

ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КРЫЛОВ ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ

ЭЛЕКТРОФИЗИКА СТАТИСТИЧЕСКИХ И
РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ

Специальность 01.04.13 - "Электрофизика"

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

ВЛАДИМИР - 1998

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И ЗАДАЧИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	17
1.1. Методы параметрического контроля	17
1.1.1. Терминология и классификация	17
1.1.2. Параметрический контроль и высокие технологии	26
1.1.3. Параметрический контроль и физический подход к обеспечению надежности	31
1.1.4. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней в задачах параметрического контроля	44
1.2. Процессорные средства параметрического контроля . . .	68
1.2.1. Терминология и смена поколений	68
1.2.2. Реализация методов параметрического контроля с помощью процессорных средств	78
1.3. Пути повышения эффективности методов и средств параметрического контроля и задачи диссертационной работы	83
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИС	86
2.1. Модель многомерного распределения параметров элементов в задачах интегральной диагностики технологических процессов изготовления ИС	86

2.2. Статистическая разрешающая способность процессорных средств параметрического контроля ИС	95
2.3. Статистические процессорные средства параметрического контроля ИС	99
2.3.1. Измеритель квазидинамических параметров ТТЛ ИС	99
3. ЧАСТОТНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ	101
3.1. Техническая реализация частотного сканирования в релаксационной спектроскопии глубоких уровней	101
3.1.1. Частотное сканирование: от обзорно-индикаторного к информационно-измерительному режиму	101
3.1.2. Разработка измерительно-вычислительного комплекса на базе спектрометра DLS-82E	106
3.1.3. Модернизация подсистемы автоматического управления температурой образца	113
3.1.4. Экспериментальные исследования частотных сканов	116
3.2. Моделирование аппаратных преобразований релаксационного сигнала	133
3.2.1. Моделирование измерительного тракта спектрометра DLS-82E	133
3.2.2. Интерактивная идентификация математических моделей аппаратных преобразований	150
3.2.3. Частотное сканирование и разрешение глубоких уровней	164
3.3. Выводы	172

4. ЭЛЕКТРОФИЗИКА АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ	176
4.1. Математическое моделирование физических процессов релаксации глубоких уровней в слое объемного заряда	176
4.1.1. Анализ противоречий базовых соотношений, основных моделей и экспериментальных данных	176
4.1.2. Эффект поля в математических моделях процессов опустошения ГУ и выноса носителей заряда в область электронейтральности	183
4.2. Алгоритмические измерения параметров релаксационных сигналов	199
4.2.1. Селекция и распознавание квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов	199
4.2.2. Регуляризация алгоритма распознавания	209
4.2.3. Моделирование и экспериментальные исследования	216
4.3. Выводы	228
5. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	230
5.1. Процессорная коррекция частотных сканов	232
5.2. Мультискановая параметрическая идентификация моделей аппаратных преобразований релаксационных сигналов	243
5.3. Компьютерная интерпретация феноменологических моделей спектроскопии глубоких уровней	249
5.4. Выводы	264

	5
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	266
Литература	269
A Списки условных обозначений, рисунков и таблиц	325
B Основные технические характеристики программно-аппаратного комплекса АСНИ РСГУ	334
C Техническое задание на разработку мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней" (ММП ВСГУ)	340
D Внедрение результатов в учебный процесс	348
E Апробация и внедрение результатов в производство и научные разработки	349

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Качество радиоэлектронных средств (РЭС) во многом определяется уровнем технологии изготовления используемой элементной базы, в первую очередь интегральных схем (ИС) как основных ее представителей. Изготовители интегральных микросхем в России и за рубежом связывают свои перспективы с разработкой и освоением нового поколения научноемких технологий, именуемых "высокими" (*high technology*). Отличаясь качественно новым уровнем использования достижений фундаментальной и прикладной науки в производстве, в определенной степени "отрицая" предшественниц, эти технологии потенциально способны обеспечить существенное повышение надежности и других качественных показателей изделий. Не лишено оснований и утверждение о том, что "высокие технологии" являются своеобразной реакцией промышленно развитых стран на усиливающуюся конкуренцию в области электроники со стороны развивающихся стран, отличающихся низкой стоимостью ручного труда и практикующих несанкционированное копирование конструкторско-технологических решений ИС.

Важной составной частью указанных технологий являются средства параметрического контроля. Новое качество этих средств в составе "высоких технологий" обусловлено тем, что они должны не только давать исходную информацию для управления технологическими процессами, но и обеспечивать приращение интеллектуального компонента выпускаемой продукции, являющееся необходимым условием ее конкурентоспособности на потребительском рынке. В этой связи весьма актуальными становятся научные исследования и разработки путей качественного совершенствования методов и средств параметрическо-

го контроля ИС и технологий их изготовления.

К необходимым условиям решения этой задачи относятся компьютеризация измерительных процедур, в частности реализация нового качества процессорных средств контроля, обусловленного возможностью статистического накопления результатов измерений, расширение спектра входных воздействий, использование наряду с точечными значениями параметров характеристик их изменения (релаксации) в процессе или после возмущающих (стрессовых) воздействий.

Перспективы повышения надежности интегральных схем (ИС) зависят от уровня развития причинной теории отказов, предполагающей детальное изучение физических процессов поведения дефектов в структуре полупроводникового материала. Эффективным инструментом экспериментального определения характеристик дефектов кристаллов ИС является квалигенетический подход на основе методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ, DLTS – *Deep Level Transient Spectroscopy*). Внедрение указанного метода в практику изготовления ИС сдерживается из-за отсутствия надежных и доступных программно-аппаратных средств, обеспечивающих реализацию измерительных процедур с требуемой точностью и наглядную интерпретацию результатов измерений. Теория глубоких уровней в настоящее время находится в стадии разработки, в связи с чем возникают определенные сложности при интерпретации экспериментальных результатов. Современный этап развития теории РСГУ пока еще не позволяет дать ее исчерпывающее описание, однако, судя по публикациям, это обстоятельство нисколько не смущает исследователей, применяющих методы РСГУ в области обеспечения качества ИС

Для освоения современных наукоемких технологий производства, к которым относится РСГУ, требуется более высокий уровень проникновения в теоретическую глубину рассматриваемой предметной обла-

сти, чем это было необходимо, например, для осуществления контроля обычных параметров по ТУ. Появляется возможность установить более тесную связь между доступными для контроля параметрами и технологическими факторами, непосредственно оказывающими влияние на надежность изготавляемых ИС.

Если решение фундаментальных проблем интерпретации результатов РСГУ допускает многочисленные варианты, разрабатываемые различными школами, то практическое использование методов РСГУ для контроля изделий электронной техники предполагает возможность сопоставления результатов, полученных разными исследователями в рамках точностных характеристик используемых программно-аппаратных средств.

Состояние вопроса. В условиях длительного "господства" монополизма изготавителя ИС в лице МЭП СССР разработчики отечественной аппаратуры, особенно специального назначения, для обеспечения качества затрачивали значительные усилия на организацию и методическое обеспечение входного контроля и электротермотренировки ИС. В результате отечественными прикладной наукой и промышленностью накоплен большой опыт разработки методов и средств контроля с целью из "плохих" ИС отобрать хотя бы часть "хороших" пусть даже ценой дополнительных затрат на приобретение и отбраковку "плохих".

Осуществлялись подобные работы и в организациях электронной промышленности с основной целью – подтянуть "плохие" ИС до уровня "хороших", однако при четко выраженном курсе на заимствование конструктивных решений серийных ИС должного внимания этим работам нельзя было уделять хотя бы по той простой причине, что технологические разработки чаще всего не опережали, а догоняли схемотехнические и конструкторские. Контролируемые параметры при этом назначались без участия технологов только на основании изучения тех-

нических условий на поставку зарубежных "аналогов", а следовательно, в техническом задании (ТЗ) на разработку средств технологического оснащения контроля отражались именно эти технические условия. Технологи и не могли участвовать в этом процессе, так как не имели опыта общения с новой технологией. Ее по существу только предстояло создать как на уровне НИИ-разработчика, так и на уровне серийного предприятия, имеющего КБ сопровождения.

Отечественная прикладная наука добилась определенных успехов в разработке методов и средств параметрического контроля интегральных схем. Идеи и методы контроля, связанные с вопросами комплексного обеспечения надежности и качества полупроводниковых приборов и интегральных схем, изложены в работах известных отечественных ученых: И.Т. Александрина, Б.Е. Бердичевского, В.Л. Воробьева, Н.Н. Горюнова, Н.С. Данилина, Л.Г. Дубицкого, Г.А. Кейджяна, А.И. Коробова, Я.В. Малкова, А.А. Маслова, Ю.Г. Миллера, Г.Б. Сердюка, Я.М. Сорина, Б.С. Сотскова, В.Н. Сретенского, Р.Б. Улинича, Я.А. Федотова, А.А. Чернышева и др. Внедрению в практику параметрического контроля процессорных средств измерений способствовали работы П.А. Арутюнова, В.Н. Иванова, Г.И. Кавалерова, В.П. Корячко, Г.Я. Мирского, А.П. Стакова, Э.И. Цветкова и др. Среди работ зарубежных ученых, известных в России, следует в указанных направлениях отметить работы И. Броудай, Т. Макино, Г. Тагути, В. Фритча, Д. Хоффманна и др.

В области теоретических и практических основ электрофизических методов измерения параметров полупроводниковых материалов и структур значительную роль сыграли работы известных зарубежных (П. Блад, С. Зи, А. Милнес, Дж. Ортон, В. Шокли и др.) и отечественных (В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович, К.В. Шалимова и др.) ученых.

Среди известных работ по тематике диссертации, посвященных электрофизическим методам, следует выделить публикации в области релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках. Это направление ведет отсчет с 1974 г. после опубликования основополагающих работ Д.В. Лэнга. В развитие этого метода применительно к задачам параметрического контроля изделий полупроводниковой электроники внесли свой вклад известные зарубежные (М. Миллер, П. Мэнгелдорф, В. Сурбэ, В. Филлипс, Р. Формэн и др.) и отечественные (Л.С. Берман, А.В. Васильев, О.Ф. Вывенко, Г.Н. Галкин, Н.Н. Горюнов, В.М. Гонтарь, А.Л. Денисов, А.Г. Ждан, Н.И. Кузнецов, А.А. Лебедев, П.Т. Орешкин, Д.А. Сеченов, С.А. Смагулова, М.Н. Шейнкман и др.) ученые.

Целью диссертационной работы является теоретическое обоснование, экспериментальные исследования и техническая реализация адаптивных процессорных средств параметрического контроля, предназначенных для работы в системах технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры и использующих статистическое накопление результатов измерений наряду с переходом от регистрации точечных значений к характеристикам релаксации параметров интегральных микросхем, элементов и структур.

Задачи исследования:

- анализ состояния и тенденций развития методов и средств параметрического контроля интегральных схем;
- моделирование статистических процессорных средств параметрического контроля микросхем, включая разработку математических моделей алгоритмических измерений, реализующих накопление и статистическое сжатие многомерной информации о результатах контроля в системах интегральной диагностики технологических процессов;
- разработка расчетных соотношений для технологической

экспресс-оценки метрологических характеристик новых методов и средств параметрического контроля ИС;

– разработка, экспериментальная апробация и внедрение в производство методики статистической адаптации измерителя квазидинамических параметров ТТЛ ИС, а также автоматизированных программно-аппаратных средств статистического регулирования технологического процесса изготовления многофункциональных КМОП ИС;

– теоретический и экспериментальный анализ возможностей решения основных проблем квалигенетического подхода к параметрическому контролю ИС на основе релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) путем технической реализации и исследования режима частотно-температурного сканирования;

– систематизация и развитие информационных технологий параметрического контроля ИС на базе исследований РСГУ, использующей адаптивно-итеративное сочетание программного распознавания и аппаратной селекции релаксационных сигналов;

– разработка и реализация предложений по координации, развитию и внедрению в производство и учебный процесс результатов научных исследований в области использования спектроскопии глубоких уровней для целей параметрического контроля ИС и электронных средств на их основе.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель многомерного распределения параметров элементов для решения задач интегральной диагностики технологических процессов изготовления ИС.
2. Расчетные соотношения для оценки разрешающей способности процессорных средств контроля.
3. Трех и четырехпараметрическая модели аппаратных преобра-

зований релаксационного спектрометра глубоких уровней с частотным сканированием, учитывающие нелинейность аппаратных средств и влияние постоянной заполнения и формы релаксационного сигнала.

4. Математическая модель физических процессов в слое объемного заряда при опустошении глубоких уровней после электрического заполнения при постоянной температуре, учитывающая повторный захват носителей на ГУ как одно из проявлений полевого эффекта.

5. Алгоритм распознавания формы квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов.

6. Элементы информационной технологии емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней с адаптивно-итеративным частотно-температурным сканированием и комплексным моделированием аппаратных преобразований и физических процессов.

7. Вариант компьютерной интерпретации параметров глубоких центров в полупроводнике, предназначенный для использования в качестве интерфейса баз данных и систем управления технологическими процессами изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.

8. Теоретическое обоснование проекта многоцелевого мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней".

Научная новизна.

– Впервые предложены и апробированы расчетные соотношения для оценки разрешающей способности процессорных средств контроля, основанные на оценке парной линейной корреляции между основными и повторными результатами измерений.

– Впервые предложены и идентифицированы трех- и четырехпараметрическая модели аппаратных преобразований емкостного релаксационного спектрометра глубоких уровней с частотным сканированием, учитывающие нелинейность аппаратных средств и влияние постоянной

заполнения.

– Внесены существенные уточнения в математическую модель физических процессов в слое объемного заряда при опустошении глубоких уровней после электрического заполнения при постоянной температуре, включая моделирование полевого эффекта.

– Разработан и апробирован новый алгоритм распознавания формы релаксационных сигналов.

– Разработаны новые элементы информационной технологии релаксационной спектроскопии глубоких уровней с аддитивно-итеративным частотно-температурным сканированием, использующие комплексное моделирование физических процессов и аппаратных преобразований релаксационного сигнала.

– Предложен оригинальный вариант компьютерной интерпретации параметров глубоких центров в полупроводнике, предназначенный для использования в качестве интерфейса баз данных о глубоких уровнях и систем управления технологическими процессами изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.

– Впервые предложена и обоснована концепция проекта многоцелевого мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней", предназначенного для инициализации и интенсификации процесса создания рабочего инструмента проведения исследований в области применения спектроскопии глубоких уровней, а также для использования в качестве технического средства обучения.

Методы исследований. При разработке теоретического аппарата использованы факторный анализ, релаксационная спектроскопия глубоких уровней, уравнения математической физики, методы параметрической идентификации и распознавания образов, имитационное моделирование, мультимедиа технологии. Проведена оценка соответствия теоретических гипотез и математических моделей результатам экспе-

риментальных исследований. Оценка точности разработанных средств контроля производилась сравнением полученных экспериментальных результатов и данных, приводимых в научно-технических публикациях.

Практическое значение работы и внедрение результатов. Результаты диссертационной работы получены автором в ходе выполнения хозяйственных НИР с НИИ прикладной механики (г. Москва) (1986 – 1991 г.г.), заводом "Экситон" (г. Павловский Посад Московской области) (1992 г.), работ по договору о творческом сотрудничестве с ВНИИ экспериментальной физики (г. Арзамас-16 Нижегородской обл.), а также при финансовой поддержке грантов конкурса "Ядерная техника и физика пучков ионизирующих излучений" (1996 – 1997 г.г., 1998 – 1999 г.г.), межвузовских научно-технических программ "Стойкость" (1990 – 1992 г.г.), "Эффективность, качество и надежность продукции (ЭКНП-2000)" (1992 – 1996 г.г.) и "Наукоемкое приборостроение" (1996 – 1997 г.г.) Министерства общего и профессионального образования Российской Федерации.

Основные результаты, приведенные в диссертации, внедрены в производство в НИИ прикладной механики и на заводе "Экситон", а также в учебный процесс во Владимирском государственном университете, что подтверждено соответствующими документами.

Материалы диссертации включены в учебное пособие "Методы и средства параметрического контроля интегральных микросхем", изданное ВлГУ и рекомендованное учебно-методическим Советом при МОПО РФ для межвузовского применения, использованы при подготовке новых лекционных и лабораторных курсов технологического цикла специальности 2008 "Проектирование и технология электронных средств", а также при разработке рабочего учебного плана подготовки магистров по программе 551106 "Обеспечение качества и сертификация электронных средств". Теоретический и экспериментальный мате-

риалы отдельных разделов диссертации, разработанные программно-аппаратные средства автоматизации экспериментальных исследований использованы при проведении дипломного проектирования во ВлГУ.

В условиях спада работы отечественной электронной промышленности, с одной стороны, и становления классических и технических университетов как центров фундаментальных исследований, с другой стороны, развитие содержания научно-технических дисциплин в ходе их преподавания мотивирует переход от заказной тематики НИР к инициативной. Автор при внедрении полученных результатов в связи с этим сделал основной акцент на использование их в учебном процессе подготовки специалистов в области обеспечения качества электронных средств, а также для координации и развития научных исследований за счет качественно новых возможностей средств вычислительной техники, в частности локальных и глобальных вычислительных сетей.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 печатных работ, в том числе 12 статей, 22 тезисов докладов, одно авторское свидетельство на изобретение, одно учебное пособие, 7 отчетов о научно-исследовательских работах, в которых автор участвовал в качестве научного руководителя или ответственного исполнителя.

Структура, объем и краткое содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, пяти приложений и изложена на 334 страницах текста, включая список литературы, приложения, 48 рисунков и 6 таблиц на 112 страницах.

Первая глава содержит аналитический обзор методов и процессорных средств параметрического контроля интегральных схем, выявленные тенденции развития которых позволили сформулировать задачи диссертационной работы.

Во второй главе излагаются результаты разработки математических моделей и технической реализации статистических процессорных

средств параметрического контроля ИС.

Третья глава посвящена особенностям технической реализации режима частотно-температурного сканирования в релаксационной спектроскопии глубоких уровней и разработке математических моделей аппаратных преобразований релаксационного сигнала.

Четвертая глава содержит теоретическое и экспериментальное обоснования алгоритмических измерений параметров релаксационных сигналов, включая математическое моделирование физических процессов релаксации глубоких уровней в слое объемного заряда с учетом эффекта поля, а также разработку и апробацию алгоритмов распознавания квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов.

В пятой главе приведены результаты разработки элементов релаксационных процессорных средств параметрического контроля полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, реализующих процессорную коррекцию частотных сканов DLTS-сигнала, мультискановую параметрическую идентификацию аппаратных преобразований релаксационных сигналов, компьютерную интерпретацию феноменологических моделей спектроскопии глубоких уровней с выходом на разработку многоцелевого мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней".

Приложения содержат списки сокращений, условных обозначений, рисунков и таблиц, характеристики разработанных статистических и релаксационных процессорных средств параметрического контроля, техническое задание на разработку мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней", сведения о внедрении результатов диссертационной работы в производство, научные разработки и учебный процесс.

Глава 1.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И ЗАДАЧИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1. Методы параметрического контроля

1.1.1. Терминология и классификация

Техническое состояние интегральных микросхем определяется главным образом по результатам параметрического и функционального контроля [94, 106, 48, 73, 107, 113, 114, 175, 177, 220, 277, 283, 225, 294], а также контроля внешнего вида. *Параметрический контроль* (распознавание вида параметрического состояния изделия) предусматривает оценку различных параметров интегральных схем в явном или неявном виде [225, 107, 209]. Если параметрический контроль предусматривает получение численных значений контролируемых параметров, то он именуется *измерительным*. В том случае, когда информация о фактическом состоянии объекта контроля не имеет числового выражения и контроль заключается в прямом сопоставлении значений контролируемого параметра и нормы, выраженных в одних и тех же физических величинах, мы имеем дело с *прямым* контролем [106]. Деление контроля на измерительный и прямой достаточно относительно, особенно при автоматизации контрольных операций с помощью средств вычислительной техники. Параметром может быть, в частности, ранг

изделия, полученный прямым контролем по схеме "годен – не годен", а также с помощью парных или множественных сравнений.

Функциональный контроль (распознавание вида функционального состояния изделия) предполагает проверку выполняемых схемой функций без непосредственного измерения параметров и реализуется, как правило, в форме *тестового функционального контроля* на заранее построенных или алгоритмически генерируемых тестах путем сравнения полученных выходных сигналов с ожидаемыми [225].

На практике применяется также сочетание перечисленных подходов в форме *функционально-параметрического контроля*, при котором параметр режима работы ИС, например минимально возможное напряжение питания, косвенно несет информацию о качестве изделия [4, 194, 283]. В данной работе эти методы также отнесены к области параметрического контроля.

В соответствии с целью диссертационной работы, сформулированной на с. 10, предлагается многоаспектная классификация методов контроля ИС, которая представлена на рис. 1.1, 1.2. Она, по мнению автора, отражает современное состояние и тенденции развития методов контроля, при этом основное внимание уделяется именно параметрическому контролю [134].

Техническое состояние ИС можно прогнозировать по результатам *операционного контроля* рабочих и тестовых элементов и структур, в ходе которого прямо или косвенно измеряются определенные параметры будущего изделия. С точки зрения задач данной работы такой операционный контроль следует считать и параметрическим, хотя измеряемые при этом параметры не регламентируются заказчиком в технических условиях на поставку ИС. В некоторых работах, например в [39], такой контроль называется *тестовым*, так как его проведения используются специальные тестовые структуры, элементы и схе-



Рис. 1.1. Классификация методов контроля ИС (начало)



Рис. 1.2. Классификация методов контроля ИС (окончание)

мы. Это вносит известную неопределенность в определение тестового контроля, который, с одной стороны, в соответствии с упомянутым первоисточником [225, с. 9] вроде бы должен быть функциональным, а с другой стороны, там же в главе 4 идет речь о тестовом контроле статических и динамических параметров и тестах для параметрического диагностирования. Параметрическим является также *измерительный контроль технологических сред, режимов технологических процессов* при наличии средств сквозного математического моделирования ИС на физико-топологическом, технологическом и схемотехническом уровнях [38].

В работе [194] предлагается термин *прогнозирующий контроль*, по сути сужающий сформулированный выше термин *параметрический контроль* изделий в смысле возможности предсказания технического состояния изделия в предстоящий период времени эксплуатации с помощью *параметрического диагностирования*.

Номинальные значения, допуски параметров и перечень реализуемых микросхемой функций, с одной стороны, могут рассматриваться как элементы внешнего интерфейса ИС при построении аппаратуры, а с другой стороны, — как требования к технологии изготовления ИС [315]. В соответствии с этим делением различают *функциональные параметры* и *технологические* [194]. С учетом процента выхода годных последние дают представление о возможностях технологии производства этого вида элементной базы электронных средств на конкретном предприятии, в отрасли и т. д. Практика показала, что перечисленные группы параметров отличаются различной информативностью при их использовании для прогнозирующего контроля. Функциональные параметры, как правило, слабо информативны в указанном смысле в отличие от технологических, которые в большей степени отражают физико-химические процессы, протекающие в различных областях

структуре ИС и на границах разделов, в том числе на поверхности полупроводника.

Электрофизические методы параметрического контроля [27, 189, 301] предусматривают выявление у объекта контроля набора параметров, характеризующего близость его технического состояния требуемому, путем сопоставления измеренных электрофизических характеристик с допустимыми значениями. Весьма важным в смысле информационной полноты параметрического контроля является технологический контроль геометрических размеров [40].

Контроль в узком смысле этого слова (в соответствии с нормативно-технической документацией [72]) дает достоверную и полную информацию о качестве изделий только в комплексе с *испытаниями* — экспериментальным определением количественных и (или) качественных характеристик свойств ИС в результате воздействия на нее внешних факторов. Испытания по их последствиям делятся, как известно, на *разрушающие* и *неразрушающие*. При разрушающих испытаниях изделия не сохраняют неизменными свои характеристики. В результате этих испытаний имеет место либо полная потеря свойств, или физическое разрушение изделия, либо частичное ухудшение качества, расходование ресурса. При неразрушающих испытаниях не происходит (или чаще считается по соглашению, что не происходит) изменения качества, параметров и характеристик изделия. Эти испытания позволяют по косвенным (вторичным) признакам обнаруживать скрытые *дефекты* или такие особенности изделия, которые влекут за собой потенциальную ненадежность изделий.

Однако следует иметь в виду, что нормальное функционирование всех нелинейных элементов ИС основано на нерегулярности структуры полупроводникового материала, что уже является дефектом с точки зрения физики твердого тела. Иначе говоря, бездефектные прибо-

ры просто неинтересны для практики. Поэтому необходимо скорректировать понятие *дефекта* от энциклопедического определения, означающего недостаток, изъян, недочет, повреждение, слабость, несовершенство и т. д., в сторону учета неравновесного характера системы, которой является интегральная полупроводниковая микросхема. В [114] предлагается под *дефектом* понимать любые отклонения параметров, характеристик и свойств ИС от установленных в нормативно-технической документации (НТД) критериев качества и значений, которые приводят к нарушению нормального функционирования ИС в начальный период или с течением времени, а также отклонения характеристик материалов и элементов схемы, снижающих процент выхода годных и ухудшающих формируемые свойства на последующих технологических операциях. Это определение дефекта по существу соответствует концепции международных стандартов ИСО серии 9000 [202], предполагающей оценку отклонения физического состояния объекта диагностирования от заданного потребителем (или стандартом) эталона по показателям "бездефектности" или "стабильности свойств".

В публикациях по диагностике [163] используется также термин *потенциальный дефект*, по отношению к которому следует определять информативный с точки зрения потенциальной надежности параметр ИС. Если между потенциальными дефектами и диагностическими параметрами существует детерминированная связь, то между дефектами и последующими отказами связь вероятностная, ибо иммунодефицит — не обязательно болезнь. Развивая биологические аналогии, Я.В. Малков приходит к выводу, что отказу ИС способствуют два обстоятельства — плохая наследственность, или генетическая предрасположенность (открытые и скрытые технологические дефекты в партиях), и условия, подвергающие ИС испытаниям на жизненную стойкость.

Терминологическое отличие неразрушающих испытаний от параметрического контроля, принятое в нормативно-технической документации, достаточно условно. В качестве примеров можно привести радиационную отбраковку ИС [41, с. 47] или контроль основных параметров полупроводникового дозиметра, предусматривающий использование внешних ионизирующих воздействий. Это позволило в рамках данной работы употреблять термин *параметрический контроль в широком смысле*, выходящий за рамки нормативно-технической документации и охватывающий дополнительно те виды неразрушающих испытаний, при которых определяются количественные характеристики свойств ИС в виде параметров, рангов или других численных оценок предпочтения [115].

Объем информации о качестве контролируемых изделий можно увеличить тремя основными способами [175, 283]:

- созданием и внедрением комплекса средств контроля и испытаний изделий, их деталей и элементов, позволяющих получать необходимые данные на всех этапах производства и эксплуатации аппаратуры;
- точной фиксацией (мониторированием) условий и внешних воздействий при производстве и эксплуатации ИС и изучением того, как эти условия и воздействия влияют на эксплуатационные характеристики аппаратуры. Особую важность в данном случае представляет распознавание отказов, классификация их по видам и определение их связи с теми или иными внешними факторами;
- изучением и использованием данных о процессах и явлениях, протекающих в материалах, конструктивных элементах и готовых приборах при воздействии на них внешних факторов. Результатом изучения является распознавание механизмов развития отказов и выработка корректирующих мероприятий конструктивного и технологического плана и специальных мер защиты от воздействий внешних факторов.

В целом целью *контроля* материалов, операционного контроля полуфабрикатов и сборочных единиц, контроля готовых приборов является в основном поддержание стабильности всего технологического процесса их изготовления, обеспечивающего поставку потребителям изделий, обладающих определенным уровнем качества при оптимальных рисках поставщика и заказчика [103]. *Испытания* в процессе производства, а также тщательное изучение поведения параметров ИС в процессе эксплуатации направлены на подтверждение заданного уровня качества и надежности изделий и совершенствование их конструкции и технологического процесса изготовления.

Одним из признаков классификации может быть область применения параметрического контроля. По данному признаку применяемые методы параметрического контроля целесообразно условно разделить на *общие*, широко используемые в различных областях современной техники, и *специальные*, связанные со специфическими особенностями ЭС, ИС и их элементов, базирующиеся на некоторых особенностях физико-химических процессов, имеющих место при функционировании этих объектов контроля.

Другим критерием может быть *степень локализации дефекта* (глубина диагноза). В соответствии с этим критерием вся совокупность методов параметрического контроля делится на методы *локальной* [15] и *интегральной* [199, 53, 89, 85, 88, 212, 174] диагностики. Развитие методов локальной диагностики [15] стимулирует поиск все более сложных, часто многоступенчатых физических механизмов формирования сигнала, несущих информацию из микрообъемов образца. В отличие от локальных методов, по мнению Л.Г. Дубицкого [174], методы интегральной диагностики дают оценку состояния изделия в целом, без выделения дефектной зоны во временном или пространственном разрешении. С этим утверждением нельзя, однако, полностью согласиться,

так как с помощью методов интегральной диагностики в ряде случаев можно получить распределение дефектов, например, относительно $p - n$ -перехода. Изложенное выше описание локальной и интегральной диагностик может относиться как к изделиям, так и к технологическим процессам их изготовления, увеличивая тем самым многообразие классификационных признаков методов параметрического контроля. Например, методы интегральной диагностики параметров микросхем могут быть использованы для локальной диагностики технологических процессов их изготовления, а накопление и статистическое смысловое (семантическое) сжатие информации результатов локальной диагностики элементов и структур микросхем способно дать исходную информацию для интегральной диагностики установившихся технологических процессов серийного производства ИС [199].

В данной работе не затрагиваются организационно-технологические вопросы контроля, оперирующие с такими терминами, как простой и сложный, однократный и многократный, сплошной, ординарный и выборочный контроль [35]. Эти вопросы, включая терминологию, метрологию, экономическую эффективность, связанную с риском поставщика и потребителя, являются предметом отдельного самостоятельного исследования и подробно рассмотрены в работах В.Н. Сретенского [219, 220], А.С. Бондаревского [35], А.И. Коробова [48], Г.А. Кейджяна [114] и др.

1.1.2. Параметрический контроль и высокие технологии

Мировой уровень производства ИС характеризуется внедрением так называемых "высоких" технологий (*high technology*). Этот термин предполагает прежде всего возрастание наукоемкости новых технологий, что означает, в частности, необходимость получения новых знаний

непосредственно в процессе производства в такой же степени, как и на предварительных стадиях разработки новых изделий. Новое качество средств параметрического контроля ИС в составе "высоких технологий" обусловлено тем, что они должны не только давать исходную информацию для управления технологическими процессами, но и обеспечивать приращение интеллектуальной компоненты выпускаемой продукции, являющееся необходимым условием ее конкурентоспособности на потребительском рынке. Как уже отмечалось выше (см. с. 6), "высокие технологии" являются своеобразной реакцией промышленно развитых стран на усиливающуюся конкуренцию в области электроники со стороны развивающихся стран, отличающихся низкой стоимостью ручного труда и практикующих несанкционированное копирование конструкторско-технологических решений ИС. В этом смысле термин "высокие технологии" означает недоступность этих технологий широкому кругу изготавителей ИС. Продвижение этих технологий по всему миру курирует специальная организация UNIDO, работающая под эгидой ООН. Высокие технологии составляют основу так называемых критических технологий, выделяемых в каждом из приоритетных направлений развития науки и техники, утвержденных правительственной комиссией РФ по научно-технической политике.

Носителю высоких технологий в большей степени будут нужны не готовые технологические рецепты как результаты научных исследований, а средства и методы их самостоятельного получения, что заставляет в определенной степени скорректировать задачи прикладной науки. Существуют два взаимодополняющих друг друга и в то же время встречных направления решения указанной проблемы. Первое направление связано с повышением уровня образования инженерного, конструкторского и производственного персонала; второе — с увеличением степени интеллектуальности автоматизированных систем проекти-

рования и управления. Первое направление не следует воспринимать отдельно от второго — они взаимосвязаны. В частности, второе направление потенциально способно изменить существующие представления о возможностях технических средств обучения.

Можно посмотреть на проблемы "высоких технологий" более широко, а именно, рассматривать их появление и развитие как движение навстречу "технологизации науки", которое можно обозначить как "интеллектуализацию производственных технологий". Под "технологизацией науки", в свою очередь, понимается особый процесс, в ходе которого

- результаты как фундаментальных, так и прикладных исследований находят свою технологическую реализацию;
- сами научные исследования проводятся на определенной технологической основе, предполагающей информатизацию науки и перманентное количественное и качественное обновление парка программно-аппаратных средств для научных исследований и образования.

Современное состояние методов параметрического контроля ИС, обусловленное разработкой и внедрением "высоких" технологий обработки материалов и сборки, может быть охарактеризовано перечислением следующих актуальных метрологических проблем микроэлектроники [219]:

1. Перенос "центра тяжести" параметрического контроля от параметров готовых изделий и полуфабрикатов к технологическим режимам (проблема совмещения во времени и пространстве процессов контроля и изготовления). Решение этой проблемы предполагает адекватное понимание роли технологических факторов в формировании параметров физических структур и элементов ИС, а также роли тестового контроля [39]. Перспективы совершенствования параметрического контроля определяются широкими возможностями совместного использования

алгоритмов и программ технологического, физико-технологического и электрического моделирования ИС [38, с. 267].

2. Требования к точности проводимых исследований, разработок новых изделий и технологических процессов растут быстрее возможностей традиционных форм метрологического обеспечения (проблема соизмеримости точности рабочих средств измерения с точностными характеристиками имеющихся в настоящее время эталонов). В целом ряде случаев, когда речь идет о феноменологических параметрах полупроводниковых структур, использующих представления зонной теории, эталоны вообще отсутствуют.

3. Количество требуемых контрольно-измерительных операций в производстве велико, их не всегда можно осуществить (проблема дефицита информации), а в силу информационных шумов, сопровождающих большие потоки информации, возникают трудности эффективного управления качеством продукции (проблема "тиражации" множества измерений и операций контроля).

4. Диапазоны измеряемых физических величин непрерывно расширяются, существенно превышая возможности известных методов измерения (проблема измерения на фемтофарадном, пикоамперном, нанометровом, мономолекулярном, одноатомном и одноквантовом уровнях). С помощью расширения указанных диапазонов наряду с расширением спектра входных воздействий создаются предпосылки для реализации перехода количественных изменений в качественные при получении новых знаний.

5. Необходимость получения первичной информации о свойствах и процессах в очень малых объемах и субмикронных структурах сложных ИС (проблема датчиков и интерфейса). Классические методы исследования полупроводников, как правило, ориентированы на однородные по своему составу и достаточно большие по размерам специально из-

готовленные образцы и по этой причине не всегда пригодны в микроэлектронике.

6. Многие высокоточные измерительные средства и методы физиков-экспериментаторов оказались необходимыми в цеховых условиях производства ИС (проблема создания компактных аналитических средств с самокалибровкой и автоматической обработкой и интерпретацией результатов измерений). В качестве альтернативы рассматриваются отраслевые центры физико-химических исследований и высокоточных измерений [64].

7. Интеллектуализация измерений, являющаяся неотъемлемым атрибутом идентификации математических моделей технологических процессов изготовления ИС, в свою очередь, обуславливает актуальность проблем верификации результатов, метрологического и алгоритмического обеспечения интеллектуальных средств контроля (подробнее см. с. 78).

Для характеристики влияния "высоких технологий" на параметрический контроль к методам, подробно описанным в монографиях и учебных пособиях [27, 33, 40, 106, 189, 220], следует добавить такие общефизические методы [174, с. 62], как эмиссионный спектральный анализ, абсорбционная оптическая спектроскопия, ядерная магнитная спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс, хроматомассспектроскопия, рентгеноструктурный анализ, рентгеновская флуоресцентная спектроскопия, комплексный термоанализ, металлография и др. В той или иной степени претендуют на место в производственных лабораториях методы, использующие различные электронно-ионные взаимодействия [174, с. 62]: электронное зондирование, электронная микроскопия, в том числе растровая [3], масс-спектроскопия вторичных ионов, спектрометрия рассеянных ионов, оже-электронов [167, 193, 234, 299], рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия [12],

дифракция медленных и быстрых электронов, туннельная растровая спектроскопия и другие методы, использующие, например, контроль процессов захвата заряда в диэлектрике МОП-структур [338], пико-секундную ультразвуковую технику [334], "холодное сканирование гравиц"⁹[cold92,lemm91,rosk88, спектроскопию разности фототоков [362], СВЧ-фотопроводимость [311] и т. д.

1.1.3. Параметрический контроль и физический подход к обеспечению надежности

Наиболее характерными чертами современной полупроводниковой электроники являются рост сложности приборов и уменьшение геометрических размеров отдельных элементов полупроводниковых структур. Переход к субмикронным размерам, значительная функциональная сложность интегральных микросхем порождают и новые надежностные проблемы [283]. В первую очередь они связаны с тем, что с усложнением приборов увеличивается число контролируемых параметров, по которым судят о качестве интегральных микросхем и правильности их функционирования.

Уменьшение геометрических размеров элементов интегральных микросхем делает исключительно острой проблему качества исходных материалов и совершенства технологических процессов изготовления приборов. Точечные и объемные нарушения кристаллической решетки возникают еще при выращивании монокристалла. Они обусловлены влиянием комплекса технологических факторов, в том числе земным притяжением. На последующих операциях изготовления приборов эти нарушения дополняются другими дефектами различных частей полупроводниковой структуры. Уменьшение размеров элементов интегральных микросхем делает их весьма чувствительными к дефектам с

размерами, приближающимися к атомным. В этих условиях становится исключительно важным знание природы дефектности исходных материалов, причин возникновения дефектов в процессе изготовления полупроводниковых структур, эволюции дефектов на последующих этапах жизненного цикла приборов и их влияния на надежность. Дефекты в исходном материале, их перегруппировка и размножение при изготовлении приборов в условиях уменьшения геометрических размеров элементов делают объем и поверхность полупроводника активными участниками деградационных процессов, оказывающих существенное влияние на надежность приборов.

Среди специалистов по надежности ИС [7, 114, 283, 164] существует мнение о том, что в процессе эксплуатации наблюдаемые отказы ИС и микроэлектронной аппаратуры связаны с дефектами разработки, производства и эксплуатации, а не с процессами износа. Под износом здесь понимается изменение электрических и других параметров ИС и их элементов и структур под воздействием эксплуатационных факторов (электрических, тепловых, механических и других нагрузок).

Следует заметить, что далеко не все авторы разделяют мнение об отсутствии износа в бездефектных полупроводниковых структурах. В работе А.С. Врачева [59] аналогия между механическим трением и процессами переноса электрического тока используется автором для вывода о влиянии "транспортных процессов" на степень дефектности структуры полупроводника даже при условии первоначального отсутствия в ней дефектов. При этом автор [59] использует теоретические положения о сверхнагрузках в относительно малом количестве точек соприкосновения при рассеянии движущихся носителей заряда.

Различны мнения относительно возможностей параметрического и функционального контроля в смысле повышения надежности успешно прошедших его ИС. Если А.А. Чернышев [283] считает, что никакими

дополнительными отбраковочными мерами в производстве и эксплуатации уровень надежности, заложенный при разработке ИС, превысить нельзя, то Я.В. Малков [164] пишет как о вполне допустимом разбросе надежности в партиях ИС по критерию интенсивности отказов 4-5 и более порядков, обнаружить который, по его мнению, можно при достаточном увеличении глубины диагностического отбора, то есть при увеличении трудоемкости и стоимости отбраковочных операций.

На современном этапе развития полупроводниковой электроники физические аспекты надежности приобретают первостепенное значение. Несмотря на то, что две традиционные наиболее важные задачи: определение фактической надежности приборов и повышение достигнутого уровня надежности — сохраняют свою доминирующую роль, знание, почему тот или иной прибор ненадежен, умение выработать и осуществить необходимые мероприятия по устраниению причин ненадежности, становится все более приоритетными. В этой связи еще большее значение приобретают исследование физики явлений, приводящих к отказам, познание механизмов отказов и формирование на этой основе их моделей, используемых при прогнозировании надежности [8, 24, 36, 51, 86, 271, 178, 270, 284, 169, 37].

В работах, посвященных физическому подходу к обеспечению надежности ИС, большие надежды возлагаются на термодинамические методы [52, 53, 85, 86, 89, 88, 163, 164, 165, 174, 178, 212, 271, 284], основанные на использовании нелинейной неравновесной термодинамики, т. е. необратимых термодинамических процессов, связанных с расщеплением (диссипацией) энергии. В зависимости от способа наблюдения различают три основные группы [174, с. 70] интегральных электрофизических эффектов, основанных на изучении электрофизических систем:

- диссипация энергии внутри системы и во внешнюю среду, прояв-

ляющаяся через инерционность;

- внутренние флюктуации спонтанного типа (шумы);
- нелинейность функциональных характеристик.

Для регистрации указанных эффектов в ходе диагностического эксперимента получают характеристики "вход–выход" ИС во временной, частотной или параметрической областях в зависимости от испытательного воздействия. Перечисленные интегральные электрофизические эффекты связаны между собой термодинамическими соотношениями, являющимися отражением термодинамических свойств и обменных процессов в физических средах в рамках нелинейной и флюктуационно-диссипативной термодинамики. Связь между диссипацией и флюктуациями, например, обусловлена тем, что флюктуации обеспечивают сам механизм рассеяния энергии, а диссипативные системы подвержены тепловым флюктуациям. Теоретически и экспериментально [88] установлена связь диссипации и флюктуаций с нелинейностью как феноменологическим свойством физических сред. Подтверждением взаимосвязи нелинейности как свойства электрофизических систем с флюктуациями является установленная зависимость распределения вероятностей флюктуаций от их величины и масштаба, а также от макроскопических условий, в которых могут находиться системы в состоянии термодинамического равновесия. В доказательство можно привести многочисленные работы по теории низкочастотного шума типа $1/f$ [59, 85, 53, 196, 226, 227, 228].

В работе [123] показано, что эти отношения следуют из понятий о крупномасштабном и мелкомасштабном "огрублении" пространства термодинамических параметров, изменяющихся во временных (частотных) и пространственных координатах. Напрашивается вывод о том, что перечисленные три группы методов по своей физической сущности являются просто разными методами наблюдения электрофизиче-

ских систем, поведение которых при внешних воздействиях определяется микроскопическими свойствами и процессами взаимодействия подводимой энергии с веществом физических сред в термодинамическом приближении. Это означает [174], что все методы интегральной диагностики направлены на создание способов наблюдения термодинамического состояния ИС как физических систем по их феноменологическим характеристикам.

В наиболее общем случае ИС следует рассматривать как открытые неравновесные термодинамические системы, эксплуатационные свойства которых будут полностью определяться неравновесностью их структуры и ее поведением при внешних воздействиях и в процессе эволюции (деградации, старения, повреждаемости). Теория открытых неравновесных термодинамических систем во всем диапазоне макроскопического описания предусматривает рассмотрение этих систем в переходе от равновесия через нелинейную область до неустойчивости на основе общих принципов самоорганизации.

Этот вывод показывает, что в основе методов интегральной диагностики лежат фундаментальные физические процессы, в одинаковой степени присущие простым и сложным физическим объектам. Но по мере усложнения объектов их "термодинамическая сущность" будет проявляться со все большей значимостью, поэтому с ростом сложности ИС применяемость и эффективность этих методов повышаются, тогда как традиционных (локальных) методов неразрушающего контроля падают. При разработке электрофизических методов интегральной диагностики ИС необходимо учитывать, что возмущения физических сред типа флюктуаций не только генерируются самой физической системой, но и одновременно связаны с воздействиями внешней среды на термодинамическое состояние электрофизической системы. Это и обуславливает возможность достаточно достоверного прогноза остаточно-

го ресурса изделий при определенных условиях по данным о неравновесном термодинамическом состоянии.

Основными физическими средами ИС являются полупроводниковые, диэлектрические и металлические, для которых характерны сложные механизмы возникновения электрофизических эффектов [174, 114, 283].

Наиболее сложным является выбор электрофизических методов интегральной диагностики для полупроводниковых материалов в составе кристаллов ИС, в первую очередь образующих области активных нелинейных элементов. При разработке систем контроля таких изделий приходится решать задачу диагностирования в нескольких режимах работы, определяемых различными механизмами переноса зарядов. Только при прямом смещении в зависимости от величины прикладываемого напряжения и протекающего тока наблюдаются режимы туннелирования, генерационно-рекомбинационного токопрохождения и омической проводимости, характерной для металлов. К этому следует добавить различные режимы при обратном смещении, в том числе предпробойные.

При взаимодействии внешнего электрического поля с диэлектрической средой имеют место различные механизмы поляризации независимо от участвующих носителей заряда (электронов, ионов, микро- и макродиполей): упругая или деформационная поляризация (время релаксации порядка $10^{-13} - 10^{-17}$ с), тепловая или прыжковая (время релаксации $10^{-2} - 10^{-11}$ с) и, наконец, объемнозарядная или миграционная (время релаксации $10^4 - 10^{-5}$ с). Достаточно сложным является и механизм остаточной проводимости диэлектрика с тремя типами переноса заряда в зависимости от участвующих носителей заряда и условий их перемещения под действием электрических полей: дрейфовый, прыжковый и диффузионный. Носителями заряда, участвующими

ми в образовании сквозной проводимости через диэлектрическую среду, могут быть электроны, ионы и такие квазичастицы (коллективные возбуждения) как поляроны малого и большого диаметров. Степень их участия в механизме проводимости зависит от внешних и внутренних условий, определяющих концентрацию и подвижность носителей. В реальных условиях в проводимости обычно участвует комбинированный механизм, определяемый условиями возникновения носителей заряда, распределением их концентрации по физической системе и влиянием механизма поляризации на подвижность носителей.

Не менее сложными являются электрофизические эффекты в тонких металлических пленках, контактах металл–полупроводник и объемных проводниках, особенно при больших плотностях тока [198]. К ним относятся прежде всего окисление и коррозия металлов, включающие объемную (поверхностную) диффузию реагента (кислорода, паров воды, ионов натрия, калия, хлора) в приповерхностный слой металла и его химическое взаимодействие с заряженными частицами металла [114, с. 157]. Диффузия протекает по дислокациям и дефектам структуры металла под действием объемного и поверхностного заряда. Скорость процессов окисления определяется концентрацией влаги, кислорода и других потенциальных реагентов, температурой и давлением, наличием электрических потенциалов, а также внутренними механическими напряжениями вследствие значительного различия коэффициентов термических линейных расширений образовавшейся окисной пленки и окисленного металла.

Другим важным в смысле влияния на надежность электрофизическими эффектом является электромиграция (электродиффузия), обусловленная электрическим полем и токами большой плотности ($J > 10^6 \text{ A/cm}^2$). Процесс электромиграции заключается в переносе вещества в металлах при протекании тока большой плотности и обусловлен

наличием двух сил, действующих на положительно заряженные ионы металла. Первая из них — электростатическая, пропорциональна валентности иона и напряженности поля и направлена к контакту, находящемуся под отрицательным потенциалом. Вторая, именуемая силой "электронного ветра", обусловлена обменом импульсов движущихся электронов и неподвижных ионов и направлена к контакту под положительным потенциалом (в случае электронной проводимости). Результирующая сила, направление которой различно для различных металлов, определяет направление миграции массы вещества в проводнике. В алюминии, например, сила "электронного ветра" почти на порядок больше силы электростатического воздействия. Электромиграция является одной из возможных причин отказа контактов разнородных материалов, а также резистивных и проводящих пленок.

Локальные градиенты температуры, обусловленные, например, колебаниями ширины проводника по его длине, могут служить дополнительными причинами обрыва металлизации вследствие близкой к экспоненциальной зависимости подвижности ионов от температуры [114]. Неизбежная деформация металлической пленки на неровностях поверхности кристалла и в местах приварки проволочных проводников ускоряет электромиграцию [283, с. 145], приводя к образованию локальных пустот в проводниках из-за неоднородности границ зерен (особенно в алюминии).

На процесс электромиграции оказывает заметное влияние кристаллическая структура подложки. Приводимые в литературе математические модели электромиграции [114, 283] нельзя считать приемлемыми, так как они не учитывают все многообразие факторов, участвующих в процессе переноса вещества в реальных пленочных структурах. В то же время обсуждаются идеи перехода на монокристаллические или аморфные пленки, не имеющие зерен и потенциально способные

исключить по этой причине указанный эффект [283, с. 149].

Из других электрофизических эффектов следует отметить взаимную диффузию металлов в месте термокомпрессионного сварного соединения, которая впоследствии может привести к химическим реакциям с образованием интерметаллических соединений, среди которых есть весьма опасные с точки зрения влияния их на механическую прочность и электропроводность соединения. Ухудшение качества металлического контакта усугубляется эффектом Киркендалла, суть которого заключается в том, что в результате различия коэффициентов диффузии контактирующих металлов в металле с большим коэффициентом диффузии образуются пустоты. Аналогичные проблемы, хотя и обусловленные несколько иными причинами, имеют место при использовании поликремниевой разводки вместо металлической [283, с. 153].

Для аппаратной реализации интегральной диагностики необходимы первичные преобразователи (датчики, сенсоры) и устройства обработки информации. В зависимости от используемого интегрально-го электрофизического эффекта применяются различные сенсоры, которые являются чаще всего активными датчиками, требующими обязательной активации объекта диагностирования испытательными воздействиями одного из видов. Положительный результат обеспечивает расширение спектра испытательных воздействий, предусматривающее двойную и более активацию подачей на объект двух и более испытательных сигналов, один из которых обеспечивает смещение, а второй выполняет роль зондирующего сигнала. Смещение, в свою очередь, может быть электрическим, температурным, оптическим, радиационным и т. д. или комбинированным. Это в равной степени относится и к зондирующему сигналу. В целом деление воздействующих сигналов на зондирующие и смещающие достаточно условно и имеет смысл, когда речь идет об измерениях во временной или частотной областях.

Соответственно указанным выше трем группам интегральных электрофизических эффектов можно выделить три типа первичных преобразователей:

- регистраторы временных изменений (релаксации) параметров ИС при использовании эффектов инерционности;
- регистраторы шумоподобных сигналов, когда носителями информации являются эффекты флюктуирования электрических параметров;
- регистраторы нелинейности функциональных характеристик ИС.

Эффекты инерционности фиксируются либо непосредственно в виде временных функций изменения параметров физических сред во времени, либо в виде параметров этих функций, например постоянной экспоненциальной релаксации, спектрального разложения по экспонентам и т. п. В акустоэлектронных ИС применяется способ наблюдения инерционности по процессу затухания свободных колебаний при "ударном" возбуждении силовым импульсом. Наиболее широко и давно применяются для диагностики качества ИС и их элементов переходные тепловые характеристики, отражающие поведение ИС при изменении температуры окружающей среды или при импульсной электрической, магнитной, радиационной и прочей нагрузке [99, 175, 116, 121, 283, 345]. Эти характеристики могут быть определены косвенно, например по изменению вольт-амперных характеристик во времени, или непосредственно путем контроля тепловых сопротивлений контактными и бесконтактными методами [175]. Сюда можно отнести и многочисленные рецепты электротермотренировки (ЭТТ) [14, 46, 110, 150, 173, 179, 221, 368] и радиационной отбраковки [21, 41], основанные на использовании стрессовых воздействий на контролируемые изделия и последующей оценке реакции (кратковременной и долговременной) на

эти воздействия. Однако стрессовые нарушения рабочего режима могут приводить как к мгновенному выходу ИС из строя, так и к снижению ее надежности [354].

Эффекты инерционности (релаксации) и гистерезисные явления используются в различных методах релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Эти методы подробно будут рассмотрены ниже (см. с. 45). Из других способов использования эффектов инерционности следует упомянуть энергодинамический метод [50, 117, 286, 317], который предусматривает извлечение диагностической информации из амплитуды, длительности, формы и порядка следования импульсов тока в шине питания путем контактного [50] или бесконтактного [117, 286, 317] зондирования на основе микрополосковой линии. Сюда же относятся методы, использующие контроль на предельно допустимой частоте [125, 225]. В литературе описаны эксперименты с применением динамических перегрузок для выяснения механизма деградации, связанной с "горячими" носителями [370].

Флюктуационные эффекты измеряются по шумоподобным сигналам при условии энергетической накачки физической среды постоянным или импульсным напряжением и температурой. В качестве основного информационного компонента чаще всего выделяется низкочастотный шум $1/f$ (фликкер-шум), которому посвящено большое количество публикаций [59, 85, 53, 196, 226, 227, 228] и который является предметом отдельного рассмотрения именно в силу своей информативности. Для объяснения природы возникновения этого шума используются две модели. Одна из них основывается на флюктуации числа носителей ΔN , другая — на флюктуации подвижности $\Delta\mu$. Не исключается, что обе модели действуют одновременно [196, с. 8]. В целом фликкер-шум в электронных системах рассматривается как нелинейное динамическое явление [227], а в качестве элементарных флюктуаций

торов используются в числе прочих электронные переходы (безызлучательные, оптические) с участием глубоких уровней [227, с. 37], сопряженные с локальными перестройками структуры — изменением положений атомов решетки в окрестности глубокого центра при локализации и делокализации электронов на нем. В конечном итоге исследователи шумоподобных сигналов приходят к выводу о том, что шумы представляют собой "память", то есть прошлое электрофизической системы. При этом, разумеется, не могут быть оставлены без внимания и другие типы шумов (диффузионный, взрывной и др.). Измерение шумов требует применения специальных регистраторов-накопителей с повышенной помехозащищенностью, предназначенных для выделения сигналов малых уровней [44, 109], учета погрешностей контактирования [146].

В работе В.Л. Воробьева и Л.Г. Дубицкого [54] проведен анализ взаимосвязи между показателями надежности изделий микроэлектроники, уровнем их дефектности и термодинамическими характеристиками. Показано, что информативность методов интегральной дефектометрии обусловлена взаимосвязью спектральной плотности шума с параметрами флюктуаций, зависящими от неравновесного характера физической структуры изделий. Обсуждаемая теоретиками [227, с. 37] природа элементарных флюктуаторов получила свое экспериментальное подтверждение [55, 56, 332] в виде возможности определения энергии и сечения захвата ГУ по результатам измерения шумовых характеристик, а также в виде взаимосвязи шумовых и вольт-фарадных характеристик [74]. В публикации [172] показано, что спектр флюктуаций тока в сканирующем туннельном микроскопе содержит вклад локализованных поверхностных возбуждений. С помощью шумовых характеристик удается контролировать свойства тонких металлических [95] и полупроводниковых поликристаллических [75] пленок, распределен-

ное сопротивление базы биполярных транзисторов [122], качество полупроводниковых структур с многослойной металлизацией [309] и в целом интегральных схем и полупроводниковых приборов различных типов [1, 2, 58, 74, 205], оптимизировать технологические процессы изготовления малошумящих ионно-легированных структур на основе кремния [162].

Повышенное внимание к эффектам нелинейности в задачах интегральной диагностики обусловлено сравнительной простотой реализации регистраторов нелинейностей, разнообразием прямых и косвенных способов фиксации нелинейности [213, 201, 214, 96, 224, 190]. В качестве меры нелинейности функциональных характеристик контролируемых изделий при прямых методах используются первая и вторая производные, например, прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик $p - n$ -переходов, определяемые путем аппаратного или программного дифференцирования характеристики при подаче на ИС линейно меняющегося напряжения, температуры, светового потока и т. п. В этой связи возрастают требования к точности регистрации функциональных характеристик и параметров ИС [308]. Сюда примыкают также методы отбора полупроводниковых приборов с наивысшей степенью надежности в партиях, основанные на контроле отклонений от единства поведения по разным диагностическим параметрам [102].

На основе эффектов нелинейности осуществляются неразрушающий контроль влагостойкости [201], плотности поверхностных состояний на границе металл – полупроводник [366], технического состояния поликристаллических слоев кремния [96], механических свойств [224], а также комплексный контроль ИС и электрорадиоэлементов [57, 213, 201, 214, 190]. Частным случаем анализа нелинейности вольт-амперных характеристик является применение зависимостей так называемых m -параметров от величины прямого тока [175, 283, с. 202].

Эффекты нелинейности используются в методе критических питающих напряжений, который дает положительные результаты при прогнозировании надежности как цифровых [4, 5, 194], так и аналоговых [63] ИС.

В основе косвенных методов определения нелинейности функциональных характеристик ИС часто используют свойство нелинейности преобразовывать спектры испытательных воздействий. Тогда в качестве сигнала отклика рассматриваются спектральные компоненты выходного спектра, образующиеся за счет преобразовательных свойств нелинейной физической среды объекта диагностирования. Носителями диагностической информации выступают высшие и комбинационные гармоники, возникающие в выходном сигнале. Здесь получили развитие методы третьей гармоники, разностной частоты, нулевых биений [175, 87, с. 168].

1.1.4. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней в задачах параметрического контроля

Обзор публикаций по обозначенной в заголовке тематике выполнен с целью анализа состояния теории вопроса, проблем разработки информационных технологий и оценки пригодности названного метода исследования полупроводников в условиях серийного производства ИС и ППП с точки зрения технического и методического обеспечения. Столь пристальное внимание к спектроскопии глубоких уровней вообще и релаксационной спектроскопии в частности обусловлено тем, что именно этот метод параметрического контроля полупроводниковых материалов в составе изделий электронной техники отвечает пересечению требований высоких технологий и физического подхода к обеспечению качества интегральных схем и полупроводниковых приборов.

Если проводить аналогии с медициной и биологией, то достижения в области изучения свойств ГУ все чаще сравнивают с успехами генетики. С точки зрения преподавания физики полупроводников и смежных с ней прикладных дисциплин, связанных с моделированием технологических процессов и обеспечением качества изделий, необходимое развитие этих дисциплин во-многом зависит от уровня теоретических представлений о роли глубоких уровней в генерационно-рекомбинационных процессах, определяющих важнейшие свойства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Общий обзор публикаций

Спектроскопия глубоких уровней (СГУ) не без оснований претендует на роль теоретической основы "квалигенетического" подхода к обеспечению надежности ИС [43, 42, 47, 80, 81, 82, 68, 77, 147, 151, 158, 189, 211, 170, 185, 188, 293, 231, 297, 306, 313, 322, 340, 350, 377], при котором своего рода "генами качества" являются глубокие центры различного происхождения. Это могут быть объемные и поверхностные дефекты полупроводникового кристалла, обусловленные искажениями кристаллической структуры из-за несовершенства технологии выращивания и последующей обработки монокристаллов, посторонние и специально вводимые примеси, последствия термообработки, радиационно-технологической обработки и т. п. Одним словом, достаточно широкий спектр дефектов различной физической природы может быть зарегистрирован с помощью методов СГУ. Достоинствами их являются: высокая чувствительность по концентрации глубоких уровней; возможность независимого определения энергии активации и сечения захвата носителей; высокая разрешающая способность; возможность определения параметров ловушек для основных и неосновных носите-

лей; экспрессность регистрации спектров. Важным является то обстоятельство, что метод является неразрушающим и пригодным для исследования глубоких уровней в $p - n$ -переходах, диодах Шоттки, гетеропереходах, МДП-структур на основе различных полупроводниковых материалов.

Параметрический контроль полупроводниковых приборов и интегральных схем с помощью методов СГУ позволяет решить две взаимосвязанные задачи:

- обнаружение, идентификация и контроль уровня "полезных" и "вредных" исходных и приобретенных в процессе технологической обработки дефектов и примесей,
- контроль характеристик дефектов и примесей в процессе эксплуатации с целью прогнозирования надежности изделий в условиях воздействия внешних факторов различной природы.

Глубокие уровни в запрещенной зоне существенно изменяют электрофизические свойства полупроводников: увеличиваются токи утечки обратносмещенных $p - n$ -переходов, уменьшается крутизна вольт-амперных характеристик, увеличивается низкочастотный шум, значительно (неконтролируемым образом) уменьшается время жизни неосновных носителей заряда в активном слое, уменьшается подвижность носителей в приповерхностном канале и увеличивается пороговое напряжение МДП-транзисторов.

Дрейфовые и поляризационные процессы в диэлектрических пленках, используемых как для подзатворного диэлектрика, так и в качестве пассивирующих покрытий, приводят к нестабильной работе приборов в процессе их эксплуатации при повышенных температурах и различных видах ионизирующих излучений [158]. Время жизни неравновесных (избыточных) носителей в полупроводнике в соответствии с рекомбинационной теорией Шокли – Холла – Рида существенно зависит от

положения глубокого уровня E_t относительно середины запрещенной зоны E_i :

$$\tau_n = [(n_0 + p_0 + 2n_i ch[(E_t - E_i)/kT])/(n_0 + p_0)]\tau_0, \quad (1.1)$$

где n_0 и p_0 — термодинамически равновесные концентрации носителей в полупроводнике; n_i — собственная концентрация свободных носителей; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К; $\tau_0 = (N_t v_{th} \sigma_0)^{-1}$, где N_t — концентрация центров рекомбинации (глубоких уровней); v_{th} — тепловая скорость носителей; σ_0 — поперечное сечение захвата носителя заряда глубоким уровнем. Времена жизни неосновных носителей могут изменяться в широких пределах в зависимости от концентрации и типа центров рекомбинации (глубоких уровней) в полупроводнике. Наибольшая эффективность центров рекомбинации достигается при относительно малых $|E_t - E_i|$. В качестве примера можно взять золото и медь, создающие в кремнии два эффективных центра рекомбинации, для которых $|E_t - E_i| = 0,03$ и $0,01$ эВ соответственно [166, с. 275].

Следует отметить, что военный стандарт США MIL-STD-977 "Test Methods and Procedures" (ред. 1982 г.) пока не предусматривает контроль параметров глубоких уровней по стандарту ASTM F 978-90 в качестве обязательного или рекомендуемого при аттестации технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, хотя С-V измерения, описанные в стандарте ASTM F 419, уже являются составной частью указанной аттестации. Вполне возможно, это связано с тем, что теория глубоких уровней в настоящее время находится в стадии разработки, в связи с чем возникают определенные сложности при интерпретации экспериментальных результатов. В свою очередь получаемые при СГУ данные стимулируют дальнейшее развитие теории глубоких уровней.

Методы релаксационной (нестационарной) спектроскопии глубоких уровней (емкостной и токовой) своим появлением были обязаны прежде всего новым возможностям техники измерения малых емкостей и токов, аппаратной реализации процедур корреляционной обработки релаксационных сигналов на фоне соизмеримых с ними по уровню шумов, широкому использованию методов математического моделирования при обработке экспериментальных данных. Поэтому логично предположить, что дальнейшее совершенствование средств измерений, главным образом за счет использования преимуществ и новых возможностей процессорных средств, о которых пойдет речь в следующей главе, должно придать дополнительные стимулы развитию теории ГУ.

В отечественной и зарубежной литературе описано достаточно большое количество разнообразных установок для СГУ вообще и РС-ГУ в частности [22, 23, 26, 30, 31, 71, 76, 84, 148, 149, 152, 155, 195, 200, 233, 303, 305, 307, 324, 326, 327, 337, 339, 344, 353, 360, 371, 374, 375, 378]. На рис. 1.3 показана типовая структурная схема современной автоматизированной DLTS-установки, созданной в Берлинском Техническом Университете (TUB) (http://sol.physic.tu-berlin.de/htm_reza/DLTS.HTM). Управление установкой и автоматическая регистрация результатов измерений осуществляется с помощью персонального компьютера IBM PC-386, сопряженного с генератором сдвоенных импульсов HP 8115A (Pulse generator), измерителем температуры TIC 303M (Temperature controller) и емкостным мостом BOONTON 7200 (Capacitance bridge) через аналогоцифровой преобразователь (A/D Converter) RTI 834H фирмы Analog Devices. В состав установки входит также криостат типа CRIOVAC с вакуумируемой рабочей камерой для установки образца. Криостат оборудован встроенным нагревателем и охлаждается жидким гелием (LHe), что позволяет обеспечить изменение температуры образца в пределах 10 К ...

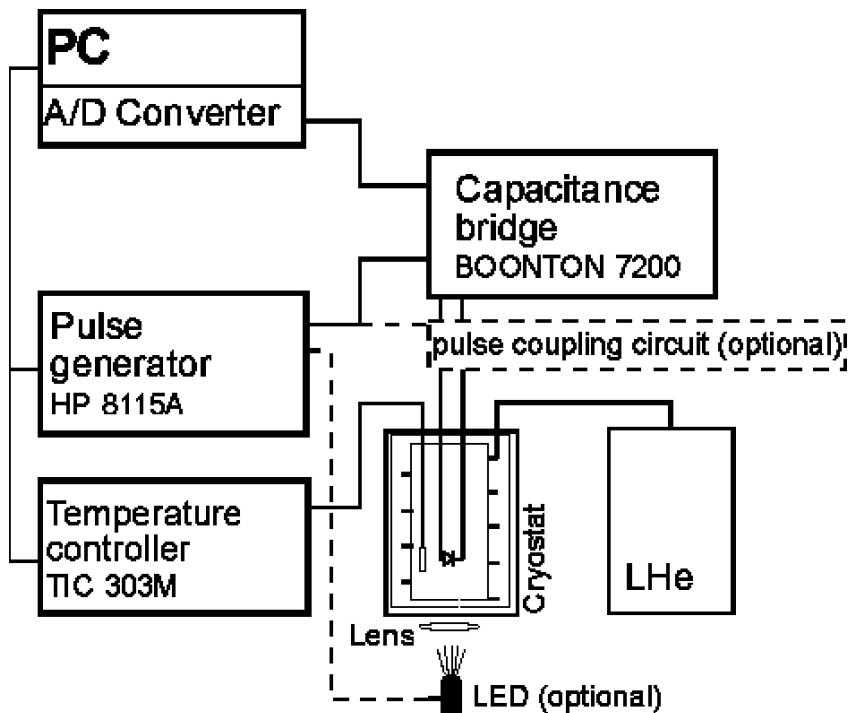


Рис. 1.3. Структурная схема установки для РСГУ Технического Университета Берлина

500 К. Возбуждение электронной системы полупроводника может осуществляться от источника излучения (LED), управляемого импульсным генератором через прозрачное окно рабочей камеры, перед которым располагается фокусирующая линза (Lens). Блок коммутации (Pulse coupling circuit) служит для реализации различных методов РСГУ путем коммутации входных и выходных сигналов согласно соответствующей с временной диаграмме.

