

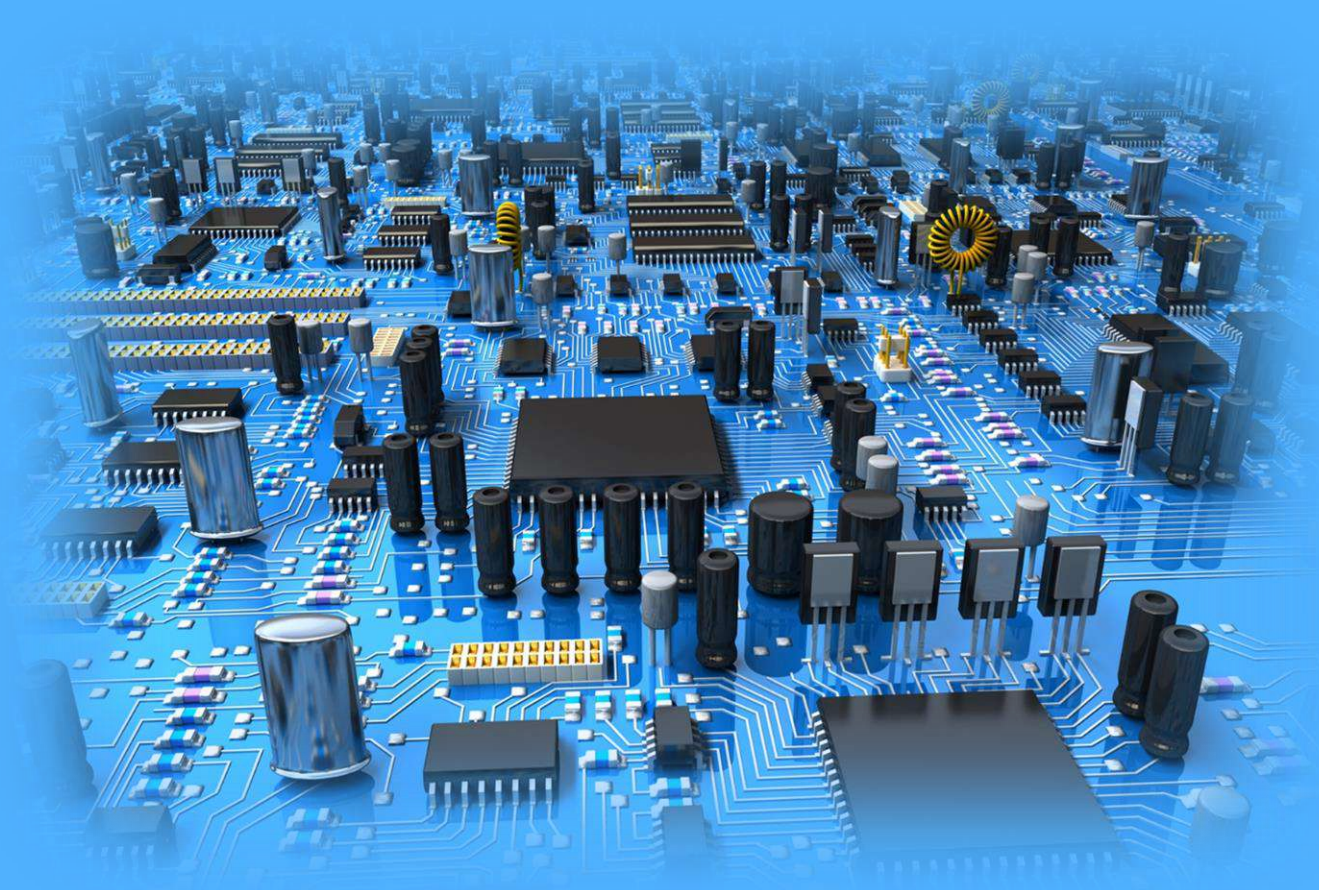


МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА «КОМПАС»

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ
РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ
БАЗЫ ЗА РУБЕЖОМ