Много работ посвящено особенностям обработки и интерпретации экспериментальных данных [20, 25, 28, 29, 31, 32, 45, 60, 61, 83, 90, 120, 160, 153, 157, 182, 206, 197, 217, 290, 291, 292, 236, 237, 272, 285, 295, 300, 304, 69, 318, 323, 341, 346, 357, 364, 365, 369, 373]. Особо следует выделить работы кафедры микроэлектроники РГРТА (научная школа Орешкина П.Т.) [93, 181, 182, 183, 184, 187, 188, 185, 232, 233, 269], в которых излагается оригинальный, в какой-то степени альтернативный по отношению к большинству публикаций подход, с которым, однако, далеко не все согласны [32]. Дискуссия, инициированная работами школы Орешкина П.Т., отражает современное состояние теории ГУ и РСГУ, находящейся в стадии формирования.

Основные математические модели физических процессов и подходы к интерпретации результатов экспериментов

Все перечисленные авторы при анализе переходных процессов, связанных с заполнением и опустошением глубоких уровней, чаще всего считают процессы заполнения и опустошения экспоненциальными с постоянной времени τ , зависящей от температуры следующим образом [328, 298, 30]:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{\Delta E}{kT}, \quad (1.2)$$

где τ_0 — коэффициент, зависящий от типа и параметров полупроводника; ΔE — оценка положения ГУ относительно границ запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура образца. Для скорости эмиссии, являющейся обратной величиной по отношению к τ , приводится также более строгое с теоретической точки зрения уравнение (для электронов) [310]:

$$e_n = \sigma_n v_t N_c \exp\left(\frac{-\Delta G}{kT}\right), \quad (1.3)$$

где σ_n — эффективное сечение захвата для электрона, v_t — тепловая скорость электрона, N_c — плотность состояний в зоне проводимости, ΔG — свободная энергия Гиббса, являющаяся функцией от температуры образца:

$$\Delta G = \Delta E - T\Delta S, \quad (1.4)$$

где энергия активации ΔE , если быть более точным, есть энталпия, которая и определяется при РСГУ, так как энтропию ΔS обычно полагают равной нулю, считая энергию ионизации не зависящей от температуры.

Далее авторы расходятся во мнениях относительно интерпретации τ_0 и границы запрещенной зоны ("дно" или "потолок"), относительно которой отсчитывают энергию ГУ. Большинство отечественных авторов и практически все зарубежные интерпретируют τ_0 следующим образом [328, 298, 30]:

$$\tau_0 = (\sigma b T^2)^{-1}, \quad (1.5)$$

где σ — сечение захвата носителей тока; b — параметр полупроводника, зависящий от типа полупроводника и ГУ (донорный или акцепторный). При этом они опираются на формулу (1.3) и исходят из того, что v_t прямо пропорциональна $T^{1/2}$, а N_c соответственно $T^{3/2}$.

Пренебрегая температурными зависимостями сечения захвата и энергии уровня, логарифмируют после умножения на T^2 обе части уравнения (1.5) и получают уравнение прямой линии:

$$\lg(\tau T^2) = -\lg(\sigma b) + \frac{\Delta E}{k \ln(10)T}, \quad (1.6)$$

в так называемых координатах Аррениуса $\lg(\tau T^2) — 1000/T$. Наклон этой прямой относительно оси координат $1000/T$ определяет энергию уровня, точнее ΔE , а смещение указанной прямой по вертикали — сечение захвата, но при условии учета полевого эффекта [120, 191, 233, 316, 364], который в первом приближении приводит к дополнительному смещению прямой (1.6) по вертикали и, следовательно, к искажению сечения захвата, определяемому по формуле (1.6). Поскольку удовлетворительная для практических целей математическая модель полевого эффекта в настоящее время отсутствует, для определения сечения захвата находят зависимость амплитуды релаксационного сигнала, характеризующего процесс заполнения ГУ, от длительности заполняющего импульса.

В работе [34] формула (1.5) приведена в виде, облегчающем нахождение коэффициентов b :

$$\tau_0 = (\gamma \sigma m^* T^2)^{-1}, \quad (1.7)$$

где γ — константа, определяемая выражением

$$\gamma = 16\pi m_e k^2 / h^3 \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ град}^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

m^* — эффективная масса носителя заряда; m_e — масса электрона; k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка.

П.Т. Орешкиным [180, с. 408] на основе разработанной им активационно-пролетной теории без вывода предложена альтернатив-

ная формула для определения τ_0 основных носителей тока:

$$\tau_0 = 2\tau_M = 2\varepsilon \varrho_v, \quad (1.8)$$

где τ_M — максвелловское время релаксации в базе диода; ε и ϱ_v — соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость и удельное объемное сопротивление материала базы диода. В более поздних работах сотрудников школы Орешкина П.Т. для неосновных носителей (электронов) в p -области используется формула [188, 232, 233]

$$\tau_0 = 0,8\tau_M \frac{\mu_p}{\mu_n}, \quad (1.9)$$

где μ_p и μ_n — подвижности дырок и электронов в области пространственного заряда. Если неосновными носителями являются дырки в n -области, то указанные подвижности меняются местами. Если в формулах (1.8) и (1.9) пренебречь температурными зависимостями входящих в них электрофизических характеристик, то удобнее пользоваться координатами $\lg(\tau) - 1000/T$.

Авторы работы [32] Л.С. Берман и А.А. Лебедев (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР), отметив, что ошибочность формулы (1.8) теоретически доказана в [289, 210], специально выполнили ряд экспериментальных исследований с целью проверки выводов, следующих из формулы (1.8):

1. Значения τ_0 для одного и того же ГУ в разных диодах из данного полупроводника определяются только удельным объемным сопротивлением ϱ базы диода и не зависят от свойств самого ГУ.

2. В одном и том же диоде значения τ_0 для различных ГУ могут различаться только из-за температурной зависимости $\varrho(T)$ (температурной зависимостью ε можно пренебречь).

Для экспериментальной проверки этих выводов авторами [32] использованы кремниевые диоды с различными ϱ базы, а объектами ис-

следования были термодефекты (ТД), возникающие при высокотемпературных обработках, и известные радиационные дефекты (РД). На основе достаточно представительного объема экспериментальных данных с привлечением ссылок на работы других авторов делаются выводы об экспериментальном опровержении сформулированных выше выводов 1 и 2.

Авторы [32], к сожалению, не указывают значений напряжения заполнения ГУ, отметив лишь, что измерения проводились при напряжении опустошения $U_R \gg V_k$, где V_k — контактная разность потенциалов, что, по их мнению, должно обеспечить выполнение условия резонансного пролета через слой объемного заряда (СОЗ), выдвинутого П.Т. Орешкиным и его соавторами в работе [184]. Справедливости ради следует заметить, что условием резонансного пролета П.Т. Орешкин считает достаточно большие значения разности опустошающего и заполняющего напряжений, которые являются запирающими (при исследовании эмиссии основных носителей с ГУ).

Конечно, не может не обращать на себя внимание тот факт, что ни сам П.Т. Орешкин, ни его последователи в своих более поздних публикациях, например в [269], никак не отреагировали на достаточно резкую критику формулы (1.8), подкрепленную специальными опровергающими экспериментами.

Отсутствует единство мнений и в определении типа ГУ — донорный или акцепторный. Для авторов [71, 232, 233] ориентиром служит исключительно полярность пика зависимости выходного напряжения селектора емкостного релаксационного (C-DLTS) сигнала от температуры. Эту зависимость часто именуют спектром ГУ, однако, по моему мнению, более удачным является термин "температурный скан DLTS-сигнала" [143]. Если полярность пика этого сигнала при заполнении ГУ основными носителями отрицательна, то ГУ считается донорным и рас-

положенным в базе $p^+ - n$ диода. Положительная полярность пика при заполнении ГУ основными носителями означает, что мы имеем дело с акцепторным ГУ в базе $n^+ - p$ диода. Электрическое заполнение ГУ только основными носителями обеспечивается при подаче неотпирающего $p - n$ переход импульса заполнения.

Другие исследователи не склонны так упрощать ситуацию. По мнению Л.С. Бермана и А.А. Лебедева [31] основные носители в базе n -типа могут быть захвачены и на донорные, и на акцепторные уровни. Более того, авторы [31] избегают терминов "донорный" и "акцепторный" ГУ и вводят в оборот термины "притягивающий" и "отталкивающий" кулоновские центры, а также коэффициенты теплового выброса электронов с ГУ в зону проводимости ($e_n = \gamma_n n_1$) и теплового выброса дырок с уровня в валентную зону ($e_p = \gamma_p p_1$), где γ_n и γ_p — соответственно коэффициенты захвата электрона и дырки, а n_1 и p_1 — равновесные концентрации дырок в валентной зоне и электронов в зоне проводимости в ОЭН.

В полупроводниках сложного состава использование РСГУ наряду с ГУ позволяет определять так называемые DX -центры, которые, по мнению авторов [316], могут быть не только заряженными, но и нейтральными.

Методы, аппаратные средства и информационные технологии РСГУ

Современное состояние информационных технологий РСГУ [60, 61, 285, 290, 291] характеризуется переходом от набора оригинальных, но разрозненных методов, алгоритмов и методик проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных к единой технологии, основанной на математическом моделировании аппаратной части спектро-

метров и физических явлений, сопровождающих процессы релаксации емкости, проводимости, тока и других параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Основным источником экспериментальной информации является релаксационный сигнал, зависящий от температуры образца и обусловленный заполнением и опустошением глубоких уровней. Этот сигнал в дальнейшем либо подвергается аппаратной обработке с целью подавления шумов и селекции по амплитуде и постоянной релаксации, либо после оцифровки используется для компьютерной реализации указанных аппаратных процедур. Результаты селекции (параметры релаксационного сигнала) при разных значениях температуры образца в дальнейшем используются для идентификации математической модели релаксационного сигнала.

Аппаратная обработка преобразует релаксационный сигнал, изменив его вид. В этом случае для определения параметров релаксационного сигнала необходимо дополнительно располагать математической моделью аппаратных преобразований. Строго говоря, оцифровка также представляет собой аппаратную обработку, видоизменяющую исходный аналоговый сигнал, и поэтому должна быть описана соответствующей математической моделью. В противном случае конечные результаты РСГУ могут быть искажены.

Таким образом, при моделировании релаксационных сигналов, полученных, например, с помощью спектрометра DLS-82E, следует рассматривать два взаимосвязанных и в то же время в определенной степени независимых этапа. Первый предусматривает моделирование аппаратной части, прежде всего аналогового перемножителя и интегратора. Данный этап достаточно независим от вида РСГУ — емкостная, токовая и др.. Разнообразие математических моделей здесь в основном определяется видом эквивалентного опорного сигнала и типом пе-

ремножителя. На втором этапе моделируются собственно физические процессы релаксации ГУ, регистрируемые по тем или иным реакциям образца, что обуславливает привязку моделирования на этом этапе к конкретному виду РСГУ.

Связь указанных этапов обуславливает обычно принимаемое допущение об экспоненциальном характере сигнала релаксации. Оно сокращает количество параметров сигнала, подлежащих экспериментальному определению, упрощает аналитическое получение математической модели аппаратных преобразований за счет использования развитого математического аппарата известных преобразований Лапласа.

Систематизированное изложение трех вариантов информационной технологии емкостной РСГУ приведено в стандарте F 978–90 американской ассоциации материалов и контроля ASTM (*The American Society for Testing and Materials*). Отечественные аналоги этого документа отсутствуют, равно как и российская организация с таким статусом. Стандарт, на мой взгляд, достаточно наглядно и в то же время исчерпывающе отражает процесс становления РСГУ как средства параметрического контроля полупроводниковых материалов, и по этой причине его целесообразно принять в качестве основы при рассмотрении особенностей информационной технологии РСГУ. По мере необходимости эта основа будет дополнена за счет других публикаций.

Следует отметить, что стандарт носит рекомендательный характер и определяет три процедуры определения энергии активации, концентрации и предэкспоненциального выражения скорости эмиссии носителей заряда с глубоких уровней в обедненной области полупроводника. Первая процедура – процедура А (нормальная DLTS) представляет собой обычную емкостную спектроскопию при постоянном запирающем напряжении на образце. Процедура А предусматривает медленное изменение температуры и предполагает экспоненциальный ха-

рактер процесса релаксации емкости. Процедура В представляет собой модификацию процедуры А, сводящуюся к введению поправок на неэкспоненциальность релаксационного процесса. И, наконец, процедура С отличается от предыдущих тем, что в целях повышения точности предусматривает ряд измерений релаксации емкости при постоянной температуре и устраниет те же источники ошибок, что и процедура В. Указанный стандарт содержит упоминание о методе постоянной емкости как способе устранения неэкспоненциальности релаксационного сигнала, в качестве которого уже выступает не емкость, а компенсирующее релаксацию емкости быстро меняющееся запирающее напряжение. Обращает на себя внимание отсутствие рекомендаций по экспериментальному определению сечения захвата носителей — предлагается ограничиться определением предэкспоненциального множителя.

Стандарт ориентирован на применение селектора релаксационных сигналов (аналогового перемножителя-интегратора) типа *boxcar*, однако не исключается использование и других типов селекторов, например *lock-in*, при условии, что приняты во внимание факторы, которые могут исказить результаты измерений параметров ГУ.

Отечественные авторы в своих публикациях много внимания уделяют сравнению разных типов аппаратных селекторов релаксационных сигналов по различным критериям [61, 285, 290, и др.]. Предложены опорные сигналы высокого разрешения (*HiRes* – 3, 4, 5, 6) [61], а также корреляторы с опорной функцией, программируемой от компьютера [285] и определяемой решением линейного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода, которое авторы работы [285] видят в корреляционном преобразовании релаксационного сигнала от одного ГУ. Однако следует заметить, что в формуле для корреляционного преобразования, взятого за основу в работе [285], отсутствует шумовая составляющая. Введение этой составляющей, особенно в области низких опорных

частот, существенно повлияет на процесс решения уравнения вплоть до принципиальной возможности нахождения решения. Более, на мой взгляд, реальный и приемлемый для практики подход изложен в работе [61], где предлагается рассчитать для сравниваемых опорных функций ширину DLTS-пика в температурном скане на полувысоте максимума пика, а также соотношение сигнал/шум в точке максимума пика. Опуская приведенные в работах [61] и [285] математические выкладки, отметим, что полного согласия в выводах относительно оптимальности выбора опорной функции коррелятора у авторов указанных работ нет. Характерной особенностью этих и подобным работ является, как правило, приверженность к температурному сканированию при постоянной частоте опорного сигнала, хотя те же авторы в [60] развиваюят идею определения параметров ГУ по точкам пересечения температурных спектров (сканов) DLTS-сигнала, полученных при разных значениях частоты опорного сигнала.

Весьма подробно в стандарте перечислены источники погрешностей измерений параметров ГУ. К ним относятся прежде всего и главным образом погрешности, связанные с измерением и обеспечением заданной температуры образца, а также возможные температурные зависимости контролируемых параметров полупроводниковых материалов. Известно, например, что ширина запрещенной зоны E_g полупроводникового кремния зависит от температуры T следующим образом [166, с. 78]:

$$E_g = 1,16 - \frac{7,02 \cdot 10^{-4} T^{3/2}}{T + 1108}, \quad (1.10)$$

где k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона.

Собственная концентрация носителей n_i , входящая в формулу для контактной разности потенциалов [166, с. 226]

$$V_k = E_g/2q + (kT/q) \ln (N_d/n_i), \quad (1.11)$$

также зависит от температуры [166, с. 78]

$$n_i = 3,87 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp(-7014T). \quad (1.12)$$

В стандарте перечисляется целый ряд причин неэкспоненциальности кривых релаксации и других ошибок определения параметров ГУ:

- концентрация глубоких центров (ГЦ) соизмерима или превосходит концентрацию основных (мелких) центров-примесей. Подтверждения этому приведены также в обзоре [80, с.43-44], автор которого, в свою очередь, ссылается на работы Лэнга и Миллера [329, 342], где говорится о сложности теоретического анализа переходных процессов в случае большой концентрации ГЦ. В этом случае чаще всего [314] рекомендуется применять метод постоянной емкости;
- заполнение ловушек (ГУ) может быть неравномерным в пределах области обеднения,
- $p - n$ -переход недостаточно резкий,
- неполное освобождение ГУ от свободных носителей вблизи границы области обеднения,
- наблюдаемая эмиссия обусловлена двумя (или более) близко расположеннымными (по энергии ионизации) глубокими уровнями,
- быстродействие аппаратных средств регистрации релаксационных сигналов сопоставимо с временем релаксации,
- влияние температурных зависимостей сечения захвата и ненулевые изменения энтропии,
- скорость эмиссии зависит от напряженности электрического поля и типа носителей (полевой эффект, эффект Пула-Френкеля).

Непосредственной реализации каждой из трех измерительных процедур в стандарте F 978–90 предшествуют тщательная проверка релаксационного сигнала емкости на предмет экспоненциальности его формы и температурная калибровка измерительного тракта. В качестве

тестов на неэкспоненциальность рекомендуются методики, предложенные в работах [363], [336], [325]. Допускается использование и других алгоритмов. Методика [363] ориентирована на обработку результатов измерений, полученных с помощью аппаратного селектора типа *boxcar*. В этом случае о форме релаксационного сигнала судят без регистрации собственно сигнала в явном виде. Другие методики [336, 325] предусматривают оцифровку сигнала релаксации и компьютерную обработку с помощью корреляционного [336] или спектрального [325] анализа на основе быстрого преобразования Фурье.

Чувствительность характеристик ГУ к температуре настолько велика, что образец можно использовать для измерения температуры наряду с откалиброванным платиновым резистивным термометром. Обычно применяется диод, легированный платиной или другими при-месями, для которых с большой точностью известны энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Калибровка в этом случае сводится к измерению скорости эмиссии $e_n = \tau_n$ и определению путем итераций температуры из уравнения

$$T = 11604,5 \cdot \Delta E / (\ln \tau + 2 \ln T + \ln B).$$

Более подробно регламентированные стандартом F 978–90 и другие методы анализа неэкспоненциальности будут рассмотрены ниже (см. с. 199), а пока лишь отметим характерную особенность данного стандарта — граничные значения критериев экспоненциальности отдаются на усмотрение пользователя стандарта, что обуславливает неоднозначность оценки экспоненциальности.

Ориентация стандарта на регистрацию релаксационных откликов объемных дефектов с линейчатым спектром по энергии активации обуславливает требование конструктивно-аппаратной защиты образца от влияния поверхностных дефектов. Это достигается введением в кон-

структурю диода периферийного защитного проводящего кольца, на которое в процессе измерений подается напряжение, минимизирующее обратный ток $p - n$ -перехода и, следовательно, влияние дефектов поверхности. Весьма необходимый для практики контроль поверхностных дефектов, в свою очередь, стараются отделить (конструктивно, аппаратно или алгоритмически) от контроля объемных дефектов. В основном в данной работе, равно как и в стандарте F 978–90, речь идет исключительно о контроле объемных дефектов и примесей.

Для определения концентрации равномерно распределенных мелких примесей N_d рекомендуется построение вольт-фарадной характеристики $p - n$ -перехода, которая обычно представляется в виде прямой линии $1/C^2 = f(U_R)$. Концентрацию N_d стандарт рекомендует определять из следующего уравнения:

$$N_d = (1, 2 \cdot 10^7)/A^2 m, \quad (1.13)$$

где A — площадь $p - n$ -перехода в см^2 ; m — наклон графика C^{-2} от U_R при комнатной температуре в $(\text{пФ})^{-2-1}$. Формула (1.13) хорошо согласуется с формулами (1.10, 1.11, 1.12) для резкого перехода, в чем нетрудно убедиться. Для получения более точного значения N_d рекомендуется проведение $C - V$ измерений с обработкой по стандарту ASTM F 419. Нелинейность зависимости $1/C^2 = f(U_R)$ свидетельствует о недостаточно резком переходе или большой концентрации ГУ, соизмеримой или даже превосходящей N_d .

Ключевой проблемой температурного сканирования является определение температуры DLTS-пика. Стандартом F 978–90 для этих целей предусматривается достаточно трудоемкая итеративная процедура, в ходе которой с точностью до $0,2^\circ\text{C}$ определяется положение пика путем неоднократных повторов в режиме линейного изменения температуры со скоростью $\leq 0,1^\circ\text{C}/\text{с}$ в ту и другую стороны относительно пика

до уменьшения DLTS-сигнала наполовину (в 2 раза). Эта рекомендация по умолчанию предполагает симметричность пика по координате $1/T$, что при близком расположении соседних пиков может и не выполняться. Наконец, сама симметрия отдельного пика не является окончательно установленным фактом. Альтернативным и, на мой взгляд, более перспективным с точки зрения общих требований информационных технологий является подход, предусматривающий определение температуры пика путем идентификации его математической модели, одним из параметров которой является указанная температура. Этот подход, именуемый в отдельных работах методом математического моделирования, в последние годы интенсивно разрабатывается и широко используется отечественными и зарубежными исследователями свойств глубоких центров [291, 28, 60, 61, 300, 312, 364, 83].

По множеству n пар значений температур пиков T и постоянных экспоненциальной релаксации τ в координатах $x = 1/T$ (или $1000/T$) и $y = \ln(\tau T^2)^{-1}$ строится так называемый график Аррениуса, который, по мнению авторов стандарта, предназначен для определения энергии активации глубокого уровня, предэкспоненциального множителя и снятия вопросов, связанных с влиянием указанных выше погрешностей DLTS-измерений. Стандарт весьма категорично утверждает, что отклонение графика Аррениуса от прямой линии указывает на влияние упомянутых погрешностей и аномальных выбросов, сопровождающих выборочные измерения. Для отбраковки последних рекомендуется воспользоваться руководством E 178 из комплекта ASTM.

Уравнение прямой линейной регрессии характеризуется, как известно, наклоном $m = S_{xy}/S_{xx}$ и точкой пересечения с осью y , определяемой соотношением $b = \bar{y} - m\bar{x}$, где $\bar{x} = \sum x/n$, $\bar{y} = \sum y/n$, $S_{xx} = \sum(x - \bar{x})^2$, $S_{xy} = \sum(y - \bar{y})(x - \bar{x})$. Оценка вариации наклона выполняется по формуле относительной остаточной дисперсии

$s_m^2 = S_y^2/S_{xx}$, вариация пересечения определяется по формуле $s_b^2 = S_y^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}} \right)$, где $S_y^2 = [S_{yy} - (S_{xy})^2 / S_{xx}] / (n-2)$, $S_{yy} = \sum(y-\bar{y})^2$. Оценка вариации наклона дает возможность после определения энергии активации ΔE по формуле $\Delta E(\text{мэВ}) = -k \cdot m \cdot \ln(10) = -0,19842m$ зафиксировать погрешность ее определения по формуле $s_{\Delta E}(\text{мэВ}) = 0,19842s_m$. Далее определяются предэкспоненциальный множитель B по формуле $B = 10^b$ с верхним и нижним пределами неопределенности $B_U = 10^{b+s_b}$ и $B_L = 10^{b-s_b}$.

Для нахождения усредненной концентрации глубоких уровней N_t при установившейся температуре пика необходимо определить C_f — емкость отрелаксированного образца при опустошающем обратном напряжении U_R , затем C_b — емкость при заполняющем напряжении U_1 и C_i — емкость образца в начальный момент восстановления опустошающего напряжения U_R после подачи заполняющего напряжения U_1 [264, 265]. Если определение первых двух емкостей C_f и C_b при наличии достаточно точного измерительного емкостного моста, питаемого относительно высокочастотным (1 МГц для спектрометра DLS-82E) синусоидальным напряжением небольшой величины (порядка 10 мВ), не составляет особого труда, то расчет емкости C_i является более сложной задачей, от точности решения которой во многом зависит погрешность определения концентрации глубоких уровней по формуле

$$N_t = N_d \left(C_i^{-2} - C_f^{-2} \right) / \left(C_i^{-2} - C_b^{-2} \right) \quad (1.14)$$

для акцепторных уровней в базе n -типа или донорных уровней в базе p -типа и по формуле

$$N_t = N_d \left(C_i^{-2} - C_f^{-2} \right) / \left(C_f^{-2} - C_b^{-2} \right) \quad (1.15)$$

для акцепторных уровней в базе p -типа или донорных уровней в базе

n -типа. В этих уравнениях предполагается, что скорость эмиссии неосновных носителей незначительна по сравнению со скоростью эмиссии основных носителей. Это предположение выполняется при $N_t < 0,1N_d$ и рассматривается как первое приближение для более сложных вычислений [347] в случае $N_t > 0,1N_d$. Для очень малых отношений N_t/N_d $C_i^2 \approx C_f^2$ и при $C_b^2 \gg C_i^2$ выражение для концентрации ГУ принимает вид

$$N_t \approx 2(C_f - C_i)N_d/C_f. \quad (1.16)$$

Процедура В отличается от процедуры А тем, что в ней должны быть реализованы некоторые рекомендации по повышению точности измерений. В частности, рекомендуется построение графиков зависимостей C_f и C_b от температуры в пределах температурного диапазона, в котором наблюдаются пики DLTS-сигнала. Эти зависимости предлагаются аппроксимировать безвесовой квадратичной регрессией и с помощью полученных аппроксимаций определить указанные емкости при каждом значении температуры образца, соответствующей пику DLTS-сигнала. Далее с помощью осциллографа, подключенного к выходу фазового детектора, соединенного с измерительным емкостным мостом, предлагается измерить величину изменения емкости $\Delta C = C_f - C_i$ при каждой температуре, вычислить $C_i = C_f - \Delta C$ для каждой температуры и аппроксимировать с помощью квадратичной регрессии с тем, чтобы уточнить значения C_i в точках температурных максимумов. Затем предлагается итерационный алгоритм коррекции постоянной релаксации τ для детектора *boxcar* [348], использующий уравнение

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left[\frac{t_2}{t_1} \right] - \frac{1}{2} \ln \left[\frac{B(t_2)}{B(t_1)} \right]}, \quad (1.17)$$

где

$$B(t) = 1 + A_1 e^{-t/\tau} + A_2 e^{-2t/\tau} + A_3 e^{-3t/\tau} + A_4 e^{-4t/\tau},$$

$$\begin{aligned} A_1 &= F \left(C_b^2 + 3C_f^2 \right) C_f^{-2}, \quad A_2 = F^2 \left(3C_b^2 + 3C_f^2 \right) C_f^{-2}, \\ A_3 &= F^3 \left(3C_b^2 + C_f^2 \right) C_f^{-2}, \quad A_4 = F^4 C_b^2 C_f^{-2}, \\ F &= \left(C_i^2 - C_f^2 \right) / \left(C_b^2 - C_i^2 \right). \end{aligned}$$

Сущность коррекции заключается в том, что, начиная с

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2/t_1)},$$

вычисляют каждое последующее значение τ с помощью уравнения (1.17) до тех пор, пока оно не будет отличаться от предыдущего менее чем на 0,1 %.

Процедура С предусматривает проведение измерений при постоянной температуре, в то время как предыдущие использовали линейно меняющуюся. Рекомендуется измерить скорость эмиссии носителей примерно при десяти постоянных значениях температуры так, чтобы пределы изменений скорости охватывали два порядка. Для измерений рекомендуется использовать метод отношения емкостей [347], предусматривающий непосредственную регистрацию релаксирующей емкости $C(t)$ примерно в пятнадцати точках. Из них для расчетов используются от пяти до десяти точек, причем для образцов с высокой концентрацией ГУ — только последние 2/3 переходного процесса. Это может означать, что неэкспоненциальность проявляется в основном в начале релаксационного процесса. Сумма электронной и дырочной скоростей эмиссии, $e_n + e_p$, определяется следующим уравнением:

$$\exp[-(e_n + e_p)t] = \frac{\left[C_b^2(t) - C_i^2(T) \right] \left[C_f^2(T) - C^2(t) \right]}{\left[C_b^2(T) - C^2(t) \right] \left[C_f^2(T) - C_i^2(T) \right]} \equiv C_r(t, T), \quad (1.18)$$

где C_r называется отношением емкостей и определяется, по крайней мере, для десяти точек зависимости (C, t) при фиксированной температуре. Скорость эмиссии рассчитывается по наклону зависимости $\ln(C_r)$ от t . Значение постоянной времени релаксации рекомендуется корректировать с помощью весовой линейной регрессии $\ln(C_r)$ от времени с весом C_r^2 :

$$\tau = -Q_{xx}/Q_{xy}, \quad s_\tau = \tau^2 \left[\frac{Q_{yy} - Q_{xy}^2/Q_{xx}}{(n-2)Q_{xx}} \right]^{1/2}, \quad (1.19)$$

где

$$Q_{xx} = \sum w(x - \bar{x}_w)^2, \quad Q_{xy} = \sum w(y - \bar{y}_w)(x - \bar{x}), \quad Q_{yy} = \sum w(y - \bar{y}_w)^2,$$

$$\bar{y}_w = \sum wy / \sum w, \quad \bar{x} = \sum wx / \sum w, \quad y = \ln(C_r), \quad x = t, \quad w = C_r^2.$$

Стандарт, как уже указывалось выше, не содержит рекомендаций по применению метода постоянной емкости и сравнению его с методом постоянного напряжения, имеющим в соответствии с текстом стандарта массу недостатков, которые можно устраниить либо, усложняя метод постоянного напряжения (процедуры В и С), либо, переходя к методу постоянной емкости. Логично предположить, что внимание, уделенное в стандарте методу постоянного напряжения, в какой-то степени должно быть связано с его преимуществами. Отсутствуют конкретные рекомендации по оценке линейности измерительного тракта спектрометра, хотя включено требование линейности аппаратных преобразований. В то же время устройства, входящие в состав аппаратных средств, например фазовый детектор и аналоговый перемножитель, условно линейны лишь в узком диапазоне значений входных сигналов.

Нет в упомянутом стандарте и рекомендаций с расчетными моделями определения концентрационных профилей ГУ с помощью подачи

двух импульсов заполнения с различной амплитудой. Не нашли отражения частотно-резонансный метод и токовая спектроскопия, активно разрабатываемые теоретически и экспериментально в работах отечественных авторов [147, 168]. За пределами стандарта остались также неэлектрические методы заполнения ГУ.

1.2. Процессорные средства параметрического контроля

1.2.1. Терминология и смена поколений

Процессорными называются средства контроля (ПСК) ИС, содержащие вычислительную мощность в цепи принятия решений о качестве изделий (рис. 1.4). В состав ПСК входят *процессорные измерители* [279], *средства прямого контроля* [106], наиболее популярные в условиях серийного производства, а также средства контроля, использующие различные методы ранжирования, например метод парных перестановок. Применение последних целесообразно при низкой точности воспроизведения входных воздействий и отсутствии эталона для сравнения, например при импульсных радиационных воздействиях.

Термин *статистические измерения* [278], отражающий появление нового раздела теории измерений, адекватного возможностям современной измерительной техники, достаточно часто употребляется в научно-технической литературе.

Термин *статистические процессорные средства контроля ИС*, введенный в рамках данной работы для определения объекта исследований, обозначает те качественно новые возможности ПСК, которые они приобретают в составе информационно-измерительных систем, способных реализовать автоматическое накопление и статистическое сжатие информации о результатах контроля, а также обмен этой

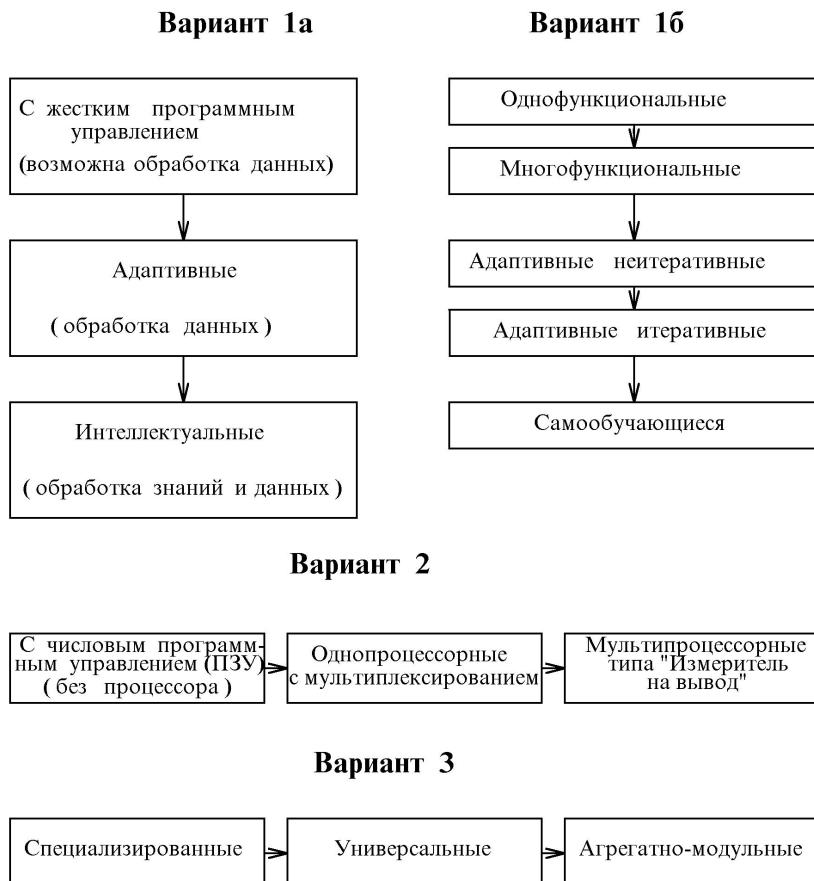


Рис. 1.4. Варианты классификации автоматизированных средств контроля ИС

информацией между различными ПСК системы. Специфика методов математической статистики заключается в том, что повышение отдачи от их использования связано, с одной стороны, с глубиной теоретической проработки вопросов собственно математической статистики, а с другой стороны определяется уровнем теоретической подготовки в конкретной предметной области, связанной с измерениями и контролем микросхем.

Можно указать два направления развития процессорных средств контроля при решении диагностических задач [199]. Первое направление — переход от контроля единичных параметров к некоторому комплексному "образному" представлению объекта диагностики и его прогнозируемых эксплуатационных свойств. Эффективным инструментом для решения диагностических задач в этом направлении является модельная диагностика, основанная на сопоставлении свойств контролируемого изделия с параметрами, заложенными в математической модели. Областью применения интегральной диагностики является контроль изделий, изготавляемых при относительно устойчивом и отлаженном технологическом процессе, когда имеет место стационарная случайная последовательность контролируемых параметров изделий.

Второе направление — развитие в плане "дифференциации", т. е. поддержки локальных методов контроля, что ведет к увеличению объема контроля и является целесообразным для этапа перехода от нестационарного, нестационарного технологического процесса путем его отладки к относительно устойчивому, позволяющему использовать интегральную диагностику. Указанные направления взаимодействуют между собой, обеспечивая управление качеством при мелкосерийном производстве.

Главная особенность ПСК — автономная работа без непосредственного участия человека. Функции оператора состоят лишь в обуче-

нии, запуске и последующем периодическом наблюдении за их работой. С этой точки зрения они могут рассматриваться как промышленные роботы [203], в основу классификации которых можно положить вид закона управления. Закон управления реализуется в виде программы управления. При этом возможны различные режимы отработки заданной программы: управление по жесткой программе без ее перестройки в процессе работы, адаптивное изменение программы в зависимости от условий работы, формирование управления при отсутствии заданной в явном виде программы.

Жесткая отработка программы характерна для ПСК первого поколения. Это наиболее простой вид управления, реализуемый на базе разомкнутого цикла управления.

Наличие системы мониторирования вспомогательной информации, позволяющей приспосабливаться к неполноте определенной обстановке при выполнении программы, отличает ПСК второго поколения, называемые адаптивными.

Способность восприятия, распознавания окружающей среды, построения ее модели, принятия решения об изменении поведения при выполнении задания характерна для ПСК третьего поколения. Такие ПСК по аналогии с соответствующими роботами [203] назовем *интеллектуальными (интеллектуальными)*, так как они технически воспроизводят отдельные достаточно сложные интеллектуальные функции, свойственные человеку. Однако следует отличать искусственный, или машинный, интеллект от естественного интеллекта живых организмов. Обладая только внешним сходством проявлений, интеллектные функции робота и, в частности, ПСК реализуются на иных физических принципах и имеют ограниченные возможности. Вместе с тем даже не столь совершенный технический интеллект значительно упрощает и автоматизирует решение задачи синтеза управляющих программ.

Таким образом, сложность решаемых системой автоматического управления задач может являться основой для разделения ПСК на поколения. Вместе с тем следует отметить, что переход от одного поколения к другому происходит в результате превращения количественных изменений указанной сложности в качественные. Так например, использование системой управления обратных связей для коррекции управляющего алгоритма является тем новым качеством, которое позволяет отличить второе поколение от первого.

Новое качество третьего поколения проявляется в том, что в системах управления от обработки данных переходят к обработке знаний [204, 9]. Если при обработке данных мы можем отделить программные файлы от файлов данных, то переход к обработке знаний означает применение языков программирования, которые оперируют с информационными объектами, именуемыми знаниями и отличающимися от данных свойством интерпретируемости, наличием классифицирующих отношений и ситуативных связей. Данные могут содержательно интерпретироваться лишь соответствующей программой. В отрыве от программы они не несут никакой содержательной информации. Знания же отличаются тем, что в них возможность содержательной интерпретации всегда присутствует. Наличие классифицирующих отношений позволяет организовать "наследование" информации. Ситуативные связи помогают строить процедуры анализа знаний на совместимость, противоречивость, а также другие процедуры, которые трудно реализовать при хранении традиционных массивов данных. Из этих процедур следует отметить процедуру логического вывода, приводящую в системе формализованных знаний к "приращению" знаний. Заметим, что база знаний не отвергает и не заменяет базу данных. Как показано в [204], база знаний и база данных рассматриваются как разные уровни представления информации, хранящейся в интеллектуальном банке инфор-

мации.

По мере развития процессорных средств контроля все чаще стали связывать возможности повышения метрологического качества получаемых с их помощью результатов контроля, а также расширение функциональных возможностей с интеллектуализацией ПСК [104]. Необходимым условием интеллектуальности ПСК является наличие процессора и программного обеспечения. Однако это условие не является достаточным, определяющим уровень интеллекта, который, в свою очередь, определяется комплексным использованием аппаратных и программно-алгоритмических возможностей на основе априорной и текущей информации о цели и условиях контроля.

По аналогии с уровнями интеллекта процессорных измерителей, предложенными Э.И. Цветковым [279], могут быть определены пять уровней-поколений ПСК:

- однофункциональные,
- многофункциональные,
- неитеративные адаптивные,
- итеративные адаптивные,
- итеративные адаптивные с самообучением.

В однофункциональном ПСК возможности процессора используются только для реализации одной установленной функции по жесткой программе. *Многофункциональное* ПСК обеспечивает выполнение установленной совокупности функций, для каждой из которых предусмотрена жесткая программа. Следовательно, в памяти ПСК должны содержаться данные, необходимые для реализации всех процедур, а также вспомогательное программное обеспечение выбора алгоритма по идентифицированной функции.

Неитеративное адаптивное ПСК - это многофункциональное ПСК, в котором для выполнения каждой функции предусмотрена со-

вокупность алгоритмов с варьируемыми характеристиками и параметрами, выбор которых производится по установленным правилам. В памяти таких ПСК хранятся данные, необходимые для реализации всех алгоритмов, массивы характеристик входного и выходного сигналов, условий функционирования, требований и ограничений, а также программы выбора алгоритма и значения характеристик и параметров для данного сочетания функций и априорных данных о свойствах объекта контроля, условиях контроля, требованиях и ограничениях.

Итеративные адаптивные ПСК отличаются от предыдущих тем, что для получения одного результата контроля используют итеративный алгоритм с варьируемыми в процессе получения этого результата характеристиками и параметрами. Итеративными называются такие циклические процедуры контроля, в каждом цикле которых алгоритм изменяется на основе информации о результатах контроля, полученных в предыдущих циклах, и с учетом изменения условий проведения контроля.

Наконец, *итеративные адаптивные ПСК с самообучением* предусматривают не только применение итеративных процедур, но и автоматизированное развитие программно-алгоритмического обеспечения за счет самообучения.

Очевидно, что указанные уровни не исчерпывают возможностей даже сегодняшнего дня. Так, можно уже говорить о создании ПСК с *самообучением и самоорганизацией*, ПСК с *саморасширением* не только открытых множеств алгоритмов с варьируемыми характеристиками и параметрами, но и программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего использовать формируемые при эксплуатации ПСК данные для расширения вышеуказанных множеств.

Приведенная характеристика уровней интеллекта ПСК создает предпосылки для целенаправленных усилий по расширению их функ-

циональных возможностей и повышению метрологического уровня. Нетрудно заметить, что классификация по уровням интеллекта не противоречит классификации по типу управления. И в самом деле, первые два уровня интеллекта по сути дела описывают первое поколение ПСК. Третий и четвертый уровни представляют второе поколение, а пятый и последующие являются уже представителями третьего поколения.

Описанная классификация процессорных измерителей, приведенная в [279], не является единственной. Другие авторы, например В.Н. Иванов и Г.И. Кавалеров [105], считают необходимым условием реализации интеллектуальных черт в измерительных системах хранение в самой системе некоторой внутренней модели "внешнего мира", т. е. объекта измерений и условий их проведения, а также совокупности правил и алгоритмов функционирования системы. Отсюда ими делается вывод, что центральным и определяющим моментом структурного построения систем такого класса является наличие памяти. Объем, способы организации и использования памяти во многом определяют глубину интеллекта конкретной измерительной системы. Этими авторами предложена альтернативная классификация, которая по своему отражает логику развития измерительных систем на современном этапе и дает возможность прогноза направлений интеллектуализации различных видов измерительных систем, не вступая в противоречия с другими классификациями. В предлагаемой системе классификационных признаков с точки зрения задач параметрического контроля ИС представляет интерес способ использования вычислительной мощности, точнее структурные взаимосвязи между элементами памяти, измерительными и вычислительными компонентами. По указанному признаку в [105] выделены измерительные системы *с внутренней вычислительной мощностью*, с внешней вычислительной мощностью, "комплементарные" (от англ. *complement* – дополнение, комплект –

чаще в отечественной литературе встречается перевод "комплементарные" – примечание автора) и интегрированные (или ассоциированные) системы.

Системы с внешней вычислительной мощностью предусматривают наряду с их собственной вычислительной мощностью и соответствующим образом организованной внутренней памятью использование внешней вычислительной машины с существенно большими производительностью и объемом памяти. Основные задачи внешнего компьютера в таких системах связаны с поддержанием баз данных и знаний, реализацией экспертных систем, построением и идентификацией математических моделей, вторичной обработкой измерительной и диагностической информации. Следует заметить, что современные операционные системы персональных компьютеров позволяют поддерживать многозадачные режимы и с их помощью реализовать обе системы на одном компьютере.

"Комплементарные" измерительные системы занимают промежуточное положение между двумя рассмотренными группами. Для них характерно использование одного и того же процессора (или группы процессоров) с внутренними элементами памяти системы и внешними устройствами памяти большой емкости. В системах этого класса аппаратные компоненты играют роль дополнительных периферийных устройств, расширяющих или дополняющих (отсюда и термин) функциональные возможности вычислительной системы. Типичным их представителем является измерительная система на базе персонального компьютера с дополнительными внутренними или внешними измерительными модулями, реализующая, по всей видимости, однозадачный режим.

Наконец, *ассоциированные системы*, которые являются наиболее сложными по своей организации с точки зрения использования вы-

числительных мощностей, представляют собой объединение интеллектуальных измерительных систем одного или различных классов из трех вышеперечисленных, рассредоточенных в пространстве и построенных по сетевому принципу. Архитектура ассоциированных измерительных систем построена на локальных и глобальных вычислительных сетях. Такие системы, в частности, составляют основу специализированных информационных, вычислительных и телекоммуникационных ресурсов (ИВТР) для проведения фундаментальных исследований. ИВТР потенциально способны существенно ускорить процесс познания, однако в выбранной прикладной предметной области автору пока не удалось обнаружить существование таких "помощников".

Новые перспективы открывает цифровая обработка аналоговых сигналов в реальном времени с помощью сигнальных микропроцессоров (СМП) [17]. Алгоритмические измерения с применением адекватной элементной базы в виде СМП позволяют многократно повысить производительность труда при проведении измерений и значительно повысить их точность. Опираясь на эти количественные изменения, можно ожидать успехов и в плане качественного совершенствования средств и методов параметрического контроля ИС.

Современный этап развития процессорных средств параметрического контроля ИС можно охарактеризовать свершившимся переходом к разработке и широкому применению ПСК второго поколения [273] (см. рис. 1.4 на с. 69). В процессе создания и промышленной эксплуатации второго поколения ПСК зреют предпосылки для перехода к третьему поколению, что позволяет определить конкретные пути повышения эффективности методов и средств параметрического контроля ИС и их элементов и структур.

1.2.2. Реализация методов параметрического контроля с помощью процессорных средств

Широкое внедрение процессорных средств в практику параметрического контроля позволяет прежде всего автоматизировать контрольные операции, отличающиеся возрастающей трудоемкостью по мере роста степени интеграции ИС. Появляется возможность документирования результатов контроля, учета контролируемой продукции. Максимальный эффект обеспечивается в рамках системного подхода к технологическому обеспечению качества ИС [48, 49, 62, 161, 321, 372, 274, 277], предусматривающего комплексное использование датчиков, средств связи и обработки данных. Тенденция интегрирования систем управления технологическими процессами и проектирования изделий является одной из основных в развитии гибких автоматизированных производств.

Достаточно очевидной является взаимосвязь между развитием средств и методов параметрического контроля, которая проявляется во взаимном влиянии одних на другие. Новые методы параметрического контроля в составе высоких технологий требуют адекватной программно-аппаратной реализации. В свою очередь, качественные изменения процессорных средств контроля и измерений, выражаящиеся, в частности, в исключительно высокой воспроизводимости цифрового моделирования их характеристик в реальном времени, недоступной для аналоговой техники, обусловливают повышение интереса к тем методам параметрического контроля, реализация которых на аналоговых устройствах была проблематичной. В качестве примера можно привести селекцию квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов (см. с. 60) по постоянной времени и амплитуде, для которой трудно реализовать средствами аналоговой техники оптимальные опорные сиг-

налы со стабильными амплитудно-временными характеристиками.

На пути повышения точности измерений с помощью процессорных средств существует ряд проблем, связанных с совершенствованием метрологического обеспечения алгоритмических измерений [105, 16]. Отдельные измерительно-вычислительные процедуры, характерные для интеллектуальных систем (адаптивные [100, 273] и итеративные [10] измерения с использованием последовательных процедур статистического оценивания, измерения с использованием нечеткой априорной информации), достаточно хорошо проработаны теоретически, однако при их реализации в процессорных средствах контроля появляются дополнительные проблемы метрологического обеспечения, такие как проблема внутреннего метрологического самоконтроля и диагностики, предусматривающая создание специальных средств воспроизведения образцовых сигналов, алгоритмов контроля, самодиагностику и самокоррекцию, периодическую коррекцию внутренней модели "внешнего мира" на основе самоидентификации и т. д.

В этом отношении параметрический контроль ИС, особенно цеховый, достаточно либерален к внедрению новых методов и средств. Технология микроэлектронного производства в условиях цеха вправе использовать новые средства контроля без достаточной метрологической проработки — для этого у него есть и соответствующие юридические основания. Далеко не все методы и средства, рекомендуемые для параметрического цехового контроля, имеют достаточное метрологическое обеспечение. Это связано отчасти с необходимостью пересмотра взглядов на измерительную процедуру, особенно в случае измерений электрофизических параметров [16, 222], например характеристик глубоких уровней. Сведение аттестации устройства для измерения параметров поверхностных ловушек в МДП-структуратах к аттестации схемных элементов электрических моделей [26] может быть принято в каче-

стве вынужденной меры, однако ни в коем случае не может рассматриваться как окончательное решение проблемы метрологического обеспечения этого вида измерений.

В этих условиях одноканальные и статистические подходы к измерениям перестают удовлетворять специалистов-метрологов микронауки, а определение измерений как технической процедуры сравнения измеряемой величины с величиной, принятой в качестве единицы, не отражает всех возникающих при измерениях ситуаций [16]. От понятия "измерение" в его классической интерпретации реальная измерительная практика вызывает необходимость перейти к более широкому понятию "алгоритмического измерения" [17, с. 19]. В указанной работе П.А. Арутюнов предполагает понимать под алгоритмическим измерением свойства некоторый способ (алгоритм) нахождения символа (числа, функции, алгебраического элемента), моделирующего свойство исследуемого объекта в соответствии с конкретной измерительной шкалой. Измерительная шкала в этом случае может быть задана в виде множества свойств, представляющих символы. В итоге алгоритмическое измерение, по П.А. Арутюнову, сводится к сравнению неизвестных свойств объекта с эталонными свойствами до тех пор, пока не будут найдены свойства, находящиеся в таком отношении, которое позволит определить символ, моделирующий исследуемое свойство. Анализируя предложенное в [17] понятие "алгоритмического измерения" можно притти к выводу о том, что оно является ни чем иным как отражением нового качества измерительных систем, связанного с переходом от обработки данных к обработке знаний.

Практическим критерием полезности новых методов и средств является повышение качества продукции, которое в конечном итоге может быть зафиксировано на выходном контроле или при испытаниях с помощью аттестованных средств измерений, контроля и испытаний.

Таким образом, производство вполне способно выступать в качестве своеобразного инкубатора новых методов параметрического контроля с функциями естественного отбора наилучших. При этом в разное время в зависимости от степени отработки технологии состав указанных методов может изменяться. Отсюда следует актуальность разработки специальных способов метрологической экспресс-оценки таких средств параметрического контроля с позиций цехового технолога.

Характерный для отечественной электронной промышленности подход к разработке средств параметрического контроля предусматривает главным образом контроль функциональных параметров. А поскольку в условиях серийного производства он реализуется в основном с помощью специализированных программно-аппаратных средств, то возможности контроля технологических параметров с помощью называемых средств весьма ограничены. Данное обстоятельство, по мнению автора, отчасти может быть объяснено тем, что в условиях заимствования конструктивно-технологических решений серийных ИС технология постоянно вынуждена "догонять" схемно-конструкторские "разработки". Наряду с очевидным, но практически трудно реализуемым в современных условиях выводом о необходимости опережающего развития технологии как условия выхода на уровень лучших мировых образцов следует, вероятно, обратить особое внимание на обеспечение гибкости средств параметрического контроля, например на базе агрегатно-модульного принципа компоновки средств технологического оснащения контроля (см. рис. 1.4 на с. 69).

Применение процессорных средств для реализации методов параметрического контроля в интерактивном режиме привело к появлению прикладных экспертных систем, способных выступить в качестве консультанта технолога в производстве ИС [18, 19] при оптимизации технологического контроля изделий микроэлектроники на осно-

ве экспертно-статистического анализа взаимосвязи видов и механизмов отказов с технологическими операциями [67, 119]. Экспертные системы, опирающиеся на методы и средства параметрического контроля, следует рассматривать как необходимый элемент смены поколений процессорных средств контроля (см. рис. 1.4 на с. 69), который предполагает [105]:

- создание и использование экспертных систем с базой знаний, описывающей конкретную предметную область общепринятыми и стандартными моделями, фактами и правилами, основанными на объективной научной информации и методологии;
- использование экспертных систем с базой знаний, формирующейся на основе индивидуального опыта конкретного высококвалифицированного пользователя или коллектива пользователей, экспертной информации, имеющейся в распоряжении создателей системы, набора возможных умозрительных ситуаций;
- применение экспертных систем, оперирующих некоторыми формальными правилами, приемами и моделями для организации измерительного эксперимента и обработки получаемой информации и обладающих более синтаксической (формальной), чем семантической (смысловой) организованностью.

Отмечается положительный эффект и от использования экспертных систем собственно при измерениях для достижения высоких метрологических характеристик средств измерений, надежности получения измерительной информации, реализации измерительной процедуры как таковой [105, с. 9], хотя проблем, требующих решения, здесь значительно больше, чем результатов.

Рассматривая адаптивные ПСК и экспертные системы как промежуточный этап к интеллектуальным ПСК, следует обратить особое внимание на задачу разработки интеллектуальных "дружественных"

интерфейсов, которые в достаточно отдаленном будущем [204] позволяют непрограммирующему пользователю с помощью автоматического программирования создавать программы выполнения технологических операций параметрического контроля. В то же время сегодня отдельные фрагменты указанных интерфейсов могут быть апробированы в обучающих программных продуктах и экспертных системах, создаваемых с использованием современных мультимедиа технологий и систем виртуальной реальности.

1.3. Пути повышения эффективности методов и средств параметрического контроля и задачи диссертационной работы

Выполненный в данной главе анализ состояния и тенденций развития методов и процессорных средств параметрического контроля интегральных схем позволяет обозначить некоторые пути повышения их эффективности:

— компьютеризация измерительных процедур, разработка и внедрение адаптивных и интеллектуальных средств параметрического контроля, в частности экспертно-статистических систем анализа взаимосвязи видов и механизмов отказов с технологическими факторами, создают определенные предпосылки для смещения центра тяжести прикладных научных исследований в область промышленного производства ИС и аппаратуры с их использованием, что приведет к повышению конкурентоспособности за счет приращения интеллектуального компонента продукции. Современное производство ИС в состоянии выполнить функции своеобразного инкубатора новых методов параметрического контроля изделий, включая отбор наиболее пригодных для различных стадий отладки технологического процесса;

- пересечение требований высоких технологий и физического подхода к обеспечению надежности ИС обуславливает актуальность развития квалигенетических методов, оперирующих характеристиками глубоких центров в полупроводниках. Именно глубокие центры, судя по публикациям, реально претендуют на роль звена, способного связать методы локальной и интегральной диагностики качества ИС, методы тонких физических исследований и термодинамический подход;
- максимальный эффект от применения новых методов и средств параметрического контроля микросхем возможен лишь в рамках системного подхода. Это означает согласованность технологического, физико-топологического, схемотехнического и функционально-логического уровней моделирования ИС, повышение роли фундаментальных дисциплин, междисциплинарных связей и навыков исследовательской работы в комплексной подготовке специалистов — носителей высоких технологий, а также разработку и применение новых средств информационного обмена и координации прикладных научных исследований в области обеспечения качества микросхем.

В рамках обозначенных направлений сформулированы основные задачи диссертационной работы:

1. Моделирование статистических процессорных средств параметрического контроля микросхем, включая разработку математических моделей алгоритмических измерений, реализующих накопление и статистическое сжатие многомерной информации о результатах контроля в системах интегральной диагностики технологических процессов.
2. Обоснование алгоритма технологической экспресс-оценки метрологических характеристик новых методов и средств параметрического контроля ИС.
3. Разработка, экспериментальная апробация и внедрение в производство:

- методики статистической адаптации измерителя квазидинамических параметров ТТЛ ИС;
- автоматизированных программно-аппаратных средств статистического регулирования технологического процесса изготовления многофункциональных КМОП ИС.

4. Теоретический и экспериментальный анализ возможностей решения основных проблем квалигенетического подхода к параметрическому контролю ИС на базе релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) путем технической реализации и исследования режима адаптивно-итеративного частотно-температурного сканирования.

5. Систематизация и развитие информационных технологий параметрического контроля ИС на базе исследований РСГУ с адаптивно-итеративным частотно-температурным сканированием.

6. Разработка и реализация предложений по координации, развитию и внедрению в производство и учебный процесс результатов научных исследований в области использования спектроскопии глубоких уровней для целей параметрического контроля ИС и электронных средств на их основе.

Перечисленные задачи поставлены и решены автором в ходе выполнения хоздоговорных НИР и исследований по госбюджетным научно-техническим программам и грантам, а также в процессе педагогической деятельности по подготовке специалистов в области конструирования и технологии электронных средств.

Глава 2.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИС

2.1. Модель многомерного распределения параметров элементов в задачах интегральной диагностики технологических процессов изготовления ИС

Областью эффективного применения контроля точности как средства интегральной диагностики [212] являются установившиеся технологические процессы. Создание диагностических систем контроля точности технологических процессов на базе процессорных средств операционного контроля привело к возникновению противоречия между изменившимся характером исходной статистической информации, с одной стороны, и аппаратом дисперсионного анализа как наиболее распространенным [235, 66, 48, 223] средством разделения дисперсий контролируемых параметров на составляющие, с другой стороны. Основная причина указанного противоречия — переход от операционного контроля параметров рабочих элементов и схем к контролю специальных тестовых ИС, элементов и структур, характерный для технологии БИС [48, 39]. Исходная статистическая информация для контроля точности в этих условиях представляет собой многомерную случайную последовательность, отличающуюся малым количеством попарно корре-

лированных длинных реализаций. Состав выборки весьма неоднороден, что и обуславливает низкую эффективность аппарата дисперсионного анализа, особенно при распределениях погрешностей, отличных от нормальных.

Альтернативным подходом является использование методов факторного анализа [276]. Для реализации этого подхода необходимо, во-первых, с учетом принятого варианта организации технологического процесса иметь модель взаимодействия исходных некоррелированных факторов, во-вторых, установить статистическую меру близости модели и реальной многомерной последовательности результатов операционного контроля. В качестве основы модели факторного анализа предлагается использовать симметричную аддитивную схему действия факторов, известную из теории корреляции [156]. В простейшем случае эта схема имеет вид:

$$\begin{cases} Y_1 = u + v_1; \\ Y_2 = u + v_2, \end{cases} \quad (2.1)$$

где Y_1 , Y_2 — случайные значения отклонений параметров тест-элементов от их номинальных значений, u — случайное значение отклонения общего, а v_1 , v_2 — характерных технологических факторов от их номинальных значений, причем u , v_1 , v_2 — взаимно линейно не коррелированы, то есть не связаны линейными корреляционными зависимостями. Соотношения для центральных моментов образуют систему

уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} D(Y_1) = D(u) + D(v_1); \\ D(Y_2) = D(u) + D(v_2); \\ cov(Y_1, Y_2) = D(u); \\ \mu_3(Y_1) = \mu_3(u) + \mu_3(v_1); \\ \mu_3(Y_2) = \mu_3(u) + \mu_3(v_2); \\ \mu_{12}(Y_1, Y_2) = \mu_3(u); \\ \mu_4(Y_1) = \mu_4(u) + \mu_4(v_1) + 6D(u)D(v_1); \\ \mu_4(Y_2) = \mu_4(u) + \mu_4(v_2) + 6D(u)D(v_2); \\ \mu_{22}(Y_1, Y_2) = \mu_4(u) + D(u)[D(v_1) + D(v_2)] + D(v_1)D(v_2), \end{array} \right. \quad (2.2)$$

где $D(x)$ — дисперсия (второй основной центральный момент) случайной величины x , в качестве которой могут быть Y_1, Y_2, u, v_1, v_2 ; $cov(Y_1, Y_2)$ — ковариация (смешанный центральный момент второго порядка) случайных величин Y_1 и Y_2 ; $\mu_3(x)$ — третий основной центральный момент случайной величины x ; $\mu_{12}(Y_1, Y_2)$ — смешанный центральный момент третьего порядка; $\mu_4(x)$ — четвертый основной центральный момент случайной величины x ; $\mu_{22}(Y_1, Y_2)$ — смешанный центральный момент четвертого порядка.

Величины в левой части уравнений (2.2) определяются с помощью первичной статистической обработки массива результатов операционного контроля \vec{Y} . Если существование факторов u, v_1, v_2 обосновано с точки зрения сущности исследуемых явлений, то правомерна постановка задачи вероятностной идентификации (определения моментов распределений) этих факторов при известных $D(Y_1), D(Y_2), cov(Y_1, Y_2)$ и т.д. решением системы уравнений (2.2).

В ходе решения диагностических задач контроля точности была изучена структура реальных симметричных схем действия факторов, отличающихся многоуровневым характером. Для их описания пред-

лагается использовать связные ациклические направленные графы — выходящие или корневые деревья [275]. Каждому ребру графа ставится в соответствие определенная составляющая технологической погрешности. Статистические характеристики составляющих погрешностей входят в набор инвариантов графа, т.е. чисел, которые принимают одно и то же значение на любом графе, изоморфном данному. Для повышения наглядности введем дополнительные ограничения:

- разрешенными будем считать пути (цепи) от точки 0 к точкам Y_1 , Y_2 согласно направленности графа;
- разрешенные пути от источника 0 до вершин с нулевой полустепенью исхода будем именовать полными путями;
- два ребра графа равны между собой, если им соответствует один и тот же набор инвариантов;
- количество вершин с нулевой полустепенью исхода определяет размерность графа;
- проекции ребер графа на произвольно выбранную ось $A - A$ равны дисперсиям соответствующих факторов. Для краткости будем в дальнейшем именовать граф, определенный таким образом, графом погрешностей.

Граф погрешностей может быть полным и приведенным. Поясним вводимые термины на примере. Структура полного графа погрешностей для n партий ИС по три пластины, содержащих по четыре тест-структуры из двух элементов Y_1 и Y_2 каждая, изображена на рис. 2.1 слева от оси $A - A$, а на рис. 2.2 изображены структуры полного (слева) и приведенного (справа) графов погрешностей технологического процесса изготовления тонкопленочных плат с резисторами.

Погрешность $\Delta(0 - 1.0)$ обусловлена групповым характером обработки партии. Погрешность $\Delta(1.0 - 1.1)$ характеризует влияние общей пластины и операций, производимых отдельно с каждой пластиной, а

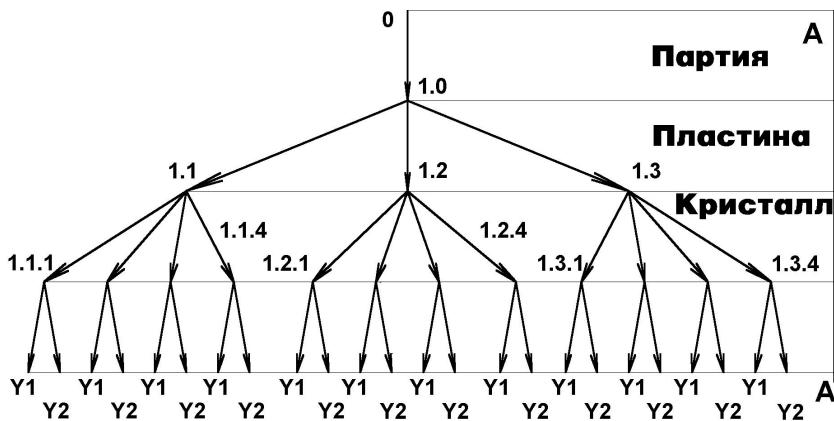


Рис. 2.1. Структура полного графа погрешностей



Рис. 2.2. Структуры полного и приведенного графов погрешностей

$\Delta(1.1 - 1.1.1)$ обусловлена наличием макронеоднородных свойств пластины и отклонениями различных пространственных диаграмм процессов обработки от равномерных, приводящими к возникновению общих составляющих погрешностей для элементов тест-структуры. Характерные составляющие $\Delta(1.1.1 - Y_1)$ и $\Delta(1.1.1 - Y_2)$ отражают индивидуальность тест-элементов Y_1 и Y_2 в пределах тест-структуры. По сравнению с известным векторным представлением погрешностей [91] предложенная графическая интерпретация отличается большей информативностью при решении диагностических задач, является графической формой паспорта стабильности технологического процесса, отражает принятый вариант организации операционных и производственных партий.

При определении инвариантов графа погрешностей сначала рассматриваются все возможные пары, позволяющие определить выборочные значения дисперсий вида $D^*[\Delta(0 - 1.0)]$. Если все полученные при этом выборочные значения не выходят за пределы установленного доверительного интервала при выбранном уровне значимости, то определяется среднее значение полученного массива $\bar{D}^*[\Delta(0 - 1.0)]$. В противном случае необходимо уточнять модель формирования погрешностей либо увеличивать длину реализации. Аналогично определяются составляющие любого уровня. Отдельные составляющие будут значимыми, если они существенно больше цены деления измерительного прибора, используемого для операционного контроля. Стандарты по контролю точности рекомендуют использовать измерительные средства с ценой деления шкалы не более $1/6$ минимального значения среднего квадратического отклонения случайной погрешности. Если это условие не выполняется, то соответствующее ребро графа погрешностей исключается и схема пересматривается.

В качестве оценки точности определения дисперсии $\bar{D}^*[\Delta(0 - 1.0)]$

целесообразно использовать предел, к которому стремится эта оценка при увеличении количества рассмотренных пар,

$$D[\bar{D}^*[\Delta(0 - 1.0)]] = \frac{2}{n} \bar{D}^{*2}[\Delta(0 - 1.0)], \quad (2.3)$$

а при оценке точности выборочных значений дисперсий $D^*[\Delta(1.0 - 1.1)]$, $D^*[\Delta(1.1 - 1.1.1)]$, $D^*[\Delta(1.1.1 - Y1)]$ и т.д., кроме соотношения (2.3) необходимо учитывать коррелированность выборочных значений дисперсий $D^*[\Delta(0 - 1.0)]$, $D^*[\Delta(0 - 1.1)]$, $D^*[\Delta(0 - 1.1.1)]$, так как $D^*[\Delta(1.0 - 1.1)] = D^*[\Delta(0 - 1.1)] - D^*[\Delta(0 - 1.0)]$ и т.д. Например (см. рис. 2.2), если $D^*[\Delta(1.0 - 1.1)] \approx D^*[\Delta(1.0 - 1.2)] \approx D^*[(\Delta(1.0 - 1.3))]$ в статистическом смысле при заданном уровне значимости и можно найти среднее значение \bar{D}^* , то в первом приближении $D(\bar{D}^*) = \frac{2}{3}n\bar{D}^{*2}$.

Описание исходного статистического массива в виде графа погрешностей позволяет избежать характерных ошибок при оценке представительности так называемой "смешанной статистики", в которой наряду с независимыми результатами наблюдений имеются коррелированные. Для этого предлагается оперировать понятием "объем выборки относительно источника погрешностей". В соответствии с этим понятием при объединении всех двенадцати реализаций в одну (см. рис. 2.1) объем получившегося массива относительно источника $\Delta(1.0 - 1.1)$ будет равен $3n$, а относительно источника $\Delta(1.1 - 1.1.1) — 12n$.

Обоснование структуры полного графа погрешностей, описывающего управляемый технологический процесс, начинается с детально-го априорного анализа всех технологических факторов, систематизации их по уровням симметричной схемы действия факторов. Результаты анализа оформляются в виде таблицы, которая является приложением к графу погрешностей наряду с таблицей инвариантов графа. Будучи введенными в память компьютера, эти таблицы используются для выдачи информационно-советующих сигналов управления, указывая с

точностью до группы факторов на причину нестабильности процесса. Количество групп факторов определяется организацией технологического процесса, точностью измерений при проведении операционного контроля, конструкцией тест-элементов и структур.