МОСКВА

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	7
Введение	10
1 Требования, предъявляемые к радиационно стойкой электронно-компонентной базе, при ее эксплуатации в специфических условиях космического пространства	13
1.1 Проблемы развития промышленности США и других зарубежных стран в вопросах создания радиационно стойкой электронной компонентной базы для космических применений	13
1.2 Радиационная стойкость электронной компонентной базы	16
1.2.1 Радиационная стойкость полупроводниковой ЭКБ к видам радиационного воздействия	16
1.2.2 Результаты воздействия дозовых эффектов накопленной радиации	18
1.2.3 Тиристорный эффект (SEL) или «защёлкивание»	20
1.2.4 Эффект пробоя подзатворного диэлектрика (SEGR) ИМС ..	21
1.2.5 Результаты воздействия одиночных сбоя (SEU)	22
1.3 Воздействие ионизирующих излучений на полупроводниковую электронную компонентную базу	24
1.3.1 Различные воздействия на МОП-транзисторы	24
1.3.2 Пограничные состояния МОП-транзистора	25
1.3.3 Паразитные утечки в n-МОП-транзисторе по кромке «Д↔ПП»	26
1.3.4 Воздействие потока нейтронов на ЭКБ	28
1.3.5 Утечки подзатворного оксида в ИМС	30
1.3.6 Типы тока каналов утечки, формируемые в результате воздействия ИИ	30
1.4 Анализ результатов исследований, проводимых за рубежом в сфере промышленной интеграции процессов производства полупроводниковой микроэлектроники	31
1.5 Основные направления развития радиационно стойкой электронной компонентной базы, используемой в РКТ	33
1.5.1 Развитие микропроцессоров, используемых в БРЭО	34
1.5.2 Основные направления развития микропроцессоров, микроконтроллеров и сигнальных микропроцессоров	35

1.5.3	Биполярные технологические процессы изготовления транзисторов	37
1.5.4	Технологический процесс изготовления структуры КМОП-транзистора	37
1.5.5	Технологический процесс изготовления структуры МОП-транзистора методом двойной диффузии ДМОП-транзистора	38
1.5.6	Технологический процесс выращивания высоко-качественных окислов МОП-транзистора	38
1.5.7	Технологические процессы изготовления твердотельных СВЧ-приборов	39
1.5.8	Технологический процесс производства радиационно стойких полевых транзисторов на основе антимонидов щелочных металлов (GaAs, InP, SiC)	39
1.5.9	Технологический процесс изготовления запоминающих устройств в микропроцессорах БРЭО КА.....	44
1.5.10	Технологический процесс изготовления переноса спинового момента SST в магниторезистивном ОЗУ или магнитном запоминающем устройстве	46
1.6	Сертификация радиационно стойкой ЭКБ для БРЭО космических применений	48
1.6.1	Сертификация производства РС ЭКБ в США	48
1.6.2	Сертификация производства РС ЭКБ в Европейском космическом агентстве	49
1.6.3	Сертификация производства и стандартизации космического приборостроения на основе РС ЭКБ Японским агентством аэрокосмических исследований	50
1.6.4	Применение системы MIL-стандартов в категорировании продукции ЭКБ в США, ЕС и других странах мира	52
2	Анализ материалов перспективных исследований в области радиационно стойкой полупроводниковой микроэлектроники	54
3	Основные тенденции развития технологических процессов производства, основанных на современных методах и подходах изготовления радиационно стойкой ЭКБ космического назначения в США и других странах до 2026 года	59
3.1	Использование перспективных специализированных технологических методов и процессов изготовления приборов полупроводниковой микроэлектроники и специализированных материалов в РС ЭКБ для БРЭО космических применений	60

3.1.1	Технологические методы и способы создания специализированной ЭКБ для космической отрасли	60
3.1.2	Технологические способы интеграции кристаллов в одном корпусе (СБИС типа СВК)	62
3.1.3	Технологический способ КМОП КНИ («кремний на изоляторе»)	62
3.1.4	Технологические методы интегрированной защиты РС ЭКБ ®Maxwell	65
3.1.5	Технологический метод Xray-Pak® Maxwell	66
3.1.6	Технологический метод Rad-Stak® Maxwell	66
3.1.7	Технологический метод LPT® Maxwell	67
3.2	Использование технологического метода низкой статической мощности в микросхемах памяти	67
3.3	Технологические методы производства монокристаллических интегральных ММІС СВЧ-схем за рубежом	69
3.4	Использование технологических методов нанотехнологий	72
3.4.1	Наноматериалы на углеродных наноразмерных трубках	73
3.4.2	Наноматериал типа графена	74
3.4.3	Элементы ЭКБ на квантовых точках	75
3.5	Технологические способы изготовления арсенида галлия (GaAs) с его исключительными свойствами для РС ЭКБ космических применений	77
3.6	Разработка технологических методов создания перспективных полупроводниковых СВЧ-приборов для терагерцевых систем радиовидения космического применения	81
3.6.1	Терагерцевый диапазон занимает промежуточное положение между оптическим и микроволновым диапазонами.....	82
3.6.2	Активные системы радиовидения в терагерцевом диапазоне	84
3.7	Схемотехнические методы, реализованные на существующих и перспективных технологических линиях для серийного производства РС ЭКБ	89
3.7.1	Схемотехнические подходы: применение библиотек элементов с резервированием	90
3.8	Конструктивный (конструкционный) способ повышения радиационной стойкости	90
3.8.1	Покрывания типа RAD-COAT	93