Использование статистических характеристик в качестве параметров технологического процесса при оценке точности предполагает случайный характер погрешностей изготовления ИС, случайность и стационарность многомерных последовательностей результатов операционного контроля. Стационарность при использовании дисперсионного анализа обычно трактуется как воспроизводимость соответствующих распределений (дисперсий), а оценка случайности отклонений параметров тест-структур от номинальных значений, как правило, не проводится, что существенно снижает достоверность статистических оценок. Если нестационарность случайной последовательности указывает на наличие "эффекта оператора" или предупреждает о возможном отклонении точности процесса, то отрицательный результат при оценке случайности чаще всего свидетельствует о существовании невыявленных в ходе априорного технологического анализа корреляционных связей между параметрами тест-элементов. Их влияние, как показывает практика, приводит к ошибочным выводам о нестационарности стационарных технологических процессов и другим характерным ошибкам, о которых упоминалось выше.

При малом количестве длинных реализаций оценку стационарности и случайности удобно выполнять с помощью универсальных непараметрических критериев серий и инверсий [97], для применения которых вполне достаточно даже одной реализации. Разработанный автором [129] вариант алгоритма оценки основан на подведении итогов "голосования" по результатам подсчета инверсий и серий при двух уровнях отсчета, соответствующих математическому ожиданию и медиане.

Количество смежных интервалов, на которые делится реализация, задается исследователем.

В ходе практической аprobации были обследованы 72 партии тонкопленочных плат. Из партии выбирались две подложки, на каждой из которых на пяти платах контролировались до подгонки сопротивления трех одинаковых по номинальной величине резисторов. Установлено, что $\sigma[\Delta(0-1.0)] = 6,5\%$, $\sigma[\Delta(1.0-1.1)] = 3,1\%$, $\sigma[\Delta(1.1-1.1.1)] = 2,9\%$, $\sigma[\Delta(1.1.1 - Y1)] = 1,9\%$. Относительная погрешность измерений 0,1%, поэтому все составляющие дисперсии значимы. Оценка стационарности и случайности проводилась при уровне значимости 5% и количестве интервалов, равном шести. Результаты обработки (см. табл. 2.1) дают достаточные основания для принятия гипотез о случайности и стационарности технологического процесса до подгонки.

Таблица 2.1. Оценка случайности, стационарности и соответствия нормальному закону

Оценка	Случайность		Стационарность		Нормальный закон	
	за	против	за	против	за	против
До подгонки	30	0	24	6	26	4
После подгонки	10	0	0	10	5	5

После подгонки контролировались сопротивления двух резисторов на пяти платах каждой из ста подложек, взятых из разных партий. Импульсно-токовая подгонка с ручной регулировкой параметров импульсов приводит к появлению "эффекта оператора" — доминирующего субъективного случайного фактора, и, как следствие, процесс становится нестационарным. Соответствующие оценки выполнены при количестве интервалов, равном десяти. В обоих случаях процесс удовлетворяет принятому критерию случайности, т. е. дополнительных коррек-

ляционных связей не обнаружено. Результаты проверки гипотезы о соответствии закона распределения погрешностей в пределах реализации нормальному по критерию χ^2 -Пирсона при том же уровне значимости косвенно согласуются с результатами оценки стационарности.

Совместное использование факторного анализа и графа технологических погрешностей открывает новые возможности применения контроля точности для диагностики технологических процессов микроэлектроники по результатам операционного контроля параметров тестовых структур, элементов и интегральных схем. Эти возможности обусловлены наглядностью предложенной модели, отражающей поточно-групповую организацию технологических процессов, а также повышенной достоверностью статистических оценок, которая в основном определяется длиной реализации, а не их количеством. Дисперсионный анализ, как основа методики контроля точности, очевидно, будет более эффективным для коротких реализаций и больших однородных выборок. В целом указанные подходы не исключают, а дополняют друг друга.

2.2. Статистическая разрешающая способность процессорных средств параметрического контроля ИС

Процессорные средства контроля (ПСК) ИС, появившиеся вследствие компьютеризации процедуры контроля, обусловливают возможность выхода на качественно новый уровень удовлетворения требований, предъявляемых к указанной технологической операции.

Совершенствование средств входного контроля, наряду с компьютеризацией и благодаря ей, с целью повышения информативности предполагает использование различных импульсных и непрерывных дестабилизирующих воздействий и переход от точечных оценок состо-

ятия ИС к оценке поведения в процессе или после воздействия [41]. Информативные параметры получаются с помощью различных сверток, применяемых в теории распознавания образов. При этом возникает проблема экспресс-оценки метрологических характеристик нового средства контроля до проведения полной метрологической аттестации. Особенности ПСК позволяют в качестве такой оценки предложить определение разрешающей способности средства контроля, характеризующей соотношение погрешностей измерений и технологической погрешности, отражающей производственный разброс параметров. Следует также иметь в виду, что за развитием методов входного контроля заинтересованы следят изготовители элементной базы, и возможность быстрой предварительной оценки точности средств контроля, привязанной к реальным технологическим процессам, явится предпосылкой к внедрению новых методов контроля в производство ИС с целью повышения качества продукции.

В работе [358] рассматривается влияние ошибок измерений на статистически значимые параметры, связанные с технологическими разбросами ИС. Автор, считая ошибки измерений несистематическими и нормально-распределенными с известной дисперсией, вводит формальную оценку их влияния при вычислении доверительных интервалов, проверке статистических гипотез и предсказании требуемых объемов партий образцов для заданного разброса ошибок измерений. Однако в данной работе не приводится алгоритм экспериментальной оценки дисперсии случайной ошибки измерений.

Программно-аппаратная реализация автокалибровки, компенсации систематической составляющей погрешности измерений, уменьшения влияния случайной составляющей за счет усреднения серии измерений, алгоритмические ловушки выбросов (грубых погрешностей измерений) и другие приемы [171] представляют собой характерные

особенности ПСК. Принимая их во внимание с учетом влияния на точность измерений контактирующих приспособлений [287], в первом приближении можно согласиться с автором [358] и считать результатирующую погрешность контроля случайной. Такое предположение, если оно, конечно, справедливо, позволяет, обратившись к факторному анализу и симметричной схеме действия факторов, предложить модель взаимосвязи массивов результатов основного и повторного контроля партии изделий [130].

Модель предполагает формирование отклонения Δx параметра изделия от среднего значения \bar{x} в виде суммы технологической Δ_T и измерительной Δ_I погрешностей. Если контроль партии изделий объемом n провести дважды, то коэффициент парной линейной корреляции результатов первого контроля x_O с результатами повторного контроля x_{Π} определится соотношением

$$r = \frac{\text{cov}(x_O, x_{\Pi})}{\sigma(x_O)\sigma(x_{\Pi})} = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_T^2 + \sigma_I^2}, \quad (2.4)$$

где $\text{cov}(x_O, x_{\Pi})$ — ковариация случайных величин x_O и x_{Π} ; σ_T и σ_I — среднеквадратические отклонения погрешностей изготовления и измерения. Условия, при которых технологические погрешности можно считать случайными, рассмотрены в [130]. Разрешающая способность ПСК, представляющая собой отношение σ_T/σ_I , определяется из формулы (2.4) через коэффициент корреляции

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \sqrt{\frac{r}{1 - r}}. \quad (2.5)$$

Доверительный интервал выборочного значения коэффициента корреляции может быть преобразован в соответствующий интервал для разрешающей способности. Таким образом, не определяя абсолютных

значений σ_T и σ_H , можно оценить их отношение, однако положительный эффект этим обстоятельством не ограничивается. Коэффициент парной линейной корреляции, как известно [115], является частным случаем обобщенного коэффициента корреляции

$$\Gamma = \frac{\sum a_{ij}b_{ij}}{\sqrt{\sum a_{ij}^2 \sum b_{ij}^2}}, \quad (2.6)$$

где a_{ij} — x -оценка, справедливая для каждой пары элементов основного массива результатов контроля и обладающая свойством $a_{ij} = -a_{ji}$; b_{ij} — y -оценка, справедливая для каждой пары элементов массива результатов повторного контроля и обладающая свойством $b_{ij} = -b_{ji}$.

Другим частным случаем обобщенного коэффициента корреляции является предложенный Спирмэном [115] коэффициент ранговой корреляции, который в случае несвязанных рангов имеет вид:

$$r_S = 1 - \frac{6S(d^2)}{n^3 - n}, \quad (2.7)$$

где $S(d^2)$ — сумма квадратов разностей рангов, определяемая как

$$S(d^2) = \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2,$$

где $\vec{A}_i = \{ A_i \}$ — первый вектор рангов (массив результатов основного контроля), $\vec{B}_i = \{ B_i \}$ — второй вектор рангов (массив результатов повторного контроля). Поскольку подходы (2.4) и (2.7) взаимосвязаны, то правомерным является распространение области применения формулы (2.5) на неизмерительные ПСК, что, в свою очередь, позволяет решать задачи сравнения по эффективности вариантов измерительных и неизмерительных ПСК.

Экспериментальная проверка предположения о случайности инструментальной погрешности при наличии массивов результатов основного и повторного контроля партии изделий с помощью измерительного ПСК в виде числовых значений параметров может быть выполнена для последовательности, образованной разностями значений основного и повторного измерений, известными методами [97].

Предложенная характеристика ПСК была успешно использована для решения ряда практических задач контроля элементной базы в условиях производства и при проведении экспериментальных исследований с целью разработки новых ПСК [258, 244, 250, 242, 261, 248, 245, 247, 240, 260, 249, 243, 251, 254, 267, 246, 255, 259, 256, 268, 263].

2.3. Статистические процессорные средства параметрического контроля ИС

2.3.1. Измеритель квазидинамических параметров ТТЛ ИС

В ходе выполнения научно-исследовательских работ по заказу НИИ прикладной механики (г. Москва), в которых автор участвовал в качестве ответственного исполнителя, научным руководителем НИР профессором ВлГУ В.Н. Устюжаниновым [240, 261] в 1990 г. была выдвинута гипотеза о существовании в пределах совокупности производственных партий ТТЛ ИС стохастической зависимости между коллекторным током выходного транзистора ТТЛ вентиля, включенного по схеме рис. ?? (а), и его временными параметрами в окрестности определенного среднего значения указанного тока. Специфика применявшейся заказчиком технологии сборки гибридных интегральных микроприборов (МПБ) предусматривала монтаж без выводных кристаллов на тонкопленочные коммутационные платы и не более чем однократное

касание контактных площадок кристаллов ТТЛ ИС частного применения измерительными зондами установки

Глава 3.

ЧАСТОТНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

3.1. Техническая реализация частотного сканирования в релаксационной спектроскопии глубоких уровней

3.1.1. Частотное сканирование: от обзорно-индикаторного к информационно-измерительному режиму

Эффективность релаксационной спектроскопии глубоких уровней (точность определения параметров ГУ, разрешающая способность) повышается с увеличением числа значений так называемых "временных окон" — частот опорного сигнала, подаваемого на второй вход аналогового перемножителя селектора релаксационных сигналов [71, 60, 20]. Это обстоятельство позволяет предположить существование при определенных условиях перехода количественных изменений в качественные вследствие увеличения количества "временных окон". В частности, новое качество вполне может проявиться в виде предпосылок решения основных проблем РСГУ, сформулированных в п.1.1. К ним относятся прежде всего проблемы моделирования селектора релаксационных сигналов, повышения точности и разрешающей способности спектрометрии. Сюда примыкают также проблемы интеллектуализации процессорных средств контроля, отмеченные в п.1.2 и отражающие смену поколений от ПСК с жестким программированием к адаптивным и далее к интеллектуальным. Эти проблемы прежде всего связаны с реализацией возможностей процессорной обработки результатов измере-

ний, таких как встроенная автокалибровка, алгоритмическая ловушка выбросов, усреднение результатов по выборке и т. п., что существенно облегчается при неизменной температуре образца. Таким образом приходим к выводу о необходимости исследования режима РСГУ, когда длительность временного окна изменяется при постоянной температуре. Температура, в свою очередь, фиксируется с помощью системы управления в широком диапазоне, характерном для РСГУ. Назовем такой режим РСГУ частотно-температурным сканированием [262].

Обычно изменение частоты опорного сигнала по тому или иному закону осуществляется на фоне температурного сканирования — относительно медленного (непрерывного и монотонного) повышения температуры образца путем нагрева предварительно охлажденного жидким азотом криостата с образцом. Такой режим впредь будем называть температурно-частотным сканированием, подчеркивая тем самым, что температура изменяется при постоянной длительности временного окна.

У разработчиков аппаратных средств релаксационных спектрометров пока нет общего мнения относительно оптимального вида закона изменения частоты опорного сигнала. Известны однако успешные попытки увязать этот закон с алгоритмами обработки экспериментальных данных [20, 60]. По мере совершенствования аппаратных средств возможна реализация режима частотного сканирования, при котором частота опорного сигнала селектора изменяется в широких пределах по определенному закону при постоянной температуре. Такой режим в качестве обзорного (индикаторного) заложен в конструкцию спектрометра глубоких уровней DLS-82E венгерской фирмы SEMITRAP, основные характеристики которого приведены в приложении Б. В частности, синтезатор частот этого измерителя впервые, если верить рекламному проспекту фирмы, реализует квазиэкспоненциальный закон изменения

частоты опорного сигнала, приближенно определяемый соотношением

$$F_0 = 2^{-n}(1 - i/128)F_{max}, \quad (3.1)$$

где $n = 0,1\dots15$; $i = 0,1\dots63$; $F_{max} = 2500$ Гц.

Порядковый номер m "временного окна" при сканировании связан с переменными n и i соотношением

$$m = 64n + i + 1. \quad (3.2)$$

Цикл по i является внутренним, а по n — внешним. Если при построении частотного скана (графика зависимости DLTS-сигнала от частоты) по оси частот выбрать логарифмический масштаб, то экспериментальные точки, соответствующие отдельным "временным окнам", расположатся достаточно равномерно по частоте. При этом первые 854 значения частоты F_0 , рассчитанные по формулам (3.1) и (3.2), перекроют диапазон в четыре декады от 2500 Гц до 0,25 Гц. Использование всех 1024 значений, как показала практика работы со спектрометром при рабочих температурах выше 250 К, нецелесообразно, так как при $m = 1024$ $F_0 = 0,0387$ Гц, а максимальное значение постоянной интегрирования спектрометра всего 30 с, что не позволяет избавиться на аппаратном уровне от влияния инфразвуковых шумов и дрейфов аналоговой части измерительного тракта.

Временные диаграммы, характеризующие процесс аппаратной селекции релаксационного сигнала приведены на рис. 3.1.

Измерительная часть спектрометра имеет в своем составе типовой набор блоков: емкостной мост, работающий на частоте 1 МГц и имеющий на выходе фазовый детектор с электромеханическим (медленным) и электронным (быстрым) компенсаторами разбаланса моста, аппаратный селектор релаксационного сигнала с переменным коэффициентом

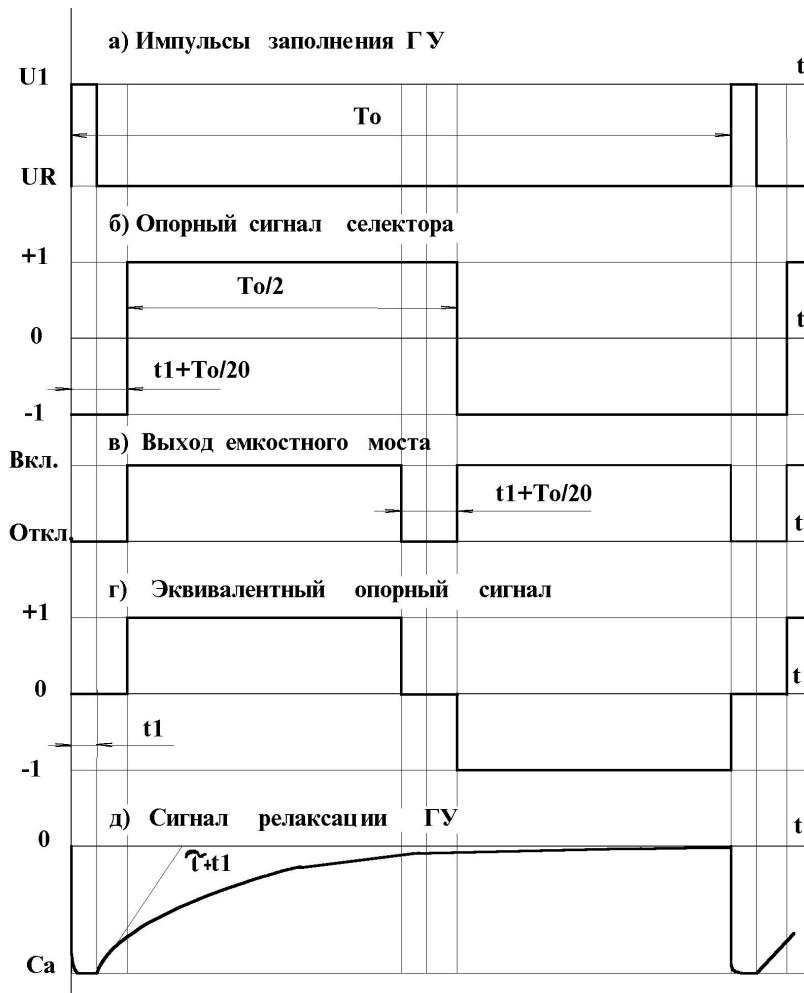


Рис. 3.1. Временные диаграммы спектрометра DLS-82E

передачи (чувствительностью), блок логики, управляющий подачей напряжений U_R , U_1 , U_2 на образец и обеспечивающий кратковременное закорачивание выхода емкостного моста для исключения перегрузки фазового детектора и селектора на время $t_1 + 0,05T_0$ при подаче заполняющего импульса, а также упомянутый выше синтезатор частот и блок двенадцатиразрядного цифроаналогового преобразования с восьмиканальным мультиплексором и интерфейсом IEEE-488 для связи с компьютером в режиме односторонней передачи информации от спектрометра к компьютеру.

Режим частотного сканирования в сопроводительной документации к спектрометру DLS-82E рекомендуется для предварительного выбора оптимальной частоты опорного сигнала для температурного сканирования, которое используется в качестве основного измерительного режима. Индикаторным режимом частотного сканирования, когда частота принимает последовательно в соответствии с (3.1) и (3.2) 1024 значения в течение 2 — 6 минут, является потому, что время, в течение которого значение частоты опорного сигнала остается неизменным, существенно меньше не только постоянной интегрирования I_T селектора релаксационного сигнала (0,3 с — 30 с), но даже и периода опорного сигнала при приближении t (порядкового номера временного окна) к 1024. В результате выходной сигнал селектора существенно искажается и по этой причине не может быть использован для проведения измерений, несмотря на встроенный в прибор DLS-82E быстродействующий восьмиканальный двенадцатиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с интерфейсом IEEE-488 для связи с компьютером.

3.1.2. Разработка измерительно-вычислительного комплекса на базе спектрометра DLS-82E

Качественно новые возможности режима частотного сканирования удалось обнаружить только после превращения его из индикаторного в измерительный путем доработки и сопряжения базового измерителя с управляющим контроллером. Такая доработка была выполнена в рамках госбюджетной НИР по научно-технической программе ГК ВШ "ЭКНП — 2000" под руководством и при участии автора [266, 139, 141]. После доработки управление синтезатором опорных частот прибора DLS-82E передано внешнему контроллеру, на который возложены задачи синхронизации в реальном времени процессов установления и контроля выходного DLTS-сигнала базового спектрометра, а также мониторирование других сигналов, характеризующих процесс емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней. К ним относятся: остаточное напряжение разбаланса емкостного моста (C), фактические значения уровней опустошения ГУ (UR), заполнения первым ($U1$) и вторым ($U2$) импульсами, температура образца (T), активная проводимость (G), входное напряжение синтезатора частот (F), длительности заполняющего импульса t_1 и временного окна $T_E = 1/F_E$. Эта информация регистрируется практически одновременно с основным выходным DLTS-сигналом. Для повышения точности измерений постоянного напряжения вместо встроенного АЦП через специально сконструированный программно-управляемый блок коммутации соответствующие аналоговые выходы DLS-82E могут быть подключены к универсальному цифровому вольтметру В7-18. Выход импульсного синхросигнала (TS) (триггера запуска) с длительностью заполняющего импульса подключен к цифровому частотомеру Ч3-54, работающему в режиме либо измерения частоты (периода) опорного сигна-

ла, либо длительности заполняющего импульса в зависимости от положения переключателей. Оба цифровых измерителя через специальные модули сопряжения подключены к тому же внешнему контроллеру и управляются программно, образуя таким образом автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс первичного сбора и обработки экспериментальной информации (см. рис. 3.2). Подача с ППИ верхнего (по схеме рис. 3.2) контроллера сигнала "старт" устанавливает синтезатор частот спектрометра DLS-82E в начальное положение, соответствующее частоте опорного сигнала 2500 Гц. Импульсный сигнал "строб" меняет значение этой частоты в соответствии с (3.1) и (3.2).

В качестве внешнего контроллера выбрана микроЭВМ "Электроника МС0513", имеющая шестнадцатиразрядный программируемый параллельный интерфейс (ППИ) и магистральный параллельный интерфейс (МПИ), к которому через контроллер (КНГМД) подключается накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД) с форматом записи, совместимым с IBM PC. Допускается в отдельных случаях использование в качестве контроллера менее мощной микроЭВМ "Электроника МС0510.01" с аналогичным ППИ в составе локальной вычислительной сети (ЛВС) КУВТ-86 с центральной ЭВМ типа "Электроника МС0521", укомплектованной накопителем на гибких магнитных дисках с форматом записи, также совместимым с IBM PC. Аппаратные средства сопряжения контроллера с измерительными приборами и коммутатором (специализированные интерфейсы) через двунаправленную шину данных (ШД) и одностороннюю адресную шину (ША) (см. рис. 3.2) выходят на программируемый параллельный порт контроллера. Информационная емкость ША и ШД позволяет увеличить при необходимости количество специализированных интерфейсов до 15-ти. Каждый специализированный интерфейс имеет аппаратно установленный собственный адрес. Унифицированный протокол информационно-

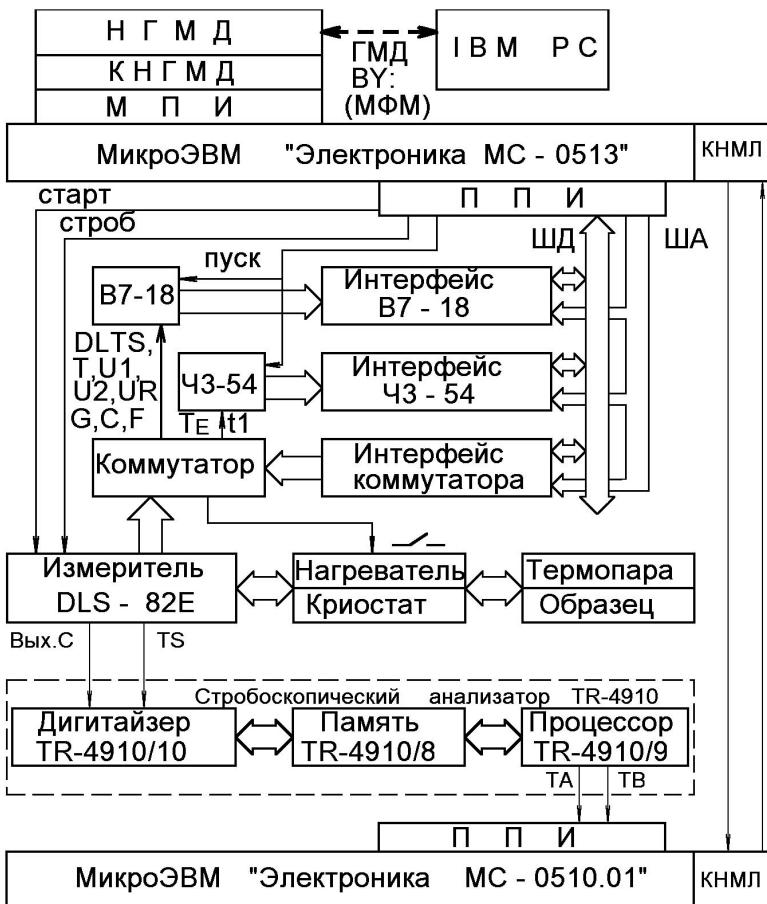


Рис. 3.2. Структурная схема АСНИ РСГУ

го обмена предусматривает одновременный запуск всех измерительных приборов сигналом "пуск" и последовательное считывание результатов измерений с каждого из них в соответствии с временной диаграммой драйвера (см. рис. 3.3). Контроллер работает в режиме реального времени и имеет встроенный таймер.

Для регистрации формы релаксационного сигнала выход фазового детектора измерителя DLS-82E (Вых. С) подключается к входу стробоскопического анализатора TR-4910 венгерской фирмы EMG, а синхросигнал TS подается на вход схемы внешнего запуска анализатора. Стробоскопический анализатор состоит из трех соединяемых между собой блоков — дигитайзера, памяти и процессора и может выполнять в числе прочих функцию цифрового аппаратного интегрирования входного сигнала с числом повторений до 2^{12} . Стробоскоп оцифровывает осциллограмму за 1024 прохода в режиме реального (проход — период) или эквивалентного (проход — несколько периодов) времени в зависимости от установленного временного разрешения и может работать в режиме цифрового интегрирования (накопления) с числом повторений стробограммы 2^{AF} , где $AF = 0, 1, 2, 4, 8, 12$ — параметр интегрирования. Переход к режиму эквивалентного времени обусловлен нехваткой времени для запоминания оцифрованного сигнала. Увеличение параметра интегрирования, с одной стороны, позволяет компенсировать влияние случайных флюктуаций релаксирующей емкости, но, с другой стороны, увеличивает время, в течение которого температура образца должна поддерживаться постоянной с достаточно высокой точностью. Практически это обеспечить довольно трудно, поэтому возникает дополнительная ошибка регистрации релаксационного сигнала, которая возрастает в режиме интегрирования с увеличением параметра AF .

На рис. 3.4 показана форма релаксационного сигнала, полученная с помощью анализатора TR-4910 при значениях фактора усреднения

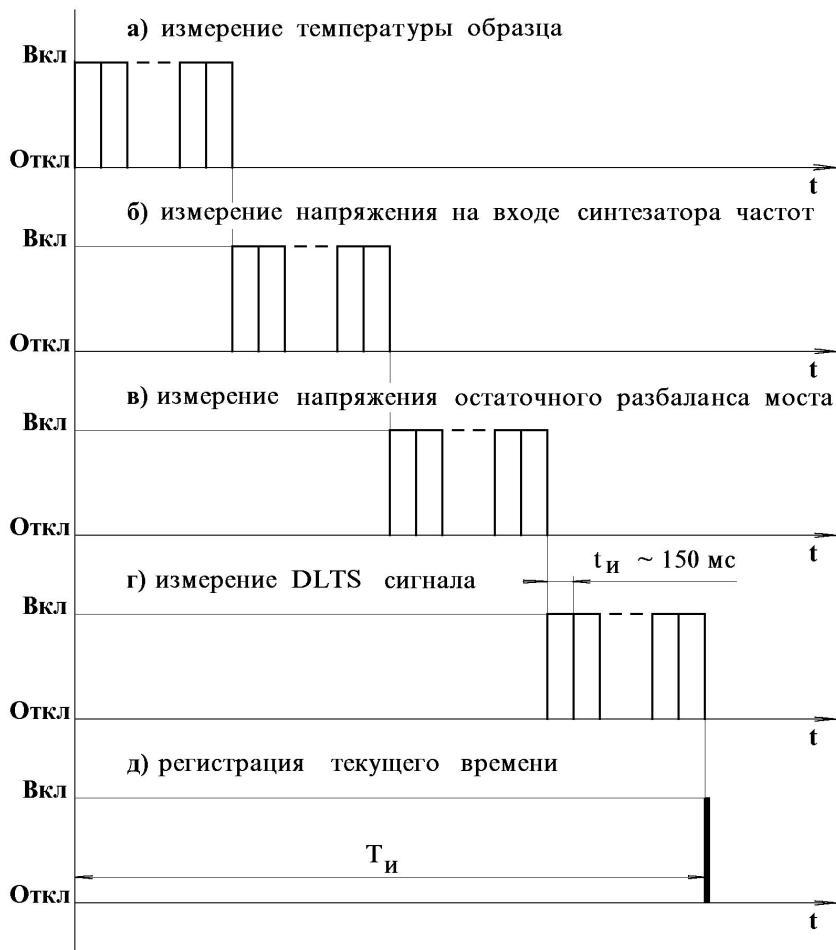


Рис. 3.3. Временные диаграммы драйвера ИВК при фиксированном значении опорной частоты селектора релаксационных сигналов

$AF = 0$ (а) и $AF = 12$ (б). Обращает на себя внимание положение уровней выходного сигнала емкостного моста в моменты его шунтирования. Это положение определенным образом связано с остаточным разбалансом измерительного моста (постоянное напряжение на выходе С). Наблюдение за этим выходом дает возможность предложить алгоритм адаптации спектрометра по отношению к показанным на рис. 3.4 искажениям релаксационного сигнала. Модель (3.20) делает возможной также адаптацию DLS-82E по температуре образца.

На рис. 3.5 приведены исходные стробограммы сигналов с выхода емкостного измерительного моста для эталонного диода из комплекта прибора DLS-82E (а) и диода КД-521Б (б). Образцы по эпитаксиально-планарной технологии разными изготовителями и имеют близкие значения емкости запертого $p^+ - n$ -перехода, поэтому существенная разница в амплитудах релаксационных сигналов существует о различной концентрации ГУ в базах этих диодов (см. п. 1.1.4). Поскольку высокая концентрация ГУ является одной из возможных причин неэкспоненциальности релаксационных сигналов, то для диода КД-521Б можно прогнозировать более высокую степень отклонения его релаксационного сигнала от экспоненциального. Следует отметить также наличие отклонений наблюдаемых релаксационных сигналов на так называемых интервалах молчания измерительного емкостного моста от временной диаграммы прибора DLS-82E (рис. 3.1). Эти отклонения должны найти соответствующее отражение в математической модели аппаратной селекции релаксационного сигнала, иначе результаты DLTS будут искажены.

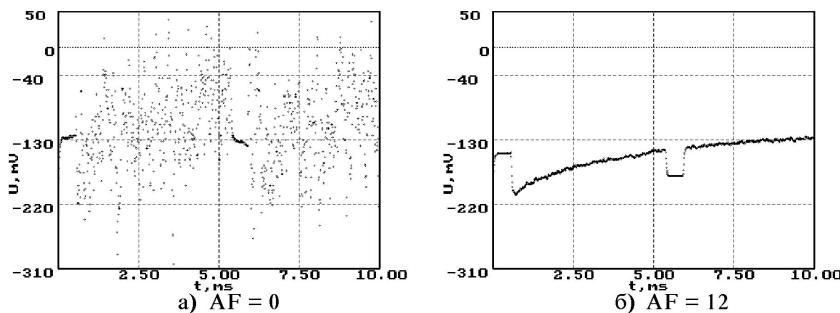


Рис. 3.4. Форма релаксационного сигнала эталонного образца до и после цифрового интегрирования

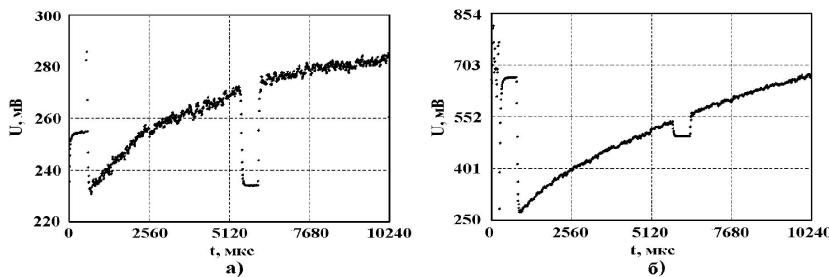


Рис. 3.5. Стробограммы эталонного диода и КД-521Б

3.1.3. Модернизация подсистемы автоматического управления температурой образца

В конструкцию системы охлаждения образца внесены изменения с целью увеличения количества способов охлаждения криостата и более экономичного расходования жидкого азота. Штатный криостат из комплекта поставки DLS-82E предусматривает при охлаждении непосредственное погружение в термос с жидким азотом. Его изотермический корпус имеет встроенный резистивный нагреватель, термопарный датчик температуры и симметрично расположенное с ним контактирующее приспособление для подключения образца, размещаемого в корпусе маломощного транзистора с тремя выводами или малогабаритного диода с двумя выводами.

Для обеспечения возможности охлаждения образца с помощью термоэлектрического модуля охлаждения на эффекте Пельтье корпус криостата дополнительно термостатирован пенополиуретаном с отражающим тепловым экраном из алюминиевой фольги со всех сторон, кроме нижней крышки, к которой могут присоединяться либо термоэлектрический модуль типа МТ 1-48, разработанный АО НЦ "Менатехник", либо теплопроводы различной конструкции, погружаемые в термос с жидким азотом емкостью около литра. Термос плотно прижимается к пенополиуретановой обшивке и таким образом уменьшаются потери хладоагента за счет кондуктивного теплообмена и диффузии. Конструкция термостата предусматривает также подключение азотного питателя для долговременного поддержания низких температур при минимальном расходе жидкого азота. За универсальность конструкции пришлось заплатить повышением нижнего температурного предела примерно до 100 К, однако при необходимости всегда можно вернуться к исходному варианту с погружением криостата в жидкий азот для

работы в диапазоне 77 К — 100 К. Охлаждение образца с помощью термоэлектрического модуля на эффекте Пельтье обеспечивает относительно небольшой диапазон изменения рабочих температур (до 260 — 320 К), однако при этом существенно упрощается поддержание постоянной температуры образца в указанном диапазоне по сравнению с использованием жидкого азота для охлаждения. Такое сужение диапазона рабочих температур вполне отвечает требованиям стандарта ASTM F 978-90 для одного ГУ при условии, что ГУ наблюдается в диапазоне двух декад изменения τ .

На контроллер также возложены функции измерения и импульсного управления температурой образца во времени. Управление базируется на модели импульсного нагрева криостата с образцом, которая имеет вид: а) при $t < t_3$:

$$T(t) = T_{\text{нач}}(t); \quad (3.3)$$

б) при $t < t < t + t_{\text{ит}}$:

$$T(t) = T_{\text{нач}} + K_{\text{тит}} P_{\text{отн}} \left(1 - e^{-\frac{t - t_3}{\tau_{\text{нап}}}} \right); \quad (3.4)$$

в) при $t > t_3 + t_{\text{ит}}$:

$$T(t) = T_{\text{нач}} + K_{\text{тит}} P_{\text{отн}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ит}} - t_3}{\tau_{\text{нап}}}} \right) e^{-\frac{t - t_{\text{ит}} - t_3}{\tau_{\text{сп}}}}, \quad (3.5)$$

где t_3 — задержка распространения фронта теплового импульса, $T_{\text{нач}}$ — начальное значение температуры, $t_{\text{ит}}$ — длительность теплового

импульса, K_T — коэффициент теплового преобразования электрической энергии нагревателя в тепловую, $t_{\text{ин}}$ — длительность импульса электрического нагрева, $P_{\text{отн}}$ — относительная мощность нагревателя, $\tau_{\text{нар}}$ — постоянная нарастания теплового профиля образца, $\tau_{\text{сп}}$ — постоянная спада теплового профиля образца.

Каждая из зависимостей описывает поведение объекта в определенный момент времени t на основе имеющейся априорной информации о структуре системы и характере протекающих в ней процессов. Поиск параметров математической модели производился методом подбора по критерию максимального совпадения теоретических зависимостей с экспериментальными. Анализ результатов показывает практически полное совпадение теоретической и экспериментальной кривых, т.е. можно сказать что полученная математическая модель адекватно описывает процессы, протекающие в исследуемой системе. При этом коэффициенты модели имеют следующие значения: $P_{\text{отн}}=100$, $t_3=10$, $t_{\text{ит}}=130$, $\tau_{\text{нар}}=30$, $\tau_{\text{сп}}=500$, $K_T=0,0045$.

Для управления температурой используется алгоритм пропорционально-интегро-дифференциального регулирования вида:

$$t = \Pi_{\varepsilon_i} + u \sum_{i=i-n}^i (\text{зад}_{-i}) + D_{[\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}]} \quad (3.6)$$

при $\varepsilon_i > 0$ и $\sum_{i=i-n}^i (\text{зад}_{-i}) > 0$ и $[\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}] > 0$,

$$t_{\text{ин}} = \Pi_{\varepsilon_i} + u \sum_{i=i-n}^i (\text{зад}_{-i}) \quad (3.7)$$

при $\varepsilon_i > 0$ и $\sum_{i=i-n}^i (\text{зад}_{-i}) > 0$ и $[\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}] < 0$,

$$t_{\text{ин}} = \Pi_{\varepsilon_i} \quad (3.8)$$

при $\varepsilon_i > 0$ и $\sum_{i=i-n}^i (\text{зад}_{-i}) < 0$ и $[\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}] < 0$,

$$t_{\text{ин}=0}(3.9)$$

при $\varepsilon_i < 0$, где ε_i – разность между заданной для регулирования температурой и температурой в текущий момент времени ($T_{\text{зад}_{-i}}$), зад – заданная для регулирования температура, i – температура образца в текущий момент времени (в момент i -го цикла измерений), p – коэффициент пропорциональной составляющей регулирования, i – коэффициент интегральной составляющей регулирования, d – коэффициент дифференциальной составляющей регулирования, $t_{\text{ин}}$ – длительность электрического импульса нагрева, n – глубина регулирования по интегральной составляющей.

Коэффициенты регулирования получены с помощью имитационного моделирования процесса регулирования, предусматривающего оптимизацию по критерию минимума интеграла квадратичной ошибки. В дальнейшем эти коэффициенты могут быть уточнены в процессе адаптации алгоритма, так как фактические значения параметров элементов системы регулирования температуры всегда будут незначительно отличаться от использованных при моделировании.

3.1.4. Экспериментальные исследования частотных сканов

Испытания синтезатора частот

Испытания синтезатора частот указывают на существование различий между расчетным (F_0) и экспериментально измеренным (F_E) значениями частоты опорного сигнала в соответствии с формулой:

$$F_E = \frac{F_0}{1 - P_F/100}, \quad (3.10)$$

где P_F — экспериментально определяемая поправка, %, зависимость которой от частоты F_0 приведена на рис. 3.6.

Зависимость частотного скана от температуры

Экспериментальная информация, собранная с помощью АСНИ РСГУ (рис. 3.2), в дальнейшем предназначена для накопления и обработки на IBM-совместимых компьютерах. Основной единицей информации является так называемый частотный скан — зависимость напряжения на DLTS-выходе от частоты опорного сигнала селектора. Семейство таких сканов, полученных при температурах 270 К – 300 К, представлено на рис. 3.7 и характеризует эталонный образец, прилагаемый к спектрометру фирмой-изготовителем для тестирования. По внешнему виду, конструктивно-технологическому исполнению и значению емкости $p-n$ -перехода $C_{p-n} < 4 \text{ пФ}$ при $U_R = -10 \text{ В}$ этот образец близок к отечественным диодам КД521 – КД522 с малым (до 4 нс) временем восстановления, изготавляемым по эпитаксиально-планарной технологии.

Тип базы и характер профилей концентрации основных примесей в документации на эталонный образец не указаны. Поэтому о наблюдаемом пике частотного скана пока можно лишь высказать предположение о том, что этот пик может характеризовать глубокий уровень, соответствующий ловушкам основных носителей в области базы диода при условии асимметрии $p-n$ -перехода. Асимметрия означает, что концентрация основных примесей в области базы много меньше, чем в области эмиттера и $p-n$ -переход при этом достаточно резкий.

Амплитуда пика, как и при температурном сканировании, характеризует амплитуду релаксационного сигнала емкости в предположении ее экспоненциального характера с учетом аппаратного коэффи-

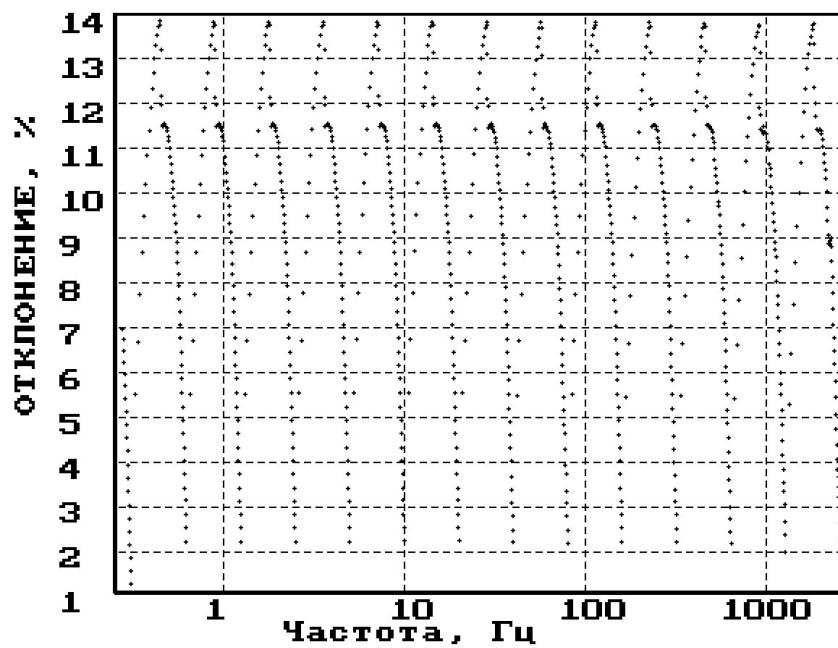
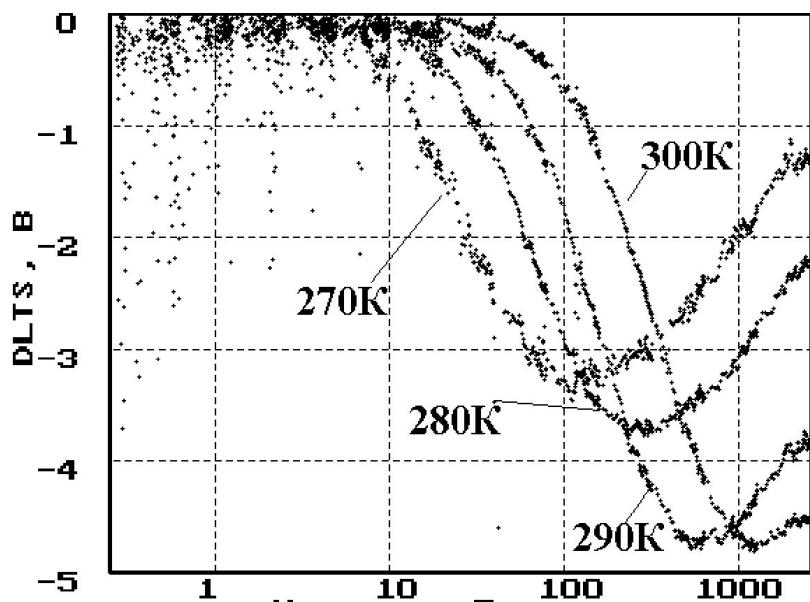


Рис. 3.6. Поправка расчетной частоты опорного сигнала



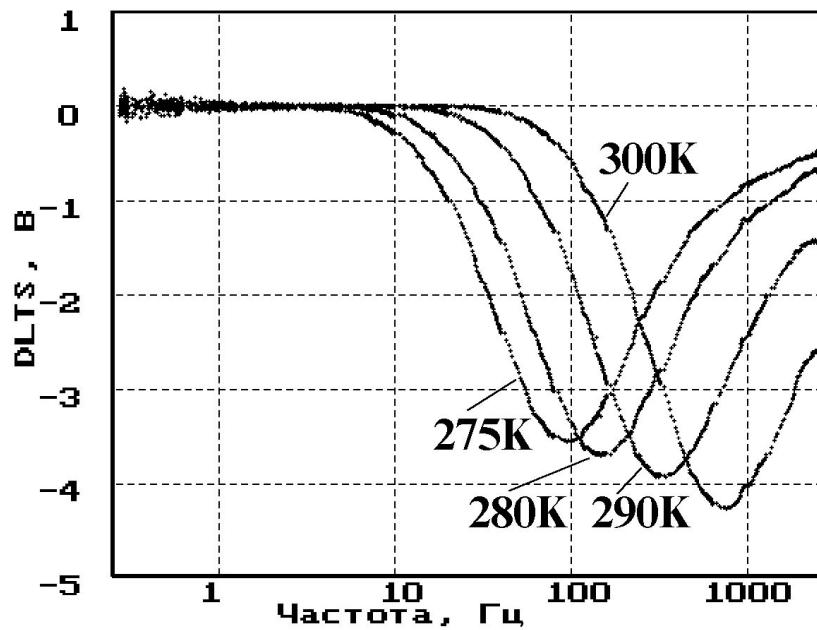
$LS=50\mu B; BS=1n\Phi; U1 = 0 B; UR=-10B; t1=20\mu s;$

Рис. 3.7. Семейство частотных сканов эталонного образца, полученных при разных температурах

циента передачи, определяемого чувствительностью емкостного моста BS и селектора релаксационных сигналов LS . Положение пика на оси частот определяется постоянной экспоненциальной релаксации и видом эквивалентного опорного сигнала (см. рис. 3.1), который зависит от собственно опорного сигнала (меандр для DLS-82E) и положения зон "молчания" емкостного моста с длительностью $t_1 + 0,05T_0$, привязанных к моменту подачи заполняющих импульсов 1 и 2 независимо от наличия второго импульса [144]. Для сравнения на рис. 3.8 изображена зависимость частотного скана от температуры для диода КД-521Б. Этот диод отличается от эталонного образца меньшим значением емкости $p - n$ -перехода (2пФ) при $U_R = -10$ В. Обращает на себя внимание относительно сильный сигнал релаксации емкости (чувствительность LS в 25 раз меньше по сравнению с рис. 3.7). В целом характер зависимости примерно одинаков. Эти рисунки отличаются также уровнем шумов, что особенно заметно в левой части изображения.

Зависимость частотного скана от уровней заполнения и опустошения (основные и неосновные носители)

Частотный скан при фиксированной температуре весьма чувствителен к изменениям уровня заполнения (см. рис. 3.9) и уровня опустошения (см. рис. 3.10), причем эти зависимости достаточно похожи друг на друга. Сходство обусловлено тем, что происходящие при этих изменениях процессы зависят от разности $U_R - U_1$. Отличия же при одинаковых значениях разности $U_R - U_1$ вызваны неравномерным распределением примесей вблизи $p - n$ -перехода. В первом случае (см. рис. 3.10), уменьшая $U_R - U_1$, мы заполняем ГУ в области с большей концентрацией ГЦ, а во втором случае (см. рис. 3.9) процессы заполнения и опустошения ГУ происходят в области с меньшей концентрацией. Эти



$$LS=500mB; BS=ln\Phi; U1=0B; UR=-10B; t1=20\mu s$$

Рис. 3.8. Семейство частотных сканов диода КД-521Б, полученных при разных температурах

различия могут быть использованы для определения профиля распределения концентрации ГУ по объему полупроводника. В литературе по РСГУ указанные явления именуют "эффектом поля".

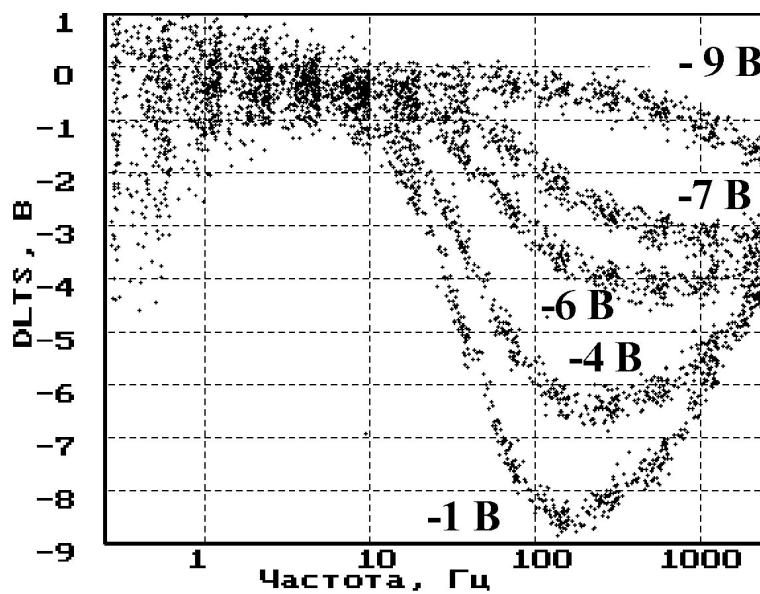
Отпирающее $p - n$ -переход напряжение заполнения меняет вид зависимости частотного скана — появляется еще один пик, но уже противоположной полярности (см. рис. 3.11). С уменьшением запирающего напряжения величина этого пика возрастает (см. рис. 3.12) и первый пик на фоне второго сдвигается вправо по оси частот.

Зависимость частотного скана от длительности заполняющего импульса

Частотный скан зависит также и от длительности заполняющего импульса (см. рис. 3.13). С уменьшением длительности t_1 амплитуда пика, соответствующего глубокому уровню, уменьшается. Поведение частотных сканов справа от пика в области относительно высоких частот опорного сигнала дает информацию о размыщлению о соотношении процессов заполнения и опустошения ГУ. На высоких частотах при малых значениях t_1 со временем возможно устанавливается динамическое равновесие между процессами неполного заполнения ГУ с одной стороны и процессами неполного опустошения с другой.

Для сравнения на рис. 3.14 приведены аналогичные зависимости для диода КД-521Б. Сравнивая рис. 3.14 и рис. 3.13 можно сделать вывод о том, что у диода КД-521Б эта зависимость выражена слабее.

Мониторирование вспомогательных сигналов и сбоев фазового детектора



$$LS=20mB; BS=ln\Phi; UR=-10B; t1=20\mu s; T_{cp.}=272\text{ K}$$

Рис. 3.9. Зависимость частотного скана эталонного образца от запирающего напряжения заполнения ГУ

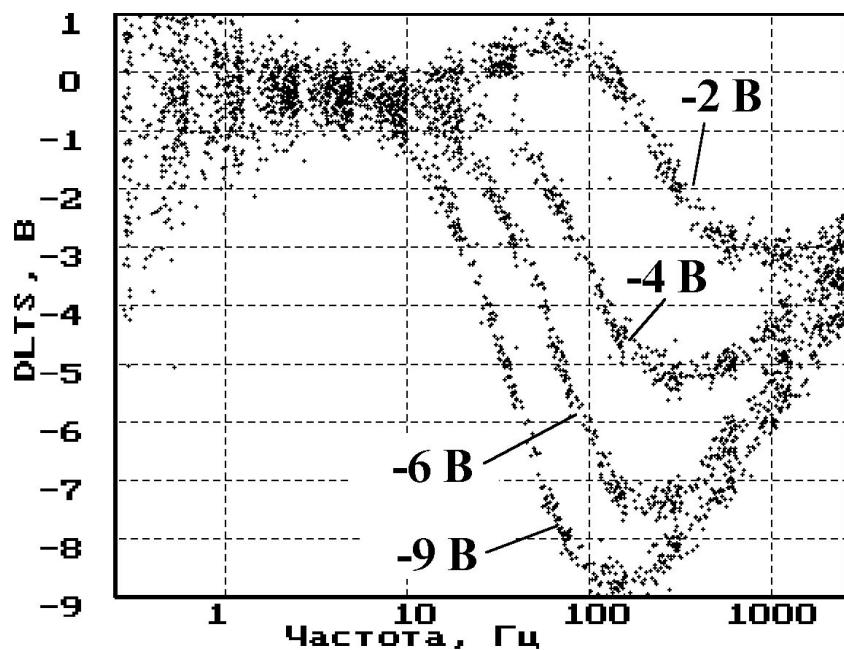
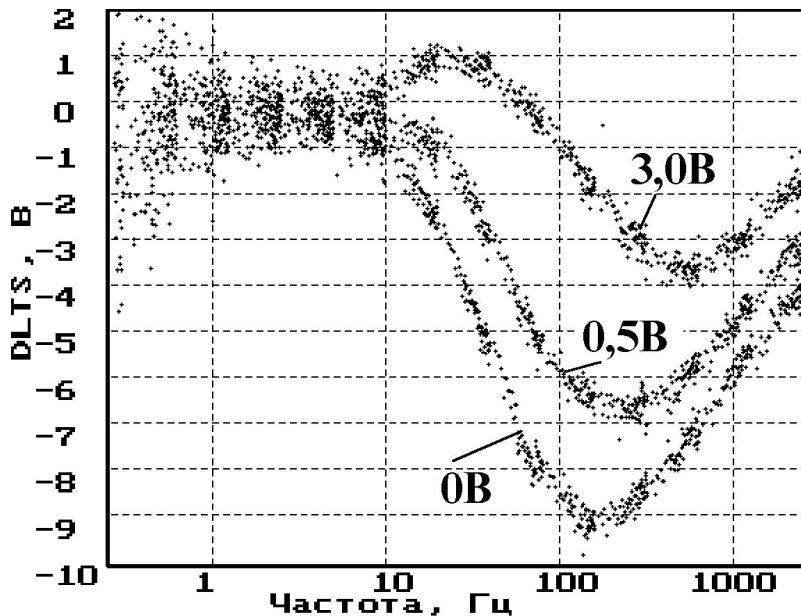
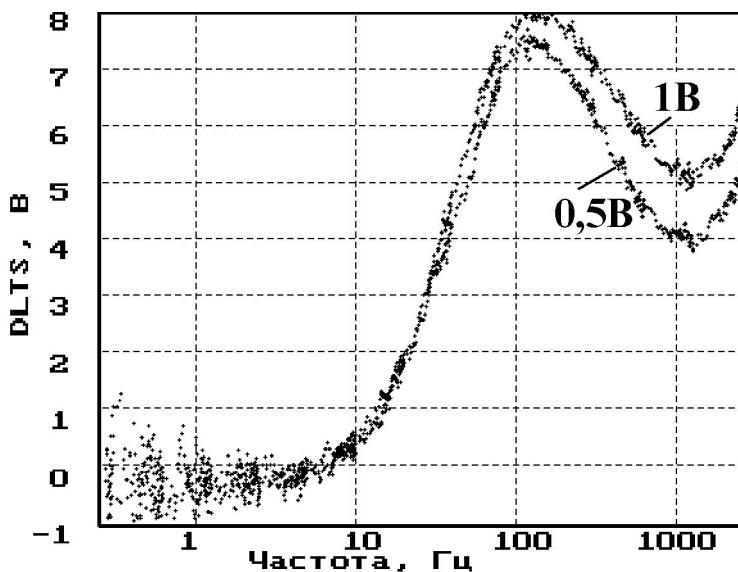


Рис. 3.10. Зависимость частотного скана эталонного образца от запи-
рающего напряжения опустошения ГУ



$$LS=20mB; BS=In\Phi; UR=-9B; tI=20\mu\text{с}; Tep.=272K$$

Рис. 3.11. Зависимость частотного скана эталонного образца от отпирающего напряжения заполнения ГУ при большом запирающем напряжении



$LS=20mB; BS=ln\Phi; UR=-1B; t1=20\mu s; IT=3c; T_{cp.}=272K$

Рис. 3.12. Зависимость частотного скана эталонного образца от отпирающего напряжения заполнения ГУ при малом запирающем напряжении

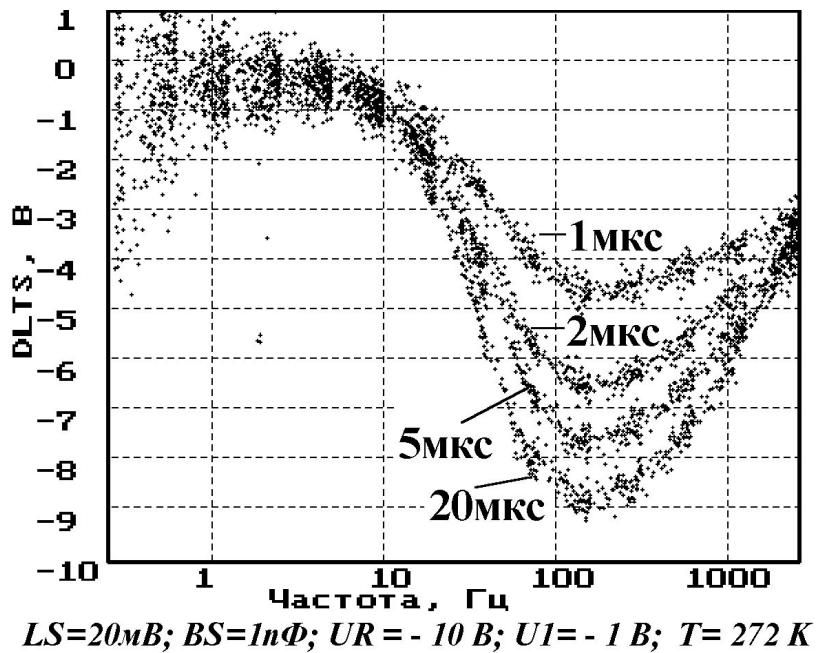
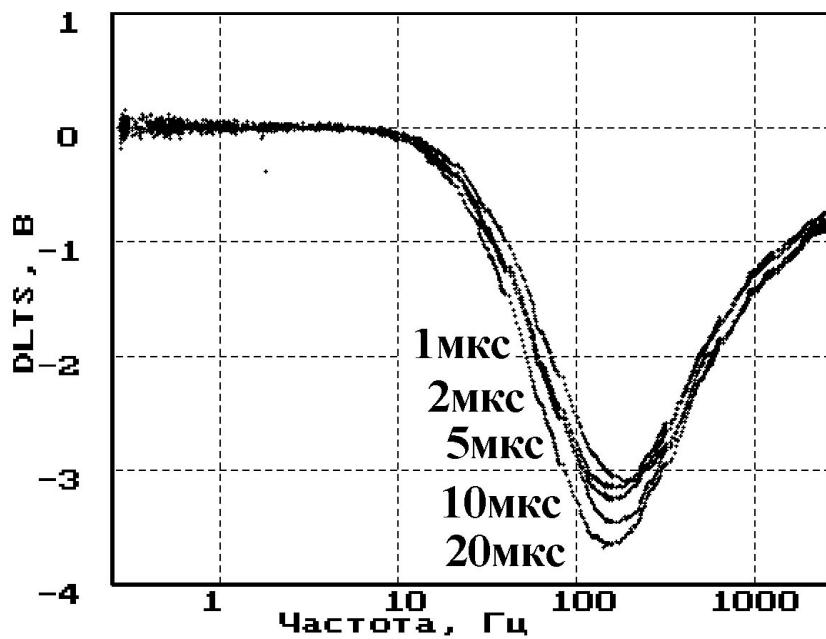


Рис. 3.13. Зависимость частотного скана эталонного образца от длительности заполняющего импульса

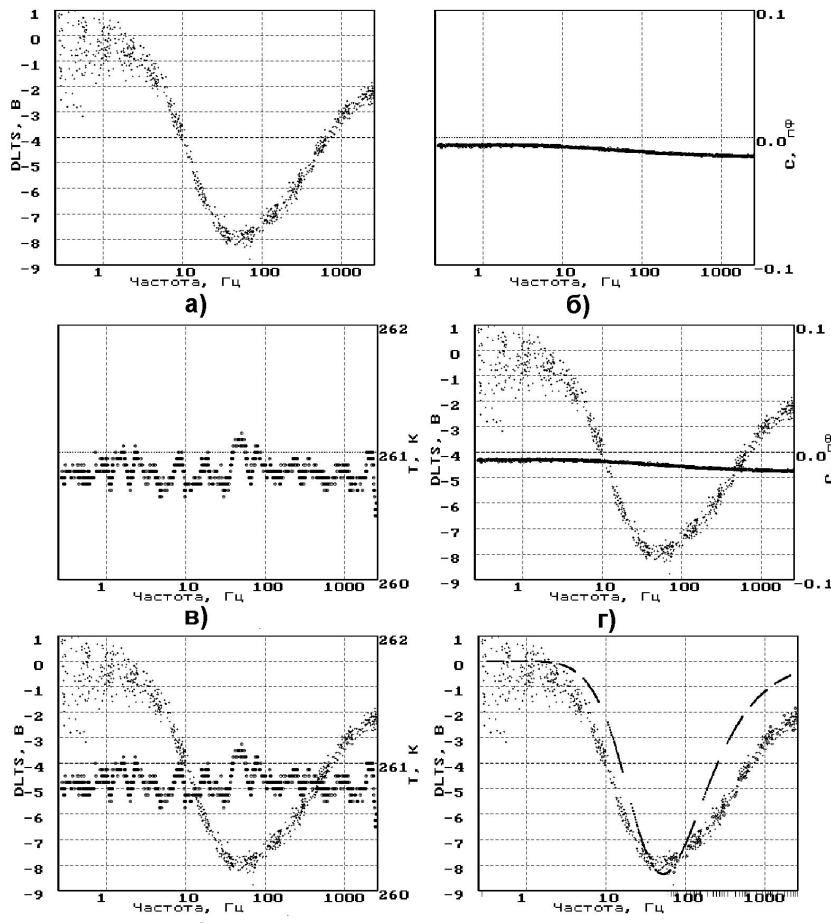


$$LS=500mB; BS=ln\Phi; UR=-10B; U1=-1B; T=280K$$

Рис. 3.14. Зависимость частотного скана КД-521Б от длительности заполняющего импульса

В описанном ИВК (АСНИ РСГУ) (см. рис. 3.2), как уже отмечалось ранее (см. с. 106), предусмотрена аппаратно-программная возможность при каждом значении меняющейся опорной частоты регистрировать также значения напряжений на других доступных аналоговых выходах спектрометра DLS-82E: линеаризатора электронного термометра, источников заполняющих и опустошающего напряжений, измерителя проводимости образца, входного напряжения синтезатора опорных частот. На рис. 3.15 в координатах "логарифм частоты опорного сигнала — амплитуда" изображены вспомогательные сигналы выхода (остаточного разбаланса) емкостного моста (б) и температуры (в). Использование полулогарифмического масштаба дает возможность совмещения основного (выход DLTS) и вспомогательных сигналов на одном рисунке (рис. 3.15 (г) и (д)). Реализована также возможность регистрации с помощью цифрового частотомера — измерителя временных промежутков периода опорного сигнала и длительности импульса заполнения. Это необходимо для контроля параметров реальной временной диаграммы (см. рис. 3.1) селектора релаксационных сигналов. Все перечисленные выходы могут быть подключены ко входу цифрового стробоскопического осциллографа, с помощью которого в режиме цифрового интегрирования-накопления можно регистрировать изменения формы выходного напряжения в течение периода опорного сигнала (см. с. 109).

При работе спектрометра в режиме DLTS иногда наблюдаются сбои, которые приводят к искажениям частотного скана. Указанные искажения могут быть вызваны неисправностями фазового детектора, регулятора температуры или другими неизвестными пока причинами. На рис. 3.16 приведены два частотных скана DLTS-сигнала и соответствующие им вспомогательные сканы поведения выхода емкостного измерительного моста и температуры образца. Сканы справа иллю-



```
fc5111 BS=1 нФ; LS=20 мВ; СО=4 нФ # СМ=13 нФ; IT=1.0 с; Тзас=290К; Тзо= 261.00К;
UR=-10.00В; UI=-1.00 В; U2=-10.00В; t1=20.0 мкс; t2=0.0 мкс; td=0.0 мкс;
нагревательный транзистор включен в схему
```

22.11.96г. UR=-9.985 В; UI=-1.007 В; U2=-9.886 В; t1=4.6 с; Tzo=260.85K;

Рис. 3.15. Интерактивная обработка частотных сканов основного и вспомогательных сигналов

стрируют совместное влияние сбоев фазового детектора и регулятора температуры на DLTS-сигнал. Сканы слева также отражают сбои фазового детектора, но получены они при удовлетворительном качестве управления температурой образца.

Сбои фазового детектора (см. рис. 3.16) имеют характер перемежающихся отказов и приводят к срыву процесса нормального детектирования несущего сигнала с частотой 1 МГц. На выходе фазового детектора в момент отказа появляется несущий сигнал достаточно большой амплитуды (до 0,5 В) и постоянная составляющая, имитирующая нарушение равновесия моста. С этого момента начинает свою работу система электромеханической балансировки емкостного моста, дезориентированная ложным сигналом разбаланса. В итоге равновесие моста необратимо начинает разрушаться. Этот процесс продолжается вплоть до восстановления нормальной работы фазового детектора, после чего требуется определенное время для восстановления равновесия измерительного моста. С целью устранения влияния сбоя фазового детектора на частотный скан DLTS-сигнала по предложению автора аспирантом Егоровым М.А. разработана программно-аппаратная ловушка сбоев, предусматривающая усложнение конструкции ИВК за счет дополнительного подключения к выходу "С" амплитудного детектора с фильтром низких частот. Выход этого вспомогательного детектора подключен к свободному входу мультиплексора цифроаналогового преобразователя. В штатном режиме при отсутствии сбоев сигнал на выходе вспомогательного детектора отсутствует, что регистрируется с помощью АЦП и контроллера. Сбой приводит к появлению сигнала на указанном входе АЦП, и контроллер, опрашивающий данный вход АЦП, переходит в режим регулировки температуры, индикации наличия сбоя и ожидания восстановления нормальной работы фазового детектора.

Отказы регулятора температуры обусловлены в основном сбоями

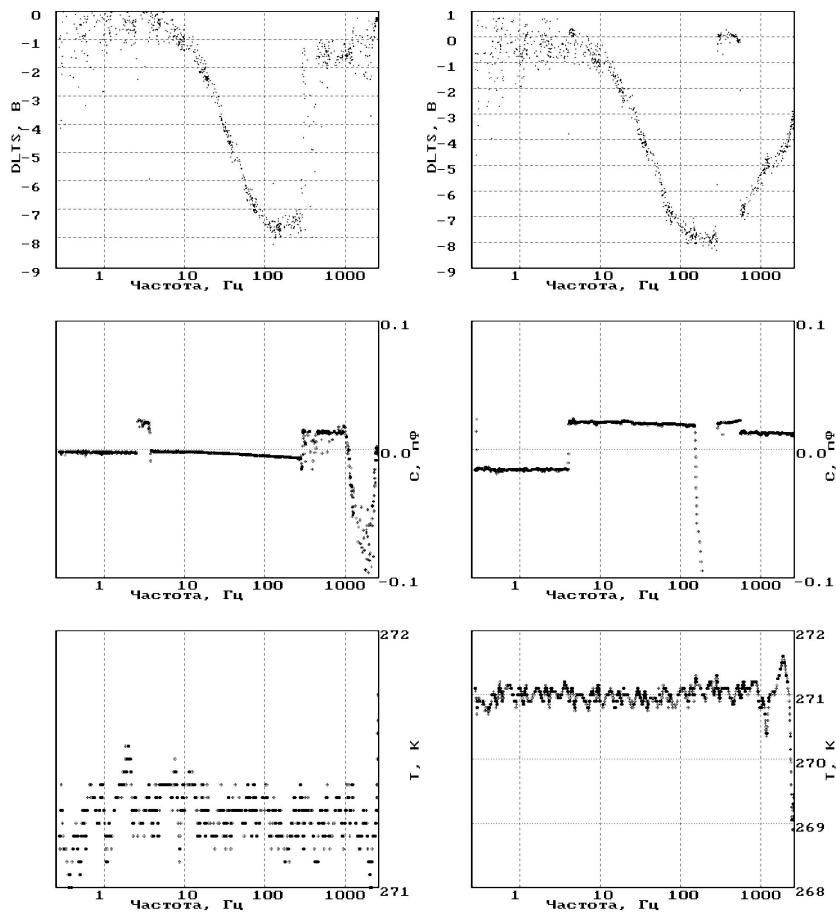


Рис. 3.16. Искажения частотного скана вследствие сбоев фазового детектора и регулятора температуры

цифроаналогового преобразования и несовершенством используемого алгоритма (недостаточная рабочесть из-за отсутствия текущей оценки качества регулирования и т. п.). Первая из названных причин может быть устранена за счет автокалибровки АЦП, усреднения и алгоритмической ловушки выбросов. Для устранения второй причины необходимо совершенствовать алгоритм регулировки температуры.

Подводя предварительные итоги экспериментальных исследований режима частотного сканирования при постоянной температуре, можно отметить, что оно дает технически реализованную возможность получения дополнительной информации о механизмах процессов заполнения и опустошения ГУ, которая может быть использована для уточнения и идентификации соответствующих математических моделей и совершенствования информационной технологии РСГУ.

3.2. Моделирование аппаратных преобразований релаксационного сигнала

3.2.1. Моделирование измерительного тракта спектрометра DLS–82E

Основой аппаратных преобразований, выполняемых измерительным трактом релаксационного спектрометра, является известная из теории радиоприемных устройств [78] корреляционная процедура оптимальной обработки зашумленных сигналов, использующая априорные знания о принимаемых сигналах. Описанное в [78] устройство для обработки смеси сигнала и шума называется коррелятором и состоит из последовательно соединенных аналогового перемножителя и схемы

суммирования (интегратора) результатов перемножения за время наблюдения T_H . Перемножитель имеет два входа, на которые подают соответственно входной и опорный сигналы. Такая система обработки называется корреляционной в соответствии с тем, что выходное напряжение образуется по закону, представляющему с точностью до амплитудного множителя взаимокорреляционную функцию входного сигнала и опорного.

Если предположить наличие в полупроводнике одного глубокого уровня и обозначить входной сигнал коррелятора, являющейся функцией времени t и представляющей собой в случае емкостной РСГУ продетектированный фазовым детектором выходной сигнал сбалансированного емкостного моста через $e(t, \tau)$, где τ — постоянная релаксации (опустошения) ГУ, то выходной сигнал коррелятора будет иметь следующий вид [61]:

$$S(\tau, T_H) = \int_0^{T_H} e(t, \tau) w(t) dt, \quad (3.11)$$

где $w(t)$ — опорная (весовая) функция, которая определяет такие характеристики коррелятора, как разрешающая способность и соотношение "сигнал/шум" [lyuy92, chih91, schmatov92], так как входной сигнал коррелятора $e(t, \tau)$ на практике представляет собой смесь собственно сигнала релаксации ГУ $e_{\text{ГУ}}(t, \tau)$ и составляющей $n(t)$, обусловленной шумами различной природы. Из теории оптимального приема сигналов [78] известно, что при прохождении через идеальный коррелятор сигнала и шума их отношение не изменяется. Для достижения необходимого соотношения сигнал/шум используют метод накопления сигналов. Эффективность накопления зависит от вида шумов и существенно различна для сигналов с известными и неизвестными параметрами. На практике периодическую (с периодом $T_0 = 1/F_0$) последовательность

сигналов релаксации после аналогового перемножения интегрируют с помощью инерционного звена, используемого в качестве интегратора и имеющего постоянную интегрирования, изменяемую в достаточно широких пределах. Она может быть соизмеримой с T_0 или существенно ее превосходить. В спектрометре DLS-82E постоянная интегрирования IT может принимать значения от 0,3 с до 30 с, а длительность временного окна T_0 меняется от 0,4 мс до 4 с. Такой вариант последовательного соединения коррелятора и инерционного звена получил название селектора релаксационных сигналов и означает фактически переход к усреднению входного сигнала [291] в соответствии с соотношением

$$S(\tau, T_0) = \frac{K_{LS}}{T_0} \int_0^{T_0} e(t, \tau) w(t) dt, \quad (3.12)$$

где K_{LS} — масштабный коэффициент селектора, зависящий от его чувствительности LS , которая для спектрометра DLS-82E может изменяться от 1 мВ до 1 В, и вида эквивалентной опорной функции $w(t)$ относительно ее периода. В спектрометре DLS-82E эта функция имеет вид, изображенный на рис. 3.1 – (г) и неизменный относительно периода опорного сигнала T_0 . Выражение для K_{LS} , характеризующее данный спектрометр и предполагающее вполне определенный алгоритм экспериментальной проверки, будет получено ниже.

Соотношение (3.12) справедливо для стационарного (установившегося) уровня выходного сигнала селектора, определяемого постоянной интегрирования IT . Это обстоятельство необходимо учитывать в качестве ограничения при автоматизации измерений в реальном времени, а именно, при выборе задержки измерения выходного сигнала селектора относительно строб-импульса, подаваемого на синтезатор частоты опорного сигнала (см. рис. 3.3).

В первом приближении [328, 31] релаксационный сигнал можно считать экспоненциальным и представить его как

$$e_{\Gamma Y}(t, \tau) = C_A \exp(-t/\tau), \quad (3.13)$$

где C_A — амплитуда емкостного релаксационного сигнала (см. рис. 3.1 (д)). Отрицательное значение амплитуды не противоречит физическому смыслу, а всего лишь означает для мостовой схемы измерений увеличение емкости образца в процессе релаксации ГУ, тогда как положительное значение C_A указывает на уменьшение емкости во времени при релаксации ГУ. В работах [328, 31] показано, что увеличение емкости обратно смешенного несимметричного резкого $p - n$ перехода с базой n типа связано с уходом электронов (основных носителей) с ГУ в область электронейтральности в процессе релаксации, что приводит к возрастанию величины объемного заряда в базе запертого диода.

С учетом введенных обозначений и в предположении аддитивного характера смешивания релаксационного сигнала и шума выходной сигнал селектора релаксационного спектрометра имеет вид:

$$S(\tau, T_0) = \frac{C_A K_{BS} K_{LS}}{T_0} \int_0^{T_0} \exp(-t/\tau) w(t) dt + \frac{C_A K_{BS} K_{LS}}{T_0} \int_0^{T_0} n(t) w(t) dt, \quad (3.14)$$

так как корреляционная процедура (3.11) является линейным преобразованием входных сигналов коррелятора. В этом соотношении K_{BS} — масштабный коэффициент, зависящий от чувствительности BS емкостного измерительного моста, включая его выходной усилитель, и фазового детектора, которая для спектрометра DLS-82E может дискретно выбираться от 1 пФ до 1000 пФ.

Коэффициент K_{BS} определяется из следующих соображений. Чувствительность емкостного моста BS представляет собой величину раз-

баланса моста в пФ, которой соответствует максимально допустимое значение постоянного напряжения (10 В) на выходе фазового детектора, подключенного к выходу измерительного моста. Полярность этого напряжения показывает, в какую сторону разбалансирован емкостной мост. В этом можно легко убедиться, если вместо образца-диода подключить постоянную емкость на вход емкостного моста. Изменяя компенсирующую емкость, которая может быть достаточно точно измерена с помощью внешнего измерителя емкости, и контролируя напряжение на выходе C (это выход фазового детектора) легко убедиться в линейности (или в нелинейности) передаточной характеристики последовательно соединенных выходного усилителя емкостного моста и фазового детектора. Из приведенных выше рассуждений следует, что в случае линейности указанной передаточной характеристики $K_{BS} = 10/BS$, В/пФ.

Весовая функция $w(t)$ выбирается таким образом, чтобы значение $S(\tau, T_0)$ стремилось к нулю при малых и больших значениях T_0 и имело максимум при некотором соотношении τ и T_0 . При аппаратной реализации корреляционной обработки с помощью логических микросхем технически просто получить весовую функцию в виде суммы ступенчатых функций (см. рис. 3.1 (г)). Одним из достоинств этой весовой функции является то, что она должна обеспечить независимость выходного сигнала селектора от остаточного разбаланса емкостного моста, обусловленного изменением температуры образца и гистерезисом системы электромеханической автоматической балансировки. Если представить входной сигнал селектора в виде суммы постоянной и релаксационной составляющих, то без дополнительных математических выкладок эта независимость достаточно очевидна с точностью до нелинейных эффектов, которыми в первом приближении можно пренебречь.

Процесс заполнения-опустошения ГУ повторяется с периодом T_0 ,

именуемым длительностью "временного окна" (см. рис. 3.1), что дает возможность заменить в выражении (3.14) верхний предел интегрирования на ∞ и обнаружить аналогию первого слагаемого в правой части этого выражения с известным преобразованием Лапласа

$$W(p) = \frac{C_A K_{BS} K_{LS}}{T_0} \int_0^{\infty} \exp(-pt) w(t) dt, \quad (3.15)$$

справедливым для кусочно-непрерывных функций $w(t)$, определенных при $t > 0$ и принимаемых равными нулю при $t < 0$. Очевидно, что p , в общем случае определяемое как комплексная величина $\sigma + j\omega$, в данном частном случае будет равно действительной переменной $1/\tau$. Если предположить, что второе слагаемое в правой части выражения (3.14) равно нулю, то для моделирования коррелятора можно использовать изображение опорной функции $w(t)$. Аналитическое выражение модели легко получить, если воспользоваться известными свойствами преобразования Лапласа (линейность, изменение масштаба, запаздывание оригинала) [13]. Для спектрометра DLS-82E (см. рис. 3.1 (г)) ступенчатые функции относительно нулевого уровня можно считать единичными с точностью до некоторого масштабного множителя $M > 0$. Изображение единичной ступени, как известно, равно $1/p$, то есть τ . Если релаксационный экспоненциальный сигнал может быть описан соотношением (3.13), то выходной сигнал коррелятора измерителя DLS-82E имеет следующий вид:

$$S(\tau, C_A, F_0) = C_A K_{BS} K_{LS} \varphi(\tau, F_0, t_1), \quad (3.16)$$

где

$$\varphi(\tau, F_0, t_1) = M \tau F_0 e^{-\frac{0,05}{\tau F_0}} \left[1 - e^{\frac{t_1 F_0 - 0,45}{\tau F_0}} - e^{-\frac{0,5}{\tau F_0}} + e^{\frac{t_1 F_0 - 0,95}{\tau F_0}} \right], \quad (3.17)$$

τ — постоянная релаксации опустошения глубокого уровня, F_0 — частота опорного сигнала, определяемая в соответствии с соотношением (3.1) и корректируемая согласно (3.10), t_1 — длительность импульса заполнения. Функция $\varphi(\tau, F_0, t_1)$ имеет один максимум и стремится к нулю при стремлении F_0 к нулю и бесконечности.

Для того, чтобы выходной сигнал коррелятора не зависел от множителя M , пронормируем его следующим образом:

$$S(\tau, C_A, F_0) = C_A K_{BS} K_{LS} \frac{\varphi(\tau, F_0, t_1)}{K_m}, \quad (3.18)$$

где $K_m = \max[\varphi(\tau, F_0, t_1)]$ — нормирующий коэффициент. Этот коэффициент должен также войти в состав масштабного коэффициента K_{LS} , характеризующего чувствительность селектора, чтобы исходное выражение (3.16) не изменилось. Предлагаемая нормировка, по мнению автора, позволяет, во-первых, упростить определение масштабного множителя M путем включения его таким образом в состав K_{LS} , а во-вторых, отношение $\frac{\varphi(\tau, F_0, t_1)}{K_m}$, как будет показано ниже, позволяет учесть неэкспоненциальность релаксационного сигнала или нелинейность измерительного тракта спектрометра, включая аппаратный селектор, фазовый детектор на выходе емкостного моста и т. п.. В данном отношении можно обойтись без масштабного множителя M , который должен присутствовать как в числителе, так и в знаменателе указанного выражения.

В полученной модели импульс заполнения является "встроенным" во "временное окно" в отличие от моделей, использованных в работах [61, 60, 290]. Это обстоятельство требует при изменении τ под влиянием температуры образца уточнять K_m , что несущественно усложняет обработку, упрощая аппаратную часть селектора при увеличении диапазона изменения и количества опорных частот.

Полученные экспериментальные результаты позволили существенно уточнить модель аппаратных преобразований релаксационного сигнала с помощью синхродетектора. В частности, обнаружен весьма полезный с точки зрения разрешающей способности спектрометра эффект зависимости "добротности" устройства селекции времени экспоненциальной релаксации от амплитуды входного сигнала, обусловленный, как нам представляется, минимум тремя возможными причинами. Во-первых, нелинейностью измерительного тракта, прежде всего входящих в его состав перемножителя аналоговых сигналов и фазового детектора, включенного между выходом емкостного моста и выходом селектора. Во-вторых, неэкспоненциальностью входного релаксационного сигнала. И, наконец, в третьих, различной степенью начального заполнения активных ГУ в зависимости от величины временного окна T_0 . Первая из указанных причин способна искажить экспоненциальный входной релаксационный сигнал. Вторая причина может быть обусловлена физическими процессами заполнения и опустошения глубоких уровней, в том числе особенностями выноса высвободившихся носителей из области пространственного заряда в область электронейтральности. Не исключено совместное проявление обеих этих причин. Подробно влияние перечисленных причин будет исследовано ниже.

Известно [11, с. 232], что интегральные аналоговые перемножители являются в общем-то нелинейными устройствами, напряжение на выходе которых в первом приближении линейно зависит от произведения гиперболических тангенсов величин, пропорциональных входным сигналам U_X и U_Y с коэффициентами пропорциональности $1/\varphi_T$, где φ_T – контактная разность потенциалов. Аналогичная ситуация имеет место и для фазовых детекторов, также использующих аналоговое перемножение. Значение гиперболического тангенса можно представить в виде

ряда [218]

$$th(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 \dots, \quad (3.19)$$

что позволяет предложить трехпараметрическую математическую модель частотной характеристики селектора при наличии в спектре одного дискретного глубокого уровня в виде:

$$S(\tau, A, p, F_0) = A \left[\frac{\varphi(\tau, F_0, t_1)}{K_m} \right]^p, \quad (3.20)$$

где $A = C_A K_{BS} K_{LS}$, $p > 0$ — коэффициент, несущий информацию о нелинейности перемножителя и фазового детектора одновременно, а также о неэкспоненциальности входного релаксационного сигнала и других причинах, например, связанных с различной степенью заполнения ГУ в зависимости от длительности временного окна T_0 . В случае $p = 1$ последовательно соединенные фазовый детектор и аналоговый перемножитель в первом приближении можно считать линейным устройством относительно экспоненциального выходного сигнала емкостного измерительного моста при независимости степени заполнения ГУ при изменении T_0 .

На рис. 3.17 приведены результаты моделирования селектора при исследовании диода КД-521Б (а) и эталонного образца (б), из которых видно, что показатель нелинейности модели (3.20) зависит от амплитуды релаксационного сигнала. О величине амплитуд емкостного релаксационного сигнала в каждом случае можно судить по величине чувствительности селектора LS и наблюдаемых шумов. Без параметрической идентификации, о которой пойдет речь ниже (см. с. 150), можно сделать предварительный вывод о том, что в случае слабого релаксационного сигнала эталонного образца (см.рис. 3.17 (б)) показатель нелинейности p ближе к 0,5, а сильный релаксационный сигнал диода КД-521Б (см.рис. 3.17 (а)) соответствует $1 < p < 1,5$. Отсюда можно так-

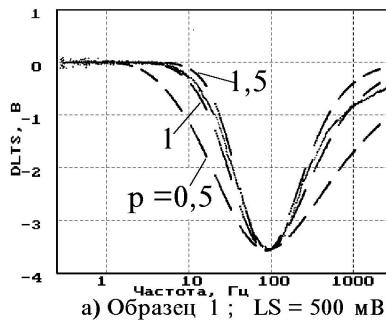
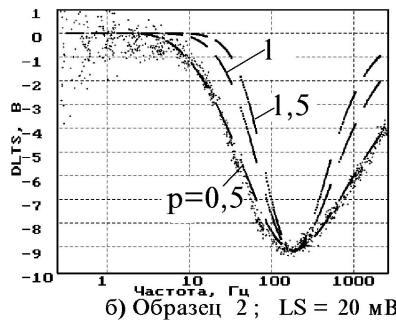
a) Образец 1; $LS = 500 \text{ мВ}$ б) Образец 2; $LS = 20 \text{ мВ}$

Рис. 3.17. Зависимость нелинейности модели от величины релаксационного сигнала

же сделать вывод о возможности при определенных условиях оценки линейности селектора и измерительного тракта в целом по частотному скану DLTS-сигнала при постоянной температуре. Однако от категорической рекомендации пока следует воздержаться, поскольку аналогичный эффект возможен и вследствие неэкспоненциальности релаксационного сигнала. Окончательное решение предполагает проведение дополнительных исследований в данном направлении. В частности, целесообразно снабдить DLTS-спектрометр источником эталонного экспоненциального входного релаксационного сигнала с изменяемой в широких пределах амплитудой.

Для определения коэффициента K_{LS} недостаточно знать чувствительность селектора LS . Величина LS , мВ, означает отделенную от остаточного разбаланса емкостного моста и усредненную за период T_0 с весовой опорной функцией переменную составляющую входного напряжения селектора (выходного напряжения фазового детектора), при которой на выходе селектора (выход $DLTS$) в установившемся режиме при условии линейности селектора будет постоянное напряжение 10 В. Полярность выходного напряжения селектора указывает, как уже отмечалось выше, на тип одиночного ГУ — донорный (отрицательная) или акцепторный (положительная). В случае релаксации нескольких ГУ разного типа эта полярность указывает на тип ГУ, вносящий преобладающий вклад в релаксационный сигнал. Амплитуду входного экспоненциального сигнала можно определить, если величину выходного сигнала разделить на K_m . Таким образом с учетом усиления сигнала селектором $K_{LS} = 10^4 K_m / LS$, В/мВ. Экспериментально проверить это соотношение сложнее, чем измерить K_{BS} . Для этого следует воспользоваться либо специальным экспоненциальным тест-сигналом релаксации, предусмотренным в приборе DLS-82E, либо зафиксировать реальный экспоненциальный сигнал релаксации с помощью цифрово-

го осциллографа с аппаратным накоплением сигнала, а потом осуществить его алгоритмическую селекцию по постоянной релаксации опустошения τ и амплитуде экспоненциального сигнала на выходе селектора A . Приведенное выше выражение для K_{LS} справедливо для экспоненциального релаксационного сигнала и линейного измерительного тракта DLTS-спектрометра в условиях идеального заполнения активных ГУ.

Идентификацию математической модели селектора целесообразно осуществлять в два приема. На первом этапе воспользоваться соотношением (3.20), а затем определить амплитуду емкостного экспоненциального релаксационного сигнала по формуле

$$C_A = \frac{A \cdot BS \cdot LS}{K_m} 10^{-5}, \quad (3.21)$$

где A измеряется в В, BS — в пФ, LS — в мВ, а K_m является величиной безразмерной. При этих условиях значение C_A получится в пФ. При проверке размерностей в этом выражении следует иметь в виду, что коэффициент 10^{-5} является размерной величиной с размерностью $1/(мВ\cdot В)$.

Регистрация частотного скана при частичном заполнении ГУ, которое имеет место при уменьшении длительности заполняющего импульса (см. рис. 3.13, 3.14) позволяет ввести в модель постоянную заполнения $\tau_{зап}$ и определить ее, воспользовавшись поведением скана слева и справа от пика при достаточно низких температурах, сдвигающих пик влево по оси частот. Очевидно, что при относительно малой длительности временного окна частичное заполнение ГУ при подаче заполняющего импульса малой длительности может сопровождаться их опять же частичным опустошением. В результате через некоторое количество периодов опорного сигнала установится динамическое равновесие между

частичными заполнением и опустошением ГУ, которое можно охарактеризовать некоторой постоянной составляющей C_x выходного сигнала фазового детектора. Эта составляющая будет входить в состав амплитуды C_A , которую можно представить в виде

$$C_A = f(C_{\text{ГУ}}, \tau_{\text{зап}}, \tau, t_1, T_0), \quad (3.22)$$

где $C_{\text{ГУ}}$ — максимальная амплитуда емкостного релаксационного сигнала экспоненциального вида, определяемая количеством ионизированных ГУ при данной температуре образца в той части слоя объемного заряда, где происходят электрическое заполнение и опустошение ГУ.

Получим соотношение (3.22) в явном виде. Рассмотрим два варианта, разные по исходным предположениям и приводящие, как будет показано ниже, к одному и тому же результату.

1. Введем фиктивное время t_x опережения процесса заполнения относительно временного окна, то есть предположим, что заполнение ГУ начинается с нуля в момент времени $t = -t_x$, предшествующий началу временного окна. Заполнение ГУ может быть описано через изменение емкости во времени

$$C(t) = C_{\text{ГУ}} \left(1 - \exp \left(-\frac{t + t_x}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right). \quad (3.23)$$

При $t = 0$ емкость достигнет минимального (по модулю) установившегося значения

$$C_x = C_{\text{ГУ}} \left(1 - \exp \left(-\frac{t_x}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right). \quad (3.24)$$

За время действия заполняющего импульса с длительностью t_1 емкостной релаксационный сигнал достигнет значения

$$C_A = C_{\text{ГУ}} \left(1 - \exp \left(-\frac{t_1 + t_x}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right). \quad (3.25)$$

Это значение и будет амплитудой релаксационного сигнала при частичном заполнении ГУ. Опустошение ГУ, если пренебречь наличием "зон молчания" емкостного моста и считать релаксационный сигнал экспоненциальным, можно описать соотношением

$$C(t) = C_A \exp\left(-\frac{t - t_1}{\tau}\right), \quad (3.26)$$

где C_A определяется по предыдущей формуле. В установившемся режиме неполному опустошению будет соответствовать

$$C_x = C_A \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right). \quad (3.27)$$

А теперь приравняем друг другу правые части равенств (3.24) и (3.27) с целью определения t_x . После несложных преобразований получим

$$\exp\left(-\frac{t_x}{\tau_{\text{зап}}}\right) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau} - \frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)}. \quad (3.28)$$

Прологарифмировав обе части этого равенства, получим искомое выражение для t_x :

$$t_x = -\tau_{\text{зап}} \ln \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_1\tau + T_0\tau_{\text{зап}} - t_1\tau_{\text{зап}}}{\tau_{\text{зап}}\tau}\right)} \right]. \quad (3.29)$$

Подставим найденное значение t_x в формулу (3.25) и получим в явном виде соотношение (3.22)

$$C_A = \frac{C_{\Gamma Y} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}}\right)\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}}\right) \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)}, \quad (3.30)$$

которое при подстановке в (3.20) превратит трехпараметрическую модель в четырехпараметрическую, позволяющую, в отличие от трехпараметрической модели, определить дополнительно постоянную заполнения $\tau_{\text{зап}}$.

2. Воспользуемся введенным в п. 1 обозначением C_x для минимального (по модулю) установившегося значения релаксационного сигнала. Будем считать, что заполнение ГУ начинается от уровня C_x с постоянной времени $\tau_{\text{зап}}$:

$$C(t) = (C_{\Gamma Y} - C_x) \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right) + C_x. \quad (3.31)$$

Амплитуда C_A релаксационного сигнала определяется в этом случае длительностью заполняющего импульса, а именно,

$$C_A = (C_{\Gamma Y} - C_x) \left(1 - \exp \left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right) + C_x. \quad (3.32)$$

Опустошение ГУ описывается точно так же, как в п. 1, а именно

$$C(t) = C_A \exp \left(-\frac{t - t_1}{\tau} \right). \quad (3.33)$$

Емкостной релаксационный сигнал, соответствующий опустошению ГУ в момент времени $t = T_0$, равен

$$C_x = C_A \exp \left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau} \right). \quad (3.34)$$

Из этого выражения амплитуда релаксационного сигнала

$$C_A = C_x \exp \left(\frac{T_0 - t_1}{\tau} \right). \quad (3.35)$$

Приравняв правые части равенств (3.32) и (3.35), получим

$$C_x = \frac{C_{\Gamma Y} \left(1 - \exp \left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}} \right) \right)}{\exp \left(\frac{T_0 - t_1}{\tau} \right) - \exp \left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}} \right)}. \quad (3.36)$$

Подставив (3.36) в (3.35), также получим выражение (3.30).

В окончательном варианте четырехпараметрическая модель аппаратных преобразований релаксационного спектрометра DLS-82E, описывающая преобразованный сигнал релаксации одного ГУ, принимает вид:

$$S(\tau, C_{\Gamma Y}, p, \tau_{\text{зап}}, F_0) = \frac{K_{BS} K_{LS} C_{\Gamma Y} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}}\right)\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{\text{зап}}}\right) \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)} \left[\frac{\varphi(\tau, F_0, t_1)}{K_m} \right]^p. \quad (3.37)$$

При этом следует обратить внимание на то, что для определения постоянной $\tau_{\text{зап}}$ достаточно частотного скана, полученного при одном лишь значении длительности заполняющего импульса. Постоянная $\tau_{\text{зап}}$ в отличие от τ , характеризующей процесс опустошения ГУ, как известно, позволяет приблизить определение сечения захвата ГУ, не искаженного полевым эффектом. Увеличение количества частотных сканов, полученных при различных значениях длительности заполняющего импульса при постоянной температуре образца, очевидно, будет способствовать повышению точности определения $\tau_{\text{зап}}$ и других параметров модели (3.37) (см. с. 243).

Емкость $C_{\Gamma Y}$ таким образом может быть определена экспериментально с погрешностью, зависящей от нелинейности аппаратных преобразований релаксационного сигнала, информацию о которой несет значение показателя p , а также от формы сигнала релаксации. Наиболее точно указанная емкость определяется при $p = 1$ и экспоненциальном сигнале релаксации. Последнее условие предусматривает специальную проверку формы релаксационного сигнала. Алгоритмы этой проверки будут рассмотрены ниже. В общем случае вопрос о погрешности определения $C_{\Gamma Y}$ пока остается открытым как с точки зрения

влияния нелинейности, так и с точки зрения отличия формы релаксационного сигнала от экспоненциальной.

Математическая модель аппаратных преобразований релаксационного сигнала (3.37) содержит параметры одного ГУ — ловушки основных носителей заряда. Реально дефекты в кремнии характеризуются набором парных ГУ, способных захватывать как основные так и неосновные носители заряда (см., например, рис. 3.11, 3.12). Ловушка неосновных носителей, как известно, дает релаксационный сигнал противоположной (положительной в случае базы n -типа) полярности, который суммируется с отрицательным сигналом релаксации ловушки основных носителей. В первом приближении результирующий сигнал $S(\tau_1, C_1\Gamma_U, p_1, \tau_{1зап}, \tau_2, C_2\Gamma_U, p_2, \tau_{2зап}, F_0)$ можно представить как сумму противоположных по знаку сигналов, каждый из которых может быть представлен четырехпараметрической моделью (3.37). Процесс идентификации этой теперь уже восьмипараметрической модели целесообразно осуществлять с помощью итераций — последовательных приближений. Подавая на образец неотпирающие импульсы заполнения, можно идентифицировать сначала математическую модель ловушки основных носителей, а потом при отпирающих импульсах заполнения дополнить ее параметрами второй ловушки — ловушки неосновных носителей.

Обычно указанные пары ГУ на частотных сканах достаточно далеко отстоят друг от друга и параметры модели аппаратных преобразований одной пары не зависят от характеристик других пар ГУ, однако не исключается ситуация [285], при которой пары уровней или ловушки одного типа будут влиять друг на друга. В этом случае идентификация усложнится, однако предложенный выше итеративный подход для разделения ловушек основных и неосновных носителей остается в силе.

3.2.2. Интерактивная идентификация математических моделей аппаратных преобразований

Идентификация математических моделей, как известно [281], сводится к определению параметров модели W_M , минимизирующих невязку модели и эксперимента. Невязка играет роль системообразующего критерия самонастройки, необходимого для оптимизации системы идентификации, состоящей из объекта моделирования, модели, заданной в виде фиксированной или меняющейся структуры, и параметров этой структуры, образующих канал самонастройки [215]. Какая-либо определенная единая классификация постановок задач идентификации и методов их решения к настоящему времени по существу отсутствует [280, стр. 296]. Это относится к линейным и особенно к нелинейным системам. Пока ясно лишь то, что оптимизация всевозможных рекуррентных алгоритмов идентификации тесно связана с учетом в них априорной информации об исследуемых процессах и о статистических свойствах шума эксперимента.

Априорная информация о шуме эксперимента, задаваемая плотностью распределения помехи, для линейных систем однозначно определяет предложенный Я.З. Цыпкиным оптимальный критерий качества идентификации, иначе именуемый как функция потерь, и абсолютно оптимальные алгоритмы, обладающие предельно возможной асимптотической скоростью сходимости [280, стр. 292]. Автор информационной теории идентификации [280] приходит к весьма категоричному выводу о том, эта скорость сходимости не может быть превзойдена никакими иными алгоритмами, как рекуррентными, так и нерекуррентными.

Неполная априорная информация о шуме эксперимента, задаваемая классом принадлежности неизвестной плотности распределения, также однозначно определяет критерий качества идентификации и аб-

соголютно оптимальные на классе алгоритмы идентификации, обладающие скоростью сходимости, не меньшей некоей гарантированной. Эти алгоритмы, именуемые робастными (*robustness* — англ.), характеризуются грубостью, нечувствительностью по отношению к отклонению от принятых априори предположений. Робастность [230, стр. 410] характеризует способность алгоритма восстанавливаться при возникновении ошибочных ситуаций как внешнего, так и внутреннего происхождения. Таким образом это устойчивый по отношению к шуму эксперимента алгоритм.

Априорная информация относительно области принадлежности параметров идентифицируемой модели исследуемого ГУ или совокупности ГУ, задаваемая в виде так называемой фидуциальной (принимаемой на веру) [280, с. 292] плотности распределения, позволяет подобрать начальные значения алгоритмов идентификации, приводящие к акселерации оценок, т. е. ускоряющие получение оценок заданной точности. Такие абсолютно оптимальные на классе алгоритмы, осуществляющие регуляризацию оценок, Я.З. Цыпкин предлагает называть акселерантными.

Итак, для решения задачи идентификации необходимо:

1. выбрать или синтезировать структуру модели, параметры которой можно изменять;
2. выбрать критерий качества идентификации — средние потери, которые характеризовали бы различие между выходными параметрами релаксационного сигнала и настраиваемой модели;
3. сформировать алгоритм идентификации, который, используя доступные для наблюдения значения входных и выходных величин, изменил бы параметры настраиваемой модели так, чтобы средние потери с ростом номера шага достигали минимума.

Идентификация моделей физических процессов релаксации ГУ и

аппаратной обработки релаксационных сигналов, в отличие от идентификации динамических объектов в теории автоматического управления, имеет свою специфику, обусловленную неоднозначностью интерпретации экспериментальных данных (см. с. 51), иначе говоря, неполными знаниями об объекте идентификации. Процесс получения новых знаний, как известно, предполагает опровержение гипотез о структуре существующих математических моделей. В этом случае от идентификации ожидают по существу обратного результата — вывода о невозможности идентификации (вследствие неадекватности) и целесообразности поиска другой (адекватной) модели. Такая ситуация возникает, как правило, либо при переходе к более точным средствам измерений, каковыми являются, например, процессорные средства, либо при расширении спектра входных воздействий на объект изучения, например, при изучении новых видов возбуждения электронной системы полупроводника, например, переходе от электрического возбуждения к радиационному с различными спектрально-энергетическими характеристиками и т. д..

Для идентификации наиболее часто применяются так называемые критерии синтеза [215], позволяющие осуществить настройку параметров или синтезировать алгоритм получения оценок параметров модели. Оптимальный критерий синтеза, предложенный Я.З. Цыпкиным [281] и представляющий собой логарифмическую функцию правдоподобия с обратным знаком, которая численно равна логарифму плотности распределения помех, взятому с обратным знаком, в данном случае пока неприменим из-за отсутствия априорной информации о свойствах помех (шумов). Однако по мере изучения релаксационных явлений и накопления статистики о свойствах шумов эксперимента к нему надо, по возможности, стремиться, чтобы обеспечить предельно возможную асимптотическую скорость сходимости, как отмечалось выше. Иначе говоря, идентификация в данном случае должна быть итеративной,

обеспечивающей по мере накопления информации коррекцию критерия и алгоритма идентификации, а также структуры моделей физических процессов и аппаратных преобразований релаксационного сигнала.

Приводимое в [215] наиболее общее выражение для критерия настройки параметров модели применительно к задаче идентификации модели аппаратных преобразований имеет вид:

$$H(a) = \min \left[\sum_{i=1}^{i=n} \beta_i |\varepsilon(a_0, a_M, i)|^\nu \right]^\psi, \quad (3.38)$$

где $a = \{a_0, a_M\}$, $\varepsilon(a_0, a_M, i) = y(a_0, i) - y_M(a_M, i)$ — разность выходов объекта и модели или вектор наблюдений, a_0 и a_M — векторы параметров объекта и модели, β_i — весовой коэффициент, $i = 1, 2, \dots, n$ — номер точки дискретизации, соответствующий определенному значению опорной частоты, n — максимальное число точек частотного скана, ν и ψ — показатели, которые чаще всего принимают значения $\nu = 2$ и $\psi = 1$. Такой критерий, по мнению авторов [215], должен обладать свойствами неотрицательности ($H(a) \geq 0$) и четности ($H(a) = H(-a)$), что ограничивает области значений показателей ν и ψ .

Недостатком критерия (3.38) является его зависимость от n . Устранить этот недостаток можно с помощью усреднения. В этом случае общее выражение для критерия качества идентификации (функционала невязки) принимает вид [280, с. 14]:

$$H(a) = M\{F[\varepsilon(a_0, a_M, i), a_M]\}, \quad (3.39)$$

где $F[\bullet]$ — функция потерь, а M — символ математического ожидания. Функция потерь $F[\varepsilon]$ обычно представляет собой четную функцию невязки, то есть $F[\varepsilon] = F[-\varepsilon]$. Таким образом критерий качества

идентификации (3.39) представляет собой средние потери. Чем меньше средние потери, тем выше качество идентификации. Улучшение качества идентификации осуществляется надлежащим выбором структуры настраиваемой модели и изменением ее параметров. Это изменение осуществляется алгоритмом идентификации, который, в соответствии с информационной теорией идентификации [280] определяется функцией потерь и структурой настраиваемой модели.

Указанная теория подробно исследует идентификацию моделей в так называемом режиме нормальной работы, когда по наблюдениям входного воздействия и выходных величин величин объекта и настраиваемой модели алгоритм идентификации изменяет параметры последней так, чтобы средние потери достигали с ростом n минимума. Однако в полном объеме рекомендациями этой теории мы не можем воспользоваться, так как осуществляем пока идентификацию иным способом, а именно: проводим специальные эксперименты на объекте, а затем полученные результаты этих экспериментов обрабатываем, приближенно восстанавливая средние потери и далее тем или иным способом минимизируя восстановленные средние потери. Такие алгоритмы минимизации в информационной теории идентификации подробно не рассматриваются [280, с. 15]. Разработанный ИВК для РСГУ (см. рис. 3.2) в отдаленной перспективе может обеспечить автоматизированный режим нормальной работы объекта идентификации, а пока процесс идентификации представляется достаточно далеким от полной формализации.

Для начала целесообразно воспользоваться традиционным критерием минимума среднего квадратического отклонения между объектом и модельным предсказанием. Среднее квадратичное отклонение для ча-

стотного скана определяется выражением

$$\varepsilon^2(a_0, a_M) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \beta_i \varepsilon^2(a_0, a_M, i). \quad (3.40)$$

Весовые коэффициенты могут быть пронормированы таким образом, что вместо множителя $1/N$ перед знаком суммы будет множитель $1 / \sum_{i=1}^{i=N} \beta_i$. Такая нормировка позволит исследовать и сравнить между собой методы идентификации в тех случаях, когда не все точки скана участвуют в расчете критерия.

Так как решение задачи идентификации предусматривает поиск экстремума критерия синтеза, то к нему предъявляется еще одно требование — унимодальности (одноэкстремальности), которое из-за влияния шумов эксперимента, возможно, выполняться не будет. Это, в свою очередь, означает необходимость поиска глобального экстремума. Различная чувствительность критерия к параметрам модели в этом случае приводит к росту вычислительных погрешностей и ошибкам идентификации. Для исправления этого недостатка применяют критерии с регуляризацией различного вида. Наиболее известна регуляризация, предложенная А.Н. Тихоновым. Среднеквадратичный критерий в этом случае записывается в виде [229]:

$$H(\alpha, a) = \varepsilon^2(a) + \alpha \|a^2\|, \quad (3.41)$$

где α — параметр регуляризации; $\|\bullet\|$ — квадрат нормы, например, $\|a^2\| = \sum a_i^2$.

Регуляризующими свойствами обладает также критерий с ковариационным сдвигом [215], который для частотного скана может быть записан в виде

$$H_\varepsilon(\tau) = \mathbf{E}^T \mathbf{A}(\tau) \mathbf{E}, \quad (3.42)$$

где $\mathbf{E} = \{\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)\}$, \mathbf{E}^T — транспонированная матрица \mathbf{E} , $\mathbf{A}(\tau)$ — симметричная матрица с элементами

$$\begin{cases} a_{ij} = 1, \text{ если } j = i + \tau; \\ a_{ij} = 0, \text{ если } j \neq i + \tau; \\ a_{ij} = a_{ji}, \end{cases}$$

где τ — целочисленный ковариационный сдвиг. В [215] для практических приложений рекомендуется также критерий анализа качества идентификации, состоящий из двух неравенств вида

$$\begin{cases} H_1 = [H(k+1) - H(k)]/H(k) < \delta_1; \\ H_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i(k+1) - a_i(k)|/a_i(k) < \delta_2, \end{cases}$$

где $H(k+1), H(k), a_i(k+1), a_i(k)$ — значения критерия синтеза и i -го параметра на k , $(k+1)$ -м шаге итерации; δ_1, δ_2 — наперед заданные малые значения. Первое уравнение запрещает существование больших вариаций критерия при малых вариациях параметров, второе — наоборот.

В работах по теории идентификации [79, 112, 216, 280, 281, и др.] предлагаются и другие критерии, которые положительно зарекомендовали себя при решении частных задач идентификации. Знакомство с ними приводит к выводу о том, что выбор критерия скорее является искусством, чем наукой, и в большей степени определяется видом модели, априорной информацией и интуицией исследователя, нежели выводами теории идентификации. Присоединимся к большинству авторов, тяготеющих к традиционному среднеквадратичному критерию (3.40) и не получивших, очевидно, убедительных практических результатов от применения альтернативных вариантов. Для одиночного пика на частотном скане DLTS-сигнала и четырехпараметрической модели (3.37)

целесообразно выбрать весовые коэффициенты для критерия

$$\bar{\varepsilon}^2(a_0, a_M) = \left(\sum_{i=1}^{i=N} \beta_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^{i=N} \beta_i \varepsilon^2(a_0, a_M, i) \quad (3.43)$$

по следующему правилу:

$$\begin{cases} \beta_i = 1, \text{ если } |S| \geq \lambda |S_{\max}|; \\ \beta_i = 0, \text{ если } |S| < \lambda |S_{\max}|, \end{cases} \quad (3.44)$$

где $0 \leq \lambda < 1$ — уровень ограничения. Такой выбор весовых коэффициентов, по мнению автора, позволяет учесть влияние низкочастотных $1/f$ шумов образца и входных цепей селектора, которое особенно проявляется при слабых сигналах релаксации (см. рис. 3.7). Оптимальное значение λ зависит от близости соседних пиков, сложности модели аппаратных преобразований (одноуровневый или многоуровневый ГУ) и подлежит уточнению в ходе практической идентификации. С увеличением λ точность идентификации будет уменьшаться, а разрешающая способность соседних пиков в рамках одноуровневой модели аппаратных преобразований — увеличиваться. Для одновременного обеспечения высокой точности идентификации и разрешающей способности при малых значениях λ от одноуровневой модели (3.37) необходимо переходить к многоуровневой с суммированием релаксационных откликов двух и более ГУ.

Качество идентификации математической модели аппаратных преобразований релаксационного сигнала зависит от использования априорной информации о чувствительности модели к основным входящим в нее параметрам с учетом диапазонов их изменения. На наш взгляд, целесообразно на первое место при ранжировании поставить постоянную опустошения и амплитуду емкостного релаксационного сигнала. Влияние нелинейности измерительного тракта и частичного заполнения-опустошения ГУ при малых значениях длительности временного окна

T_0 (влияние постоянной заполнения) менее существенно, поэтому можно предложить еще одну разновидность итерационного процесса для ускорения идентификации модели: предварительно определять по частотному скану постоянную опустошения и амплитуду емкостного релаксационного сигнала, а потом уже усложнять идентификационную процедуру, дополняя модель до четырехпараметрической. Это, по мнению автора, должно положительно отразиться и на устойчивости процесса идентификации модели (3.37), особенно, если четырехпараметрическую идентификацию после трехпараметрической сопровождать установлением ограничений на первые три параметра — постоянную опустошения, амплитуду емкостного релаксационного сигнала и показатель нелинейности.

При отработке информационной технологии итеративной идентификации целесообразно использовать не автоматический, а автоматизированный (интерактивный) поиск параметров четырехпараметрической модели ГУ — ловушки основных носителей. На первом этапе идентификации, этапе предварительного определения постоянной опустошения ГУ и амплитуды емкостного релаксационного сигнала, предлагается в интерактивном режиме указать точку частотного скана, приблизительно соответствующую глобальному экстремуму пика. Одновременно выполняется оценка качества частотного скана. Необходимость этой оценки обусловлена изредка возникающими сбоями в работе фазового детектора выходного высокочастотного сигнала емкостного измерительного моста спектрометра DLS-82E (см. с. 131).

Алгоритм интерактивной идентификации реализован автором в виде фрагмента информационной технологии емкостной РСГУ с частотно-температурным сканированием и состоит из двух последовательно запускаемых программных модулей.

Для решения задач первого этапа идентификации автором разра-

ботан программный модуль DLSOSMR.EXE Этот модуль формирует файл результатов интерактивной идентификации двухпараметрической (без нелинейности и неэкспоненциальности) модели пика частотного скана, соответствующего ловушке основных носителей. Для каждого частотного скана, содержащего единичный пик, соответствующий ловушке основных носителей заряда, определяются постоянная опустошения τ , амплитуда пика A со знаком полярности, средняя температура образца $T_{\text{ср.}}$, коэффициент масштабирования модели K_M и минимальная невязка. Показатель нелинейности p полагается равным единице, что соответствует линейному преобразованию экспоненциального релаксационного сигнала, а постоянная заполнения $\tau_{\text{зап.}}$ принимается равной нулю. Результаты работы программы DLSOSMR.EXE представлены на рис. 3.15. Фрагмент рисунка (а) изображает частотный скан эталонного образца, полученный при температуре 261 К. Соответствующий этому скану сигнал разбаланса емкостного измерительного моста изображен на фрагменте (б). Следует отметить, что величина разбаланса в течение частотного сканирования не остается неизменной и плавно изменяется в небольших пределах. На фрагменте (в) отображено поведение температуры образца во время сканирования. Длительность процесса сканирования для файла fc511.dat составляет примерно 20 мин. Температура в определенном смысле отражает импульсное регулирование, которое предусматривает выдачу импульсов нагрева каждую минуту. Кстати, значения температуры, соответствующие по времени моменту подачи импульса нагрева при желании на графиках могут быть помечены, так как мониторирование температуры это предусматривает. Эти температуры в файле значений абсолютной (по Кельвину) температуры образца условно помечены знаком минус в отличие от остальных значений.

Выходной файл результатов этого программного модуля является

входным для второго модуля автоматической пакетной обработки частотных сканов DLSOSMP.EXE. Модуль предусматривает автоматическую итеративную идентификацию двух- и трехпараметрической модели аппаратных преобразований релаксационного сигнала, соответствующего единичной ловушке основных носителей заряда. При этом используется критерий (3.43).

Для идентификации трехпараметрической модели по каждому из трех параметров модели предусмотрено 20 итераций, каждая из которых представляет собой сочетание двухсот "бросков-попыток" ненаправленного случайного поиска с покоординатным спуском, причем шаг по τ при координатном спуске был выбран мультиплективным, а по остальным параметрам — аддитивным. Величина шага при покоординатном спуске от итерации к итерации не меняется и равна 0,001 от начального значения параметра. При смене итераций область разброса псевдослучайных значений параметров сужается. Уменьшение области разброса достигается тем, что псевдослучайные значения постоянной опустошения τ , амплитуды A и нелинейности p определяются по формуле:

$$x_i(\xi) = x_{i-1} \left(1 + \frac{\xi - 0,5}{5j} \right), \quad (3.45)$$

где ξ — псевдослучайное число, распределенное по равномерному закону в интервале $\{0, 1\}$, j — номер итерации $j = 1, 2, \dots, 20$, а вместо x необходимо подставить соответствующий параметр из трех указанных. При вводе исходных данных для пакетной обработки программа DLSOSMP.EXE запрашивает значение λ , определяющее весовые коэффициенты по формуле (3.44) при вычислении невязки (3.43).

Описанный алгоритм, не претендую на оптимальность, в целом успешно справляется с задачей идентификации, конечно, при условии аккуратного отношения оператора к интерактивной идентификации на-

чального приближения. В перспективе субъективизм выбора начального двухпараметрического приближения единичного ГУ может быть устранен, например, с помощью корреляционной процедуры так называемого вторичного частотного сканирования, алгоритм которого копирует работу аппаратного селектора спектрометра с той лишь разницей, что вместо экспоненциального опорного сигнала используется двухпараметрическая модель единичного ГУ (3.37) с единичной амплитудой и меняющейся по логарифмическому закону постоянной опустошения.

Отличительной особенностью модуля DLSOSMP.EXE является возможность досрочного прерывания его работы с сохранением результатов автоматического поиска параметров τ , A и p для каждого частотного скана. При следующей попытке обработать входной файл эти результаты повторно обрабатываться не будут, так как они помещаются во входной файл, но помечаются особым идентификатором. Пользователю программы DLSOSMP.EXE предоставляется возможность выбора режимов — с графическим отображением процесса идентификации или без такового. В последнем случае теряется наглядность отображения работы алгоритма, но зато существенно (примерно в 5 раз) уменьшается время обработки. На рис. 3.18 изображены основные стадии работы программы DLSOSMP.EXE. Фрагмент (а) повторяет фрагмент (е) рисунка 3.15 и соответствует началу работы программы, то есть чтению результатов предыдущей программы интерактивной идентификации, выполненной оператором. На фрагментах (б), (в), (г), (д) и (е) показаны "коридоры" разброса значений моделирующей функции, соответствующие итерациям по мере нарастания номера итерации.

Исходные экспериментальные данные должны быть помещены в подкаталог TEMP организованный в каталоге по умолчанию, содержащем перечисленные программные модули и файл pf.dat коррекции

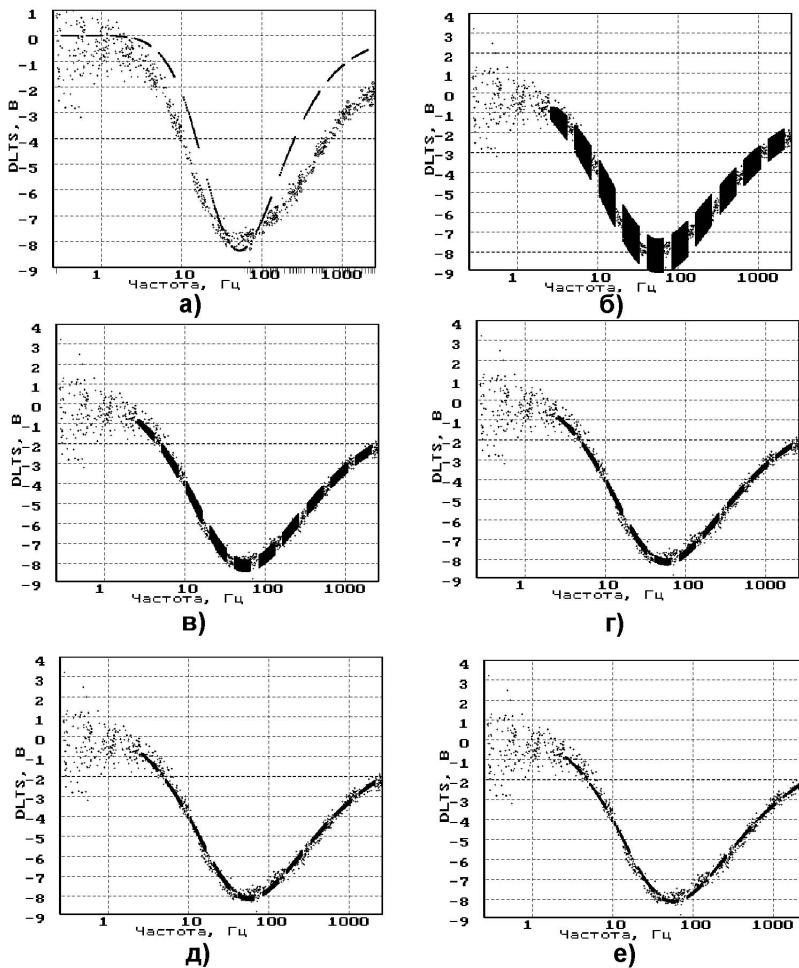


Рис. 3.18. Обработка с помощью DLSOSMP.EXE

опорных частот спектрометра DLS-82E (см. рис. 3.6 на с. 118). Это дает возможность раздельно хранить данные и необходимое для их обработки программное обеспечение.

В результате выходной файл второго модуля DLSOSMP.EXE содержит минимум три уточненных параметра модели (3.37) — τ , A и p . Идентификация четвертого параметра — постоянной заполнения ГУ $t_{зап}$ по одному скану принципиально возможна лишь при том условии, что этот скан получен в режиме так называемого частичного заполнения и опустошения ГУ, меняющегося при увеличении частоты F_0 опорного сигнала. Детально этот режим рассмотрен выше при выводе формулы (3.37). Для его реализации необходимо длительность заполняющего импульса t_1 при экспериментальном исследовании образца устанавливать в пределах ожидаемой постоянной заполнения. Тем самым мы как бы даем возможность процессам заполнения ГУ наглядно себя показать в пределах одного частотного скана DLTS-сигнала. Следует, однако, заметить, что при относительно малых значениях t_1 амплитуда релаксационного сигнала потенциально может меняться также из-за влияния паразитных емкостей измерительного тракта спектрометра. Отделить указанные причины от влияния релаксации ГУ в образце позволит анализ температурных зависимостей амплитуды релаксационного сигнала и постоянных заполнения и опустошения ГУ.

Для четырехпараметрической идентификации автором разработана программа DLSO1M4P.EXE. От программы DLSOSMP.EXE она отличается введением четвертого параметра в модель аппаратных преобразований на соответствующих этапах случайного поиска и покоординатного спуска. Результаты идентификации четырехпараметрической модели по одному скану приведены на с. 244 в таблице 5.1 в строках, соответствующих файлам e0045 – e0049. Обращают на себя внимание заметные разбросы всех четырех параметров модели, свидетельствую-

щие о невысокой устойчивости процесса. Оценка относительной и абсолютной точности идентификации каждого из четырех параметров модели (3.37) представляет собой самостоятельную задачу, решение которой выходит за рамки данной работы. Пока лишь можно с уверенностью высказать предположение, что идентификация четвертого параметра модели аппаратных преобразований — постоянной заполнения — будет, очевидно, более успешной, если ее осуществлять с использованием одновременно нескольких частотных сканов DLTS-сигнала, полученных при одинаковой температуре, но при разных длительностях заполняющего импульса t_1 , обуславливающих разные амплитуды пиков частотных сканов. Постановка задачи такой "мультискановой" идентификации вполне может оказаться преждевременной по причине несовершенства подсистемы управления температурой образца. Осточные изменения температуры (см. рис. 3.15 – в) таковы, что средняя температура, при которой получен частотный скан, отличается от заданной и незначительно меняется от скана к скану. Поэтому мультискановую идентификацию четырехпараметрической модели целесообразно отложить до реализации процессорной коррекции частотных сканов по температуре образца (см. с. 234), после которой будет сформирован годный для идентификации мультискан — набор частотных сканов, полученных при постоянной температуре, но при различных длительностях заполняющего импульса (см. с. 243).

3.2.3. Частотное сканирование и разрешение глубоких уровней

Разрешение спектральных линий глубоких уровней одного или разных типов (ловушки основных и неосновных носителей) является важной интегральной характеристикой методики РСГУ, определяющей способность различения близких линий в спектре DLTS, что

является актуальным для исследования полупроводниковых материалов с большим количеством различных центров, как, например, в GaAs. Логично предположить, что всякого рода усовершенствования программно-аппаратных средств положительно отразиться не только на чувствительности и точности определения параметров одноравниной модели аппаратных преобразований, но и на способности DLTS-спектрометра различать глубокие уровни с близкими значениями энергии активации и сечения захвата. Эти ГУ могут представлять собой ловушки одного или разных типов. В качестве примера можно сослаться на рис. 3.9 — 3.12, которые в разной степени отражают одновременную релаксацию как минимум двух ГУ, представляющих собой ловушки основных и неосновных носителей.

Уже упоминавшийся выше (см. с. 47) стандарт ASTM F 978–90 не регламентирует соответствующую процедуру, однако в работах отечественных авторов [20, 34, 61, 285, 290] предлагаются различные критерии разрешения близко расположенных спектральных линий. С помощью этих критериев в большинстве работ [20, 34, 61, 285], как правило, определяются оптимальные параметры весовой (опорной) функции селектора релаксационных сигналов. Таким образом разрешающая способность спектрометра зависит прежде всего от типа селектора и вида его опорной (весовой) функции. В этих работах чаще всего под селектором понимается устройство, состоящее из последовательно соединенных коррелятора и интегратора.

А.А. Шматовым [290] отмечается, что существующая неопределенность в вопросах выбора опорной функции коррелятора усугубляется обстоятельством, связанным с изменением методов обработки РСГУ спектров (температурных сканов) в сторону идентификации их математических моделей. При этом подходе информация о параметрах ГУ извлекается со всей РСГУ кривой (всего температурного скана), что

имеет преимущества по сравнению с методами, использующими точки максимума (минимума) пиков температурного скана. Под селектором в данном случае понимается уже не только соответствующее аппаратное средство, реализующее корреляционную процедуру обработки зашумленных периодических сигналов. Сюда включаются условия записи и методика обработки (как аппаратной, так и алгоритмической) сигнала релаксации [34]. А если принять во внимание нелинейность элементов измерительного тракта, то разрешающая способность становится интегральной характеристикой информационной технологии РСГУ.

В первом приближении можно вести речь о разрешении релаксационных сигналов экспоненциальной формы на фоне аддитивных шумов. В дальнейшем могут быть введены поправки на неэкспоненциальность сигналов релаксации и неаддитивность шумов. Поскольку температурное сканирование при постоянной длительности временного окна (периоде опорного сигнала) является основным способом исследования образцов в РСГУ, то при оценке разрешения оперируют с понятием ширины пика температурного скана DLTS-сигнала на полувысоте.

В работе [34, с. 3] при определении критерия разрешения авторы предлагают считать, что две спектральные линии (два пика температурного скана, полученные при разных, но близких значениях длительности временного окна) равной амплитуды и одинаковой полярности разрешаются, если их пересечение происходит на полувысоте линий (пиков) или ниже. Проверку экспериментальных спектров на присутствие в одном пике более чем одной линии предлагается проводить путем сопоставления ширины пика на полувысоте с некоторой расчетной величиной. Таким образом понятия разрешающая способность и присутствие в одном пике более чем одной спектральной линии в данной работе не означают одно и то же. Обращает на себя внимание тот факт, что при определении разрешающей способности совершенно не

используются характеристики шумов, сопровождающих релаксационный сигнал. Это может свидетельствовать либо о хорошей аппаратной обработке релаксационного сигнала, либо о большой его величине по отношению к шумам.

Ширину пика на полувысоте, определяемую как отношение показателей экспоненты τ_{\max} и τ_{\min} , при которых достигается половина высоты DLTS-максимума

$$l_W = \tau_{\max}/\tau_{\min}, \quad (3.46)$$

в работе [61] предлагается использовать для сравнительного анализа типов опорных функций коррелятора релаксационного сигнала. Расчитанная таким образом относительная ширина, в отличие от ширины в виде ΔT или отношения $\Delta T/T_{\max}$, по мнению авторов, не зависит от параметров ГЦ и является характеристикой только корреляционной (опорной) функции. С этим утверждением можно согласиться лишь при условии линейности корреляционного преобразования релаксационного сигнала. Однако (см. рис. 3.17) исследования селектора спектрометра DLS-82E на разных образцах с помощью частотного сканирования при постоянной температуре указывают, хотя и неоднозначно, на его нелинейность по отношению к слабым сигналам релаксации емкости.

Наряду с оценкой (3.46) в работе [61] предлагается дополнительно такой критерий как отношение сигнал/шум в точке DLTS-максимума

$$S_N = A_0/N, \quad (3.47)$$

где амплитуда DLTS-максимума определяется по формуле

$$A_0 = \int_0^{T_0} \exp(-t/\tau_0) W(t) dt, \quad (3.48)$$

а величина шума по формуле

$$N = \left(\int_0^{T_0} (W(t))^2 dt \right)^{1/2}. \quad (3.49)$$

Результаты сравнения опорных сигналов по критериям (3.46) и (3.47) отображаются в виде параметрической (фазовой) диаграммы в координатах $l_W - S/N$.

Знание ширины линии и отношения сигнал/шум не позволяет, к сожалению, однозначно оценить способность спектрометра различать соседние ГУ (с близкими значениями энергии активации и сечения захвата), особенно при переходе на обработку спектров методом математического моделирования. В работах [20, 60] для определения параметров ГУ используются наряду с максимумами DLTS-пиков точки пересечения температурных сканов DLTS-сигнала, полученных при различных значениях длительности временного окна. В таких точках величины DLTS-сигналов равны, и поэтому температурная зависимость амплитудного множителя не входит в окончательные формулы расчета τ . В работе Вывенко О.Ф. и др. [60] решается задача оптимизации отношения длительностей временных окон, при которых получаются температурные сканы. При таком подходе повышается точность регистрации температуры образца, расширяется температурный интервал и увеличивается число экспериментальных точек. В результате повышается точность определения энергии активации и, как следствие, потенциальное разрешение спектрометра.

Существенно влияет на разрешение близких по параметрам ГУ качество аппаратной обработки релаксационного сигнала, например, постоянная цифрового (до корреляционной обработки) или аналогового (после корреляционной обработки) интегрирования. Таким образом проблема абсолютной и относительной оценки разрешающей спо-

собности спектрометра ГУ существует и пока еще в целом остается нерешенной. С позиций современных информационных технологий регистрации и обработки релаксационных сигналов, предусматривающих построение и параметрическую идентификацию математических моделей аппаратных преобразований и физических процессов релаксации, указанная проблема по сути дела сводится к проблеме разработки оценки "идентифицируемости" многопараметрической модели по каждому из параметров. Данная проблема непосредственно связана с оценкой параметрической чувствительности модели к изменениям исходных параметров, а также с определением объема исходной экспериментальной информации и формулировкой требований к размерности мультискана (набора частотных сканов DLTS-сигнала, полученных при одной температуре и одновременно используемых для параметрической идентификации) и планированию эксперимента, например, в части его ортогональности и т. п. Точность, чувствительность и разрешающая способность, очевидно, должны стать основными критериями оптимизации информационной технологии РСГУ, поэтому целесообразно еще раз вернуться к этим вопросам (см. с. 232).

Для оценки разрешающей способности информационной технологии РСГУ можно в практических приложениях обойтись точностными характеристиками параметров ГУ — среднеквадратичными отклонениями энергии активации и сечения захвата (предэкспоненциального множителя), вычисление которых предусматривает стандарт ASTM F978–90 (см. с. 63). Разработанный автором в соответствии с этим стандартом программный модуль DLSOSGU1.EXE, получив файл данных, сформированный описанным выше модулем DLSOSMP.EXE, завершает обработку пакета частотных сканов определением параметров единичного глубокого уровня — энергии активации и предэкспоненциального множителя с использованием моделей Лэнга — стандар-

та F 978–90 (1.6, с. 52) и альтернативной — П.Т. Орешкина из РГРТА (1.8, с. 53). При этом программа использует совокупность пар значений τ и $T_{\text{ср.}}$ — постоянной опустошения и температуры образца. Результат отображается в виде прямых линий в соответствующих координатах $\lg(\tau T^2) — 1000/T$ или $\lg(\tau) — 1000/T$, которые сопровождаются численными значениями параметров ГУ и точностей их определения, рассчитанных по методике стандарта ASTM F 978–90 (см. с. 63). Результаты работы программы DLSOSGU1.EXE представлены на рис. 3.19. В верхней части этого рисунка приведены результаты обработки 50-ти частотных сканов, полученных в диапазоне температур образца 261 К ... 295 К и обработанных по модели Лэнга (стандарта ASTM F 978–90). В нижней части рисунка отражена аналогичная обработка по модели П.Т. Орешкина из РГРТА. Анализ этих результатов, полученных на эталонном образце спектрометра DLS–82E, позволяет сделать следующие выводы:

1. Точность определения энергии активации с помощью частотно-температурного сканирования, выраженная трехсигмальной оценкой (2,33%), существенно (в 4 – 6 раз) выше указанной в приложении к стандарту F 978–90 межлабораторной (по семи различным лабораториям, исследовавшим одинаковые образцы) точности определения этого параметра (8,6% ...13%) с помощью классического температурного или, точнее, температурно-частотного сканирования со сменой частот опорного сигнала (временных окон) при изменяющейся температуре. К сожалению, в указанном приложении не приведены соответствующие оценки точности по каждой из лабораторий, участвовавших в межлабораторной проверке стандарта. Не указаны там и температурные интервалы, на которых получена исходная экспериментальная информация. Поэтому сравнение информационной технологии частотно-температурного сканирования с классической носит предварительный

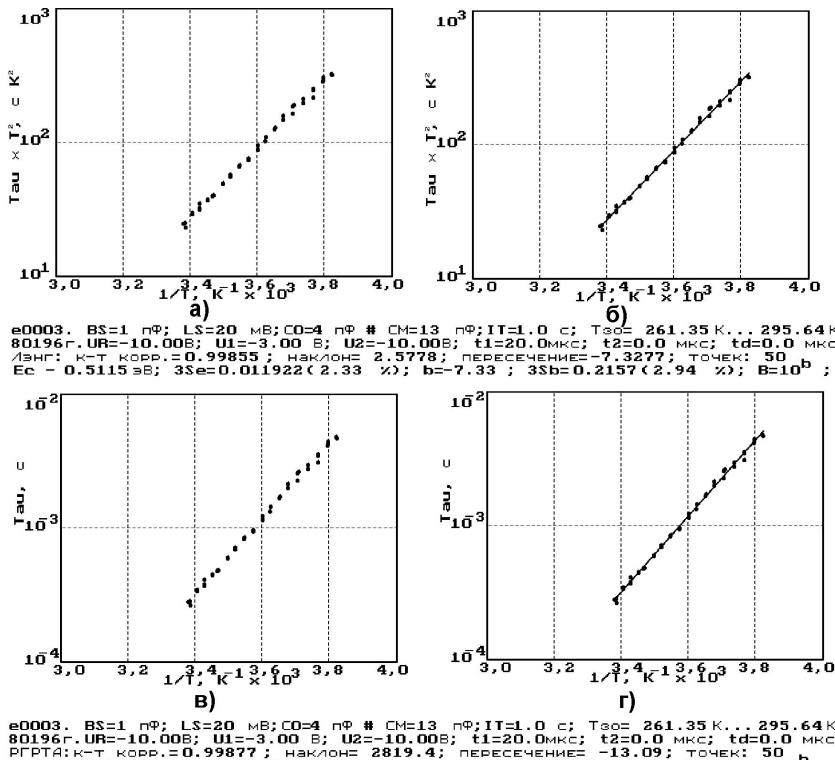


Рис. 3.19. Определение параметров ГУ с помощью DLSOSGU1.EXE

характер.

2. Значения энергии активации наблюдаемого донорного ГУ, определенные по моделям Д. Лэнга и П.Т. Орешкина (0,5115 эВ и 0,5594 эВ), различаются на величину, превышающую трехсигмальную оценку точности (0,012 эВ). Таким образом разрешение частотно-температурного сканирования является достаточным для сопоставления указанных моделей по энергии активации.

В таблице 3.1 приведены результаты экспериментальных исследований эталонного образца при разных режимах измерений в диапазоне температур 260 К ... 300 К. В первом столбце в скобках указаны объемы каждого эксперимента, равные количеству полученных сканов. Результаты обработаны с помощью программ DLSOSMR.EXE, DLSOSMP.EXE и DLSOSGU1.EXE, использующих трехпараметрическую модель аппаратных преобразований спектрометра DLS-82E (3.20). Для параметров ГУ – энергии активации $E_{\text{ГУ}}$ и показателя b предэкспоненциального множителя – в таблице приведены соответствующие трехсигмальные оценки 3Se и 3Sb – утроенные среднеквадратичные отклонения параметров. Из этой таблицы следует, в частности, что в рамках принятой модели разрешающая способность частотного сканирования при постоянной температуре позволяет изучать влияние режимов измерений на параметры ГУ. Это, в свою очередь, может быть использовано также для уточнения моделей релаксационных процессов.