3.9	Математическое моделирование эффектов воздействия ИИ и ДФКП при проектировании приборов РС ЭКБ	94
3.10	Выбор метода анализа на основании требований, предъявляемых к моделированию ИС	95
3.11	Особенности применения метода электромагнитного моделирования для разработки радиочастотных интегральных схем RFIC-приемников	97
3.12	Особенности применения метода электромагнитного моделирования при разработке монолитной интегральной СВЧ-схемы типа MMIC	99
3.13	Сравнение методов и скорости моделирования с требованиями получения заданных характеристик и экстракций паразитных компонентов при разработке и проектировании ИС	100
3.14	Квазистатические алгоритмы анализа в поперечном сечении (2D)	103
3.15	Метод моментов (планарная модификация, 2,5D)	104
3.16	Метод конечных элементов (3D)	105
3.17	Интеграция методов ЭМ-анализа в средства разработки	106
3.18	Совместное использование схемотехнического метода и метода ЭМ-анализа при моделировании топологии ИС для космического применения	106
4	Компании-производители радиационно стойкой электронно-компонентной базы космического применения	110
4.1	Анализ компаний мира, занимающихся выпуском радиационно стойкой ЭКБ полупроводниковой микроэлектроники	111
4.1.1	Компания Honeywell Inc (США)	112
4.1.2	Международная военно-промышленная корпорация BAE Systems (Великобритания)	113
4.1.3	Компания Atmel Cor. (США)	115
4.1.4	Корпорация Microchip Technology Inc. (США)	116
4.1.5	Компания Aeroflex Colorado Springs, Inc. (США)	120
4.1.6	Компания Aitech Defense Systems (США)	121
4.1.7	Компания Maxwell Technologies Inc. (США).....	122
4.1.8	Франко-итальянская компания STMicroelectronics (Швейцария)	125
4.1.9	Международная компания TowerJazz (Израиль)	128

4.1.10	Компании Fujitsu Ltd и Mitsubishi Heavy Industries (МНІ) (Япония)	129
4.2	Кооперация разработчиков и производителей РС ЭКБ	131
5	О формировании в США нового глобального рынка комплексных аппаратно-программных решений в сфере полупроводниковой мик- роэлектроники	133
	Заключение	134
	Список использованных источников	137

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АКП	– авиационно-космическое применение
БТ	– биполярный транзистор
БРЭО	– бортовое радиоэлектронное оборудование
ДОЗУ	– динамическое оперативное запоминающее устройство (Dynamic RAM)
ДФКП	– дестабилизирующий фактор космического пространства
ЖУФ	– жесткий УФ-диапазон (Ultraviolet radiation-EUV)
ИИ	– ионизирующее излучение (ionizing radiation)
ИЛИ-НЕ	– схема памяти (NOR)
И-НЕ	– схема памяти (NAND)
ИС	– интегральная микросхема (Integrated Circuit – IC)
ИМС	– интегральная микросхема (IMC)
ИФ ОЗУ	– оперативное ЗУ с изменением фазы (PC RAM)
КА	– космический аппарат (space vehicles – SV)
КМОП	– комплементарная МОП-структура (complementary metal oxide semiconductor CMOS)
КНИ	– «кремний на изоляторе» – технология изготовления ПП-структуры - silicon-on-insulator SOI)
КНС	– «кремний на сапфире» – технология изготовления ПП-структуры – (silicon-on-sapphire SOS)
МДП	– металл-диэлектрик-полупроводник
МОП	– магнитная оперативная память на структуре «метал-оксид-полупроводник» (Metal Oxide Semiconductor – MOS),
НДР	– накопленная доза радиации
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство с выборочным доступом (Read Access Memory-RAM)
ПЗУ	– постоянное запоминающее устройство (Read Only Memory-ROM)
ПЛИС	– программируемая логическая ИС (System-on-a-programmable-chip SoPC)
ПП	– полупроводниковый (Solid-state – SS)
ПТ	– полевой транзистор (FET)
РКТ	– ракетно-космическая техника (Rocket-and-space Technical)
РС	– радиационно стойкий (Radiation-hard – RH)
РЭО	– радиоэлектронное оборудование
САПР	– система автоматизированного проектирования (Computer-aided Design System CAD)