3.3. Выводы

1. Разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) (рис. 3.2) для автоматизации научных исследований в области релаксационной спектроскопии глубоких уровней на базе спектрометра DLS—

Таблица 3.1. Влияние режимов измерений на параметры ГУ

Имя файла эксперимента (число точек)	Режимы измерений			Параметры глубокого уровня			
	UR, B	U1, B	t1, мкс	E _{Гу} , эВ	3Se, эВ	b	3Sb
e0003 (50)	-10	-3	20	0,5115	0,0119	-7,33	0,22
e0004 (46)	-8	-1	20	0,4941	0,0099	-6,96	0,18
e0005 (19)	-6	-1	20	0,4379	0,0123	-6,18	0,22
e0006 (40)	-10	-5	20	0,4708	0,0096	-6,83	0,17
e0007 (37)	-10	-1	10	0,4752	0,0117	-6,64	0,21
e0008 (39)	-10	-3	10	0,4941	0,0101	-7,08	0,18

82Е фирмы SEMITRAP (Венгрия) и стробоскопического цифрового осциллографа TR-4910 фирмы EMG (Венгрия) (АСНИ РСГУ). ИВК впервые реализует сочетание измерительного режима частотного сканирования образца при постоянной температуре и прямой регистрации релаксационного сигнала с возможностью его алгоритмической селекции и распознавания.

2. Теоретические и экспериментальные исследования измерительного режима частотного сканирования при постоянной температуре позволяют существенно уточнить представления о селекции релаксационных сигналов спектрометров глубоких уровней. С помощью разработанной АСНИ РСГУ:

- исследовано влияние эффектов нелинейности измерительного тракта и неэкспоненциальности релаксационного сигнала на разрешающую способность спектрометра. Предложена и апробирована математическая модель (3.20) модифицированного синхродетектора прибора DLS—82Е, учитывающая указанные эффекты. Для их разделения необходима экспериментальная оценка реальной линейности измери-

тельного тракта, которая может быть получена с помощью эталонного релаксационного сигнала с регулируемой амплитудой;

- исследованы эффекты частичного заполнения и неполного опустошения ГУ и получена необходимая экспериментальная информация, позволившая предложить и идентифицировать математическую модель (3.37) указанных эффектов;

- исследована температурная зависимость амплитуды пика релаксационного сигнала, которая с учетом нелинейности измерительного тракта позволит дополнительно уточнить энергию активации ГУ;

- выполнены экспериментальные исследования полевого эффекта — зависимости частотного скана DLTS-сигнала от абсолютных значений и разности уровней заполнения и опустошения ГУ основными и неосновными носителями.

3. Предложено и технически реализовано мониторирование вспомогательных сигналов РСГУ: температуры образца, остаточного разбаланса емкостного моста, фактических значений уровней заполнения и опустошения ГУ, создающее предпосылки для адаптации спектрометра относительно перечисленных сигналов.

4. Предложено аппаратно-программное решение проблемы обеспечения устойчивости работы спектрометра в режиме частотного сканирования.

5. Частотное сканирование при постоянной температуре позволяет разделить моделирование аппаратных преобразований и физических процессов заполнения и опустошения ГУ и тем самым упростить идентификацию моделей, существенно повысив статистическую точность определения параметров ГУ, в частности энергии активации (в 4 – 6 раз по сравнению с указанной в приложении к стандарту F 978–90 межлабораторной точностью определения этого параметра).

6. В целом, реализация режима частотно-температурного скани-

рования в РСГУ, особенно в адаптивно-итеративном варианте, создает предпосылки для значительного увеличения объема и точности исходной экспериментальной информации о свойствах ГУ и механизмах аппаратных преобразований релаксационных сигналов и тем самым может способствовать решению существующих проблем РСГУ. Разрешающая способность предложенных моделей аппаратных преобразований релаксационных сигналов, идентифицированных с помощью частотно-температурного сканирования, позволяет фиксировать различия основных моделей процессов релаксации ГУ, описанных в литературе, по определяемой с их помощью энергии активации, а также предоставляет новую информацию для изучения влияния полевого эффекта на параметры релаксационного сигнала.

Глава 4.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

4.1. Математическое моделирование физических процессов релаксации глубоких уровней в слое объемного заряда

4.1.1. Анализ противоречий базовых соотношений, основных моделей и экспериментальных данных

Применение частотно-температурного сканирования (см. главу 3) в РСГУ позволяет значительно увеличить объем и точность исходной экспериментальной информации о свойствах ГУ и механизмах аппаратных преобразований релаксационных сигналов. В разработанном под руководством автора и описанном в предыдущей главе измерительно-вычислительном комплексе на базе спектрометра DLS-82E и стробоскопического анализатора TR-4910 (рис. 3.2) впервые обеспечивается возможность сочетания частотно-температурного сканирования с компьютерным анализом исходных релаксационных сигналов, регистрируемых до аппаратной обработки, включая алгоритмическую селекцию и распознавание (фильтрацию) формы. Это объективно создает предпосылки для получения новых знаний о свойствах глубоких уровней в процессе анализа противоречий базовых соотношений физики полупроводников, существующих моделей релаксации ГУ и новых экспериментальных данных.

Узлом многих проблем адекватного математического моделирова-

ния является, как известно, взаимосвязь формальных и неформальных методов в синтезе модели и ее численной реализации с учетом разумного компромисса "точность — сложность" [38]. Указанный компромисс предполагает экспериментальное подтверждение приемлемой адекватности выходных характеристик и параметров физико-топологического и технологического уровней моделирования, без которого бессмысленно использовать формальный математический аппарат решения исходных (достаточно сложных на этом уровне моделирования) уравнений моделей. Разработка пригодных для практического использования математических моделей физических процессов релаксации ГУ предполагает не только стремление к упомянутым компромиссам, но и выявление новых закономерностей, связей искомых и базовых переменных модели, фундаментализацию их описания. В этом плане, на наш взгляд, более продуктивным является не подтверждение, а, наоборот, экспериментальное опровержение тех или иных используемых или разрабатываемых моделей, разумеется, при условии корректности постановки эксперимента. Повышение точности DLTS-измерений за счет использования частотно-температурного сканирования с комплексной аппаратурно-алгоритмической селекцией релаксационных сигналов потенциально способно реализовать такие эксперименты. Это, в свою очередь, будет способствовать коррекции математической формулировки задачи исследования, пересмотру физических приближений, новому ранжированию учитываемых и пренебрегаемых факторов.

К базовым (фундаментальным) соотношениям, описывающим работу полупроводниковых приборов на физико-топологическом и технологическом уровнях [101, 38] обычно относят уравнение Пуассона, являющееся следствием одного из четырех обобщенных уравнений Максвелла, а также уравнения непрерывности и кинетические уравнения переноса носителей заряда, включающие сравнительную оценку токов

смещения и проводимости. Необходимо отметить, что в понятие "фундаментальности" уравнений полупроводника большинство авторов не вкладывают их незыблемость — скорее это один из наборов основополагающих уравнений, описывающих с достаточной адекватностью электрофизические процессы в полупроводниковых структурах.

Для простоты дальнейшего изложения ограничимся одномерным случаем. Объемная плотность J_{cond} тока проводимости, который вместе с током смещения определяет полный ток в объеме полупроводника, складывается, как известно, из плотностей J_n электронного и J_p дырочного токов, которые определяются соотношениями [101], состоящими из полевой (обусловленной дрейфом носителей заряда под действием электрического поля) и диффузионной (обусловленной градиентом концентрации) компонент:

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.2)$$

где q — заряд электрона (дырки), μ_n — подвижность электрона, $n = n(x)$ — концентрация электронов, $E = E(x)$ — напряженность электрического поля, D_n — коэффициент диффузии электронов, $\frac{\partial n}{\partial x}$ — производная концентрации электронов по пространственной координате, μ_p — подвижность дырки, $p = p(x)$ — концентрация дырок, D_p — коэффициент диффузии дырок, $\frac{\partial p}{\partial x}$ — производная концентрации дырок по пространственной координате. Для невырожденных полупроводников с учетом соотношения Эйнштейна, связывающего коэффициенты диффузии с соответствующими значениями подвижностей (для электронов $D_n = (kT/q)\mu_n$, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура), соотношения (4.1) и (4.2) при не очень сильных

электрических полях принимают вид:

$$J_n = q\mu_n \left(nE + \frac{kT}{q} \frac{\partial n}{\partial x} \right), \quad (4.3)$$

$$J_p = q\mu_p \left(pE - \frac{kT}{q} \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (4.4)$$

При сильных полях в уравнениях (4.3) и (4.4) рекомендуется заменить произведения $\mu_n E$ и $\mu_p E$ на соответствующие предельные скорости v_s . Для практических приложений можно воспользоваться эмпирическим выражением для дрейфовой скорости, приведенным в [166, с.59] для кремния со ссылкой на [319] в диапазоне температур 77 К ... 300 К :

$$v_d = v_s \left(\frac{E}{E_s} \right) \left[1 + \left(\frac{E}{E_s} \right)^\beta \right]^{-\frac{1}{\beta}}, \quad (4.5)$$

где для электронов $v_s = 1,53 \cdot 10^9 \cdot T^{-0,87}$ см/с, $E_s = 1,01T^{1,55}$ В/см, $\beta = 2,57 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0,66}$ и для дырок $v_s = 1,62 \cdot 10^8 \cdot T^{-0,52}$ см/с, $E_s = 1,24 \cdot T^{1,68}$ В/см, $\beta = 0,46 \cdot T^{0,17}$. При температуре 300 К скорость v_s равна $1,07 \cdot 10^7$ см/с для электронов и $8,34 \cdot 10^6$ см/с для дырок. При длине слоя объемного заряда порядка 1 мкм соответствующие времена пролета носителей несоизмеримо меньше наблюдаемых значений постоянных релаксаций, и по этой причине соотношения (4.5,4.6,4.7) не могут внести существенный вклад в модели выноса высвобождающихся носителей в область электронейтральности.

В случае неоднородных электрических полей обычно рекомендуется использовать зависимости подвижности от температуры и концентрации легирующих примесей. Для кремния приводимые в литературе эмпирические зависимости имеют вид [166, с.56] :

$$\mu_n = 88 \cdot T_n^{-0,57} + \frac{7,4 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,33}}{1 + [N/(1,26 \cdot 10^{17} \cdot T_n^{2,4})]0,88 \cdot T_n^{-0,146}}, \quad (4.6)$$

$$\mu_p = 54,3 \cdot T_n^{-0,57} + \frac{1,36 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,33}}{1 + [N/(2,35 \cdot 10^{17} \cdot T_n^{2,4})]0,88 \cdot T_n^{-0,146}}, \quad (4.7)$$

где $T_n = T/300$, T — температура по шкале Кельвина, а N — суммарная концентрация легирующих примесей в кремнии. Формулами (4.6) и (4.7) можно пользоваться при концентрациях примесей до 10^{20-3} и для температур от 250 К до 500 К. Если допустить, что длительность процесса выноса вы свободившихся с ГУ носителей определяется концентрацией ГУ, которая чаще всего мала относительно концентрации основных примесей (мелких уровней), то в соответствии с формулами (4.6) и (4.7) уменьшение концентрации только увеличивает подвижность носителей и может привести лишь к уменьшению и без того малого времени пролета слоя объемного заряда.

Специфика используемых в РСГУ образцов и режимов работы полупроводниковых структур позволяет в рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения разделить эти относительно простые структуры (диоды Шоттки, несимметричные резкие $p - n$ переходы) на области квазинейтральности и объемного заряда и воспользоваться хорошо разработанным подходом, основанным на выделении доминирующего физического процесса и расщеплении фундаментальной системы уравнений (ФСУ) с последующим сшиванием на границах областей аналитическими приближениями [38].

Таким доминирующим физическим процессом в подавляющем большинстве работ считается процесс перезаряда глубоких уровней с постоянной перезаряда τ и предэкспоненциальным множителем τ_0 , определяемыми соответственно по формулам (1.2) и (1.5). Считается, что заполнение и опустошение ГУ происходят с одной и той же скоростью $1/\tau$, имеющей физический смысл вероятности ухода (или захвата) носителя с ГУ в единицу времени. Последняя из перечисленных формул достаточно строга (см. например [328, 31]) выводится на базе статисти-

ки Больцмана в предположении мгновенного выноса свободных носителей, высвободившихся с ГУ, в область электронейтральности. Указанное предположение справедливо, если слой объемного заряда, в котором релаксируют ГУ, является достаточно тонким, что соответствует небольшим значениям разности опустошающего U_R и заполняющего U_1 напряжений, запирающих $p - n$ переход в соответствии с временной диаграммой конкретного спектрометра, например, DLS-82E (см. рис. 3.1). Теоретически, приближая U_1 к U_R , можно получить релаксационный отклик, емкостный или токовый, соответствующие моноатомному слою, но в этом случае трудно обеспечить удовлетворительное для последующей обработки соотношение "сигнал/шум". При более глубоком теоретическом рассмотрении следует учесть другие ограничения, в частности, явления на границе релаксирующего СОЗ и области электронейтральности (ОЭН), а именно, существование переходной области или длины Дебая для легированного полупроводника [166, с. 229], максимальное значение которой (собственная длина Дебая) определяется выражением:

$$L_d = \left(\frac{\varepsilon kT}{q^2 n_i} \right)^{1/2}. \quad (4.8)$$

и составляет 24 мкм при комнатной температуре. Для легированного полупроводника вместо собственной концентрации свободных носителей n_i следует подставить суммарную концентрацию свободных носителей в рассматриваемой области полупроводника $n + p$. Для симметричных $p - n$ -переходов с типовыми примесными концентрациями 10^{16} см^{-3} длина Дебая составляет уже 40 нм при длине обедненного слоя для одной из областей полупроводника порядка 200 нм [166, с. 230].

Доминирующим физическим процессом в модели П.Т. Орешкина (1.8) для основных носителей заряда, высвобождающихся с ГУ, судя

по использованию максвелловского времени релаксации τ_M , является так называемая диэлектрическая релаксация, обусловленная с позиций ФСУ возникновением токов смещения в процессе нейтрализации свободного заряда в полупроводнике с помощью процессов проводимости. Если в однородном проводнике (полупроводнике, диэлектрике) с одним типом носителей, проводимостью $1/\varrho_v$ и диэлектрической проницаемостью ε [166, с. 52] задано распределение концентрации подвижных зарядов $\varrho(x, y, z, t = 0)$, то используя уравнение Пуассона $\nabla D = \varrho$, определение электрической индукции $D = \varepsilon E$, закон Ома $J = E/\varrho_v$ и уравнение непрерывности $\nabla J = -d\varrho/dt$, можно получить

$$\varrho(x, y, z, t) = \varrho(x, y, z, t = 0) \exp[-t/(\varepsilon\varrho_v)],$$

что означает накопление нескомпенсированного заряда в местах, представляющих собой неоднородность, то есть на границе СОЗ и ОЭН, с постоянной времени $\tau_M = \varepsilon\varrho_v$. При определении удельной объемной проводимости $1/\varrho_v$, например по формуле $1/\varrho_v = q\mu_n n$, по мнению автора, необходимо учитывать то обстоятельство, что область, в которой носители освобождаются с ГУ, обеднена основными носителями, причем процесс обеднения продолжается за счет высвобождения носителей с ГУ. Последнее обстоятельство помогает в какой-то степени понять присутствие множителя 2 в формуле (1.8).

На основе этих, в общем-то противоречивых, доминирующих процессов, к сожалению, пока не получено удовлетворительное объяснение полевого эффекта, почти всегда сопровождающего измерение параметров ГУ (рис. 3.9, 3.10, 3.11, 3.12). По мнению автора, построение и идентификация именно математических моделей полевого эффекта, включая моделирование эффекта Пула-Френкеля, могут явиться ключевым моментом выбора доминирующего процесса (процессов). Не исключено, что для решения этой задачи придется каким-то об-

разом объединить (сочетать) обе модели релаксации ГУ, которые пока противопоставляются друг другу. Математические модели полевого эффекта должны стать составной частью алгоритмических измерений параметров ГУ, особенно при малых размерах образцов, характерных для микро- и наноэлектроники, когда существует необходимость обеспечения соотношения "сигнал/шум" с помощью увеличения разности напряжений $U_1 - U_R$.

4.1.2. Эффект поля в математических моделях процессов опустошения ГУ и выноса носителей заряда в область электронейтральности

Попытаемся объяснить полевой эффект, то есть зависимость постоянной релаксации τ от разности заполняющего U_1 и опустошающего U_R напряжений, с помощью уравнения непрерывности. Как известно, уравнения непрерывности могут быть получены как для основных, так и для неосновных носителей в полупроводнике, и способны учитывать процессы генерации, рекомбинации, выноса носителей в область электронейтральности и опустошения ГУ при подаче напряжения опустошения ГУ (обратного смещения $p - n$ -перехода U_R), а также заполнения ГУ носителями при подаче напряжения заполнения U_1 .

Получим уравнение непрерывности, описывающее ту часть процесса опустошения одиночного ГУ, которая в соответствии с временной диаграммой (рис. 3.1) доступна для регистрации с помощью селектора релаксационных сигналов спектрометра DLS-82E. Параметры этой временной диаграммы подобраны таким образом, чтобы к началу регистрации реакции глубокого уровня на заполняющий импульс закончился не только процесс заполнения ГУ, но и основные процессы выноса носителей с мелких уровней в область электронейтральности (ОЭН).

Это означает, что мы наблюдаем увеличение объемного заряда за счет высвобождения носителей заряда с ГУ и выноса их в область электронейтральности. Для определенности смоделируем процесс в базе $p^+ - n$ -диода после заполнения ГУ основными носителями (электронаами) с помощью подачи запирающего $p - n$ -переход напряжения заполнения U_1 ($U_1 > U_R$), ограничившись одномерным случаем [166, с.267]. Чтобы вывести одномерное уравнение непрерывности для электронов, высвобождающихся с ГУ, следует рассмотреть бесконечно тонкий слой базы, имеющий толщину dx и расположенный на расстоянии x от левой границы той части слоя объемного заряда (СОЗ), где ГУ способны захватывать электроны [31, с.10] при подаче заполняющего импульса (см. рис. 4.1 (а)).

Обозначим эту область СОЗ как СОЗ_{РГУ} и будем считать слой dx расположенным внутри СОЗ_{РГУ}. Правая граница этой области отделяет СОЗ от ОЭН. Точнее, между правой границей СОЗ_{РГУ} и ОЭН существует небольшой участок СОЗ, на котором нет перезаряда ГУ, однако им, вследствие его относительно малой длины, можно пренебречь (см. рис. 4.1 (б), (в)). Положение границ СОЗ_{РГУ} определяется напряжениями заполнения U_1 и опустошения U_R , а также профилями концентрации мелких и глубоких уровней.

Число электронов в слое увеличивается за счет опустошения ГУ. Данный процесс аналогичен процессу генерации электронов. При относительно малых концентрациях ГЦ повторным захватом электронов на ГУ обычно [31] рекомендуется пренебречь, т. е. считать, что процесс, аналогичный рекомбинации, не имеет места. Такое допущение может быть обоснованным при малых $U_1 - U_R$, т. е. при малой толщине СОЗ_{РГУ} или в непосредственной близости от левой границы СОЗ_{РГУ}. Если эта толщина значительна (при увеличении $U_1 - U_R$), то вероятность повторного захвата электрона на ГУ, очевидно, по мере

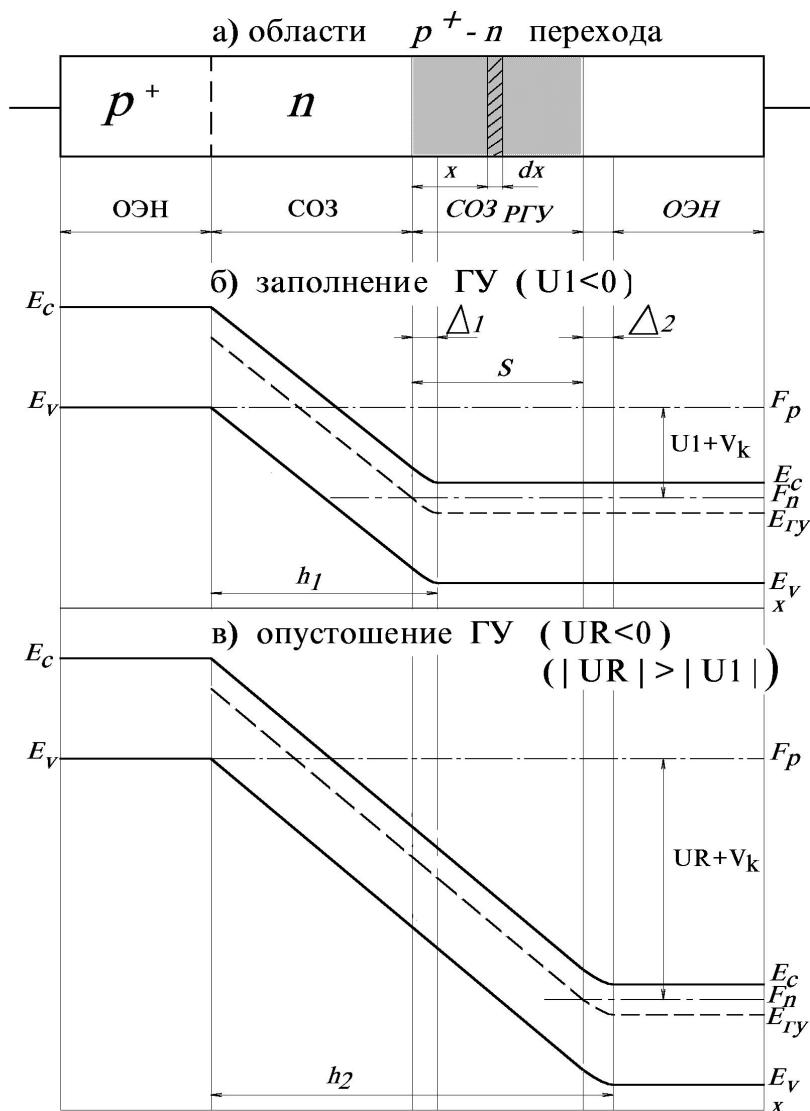


Рис. 4.1. К выводу уравнения непрерывности

удаления слоя dx от левой границы СОЗ РГУ будет возрастать пропорционально количеству электронов, высвобождающихся с ГУ и проходящих под действием электрического поля через слой dx .

Число электронов в слое может увеличиваться также за счет потока электронов, втекающего в слой. Поэтому изменение содержания электронов будет равно алгебраической сумме числа электронов, втекающих в слой, минус число электронов, вытекающих из него, плюс число электронов, генерированных в слое за счет высвобождения с ГУ минус число электронов, повторно захваченных на ГУ. Первые две составляющие могут быть найдены путем деления токов с каждой стороны слоя на заряд электрона; последние пока будут просто обозначены как G_n и R_n . Следует учесть также, что электроны, захваченные на ГУ, впоследствии могут высвобождаться с них. Сочетание процессов опустошения ГУ и захвата на ГУ может быть интерпретировано и как относительное замедление процесса опустошения ГУ по мере перемещения участка dx от левой границы СОЗ РГУ к правой вследствие изменения условий равновесия при заполнении и опустошении ГУ в пользу заполнения ГУ. Именно эту картину мы и наблюдаем при проведении эксперимента (см. рис.3.9 и рис.3.10).

Скорость изменения числа электронов в слое будет равна

$$\frac{\partial n}{\partial t} S dx = \left[\frac{J_n(x)}{-q} - \frac{J_n(x + dx)}{-q} \right] S + G_n S dx - R_n S dx, \quad (4.9)$$

где S — площадь поперечного сечения слоя. Разлагая числитель вычитаемого внутри квадратных скобок в правой части уравнения в ряд Тейлора

$$J_n(x + dx) = J_n(x) + \frac{\partial J_n}{\partial x} dx + \dots, \quad (4.10)$$

можно получить основное уравнение непрерывности для электронов,

высвобождающихся с ГУ и движущихся в ОЭН:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n. \quad (4.11)$$

Темп генерации электронов в слое G_n за счет высвобождения их с ГУ при малых значениях x определяется концентрацией активных (то есть термоионизированных) ГЦ, степенью их начального заполнения, которая зависит, например, от длительности импульса заполнения, суммарной концентрацией электронов, покинувших ГУ к моменту времени t , а также характеристикой ГУ — постоянной релаксации (перезаряда) ГУ τ_n . По мере увеличения x необходимо принимать во внимание количество повторно захваченных носителей на ГУ в сечении dx за время t . Темп повторного захвата носителей на ГУ R_n определяется количеством выносимых в область электронейтральности в момент времени t через сечение dx свободных носителей, вероятностью повторного захвата P_n их на ГУ и постоянной перезаряда ГУ τ_n . Вероятность повторного захвата будет, в свою очередь, определяться скоростью движения высвобождаемых с ГУ носителей (напряженностью электрического поля) и зависеть от сечения захвата и концентрации опустошенных активных ГУ, способных захватывать носители, то есть будет функцией от x и t . С учетом диффузационной и дрейфовой составляющих электронного тока уравнение непрерывности для электронов, высвобождающихся с ГУ, примет вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + n \mu_n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (4.12)$$

где

$$G_n = \frac{\gamma_{\text{зап}} n_{\text{aГУ}} + \int_0^t \frac{P_n}{\tau_n} \int_0^x n dx dt - \int_0^t n dt}{\tau_n}, \quad R_n = \frac{P_n}{\tau_n} \int_0^x n dx,$$

$n = n(x, t)$ — концентрация электронов, высвобождающихся с ГУ, $\gamma_{\text{зап}}$ — степень начального заполнения ГУ ($0 < \gamma_{\text{зап}} \leq 1$), $n_{\text{aГУ}} = n_{\text{aГУ}}(x)$ — концентрация активных ГУ, которые были бы ионизованы, если находились бы в ОЭН, т. е. это концентрация ГУ, участвующих в захвате электронов, P_n — вероятность захвата на ГУ движущегося под действием электрического поля электрона, τ_n — постоянная релаксации опустошения для электронов, $E = E(U_R, x, t)$ — напряженность поля, μ_n — подвижность электронов, высвобождающихся с ГУ, D_n — коэффициент диффузии электронов, высвобождающихся с ГУ. В первом приближении при относительно малой концентрации ГЦ ($n_M(x) \gg n_{\text{ГЦ}}(x)$) напряженность можно считать не зависящей от времени и зависящей от распределения концентрации основной (мелкой) примеси по координате $n_M(x)$ и напряжения смещения U_R , т. е. $E = E(U_R, n_M(x))$.

Концентрация ГУ, участвующих в захвате электронов, зависит от концентрации глубоких центров $N_{\text{ГЦ}}$, энергетического положения ГУ в запрещенной зоне $E_{\text{ГУ}}$ и температуры T [31]:

$$n_{\text{aГУ}} = N_{\text{ГЦ}} \exp \left(-\frac{F_n - E_{\Gamma}}{4kT} \right), \quad (4.13)$$

где F_n — положение примесного уровня Ферми.

Аналогичный вид с учетом изменения знака заряда будет иметь уравнение непрерывности для дырок, высвобождающихся с ГУ в СОЗ базы p -типа обратно смещенного $n^+ - p$ -диода:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - p\mu_p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (4.14)$$

где

$$G_p = \frac{\gamma_{\text{зап}} p_{\text{aГУ}} + \int_0^t \frac{P_p}{\tau_p} \int_0^x pdxdt - \int_0^t pdt}{\tau_p}, \quad R_p = \frac{P_p}{\tau_p} \int_0^x pdx,$$

$p = p(x, t)$ — концентрация дырок, высвобождающихся с ГУ, $p_{\text{aГУ}} = p_{\text{aГУ}}(x)$ — концентрация активных ГУ, которые были бы ионизованы, если находились бы в ОЭН, т. е. это концентрация ГУ, участвующих в захвате дырок, P_p — вероятность захвата на ГУ движущейся под действием электрического поля дырки, τ_p — постоянная релаксации опустошения для дырок, $E = E(U_R, x, t)$ — напряженность поля, μ_p — подвижность дырок, высвобождающихся с ГУ, D_p — коэффициент диффузии дырок, высвобождающихся с ГУ. В первом приближении при относительно малой концентрации ГЦ ($p_M(x) \gg p_{\text{ГЦ}}(x)$) напряженность можно считать не зависящей от времени и зависящей от распределения концентрации основной (мелкой) примеси по координате $p_M(x)$ и напряжения смещения U_R , т. е. $E = E(U_R, p_M(x))$. Следует подчеркнуть, что эти уравнения получены в предположении независимости подвижности μ и коэффициента диффузии D от x .

По аналогии концентрация ГУ, участвующих в захвате дырок, зависит от концентрации глубоких центров $N_{\text{ГЦ}}$, энергетического положения ГУ в запрещенной зоне $E_{\text{ГУ}}$ и температуры T [31]:

$$p_{\text{aГУ}} = N_{\text{ГЦ}} \exp \left(-\frac{E_{\text{ГУ}} - F_p}{4kT} \right), \quad (4.15)$$

где F_p — положение примесного уровня Ферми.

В общем случае уравнения (4.12) и (4.14) не имеют аналитического решения, однако могут быть решены численными методами, например, с использованием конечноразностных схем [13, 38, 208]. Огромное раз-

нообразие применяемых численных методов свидетельствует об отсутствии на сегодня единого универсального, максимально эффективного подхода для всех типов полупроводниковых структур и видов анализа. Общим при численном решении интегродифференциальных уравнений в частных производных является существование двух этапов. На первом этапе пространственную область разбивают на сетку из отдельных точек или узлов. На втором этапе применение какого-либо метода дискретизации к данной краевой задаче сводит ее к алгебраической в пространстве с достаточно большой (но конечной) размерностью. Дискретизированные уравнения выводятся из (4.12) и (4.14) с помощью аппроксимаций производных и интегралов, в которые входят значения неизвестных функций только в узлах сетки, что можно сделать, используя интерполяционные функции в окрестности узла.

Для решения уравнения непрерывности численными методами необходимо сформулировать начальные и краевые условия, а также уточнить геометрические и электрофизические параметры моделей, обосновать ограничения на количество физических механизмов, составляющих суть процессов релаксации ГУ [38].

В уравнении (4.12) генерационная G_n и рекомбинационная R_n составляющие учитывают повторный захват электронов на ГУ по мере их движения по СОЗРГУ в сторону ОЭН. Вероятность повторного захвата P_n считается величиной весьма малой и потому постоянной, что весьма ограничивает область применения уравнения. В целом оно получилось достаточно громоздким и для своего решения требует большого объема априорной информации. В то же время далеко не все параметры допускают электрофизическую модельное истолкование, например, P_n .

Интегродифференциальные уравнения в частных производных (4.12) и (4.14) при малой ширине СОЗ РГУ, стремящейся к dx (что со-

отвечает малым значениям $U_1 - U_R$), могут быть сведены к обыкновенному линейному дифференциальному уравнению вида:

$$\frac{dy}{dt} = y\varphi(t) + \psi(t). \quad (4.16)$$

Рассмотрим, например, случай, когда концентрация глубоких центров не зависит от координаты x , т. е. соответствующие первая и вторая частные производные по координате равны нулю, а, следовательно, последнее и предпоследнее слагаемые в правой части уравнений (4.12) и (4.14) обращаются в нуль. Вследствие малой ширины СОЗРГУ будут равны нулю и слагаемые, которые содержат интегралы по координате x . После перехода в уравнении (4.12) от переменной $n(t)$ к переменной $n_{\Gamma Y}(t)$ (концентрация опустошенных ГУ) в предположении относительно большой скорости выноса в ОЭН покинувших ГУ электронов (что позволит пренебречь слагаемым $n\mu\frac{\partial E}{\partial x}$) получаем:

$$\varphi(t) = -\frac{1}{\tau_n}, \quad \psi(t) = \frac{\gamma_{\text{зап}} n_{\text{a}\Gamma Y}}{\tau_n}, \quad (4.17)$$

т. е. $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ — постоянные величины.

Решение уравнения (4.16) в общем виде выглядит следующим образом [13, с.310]:

$$y = e^{\int_0^t \varphi(t) dt} \left(\int_0^t e^{-\int_0^t \varphi(t) dt} \psi(t) dt + C \right), \quad (4.18)$$

где C — значение функции y при $t = 0$. В рассмотренном частном случае (4.17) оно представляет собой экспоненту:

$$n_{\Gamma Y}(t) = \gamma_{\text{зап}} n_{\text{a}\Gamma Y} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} \right) \right]. \quad (4.19)$$

Более точным и в то же время пригодным и перспективным для практики, на наш взгляд [138], может стать конечноразностное приближение, учитывающее повторный захват без диффузионно-дрейфовых составляющих, которое для элемента $n_{\Gamma Y}^-(i, j)$ внутри двумерной сетки (координата x — время t) при $i > 1$ и $j > 0$ имеет вид

$$n_{\Gamma Y}^-(i, j) = n_{\Gamma Y}^-(i, j-1) - n_{\Gamma Y}^-(i, j-1) \frac{\Delta t}{\tau_n} \{1 - \sigma_n \Delta t \frac{\Delta x}{\tau_n} [n_{\Gamma Y}^-(i-1, j-1) + \\ + \sum_{k=2}^{k=i} n_{\Gamma Y}^-(i-k, j-1) \prod_{l=1}^{l=k-1} (1 - \sigma_n n_{\Gamma Y}^-(i-l, j-1) \Delta t \frac{\Delta x}{\tau_n})]\}, \quad (4.20)$$

где σ_n — сечение захвата ГУ, Δt и Δx — шаги сетки, $n_{\Gamma Y}^-(i, 0) = n_{\Gamma Y}(t)$, которая определяется по (4.19) и, в свою очередь, может зависеть от координаты x ; k и l — вспомогательные целочисленные переменные. При $i = 1$ второе слагаемое в квадратных скобках выражения (4.20) исчезает.

Приближение (4.20), полученное в предположении мгновенного выноса освободившихся с ГУ носителей, отражает поведение концентрации заряда на ГУ во времени и пространстве и представляет собой одномерный вариант описания процесса опустошения ГУ во времени в СОЗрГУ длиной S (см. рис. 4.1) при следующих начальных условиях и приближениях. Момент времени $t = 0$ ($j = 0$) соответствует началу процесса опустошения и начальному распределению концентрации ГУ, захвативших носители заряда. В общем случае эта величина, как уже отмечалось, может быть не постоянной величиной, а функцией от x , то есть от i . В крайнем левом элементарном слое ($i = 0$) имеет место только опустошение ГУ без повторного захвата и выражение в фигурных скобках становится равным 1. Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в этом элементарном слое, общеизвестно [31] и имеет аналитическое решение (4.19). По мере продвижения вправо к ОЭН

($i = 1, 2, 3 \dots N_x$) опустошенные ГУ могут повторно захватывать носители заряда, освобождающиеся с ГУ слева от текущего слоя с номером i , и не захваченные повторно глубокими уровнями в слоях $1, 2, 3 \dots i - 1$. Общее число шагов сетки по координате t примем равным N_t , а по координате x соответственно N_x . Таким образом толщина элементарного слоя $\Delta x = \frac{h_2 - h_1}{N_x}$ (см. рис. 4.1). Величина шага Δt в общем случае может быть выбрана произвольно в зависимости от длительности процесса опустошения, обычно принимаемой равной $2, 2\pi$, и того отрезка времени $T = N_t \Delta t$, в течение которого наблюдается процесс опустошения.

Будем считать, что вероятность повторного захвата носителей на ГУ определится как произведение сечения захвата ГУ σ_n на толщину элементарного слоя Δx и концентрацию ГУ, способных повторно захватить носители заряда. При этом относительная концентрация указанных ГУ предполагается настолько малой, что влиянием этих ГУ друг на друга при повторном захвате носителей можно пренебречь. Иначе говоря, расположение в элементарном слое глубоких ловушек на одной линии, параллельной оси x , настолько маловероятно, что принимается недопустимым. Из аналогичных соображений (как дополнение до 1) определяется вероятность того, что носители заряда, освободившиеся с ГУ слева от элементарного слоя Δx , проследуют сквозь него без повторного захвата.

Обоснованность введенного приближения можно подтвердить количественными оценками. Например, при концентрации $n_{\text{агу}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, сечении захвата $\sigma_n = 10^{-16} \text{ см}^2$ и $\Delta x = 10^{-5} \text{ см}$ площадь, занимаемая всеми активными ГУ, находящимися в элементарном слое Δx площадью 1 см^2 и условно размещенными на его поверхности с учетом их сечений захвата, будет составлять всего 10^{-9} см^2 . Это число (без

размерности) представляет собой ни что иное, как максимальную вероятность повторного захвата носителей на ГУ в данном элементарном слое. Следует сразу же отметить, что полученное значение вероятности весьма мало и вряд ли при этом повторный захват существенно повлияет на процесс релаксации ГУ.

Рекурсивное соотношение (4.20) совместно с начальными условиями и частными случаями для $i = 0$ и $i = 1$ позволяет анализировать поведение концентрации $n_{\Gamma Y}^-$ во времени и пространстве в пределах СОЗРГУ. Пока трудно предложить интегро-дифференциальную форму записи этого конечно-разностного приближения, но в этом нет особой необходимости потому, что для решения очевидно придется воспользоваться численными методами.

В реальных спектрометрах имеют дело не с концентрациями носителей, высвобождающихся с ГУ, а с емкостями (емкостная РСГУ), токами (токовая РСГУ) или другими параметрами, характеризующими образец. Для получения соответствующих математических моделей релаксации емкости, тока и т. п. в качестве исходных могут быть использованы уравнения непрерывности (4.12) и (4.14). Для построения математической модели релаксации емкости необходимо перейти к определению величины объемного заряда как функции времени, напряжений заполнения U_1 и опустошения U_R .

Рекурсивное приближение (4.20) позволяет описать поведение заряда на глубоких уровнях в процессе их опустошения следующим образом:

$$Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle = q \sum_{i=0}^{i=N_x} n_{\Gamma Y}^- \langle i, j \rangle S_{p-n} \Delta x, \quad (4.21)$$

где S_{p-n} — площадь $p - n$ — перехода, q — заряд электрона. Для од-

номерного случая это соотношение может быть записано в виде

$$Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle = q S_{p-n} \Delta x \sum_{i=0}^{i=N_x} n_{\Gamma Y}^- \langle i, j \rangle, \quad (4.22)$$

так как S_{p-n} и Δx не зависят от i . Это означает, что для анализа формы релаксационного сигнала необязательно знать площадь $p - n$ — перехода, а достаточно лишь просуммировать значения концентраций. В первом приближении при условии относительно малой концентрации ГУ (относительно основных "мелких" примесей) можно считать распределение потенциала в СОЗ_{РГУ} в процессе опустошения ГУ неизменным и поэтому приравнять заряд $Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle$ емкости $C_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle$ с точностью до постоянного масштабного коэффициента.

Изменение заряда во времени $Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle$ будет определять ток из СОЗ_{РГУ} в ОЭН, что является иллюстрацией связи между токовой и емкостной РСГУ. Ток релаксации будет представлять собой заряд, вытекающий из крайнего правого элементарного слоя СОЗ_{РГУ} (см. рис. 4.1) в единицу времени. Величина тока определяется по формуле

$$I \langle j \rangle = \frac{Q_{\Gamma Y}^- \langle j - 1 \rangle - Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle}{\Delta t} \quad (4.23)$$

и в случае экспоненциальности кривой уменьшения заряда $Q_{\Gamma Y}^- \langle j \rangle$ во времени кривая уменьшения тока релаксации также будет экспоненциальной. Максимальная размерность двумерной сетки (координата x — время t) ограничена значениями $N_x = N_t = 1000$. Положительной особенностью расчетов по рекурсивной формуле (4.20) является возможность увеличения N_t без пропорционального ($N_x \cdot N_t$) увеличения объема требуемой оперативной памяти компьютера, что обычно свойственно численным методам.

Результаты компьютерного моделирования концентрации свободных носителей, заряда и тока релаксации ГУ, как и ожидалось для реальных значений концентраций ГУ, сечений захвата и толщины элементарного слоя, свидетельствуют о том, что повторный захват с мгновенным выносом носителей в ОЭН практически не изменяет постоянную опустошения по сравнению с заданной постоянной τ_n . Постоянной остается и форма сигналов релаксации заряда и тока.

Полученные результаты говорят о том, что наряду с повторным захватом надо дополнительно учитывать конечную скорость выноса носителей, обусловленную с одной стороны подвижностью дрейфа или предельной дрейфовой скоростью движения носителей заряда в сильных электрических полях, а с другой стороны диэлектрической релаксацией, постоянная которой обратно пропорциональна концентрации свободных носителей заряда в рассматриваемом элементарном слое.

Конечную скорость выноса носителей заряда в ОЭН из СОЗРГУ формально можно интерпретировать как кажущееся увеличение сечения захвата носителей на ГУ. Физически это можно истолковать как следствие уменьшения скорости выноса свободных носителей в ОЭН вследствие ограниченной подвижности носителей, диэлектрической релаксации и тепловых колебаний кристаллической решетки полупроводника, приводящих к кажущемуся увеличению сечения захвата по сравнению с величиной, определенной в предположении мгновенного выноса. При этом в процессе моделирования по формулам (4.20, 4.22, 4.23) может потребоваться алгоритмическое ограничение вероятности захвата носителя на ГУ в элементарном сечении на уровне единицы.

На рисунке 4.2 представлены результаты имитационного моделирования релаксационных процессов опустошения ГУ (рис. 4.1): изменения концентраций свободных носителей на левой ($N_{0,0}$) и правой ($N_{1,0}$)

границах и в середине ($N_{0,5}$) СОЗРГУ, а также суммарного заряда q и тока релаксации J . Эти результаты получены при следующих исходных данных: концентрация активных ГУ — $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, длина СОЗРГУ — 10 мкм, количество дискрет по длине — 50, постоянная перезаряда ГУ — 2 мс, размер дискрета времени Δt — 0,1 мкс. "Образцы" отличаются значениями сечений захвата ГУ: для образца 1 $\sigma_n = 10^{-8} \text{ см}^2$, а для образца 2 $\sigma_n = 10^{-7} \text{ см}^2$. При таких аномальных сечениях захвата в сочетании с относительно высокими значениями концентрации активных ГУ и длиной СОЗРГУ оказалось целесообразным скорректировать алгоритм моделирования, а именно, ограничить максимальную вероятность захвата носителя на активный ГУ в элементарном слое на уровне единицы.

Результаты моделирования указывают на значительное увеличение среднего значения кажущейся постоянной релаксации заряда и тока при существенном отклонении формы релаксационного сигнала от экспоненциальной по мере увеличения сечения захвата ГУ. К такому же эффекту приведет увеличение концентрации активных ГУ или длины СОЗРГУ.

Следует отметить характерную тенденцию изменения формы этих релаксационных сигналов, состоящую в том, что в начале сигнала релаксации спадает достаточно медленно с постоянной, превышающей $\tau_{n\text{зап}}$. В дальнейшем, текущая постоянная релаксации медленно уменьшается, устремляясь со временем к τ_n зап. Таким образом, процесс релаксации перестает быть экспоненциальным. Для того, чтобы это увидеть, необходимо отслеживать текущее значение изменяющейся постоянной опустошения ГУ, то есть соответствующим образом преобразовать исходный релаксационный сигнал (см. с. 205). Поведение концентрации носителей, захваченных на ГУ, зависит от положения элементарного слоя dx . На левой границе СОЗ РГУ повторный

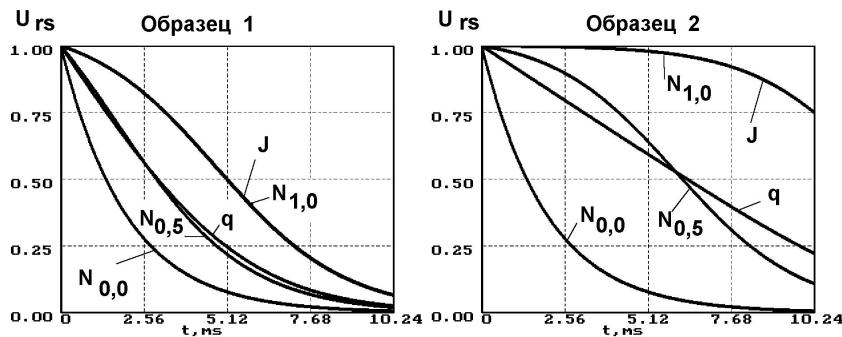


Рис. 4.2. Влияние повторного захвата на процессы релаксации ГУ

захват отсутствует, поэтому концентрация уменьшается с постоянной перезаряда $\tau_{\text{зап}}$. По мере продвижения к правой границе влияние повторного захвата на релаксационные процессы возрастает. Ток релаксации определяется концентрацией зарядов на ГУ в элементарном слое на правой границе СОЗРГУ, поведение же суммарного заряда q ближе к изменению концентрации носителей заряда, захваченных на ГУ в середине СОЗРГУ.

4.2. Алгоритмические измерения параметров релаксационных сигналов

4.2.1. Селекция и распознавание квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов

Большинство опубликованных методов и программно-аппаратных средств релаксационной спектроскопии глубоких уровней основаны на предположении об экспоненциальном характере процессов релаксации емкости, проводимости и других параметров исследуемых полупроводниковых образцов. Указанное предположение существенно облегчает селекцию (аппаратную или программную) релаксационных сигналов. Однако имеются весьма многочисленные данные [347, 355, 363], свидетельствующие о том, что форма релаксационных сигналов может отличаться от экспоненциальной. Известные рекомендации [31, 298] по замене стабилизации обратного напряжения стабилизацией емкости $p - n$ -перехода в определенной степени означают уход от решения проблемы, так как неэкспоненциальность может свидетельствовать о наличии дополнительной информации о свойствах ГУ или процессах релаксации. В этой связи практический интерес представляют оценки степени и характера неэкспоненциальности указанных сигналов с це-

лью получения дополнительной информации о характеристиках ГУ.

К указанным выше (см. с. 60) многочисленным причинам неэкспоненциальности релаксационных сигналов необходимо добавить следующие:

- влияние "хвоста" скорости заполнения ловушек, имеющее по утверждению [379] место при малых значениях обратного смещения U_R . В обзоре [80, с.44] приведено объяснение этого эффекта на основе предположения о деформации зонных диаграмм (соизмеримость длины Дебая с СОЗ) и дана рекомендация по минимизации влияния данной причины за счет увеличения напряжения обратного смещения U_R ;

- уже упоминавшееся выше (см. с. 60) влияние полевого эффекта, которое может иметь место при относительно больших размерах той части слоя объемного заряда, в которой происходит релаксация ГУ, то есть при больших значениях $|U_R - U_1|$. Это влияние, по мнению автора, может быть обусловлено повторным захватом высвобождающихся с ГУ в процессе релаксации носителей по мере их продвижения в область электронейтральности. С очевидной, казалось бы, рекомендацией уменьшать указанную разность не стоит торопиться, так как в этом случае либо проявится отмеченное выше влияние "хвоста" скорости заполнения ловушек, либо уменьшится соотношение сигнал/шум, особенно в $p - n$ -переходах с малыми размерами, характерными для элементов ИС;

- не исключено, что причиной неэкспоненциальности может быть прохождение экспоненциальных сигналов через нелинейные устройства измерительного тракта спектрометра. Известные методы оценки линейности, также как и экспоненциальности, оставляют граничные значения критериев на усмотрение пользователя, что делает эти оценки неоднозначными;

- и, наконец, наиболее реальным будет то или иное сочетание пе-

речисленных выше (в том числе в п. 1.1.3) причин с неизвестным соотношением между их вкладами.

Таким образом релаксационные сигналы практически всегда квазиэкспоненциальны (почти экспоненциальные) и поэтому составной частью информационной технологии РСГУ становится анализ (спектральный, корреляционный и др.) формы сигналов релаксации, назначение которого разные авторы понимают по-разному. По мнению большинства, сформулированному, например, в работе В.М. Гонтара и др. [69, с. 19], цель анализа релаксационных сигналов состоит в том, чтобы с максимальной точностью из основной (доминирующей) экспоненциальной составляющей сигнала извлечь информацию о его амплитуде и характерном времени. Эта процедура получила название селекции релаксационного сигнала по амплитуде и скорости (постоянной) экспоненциальной релаксации. Учет неэкспоненциальности в этом случае сводится к выделению из релаксационного сигнала экспоненты – своеобразной "фильтрации" сигнала релаксации по критерию экспоненциальности непосредственно в процессе измерений. К этому же сводятся рекомендации и других авторов, например [34], а также упоминавшегося ранее стандарта ASTM F 978–90, приведенные на с. 60.

Селекция может быть реализована аппаратно или программно. В последнем случае иногда употребляют, на наш взгляд, не совсем удачный термин "алгоритмическая селекция" потому, что аппаратные средства тоже реализуют с помощью схемотехнических решений вполне определенные алгоритмы. Одним из достоинств частотного сканирования при постоянной температуре является возможность получения дополнительной информации, содержащейся в значении показателя p , входящего в соотношения (3.20) и (3.37). Эта информация может быть интерпретирована следующим образом. Экспоненциальный релакса-

ционный сигнал, проходя через линейный измерительный тракт спектрометра дает частотный скан со значением $p = 1$. Отличия показателя p от единицы можно истолковать по крайней мере двухзначно: как следствие неэкспоненциальности исходного релаксационного сигнала и как нелинейность тракта аппаратного преобразования от емкостного измерительного моста до выхода амплитудно-временного селектора. Ниже на с. 216 это будет показано с помощью имитационного моделирования. Это означает, что неэкспоненциальность релаксационного сигнала может быть преобразована в эквивалентную ей нелинейность измерительного тракта и обратно. Кстати говоря, равенство $p = 1$ теоретически может означать компенсацию неэкспоненциальности релаксационного сигнала соответствующими нелинейнымиискажениями измерительного тракта, то есть это равенство не обязательно указывает на экспоненциальность сигнала и линейность аппаратных средств.

Кардинальным средством проверки линейности измерительного тракта могло бы стать применение специального цифрового генератора эталонных релаксационных сигналов с амплитудой, изменяющейся в достаточно широких пределах — от единицы до нескольких сотен милливольт. Аналоговые имитаторы релаксации не обладают необходимой стабильностью параметров экспоненты. Основная трудность создания такого устройства состоит в том, что эталонный сигнал должен быть синхронизирован импульсами электрического заполнения ГУ и введен в емкостной мост через входы подключения образца в виде амплитудно-модулированного экспонентой несущего синусоидального измерительного сигнала с частотой 1 МГц и жесткой привязкой к фазе переменного напряжения питания моста.

Преимуществами программной селекции по сравнению с аппаратной являются:

- отсутствие ограничений на вид опорного сигнала, если использу-

ется метод перемножения с интегрированием;

— возможность использования таких методов селекции, аппаратная реализация которых затруднена;

— возможность восстановления первоначальной формы релаксационного сигнала после прохождения его через нелинейные каскады устройств аппаратной обработки с известным видом нелинейности;

— возможность непосредственной (без селекции по амплитуде и постоянной релаксации) идентификации моделей физических процессов заполнения и опустошения ГУ;

— возможность сравнения различных подходов к обработке сигналов релаксации и перехода к интеллектуальной обработке получаемых экспериментальных результатов.

Недостатки программной селекции по сравнению с аппаратной в основном обусловлены увеличением длительности данной процедуры, а также искажениями регистрации (оцифровки) исходного релаксационного сигнала из-за ограниченного быстродействия или точности аналого-цифрового преобразования. В меньшей степени сказывается быстродействие применяемого компьютера, хотя при достаточно сложной и трудоемкой обработке и оно будет заметно.

Анализируя преимущества программной селекции, легко заметить, что содержание понятия "селекция" в этом случае существенно расширяется. По сути дела речь идет о возможности оценки характерных отличий формы релаксационного сигнала от экспоненциальной, что, в свою очередь, позволит получить дополнительную информацию либо о свойствах ГУ и особенностях процессов их релаксации, либо о нелинейностях измерительного тракта спектрометра.

Для этих целей могут быть использованы алгоритмы распознавания образов, предусматривающие, в частности, корреляционные или спектральные преобразования исходных релаксационных сигналов. Очевидно,

видно, что в качестве опорной функции целесообразно использовать экспоненту с отрицательным аргументом. Трудности построения распознавающих алгоритмов обусловлены особенностями регистрируемых релаксационных сигналов, которые, в свою очередь, определяются временной диаграммой конкретного релаксационного измерителя. В качестве примера на рис. 3.1 приводится временная диаграмма спектрометра DLS-82E, работающего в составе измерительно-вычислительного комплекса, описанного выше и обеспечивающего регистрацию формы релаксационного сигнала емкости. Выход емкостного измерительно-го моста, работающего на частоте 1 МГц, дважды за период опорного сигнала T_0 отключается от входа фазового детектора на промежуток времени $t1 + T_0/20$ (рис. 3.1 (в)). Это связано с подавлением влияния относительно мощной реакции мелких уровней на импульс заполнения (рис. 3.1 (а)) в начале периода и с резервированием возможности подачи второго импульса заполнения в середине периода при исследовании профиля распределения ГУ. С учетом длительностей переходных процессов в конечном итоге реальный сигнал релаксации емкости отличается от изображенного на рис. 3.1 (д).

Для учета особенностей регистрации релаксационных сигналов, определяемых временной диаграммой спектрометра, воспользуемся рекомендациями теории нечетких (расплывчатых) множеств. В терминах этой теории стробограмма представляет собой пространство \mathbf{X} , в котором релаксационный сигнал определяется как нечеткое множество \mathbf{S} в виде совокупности упорядоченных пар

$$\mathbf{S} = \{x, \mu_S(x)\}, x \in \mathbf{X}, \quad (4.24)$$

где $\mu_S(x)$ — степень принадлежности x к \mathbf{S} или значение функции принадлежности $\mu_S : \mathbf{X} \rightarrow [0, 1]$. Нечеткость множества \mathbf{S} обусловлена качеством синхросигнала и схемы запуска стробоскопического анализа-

тора. В частном случае, когда $\mu_S(x)$ принимает только значения 0 или 1, множество (4.24) является четким (нерасплывчатым). Дополнением к множеству \mathbf{S} до множества \mathbf{X} является множество \mathbf{S}' , представляющее собой значения выходного сигнала фазового детектора, подключенного к выходу измерительного емкостного моста, в моменты времени, соответствующие его отключению (см. рис. 3.1 - в). В состав \mathbf{S}' должны быть включены и переходные процессы, также искажающие релаксационный сигнал. Решение о разделении множества \mathbf{X} на \mathbf{S} и \mathbf{S}' представляет собой переход $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{C}$, где \mathbf{C} – четкое множество с соответствующей бинарной функцией принадлежности $\mu_C(x)$. Формирование этой функции является предметом первичной обработки стробограммы с целью выделения релаксационного сигнала [142]. Базовый измеритель DLS-82E обеспечивает возможность дополнительного контроля сигналов (а) и (б) (см. рис. 3.1), что существенно облегчает формирование указанной функции. На рис. 4.3 изображены результаты выделения релаксационных сигналов из стробограмм рис. 3.5.

Для анализа формы выделенного релаксационного сигнала \mathbf{C} предлагается использовать корреляционное преобразование, основанное на определении величины модифицированного коэффициента парной линейной корреляции

$$r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}} = \frac{\sum_{i=k}^{i=l} \mu_i \sum_{i=k}^{i=l} (c_i y_i \mu_i) - \sum_{i=k}^{i=l} (c_i \mu_i) \sum_{i=k}^{i=l} (y_i \mu_i)}{\sqrt{\sum_{i=k}^{i=l} \mu_i \sum_{i=k}^{i=l} (c_i \mu_i)^2 - \left[\sum_{i=k}^{i=l} (c_i \mu_i) \right]^2} \sqrt{\sum_{i=k}^{i=l} \mu_i \sum_{i=k}^{i=l} (y_i \mu_i)^2 - \left[\sum_{i=k}^{i=l} (y_i \mu_i) \right]^2}} \quad (4.25)$$

между релаксационным \mathbf{C} и опорным \mathbf{Y} сигналами на скользящем по времени интервале корреляции $k-l$ ($0 < k < l \leq n$), где $n = 1024$ – число проходов стробограммы, $\mu_{Ci} = \mu_C(x)$ – функция принадлеж-

ности выделенного релаксационного сигнала, τ — постоянная времени опорного экспоненциального сигнала $y = \exp[-(i - m)\Delta t/\tau]$, Δt — временное разрешение анализатора TR-4910, $i = 1, 2, \dots, n$ — текущее время и m — начало процесса релаксации в единицах времени Δt стробограммы. Знак перед коэффициентом корреляции несет информацию о типе доминирующих в релаксационном сигнале ГУ. Если доминирующий ГУ представляет собой ловушку основных носителей в базе p -типа или неосновных носителей в базе n -типа, то $1 \geq r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}} > 0$. Соответственно, для ловушки основных носителей в базе n -типа или неосновных носителей в базе p -типа $-1 \leq r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}} < 0$.

Для характеристики неэкспоненциальности предлагается использовать образ исходного релаксационного сигнала в виде зависимости величины постоянной времени $\tau(k)$ опорной экспоненциальной функции, соответствующей максимуму модуля выражения (4.25) при постоянном интервале корреляции $l - k$:

$$Z = \tau(k)|r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}}| \rightarrow \max. \quad (4.26)$$

В связи с тем, что критерий $|r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}}|$ для зашумленных релаксационных сигналов является многоэкстремальной функцией, то для нахождения глобального максимума целесообразно сочетать стохастические и детерминированные методы поиска. Автор использовал в программах распознавания комбинацию "слепого" случайного поиска с покоординатным подъемом и уменьшением в ходе смены итераций величины мультиплективного шага (см. с. 160) по τ на порядок по мере приближения к экстремуму. Для повышения устойчивости корреляционного преобразования введено усреднение среднего (по всей стробограмме) и текущего значений τ по ансамблю 20...100 попыток.

Отклонения зависимости (4.26) от прямой линии, параллельной оси времени, и будут отражать искомую неэкспоненциальность. Величина

интервала корреляции в первом приближении выбирается аналогично интервалу при построении гистограмм — увеличение его сглаживает отличия от экспоненты, а уменьшение приводит к усилению влияния случайных погрешностей регистрации отдельных точек стробограммы. Для определенности рекомендуется выбирать этот интервал равным постоянной релаксации τ , найденной с помощью частотного сканирования [262] при той же температуре, либо определенной с помощью соотношения (4.25) при $k = 1, l = n$. Возможно также определение интервала корреляции относительно временного окна стробоскопического анализатора $T_a = 1024 \cdot \Delta t$. В целом вопрос о выборе оптимального интервала корреляции пока остается открытым.

На рис. 4.4 представлены образы релаксационных сигналов рис. 3.5,4.3. Следует иметь в виду, что достоверность расчетов по формуле (4.25) снижается при пересечении интервала корреляции с интервалами "молчания" измерительного емкостного моста за счет уменьшения объема выборки.

В качестве альтернативного подхода может быть использовано спектральное преобразование неэкспоненциального релаксационного сигнала путем разложения в ряд по экспоненциальным функциям:

$$E\left(\frac{t}{\tau}\right) = \sum_{i=-N}^{i=N} A_i sgn(|i|) \exp\left(-\frac{t}{\tau i sgn(i)} q^{sgn(|i|-1)}\right), \quad (4.27)$$

где N — глубина, A_i — коэффициенты разложения (одного знака), $sgn(i)$ — функция, принимающая значения $-1, 0, 1$ в зависимости от знака аргумента i ; $q \geq 1$ — кратность разложения. Неортогональность экспоненциальных функций разложения налагает ограничения на N в процессе идентификации модели (4.27), однако следует заметить, что исходная функция удовлетворяет более жестким условиям, чем условия Дирихле. Физически разложение (4.27) может быть истолковано

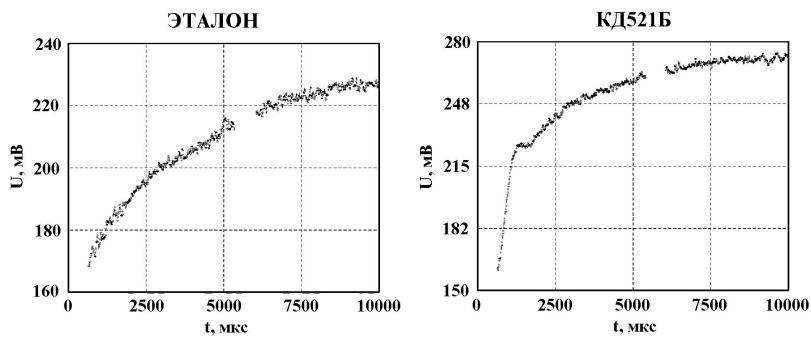


Рис. 4.3. Релаксационные сигналы после предварительной обработки

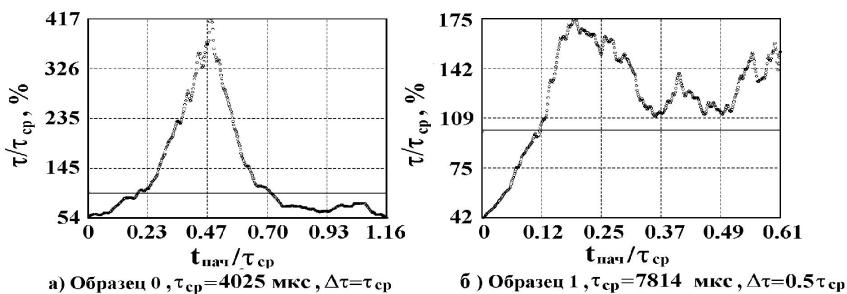


Рис. 4.4. Образцы релаксационных сигналов

как многоуровневый глубокий центр. Ближайшим с точки зрения поставленной задачи ортогональным разложением является ряд Грама-Шарлье [13], использующий ортогональные полиномы Эрмита и функции нормального распределения Гаусса. Им можно воспользоваться, если считать релаксационный процесс правой половиной симметричного закона статистического распределения и обеспечить соответствующее вероятностное нормирование. Для сопоставления корреляционного и спектральных преобразований необходимо проведение дополнительных исследований.

4.2.2. Регуляризация алгоритма распознавания

Корреляционный алгоритм распознавания квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов, описанный выше, предназначен для оценки степени и характера неэкспоненциальности указанных сигналов с целью получения дополнительной информации о характеристиках глубоких уровней. В отличие от алгоритмов, использующих логарифмирование исходного сигнала, предложенный алгоритм менее чувствителен к дрейфу нуля входных цепей регистратора. Однако в процессе экспериментальных исследований и имитационного моделирования зашумленных релаксационных сигналов обнаружилась невысокая устойчивость его по отношению к шумам, сопровождающим слабые релаксационные сигналы. Увеличение интервала корреляции является недостаточной мерой, приводящей к искажению образа. Целью данного подраздела является повышение устойчивости распознавания формы зашумленных релаксационных сигналов с учетом реальных временных диаграмм спектрометра глубоких уровней. Автор использовал при проведении экспериментальных исследований разработанный во ВлГУ и описанный выше (см. с. 108) измерительно-вычислительный комплекс

на базе спектрометра DLS-82E, однако приводимые ниже рекомендации справедливы и для других типов спектрометров с электрическим заполнением глубоких уровней.

Задача построения образа зашумленного релаксационного сигнала является некорректной по Тихонову А.Н. [229, с. 16]. Для решения такого рода задач необходимо сформулировать принцип отбора возможных решений. Обычно рекомендуется использовать априорную (дополнительную) информацию о решении [229, с. 18]. Такая информация может быть количественной или качественной. В первом случае используют прием, предусматривающий нахождение так называемого квази-решения. В нашем случае квазирешением в перспективе может быть модель реального релаксационного сигнала или его спектральное представление (4.27). Если же априорная информация носит качественный характер (например, гладкость решения), то в этом случае А.Н. Тихоновым рекомендуется иной подход, основанный на применении метода регуляризации.

Прежде всего предлагается расширить диапазон охвата исходной стробограммы $c(t)$ релаксационного сигнала. Это достигается изменением пределов суммирования в выражении для модифицированного коэффициента парной линейной корреляции, определяемого на скользящем интервале корреляции $2q$ по формуле $r(c, y) = cov(c, y)/[\sqrt{D(c)}\sqrt{D(y)}]$, где

$$cov(c, y) = \sum_{i=k-q}^{i=k+q} \mu_i \sum_{i=k-q}^{i=k+q} (c_i y_i \mu_i) - \sum_{i=k-q}^{i=k+q} (c_i \mu_i) \sum_{i=k-q}^{i=k+q} (y_i \mu_i);$$

$$D(c) = \sqrt{\sum_{i=k-q}^{i=k+q} \mu_i \sum_{i=k-q}^{i=k+q} (c_i \mu_i)^2 - \left[\sum_{i=k-q}^{i=k+q} (c_i \mu_i) \right]^2};$$

$$D(y) = \sqrt{\sum_{i=k-q}^{i=k+q} \mu_i \sum_{i=k-q}^{i=k+q} (y_i \mu_i)^2 - \left[\sum_{i=k-q}^{i=k+q} (y_i \mu_i) \right]^2};$$

$1 \leq k \leq n$; $n = 1024$ — число проходов стробограммы (значений исходного релаксационного сигнала); $\mu_i = \mu_C(x)$ — функция принадлежности выделенного релаксационного сигнала; $x(t)$ — временная диаграмма выхода измерительного моста; τ — постоянная времени опорного экспоненциального сигнала $y = \exp[-(i-m)\Delta t/\tau]$; Δt — временнóе разрешение стробоскопического цифрового анализатора TR-4910; $i = 1, 2, \dots, n$ — текущее время и $m > 0$ — начало процесса релаксации в дискретах Δt стробограммы. Образом исходного релаксационного сигнала так же является зависимость постоянной времени $z = \tau(k)$ опорной экспоненциальной функции, соответствующей максимуму коэффициента корреляции. Отклонения этой зависимости от прямой линии, параллельной оси времени, и будут отражать искомую неэкспоненциальность.

Определенное регуляризующее действие оказывают повторение корреляционной процедуры с последующим усреднением полученных результатов (интегрирование), а также умножение функции принадлежности μ_i на экспоненту $y = \exp[-(i-m)\Delta t/\tau]$ (коррекция экспоненциального увеличения относительного шума).

Недостатком критериев типа (4.25) является привязка только к одному параметру экспоненты — τ . При этом упускается из виду другой параметр — амплитуда, что, вероятно, является одной из причин плохой обусловленности задачи построения образа релаксационного сигнала. Частично избавиться от указанного недостатка позволяет пере-

ход к регрессионному преобразованию с критерием

$$K = \frac{\sum_{i=k-q}^{i=k+q} (c_i - \bar{c}_k \cdot \exp(-(i-k)\Delta t/\tau))^2 \mu_i}{\sum_{i=k-q}^{i=k+q} \mu_i}, \quad (4.28)$$

где

$$\bar{c}_k = \sum_{i=k-2}^{i=k+2} c_i$$

представляет собой опорную точку привязки экспоненты по амплитуде в середине интервала корреляции $2q$. На границах окна стробоскопического анализатора и интервалах "молчания" временной диаграммы это значение, а точнее значение k , соответствующим образом корректируется в программе обработки, максимально приближаясь к середине интервала корреляции и в то же время оставаясь вне интервалов "молчания".