СБИС	– сверхбольшие ИС (Very Large-scale Integration – VLSI)
СВК	– технология «система в одном корпусе»
СОЗУ	– статическое ОЗУ
ЭЕС	– эффект единичного события
ЭКБ	– электронная компонентная база – (electronic componential base ECB)
ЭРЗ	– экран радиационной защиты
ACE	– Automated Circuit Extraction – технология автоматической экстракции компонентов
ASIC	– Application Specific Integrated Circuit – специализированная интегральная схема
CAGE	– Commercial and Government Entity – реестр коммерческих и государственных предприятий
CGA	– Column Grid Array – микросхема в керамическом корпусе
CMOS	– комплементарная МОП – структура
COTS	– Commercial-Off-The-Shelf – готовое изделие является доступным на коммерческом рынке
CPU	– Core Processing Unit – системный блок
CRAM	– Card Random Access Memory – память на магнитных картах с произвольным доступом
DARPA	– Управление перспективных исследований и разработок МО США
ESA	– European Space Agency – Европейское космическое агентство
FEM	– Finite Element Method – метод конечных элементов
FET	– Field Effect Transistor – полевой транзистор
FinFeT	– Field Effect Transistor with Fin – полевой транзистор с затвором «рыбий плавник»
FPGA	– Field-Programmed Gate Array – программируемая вентильная матрица
GSTP	– General Support Technology Programme – Европейская программа общей поддержки развития технологий
HBT	– Bipolar heterotransistor – биполярный гетеротранзистор
HEMT	– High Electron Mobility Transistors – транзисторы с высокой подвижностью электронов.
IMC	– Integrated microelectronic circuit – интегральная микросхема
IPC	– Industrial Policy Committee – Комитет по промышленной политике ESA

ITRS	– International Technology Road Map for Semiconductors – Международная технологическая дорожная карта для полупроводниковой промышленности
JUICE	– Jupiter Icy Moons Explorer – проект ESA, направленный на исследование Юпитера и его спутников
LD MOS	– Lateral Diffusion Metal Oxide Semiconductor – МОП-транзистор на кремнии (Si) с боковой диффузией
MASTAR	– аналитическая программа по моделированию БИС
MCTL	– Military Critical Technology List – перечень критически важных военных технологий
MES	– metal-semiconductor barrier – полевой транзистор с барьером Шоттки
MIL-S	– Military Standards – стандарт МО США
MMIC	– Microwave monolithic integrated circuit – монолитная интегральная СВЧ-схема
MoM	– Method of Moments – метод моментов
PC RAM	– Phase Change RAM – ОЗУ с изменением фазы
PWM	– Pulse-Width Modulation – (ШИМ)-контроллеры широтно импульсной модуляции
QML	– Qualified Manufacturers List – квалификационный список фирм-производителей
QPL	– Qualified Parts List – квалификационный список деталей
RFIC	– Radio Frequency Integrated Circuit – радиочастотные ИС
SEMI	– Semiconductor Equipment Materials International – Международная ассоциация производителей ПП-оборудования и материалов
SEE	– Single Event Effects – эффект единичного события
SEL	– тиристорный эффект или «защёлкивание»
SEU	– Single Event Upset – одиночные сбои
SiP	– System in Package – технология СВК

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние радиационно стойкой полупроводниковой микроэлектроники отражает все тенденции планомерного развития технологий, технологических процессов и методов производства новых поколений электронной компонентной базы. Практически все национальные космические программы базируются на полупроводниковой (ПП) микроэлектронике, которая вобрала в себя тенденции развития радиационно стойкой электронной компонентной базы (РС ЭКБ), технологические методы производства которой относятся к критическим технологиям и оказывают определяющее влияние на технический облик приборов и на темпы развития космических радиоэлектронных систем. Поэтому разработчики РС ЭКБ для радиоэлектронного оборудования ракетно-космической техники (РЭО РКТ) в силу решаемых задач просто обязаны исходить из необходимости улучшения её массогабаритных характеристик, повышения надежности и стойкости к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП¹), расширения функциональных возможностей и увеличения продолжительности до 15 лет и более её активного функционирования.