Теория регуляризации решений некорректных задач А.Н. Тихонова [229, с. 138] рекомендует дополнить критерий оптимизации стабилизирующим функционалом

$$\Omega(z) = \int_a^b \left\{ \sum_{k=1}^n \psi_k(s) \left(\frac{\partial^k z}{\partial s^k} \right)^2 \right\} ds, \quad (4.29)$$

где $\psi_k(s) (k = 1, \dots, n)$ — неотрицательные непрерывные функции; $\psi_k(s) \geq c > 0$, а $z(s) \in F_n$; F_n — метрическое пространство образов. В этом случае в качестве приближенного устойчивого решения берется наиболее гладкое из возможных решений, обладающих гладкостью порядка n . Для начала ограничимся $n = 1$ и представим регуляризованный критерий в виде:

$$K_{\text{рег}}(t) = |1 - r_{\mathbf{C}, \mathbf{Y}}(t)| + \alpha \Omega(t) \quad (4.30)$$

или

$$K_{\text{рег}}(t) = K + \alpha \Omega(t), \quad (4.31)$$

где α — параметр регуляризации, значение которого определяется средним относительным уровнем шума, сопровождающего релаксационный сигнал; $\psi_1 = 1$.

В качестве дополнительного (или альтернативного регуляризации по А.Н. Тихонову) средства повышения устойчивости корреляционного преобразования, одновременно решая задачу определения значений распознающих признаков, предлагается аппроксимация корреляционного (4.26) или регрессионного (4.28) преобразований полиномиальным приближением регрессии, предусматривающим выбор оптимальной степени разложения по ортогональным полиномам Чебышева с использованием метода структурной минимизации эмпирического риска [6].

Функционал эмпирического риска имеет вид

$$I(\vec{\alpha}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(z_i - \sum_{j=0}^k \alpha_j Q_j(t_i) \right)^2 / \sigma_i^2, \quad (4.32)$$

где $Q_j(t)$ — полином Чебышева степени j , значения которого вычисляются по рекуррентной формуле

$$Q_j(t) = 2tQ_{j-1}(t) - Q_{j-2}, \quad Q_0(t) = 1, \quad Q_1(t) = t, \quad (4.33)$$

и при фиксированной степени полиномиального разложения k минимум функционала эмпирического риска находится путем решения нормальной системы линейных алгебраических уравнений

$$\vec{\alpha}^* = (\vec{\alpha})^{-1T} \vec{z}, \quad (4.34)$$

где $\vec{\alpha}^* = (\alpha_0, \dots, \alpha_k)^T$ — искомый вектор коэффициентов разложения регрессии по полиномам Чебышева; $\vec{z} = (z_1, \dots, z_l)^T$ — вектор значений

образа исследуемой зависимости; $= \{Q_j(t_i)/\sigma_i^2\}$ – матрица размером $n \times (k + 1)$ значений полиномов Чебышева в экспериментальных точках t_i ; σ_i^2 – дисперсии замеров z_i . Метод структурной минимизации эмпирического риска предполагает отсутствие систематических ошибок построения образа с помощью корреляционного преобразования. Случайные погрешности, обусловленные влиянием шумов и ограниченным переменным объемом выборки, должны быть приведены к значениям образа $z_k = \tau(k)$.

Достигнутая величина функционала эмпирического риска равна

$$I(\vec{\alpha}^*) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(y_i - \sum_{j=0}^k \alpha_j^* Q_j(x_i) \right)^2 / \sigma_i^2 \quad (4.35)$$

и характеризует качество построенного приближения функции регрессии, которое оценивается по той же случайной выборке, по которой строилось это приближение. Оценка качества приближения, справедливая для любой случайной выборки, дается выражением

$$J(k) = \left[\frac{I_{\Theta}(\vec{\alpha}^*)}{1 - \sqrt{\frac{(k+1) \left(\ln \frac{n}{k+1} + 1 \right)}{n}} - \ln \nu} \right]_{\infty}, \quad (4.36)$$

где $1 - \nu$ – вероятность, с которой справедлива эта оценка.

Выражение (4.36) зависит от степени полинома k . Та степень, при которой оценка $J(k)$ принимает наименьшее значение, является оптимальной степенью полиномиального приближения, а сама функция регрессии аппроксимируется полиномом этой степени, минимизирующим функционал эмпирического риска.

Обучение регуляризованного таким образом корреляционного алгоритма распознавания сводится к уточнению дисперсий σ_i^2 значений z_i с помощью априорного изучения и имитационного моделирования шумов, различных причин неэкспоненциальности релаксации и конкретных временных диаграмм применяемых спектрометров. В результате устойчивость распознавания формы зашумленных квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов может быть существенно повышенна. График полинома Чебышева $Q_j(t)$ степени j в интервале $(-1, +1)$, как известно [13, с. 480], представляет собой проекцию синусоиды с периодом $2\pi/j$ и амплитудой единица, обвитой вокруг цилиндра вращения с радиусом единица, на плоскость, параллельную оси цилиндра. Данная проекция является частным случаем кривых Лиссажу. Каждая точка кривой на плоскости является проекцией двух точек, симметрично расположенных на цилиндре. Эта геометрическая интерпретация иллюстрирует взаимосвязь разложения по полиномам Чебышева с разложением Фурье. Одним из отличий является использование вместо периода повторяющегося сигнала окна стробоскопического анализатора или аналого-цифрового преобразователя, поэтому результаты чебышевской аппроксимации, а, следовательно и распознавания, будут зависеть от размеров указанного окна.

Чебышевская аппроксимация корреляционного или регрессионного преобразования с использованием метода структурной минимизации эмпирического риска может быть средством фильтрации квазиэкспоненциального сигнала, если принудительно ограничить максимальную степень k аппроксимирующего полинома

$$Q = \sum_{j=0}^k \alpha_j Q_j(t) \quad (4.37)$$

на уровне $k = 0, 1, 2, 3$ и т. д. В частности, $k = 0$ означает что

иное, как выделение основной (доминирующей) экспоненты в составе релаксационного сигнала. Физический смысл фильтрации при увеличении k будет рассмотрен ниже для случаев, представляющих определенный практический интерес.

4.2.3. Моделирование и экспериментальные исследования

Целью моделирования и экспериментальных исследований является разработка и апробация инструментальных средств анализа квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов, включая оптимизацию предложенных алгоритмов преобразования и распознавания. Оптимизация предусматривает выбор того или иного преобразования или последовательности преобразований, способа регуляризации полученных образов, а также ограничение степени аппроксимирующего чебышевского разложения и оценку инвариантности моделей релаксации ГУ относительно дискретности конечно-разностного приближения.

Модели неэкспоненциальности, представляющие практический интерес, должны, во-первых, отражать многоуровневость глубокого центра в предположении экспоненциальности релаксационных сигналов от каждого ГУ. В этом случае моделируемый сигнал представляет собой сумму двух и более экспонент с различным в общем случае соотношением амплитуд и постоянных релаксаций. Во-вторых, необходимо смоделировать нелинейные искажения релаксационного сигнала, обусловленные нелинейными элементами измерительного тракта спектрометра. И, наконец, представляет практический интерес моделирование целого ряда других причин, приводящих к неэкспоненциальности релаксации. Это могут быть физические процессы, обусловленные высокой концентрацией ГУ, влиянием повторного захвата высвобождающихся носителей, неравномерным распределением ГУ по длине СОЗ, величи-

ной электрического поля, влиянием поверхностных эффектов и т. п.

С одной стороны эти модели необходимы для иллюстрации характера неэкспоненциальности, как инструмент для экспериментальных исследований и набора статистики. А с другой стороны они со временем могут стать составной частью алгоритмических измерений, так как предназначены для уточнения теоретических представлений о процессах заполнения и опустошения ГУ. Перспективным является сочетание моделирования формы релаксационных сигналов и процессов их аппаратной обработки с помощью частотного сканирования при постоянной температуре образца.

Имитационное компьютерное моделирование дает возможность анализа поведения рассмотренных выше алгоритмов при наличии и отсутствии шумов. Искажения релаксационных сигналов шумами в прошлом случае могут быть смоделированы по аддитивной схеме взаимодействия шумов с сигналом. Эта схема, по мнению автора, удовлетворительно отражает влияние шумов элементов измерительного тракта спектрометра. Эти шумы можно считать независимыми от релаксационного сигнала. Для моделирования влияния шумов образца не исключается применение и других схем, например, мультипликативной и др.

На рис. 4.5 изображены результаты имитационного моделирования алгоритмов преобразования так называемого биэкспоненциального релаксационного сигнала, состоящего из двух экспонент с одинаковыми амплитудами, но разными постоянными, отличающимися друг от друга в 2 раза (рис. 4.5 (а)). Значения постоянных ($\tau_1 = 3$ мс, $\tau_2 = 6$) выбраны близкими к реально наблюдаемым в экспериментах значениям. Уровень случайного шума с нормальным распределением характеризуется математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением σ в пределах 0,1 ... 3 % от амплитуды релаксаци-

онного сигнала. На рис. 4.5 (б) изображена сумма сигнала и шума с $\sigma = 1 \%$.

На рис. 4.5 (в), (г) показаны образы соответственно "чистого" и "зашумленного" сигналов, полученные с помощью корреляционного преобразования (4.25) с расширенным диапазоном охвата исходной стробограммы $c(t)$ релаксационного сигнала, а на рис. 4.5 (д), (е) — те же образы, но полученные с помощью регрессионного преобразования (4.28). Длина скользящего интервала, используемого для корреляционного и регрессионного преобразований, задается относительно размера временного окна регистратора T_w : $\Delta\tau = 0,2 \cdot T_w$, где $T_w = 1024 \cdot \Delta t$; $\Delta t = 10 \text{ мкс}$. На рис. 4.5 (ж), (з) показаны образы сигналов с уровнями шума соответственно $\sigma = 0,1 \%$ и $\sigma = 3 \%$, полученные с помощью регрессионного преобразования на скользящем интервале. Сопоставление рис. 4.5 (г) и (е), соответствующих одному и тому же уровню шума, приводит к выводу о более высокой обусловленности регрессионного преобразования по сравнению с корреляционным. Однако его возможности не безграничны — при возрастании шума до уровня, характеризуемого $\sigma = 3 \%$ (рис. 4.5 (з)), эффективность преобразования в смысле однозначности образа существенно снижается.

Установление граничных значений допустимого уровня шума является задачей отдельного исследования, предполагающего, в частности, весьма трудоемкую процедуру статистического имитационного моделирования. Перед тем как приступить к решению указанной задачи, исследуем возможности "улучшения" образа с помощью регуляризации по А.Н. Тихонову и аппроксимации с использованием полиномов П.Л. Чебышева. На рис. 4.6 показаны результаты регуляризации и чебышевской аппроксимации образа "чистого" и "зашумленного" релаксационных биэкспоненциальных сигналов, изображенных на

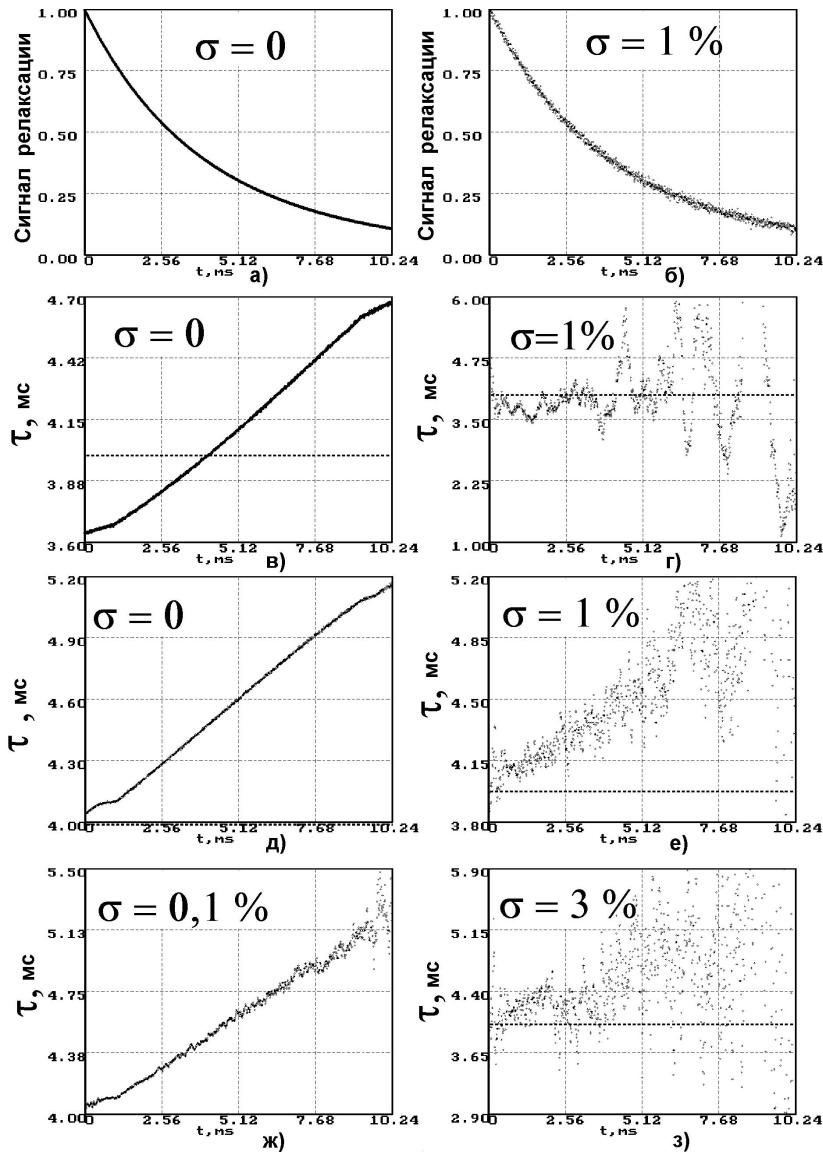


Рис. 4.5. Влияние уровня шумов на образы релаксационных сигналов

(рис. 4.5 (а), (б)). Регрессионный образ сигнала без шума приведен на рис. 4.6 (а), а его чебышевская аппроксимация — на рис. 4.6 (б). Рис. 4.6 (в), (д), (ж) отражают влияние регуляризации образа "зашумленного" ($\sigma = 1\%$) релаксационного сигнала. На рис. 4.6 (в) приведены результаты регуляризации (4.29) регрессионного образа (рис. 4.6 (ж)) с использованием производной первого порядка на скользящем интервале регуляризации $a - b = \Delta t$. Параметр регуляризации $\alpha = 8 \cdot 10^{-7}$. Добавление в стабилизирующий функционал второй производной при соотношении вкладов первой и второй производных $1 : 0,01$ и неизменном значении параметра регуляризации изменяет образ так, как показано на рис. 4.6 (д). Увеличивается в два раза интервал регуляризации, так как для определения второй производной необходимо иметь три соседних значения аппроксимируемой функции, то есть $a - b = 2\Delta t$. Для сравнения на рис. 4.6 (ж) показан нерегуляризованный образ.

Чебышевские аппроксимации, определяемые соотношениями (4.32) — (4.36), представлены соответственно на рис. 4.6 (б), (г), (е), (з). Они получены при ограничении максимального значения степени аппроксимирующего полинома на уровне $k = 3$. Анализ аппроксимаций образов приводит к выводу о том, что регуляризация с использованием первой и второй производных на малом интервале $\{a, b\}$ может исказить аппроксимацию регуляризованного образа. Увеличение порядка гладкости k сопряжено с увеличением интервала $\{a, b\}$ и является наиболее эффективным при $a - b = T_w$. Однако из-за специфики релаксационного сигнала, обусловленной наличием так называемых интервалов "молчания", повышение гладкости образа таким способом весьма проблематично. Сравнивая аппроксимации на рис. 4.5 (б), (з), можно обнаружить их сходство между собой. Это означает, что аппроксимация нерегуляризованного сигнала может оказаться более эффективной в смысле определения характерных

параметров квазиэкспоненциального релаксационного сигнала.

Аппроксимированные образы релаксационных сигналов, изображенных на рис. 4.2, приведены на рис. 4.7.

Смоделируем искажения экспоненциального сигнала в аналоговом перемножителе аппаратного селектора (3.19) с помощью соотношения

$$y = th(k_n \cdot x), \quad (4.38)$$

где k_n – коэффициент усиления нелинейного элемента. Результаты моделирования нелинейных искажений экспоненциального релаксационного сигнала с постоянной $\tau = 1$ (сигналы на выходе нелинейного элемента и чебышевские аппроксимации его образов) представлены соответственно на рис. 4.8 (а), (б) для трех значений коэффициента усиления нелинейного элемента.

Для оценки инвариантности моделей (4.20, 4.22, 4.23) относительно числа дискрет также воспользуемся имитационным моделированием. В таблице 4.1 приведены результаты моделирования полиномиальных аппроксимаций образов сигнала релаксации заряда (4.22) для двух образцов, отличающихся концентрацией ГУ в базовой области – в образце 2 концентрация ГУ на порядок больше.

Модели (4.20, 4.22, 4.23) инвариантны по отношению к числу дискрет по длине СОЗРГУ, т. е. изменение N_x не влияет на результаты моделирования.

Рис. 4.9 иллюстрирует влияние интервалов молчания на образы релаксационных сигналов. Исходный релаксационный сигнал (рис. 4.9 (а)), представляющий собой описанную выше сумму двух экспонент, с учетом шумов ($\sigma = 0,5\%$) и двух отключений выхода емкостного моста выглядит так, как показано на рис. 4.9 (б). Образы этого сигнала до и после аппроксимации представлены на рис. 4.9 (в), (г). Сопоставляя этот рисунок с рис. 4.5, можно сделать вывод об устойчи-

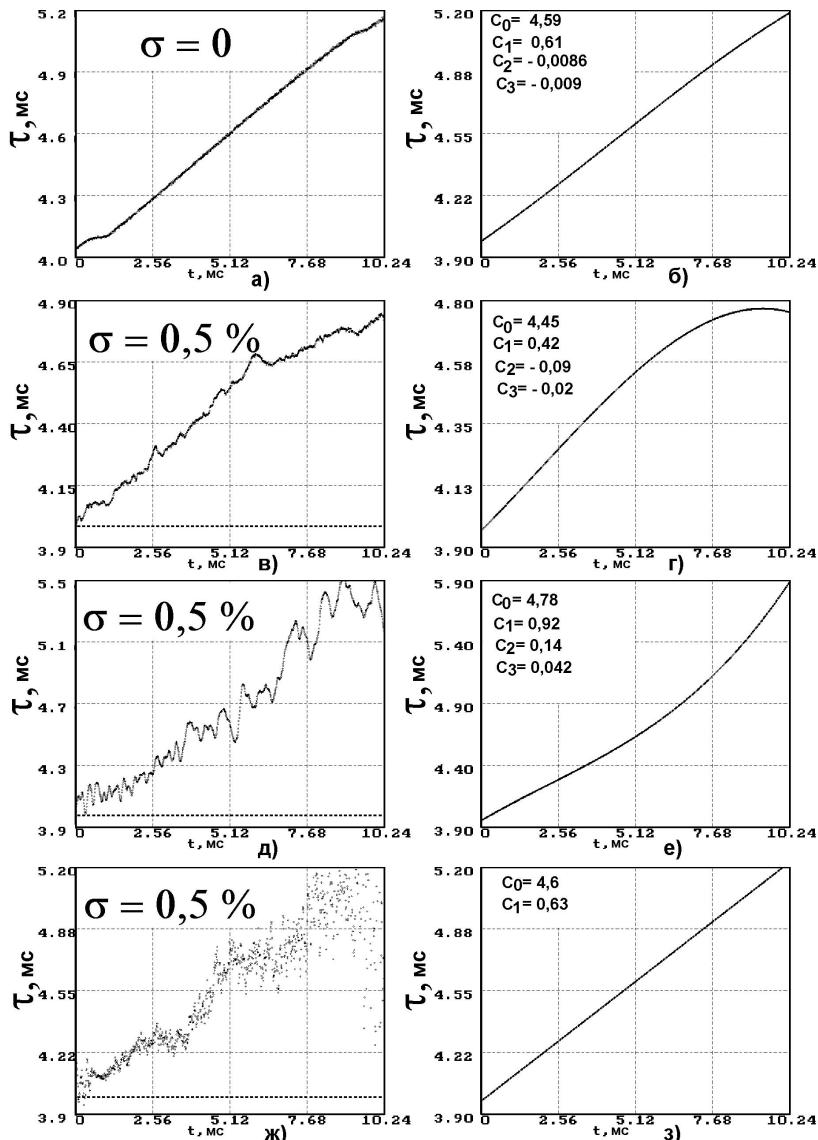


Рис. 4.6. Регуляризация и аппроксимация образов

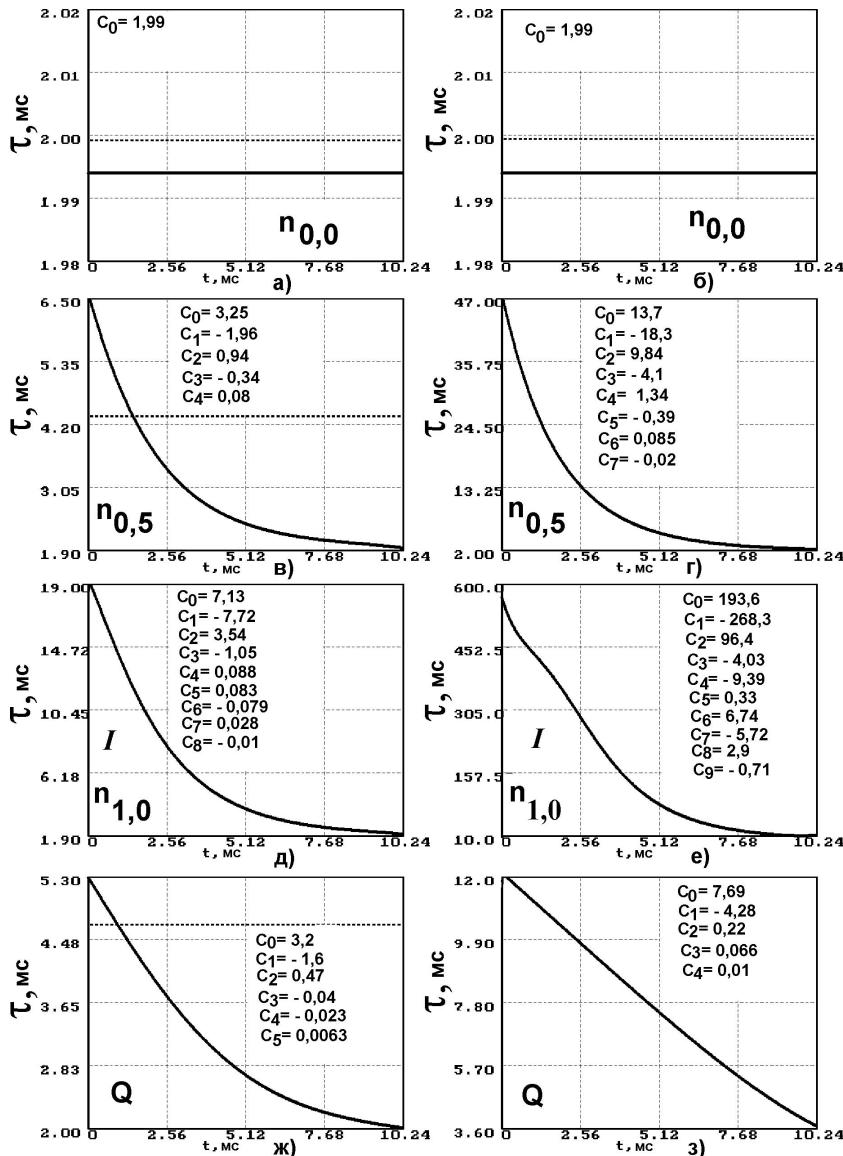


Рис. 4.7. Влияние повторного захвата носителей на образы релаксационных сигналов

Таблица 4.1. Инвариантность коэффициентов чебышевской полиномиальной аппроксимации образа сигнала релаксации заряда относительно числа дискрет

Коэффициенты полиномов Чебышева	Образец 1		Образец 2	
	Nx = 50	Nx = 20	Nx = 50	Nx = 20
C0	2,070014	2,067911	3,200199	3,171246
C1	-0,117770	-0,114478	-1,603660	-1,582968
C2	0,057750	0,056476	0,473869	0,482043
C3	-0,018544	-0,018272	-0,040785	-0,046546
C4	0,004990	0,004985	-0,022739	-0,022095

вости аппроксимации образа по отношению к интервалам "молчания" измерительного моста.

Апробация описанного выше двухступенчатого алгоритма распознавания формы квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов на экспериментальных стробограммах выполнена аспирантом С.А. Савенко. Пример оценки воспроизводимости параметров образов экспериментальных стробограмм, полученных с помощью регрессионного преобразования и полиномиального чебышевского разложения на объеме выборки 50 шт., приведен на рис. 4.10 в виде гистограмм коэффициентов C_0 и C_1 . Из этих гистограмм следует, что устойчивость распознавания заметно зависит от шума, сопровождающего экспериментальный релаксационный сигнал. Точнее говоря, повышение устойчивости возможно при условии повышения гладкости исходного сигнала путем фильтрации его от "быстрых" (случайных) составляющих. Однако в процессе такой фильтрации существует опасность исключения из исходного сигнала тех его характерных особенностей, ради которых, собственно, и создавалось вышеописанное распознавающее преобразование.

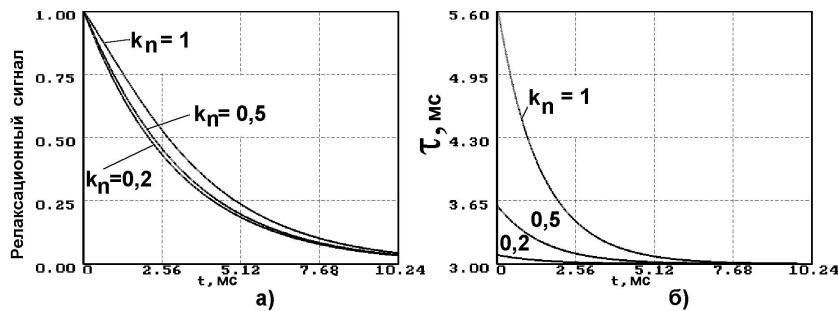


Рис. 4.8. Нелинейные искажения экспоненциального релаксационного сигнала

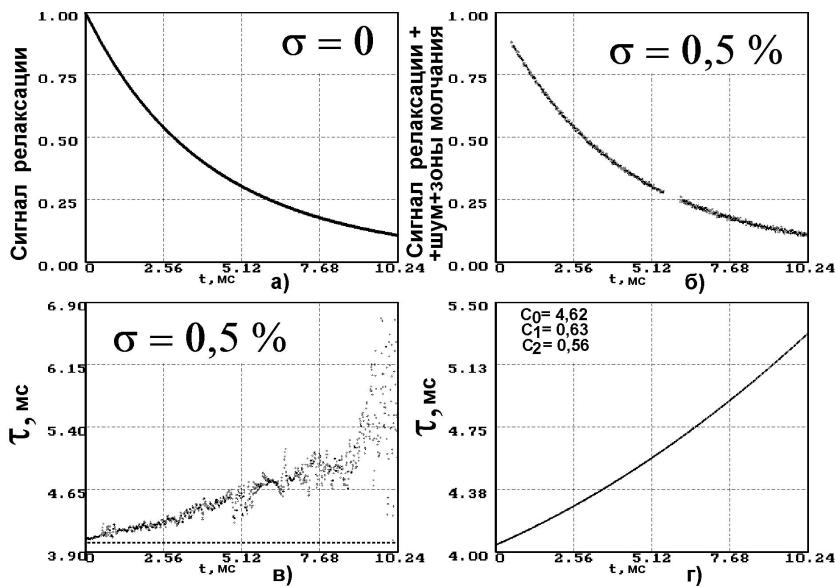


Рис. 4.9. Влияние интервалов молчания на образы релаксационных сигналов

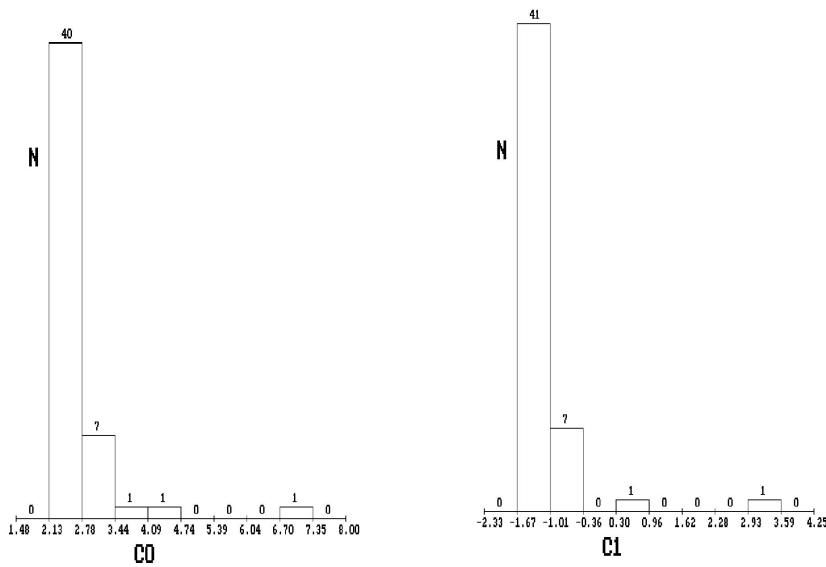


Рис. 4.10. Воспроизводимость параметров образов экспериментальных стробограмм релаксационного сигнала диода КД-521Б

вание. Для оптимального повышения гладкости исходного релаксационного сигнала предлагается заменить зашумленный релаксационный сигнал его кусочной сплайн-полиномиальной чебышевской аппроксимацией с использованием описанного выше (см. с. 215) метода структурной минимизации эмпирического риска [6, 176] и подбором максимальной степени аппроксимирующего полинома и длины интервала, на котором исходный релаксационный сигнал заменяется его аппроксимацией. Дополнительным параметром оптимизации является максимальный порядок производной, постоянство которой обеспечивается в процессе сшивания фрагментов при сплайн-аппроксимации. Для обучения (оптимизации) можно воспользоваться описанными выше моделями квазиэкспоненциальных незашумленных релаксационных сигналов, например, биэкспоненциальной моделью, моделью повторного захвата или нелинейного искажения измерительным трактом.

Полученные результаты позволяют уточнить существующие представления о реальных физических процессах опустошения глубоких уровней и сделать вывод о необходимости и возможности адаптации релаксационного спектрометра по форме сигнала релаксации.

Идея исследований релаксации параметров интегральных микросхем состоит в том, чтобы подробнее рассмотреть так называемые "хвосты" переходных процессов в микросхемах. Например, предлагается обратить внимание на окончание процесса перехода доступного наблюдению выходного каскада логической микросхемы из состояния "1" в состояние "0", характеризуемое низким уровнем потенциала или наоборот установление высокого потенциала. Предварительные эксперименты на интегральных схемах серий 155 и 555, выполненные аспирантом С.А. Савенко с помощью измерительного комплекса TR-5550, свидетельствуют о возможности регистрации указанных процессов и их зависимости от температуры ИС.

4.3. Выводы

1. Сопоставление доминирующих физических процессов, используемых в обеих известных моделях релаксации ГУ (1.5) и (1.8), с фундаментальными уравнениями физики полупроводников и экспериментальными данными, полученными с помощью частотно-температурного сканирования, указывает на существование противоречий, наиболее проявляющихся в попытках объяснения полевого эффекта — зависимости параметров релаксационного сигнала от разности заполняющего и опустошающего напряжений. При этом обе модели в известной степени не противоречат упомянутой фундаментальной системе уравнений.
2. Предложена математическая модель физических процессов опустошения глубоких уровней в слое объемного заряда после электрического заполнения при постоянной температуре, учитывающая повторный захват на ГУ высвобождающихся в ОПЗ носителей при их выносе в ОЭН. Эта модель позволяет дать объяснение полевому эффекту в части, касающейся изменения формы релаксационного сигнала в зависимости от параметров ГУ.
3. Разработаны и исследованы корреляционный, регрессионный и спектральный алгоритмы анализа формы квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов. С помощью теории нечетких множеств в указанных алгоритмах реализован учет конкретных временных диаграмм релаксационного спектрометра. В процессе имитационного моделирования установлено, что регрессионный алгоритм обладает наибольшей устойчивостью по отношению к шумам, сопровождающим релаксационные сигналы.
4. Для повышения устойчивости регрессионного алгоритма предложено регуляризовать его путем аппроксимации получаемого образа по-

линомами Чебышева с использованием метода структурной минимизации эмпирического риска.

5. С помощью математического моделирования и экспериментальных исследований апробированы предложенные алгоритмы и способы их регуляризации и показана возможность адаптации спектрометра относительно формы релаксационного сигнала. Для реализации этой возможности в наиболее полном и необходимом для практики объеме целесообразно перейти к использованию комплексных моделей, описывающих одновременно аппаратные преобразования и физические процессы релаксации ГУ.

Глава 5.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Перспективы технической реализации и внедрения в производство релаксационных процессорных средств параметрического контроля полупроводниковых приборов и интегральных схем на современном этапе предполагают решение как фундаментальных проблем СГУ и РСГУ, связанных с интерпретацией результатов измерений и обработкой знаний, так и ряда прикладных задач, а именно, разработка интеллектуальных драйверов и интерфейсов измерительно-вычислительных комплексов сбора экспериментальной информации, идентификация ГУ и ГЦ и создание соответствующих баз данных, определение концентрации и профиля распределения дефектов и примесей с учетом конструктивных особенностей контролируемых изделий [257]. Специфика современных технологий изготовления ИС и ППП состоит в том, что фундаментальные и прикладные проблемы, связанные с применением РСГУ, решаются в известной степени параллельно, точнее, параллельно-итеративно.

Решение фундаментальных проблем сводится прежде всего к уточнению и содержательной интерпретации модельных представлений, описывающих заполнение и опустошение ГУ в конкретных рабочих и тестовых элементах и структурах. Существенному продвижению в дан-

ном направлении, по мнению автора, может способствовать информационная технология РСГУ на базе сочетания адаптивно-итеративного частотно-температурного сканирования (см. главу 3) с алгоритмической селекцией и распознаванием релаксационных сигналов (см. главу 4). Разработка этой информационной технологии является достаточно сложной и трудоемкой научно-технической задачей, выходящей за рамки диссертационной работы. Решение данной задачи предусматривает в конечном итоге создание программно-аппаратного комплекса не только для обработки результатов измерений, но и для получения новых знаний в указанной предметной области. Это, в свою очередь, предполагает обращение к соответствующим базам знаний, а, следовательно, и формирование таковых в том или ином виде.

В данной работе, в силу перечисленных причин, автор не претендует на законченность разрабатываемой под его руководством и при его участии информационной технологии РСГУ на базе адаптивно-итеративного частотно-температурного сканирования, ограничиваясь детальным рассмотрением отдельных ключевых моментов. К таким моментам относятся: процессорная коррекция частотных сканов DLTS-сигнала, мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований, а также некоторые направления оптимизации адаптивно-итеративного частотно-температурного сканирования.

Специалисты в области физики полупроводников пришли к выводу о том, что РСГУ не является самодовлеющим методом исследования ГЦ и ГУ. Эффективность использования токовой, емкостной и других разновидностей РСГУ для целей параметрического контроля полупроводниковых приборов и интегральных схем обеспечивается за счет информационного взаимодействия с другими методами изучения характеристик полупроводниковых материалов. Создание интерфейса для

обеспечения указанного взаимодействия, по мнению автора, является весьма актуальной задачей, обуславливающей необходимость поиска и разработки типовых (стандартных) вариантов компьютерной интерпретации феноменологических моделей спектроскопии глубоких уровней.

Логическим развитием и завершением исследований в данном направлении со временем могут стать теоретическая разработка и программно-аппаратная реализация обобщенной технологии СГУ с применением мультимедиа технологий и систем виртуальной реальности. В данной главе рассматривается проект мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней", который, по мнению автора, может стать единственным средством инициализации и интенсификации процесса разработки упомянутой обобщенной информационной технологии.

5.1. Процессорная коррекция частотных сканов

Процессорная коррекция зависимостей DLTS-сигнала от частоты (частотных сканов DLTS-сигнала) представляет собой реализацию адаптивно-итеративных алгоритмов измерений, которые ориентированы на повышение метрологического уровня результатов измерений с помощью уточнения характеристик условий измерений, выступающих в качестве влияющих факторов [279, с. 181]. Условия измерений при этом регистрируются как вспомогательные параметры в процессе проведения измерительного эксперимента. Известно, что применение адаптивных алгоритмов в комплексе с итеративными позволяет решить задачу наиболее полного использования всей априорной и промежуточной информации о свойствах объекта измерений, условиях измерений, требованиях и ограничениях.

Итеративная составляющая процессорной коррекции может быть

способом повышения устойчивости идентификации трех- и четырехпараметрической моделей одноуровневого пика частотного скана. Достаточно очевидным фактом с точки зрения физики процессов, например, является относительная независимость показателя нелинейности p моделей (3.20) и (3.37) от температуры. В связи с этим целесообразно усреднить значения p , полученные в процессе пакетной (по набору сканов) обработки результатов эксперимента с помощью программ типа dlsosmp%.pas, а при повторной итерации найденное таким образом среднее значение p считать величиной постоянной, не подлежащей определению. Достаточно плавную и монотонную зависимость амплитуды пика частотного скана DLTS-сигнала от температуры, полученную в ходе первой итерации, можно заменить полиномиальной аппроксимацией с ограничением верхнего значения степени аппроксимирующего полинома на уровне 1...3. При идентификации четырехпараметрической модели целесообразно обратить внимание на отношение значений постоянных заполнения и опустошения, которое, вероятно, будет постоянной или медленно меняющейся с температурой образца величиной.

Эффективность процессорной коррекции (реальное повышение метрологического уровня измерений) можно оценить двумя путями:

— традиционным, предусматривающим определение характеристик ГУ (энергии активации и предэкспоненциального множителя) с последующей оценкой их вариаций после каждой адаптации, например, по методике стандарта ASTM F978-90, изложенной выше (см. с. 63). Этот путь достаточно прост и очевиден, но он не гарантирует отсутствие систематических ошибок, обусловленных используемыми моделями. На практике проведение измерений на другом образце той же конструкции, изготовленном по той же технологии, может привести к смещению энергии активации и предэкспоненциального множителя [69, с. 22];

— с помощью предложенной автором статистической технологической разрешающей способности в соответствии с рекомендациями гл. 2. В этом случае необходимо увеличивать объем измерений за счет использования партии образцов вместо одного образца. Существенно повысив трудоемкость измерений, можно получить новый способ оценки корректности используемых моделей, применяемых для обработки результатов измерений. Статистическая разрешающая способность потенциально способна классифицировать тот или иной параметр ГУ (энергия уровня, сечение захвата, концентрация) как физическую константу или характеристику конкретного экземпляра образца, обусловленную технологическими погрешностями. Относительно малое значение статистической разрешающей способности σ_T/σ_I по тому или иному измеряемому параметру ГУ указывает либо на его независимость от конкретного экземпляра и вероятную близость к физической константе, либо на низкую точность алгоритмических измерений; возрастание σ_T/σ_I свидетельствует об обратном, то есть о влиянии технологических разбросов конкретных образцов в партии или повышении точности алгоритмических измерений. Динамика изменения статистической разрешающей способности в условиях целенаправленного увеличения точности алгоритмических измерений за счет применения аддитивных и итеративных процедур потенциально может способствовать уточнению существующих модельных представлений о процессах релаксации ГУ.

Температурная коррекция

Предусмотренное в измерительно-вычислительном комплексе (рис. 3.2 на с. 108) мониторирование вспомогательного сигнала с выхода электронного термометра позволяет предложить соответству-

ющую постэкспериментальную процессорную коррекцию частотного скана DLTS-сигнала. В процессе частотного сканирования температура образца незначительно изменяется относительно заданного значения (рис. 3.15 (в), (д) на с. 130). Усреднение температуры по всему скану положительно отражается на точности определения параметров ГУ, однако из-за колебаний температуры относительно среднего (или заданного) значения частотный скан DLTS-сигнала искажен, то есть не соответствует средней температуре в отдельных точках. Указанные искажения могут привести в процессе идентификации моделей пика (3.20, 3.37) к ошибке определения постоянной опустошения ГУ, которая, в соответствии с формулами (1.2, 1.5, 1.7, 1.8) весьма существенно зависит от температуры. Особенно опасными с этой точки зрения являются искажения в области частот опорного сигнала, соответствующих экстремуму выражений (3.20, 3.37). Поэтому есть основания ожидать от температурной коррекции положительных результатов в смысле точности определения параметров ГУ.

Определив предварительно параметры ГУ при усредненной температуре частотного скана основного сигнала, можно затем скорректировать каждую его точку, воспользовавшись значением зарегистрированной температуры образца в каждой точке скана. Следует, однако, иметь в виду, что температура измеряется с погрешностью, состоящей, как известно, из нескольких составляющих (систематическая, случайная, выброс). Особенности описанного выше алгоритма управления температурой с помощью пропорционально-интегро-дифференциального алгоритма, в частности, подача импульсов регулирования один раз в минуту, позволяют вместо измеренных значений температуры использовать аппроксимацию временной зависимости температуры в промежутках между подачей управляющих импульсов нагрева. В первом приближении можно пренебречь выбросами измеренных

значений температуры, поскольку задача исключения выбросов достаточно успешно, на наш взгляд, решается драйвером измерительно-вычислительного комплекса. В дальнейшем анализ последовательности значений температуры образца на наличие выбросов (грубых погрешностей) при необходимости может быть включен в состав алгоритмов вторичной обработки экспериментальной информации.

Таким образом, адаптация спектрометра по температуре предполагает решение двух взаимосвязанных задач:

- уточнение фактического значения температуры с помощью аппроксимации ее временной зависимости;
- собственно коррекция исходного частотного скана DLTS-сигнала по результатам предварительного определения параметров ГУ при усредненной температуре получения частотного скана.

Выбор вида аппроксимации представляет собой достаточно ответственную процедуру, определяющую повышение точности измерения температуры за счет аппроксимации ее поведения во времени. Целесообразно вид этой аппроксимации согласовать с алгоритмом пропорционально-интегро-дифференциального регулирования и поведением температуры образца после подачи импульса нагрева. Такая возможность заложена в алгоритм мониторирования температуры — моменты выдачи регулирующего импульса напряжения на нагреватель криостата условно помечены в файле абсолютных температур отрицательными значениями. Поэтому наилучшей, на наш взгляд, будет кусочная аппроксимация, узлы которой соответствуют моментам подачи импульсов нагрева. Зафиксированные таким образом узлы делят последовательность значений температуры, записанную в файл типа $t * .dat$, на отдельные отрезки, соответствующие выбранному интервалу регулирования длительностью одна минута. Реально это время может оказаться чуть более минуты, но в первом приближении его вполне мож-

но считать постоянным и равным 60 с. Воспользовавшись файлом типа $w*.dat$, в котором записаны длительности временных интервалов, отделяющих соседние измерения температуры (рис. 3.3 на с. 110), получим зависимость температуры образца от времени $T = f(t)$ внутри каждого интервала регулирования. Наиболее удобной формой аппроксимации поведения температуры на интервале регулирования будет, на наш взгляд, описанное на с. 213 полиномиальное приближение регрессии с выбором оптимальной степени разложения по полиномам Чебышева методом структурной минимизации эмпирического риска [6]. В общем случае аппроксимированные значения температуры образца на стыке смежных интервалов регулирования будут отличаться друг от друга. Для обеспечения непрерывности кусочной аппроксимации предлагается определить на границах интервалов регулирования средние аппроксимированные значения, а затем повторить процедуру полиномиальной аппроксимации для каждого интервала, увеличив в формуле (4.32) веса первого и последнего значений за счет уменьшения соответствующих среднеквадратичных отклонений σ_i . Уменьшая σ_i до нуля мы тем самым требуем безусловного совпадения аппроксимации и исходного значения аппроксимируемого параметра. Такое "сшивание" не гарантирует сплайновой гладкости аппроксимирующей функции на стыке интервалов регулирования по первой и второй производным [6, 176], однако в данном случае (рис. 3.15, в, д на с. 130) сплайн-аппроксимация необязательна.

Предложенный алгоритм итеративной кусочно-непрерывной аппроксимации полиномиальным приближением реализован в виде программного модуля DLSOSKTO.EXE. Исходными для работы модуля являются файлы типа $t * .dat$ и $w * .dat$. Выходным файлом первой итерации будет файл типа $kt * .dat$ скорректированных температур. На рис. 5.1 (а) показаны значения температуры образца до коррекции, а на

рис. 5.1 (б) — после коррекции с помощью кусочно-непрерывной итеративной полиномиальной аппроксимации.

В зависимости от устойчивости процедуры коррекции текущей температуры образца могут быть поставлены задачи "приведения" скана DLTS-сигнала как к средней температуре, так и к заранее заданной. Последнее необходимо для так называемой мультискановой (см. с. 243) идентификации четырехпараметрической модели (3.37) аппаратных преобразований спектрометра с целью определения постоянной заполнения ГУ. Возможность такого "приведения" определяется устойчивостью и сходимостью процедуры температурной коррекции DLTS-сигнала. Для их оценки необходимы специальные исследования.

В первом приближении температурная коррекция частотного скана DLTS-сигнала может быть сведена к коррекции постоянной опустошения ГУ. Параметры ГУ — энергия активации ΔE и предэкспоненциальный множитель $\lg(\sigma b)$ — определяются в процессе первой итерации, под которой подразумевается стандартная, в соответствии с F978-90 (см. с. 63), процедура использования линейной регрессии в аррениусовых координатах при температуре образца, равной среднему значению по скану (программный модуль DLSO1GU1.EXE). Подстановка найденных значений ΔE и $\lg(\sigma b)$ в выражения (1.2, 1.5, 1.7, 1.8) позволит в каждой точке скана уточнить значение τ . Далее, с помощью моделей (3.20) или (3.37) при неизменной амплитуде релаксационного сигнала в этой точке скана определяется величина относительного изменения теоретического значения сигнала на выходе селектора вследствие коррекции τ . Соответственно этому изменению корректируется экспериментальное значение DLTS-сигнала.

Скорректированные таким образом частотные сканы DLTS-сигнала могут быть вновь использованы для определения параметров ГУ и повторных коррекций. Количество итераций зависит от сходимости и

устойчивости итерационного процесса и подлежит оценке с помощью имитационного моделирования или уточнения по мере увеличения объема обработанных экспериментальных данных. В процессе дальнейших итераций не исключается использование четырехпараметрической модели (3.37) с постоянной заполнения, но пока с вводом этого параметра, по мнению автора, не следует торопиться из-за влияния паразитных емкостей измерительного тракта, заряд которых идет параллельно с заполнением ГУ. Разделению перечисленных причин может способствовать мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований, о которой речь пойдет ниже.

Программный модуль коррекции частотного скана DLTS-сигнала DLSOSMPK.EXE предусматривает чтение файлов $f * .dat$ и $kt * .dat$, выдачу скорректированного в ходе первой итерации файла типа $kf * .dat$, соответствующего температуре "привязки" — средней или заданной, а также уточнение параметров одиночного ГУ с помощью программного модуля DLSO2GU1.EXE (см. с. 169) и т. д.. Коррекция может быть выполнена при различных значениях параметра λ , определяющего весовые коэффициенты по формуле (3.44) при вычислении невязки (3.43). На рис. 5.2 (а), (б) приведены зависимости энергии активации ГУ $\Delta E = E_c - E_{\text{ГУ}}$ (а) и точности определения энергии активации ГУ $\left(\frac{3\sigma_{E_c-E_{\text{ГУ}}}}{E_c - E_{\text{ГУ}}} \% \right)$ (б) от параметра λ . Аналогичные зависимости модуля показателя предэкспоненциального множителя $|b|$ и точности его определения $\left(\frac{3\sigma_b}{b} \% \right)$ приведены на рис. 5.2 (в), (г). Анализ этих зависимостей приводит к выводу о повышении в 1,3 ... 1,8 раза точности алгоритмических измерений параметров ГУ с помощью предложенной температурной процессорной коррекции при значениях $\lambda > 30 \%$. Средние значения энергии активации и модуля показателя предэкспоненциального множителя также меняются с изменением λ до

и после коррекции, однако эти изменения скорее носят случайный, чем систематический характер. Отсутствие положительного эффекта температурной процессорной коррекции при значениях $\lambda \leq 30\%$ можно объяснить тем обстоятельством, что для определения параметров пика была использована не четырех-, а всего лишь трехпараметрическая модель. Другим объяснением может быть влияние соседних ГУ, а также возрастание асимметрии модели относительно пика частотного скана из-за его расположения вблизи правой границы скана.

Дальнейшая оптимизация процедур температурной процессорной коррекции является предметом самостоятельного исследования и в задачу данной работы не входит.

Прочие виды коррекции

Возможности процессорной коррекции частотных сканов DLTS-сигнала не ограничиваются только температурной коррекцией (адаптацией). Принципиально возможной является адаптация DLTS-сигнала по уровням заполнения и опустошения U_1 и U_R , реальной длительности импульса заполнения t_1 , сигналу разбаланса емкостного измерительного моста U_C , а также по форме реального квазиэкспоненциального релаксационного сигнала (разумеется, при условии мониторирования соответствующих параметров).

Весьма перспективным, по мнению автора, может стать переход от многоступенчатой идентификации параметров ГУ с использованием промежуточных моделей пика частотного скана DLTS-сигнала к одноступенчатой, предусматривающей в процессе оптимизации определение непосредственно параметров ГУ. Эта идентификация фактически означает комплексное (совместное) моделирование физических явлений формирования и аппаратных преобразований релаксационных сиг-

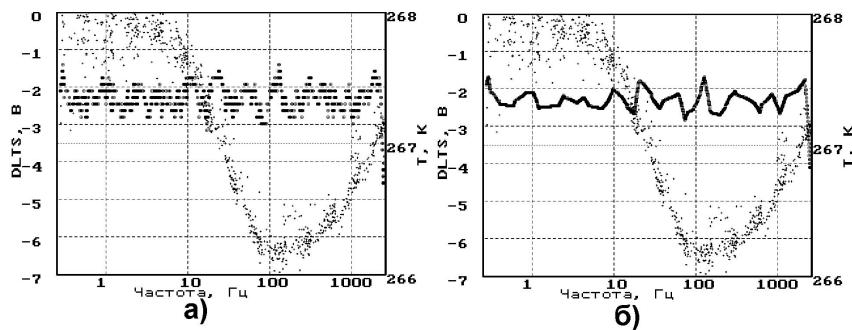


Рис. 5.1. Коррекция измеренных значений температуры образца с помощью кусочно-непрерывной полиномиальной аппроксимации

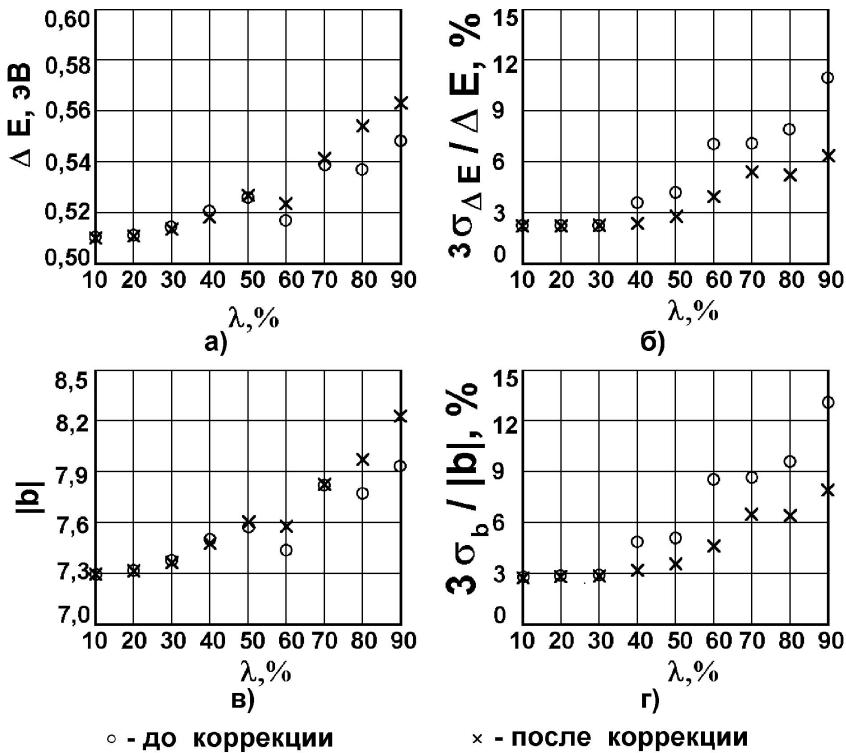


Рис. 5.2. Эффективность температурной процессорной коррекции частотных сканов DLTS-сигнала

налов. Торопиться с этим переходом однако не стоит до тех пор, пока не будут созданы приемлемые модели неэкспоненциальности реальных релаксационных сигналов. Следует также заметить, что такой переход будет сопряжен с существенным увеличением объема компьютерной обработки [136].

Теоретические и экспериментальные изыскания в указанных направлениях выходят за рамки данной работы и являются предметом дальнейших самостоятельных исследований.

5.2. Мультикановая параметрическая идентификация моделей аппаратных преобразований релаксационных сигналов

Предложенная автором одноуровневая (относящаяся к одному глубокому уровню — ловушке основных носителей) четырехпараметрическая модель аппаратных преобразований релаксационного спектрометра (3.37) принципиально может быть идентифицирована на одном частотном скане DLTS-сигнала с помощью описанной выше программы DLS01M4P.EXE (см. с. 163). Однако точность и устойчивость экспериментального определения параметров указанной модели будут выше, если для этих целей использовать несколько частотных сканов, отличающихся разными значениями длительности заполняющего импульса t_1 , но полученных при одной температуре образца.

В таблице 5.1 приведены полученные автором результаты идентификации четырехпараметрической модели аппаратных преобразований для эталонного образца спектрометра DLS-82E. Каждая из строк, соответствующих файлам e0045 – e0049, получена в результате обработки одного частотного скана DLTS-сигнала. Различные частотные сканы в этих строках таблицы соответствуют разным значениям дли-

Таблица 5.1. Моно- и мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований (без дублирования сканов)

Имя файла эксп.	Длит. t1, мкс					Результаты идентификации				
	20	10	5	2	1	Постоянные		Ампл. Сх, пФ	К-т р	Средн. невяз.
						оп., мс	зап., мкс			
e0022	+	+	+	+	+	2,36	1,41	-0,099	0,495	0,344
e0040	+	+	+	+		2,32	1,37	-0,099	0,485	0,406
e0041		+	+	+	+	2,29	1,17	-0,093	0,490	0,259
e0042	+	+	+			2,45	4,00	-0,109	0,519	0,141
e0043		+	+	+		2,20	0,98	-0,093	0,482	0,274
e0044			+	+	+	2,15	0,98	-0,088	0,496	0,215
e0045	+					2,43	2,78	-0,11	0,487	0,095
e0046		+				2,72	5,73	-0,12	0,522	0,064
e0047			+			2,39	5,09	-0,13	0,665	0,074
e0048				+		2,97	2,13	-0,13	0,566	0,068
e0049					+	2,73	1,11	-0,086	0,496	0,064
e0050	+	+				2,56	4,98	-0,11	0,497	0,085
e0051		+	+			2,36	3,38	-0,105	0,527	0,139
e0052			+	+		2,01	0,45	-0,085	0,476	0,146
e0053				+	+	3,03	1,91	-0,119	0,561	0,085

тельности заполняющего импульса t_1 . Остальные строки соответствуют так называемой "мультискановой" идентификации, выполняемой с использованием двух и более частотных сканов. Знаками "+" во 2-м – 6-м столбцах таблицы условно показаны схемы объединения отдельных сканов в мультискан. Сравнивая между собой группы строк, соответствующие файлам экспериментов e0040 – e0041 (4 скана), e0042 – e0044 (3 скана) и e0050 – e0053 (2 скана), можно отметить тенденцию уменьшения разброса идентифицируемых параметров по мере увеличения числа сканов в мультискане.

Программа DLSO1M4P.EXE мультискановой идентификации допускает также многократное дублирование сканов, полученных при одинаковых условиях. Эта возможность предусмотрена с целью повышения точности и устойчивости процесса идентификации за счет увеличения объема экспериментальных данных путем дублирования сканов. Таблица 5.2 аналогична предыдущей с той лишь разницей, что строки, соответствующие файлам экспериментов e0035 – e0039, получены не на одном, а на нескольких сканах каждая (e0035 – 11 сканов, e0036 – 16 сканов, e0037 – 12 сканов, e0038 – 16 сканов, e0039 – 15 сканов). Различия сканов внутри группы в этих строках обусловлены только статистической воспроизводимостью экспериментов, так как режимы измерений не меняются.

На рис. 5.3 показаны промежуточные этапы мультискановой идентификации четырехпараметрической модели на базе экспериментов e0022 (а) и e0021 (б). Они отражают процесс ненаправленного случайного поиска с варьированием всех параметров модели. Диапазон разброса теоретических кривых, соответствующий уровню $\lambda = 10\%$, входящему в формулы (3.44), условно показан на этих рисунках штриховыми линиями черным (а) и белым (б) цветами.

Сопоставление похожих по схеме компоновки строк таблиц позво-

Таблица 5.2. Мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований (с дублированием сканов)

Имя файла эксп.	Длит. t1, мкс					Результаты идентификации				
	20	10	5	2	1	Постоянные		Ампл. Сх, пФ	К-т р	Средн. невяз.
						оп., мс	зап., мкс			
e0021	+	+	+	+	+	2,50	1,38	-0,10	0,488	0,198
e0030	+	+	+	+		2,46	1,48	-0,10	0,480	0,214
e0031		+	+	+	+	2,47	1,23	-0,096	0,484	0,137
e0032	+	+	+			2,49	2,68	-0,104	0,485	0,193
e0033		+	+	+		2,41	1,26	-0,096	0,473	0,135
e0034			+	+	+	2,47	1,17	-0,094	0,483	0,130
e0035	+					2,47	3,98	-0,11	0,480	0,097
e0036		+				2,41	1,91	-0,097	0,471	0,128
e0037			+			2,81	4,28	-0,13	0,573	0,144
e0038				+		2,91	1,96	-0,12	0,546	0,088
e0039					+	2,70	1,05	-0,088	0,495	0,091
e0060	+	+				2,61	5,37	-0,11	0,498	0,115
e0061		+	+			2,39	1,80	-0,098	0,476	0,143
e0062			+	+		2,38	1,16	-0,094	0,474	0,129
e0063				+	+	2,64	1,24	-0,096	0,502	0,100

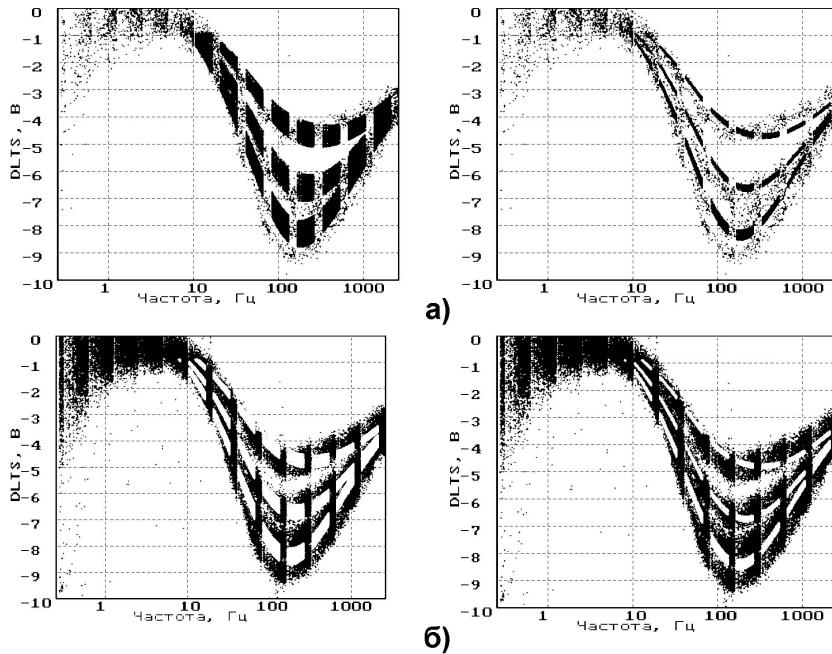


Рис. 5.3. Этапы мультискановой идентификации четырехпараметрической модели аппаратных преобразований по результатам экспериментов e0022 (а) и e0021 (б)

ляет сделать предварительный качественный вывод о положительном эффекте за счет дублирования, хотя дублирование скана при неизменных условиях его получения не эквивалентно такому же увеличению объема экспериментальных данных за счет получения сканов при разных значениях длительности заполняющего импульса t_1 . Следует также иметь в виду, что чрезмерное уменьшение t_1 может повлечь за собой дополнительные эффекты, не связанные с перезарядом глубоких уровней. В частности, при $t_1 < 1\text{мкс}$ на осциллографах заполняющего импульса наблюдаются процессы заряда паразитных емкостей измерительного тракта. В отличие от перезаряда ГУ наблюдаемые процессы не зависят от температуры образца, однако это обстоятельство не позволяет автоматически отделить одни процессы от других, так как низкие (меньше единицы) значения показателя p в таблицах 5.1 и 5.2 указывают на многоуровневость наблюдаемого ГЦ. Это означает, что применение для идентификации одноуровневой четырехпараметрической модели аппаратных преобразований (3.37) не совсем правомерно и может служить только в качестве первой итерации.

Постоянство температуры в пределах скана, "усиленное" температурной процессорной коррекцией, является отличительной особенностью частотного сканирования. Это отличие позволяет на определенном этапе исследования исключить температуру из тех компонентов моделей, где она присутствует в неявном виде. Речь идет, например, об исследовании температурных зависимостей энергии активации и сечения захвата.

Кроме четырехпараметрической модели аппаратных преобразований мультискановая идентификация, по мнению автора, будет также весьма эффективной при исследовании полевого эффекта для одноуровневого (см. рис. 3.9) и двухуровневого ГЦ (см. рис. 3.11, 3.12). Изменяющимися управляемыми параметрами этих моделей дополнитель-

но будут напряжения заполнения U_1 и опустошения U_R глубоких уровней. По сути дела модель полевого эффекта должна быть комплексной, то есть отражать, с одной стороны, аппаратные преобразования релаксационных сигналов и, с другой стороны, физические процессы релаксации.

Изучение взаимосвязи количества и видов сканов в мультискане с обусловленностью указанных моделей (точностью и устойчивостью процесса идентификации) выходит за рамки данной работы и является предметом самостоятельных исследований. В частности, представляет практический интерес разработка критериев и методов "опроверждения" различных математических моделей релаксации ГУ и аппаратных преобразований релаксационных сигналов путем сопоставления средней невязки по всем сканам мультискана со средними невязками по отдельным сканам или группам сканов. Сравнивая, например, среднюю невязку в строках e0035 – e0039 таблицы 5.2 со средними невязками в других строках указанной таблицы, можно получить пороговые значения средних невязок, с помощью которых одни модели могут быть признаны неадекватными и отвергнуты, а другие, наоборот, приняты как адекватные относительно установленных пороговых значений.

5.3. Компьютерная интерпретация феноменологических моделей спектроскопии глубоких уровней

Контроль параметров глубоких уровней становится составной частью метрологического обеспечения качества интегральных микросхем. Методы спектроскопии ГУ активно внедряются в производство, оставаясь в то же время предметом интенсивных теоретических и прикладных исследований. Таким образом, процесс познания тесно связан с практическим восприятием и использованием получаемых результа-

тов, что обуславливает актуальность достаточно наглядной интерпретации моделей ГУ, применяемых для диагностики отказов элементной базы электронных устройств. Возникающие при этом проблемы связаны с использованием феноменологических теорий, в определенной степени отрицающих возможность наглядного отображения [252]. Одна из первых таких проблем связана с идентификацией глубоких центров — дефектов, приводящих к появлению ГУ в запрещенной зоне полупроводника.

Для приведенных ниже публикаций по данному вопросу [304, 378, 303, 31, 356, 377, 296, 166, 101, 297, 333], освещавших, в частности, лишь некоторые достижения релаксационной спектроскопии ГУ (РСГУ), уже характерно относительное разнообразие вариантов отображения параметров и характеристик ГУ. Наиболее распространенным в РСГУ является использование координат Аррениуса $\ln(e_n/T^2) — 1000/T$ (см. рис. 5.4) [304, 378], $\ln(\tau^2 T) — 1000/T$ (рис. 3.19 — верхний) или $\ln(\tau) — 1000/T$ (см. рис. 3.19 — нижний), [31], где e_n — скорость эмиссии, T — абсолютная температура образца, τ — постоянная релаксации, и в неявном виде отражены E_c (энергия уровня) и σ (сечение захвата носителей), а также их температурные зависимости. Тип ловушек (доноры или акцепторы) при этом отражает полярность соответствующих пиков дополнительных зависимостей *DLTS*-сигнал — T или *DLTS*-сигнал — $\ln(F)$ (см. рис. 3.7) [304, 378, 31, 356, 377, 296], где *DLTS*-сигнал — выходной сигнал релаксационного спектрометра (емкостного или токового), F — текущее значение частоты при частотном сканировании. Менее распространены варианты с координатами $\Delta C — T$ (см. рис. 5.6, 5.7) [333, 80, 34].

Учебники, ориентированные на подготовку технологов микроэлектронного производства, предлагают зонные диаграммы в качестве основы графического отображения параметров ГУ [166, 101, 297], где на-

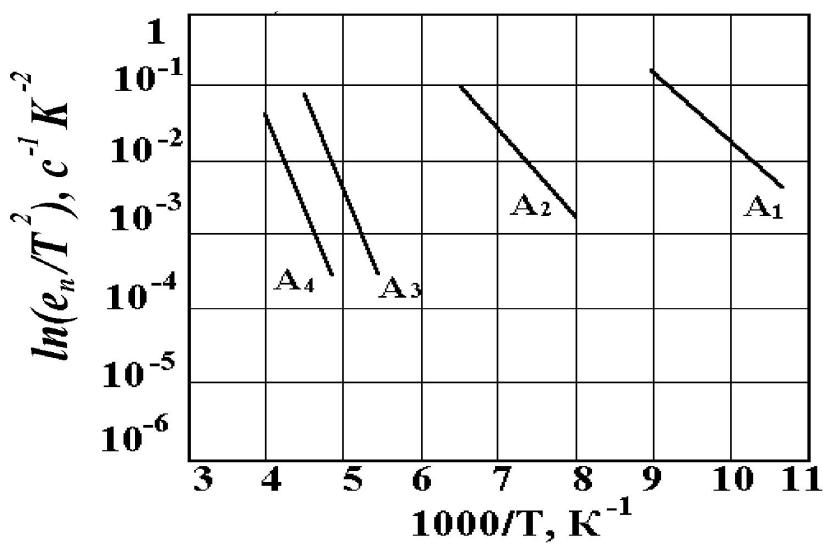


Рис. 5.4. Кривые Аррениуса для глубоких уровней в GaAs

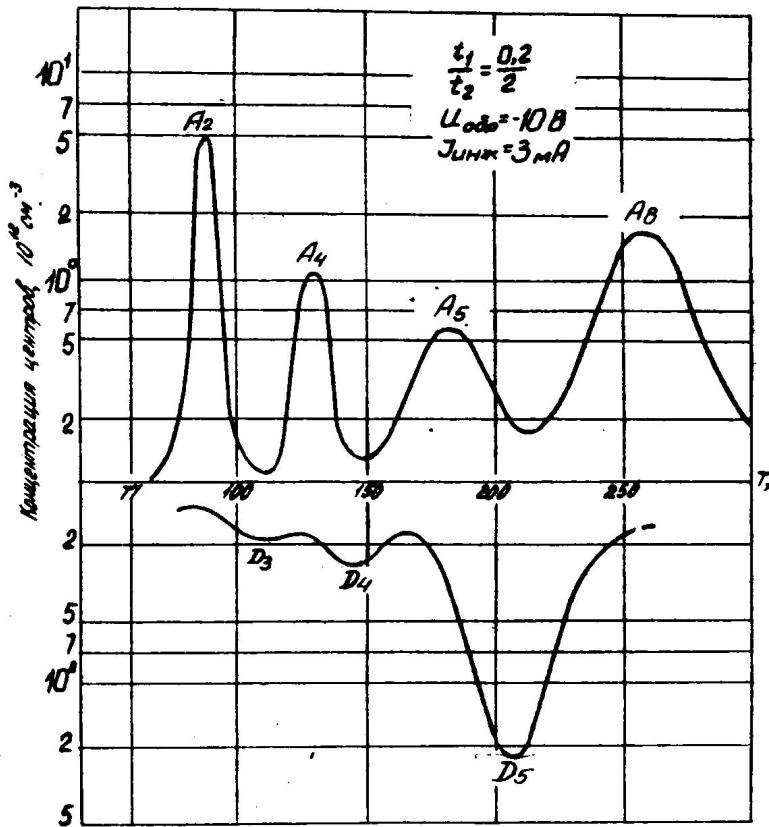


Рис. 5.5. Спектр радиационных дефектов в кремнии, легированном золотом

ряду с энергией ГУ, шириной запрещенной зоны и видом полупроводникового материала отражается тип ловушек, однако не приводятся характеристики активности ловушек.

На роль индикатора спектрометра глубоких уровней успешно претендует экран дисплея компьютера, позволяющий сочетать вывод графической информации и табличной алфавитно-цифровой [304, 378, 356, 377] с выдачей твердых копий экрана.

Анализ перечисленных вариантов позволяет сделать следующие выводы:

— взятые в совокупности и многообразии, они достаточно полно отражают особенности процесса и результаты релаксационной спектроскопии ГУ;

— в силу упомянутого многообразия подходов оперативное и целостное восприятие их широким кругом пользователей для сопоставления и практического использования результатов, например каталогизации ГЦ, весьма проблематично.

Интерпретация моделей ГУ должна учитывать то обстоятельство, что кроме многочисленных методов нестационарной (релаксационной, неравновесной) и стационарной (равновесной) электрической спектроскопии существуют и другие способы определения характеристик глубоких уровней: нейтронно-активационный анализ, массспектроскопия, химическое селективное травление, растровая электронная и тунNELьная микроскопия, ИК Фурье-спектроскопия, рентгеноспектральный анализ и рентгеновская электронная спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс, эффект Холла, обратное рассеяние, измерение времени жизни неосновных носителей, исследование вольт-амперных характеристик и другие.

Индикатор спектрометра глубоких уровней должен отражать основные параметры (энергию и сечение захвата ГУ, тип ловушек) с це-

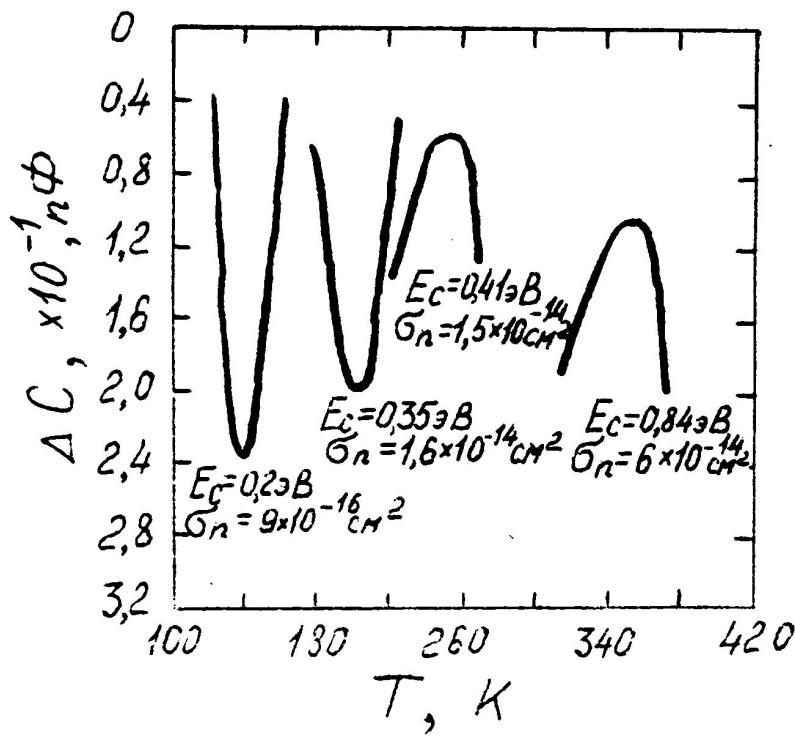


Рис. 5.6. Спектр электронных ловушек в монокристаллическом образце арсенида галлия, полученный методом емкостной РСГУ

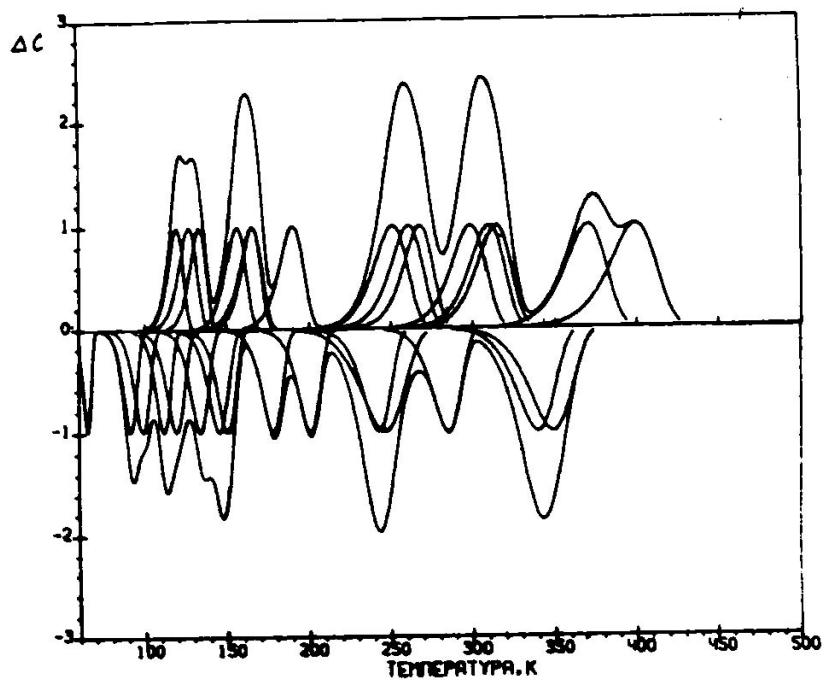


Рис. 5.7. Расчетные спектры DLTS в GaAs электронных (отрицательные пики) и дырочных (положительные пики) ловушек

лью сопоставления результатов, полученных различными способами, а также иметь возможность интерпретации таких характеристик, как температурные зависимости E_c и σ , полевые зависимости, эффекты больших концентраций и т.п.

Сложность научных методов спектроскопии ГУ, по мнению автора, требует адекватных подходов к интерпретации используемых моделей, в частности применения элементов систем виртуальной реальности (ВР), успешно разрабатываемых и используемых ведущими фирмами мира [253]. Термином "виртуальная" (мнимая) реальность [207, 288] исследователи, занимающиеся разработкой этой комплексной проблемы, характеризуют, с одной стороны, качественно новый уровень компьютерного моделирования процессов, происходящих в сложных системах, а с другой стороны, новый этап в развитии подхода к познанию мира, основанный на отображении знаний с учетом специфики механизмов межполушарной асимметрии человеческого мозга на основе дуальной — "левополушарной" (логико-комбинаторной) и "правополушарной" (целостной) стратегии обработки информации. Система ВР в общем случае, предполагая полисенсорное воздействие с помощью средств мультимедиа и соответствующих обратных связей, позволяет осуществить "взгляд изнутри" на исследуемый объект, создать в реальном масштабе времени "эффект присутствия" как в глубине образа, так и на его поверхности, за счет разработки специальных программно-аппаратных средств. В некоторых публикациях ВР представляется как новая технология, способная усилить возможности человеческого мышления.

В педагогическом плане при подготовке технологов микроэлектронного производства автор отмечает обострение противоречия между нарастающим объемом учебного материала и степенью его усвоения. В терминах дуальной модели отображения человеком знаний это приво-

дит к нарушению баланса логико-комбинаторной и образной стратегий обработки информации в процессе познания. Эффективным средством обеспечения указанного баланса может стать адекватная техническая поддержка обучения, предполагающая переход на новый уровень компьютерного моделирования процессов, происходящих в сложных системах. Необходимы технические средства обучения, по своей сложности адекватные объекту изучения и построенные по принципу "просто о сложном", которые должны стать не только средством познания в данной предметной области, но и средством приобщения будущего специалиста к процессу научного поиска, т. е. учить не только пользоваться готовыми знаниями, но и получать новые знания в процессе будущей производственной деятельности. Поэтому характерной особенностью нового поколения технических средств обучения является изначально двойное назначение, то есть применение в качестве инструмента исследования и обучения, что возможно лишь при объединении усилий коллективов исследователей и педагогов.

Специфика применяемых моделей физики полупроводников заключается в том, что, в отличие от компьютерной томографии, систем автоматизированного проектирования, различных тренажеров [111] и других областей применения ВР, в данном случае, в силу феноменологического происхождения указанных моделей, предполагается создание на основе коллективного соглашения "компьютерного призрака", не имеющего аналогов в реальном мире.

В качестве первого шага предлагается компьютерный вариант интерпретации модели ГУ, представленный на рис. 5.8 и позволяющий доступными средствами монохромного дисплея и черно-белого принтера компьютера отобразить перечисленную информацию в форме, которая, по мнению автора, наиболее способствует ее восприятию и в то же время допускает сопоставление результатов, полученных различными спо-

собами. Параметры ГУ на рис. 5.8 (а), соответствующие примеси палладия в кремнии, взяты из [312]. На рис. 5.8 (б) отображены глубокие уровни в кремнии, образовавшиеся в результате радиационной обработки [31, с. 126].

Входная информация вводится в табличном алфавитно-цифровом виде в диалоговом режиме или представляет собой результат сжатия в реальном времени итогов работы конкретного спектрометра, например, *DLTS*-спектрометра в режиме частотно-температурного сканирования. Для тех случаев, когда информация о сечениях захвата σ ловушками носителей зарядов не приводится, программа интерпретации автоматически выдает усеченную разновидность предложенного варианта, совместимую с ним по энергии уровня E_c и типу ловушек (рис. 5.8 (в) (е)). Параметры ГУ на рис. 5.8 (в) – (е) взяты из разных первоисточников, авторы которых связывают эти ГУ с золотом в кремнии [166, 101, 297, 361]. Буквами *D* и *A* условно обозначены типы ловушек (донары, т.е. ловушки электронов или акцепторы — ловушки дырок). Эти буквы неслучайно находятся вблизи углов координатного прямоугольника "энергия уровня — сечение захвата" — от этих углов осуществляется отсчет параметров соответствующих ГУ: донорных и акцепторных.

При таком отсчете мелкие донорные и акцепторные уровни характеризуются соответственно малыми ($< 0,1$ эВ) значениями энергии уровня. Для индикации энергии уровня предлагается линейный масштаб с максимальным значением, соответствующим ширине запрещенной зоны полупроводникового материала при определенной температуре (1,12 эВ при 300 К для кремния).

Таким образом, нижняя горизонталь прямоугольника координат соответствует потолку валентной зоны, а верхняя — дну зоны проводимости. Сечение захвата отображается в логарифмическом масштабе с

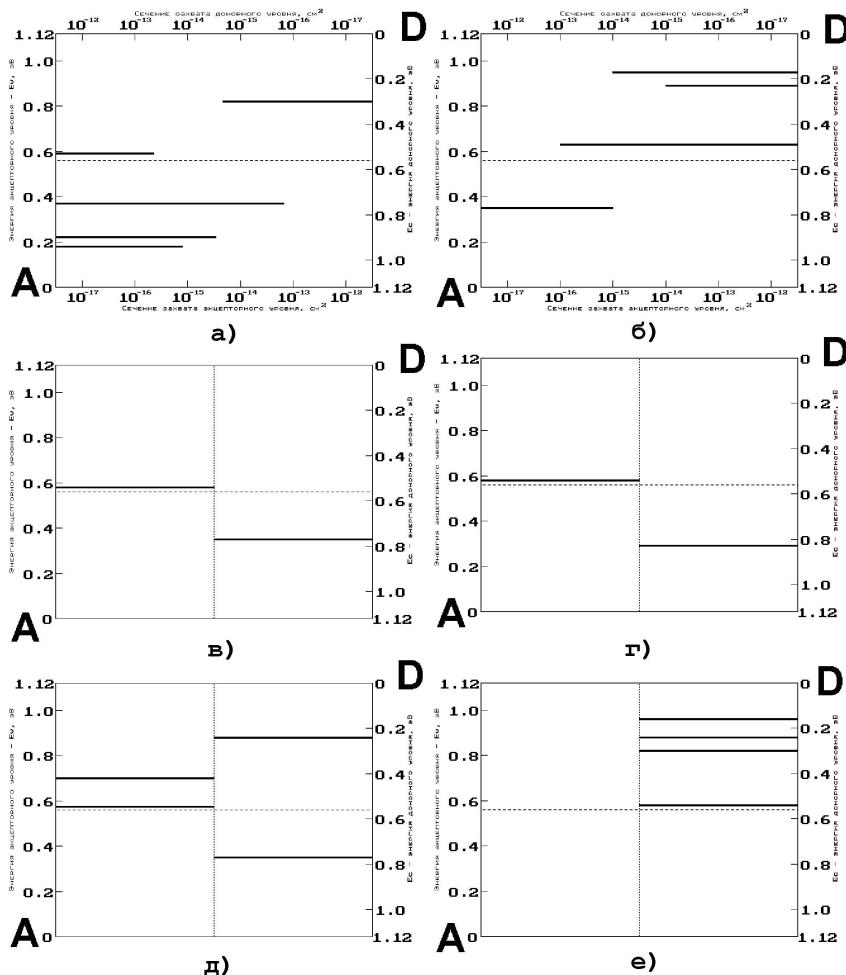


Рис. 5.8. Спектрограммы глубоких уровней, связываемых с палладием в кремнии (а), радиационной обработкой кремния (б) и золотом в кремнии ((в) - (е))

учетом диапазона реально возможных значений. Ширина линий спектrogramмы, соответствующих ГУ, при необходимости и наличии точностных оценок (например, трехсигмальных в соответствии со стандартом ASTM F978–90) потенциально способна отразить точность определения параметров ГУ. Спектrogramма ГУ (рис. 5.8) может быть дополнена второй и последующими страницами дисплея с алфавитно-цифровой информацией о типе и особенностях изготовления образца, значениях параметров ГУ, источниках информации и т. д.

Пунктиром показана середина запрещенной зоны, чтобы акцентировать внимание на близости к ней тех ГУ, которые сильнее влияют на параметры полупроводниковых приборов, например, на время жизни неравновесных носителей (1.1) [166]. Зависимость параметров ГУ от температуры удобно отразить переходом к трехмерному изображению, при котором рис. 5.8 является сечением, сделанным при фиксированной температуре образца. Искривлением координатного пространства в третьем (температурном) измерении интерпретируется возможность совмещения данных, полученных при разных температурах, на одном изображении. Аналогично можно попытаться отразить влияние амплитуды заполняющего импульса (полевой эффект) и другие эффекты, однако в целом восприятие, вероятно, удастся обеспечить за счет полисенсорности (полимодальности) воздействия (цвет, звук и т. п.), различных обратных связей и других средств ВР по мере их доступности.

Предлагаемый вариант претендует на использование в качестве основы проекта стандарта представления выходной информации спектрометра глубоких уровней, несмотря на целый ряд присущих ему недостатков. При этом не отрицается, а наоборот, предполагается применение описанных в литературе вариантов в качестве промежуточных и дополнительных для идентификации ГЦ.

Сопоставление рис. 5.8 (в) – (е)) наглядно показывает степень со-

гласия разных авторов относительно поведения золота в кремнии. Аналогичная ситуация характерна и для других примесей в кремнии, в том числе и для упомянутого выше палладия.

В процессе разработки обозначились два направления деятельности. Первое связано с решением задачи создания "виртуальной" передней панели измерительного прибора средствами персонального компьютера [367], дисплей которого является "окном" в практику измерений. Причем заглянуть в это окно можно и в отсутствие подключаемых к компьютеру измерительных блоков, модулей и плат, заменив их эмуляторами. Этого может оказаться достаточно для отработки взаимодействия человека-оператора с автоматизированным информационно-измерительным комплексом.

А если посмотреть на дисплей как на "окно" в теорию методов измерений ? В первую очередь речь идет, конечно, о сложных научноемких методах измерений. В качестве примеров можно назвать РСГУ, эллипсометрию, туннельную спектроскопию и другие информационные технологии. В этом случае речь может идти о создании некоего виртуального образа, который должен комплексно отразить сложную и многомерную модель или комплекс моделей, соответствующих конкретной предметной области.

Если в первом случае задача создания ВР не вызывает особых сомнений, то во втором случае, особенно для формирующихся в теоретическом плане методов и разделов науки, целостное восприятие у разных ученых может быть различным. Однако в любом случае целесообразно инициировать движение в данном направлении. И сделать это, по мнению автора, можно путем разработки с записью на CD ядра открытого (по программным модулям и файлам данных) многоцелевого (по своему назначению) мультимедиа продукта (ММП), предназначенного для решения следующих задач:

1. Инициализация процесса создания рабочего инструмента с функциями справочника-энциклопедии для проведения исследований по фундаментальным и прикладным проблемам спектроскопии глубоких уровней, способного работать в режиме удаленного доступа на базе исследовательских центров коллективного пользования (так называемых виртуальных лабораторий).

2. Интенсификация научно-технического информационного обмена при использовании ММП в качестве специализированного электронного журнала-конференции, как альтернативы научным публикациям в классическом варианте.

3. Разработка интерфейса общения различных коллективов исследователей при выполнении заказных экспериментов и передачи результатов с помощью средств телекоммуникаций.

4. Создание технического средства обучения, по своей сложности адекватного объекту изучения и построенного по принципу "просто о сложном", которое может стать не только средством познания, но и приобщения будущего специалиста к процессу научного поиска. Это техническое средство должно предусматривать как самостоятельное изучение вопросов теории СГУ, так и использование его в качестве технической базы лабораторного практикума под руководством преподавателя

5. Реклама возможностей исследовательских лабораторий, представленных в ММП.

В структуре ММП следует выделить три основных части: теоретическую, исследовательскую и справочно-информационную.

Теоретическая часть систематически, на уровне современных представлений о роли глубоких центров при формировании качества интегральных схем и полупроводниковых приборов, должна излагать основные сведения зонной теории полупроводников, положения

генерационно-рекомбинационной теории Холла-Шокли-Рида и альтернативных подходов, предлагаемые различными научными школами модельные представления релаксации глубоких уровней после стрессовых воздействий различной природы, позволяющие решать практические задачи, связанные с обеспечением качества электронных средств.

Исследовательская часть должна использоваться для закрепления полученных теоретических знаний. В форме псевдовзаимодействия с реальными автоматизированными системами научных исследований необходимо отрабатывать навыки постановки и решения задач идентификации глубоких центров, определения концентрации и профиля распределения глубоких уровней в различных областях полупроводникового прибора и ИС. Предпосылками успешной реализации этой, наиболее сложной, части ММП являются современные методы компьютерной трехмерной анимации в сочетании с промежуточными и конечными результатами процесса исследований, полученными с помощью реальных измерительно-вычислительных комплексов типа описанного выше, а также с фрагментами фото- и видеоматериалов, полученных на натурных съемках и иллюстрирующих процесс получения и использования достижений РСГУ.

Основное назначение справочно-информационной базы — поддержка контекстно-зависимого перечня подсказок и рекомендаций, доступных из любой части ММП. В сопровождающей аудио- и текстовой информации имеется технически обеспеченная возможность использования двух-трех языков с выбором одного из них.

Возможно с точки зрения различных научных школ в условиях становления теории ГУ этот программный продукт окажется спорным по своему построению. Однако его роль и состоит в том, чтобы форсировать продвижение к истине, которая рождается в инициированном и фор-

сированном таким образом научном споре, а открытость по программным модулям и файлам данных обеспечит достижение этой цели.

Предварительная аprobация данной разработки в учебном процессе показала, что эффект "документального фильма" за счет виртуального общения с реальным спектрометром и различными литературными данными существенно выше эффектов "мультифильмов" моделирующих программ, построенных исключительно на расчетных соотношениях, поскольку интерпретируется не только результат, но и сам процесс его получения.

5.4. Выводы

1. Предложен, реализован в виде программы и экспериментально аprobирован двухступенчатый алгоритм адаптации релаксационного спектрометра DLS-82E относительно температуры образца (алгоритм температурной процессорной коррекции частотных сканов DLTS-сигнала). Экспериментально определена область эффективности предложенного алгоритма. Показана возможность адаптации спектрометра по уровням заполнения и опустошения, а также по остаточному разбалансу емкостного измерительного моста.

2. Разработаны и экспериментально аprobированы алгоритм и программа мультискановой параметрической идентификации моделей аппаратных преобразований релаксационного сигнала и физических процессов релаксации. При их использовании достигается повышение точности и устойчивости процедуры оценки параметров за счет увеличения числа одновременно используемых опорных частотных сканов.

3. Предложен подход к формулировке критериев адекватности математических моделей в процессе мультискановой идентификации. Он использует оценку отношения экспериментальных невязок, получен-

ных на разном количестве опорных частотных сканов DLTS-сигнала.

4. Предложен компьютерный вариант интерпретации феноменологических моделей СГУ, наглядно и комплексно отображающий основные параметры глубоких центров средствами виртуальной реальности. Он предназначен для использования в качестве интерфейса баз данных и систем управления технологическими процессами изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также специализированной распределенной информационной системы для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области спектроскопии глубоких центров в полупроводниках.

5. Выполнено теоретическое обоснование и определены на уровне технического задания на разработку структура и основные задачи многоцелевого мультимедиа продукта (ММП) "Виртуальный спектрометр глубоких уровней". ММП предназначен для реализации предложений автора по координации, развитию и внедрению результатов научных исследований в области спектроскопии глубоких уровней в учебный процесс и практику изготовления ИС и электронных средств на их основе. Под руководством и при участии автора сотрудниками регионального центра новых информационных технологий ВлГУ разработана рекламно-демонстрационная версия ММП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в рамках данной работы теоретических и экспериментальных исследований и разработок можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ состояния и тенденций развития методов и процессорных средств параметрического контроля интегральных схем, позволивший определить конкретные пути повышения эффективности указанных методов и средств и сформулировать основные задачи диссертационной работы.

2. Разработана математическая модель многомерного распределения параметров интегральных элементов для систем интегральной диагностики технологических процессов изготовления и предложен алгоритм оценки статистической разрешающей способности процессорных средств параметрического контроля ИС. Указанные модель и алгоритм отражают качественные изменения в развитии средств контроля, обусловленные возможностью накопления и статистического сжатия информации о результатах контроля.

3. Разработаны, апробированы и внедрены в производство:

- программно-аппаратные средства и методика статистической адаптации измерителя квазидинамических параметров ТТЛ ИС в составе пластин;
- автоматизированный программно-аппаратный комплекс статистического регулирования технологического процесса изготовления многофункциональных КМОП ИС.

4. Разработаны трех- и четырехпараметрическая модели аппаратных преобразований релаксационного спектрометра глубоких уровней с частотным сканированием, учитывающие нелинейность аппаратных

средств, неэкспоненциальность релаксационных сигналов и влияние постоянной заполнения ГУ.

5. Предложена математическая модель физических процессов в слое объемного заряда при опустошении глубоких уровней, учитывающая повторный захват носителей на ГУ как одно из проявлений полевого эффекта.

6. Разработан и апробирован новый алгоритм распознавания формы квазиэкспоненциальных релаксационных сигналов для адаптивного релаксационного спектрометра.

7. Определена структура, сформулированы направления оптимизации, разработаны и апробированы отдельные элементы информационной технологии адаптивно-итеративной релаксационной спектроскопии глубоких уровней с частотно-температурным сканированием, обеспечивающей существенное повышение точности измерений параметров глубоких центров.

8. Разработан вариант компьютерной интерпретации параметров глубоких центров в полупроводнике, предназначенный для использования в качестве интерфейса баз данных и систем управления технологическими процессами изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.

9. Выполнено теоретическое обоснование проекта многоцелевого мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней", предназначенного для реализации предложений автора по координации, развитию и внедрению результатов научных исследований в области спектроскопии глубоких уровней в практику изготовления ИС и электронных средств на их основе.

Выполненная разработка делает реальной перспективу разработки новой информационной технологии РСГУ на базе адаптивно-

итеративного частотно-температурного сканирования. Эта технология способна существенно повысить точность определения параметров ГУ и тем самым способствовать развитию модельных представлений о процессах заполнения и опустошения ГУ, их роли в процессах генерации-рекомбинации.

Определены также перспективы разработки обобщенной информационной технологии спектроскопии глубоких уровней с помощью многоцелевого мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней".

Литература

- [1] Абрамов Е.Е., Воронцов В.Н. Прогнозирование надежности операционных усилителей по уровню низкочастотных шумов // Дефектоскопия. – 1995. – N 3. – С. 69–71.
- [2] Абрамов Е.Е. Способ обнаружения нестационарных шумов при оценке качества изделий электронной техники по уровню низкочастотного шума // Дефектоскопия. – 1995. – N 3. – С. 72–74.
- [3] Аброзевич А.С., Булярский С.В., Назаров М.В., Бутылкина Н.А., Рыжиков И.В., Лукьянов А.В. Определение примесных глубоких уровней в полупроводниках с помощью РЭМ // Электрон. пром-сть. – 1990. – N 5. – С. 58–60.
- [4] Аладинский В.К., Гаврилов В.Ю., Горелкина Е.Н. Критическое питающее напряжение как информативный параметр при электрофизическом диагностировании КМОП ИС // Электронная техника. Сер. 2. – 1990. – Вып. 4 (207). – С. 87–90.
- [5] Аладинский В.К. Деградация в изделиях электронной техники при различных внешних воздействиях // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. – С. 31–39.
- [6] Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / Под ред. В.Н. Вапника. – М.: Наука. Главная редакция математической литературы, 1984. – 816 с.

- [7] Алексян И.Т. Особенности проблем надежности микроэлектронных изделий // Электронная техника. 1980. Сер. 8, вып. 6 (84). 1980. – С. 3–8.
- [8] Алексян И.Т., Черняев Н.В. Метод изучения надежности интегральных микросхем. – Микроэлектроника, т. 21, 1992. – вып. 2. – С. 105–111.
- [9] Алиев Р.А., Абдиев Н.М., Шахназаров М.М. Производственные системы с искусственным интеллектом. – М.: Радио и связь, 1990. – 263 с.
- [10] Алиев Т.М. и др. Итерационные методы повышения точности измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с
- [11] Аналоговые и цифровые интегральные схемы / С.В. Якубовский, Н.А. Барканов, Б.П. Кудряшов; Под ред. С.В. Якубовского — М.: Сов. радио, 1979. — 336 с.
- [12] Андрушенко А.Л., Щемелев В.Н., Стручинский Г.Б. и др.(ЛГУ и НПО "Электрон") Способ определения физико-химических характеристик полупроводников: А. с. 1823035 СССР МКИ⁵ Н 01 L 21/26. – № 4787782/25; Заявл. 2.2.90; Опубл. 23.6.93; Бюл. N 23.
- [13] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1964. – 772 с.
- [14] Арендов В.А. Влияние отбраковки неразрушающими методами контроля и электротермотренировкой на надежность элементов // Докл. АН УССР. – 1990. – N 7. – С. 68–71.

- [15] Аристов В.В., Лукъянов А.Е. Локальные методы диагностики в микроэлектронике, Электронная промышленность, 1989, N 2, с. 41–43.
- [16] Арутюнов П.А. Новый взгляд на выражение неопределенности в измерении // Микроэлектроника. – 1994. – 23, N 3. – С. 18–23.
- [17] Арутюнов П.А. Теория и применение алгоритмических измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- [18] Арутюнов П.А. Экспертные системы — электронные консультанты технолога в производстве СБИС (Современное состояние, проблемы, перспективы)//Микроэлектроника, т. 20. – Вып. 4, 1991. – С. 323–336.
- [19] Арутюнов П.А., Кузнецов М.Г. Информационная экспертная система — электронный консультант технолога для поиска прецедента и диагностики технологических сбоев в производстве БИС. // Известия вузов "Электроника", 1996, N 1–2, с. 117–123.
- [20] Астрова Е.В., Лебедев А.А. Новый способ обработки спектров DLTS. – Физ. и техн. полупровод. – 1990 . – 24, N 3. – С. 549 – 556.
- [21] Бадуля В.И., Долотко В.И., Кричевский В.И. и др. Установка для диагностирования полупроводниковых структур и ИМС при воздействии ионизирующего излучения // Электрон. пром-сть. – 1990. – N 1. – С. 26–27.
- [22] Базлов Н.В., Вывенко О.Ф., Истратов А.А. Автоматизированный емкостный спектрометр для исследования глубоких центров в полупроводниках. — Приборы и техника эксперимента. — 1990. — N 6. — С. 159 — 163.

- [23] Базовкин В.М., Половинкин В.Г., Халиуллин Н.И. Быстродействующее устройство для исследования релаксации емкости, поверхностного потенциала и генерационного тока структур металл – диэлектрик – полупроводник. — Приборы и техника эксперимента. — 1989. — N 2. — С. 185 – 188.
- [24] Байда Н.П., Москвина С.М., Снежко В.В. Методы прогнозирования надежности микроэлектронной аппаратуры / Винниц. политехн. ин-т. — Винница: 1989. — 92 с: Деп. в УкрНИИНТИ 07.06.89, N 1550–Ук 89.
- [25] Балтянский С.Ш. Идентификация и оценка погрешности параметра электрической модели центров релаксации в процессе измерительного эксперимента. — Цифр. инф.-измерит. техн. — 1992. — N 21. — С. 32 – 40.
- [26] Балтянский С.Ш., Карпанин О.В., Чернецов К.Н. Измерение параметров поверхностных ловушек в МДП-структур на основе синтеза электрической модели. — Измерительная техника, 1995, N 5, — с. 39 — 43
- [27] Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.
- [28] Белокурова И.Н., Третяк О.В., Шаховцова С.И., Шварц М.М., Шматов А.А. Емкостная спектроскопия глубоких уровней облученных твердых растворов германий–кремний. — Физ. и техн. полупровод. — 1989. — Т. 23, N 10. — С. 1869 – 1873.
- [29] Беляевский В.И., Капустин Ю.А., Свиридов В.В. Интерпретация неравновесных емкостных спектров А-центров, вводимых при

импульсной фотонной обработке кремния. — Физ. и техн. полупровод. — 1992. — 26, N 10. — С. 1832 — 1835.

- [30] Берман Л.С., Клингер П.М., Фистуль В.М. Определение параметров глубоких центров в перекомпенсированном полупроводнике методом температурной зависимости емкости и активной проводимости. — Физ. и техн. полупровод. — 1989. — 23, N 11. — С. 1947 — 1950
- [31] Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. — Л.: Наука, 1981. — 176 с.
- [32] Берман Л.С., Лебедев А.А. Об интерпретации результатов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких центров в полупроводниковых структурах. — Изв. вузов Физика. — 1989. — 32, N 12. — С. 88 — 90.
- [33] Влад П., Ортон Дж.В. Методы измерения электрических свойств полупроводников: Пер. с англ.//Зарубежная радиоэлектроника. 1981.— N 1. С. 3—50; N 2. С. 3—49.
- [34] Боброва Е.А., Галкин Г.Н. О разрешающей способности метода релаксационной емкостной спектроскопии// Препринт N 97 ФИАН, М.: ФИАН, 1990. — 17 с.
- [35] Бондаревский А.С. Развитие операций контроля в радиоэлектронике и вопросы их точности // Радиотехника. — М.: 1995, N 4—5. — С. 164—170.
- [36] Бордюженко В.С., Житник Т.А. Физико-статистическое прогнозирование показателей надежности компонентов РЭА // Межвуз. сб. науч. тр. / Пенз. политехн. ин-т. — 1990. — N 2. — С. 55 — 59.

- [37] Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 496 с.
- [38] Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем: Учеб. пособие для спец. "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники". — М.: Высш. шк., 1989. — 320 с.
- [39] Булгаков С.С., Десятов Д.Б., Еремин С.А., Сысоев В.В. Автоматизированный тестовый контроль производства БИС. — М.: Радио и связь, 1992. — 192 с.
- [40] Быстров Ю.А., Колгин Е.А., Котлецов Б.Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. — М.: Радио и связь, 1988. — 168 с.
- [41] Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике.—М.: Радио и связь, 1990.— 184 с.
- [42] Вавилов В.С., Қекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники: Учеб. руководство. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 192 с.
- [43] Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. — М.: Наука, 1990. — 226 с
- [44] Валеев Э.Я., Зарукин А.И. Устройство для измерения шумовых характеристик микросхем: А.с. 1674020 СССР, МКИ⁵ G 01R 31/28. — N 4604297; Заявл. 11.11.88; Опубл. 30.8.91. — Бюл. N 32.

- [45] Васильев А.В., Смагулова С.А., Шаймееев С.С. К вопросу о методике обработки спектров DLTS. — Физ. и техн. полупровод. — 17, N 1. — С. 162 — 164.
- [46] Веденисов С.Б., Игнатьев А.И. Способ электротермотренировки интегральных микросхем: А.с. 1449950 СССР, МКИ⁴ G 01R 31/28. — N 4165251/24—21; Заявл. 8.107.864 Опубл. 7.1.89; Бюл. N 1.
- [47] Витман Р.Ф., Гусева Н.Б., Лебедев А.А. и др. Взаимосвязь структурно-чувствительных свойств с генетическими особенностями монокристаллов кремния. — Физ. тв. тела (С.-Петербург) — 1994.— Т.36; N 3. — С.697 — 704.
- [48] Власов В.Е., Захаров В.П., Коробов А.И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры /Под ред. А.И.Коробова. — М.: Радио и связь, 1987. — 160 с.
- [49] Власов В.Е., Пищаев В.В., Сапронов В.И., Филатов В.Н. Разработка и реализация принципов системного подхода к технологическому обеспечению качества компонентов МЭА // Электрон. пром-сть. — 1989. — N 12. — С. 12—14.
- [50] Воинов В.В., Кураченко С.С. Способ отбраковки КМОП интегральных схем по уровням надежности: А.с. 1640660 СССР, МКИ⁵ G 01R 31/28 / N 4609917/21. Заявл. 22.9.88; Опубл. 7.4.91; Бюл. N 13.
- [51] Воробьев А.В., Темников Е.С., Якубовский С.В. Состояние и пути развития диагностического контроля ИС: [Докл.] 1-ая Всес. науч.-техн. конф. "Методы и средства диагностирования ИЭТ",

- [Москва], 14–16 нояб. 1989 г.// Электронная промышленность. – 1990. – N 6. – C. 28 – 30.
- [52] Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики микроэлектронных устройств. М.: Наука, 1989. – 159 с.
- [53] Воробьев В.Л. Термодинамические методы анализа надежности микроэлектронных устройств // Надежность и контроль качества. – 1989. – Вып. 6. – С. 10–14.
- [54] Воробьев В.Л., Дубицкий Л.Г. Информативность шумовых методов интегральной дефектометрии изделий микроэлектроники // Техн. диагност. и неразруш. контроль. – 1992. – N 4. – С. 30–36.
- [55] Воробьев М.Д., Кармазин А.В., Коханов Н.Г., Склизнев С.М., Смирнов Л.П. Шумовая спектроскопия глубоких уровней в GaAs полевых транзисторах Шоттки // Электрон. техн., Сер. 1. – 1991. – N 6. – С. 36 – 40, 62.
- [56] Воробьев М.Д., Коханов Н.Г., Склизнев С.М., Смирнов Л.П. Методы барьерной шумовой спектроскопии глубоких центров в полупроводниковых приборах // Материалы докл. научн.-техн. сем. "Шумов. и дегр. процессы в полупр. приборах", метрология, диагностика, технология, пос. Черноголовка, Моск. обл., 25 – 29 ноябр. 1991 г., Москва, 1 – 3 дек. 1992 г. – М.: 1993. – С. 31 – 34.
- [57] Воронков И.Е., Ходкевич А.Д., Ходкевич С.П. Исследование неоднородности лавинного пробоя $p - n$ переходов с помощью производных их вольтамперных характеристик // Электронная техника. – Сер. 1. – 1977. – С. 33–44.

- [58] Воронцов В.Н., Холкин В.Ю. Шумовая термоэлектродинамическая диагностика полупроводниковых приборов // Дефектоскопия. – 1995. – N 3. – С. 69–71.
- [59] Врачев А.С. Низкочастотный шум – свойство диссипативных систем.// Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов науч.-техн. семинара (Москва, 28 ноября – 1 декабря 1994 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1995. – С. 43 – 56.
- [60] Вывенко О.Ф., Базлов Н.В., Целищев С.Л. Об определении энергии ионизации глубоких уровней из данных DLTS. — Физика и техника полупроводников, Т.24, В.12, 1990. — С.2208 — 2210.
- [61] Вывенко О.Ф., Истратов А.А. Оптимизация корреляционной процедуры в методах термостимулированной релаксационной спектроскопии полупроводников. — Физика и техника полупроводников, Т.26, В.10, 1992. — С.1693 — 1700.
- [62] Вышкварко В.Г., Казаликашвили Н.А., Мойнов Р.Г. и др. Автоматизированная диагностика дефектов в системе технологического обеспечения качества // Электрон. техн. Сер. 8. – 1990. – N 4. – С. 15–18.
- [63] Гаврилов В.Ю., Номоконова Н.Н., Покровский Ф.Н. Обнаружение скрытых дефектов в аналоговых интегральных схемах // Надежность и контроль качества. – 1991. – N 3. – С. 28 – 32, 61, 63.

- [64] Гаген И.Е., Гамарц Е.М., Савельев В.П. и др. Отраслевые центры физико-химических исследований и высокоточных измерений и их роль в повышении эффективности исследований и разработок // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. — 1980. — вып. 2 (80) — 3 (81). — С. 35—49.
- [65] Генкин В.Л., Ерош И.Л., Москалев Э.С. Системы распознавания автоматизированных производств. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. — 246 С.
- [66] Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА: Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1983. — 296 с.
- [67] Голубев В.В. Метод оптимизации технологического контроля изделий микроэлектроники на основе экспертно-статистического анализа взаимосвязи видов и механизмов отказов с технологическими операциями.// Электрон. техн. Сер. 8. — 1990. — N 4. — С. 6—12.
- [68] Гонтарь В.М., Султанов М.Г. Комплексный контроль элементов ИС с использованием метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней. — Электронная техника, сер.3. — 1991. — N 5. — С.33 — 36.
- [69] Гонтарь В.М., Султанов М.Г., Хромов С.М. Особенности определения параметров глубоких уровней методами релаксационной спектроскопии глубоких уровней. — Электрон. техн. Сер. 3. — 1991. — N 6. — С. 18 — 22.

- [70] Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. — 248 с.
- [71] Горюнов Н.Н., Винке А.Л., Комаров А.А. и др. Установка емкостной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках ИР 9000. — В сб. тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. конф. "Метрологические проблемы микроэлектроники" (11—13 июня 1991 г., Менделеево Московской обл) — М.: Радио и связь, 1991.—С. 74 — 75.
- [72] ГОСТ 16504—81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 28 с..
- [73] Готра З.Ю., Николаев И.М. Контроль качества и надежность микросхем: Учебник для техникумов. — М.: Радио и связь, 1989. — 168 с.
- [74] Гуляев А.М., Короневский И.М., Кукоев И.Ю. Прогнозирование отказов диодов по шумовым и вольт-фарадным характеристикам // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2—5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 98—100.
- [75] Гуляев А.М., Мирошникова И.Н. Низкочастотные шумы в поликристаллических полупроводниковых пленках (Обзор)// Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докла-

дов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 134–151.

- [76] Гусаров В.В., Шугинин А.В., Соболев Н.А., Костылев В.А. Устройство для исследования глубоких уровней в полупроводниках: А.С. 1704195 СССР, ⁵ Н 01 Л 21/66: СКБ физ.-техн. ин-та им. А.Ф. Иоффе — № 4795198/25, Заявл. 31.10.89; Опубл. 7.1.92, Бюл. № 1.
- [77] Гусев М.Ю., Зюганов А.Н., Свечников С.В. Спектроскопия объемных и поверхностных уровней полупроводников на базе дифференциальной обработки вольт-амперных характеристик. — Обеспечение качества и надежности РЭА и ЭВА. — М.: 1989. — С. 40–49.
- [78] Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. М.: Сов. радио, 1972. — 448 с.
- [79] Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
- [80] Денисов А.А., Лактошкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (по данным отеч. и заруб. печати за 1974—1984 гг.). Обзоры по электр. технике. Сер. 7, Технология, организация производства и оборудование. — Вып. 15 (1141). — М.: ЦНИИ "Электроника", 1985
- [81] Денисов А.А., Дорджин Г.С., Лактошкин В.Н. и др. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (Практическое применение). — М.: ЦНИИ "Электроника", 1986. — 56 с. — (Обзоры по

ЭТ; Сер. Технология, организация производства и оборудование; Вып.8 (1202)).

- [82] Денисов А.Л., Гармаш Ю.В., Клочков А.Я. и др. Применение резонансной релаксации заряда для исследования полупроводниковых структур. — Электронная промышленность, 1984, вып. 2 (130), с. 65–68.
- [83] Дмитриев С.Г., Ждан А.Г., Маркин Ю.В. Идентификация многозарядных объемных уровней при релаксационной спектроскопии границы раздела полупроводник — диэлектрик. — Физ. и техн. полупровод. — 1993. — 27, N 8. — С. 1247— 1255.
- [84] Дорджин Г.С., Лактошкин В.Н. Автоматизированная установка релаксационной спектроскопии глубоких уровней для контроля полупроводниковых структур и приборов. — Электрон. пром-ть. — 1990. — N 10. — С. 36 — 38.
- [85] Дубицкий Л.Г., Воробьев В.Л. Методы контроля качества и надежности с применением физико-технического анализа // Надежность и эффективность в технике: Справочник. — М.: Машиностроение, 1989. — Т. 7: Качество и надежность в производстве. — С. 136 – 152.
- [86] Дубицкий Л.Г. Перспективы использования калибровочных полей и теории катастроф в исследовании физики отказов изделий микроэлектроники // Надежность и контроль качества. — 1989. — N 6. — С. 3–10.
- [87] Дубицкий Л.Г. Радиотехнические методы контроля изделий. М.: Машиностроение, 1963. — 211 с.

- [88] Дубицкий Л.Г., Сердюк Г.Б. Методы и средства интегральной диагностики (задачи управления качеством и надежностью электрорадиоизделий). — Киев: Знание, 1982. — 24 С.
- [89] Дубицкий Л.Г. Физические основы интегральной диагностики // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. — 1980. — Вып. 7 (85). — С. 11 — 34.
- [90] Еремин В.К., Иванов А.М., Строкан Н.Б. Ложные пики в спектрах DLTS планарных диодных структур. — Физ. и техн. полупровод. — 1992. — 26, N 3. — С. 477 — 480.
- [91] Ермолаев Ю.П. Оптимизация гибридных интегральных схем и их элементов на основе специфики интегральной технологии. Докт. диссертация. Казань: КАИ, 1974 г.
- [92] Ждан А.Г., Маркин Ю.В. Эффекты релаксации области пространственного заряда полупроводника при термостимулированной деполяризации МДП структур / Физ. и техн. полупроводн. — 1994. — 28, N 5. — С. 756 — 766.
- [93] Железнов Ф.К. Повышение выхода годных и надежности полупроводниковых приборов и ИС. — Электрон. техн. Сер. 3. — 1992, N 4. — С. 72 — 74.
- [94] Жердев В.А., Крецендер Б.П., Белоконь Р.Н. Контроль устройств на интегральных схемах /Под ред. Б.П. Крецендера. — Киев: Техника, 1986. — 160 с.
- [95] Жигальский Г.П. Неравновесный фликкер-шум в тонких металлических пленках // Шумовые и деградационные процессы в по-

лупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 152–165.

- [96] Жигальский Г.П., Федоров А.С. Оценка параметров технического состояния поликристаллических слоев кремния по эффектам нелинейности // Электрон. техн. Сер. 10. – 1993. – N 3. – С. 56 – 61.
- [97] Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов.—М.: Энергия, 1979.—112 с.
- [98] Завилов В.Н., Константинов А.Г., Померанец М.В. Программирование на языке Паскаль для микроЭВМ "Электроника БК-0010" // Микропроцессорные средства и системы. – 1987, N 1. – С. 37 – 39.
- [99] Захаров Ю.И.; НИИ приборостр. Способ контроля качества микросхем: А. с. 1684755 СССР МКИ⁵ G 01R 31/28. – N 4710073/21; Заявл. 26.6.89; Опубл. 15.10.91; Бюл. N 38.
- [100] Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 263 с
- [101] Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ. / Под ред. Р.А. Суриса. — М.: Мир, 1984.
- [102] Знаменская Т.Д., Малков Я.В., Нуров Ю.Л. и др.(Московский лесотехнический институт) Способ контроля качества интегральных схем: А. с. 1458842 СССР, МКИ⁵ G 01R 31/28. – N 4270000/24-21; Заявл. 9.4.87; Опубл. 15.2.89; Бюл. N 6.

- [103] Иванов В.В., Деменин С.Н., Радзиевский И.А. и др. Методика определения коэффициентов запаса на электрические параметры изделий электронной техники по критериям качества//Надежн. и контроль качества. — 1991. — N 6. — С. 45–48, 62, 63.
- [104] Иванов В.Н. Интеллектуальные средства измерений // Приборы и системы управления. — 1986. — N 2. — С. 21–23.
- [105] Иванов В.Н., Кавалеров Г.И. Теоретические аспекты интеллектуализации измерительных систем // Измерит. техн. — 1991. — N 10. — С. 4–5.
- [106] Измерения и контроль в микроэлектронике / Под ред. Сазонова А.А. — М.: Высшая школа, 1984.—367 с.
- [107] Измерение параметров цифровых интегральных микросхем / Ю.Д. Эйдукас, Б.В. Орлов, Л.М. Попель и др.; Под ред. Ю.Д. Эйдукаса, Б.В. Орлова. — М.: Радио и связь, 1982. — 368 с.
- [108] Исюк В.И. Комплекс программных средств для генерации теста контроля тока потребления КМОП БИС // Электрон. техн. — Сер. 3. — 1992. — N 2–3. — С. 62–64.
- [109] Кавешников Е.А., Малков Я.В., Архипов И.П., Ермолаев Г.М., Знаменская Т.Д., Кумиров В.В. Способ разбраковки полупроводниковых приборов и микросхем: А.с. 1714541 СССР, МКИ⁵ G 01R 31/26. — N 4793368/21; Заявл. 19.2.90; Опубл. 23.2.92: Бюл. N 7.
- [110] Катеринич И.И. Контроль и регулирование надежности МДП БИС по результатам электротермотренировки // Электрон. пром-сть, 1989. — N 12. — С. 6–8.

- [111] Катков А.А., Крылов В.П., Устюжанинов В.Н. Авторское свидетельство СССР 1531523. Тренажер-имитатор установки вакуумного напыления – Выдано 22.08.89 г. / Заявка 4210350 с приоритетом от 16.02.87 г.
- [112] Катковник В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. – Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 336 с.
- [113] Кейджян Г.А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. — М.: Радио и связь, 1987. — 152 с.
- [114] Кейджян Г.А. Основы обеспечения качества микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1991. — 232 с.
- [115] Кендэл М. Ранговые корреляции.—Зарубежные статистические исследования,М.: Статистика, 1975.—216 с.
- [116] Климов Ю.А., Масловский В.М., Холоднов К.В. Долговременная релаксация параметров полупроводниковых структур после воздействия магнитного поля // Электрон. техн. Сер. 3. – 1991. – N 5. – C. 22–26.
- [117] Ковальчук Е.А., Статкевич А.Н., Тарашкевич С.С. Контроль полупроводниковых запоминающих устройств с произвольной выборкой энергодинамическим методом // Надежность и контроль качества. – 1990. – N 8. – C. 30 – 35.
- [118] Колешко В.М., Минченко В.А. Зондовый контроль динамических параметров интегральных микросхем вnano- и пикосекундном диапазонах //Деп. в ВИНИТИ 14.8.90. – N 4601–B90. Ред. жур. Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – Минск, 1990. – 40 с.

- [119] Комаров А.С., Дорошевич К.К. Новый подход к оценке качества разработки и изготовления интегральных микросхем // Электрон. техн. Сер. 3. – 1992. – N 4. – С. 69–70.
- [120] Комаров Б.А., Коршунов Ф.П., Мурин Л.И. Роль полевых эффектов при определении концентрации термодоноров в кремнии методом DLTS. – Физ. и техн. полупровод. – 1994. – 28, N 3. – С. 498 – 505.
- [121] Кононенко С.А., Фесечко В.А., Колычев О.А. и др. Динамический метод теплового неразрушающего контроля изделий электронной техники, основные принципы и средства реализации // Вестн. Киев. политехн. Ин-та. Радиоэлектрон. – 1990. – N 27. – С. 21–27.
- [122] Корытов А.В. Определение распределенного сопротивления базы биполярных транзисторов по измерениям их шумов // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – N 4. – С. 143 – 145.
- [123] Корячко В.П. Конструирование микропроцессорных систем контроля РЭА. – М.: Радио и связь, 1987. — 160 с.
- [124] Костишин В.Г., Летюк Л.М., Ладыгин Е.А., Мусалитин А.М., Лабед Л.И., Бузаков В.И. Радиационно-стимулированные изменения структуры и свойств эпитаксиальных монокристаллических пленок феррит-гранатов $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$.// Известия вузов "Электроника", 1996Б N 1–2, с. 17–24.
- [125] Кривошапко В.М., Левицкий Д.О. Синтез логико-динамических тестов КМОП БИС // Автомат. и телемех. – 1990. – N 9. – С. 118–129.

- [126] Крылов В.П. Методика статистического анализа влияния режимов обработки материалов тонкопленочных интегральных элементов на их эксплуатационные характеристики// Конструктивно-технологические особенности аппаратуры и эксплуатационная надежность материалов в аппаратуре связи. Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф., Ереван: НТО Приборпром им. С.И. Вавилова, 1978. – С. 87 – 88
- [127] Крылов В.П. Методика контроля точности технологических процессов изготовления интегральных микросхем// Тез. докл. 9-й Всесоюzn. науч.-техн. конф. по микроэлектронике. Казань: КАИ, 1980. – С. 97
- [128] Крылов В.П. Использование операционного контроля для оценки точности технологических процессов изготовления интегральных схем// Информационно-измерительные системы и точность в приборостроении. М.: МИЭМ, 1982. – С. 56
- [129] Крылов В.П. Исследование и разработка методики контроля точности технологических процессов крупносерийного производства интегральных схем. Канд. диссертация. Москва: МЭИ, 1983. — 171 с.
- [130] Крылов В.П. Применение теории точности для диагностики технологических процессов микроэлектроники: Известия высших учебных заведений // Радиоэлектроника.—Киев.—1988.—N 7.—С. 43—47
- [131] Крылов В.П. Причинный подход к имитационному моделированию поточно-групповых технологических процессов// Машиностроение.—1989.—N 10.—С. 22—25

ное и математическое моделирование. Тез. докл. всесоюзн. науч.-техн. конф. Воронеж: ВТИ, 1991. – С. 46

- [132] Крылов В.П. Компьютерный анализ сигнальных партий и моделирование технологического процесса изготовления интегральных схем в автоматизированной системе статистического регулирования// Информационные технологии и системы. Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. Воронеж: ВТИ, 1992. – С. 39
- [133] Крылов В.П. Компьютерный анализ сигнальных партий и моделирование технологического процесса сборки интегральных схем в автоматизированной системе статистического регулирования// Информационные технологии и системы. – Воронеж: ВТИ, 1994. – С. 26 – 31.
- [134] Крылов В.П. Методы и средства параметрического контроля интегральных микросхем: Учебное пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 1998. — 52 с.
- [135] Крылов В.П. Определение разрешающей способности процессорных средств входного контроля элементной базы техники связи// Техника средств связи, 1992, вып. 4. – С. 139 – 143.
- [136] Крылов В.П. От адаптивных к интеллектуальным процессорным средствам контроля интегральных схем// Компьютерные технологии в инженерной и управлеченческой деятельности. Сборник трудов. Часть 2. Материалы Всероссийских научно-технических конференций с международным участием. Таганрог: (21 – 24 октября 1997 г.). ТРТУ, 1998. — С. 80.
- [137] Крылов В.П. Релаксационно-статистические процессорные средства контроля качества интегральных схем// Радиационные

процессы в электронике. Тез. докл. 6-го межотрасл. семинара. М.: РАДТЕХ – НИИПМ, 1994. – С. 177.

- [138] Крылов В.П., Егоров М.А. Моделирование аппаратных преобразований и физических процессов в емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 17–20 ноября 1997 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 1998. — С. 108 – 111.
- [139] Крылов В.П., Егоров М.А., Савенко С.А. Испытания спектрометра DLS–82E в составе измерительно-вычислительного комплекса // Конверсия, приборостроение, рынок: Материалы Межд. науч.-техн. конф. – Владимир: Владим. гос. ун-т, 1997. – В 2 частях. Ч. 1. – С. 53 – 58.
- [140] Крылов В.П., Егоров М.А., Савенко С.А. Моделирование и распознавание релаксационных сигналов // Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем / Сб. докл. научн. конф. – Под ред. А.М. Тартаковского, А.В. Блинова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1997. — С. 86.
- [141] Крылов В.П., Егоров М.А., Савенко С.А. Спектрометр DLS–82E под управлением внешнего контроллера // Радиационные процессы в электронике // Сборник выбранных докладов 6-го международного семинара "Радиационные процессы в электронике", М.: МИФИ, 1997. — С. 20 – 27.

- [142] Крылов В.П., Савенко С.А. Исследование и распознавание релаксационных сигналов // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 17–20 ноября 1997 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 1998. — С. 112 – 116.
- [143] Крылов В.П., Устюжанинов В.Н. Компьютерная интерпретация феноменологических моделей спектроскопии глубоких уровней. — Измерительная техника. — 1995, N 3. — С.13 – 15.
- [144] Крылов В.П., Устюжанинов В.Н. Математическая модель селектора релаксационных сигналов. В сб. докладов Междунар. научн.-техн. конф. "Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем." Часть 2. АИН РФ, ПГТУ, Пенза: 1996. — с. 63—64.
- [145] Крылов В.П., Устюжанинов В.Н., Егоров М.А. Моделирование частотного скана релаксационного спектрометра глубоких уровней. В сб. мат-лов Всероссийской научн.-техн. конф. "Конверсия, приборостроение, рынок", г.Владимир, 20—22 июня 1995 г., ВлГТУ, Владимир: 1995.—с. 127—130.
- [146] Ксенофонтов К.И., Маковийчук М.И., Паршин Е.О., Рекшинский В.А. Анализ погрешности зондового метода при измерении электрофлуктуационных параметров полупроводниковых структур // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 105–110.

- [147] Кузнецов Н.И. Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней (I-DLTS). — Физика и техника полупроводников. — 1993. — 27, N 10. — С. 1674 – 1679.
- [148] Кузнецов Н.И. Токовый спектрометр для измерения параметров глубоких центров в полупроводниковых структурах. — Приборы и техника эксперимента. — 1990. — N 6. — С. 163 – 165.
- [149] Кулик И.О., Янсон И.К., Балкашин О.П., Пилипенко Ю.А., Кулик И.И. Способ определения времени релаксации неравновесных возбуждений; А.с. 1581138 СССР, 5 Н 01Л 21/66; Физ.-техн. ин-т низк. температур АН УССР. — N 4428166/25; Заявл. 20.5.88; Опубл. 15.5.91; Бюл. N 18.
- [150] Кунин Ю.И. Автоматизированная система технологической тренировки радиоэлектронной аппаратуры // Радиопромышленность. — 1991. — N 6. — С. 16–19.
- [151] Ладыгин Е.А., Горюнов Н.Н., Голомедов А.В. Физические методы контроля режимов обработки быстрыми электронами и отжига в технологии микроэлектроники: В сб. Научные труды. Физика полупроводников. Межвузовский тематический сборник N 76, М.: МЭИ. — С. 67 – 75.
- [152] Лалэко В.А., Кожевников С.В., Наумов В.Г., Драган И.М., Шавкера В.Л. Автоматизация исследований электрических характеристик полупроводниковых и диэлектрических слоев. — Петрозавод. гос. ун-т. — Петрозаводск, 1992. — 11 с.; ил.— Библиогр.: 5 назв. — Рус. — Деп. в ВИНТИ 13.7.92, 2284–B92.
- [153] Лебедев А.А., Экке В. Определение энергетического спектра плотности поверхностных состояний в МДП структурах с помо-

щью емкостной спектроскопии DLTS при учете взаимодействия с неосновными носителями тока. — Физ. и техн. полупровод. — 1993. — 276 N 1. — С. 76 – 80

- [154] Леонтьев Г.Е. Шумы в p – n переходах и биполярных транзисторах, сформированных на кремниевых пластинках, имеющих свирлиевые дефекты. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. науч.-техн. семинара (Москва, 28 ноября – 1 декабря 1994 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1995, с. 89 – 94.
- [155] Линник В.Д., Стрилец М.М., Титов С.А. Устройство для исследования параметров локализованных состояний в полупроводниковых структурах. — А. с. 1812530 СССР, 5 G 01R 31/26; Воронеж. технол. ин-т. — N 4873426/21; Заявл. 3.9.90; Опубл. 30.4.93; Бюл. N 16.
- [156] Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. — М.: Госстатиздат, 1961. — 388 с.
- [157] Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. Метод профилирования глубоких уровней в полупроводнике МДП-структур, Микроэлектроника, вып. 6, т. 18, 1989. — С.515 – 522.
- [158] Лысенко В.С., Назаров А.В., Турчанинов В.И. Методы термостимулированного возбуждения заряда для исследования элементов интегральных схем // Электрон. пром-сть. — 1989. — N 2. — С. 3–14.

- [159] Маджарова Т.Б. Электротермотренировка, какая тренировка считается достаточной? Экспресс-информация. Надежность и контроль качества. — 1993. — N 2. — С. 17–18.
- [160] Макаренко Л.Ф. Новая модель для объяснения спектроскопических характеристик термодоноров в кремнии. // Физ. и техн. полупровод. — 1994. — 28, N 8. — С. 1434 – 1438.
- [161] Макино Т., Охаси М., Докэ Х., Макино К. Контроль качества с помощью персональных компьютеров: Пер. с яп. А.Б. Орфепова; Под ред. Ю.П. Адлера. — М.: Машиностроение, 1991. — 224 с.
- [162] Маковийчук М.И., Паршин О.Е., Подвальный Л.С. Электрофлуктуационные характеристики ионно-легированных слоев n -кремния // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 101–104.
- [163] Малков Я.В. Деградационные процессы в полупроводниках с позиций общих теорий (термодинамика, теория информации, сингетика, теория катастроф, теория нечетких множеств). Попытка постановки задачи. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. науч.-техн. семинара (Москва, 28 ноября – 1 декабря 1994 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1995, с. 29 – 42.
- [164] Малков Я.В., Злотников В.А., Знаменская Т.Д. Критерии прогнозирования потенциальной ненадежности интегральных мик-

росхем по внезапным и постепенным отказам. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. науч.-техн. семинара (Москва, 27 – 30 ноября 1995 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1996, с. 241 – 246.

- [165] Малков Я.В., Знаменская Т.Д. Методы оценки эффективности прогноза потенциальных отказов ИМС по диагностическим параметрам // 13 Науч.-техн. конф. "Неразруш. физ. методы и средства контроля", Санкт-Петербург, 8–12 сент. 1993 г.: Тез. докл. – СПб: 1993. – С. 41.
- [166] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 630 с.
- [167] Мальнева Е.В., Свентицкий А.А. Технологическое применение электронной Оже-спектроскопии // Обз. по электр. техн. Сер. 7. – ЦНИИ "электроника". – 1990, N 9. – С. 1–59.
- [168] Маняхин Ф.И. Определение параметров локальных заряженных центров в полупроводниках методом температурно-частотного сканирования области пространственного заряда // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 400–405.
- [169] Миленин Г.В. Физико-статистические модели отказов изделий микроэлектроники // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Радиоэлектроника. – 1991. – N 28. – С. 27–30.

- [170] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. — М.: Мир, 1977. — 562 с.
- [171] Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах.— М.: Радио и связь, 1984.—160 с.
- [172] Молотков С.Н. Шумовая спектроскопия поверхностных возбуждений посредством сканирующего туннельного микроскопа // Письма в ЖЭТФ. — 1992. — 56, N 9–10. — С. 480–484.
- [173] Морозов А.В., Якубук Н.И., Завадский В.Ф. и др. Устройство для электротренировки радиоэлектронных изделий: А. с. 1647938 СССР, МКИ⁵ Н 05К 13/00. — N 4649498/21; Заявл. 13.2.89; Опубл. 7.5.91; Бюл. N 17.
- [174] Надежность и диагностика интегральных схем. Ч. 1. Бердичевский Б.Е., Маджарова Т.Б. Долговечность и сохраняемость интегральных схем. Ч. 2. Дубицкий Л.Г. Методы и средства неразрушающего контроля микроэлектронных устройств: Обзоры по электронной технике, Сер. 3, Микроэлектроника. — М.: ЦНИИ "Электроника", 1991. — Вып. 3(1636). — 84 С.
- [175] Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры. // Бердичевский Б.Е., Дубицкий Л.Г., Сушинцев Г.М., Агеев А.П. / Под ред. Б.Е. Бердичевского. М.: Сов. радио, 1976.—296 с.
- [176] Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. — М.: МИКАП, 1994. — 382 с.
- [177] Обеспечение качества РЭА методами диагностики и прогнозирования / Н.С. Данилин, Л.И. Гусев, Ю.И. Загородский и др. Под ред. Н.С. Данилина. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — С. 9–10.

- [178] Обеспечение надежности микросхем / Приходько П.С., Вавилов В.А., Гаврилов В.К., Наговицына Л.Ф., Миллер Ю.Г., Мартынов В.И. // Электронная промышленность. — 1994. — N 1. — С. 32 – 34.
- [179] Овсянников Н.И. Термотоковая тренировка микросхем, герметизированных пластмассой // Электрон. пром-сть. — 1990. — N 1. — С. 8–10.
- [180] Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. — М.: Высшая школа, 1977.—444 с.
- [181] Орешкин П.Т. Рекомбинация через ловушки. — Физика полупровод. и микроэлектроника. — Рязань.: Ряз. гос. радиотехн. акад. — 1995. — С. 5 – 12.
- [182] Орешкин П.Т. Темновая релаксация заряда в ОПЗ барьерных слоев. — Известия вузов СССР (Физика). — 1981, N 9, — с. 136 – 137.
- [183] Орешкин П.Т., Гармаш Ю.В., Перелыгин А.И. К вопросу о релаксационной спектроскопии глубоких центров в полупроводниках. — Физика и техн. полупровод. — 1983. — 17 N 6. — С. 496 – 498.
- [184] Орешкин П.Т., Гармаш Ю.В., Перелыгин А.И. Резонансная релаксация заряда в физических барьерных слоях. — Известия вузов СССР (Физика), 1983, N 11, с. 67 – 72.
- [185] Орешкин П.Т., Зубков М.В., Холомина Т.А., Железнов Ф.К., Кузнецов Ю.М., Клочков А.Я., Трегулов В.В. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниках. — Электрон. техн. Сер.3. — 1992. — N 2 – 3. — С. 3 – 8.

- [186] Орешкин П.Т., Клочков А.Я. Контроль параметров глубоких уровней при отработке технологии ИС. – Электрон. техн. Сер. 3. – 1991, N 5. – С. 30 – 33.
- [187] Орешкин П.Т., Ляшедько А.Л., Туркин Ю.А. Частотная спектроскопия глубоких уровней. – Физика полупровод. и микроэлектроника. Рязань: Ряз. гос. радиотехн. акад. – 1995. – С. 90 – 92.
- [188] Орешкин П.Т., Матушкин С.А., Петров И.М. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (ловушек) для основных и неосновных носителей заряда. – Электрон. техн. Сер. 3. – 1991. – N 2. – С. 7 – 14.
- [189] Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учеб. для вузов по спец. "Полупроводниковые и микроэлектронные приборы", 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1987. — 239 с.
- [190] Панов С.Ф. Диагностика комплектующих РЭА по эффектам нелинейности // Тез. докл. межотрасл. науч.-практ. конф. "Развитие и соврещ. телевиз. техн.", 5 – 6 марта 1991 г./НИИ телевиз. техн. "Электрон". – Львов, 1991. – С. 123.
- [191] Пахомов А.А., Яссиевич И.Н. Влияние границы раздела на захват и эмиссию носителей глубокими центрами. — Физ. и техн. полупров. — 1993. — 27, N 3.— С. 482 – 487.
- [192] Петров В.С., Табачникова Н.А., Фонарева Г.С., Васильевский А.А., Алешина С.А. Применение термодесорбционной спектроскопии для определения термодинамических и кинетических параметров высокотемпературных сверхпроводников ти-

па $YBa_2 Cu_3 O_2$.// Известия вузов Электроника, 1996, N 1–2, с. 25–29.

- [193] Петрова А.Г. Электронная Оже-спектроскопия в диагностике поверхности твердого тела //Метрология. – 1992. –N 2. – С. 3–20.
- [194] Покровский Ф.Н., Номоконова Н.Н. КМОП интегральные схемы: формирование и оценка качества. / Под общ. ред. канд. техн. наук В.Ю. Гаврилова. Моногр. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1996. – 56 с.
- [195] Потапович Ю.Н., Панченко Т.В., Снежной Г.В. Автоматизированная установка для токовой спектроскопии полупроводников и диэлектриков. — Измерительная техника. — 1992. — N 7. — С. 54 — 56.
- [196] Потемкин В.В. 13-я международная конференция по шумам (Паланга, май-июнь, 1995 г.) // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. науч.-техн. семинара (Москва, 27 – 30 ноября 1995 г.).М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1996, с. 5 – 17.
- [197] Приходько В.Г. Спектроскопия объемных локализованных состояний в транзисторных полупроводниковых структурах. — Радиотехника и электроника (Москва), 1994. –396 N 5, с. 851–854.
- [198] Прогнозирование надежности ИС по плотности тока // Электрон. пром-сть. – 1991. – N 4. – С. 46

- [199] Пролейко В.М., Абрамов В.А., Брюнин В.Н. Системы управления качеством изделий микроэлектроники (теория и применение). — М.: Сов. радио, 1976. — 224 с.
- [200] Пузин И.Б., Шерварлы Г.К., Нечкин С.Б. Измерение малых емкостей полупроводниковых приборов с помощью компенсационно-измерительного 2Т-моста. — Приборы и техника эксперимента. — 1992. — N 1. — С. 112 — 114.
- [201] Рабинович В.Б., Ханин С.В. Неразрушающий контроль влагостойкости оксидно-полупроводниковых конденсаторов на основе эффектов нелинейности вольт-амперных характеристик // Дефектоскопия. — 1995. — N 5. — С. 75 — 77.
- [202] Рекомендации по применению ГОСТ 40.9001-88, ГОСТ 40.9002-88, ГОСТ 40.9003-88 // Системы качества: Сборник нормативно-методических документов.— М.: Изд-во стандартов, 1989. — С. 35 — 97.
- [203] Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: Учеб. пособие для втузов / И.М. Макаров, В.З. Рахманкулов, В.М. Назаретов и др.; Под ред. И.М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986. — 159 с.
- [204] Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 6. Техническая имитация интеллекта: Учеб. пособие для втузов / И.М. Макаров, В.З. Рахманкулов, В.М. Назаретов и др.; Под ред. И.М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986. — 144 с.

- [205] Романцов В.П., Долганов М.В. Метод контроля качества интегральных схем, представленных шумовой моделью // Электрон. моделир. — 1991. — 13, N 6. — С. 65–67.
- [206] Романычев Г.Д., Ермолина И.В., Полягалов Е.А., Зуев Ю.Ф., Упшинский Д.В., Фельдман Ю.Д. Анализ источников погрешностей метода временной диэлектрической спектроскопии. — Изм. техн. — 1992. — N 8. — С. 61 — 63.
- [207] Рыжов В. На пути к отчуждению сознания. Компьютер маркет. Прил. к газете "Поиск", вып. 19, авг. 1993. — С. 8.
- [208] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 432 с.
- [209] Сапрыкин В.С., Кузнецов Н.И., Докучаев Н.И., Острецов Б.В. Измерение динамических параметров интегральных схем. — М.: Сов. радио, 1979. — 104 с.
- [210] Свиридов В.В. // Физика и техника полупроводников. — 1987, Т. 21, В. 12. — С. 2172 — 2176.
- [211] Семушкин Г.Б., Темников А.Ф. Неравновесная спектроскопия поверхностных состояний в МДП-структур. — Микроэлектроника (Москва). — 1989. — 18, N 4. — С. 297 — 303.
- [212] Сердюк Г.Б. Интегральная диагностика электро- и радиоизделий / Измерения, контроль, автоматизация. — Вып.3(37). — М.: ЦНИИТЭИПриборостроения, 1981. — С. 36 — 42.
- [213] Сердюк Г.Б. Информационная совместимость методов электрофизического диагностирования ИЭТ по эффектам нелинейности // Электронная промышленность. — 1990. — N 6. — С. 32 — 35.

- [214] Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г., Свистунов А.Я. Моделирование характеристик нелинейности энергопотребления ИМС // Материалы докл. научн.-техн. сем. "Шумов. и дегр. процессы в полупр. приборах", метрология, диагностика, технология, пос. Черноголовка, Моск. обл., 25 – 29 ноябр. 1991 г., Москва, 1 – 3 дек. 1992 г. – М.: 1993. – С. 129 – 134.
- [215] Системы управления гибким автоматизированным производством: Учебное пособие / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной.—К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. — 383 с.
- [216] Современные методы идентификации систем: Пер. с англ./ под ред. П. Эйкхофа. – М.: Мир, 1983. — 400 с.
- [217] Солодовников А.И., Спиваковский А.М. Спектральный подход к построению моделей нечетких сигналов и объектов. – Изв. вузов Приборостроение. – 1994. – 37, N 7 – 8, с. 56 – 60.
- [218] Справочник по высшей математике / Под ред. М.Я. Выгодского — М.: Наука, 1970. — 561 с
- [219] Сретенский В.Н. Метрологические проблемы микроэлектроники // Микроэлектроника. — 1984.—Т. 13, вып. 6.—С. 484—492.
- [220] Сретенский В.Н. Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. —М.: Радио и связь, 1988. — 144 с.
- [221] Станев Ст., Георгиев Ж., Василев В., Гергов Р. Електротермотренировка на полупроводникови памяти и микропроцессорни интегрални схеми// Стандарти и качество. – 1990. – 41, N 3. – С. 23–25, 40–41.

- [222] Стахов А.П. Введение в алгоритмическую теорию измерений. М.: Сов. радио, 1977. — 157 с
- [223] Сыпчук П.П., Талалай А.М. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. — М.: Сов. радио, 1979. — 168 с.
- [224] Тарасова И.Л. Методы оценки качества нелинейных элементов // Препр. / Ин-т пробл. машиновед. РАН. — 1993. — N 97. — С. 46 — 61.
- [225] Тестовый контроль микропроцессорных БИС на производстве / Г.М. Ясинявишнене, Б.В. Бургис, Е.А. Мецаев, И.-А.К. Гребликас. — М.: Радио и связь, 1989. — 120 с.
- [226] Тимашев С.Ф. Принципы фликкер-шумовой спектроскопии // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы до-кл. науч.-техн. семинара (Москва, 28 ноября — 1 декабря 1994 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1995, с. 5 — 19.
- [227] Тимашев С.Ф. Фликкер-шум в электронных системах как нелинейное динамическое явление // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 27–30 ноября 1995 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1996. — С. 26–43.
- [228] Тимашев С.Ф. Фликкер-шум как индикатор "стрелы времени" (Методология анализа временных рядов на основе теории детерминированного хаоса) // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагности-

ка, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МН-ТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 5–30.

- [229] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач, М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 286 с.
- [230] Толковый словарь по вычислительным системам / Под ред. В. Иллингуорта и др.; Пер. с англ. А.К. Белоцкого и др.; Под ред. Е.К. Масловского. — М.: Машиностроение, 1991. — 560 с.
- [231] Точечные дефекты в твердых телах. — М.: Мир, 1979. — 340 с
- [232] Трегулов В.В. Экспериментальный анализ модели рекомбинации носителей заряда в полупроводниках при наличии глубоких ловушек. — Физика полупровод. и микроэлектроника. — Рязань: Ряз. гос. радиотехн. акад. — 1995. — С. 69 — 76.
- [233] Трегулов В.В., Зубков М.В. Полевой эффект при релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках. — В межвуз. сб. научн. тр. "Физика полупроводников и микроэлектроника", Рязань: РГРТА, 1995. — С.77 — 80.
- [234] Тропева И.А., Пенский Н.В. Локальный анализ внутренних границ раздела в интегральных микросхемах методом электронной Оже-спектроскопии //Завод. лаб. — 1992. — 58, N 8. — С. 29—30.
- [235] Управление качеством электронных средств: Учеб. для вузов /Глудкин О.П., Гуров А.И., Коробов А.И. и др. / Под ред. О.П.Глудкина, М.: Высшая школа, 1994. — 414 с.

- [236] Урманов Н.А., Гафурова М.Б. Аномальные (с двумя максимумами) пики в спектрах токовой спектроскопии, связанные с одним типом глубоких состояний. — Физ. и техн. полупровод. — 1993. — 27, N 9. — С. 1535 – 1540.
- [237] Урманов Н.А., Степанова М.Н. Изотермическая и термостимулированная релаксация тока и емкости в слабо асимметричном р – п переходе с неоднородным профилем легирования п- и р- областей. — Физ. и техн. полупровод. — 1993. — 27, N 9. — С. 1495 – 1507.
- [238] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Автоматизированная подсистема обеспечения температуры образца для релаксационного спектрометра глубоких уровней в режиме температурно-частотного сканирования// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ПГТУ, 1995. — С. 75 – 76
- [239] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Адаптивное частотно-температурное сканирование в релаксационной спектроскопии глубоких уровней. // Перспективы повышения надежности и качества наукоемкой продукции на основе новейших достижений приборостроения. Тезисы докладов Юбилейной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 60-летию МГА-ПИ, Москва – Сергиев Посад, 16 – 20 октября 1996 г., М.: МГА-ПИ. – С. 123 – 125.
- [240] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Вероятностно-статистические оценки индивидуального прогнозирования радиационной стойкости микросхем ТТЛ типа// Проблемы создания полупроводниковых приборов, ИМС и РЭА на их основе, стойких к действию

внешних факторов. Тез. докл. 5-го межотрасл. семинара. Петрозаводск: НПО "Ротор", 1991. – С. 78

- [241] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Виртуальная реальность в информационных технологиях спектроскопии глубоких уровней// Перспективные технологии в средствах передачи информации. Материалы междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВлГТУ, 1995. – С. 160 – 163.
- [242] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Исследование влияния локальных дефектов структуры на параметры ИС ТТЛ типа// Тез. докл. 12-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. по микроэлектронике. Тбилиси: 1987. – часть 3, с. 68
- [243] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Контроль квазидинамических параметров интегральных микросхем ТТЛ типа. Сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции: Метрологические проблемы современной микроэлектроники. — Менделеево.: ВНТОРЭС—ВНИИФТРИ, 1991.—С. 28—29.
- [244] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Метод прогнозирования деградационных изменений параметров интегральных схем в условиях действия внешних факторов// Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов. Тез. докл. 2-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. Кишинев: 1986. – С. 75
- [245] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Метод статистической экспресс-калибровки процессорных измерителей параметров электронных приборов. Сб.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции: Актуальные проблемы элек-

тронного приборостроения. — Новосибирск.: ВНТОРЭС, 1990.—С. 125.

- [246] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Особенности разработки программно-аппаратных средств ресурсосберегающего контроля качества интегральных схем// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ПДНТП, 1993. — С. 47 – 48
- [247] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Принципы и особенности реализации автоматизированных систем индивидуального контроля надежности микросхем// Автоматизированные системы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры. Тез. докл. всесоюзн. науч.-техн. конф. Львов: 1990. — С. 87
- [248] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Принципы синтеза и эффективность измерительно-классификационных комплексов// Тез. докл. 4-го межотрасл. семинара-совещания по проблемам создания полупроводниковых приборов и интегральных схем, устойчивых к воздействию внешних факторов. (Винница - окт. 1989) Винница: 1989. — С. 123
- [249] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Принципы синтеза и эффективность цифровых измерительно-классификационных комплексов.// Проблемы создания полупроводниковых приборов, ИС и РЭА на их основе, стойких к воздействию внешних факторов. М.: ЦНТИ "Поиск", часть 1, 1991. — С. 76 – 80.
- [250] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Прогнозирование и отбор надежных ИС ТТЛ типа на входном контроле// Надежность и ка-

чество в приборостроении и радиоэлектронике. Тез. докл. Всесоюзн. симпозиума. Ереван: 1986. – С. 112

- [251] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Проблемно-ориентированный программно-аппаратный комплекс учебной лаборатории контроля качества интегральных схем// Информационные технологии и системы. Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. Воронеж: ВТИ, 1992. – С. 76
- [252] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Проблемы интерпретации феноменологических моделей релаксационной спектроскопии глубоких уровней// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Пенза – Саратов, 1994). Пенза: ПДНТП, 1994, часть. 1. – С. 17 – 18.
- [253] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Проблемы изучения высоких технологий и виртуальные измерительно-вычислительные комплексы// Физика и радиоэлектроника в медицине и биотехнологии: Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВлГТУ, 1996. – С. 130 – 131.
- [254] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Проблемы ресурсосбережения, надежности и качества в технологии микросхем и возможные пути их решения// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ЦП НТО им. С.И. Вавилова, 1992. – С. 136 – 137
- [255] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Прогнозирование надежности интегральных схем в составе устройств приборной автоматики

- ки// Проблемы конверсии, разработка и испытания приборных устройств. М.: НТЦ "Информтехника", 1993. – С. 61 – 65.
- [256] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Радиационная стойкость биполярных БИС ОЗУ к действию импульса ионизирующего излучения// Спец. вопросы атомной науки и техники, М.: НИИП, 1994, вып. 1 – 2, с. 86 – 90
- [257] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Релаксационные процессорные средства диагностики элементной базы электронных устройств// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Пенза – Саратов, 1994). Пенза: ПДНТП, 1994, часть. 1. – С. 56.
- [258] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Состояние и перспективы разработки методов прогнозирования надежности ИС в условиях действия внешних факторов// Состояние и перспективы развития микроэлектронной техники. Тез. докл. 11-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. Минск: 1985. – С. 126
- [259] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Статистические процессорные средства контроля качества интегральных схем// Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Запорожье, 1993). М.: МИЭМ, 1993. – С. 63 – 64
- [260] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П. Статистический процессорный измеритель — инструмент автоматизированного исследования. Сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции: Перспективы развития и применения средств вычислительной техники для мо-

делирования и автоматизированного исследования. — М.: ВН-ТОРЭС, 1991.—С. 189—190.

- [261] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Вахромеев В.Е. Автоматизированная система контроля стойкости цифровых микросхем в составе пластин к действию внешних факторов// Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем. Тез. докл. всесоюзн. науч.-техн. конф. Калуга: 1989. — С. 74
- [262] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Егоров М.А. Частотное сканирование в релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докладов международного научно-технического семинара (Москва, 2–5 декабря 1996 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1997. — С. 408–411.
- [263] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Крячков В.А., Фролова Т.Н. Оптимизация режимов полупроводниковых термисторов на основе синтетического алмаза// Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ПГТУ, 1995. — С. 77
- [264] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Фролова Т.Н. Определение концентраций глубоких центров методом низкотемпературной спектроскопии с частотным сканированием. В сб. мат-лов Всероссийской научн.-техн. конф. "Конверсия, приборостроение, рынок", г.Владimir, 20—22 июня 1995 г., ВлГТУ, Владимир: 1995.—с. 124—127.

- [265] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Фролова Т.Н. Определение концентраций глубоких центров методами релаксационной спектроскопии с частотным сканированием. В сб. научн. тр. ВлГТУ "Автоматизированные информационные системы контроля и управления в технике и медицине", ВлГТУ, Владимир: 1996.— с. 17—21.
- [266] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Харламов Р.В. Компьютерный комплекс контроля качества микросхем методами релаксационной спектроскопии глубоких уровней// Тез. докл. междунар. форума информатизации. Воронеж: ВТИ, 1993. — С. 55 — 56
- [267] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Эльяш С.Л. Программно-аппаратные средства для статистической оценки устойчивости приборных устройств к импульсным ионизирующими излучениям// Проблемы конверсии, разработка и испытания приборных устройств. М.: НТЦ "Информтехника", 1993. — С. 58 — 60.
- [268] Устюжанинов В.Н., Крылов В.П., Эльяш С.Л. Программно-аппаратный комплекс для статистических испытаний интегральных схем на стойкость к импульсным ионизирующими излучениям// Радиационные процессы в электронике. Тез. докл. 6-го межотрасл. семинара. М.: РАДТЕХ — НИИПМ, 1994. — С. 176.
- [269] Физика полупроводников и микроэлектроника // Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 1995. — С. 96.
- [270] Физические аспекты надежности, методы и средства диагностирования интегральных схем: Междунар. науч.-техн. конф. 19—20 мая 1993 г., Тез. докл. / Воронеж. политех. ин-т / Ред. Иевлев В.М. — Воронеж: 1993. — 103 с.

- [271] Физические основы надежности интегральных схем / Под ред. Ю.Г. Миллера. — М.: Сов. радио, 1976. — 320 с.
- [272] Филина Л.И., Маргулис В.А. Термостимулированная проводимость для двух взаимосвязанных уровней прилипания. — Физ. и техн. полупровод. — 1994. — 28, N 8. — С. 1460 — 1467.
- [273] Фомин Я.А., Безродный Б.Ф. Адаптивные системы контроля изделий микроэлектроники на ПЭВМ. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 203 с.
- [274] Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления. — М.: Мир, 1984. — 464 с.
- [275] Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 300 с.
- [276] Харман Г. Современный факторный анализ. — М.: Статистика, 1972. — 486 с.
- [277] Хоффманн Д. Измерительно-вычислительные системы обеспечения качества: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 272 с.
- [278] Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений. — 2-е изд., —Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.—256 с.
- [279] Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства.—Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1989.—224 с.
- [280] Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. — М.: Наука, Физматлит, 1995.—336 с.
- [281] Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. — М.: Наука, 1968.—320 с.

- [282] Чернышев А.А., Арапенков А.П., Эволюция технических средств контроля логических БИС и СБИС // Электрон. пром-сть, 1990, N 4. – С. 61–64.
- [283] Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.
- [284] Обеспечение надежности в условиях субмикронных технологий // Электронная промышленность. — 1992. — N 1. — С. 21–23.
- [285] Чихрай Е.В., Абдуллин Х.А. К вопросу о повышении разрешающей способности метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней. — Физика и техника полупроводников. — 1991, Т.25, В.4. — С.751 — 753.
- [286] Шабалов Д.В., Воробьев А.В. Диагностирование радиокомпонентов методом анализа аномалий переходного процесса тока вшине питания // Электрон. пром-ть. — 1990. —N 7. — С. 60–62.
- [287] Шабанов А.А., Хамидуллин Р.Р. Контактные устройства для контроля изделий микроэлектроники.—М.: Радио и связь, 1985.— 128 с.
- [288] Шапиро Д. Мнимые успехи и реальные достижения. Компьютер маркет. Прил. к газете "Поиск", вып. 19, авг. 1993. — С. 8—9.
- [289] Шик А.Я.// Физика и техника полупроводников. — 1984, Т. 18, В. 10. — С. 1759 — 1762.
- [290] Шматов А.А. К вопросу о корреляционной функции в релаксационной спектроскопии глубоких уровней. — Физика и техника полупроводников. — 1992, Т. 26, В.3. — С.473 — 476.

- [291] Шматов А.А. Обработка спектров релаксационной спектроскопии глубоких уровней методом математического моделирования. — Физика и техника полупроводников. — 1993, Т.27, В.8. — С.1282 — 1285.
- [292] Штраус В.Д. Технология обработки информации при исследовании релаксационных моделей. Релаксационные модели, порожденные дифференциальным оператором дробного порядка с двумя параметрами дробности. — Автоматика и вычислительная техника. — 1995. — N 4. — С. 25 — 35.
- [293] Эффекты возбуждения и релаксации в полупроводниках и диэлектриках: Сб. науч. тр. / Моск. инж.-физ. ин-т (МИФИ) / Ред. Руденко А.И., Мазур Е.А. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 91 с.
- [294] Якимов О.П. Моделирование режимов и оценка качества электронных приборов. — М.: Радио и связь, 1989. — 176 с.
- [295] Яковенко А.В., Кузнецов А.А., Полонский Е.А. Корреляционный метод измерения сигнала в электронной спектроскопии. — Приборы и техн. эксперимента. — 1995. — N 5. — С. 107 — 111.
- [296] A. de Dios, E.Castan, L.Bailon e.a. Interface state density measurement in MOS structures by analysis of the thermally stimulated conductance // Solid—State Electronics. — 1990. — V. 33. — N 8. — P. 987 — 992.
- [297] Ann. Rev. Mater. Sci. — V. 10. — P. 157.
- [298] ASTM F 978 — 90 Standard Test Method for Characterizing Semiconductor Deep Levels by Transient Capacitance Techniques

// Current edition approved June 29, 1990. Originally published as F 978 – 86. Last previous edition F 978 – 86// Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.05, pp. 489 – 496.

- [299] Atanasova E.D., Shorov A.V. Auger electron spectroscopy in vestigations of plasma-nitrided thin thermal SiO_2 and oxide on silicon.// Thin Solid Films, 1991, 202, N 2. – P. 267–282.
- [300] Batovski Dobri, Hardalov Chavdar. Two-dimensinal approach for solving the inverse problem for deep level transient spectroscopy.// J. Appl. Phys. — 1995. — 78, N 3. — C.1808-1811.
- [301] Blood P., Orton J.W. The Electrical Characterisation of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States// Academic Press London, 1992, ISBN 0-12-528627-9.
- [302] Cold Boundary Scan — neue Meßmethode für IC-Tst // Elektronikpraxis. — 1992. — 27, N 14. — P. 26–27.
- [303] Dabek T., Darowski W., Korbel K. Uklad do identyfikacji glebokich pulapek metoda CC-DLTS // Elektronika. — 1989. — V. 30. — N 6. — S. 23 — 26.
- [304] Devries D., Khan A.A. Application of the divisor method to multiple peak DLTS spectra // Electronic Materials. — 1989. — V. 18 — N 6. — P. 763.
- [305] Dmowski K., Lepley B., Lossen E., El Bouabdellati M. A method to correct for leakage current effects in deep level transient spectroscopy measurements on Schottky diodes. // J. Appl. Phys. — 1993. — 74, N 6. — C. 3976 – 3943.

- [306] Dobaczewski L., Kaczor P., Hawkins I.D., Peaker A.R. Laplace transform deep-level transient spectroscopic studies of defects in semiconductors. — J. Appl. Phys. — 1994 — 76, N 1, p. 194 — 198.
- [307] Dong Qi, Zheng Xinyu, Chen Peiyi, Fei Xinbo // Банъдаоти сюэ-бэо. = Chin. J. Semicond. — 1991. — 12, N 57 — C. 257 — 264.
- [308] Dorey A.P., Jones B.K., Richardson A.M., Russell P.C., Xu Y.Z. Reliability testing by precise electrical measurement// Int. Test. Conf.: New Front. Test., Washington, D.C., Sept., 12 — 14, 1988: Proc. — Washington (D.C.), 1988. — C. 369 — 373.
- [309] Dreyer Michael, Duffin Robert (Motorola Inc.) Measuring integrity of semiconductor multi-layer metal structures: Пат. 5049811 США; МКИ⁵ G 01R 15/12. — N 546635; Заявл. 2.7.90; Опубл. 17.9.91; НКИ 324/158Р.
- [310] Engstrom O. and Alm Anders Thermodynamical Analysis of Optimal Recombination Centers in Thyristors // Solid-State Electronics, Vol. 21, 1978, pp. 1571 — 1576.
- [311] Ferenczi George, Pavelka Tibor, Tüttö Peter / Injection level spectroscopy: A novel non-contact contamination analysis technique in silicon // Extend. Abstr. 1991 Int. Conf. Solid State Devices and Mater; Yokohama, Aug. 27—29, 1991. — Tokyo, 1991. — P. 222—224.
- [312] Gill A.A., Iqbal M.Z., Zafar N. Palladium-related deep levels in silicon // Semicond. Scient. Technol. — 1993. — V. 8. — N 15. — P. 675 — 681.

- [313] Goldman E.I., Zhdan A.G. Problems of relaxation spectroscopy of localised electron states // Semicond. Sci. and Technol. — 1990. — 5, N 7.— C. 675 — 685.
- [314] Goto G., Yanagisawa S., Wada O., Takahashi H. — Jap. J. Appl. Phys., 1974, v. 13, p. 1127—1133.
- [315] Graichen Frank / CECC — das europäische Standardisierungs- und Gütebesättigungssystem für Bauelemente der Elektronik // Nachrichtentechn. Elektron. — 1992. — 42, N 6. — S. 246—247.
- [316] Halder N.C., Barnes D.E. Deep levels and DX centres in Al_xGa_{1-x}-As/GaAs. Field effect deep level transient spectroscopy study.// J. Vac. Sci. and Technol. B. — 1992. — 10, N 1. — C. 94 — 102.
- [317] Hashizume Masaki, Tamesada Takeomi // Дэнси дзехо цусин гаккай ромбунси д. 1. = Trans. Inst. Electron., Inform. and Commun. Eng. d. 1. — 1990. — 73, N 7. — P. 621—629.
- [318] Huylebroeck G., Clauws P., Vennik J. — On the determination of the defect parameters of repulsive centers by deep level transient spectroscopy. — Solid - State Electron. — 1990. — 33, N 5. — C. 579 — 583.
- [319] Jacoboni C., Canali C., Ottaviani G., Quaranta A.A. Solid-State Electronics 20, 77, February 1977.
- [320] Jacomino Mineille, Rainard Jean-Luc, David Rene/ Fault detection in CMOS circuits by consumption measurement // IEEE Trans., Instrum. and Meas. — 1989. — 38, N 3. — P. 773—778.
- [321] Janker A., Würmseher H., Holzner G. Integrierte Qualitätssicherung in der Baugruppenfertigung. Teil 2. Strategien

zur "Null-Fehler-Fertigung"// Productronic. — 1992. — 2, N 10. — S. 42—44.

- [322] Jones B.K. Quality and reliability: electrical defects // Int. J. Electron. — 1994. — 77, N 1, — c.35 — 47.
- [323] Ivashchenko A.I., Kopanckaya F.Yu., Solomonov A.I., Tarachenko V.P. / Some complications of the DLTS technique caused by non-exponential relaxation of barrier capacitance // Semicond. Sci. and Technol. — 1993. — 8, N 4. — P. 590 — 598.
- [324] Katayama K., Agarwal A., Radzimski Z.J., Shimura F. Semisitivities of laser/microwave- and conventional-DLTS for defects in CZ silicon // Extend. Abstr. 1992 Int. Conf. Solid State Devices and Mater. "Tsukuba", Aug. 26 — 28, 1992. — Tokyo, 1992. — C. 446 — 448.
- [325] Kirchner, P.D., Schaff, W.J., Maracas, G.N., Eastman, L.F., Chappel, T.I., and Ransom, C.M. The Analysis of Exponential and Nonexponential Transients in Deep-Level Transient Spectroscopy // Journal of Applied Physics, Vol 52, 1981. — PP. 6462—6470.
- [326] Kurz H. Femtosecond spectroscopy of hot carrier relaxation in bulk semiconductirs: 7th Int. Conf. Hot carriers Semicond. (HCI-7) Nara, 1—5 July, 1991 // Semicond. Sci. and Technol. — 1992. — 7, N 3B. — C. B124 — B129.
- [327] Lagowski Jacek, Morawski Andrzej, Edelman Piotr Non-contact, no wafer preparation deep level transient spectroscopy based on surface photovoltaic. // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. — 1992. — 31, N 8B. — C.L1185 — L1187.

- [328] Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. — J. Appl. Phys., 1974, v. 45, No. 7, p. 3023—3032.
- [329] Lang D.V. Space charge spectroscopy in semiconductors. — Thermally stimulated relaxation processes in solids. P.Braunlich Ed. New Jork: Springer, 1979, p. 93—133.
- [330] Lee Kuen-Jone, Breyer Melvin / Design and test rules for CMOS circuits to facilitate IDDQ testing of bridging faults // IEEE Trans. Comput.-Aid. Des. Integr. Circuits and Syst. — 1992. — 11, N 5. — P. 659—670.
- [331] Lemme U. "Boundary Scan" großim Kommen // Elektronik. — 1991. — 40, N 12. — S. 23.
- [332] Levinstein M.E., Rumyantsev S.L. Noise spectroscopy of local levels in semiconductors // Semicond. Sci. and Technol. — 1994. — 9, N 6. — P. 1183—1189.
- [333] Li G. P., Wang K.L. Defect formation chemistry of ELZ center of $E_C - 0,83$ eV in ion-implanted gallium arsenide // J. Appl. Phys. — 1982. — V. 53. — N 12. — P. 8653 — 8662.
- [334] Lin H.-N., Stoner R.J., Maris H.J./ Nondestructive testing of microstructures by picosecond ultrasonics // J. Nondestruct. Eval. — 1990. — 9, N 4. — P. 239—246.
- [335] Maly Wojciech// Current testing // Int. Test. Conf.: Chang. Phil. Test, Washington, D.C., Sept. 10—14,1990. — Proc. — Los Alamos Calif.) etc., 1990. — P. 257.

- [336] Mangelsdorf, P.C., Jr., Convenient Plot for Exponential with Unknown Asymptotes, *Journal of Applied Physics*, Vol 30, 1959. – P. 442.
- [337] Marco S., Samitier J., Lopez-Villegas J.M. On the capacitance control in deep level spectroscopy. // *J. Phys. E*. – 1991. – 2, N 10. – C. 899 – 906.
- [338] Marczewski M., Kowalski M., Strzalkowski I., Bakowski A./ Computer driven system for charge trapping characterization of dielectric layers in MOSFETS// *Phys. for Ind., Ind. for Phys.: Eur. Conf.*, Cracow, 17–19 Sept., 1991: Abstr. – Krakow, 1991. – P. 186–187.
- [339] Matsuura Hideharu, Yoshimoto Masahiro, Matsunami Hiroyuki Discharging current transient spectroscopy for evaluating traps in insulators / *Jap. J. Appl. Phys.*, Pt 2. — 1995. — 34, N 2A. — L.185 – L.187
- [340] Meijer E., Grimmeiss H.G. Transient current measurements for the characterization of deep defects in semiconductors / *Semicond. Sci. and Technol.* — 1992. — 7, N 2. — C. 188 — 197.
- [341] Meilwes N., Spach J.M., Emtsev V.V., Oganesyan G.A. On the nature and structures of different heat treatment centres in n- and p-type silicon. — *Semicond. Sci. and Technol.* — 1994. — 9, N 7. — C. 1346 – 1353.
- [342] Miller G.L., Lang D.V., Kimerling L.C. Capacitance transient spectroscopy. — *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1977, v.7, p. 377—448.

- [343] Miller M.D., Ramirez J.V., Robihson D.A.H. A correlation method for semiconductor transient signal measurments. — J. Appl. Phys., 1975, v. 46, No. 6, p. 2638 — 2644.
- [344] Mooney P.M. Photo- deep level transient spectroscopy: A technique to study deep levels in heavily compensated semiconductors. — J. Appl. Phys., 1983, v. 54, No 1, p. 208 — 213.
- [345] Nowakowski A., Gajklewicz J. Application of thermal models in production measurements of semiconductor devices //Measurement. — 1989. — 7, N 2. — P. 64—67.
- [346] Paima A., Jimenez-Tejada J.A., Bahgueri J., Cartujo P., Carceller J.E. / Accurate determination of majority thermal-capture cross sections of deep impurities in p-n junctions. // J. Appl. Phys. — 1993. — 74, N 4. — C. 2605 — 2611.
- [347] Phillips, W.E. and Lowney, J.R. Analysis of Nonexponential Transient Capacitance in Silicon Diodes Heavily Doped with Platinum, Journal of Applied Physics, Vol 54, 1983, pp. 2786—2791.
- [348] Phillips, W.E., Thurber, W.R., and Lowney, J.R. Improved Analysis Procedures for Deep-Level Measurements by Transient Capacitance // Proceedings // The Electrochemical Society Simposium on Defects in Silicon, San Francisco, CA, May 8-13, 1983.
- [349] Ovens Kevin M., Niehaus Jeffrey A.; Texas Instruments Inc. — Test circuit for screening parts: Пат. 5339028 США, МКИ⁵ G 01R 31/28. — N 7439; Заявл. 22.1.93; Опубл. 16.8.94; НКИ 324/158.1
- [350] Rosencher E. Deep level transient spectroscopy for semiconductor surface and interface analysis. / Semicond. Interfaces: Form. and

Prop: Proc. Workshop, Les Houches, Febr. 24 — March 6, 1987. — Berlin etc., 1987. — C. 273 — 281.

- [351] Roskell Derek / Boundary scan leads to better fault finding // New Electron. — 1988. — Nov., — P. 27—28.
- [352] Richardson A.M., Doney A.P. Supply current monitoring in CMOS circuits for reliability prediction and test // Qual. and Reliab. Eng. Int. — 1992. — 8, N 6. — P. 543—548.
- [353] Sanchez Francisco J., Sandoval Francisco, Garcia-Perez Fernando A compact microcomputer-based deep level transient spectroscopy measurement system // IEEE Trans. Instrum. and Meas. — 1990. — 39, N 3. — C.467 — 472.
- [354] Schneider Birger, Jorgensen Gert, Christensen Mogens Bo. / The effects of backdrive stressing fast IC technologie//Int. Test. Conf.: Test. Impact Des. and Technol., Washington, D.C., Sept. 8—11. — 1986. — Proc. — Washington (D.C.), 1986. — P. 452—464.
- [355] Shaban E.H. Non-exponential capacitance transient in deep level transient spectroscopy (DLTS) measurements. //Solid-State Electron. — 1996. — 39, N 2. — P. 321—322.
- [356] Sheng S. Li, Chiu T.T., Loo R. Y. Effects of low temperatur periodic annealing on the deep-level defects in 200 KeV proton irradiated AlGaAs—GaAs// IEEE Trans. Nucl. Science. — 1981. — V. 28. — N 6. — P. 4113 — 4118.
- [357] Shiraki H., Tokuda Y., Sassa K., Toyama N. — Precise evaluation of deep-level concentrations in capacitance transient analyses. — J. Appl. Phys. — 1994. — 76, N 2. — C. 791 — 795.

- [358] Spanos Costas J. Statistical sgnificance of error-corrupted IC measurements // IEEE Trans. Semicond. Man. – 1989. 2, N 1. – P. 23–28.
- [359] Stoney Tom, Maly Wojciech, Andrews John, Miske Myron / Current test and stuck-at fault comparison on a CMOS chip // Electron. Eng. (Gr. Brit.) – 1991. – 63, N 779. – P.P. 89, 91, 93, 95.
- [360] Su Z., Farmer J.W. Singl scan deep-level transient spectroscopy. — J. Appl. Phys. — 1990 — 68, N 8. — C.4068 — 4070.
- [361] Takahasci Manabu, Morooka Masami, Ueda Fumito, Hashimoto Fumio/ Concentration profiles of deep levels induced by gold diffusion in silicon // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. – 1994 – 33, N 4A. – P. 1713 – 1716.
- [362] Tober Richad L., Li W.Q., Bhattacharya P.K. Differential photocurrent spectroscopy: A novel technique for semiconductor characteization // J. Appl. Phys. – 1992. – 71, N 7. – P. 3506–3509.
- [363] Thurber, W.R., Forman, R.A. and Phillips, W.E. A Novell Method to Detect Nonexponential Transients in Deep Level Transient Spectroscopy, Journal of Applied Physics, Vol 53, 1982, pp. 7397–7400.
- [364] Thurzo I., Pincik E. On the spatial resolution of small-signal DLTS: The need for a quantum model. – Semicond. Sci. and Technol. – 1992. – 7, N 4. – C. 516 – 523.

- [365] Tomokage Hajime, Komibayashi Hidefumi Miyamoto Токио // Фукуока дайгаку когаку сюх = Fukuoka Uniu Rev. Techn. Sci. – 1990. – N 44. – C. 63 – 64.
- [366] Turut Abdulmesit, Saglam Mustafa / Determination of the density of Si-metall interface states and excess capacitance caused by them // Phisica. B. – 1992. – 179, N 4. – C. 285 – 294.
- [367] Wagner Mathias / Virtuelle Frontpatte // Ind.-Anz. – 1995 – 117, N 4. – S. 44–45.
- [368] Vassilev V.Z., Nenkova B.G. Cost effectiveness of bunnin procedures of semiconductor devices and integrated circuits// Microelectron. and Rel. – 1989. – 29, N 3. – P. 453–458.
- [369] Wang C.V., Wu C.H., Boone J.L. A new technique to decompose closely spaced inteface and bulk trap states using temperature dependent pulse - width deep level transient spectroscopy method: An application to Pt/CdS photodetector. // J. Appl. Phys. – 1993. – 73, N 2. – C. 760 – 766.
- [370] Weber Werner/ Dynamic stress experiments for understanding hot-carrier degradation phenomena // IEEE Trans. Electron Devices. – 1988.–35, N 9. – P. 1476–1486.
- [371] Weiss S., Kassing R. Deep level transient fourier spectroscopy (DLTFS) — a technique for the analysis of deep level properties.// Solid — Siaie Electron. — 1988. – 31, N 12. — C.1733 — 1742.
- [372] Wolsky Gerhard B. Elektronik im Prüffeld // Messen und Prüfen. – 1992. – 28, N 4. – S. 24–26.

- [373] Xu Minzhen, Tan Changhua, Wang Yangyuan / Bandaoti xuebao.
= Chin. J. Semicond. — 1992. — 13, N 1. — C. 62 — 65.
- [374] Yamamoto Ichiro, Kuwano Hiroshi, Saito Yoji / Energy distribution
of trapping states at grain boundaries in polycrystalline silicon // J.
Appl. Phys. — 1992. — 71, N 7. — C. 3350 — 3355.
- [375] Yoshida Haruhiko, Niu Hirohiko, Kishino Seigo Isothermal
capacitance transient spectroscopy of electron and hole emissions
from interface states in metall-oxide-semiconductor transistors. / J.
Appl. Phys. — 1993. — 73, N 9.— C. 4457 — 446.
- [376] Yoshida H., Ohmori M., Niu H., Kishino S., Tanaka H., Nakashizu
T. *Si/SiO₂* interface states enhanced by oxidation-induced stacking
faults // Appl. Phys. Lett. — 1992. — 60, No 19. — C.2389—2390.
- [377] Zhang Ankang, Qin Zuxin / Failure mechanism analysis of
semiconductor devices with deep level transient spectroscopy /
Proc. Intern. Conf. Semicond. Integr. Circuit Technol. Beijing,
1986. — Singapore, 1986. — P. 651 — 653.
- [378] Zheng Xiangqin / Micro-computer programmed DLTS
measurement system. // Proc. Intern. Conf. Semicond. Integr.
Circuit Technol., Beijing, 1986. — Singapore, 1986. — P. 758—
760.
- [379] Zilbersztejn A. Trap depth and electron capture cross section
determination by trap refilling experiments in Shottky diodes. —
Appl. Phys., Lett., 1978, v.33, No 2, p. 200—202.

Приложение А

Списки условных обозначений, рисунков и таблиц

Список сокращений и условных обозначений

АСНИ — автоматизированная система научных исследований

ВСГУ — виртуальный спектрометр глубоких уровней (программный продукт)

ГУ — глубокие уровни (с энергией активации $> 0,1$ эВ)

ГЦ — глубокие центры, характеризуемые одним или несколькими ГУ

ИС — интегральная микросхема

ЛВС — локальная вычислительная сеть

ММП — мультимедиа продукт

ПСК — процессорное средство контроля

ППП — полупроводниковые приборы

РД — радиационные дефекты

РПСК — релаксационное процессорное средство контроля

РСГУ (НЕСГУ), DLTS — релаксационная (нестационарная) спектроскопия глубоких уровней

СГУ — спектроскопия глубоких уровней

СОЗ — слой объемного заряда

СОЗ_{РГУ} — часть слоя объемного заряда, в которой при подаче и снятии заполняющего импульса происходит релаксация ГУ

СПСК — статистическое процессорное средство контроля

ТД — дефекты термообработки

ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика

ФСУ — фундаментальная система уравнений физики полупроводни-

ков

ASTM — американская ассоциация материалов и контроля (*The American Society for Testing and Materials*)

B_S, B_S — чувствительность емкостного моста, пФ

C_0, C_0 — емкость магазина-компенсатора, пФ (меняется дискретно и совместно с C_M уравновешивает емкостной мост спектрометра)

C_M, C_M — компенсирующая емкость, пФ (меняется непрерывно и может быть подключена либо параллельно C_0 , либо последовательно с ней)

$\text{cov}(x, x)$ — ковариация случайных величин x и x

C_{p-n} — емкость обратно смешенного $p - n$ перехода

D_n — коэффициент диффузии электронов

D_p — коэффициент диффузии дырок

E — напряженность электрического поля

F_0 — частота опорного сигнала селектора

F_{max} — максимальное значение частоты опорного сигнала селектора

G_n — темп генерации электронов в единице объема в единицу времени

G_p — темп генерации дырок в единице объема в единицу времени

IT, I_T — постоянная интегрирования, с

k — постоянная Больцмана

m — номер "временного окна" (строба)

n_i — собственная концентрация свободных носителей

n — концентрация электронов

n_p — концентрация электронов в дырочном полупроводнике

n_{p0} — термодинамически равновесное значение концентрации электронов в дырочном полупроводнике

p — концентрация дырок

p_n — концентрация дырок в электронном полупроводнике

p_{n0} — термодинамически равновесное значение концентрации дырок в

электронном полупроводнике

q — заряд электрона (дырки)

r — коэффициент парной линейной корреляции

r_S — коэффициент ранговой парной корреляции по Спирмэну

T — абсолютная температура образца, К

T_0 — период опорного сигнала селектора

t_1, t_1 — длительность импульса 1 заполнения ГУ, мкс

t_2, t_2 — длительность импульса 2 заполнения ГУ, мкс

td, t_d — задержка импульса 2 относительно импульса 1, мкс

U_1, U_1 — уровень заполняющего импульса 1, В

U_2, U_2 — уровень заполняющего импульса 2, В

UC, U_C — среднее значение выходного напряжения емкостного моста, В (после фазового детектора)

U_n — скорость рекомбинации электронов в дырочном полупроводнике

U_p — скорость рекомбинации дырок в электронном полупроводнике

UR, U_R — уровень обратного смещения, В

V_k — контактная разность потенциалов

v_s — скорость насыщения

Δx — отклонение параметра изделия от среднего значения

Δ — технологическая погрешность параметра изделия

Δ — измерительная погрешность параметра изделия

Δt — временное разрешение анализатора TR-4910

ϱ — плотность объемного заряда

ϱ_v — удельное объемное сопротивление

μ_n — подвижность электрона

μ_p — подвижность дырки

$\mu_S(x)$ — степень принадлежности величины x к множеству S

$\tau_{зап}$ — постоянная заполнения ГУ

τ_M — постоянная диэлектрической релаксации (Максвелла)

τ_n — время жизни электронов в дырочном полупроводнике

τ_p — время жизни дырок в электронном полупроводнике

$\sigma, \sigma_n, \sigma_p$ — сечение захвата носителей тока

$\sigma_{\text{И}}$ — среднеквадратическое отклонение измерительной погрешности

σ_{T} — среднеквадратическое отклонение технологической погрешности

Список иллюстраций

1.1	Классификация методов контроля ИС (начало)	19
1.2	Классификация методов контроля ИС (окончание)	20
1.3	Структурная схема установки для РСГУ Технического Университета Берлина	49
1.4	Варианты классификации автоматизированных средств контроля ИС	69
2.1	Структура полного графа погрешностей	90
2.2	Структуры полного и приведенного графов погрешностей	90
3.1	Временные диаграммы спектрометра DLS-82E	104
3.2	Структурная схема АСНИ РСГУ	108
3.3	Временные диаграммы драйвера ИВК при фиксированном значении опорной частоты селектора релаксационных сигналов	110
3.4	Форма релаксационного сигнала эталонного образца до и после цифрового интегрирования	112
3.5	Стробограммы эталонного диода и КД-521Б	112
3.6	Поправка расчетной частоты опорного сигнала	118
3.7	Семейство частотных сканов эталонного образца, полученных при разных температурах	119
3.8	Семейство частотных сканов диода КД-521Б, полученных при разных температурах	121
3.9	Зависимость частотного скана эталонного образца от запирающего напряжения заполнения ГУ	123

3.10 Зависимость частотного скана эталонного образца от запирающего напряжения опустошения ГУ	124
3.11 Зависимость частотного скана эталонного образца от отпирающего напряжения заполнения ГУ при большом запирающем напряжении	125
3.12 Зависимость частотного скана эталонного образца от отпирающего напряжения заполнения ГУ при малом запирающем напряжении	126
3.13 Зависимость частотного скана эталонного образца от длительности заполняющего импульса	127
3.14 Зависимость частотного скана КД-521Б от длительности заполняющего импульса	128
3.15 Интерактивная обработка частотных сканов основного и вспомогательных сигналов	130
3.16 Искажения частотного скана вследствие сбоев фазового детектора и регулятора температуры	132
3.17 Зависимость нелинейности модели от величины релаксационного сигнала	142
3.18 Обработка с помощью DLSOSMP.EXE	162
3.19 Определение параметров ГУ с помощью DLSOSGU1.EXE	171
4.1 К выводу уравнения непрерывности	185
4.2 Влияние повторного захвата на процессы релаксации ГУ	198
4.3 Релаксационные сигналы после предварительной обработки	208
4.4 Образы релаксационных сигналов	208
4.5 Влияние уровня шумов на образы релаксационных сигналов	219

4.6 Регуляризация и аппроксимация образов	222
4.7 Влияние повторного захвата носителей на образы релаксационных сигналов	223
4.8 Нелинейные искажения экспоненциального релаксационного сигнала	225
4.9 Влияние интервалов молчания на образы релаксационных сигналов	225
4.10 Воспроизводимость параметров образов экспериментальных стробограмм релаксационного сигнала диода КД-521Б	226
5.1 Коррекция измеренных значений температуры образца с помощью кусочно-непрерывной полиномиальной аппроксимации	241
5.2 Эффективность температурной процессорной коррекции частотных сканов DLTS-сигнала	242
5.3 Этапы мультискановой идентификации четырехпараметрической модели аппаратных преобразований по результатам экспериментов e0022 (а) и e0021 (б)	247
5.4 Кривые Аррениуса для глубоких уровней в GaAs	251
5.5 Спектр радиационных дефектов в кремнии, легированном золотом	252
5.6 Спектр электронных ловушек в монокристаллическом образце арсенида галлия, полученный методом емкостной РСГУ	254
5.7 Расчетные спектры DLTS в GaAs электронных (отрицательные пики) и дырочных (положительные пики) ловушек	255

5.8 Спектрограммы глубоких уровней, связываемых с палладием в кремнии (а), радиационной обработкой кремния (б) и золотом в кремнии ((в) - (е))	259
B1 Криостат с охлаждением жидким азотом	338
B2 Криостат с охлаждением термоэлектрохолодильником на эффекте Пельтье	339

Список таблиц

2.1	Оценка случайности, стационарности и соответствия нормальному закону	94
3.1	Влияние режимов измерений на параметры ГУ	173
4.1	Инвариантность коэффициентов чебышевской полиномиальной аппроксимации образа сигнала релаксации заряда относительно числа дискрет	224
5.1	Моно- и мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований (без дублирования сканов)	244
5.2	Мультискановая идентификация четырехпараметрической модели аппаратных преобразований (с дублированием сканов)	246
C1	Календарный план	347

Приложение В

Основные технические характеристики программно-аппаратного комплекса АСНИ РСГУ

Характеристики спектрометра DLS—82E

Общие характеристики

Максимальная чувствительность $C = 2 \times 10^{-5}$ пФ при отношении "сигнал/шум" = 1, что соответствует концентрации ловушек $10^{-7} \times (N_D - N_A) < N_T < 10^{-5} \times (N_D - N_A)$

Режимы работы:

"ПРОВЕРКА" (функций и калибровки)

"С" (для $C - V$, $C - T$ и $G - T$ – измерений)

"ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ РСГУ"

"ПРОФИЛЬ" (распределение по глубине)

"ОС ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ" (в режимах "С", "ДИФФ. РСГУ" и "ПРОФИЛЬ")

Входы:

"ЕМКОСТЬ ОБРАЗЦА": "высокий" и "низкий" потенциалы

"КОМПЕНСИРУЮЩАЯ ЕМКОСТЬ": "высокий" и "низкий" потенциалы

Выходы:

"ВЫХОД ЕМКОСТИ" или "ВЫХОД U_T " в режиме "ОС ... "

"ВЫХОД ПРОВОДИМОСТИ"

" U_1 " — уровень первого импульса

" U_2 " — уровень второго импульса

" UR " — величина обратного смещения

"УПРАВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ"

"ВЫХОД ТРИГГЕРА ЗАПУСКА"

"ВЫХОД РСГУ"

"УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИМ КОМПЕНСАТОРОМ ЕМКОСТИ"

Потребляемая мощность от сети 50/60 Гц 220 В — 80 ВА

Масса — не более 10 кг

Измеритель емкости

Контрольный сигнал: 1 МГц, 100 мВ, кварцевая стабилизация

Диапазоны емкости: 1, 10, 100, 1000 пФ

Диапазоны проводимости: 10 мкСм, 100 мкСм, 1 мСм, 10 мСм

Дифференциальные измерения: Максимальная емкость на клеммах может на 2 порядка превышать выбранный предел в диапазонах "1 пФ" и "10 пФ"; предельно измеримая емкость — 1000 пФ

Время восстановления: не более 5 мкс

Выходное напряжение: 10 В на всю шкалу каждого диапазона

Синхродетектор

Чувствительность: 1 мВ — 1 В (градация диапазонов: 1–2–5)

Частота повторения: 0,25 Гц — 2,5 кГц (что соответствует $0,5c^{-1} < e_n < 5 \times 10^3 c^{-1}$) полоса разделена на 4 плавных поддиапазона

Время интегрирования: 300 мс — 30 с (градация: 1-3-10), 12 дБ в каждом диапазоне

Выходное напряжение: 10 В на всю шкалу каждого диапазона

Установка сдвига нуля: 10-кратная от всей шкалы каждого диапазона чувствительности

Стабильность фазового угла: не хуже 0,05°

Генератор двойных импульсов

Длительность импульсов: 100 нс – 50 мс; полоса разделена на 6 плавных поддиапазонов

Время задержки: 100 нс – 50 мс

Время нарастания и спада импульсов: 25 нс

Амплитуда импульсов: от –20 В до +20 В с независимой настройкой по каждому каналу

Автоматический компенсатор емкости и магазин емкостей

КПЕ: диапазон от 5 пФ до 120 пФ

Магазин емкостей: диапазон от 1 пФ до 1221 пФ с шаговым выбором значений 1-2-3-5, 10-20-30-50, 100-200-300-500

Переключатель выбора: параллельный или последовательный

Входы: "ПРИВОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА"

Выходы: "ВЫХОД КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТИ": "высокий" и "низкий" потенциалы

Интерфейсный блок

Измерительный узел: 3-разрядный цифровой вольтметр с выборкой и хранением показаний емкости (пФ), проводимости (См), температуры (К), UR (В), $U1$ (В), $U2$ (В), выхода РСГУ (В).

Управление температурой : нагреватель постоянного тока со скоростями нагрева 0,1 – 1 К/с

Диапазон температур: 77 – 450 К

Точность поддержания температуры: ± 1 К по всему диапазону

Линеаризатор температуры: для хромель-алюмелевой термопары

Азотный криостат с погружением образца

Датчик температуры: хромель-алюмелевая термопара

Диапазон температур: 77 К – 450 К

Нагреватель: резистивного типа, от постоянного тока

Измерительные головки: для образцов, помещенных в корпуса "ТО-18" или "ТО-5", или для пластин площадью менее 1²

На рис. В1 приведена конструкция "штатного" криостата спектрометра DLS-82E, охлаждаемого жидким азотом с использованием медного теплопровода, погруженного в хладоагент. Такая конструкция обеспечивает при температуре окружающей среды +293 К температуру образца от 100 К до 323 К. Термопровод имеет форму, обеспечивающую неравномерное, близкое к ступенчатому, изменение температуры криостата по мере испарения жидкого азота.

Конструкция, изображенная на рис. В2, обеспечивает охлаждение криостата с помощью термоэлектрического модуля на эффекте Пельтье. Холодопроизводительность модуля порядка 20 Вт позволяет охлаждать криостат на 40 К относительно температуры лаборатории. Достоинством этого способа охлаждения являются экономичность (не требует хладоагента) и возможность сравнительного точного поддержания заданной температуры в указанных пределах с помощью регулирования тока термоэлектрического модуля и мощности, подводимой к встроенному нагревателю криостата.

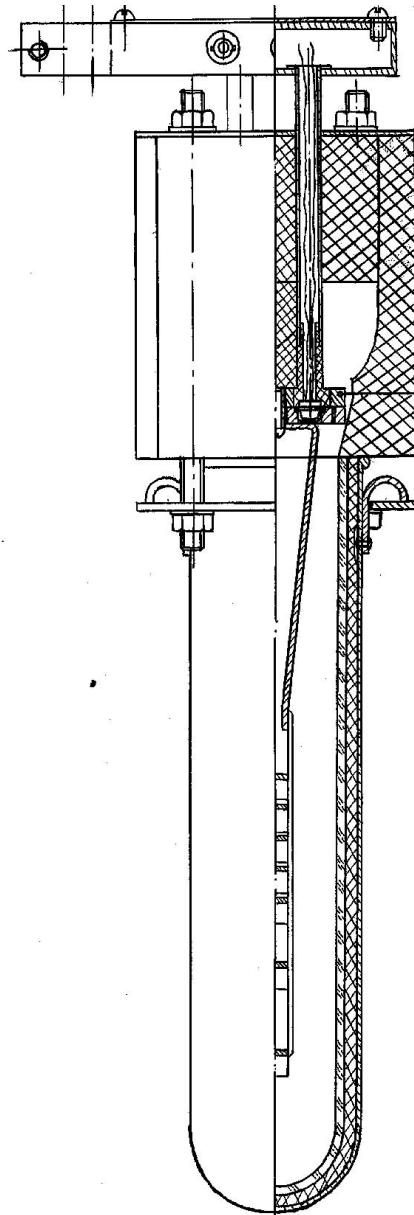


Рис. В1. Криостат с охлаждением жидким азотом

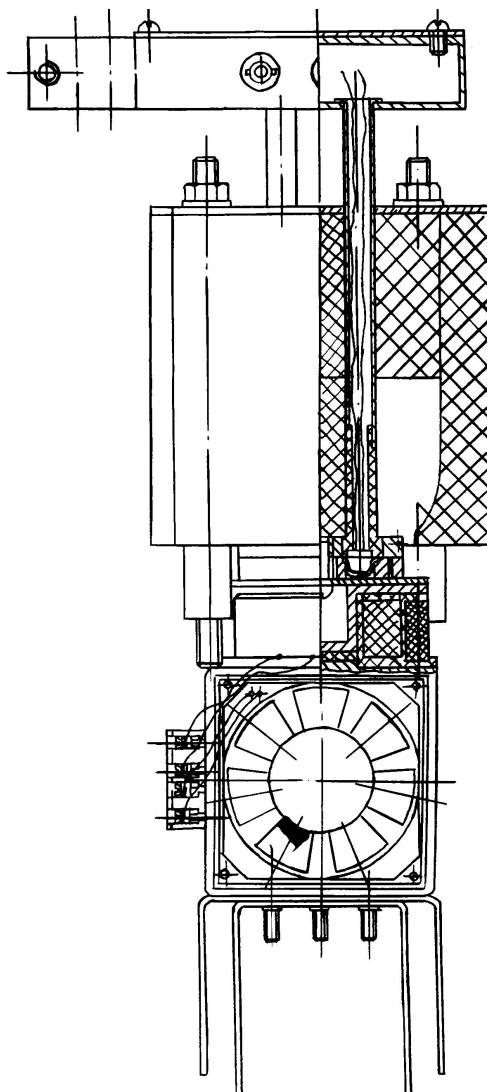


Рис. В2. Криостат с охлаждением термоэлектрохолодильником на эффекте Пельтье

Приложение С

Техническое задание на разработку мультимедиа продукта "Виртуальный спектрометр глубоких уровней" (ММП ВСГУ)

1. Цель работ:

Целью работ является создание обучающего мультимедиа продукта по теме "Релаксационная спектроскопия глубоких центров" (РСГЦ) дисциплин "Физика твердого тела", "Физика полупроводниковых приборов", "Физические основы надежности интегральных схем". В основу продукта положены оригинальные разработки Исполнителя, выполненные с помощью автоматизированной системы научных исследований на базе спектрометра DLS-82E фирмы SEMITRAP, Венгрия, а также научно-технические публикации отечественных и зарубежных авторов по указанной тематике.

1.1. Описание мультимедиа продукта (ММП).

ММП должен содержать три основных части:

- * теоретическую часть;
- * исследовательскую часть;
- * справочно-информационную базу.

Теоретическая часть должна систематически, на уровне современных представлений о роли глубоких центров при формировании качества интегральных схем и полупроводниковых приборов, излагать основные сведения зонной теории полупроводников, положения генерационно-рекомбинационной теории Холла-Шокли-Рида, модельные представления релаксации глубоких уровней после стрессовых воздействий различной природы, позволяющие решать практичес-

ские задачи, связанные с обеспечением качества электронных средств.

Исследовательская часть должна использоваться для закрепления полученных теоретических знаний. В форме псевдовзаимодействия с реальной автоматизированной системой научных исследований должны быть отработаны навыки постановки и решения задач идентификации глубоких центров, определения концентрации и профиля распределения глубоких уровней в различных областях полупроводникового прибора, работы с базой данных о характеристиках глубоких центров в кремнии и других полупроводниковых материалах. Исследовательская часть должна использовать современные методы трехмерной анимации, основанные на оригинальном варианте компьютерной интерпретации феноменологических моделей релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), в сочетании с промежуточными и конечными результатами процесса исследований, полученными с помощью реального измерителя, сопряженного с компьютером, а также с фрагментами видеоматериалов, полученных на натурных съемках и иллюстрирующих процесс получения и использования достижений РСГУ.

Справочно-информационная база должна давать контекстно-зависимый перечень подсказок и рекомендаций, доступный из любой части продукта.

В рамках проекта предусмотреть исследование возможностей использования разрабатываемого ММП в качестве технического средства, позволяющего работать на базовом измерительно-вычислительном комплексе Исполнителя в режиме удаленного доступа с помощью средств телекоммуникаций системы РЦ НИТ.

1.2. Область применения

ММП предназначен для применения при изучении темы "Релаксационная спектроскопия глубоких уровней", использующей феноменологические представления зонной теории полупроводников и

генерационно-рекомбинационной теории Холла-Шокли-Рида, а также модельные представления релаксации ловушек на глубоких уровнях при разных температурах. Лабораторный практикум по данной теме предполагает использование достаточно сложного прецизионного и дорогостоящего оборудования с относительно низкой производительностью.

Использование продукта позволит значительно сократить сроки выполнения учебно-лабораторных исследований и повысить качество усвоения учебного материала при существенном снижении стоимости постановки лабораторного практикума.

Рекомендуется при подготовке бакалавров по направлению 551100 "Проектирование и технология электронной аппаратуры", магистров по специальности 200800 "Проектирование и технология радиоэлектронных средств", послевузовского и дополнительного профессионального образования по указанным направлению и специальности. Может быть полезен студентам, аспирантам и инженерам других специальностей, интересующимся современными научноемкими технологиями микроэлектроники.

2. Технические требования

2.1. Технические требования к прототипу ММП

Прототип должен быть программой для Windows 3.1 с графическим пользовательским интерфейсом.

Прототип должен содержать:

* заставку;

* главный интерфейс;

* одну - две реализованные сцены, которые наиболее полно характеризуют продукт.

Все файлы прототипа ММП и его установочной программы должны быть по своим названиям и структуре каталогов пригодны для записи

на CD-ROM.

2.2. Технические требования к установочной программе прототипа ММП.

Установочная программа прототипа мультимедиа продукта должна быть Windows - программой, иметь графический пользовательский интерфейс и выполнять следующие функции:

- * проверять конфигурацию программных и аппаратных средств на соответствие требованиям прототипа ММП;
- * запрашивать имя каталога, создаваемого для установки прототипа ММП на жестком диске компьютера;
- * копировать файлы, необходимые для работы прототипа ММП на жесткий диск компьютера, в том числе созданный на предыдущем шаге каталог и системные каталоги Windows;
- * создавать в Program Manager (Менеджере программ) или функционально аналогичной программе программную группу с пиктограммами, необходимыми для запуска прототипа ММП;
- * указать на необходимость установки драйверов, лицензированных у других фирм (Quick Time Runtime), перечислив все необходимые драйверы;
- * указать на необходимость установки используемых ММП шрифтов, перечислив все необходимые шрифты.

2.3. Технические требования к установочной программе ММП

Установочная программа мастер - версии мультимедиа продукта должна быть Windows - программой, иметь графический пользовательский интерфейс и выполнять следующие функции:

- * проверять конфигурацию программных и аппаратных средств на соответствие требованиям данного ММП (см. технические требования к ММП);
- * запрашивать имя каталога, создаваемого для установки програм-

мы на жестком диске компьютера;

* копировать файлы, необходимые для работы ММП на жесткий диск компьютера, в том числе созданный на предыдущем шаге каталог и системные каталоги Windows;

* проверять при копировании файлов, особенно в системные каталоги Windows, даты создания и версии заменяемых файлов и запрашивать подтверждения пользователя на замену старых версий файлов;

* создавать в Program Manager (Менеджере программ) или функционально аналогичной программе программную группу с пиктограммами, необходимыми для запуска прототипа ММП;

* при варианте установки с запуском программы ММП непосредственно с CD-ROM копировать на жесткий диск файл с пиктограммой продукта, используемой в Program Manager (Менеджере программ) или функционально аналогичной программе;

* установить драйверы, лицензированных у других фирм (Quick Time Runtime), путем запуска их собственных программ установки;

* проверить наличие и при необходимости установить используемые ММП шрифты;

* в ходе работы отображать графически долю выполненной и оставшейся работы по установке ММП.

2.4. Технические требования к ММП

ММП должен представлять собой программу для Microsoft Windows 3.1. с графическим пользовательским интерфейсом.

ММП должен работать на следующей минимальной конфигурации аппаратных средств:

* процессор 386DX с тактовой частотой 33 МГц;

* оперативная память 4 МБ;

* двухскоростной CD-ROM;

* звуковая плата с 8-битными монофоническими ЦАП/АЦП и син-

тезатором MIDI - музыки базового (в смысле определения Microsoft) уровня;

- * мышь или функционально аналогичный манипулятор;
- * разрешение графической системы компьютера не хуже чем 640x480 точек при не менее, чем 256 цветов;
- * 5 мегабайт свободного пространства на жестком диске.

ММП в ходе запуска должен тестировать наличие необходимых для его работы устройств и программного обеспечения и выдавать необходимую диагностику.

ММП должен обеспечивать появление визуальной или звуковой реакции на любое действие пользователя в течение не более 0,5 с.

Все файлы ММП и его установочной программы должны быть по своим названиям и структуре каталогов пригодны для записи на CD-ROM.

2.5. Технические требования к полиграфическим материалам ММП

Для ММП должны разрабатываться следующие полиграфические материалы:

- * Буклет, вкладываемый в упаковку CD-ROM из прозрачного пластика (jewel case). Первая страница буклета одновременно является заставкой ММП, видимой через лицевую часть прозрачной упаковки.
- * "Задник" - листочек, вкладываемый в прозрачную упаковку и видимый через обратную и две боковые стороны упаковки.
- * Рисунок на CD-ROM, наносимый на сам диск методом шелкографии.

Буклет должен содержать инструкцию по установке ММП, инструкцию пользователя и пользовательскую лицензию.

3. Этапы работ

Настоящая работа включает в себя две основные стадии:

- * подготовку материала;

* производство мультимедиа продукта.

Работа заканчивается передачей Заказчику мастер-версии ММП.

Работы выполняются в три календарных этапа (см. таблицу):

4. Порядок сдачи-приемки работ.

4.1. Порядок сдачи-приемки прототипа ММП

Прототип продукта должен представляться только вместе с установочной программой и рекламной листовкой.

Прототип продукта должен представляться на жестком диске, рассчитанном на подключение к контроллеру SCSI.

После запуска установочной программы и выполнения всех требуемых этой программой действий представитель Исполнителя должен продемонстрировать работоспособность прототипа.

4.2. Порядок сдачи-приемки рабочих материалов

Рабочие материалы и база данных должны приниматься только вместе с описывающей их базой данных. База данных должна быть представлена в формате Microsoft Excel.

Рабочие материалы и база данных должны представляться на жестком диске, рассчитанном на подключение к контроллеру SCSI.

Представитель Исполнителя должен установить базу данных и рабочие материалы на компьютер Заказчика и продемонстрировать Заказчику базу данных и несколько файлов рабочих материалов по выбору Заказчика.

4.3. Порядок сдачи-приемки ММП

ММП должен представляться вместе с установочной программой и полиграфическими материалами. ММП и установочная программа предоставляются на диске CD-R.

Полиграфические материалы представляются в виде одного экземпляра цветных пробных оттисков и компьютерных файлов в формате пакета Corel Draw версия 4.0 на дискетах формата 3,5 дюйма.

Таблица С1. Календарный план

Номер этапа	Выполняемые работы	Сроки выполнения	Предоставляемые отчетные материалы
1.	Подготовка литературного сценария. Подготовка прототипа ММП, рекламной листовки, установочной программы.	02.01 - 31.03	Литературный. Пр установочная. Пр листовки
2.	Подготовка компонентного сценария. Сбор и структуризация рабочих материалов.	01.04. - 30.06	Компонентный. Ра
3.	Подготовка рабочего сценария. Разработка альфа-, бета- и мастер-версии ММП.	01.07. - 30.11	Рабочий

Приложение D

Внедрение результатов в учебный процесс

Приложение Е

Апробация и внедрение результатов в производство и научные разработки

Акт о внедрении результатов диссертации на предприятии "Экситон".

Акт о внедрении результатов диссертации в НИИ прикладной механики.