«Международная технологическая дорожная карта для полупроводниковой промышленности» (International Technology Road Map for Semiconductors) сформированная в США- это документ, где впервые американские специалисты предприняли попытку обобщить накопленный опыт развития промышленного сектора ПП-микроэлектроники: каталогизировать различные типы микросхем памяти, оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), микропроцессоров, логических, интерфейсных и интегральных микросхем (ИМС) и иных перспективных энергонезависимых схем и приборов разных классов и их цены в течение долгосрочного периода 2019÷2026гг.

¹ ДФКП – это относительно низкое по интенсивности электронное и протонное ионизирующее излучение (ИИ) от *естественных* радиационных поясов Земли, воздействующее (длительно) на КА, а также тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) космического пространства и высокоэнергетические протоны (ВЭП). В каждом из этих случаев ЭКБ подвергается воздействию разного рода ИИ или находится в условиях радиационной обстановки, определяющей срок её использования.

Тенденции развития производства и совершенствования ПП-микроэлектроники и РС ЭКБ, определяемые Международной топологической картой для полупроводников (ITRS), ориентированы на массовый выпуск приборов с коротким жизненным циклом и быстрой сменой их номенклатурных типов.

Впервые в США в рамках государственной политики начали проводить линию по принятию обязательных международных стандартов на спецификацию ПП-микроэлектроники, совершенствование технологических методов и процессов их производства, на применение перспективных редкоземельных элементов, материалов и их окислов. Серьезное внимание стало уделяться надежности РС ЭКБ, используемой для космических применений.

В электронной отрасли США предприняты первые шаги к введению централизованного контроля крупных дорогостоящих проектов в сфере ПП-микроэлектроники по выпуску ЭКБ, реализуемой на коммерческих рынках сбыта. Крупнейшие американские производители ПП-микроэлектроники начали предпринимать серьезные шаги для формирования централизованного контроля рынка сбыта ЭКБ и особенно в направлении их радиационно стойкой (РС) для космического применения.

В практику электронной отрасли США стали вводиться обязательные штрафы за невыполнение тактико-технических характеристик изготавливаемых микроэлектронных приборов, за их ненадежность, за срыв выполнения программ по выпуску серийного производства приборов и обязательств компаний перед государством по контрактам.

Компании - производители электронных микросхем различных классов приступили к переходу от геометрического масштабирования микросхем к технологиям *эквивалентного масштабирования*, т.е. к улучшению параметров микросхем путем внедрения в производство конструктивных новшеств с применением подхода «система в корпусе», использования современных субмикронных технологий изготовления кристаллических пластин путем

применения схемотехнических и конструктивно-технологических решений при их изготовлении.

Разработка специализированного программного обеспечения (ПО) для математического моделирования и применения специализированных методов электромагнитного анализа (ЭМ-анализа) с целью получения точных результатов проектирования приборов ЭКБ за приемлемое время с одновременным уменьшением их размеров, позволила компаниям добиваться высокого быстродействия, высокой плотности упаковки большого количества схем в одном приборе, большей функциональности при уменьшении потребляемой мощности и высокой радиационной стойкости микроэлектронных приборов.

Научно-исследовательские центры NASA и МО США занимаются изучением масштабных НИОКР по разработке РС ЭКБ на основе наноразмерных материалов. Проводимые исследования мотивируются возможностью улучшения технических характеристик приборов и повышения РС ЭКБ и снижением стоимости изделий. В ходе работ по созданию РС наноматериалов и ЭКБ на их основе учёные установили, что наиболее высокой РС обладают: нанопорошки металлов; наноразмерные углеродные трубки; графены; наноразмерные структуры на квантовых точках и квантовых ямах и пористые материалы.

В настоящее время в рамках Европейской программы общей поддержки развития технологий (General Support Technology Programme – GSTP) ведутся разработки технологии создания терагерцевых монолитных интегральных СВЧ-схем для Европейского космического агентства. По оценке специалистов, основным достоинством работы с активными системами *радиовидения в терагерцевом (ТГц) диапазоне* являются низкие требования к чувствительности создаваемого интегрированного гетеродинного приемника с двойной поляризацией на частоте 424 ГГц на основе мембраны ММІС с диодом Шоттки на GaAs.

1 ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РАДИАЦИОННО СТОЙКОЙ ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЕ, ПРИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СПЕЦИФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

1.1 Проблемы развития промышленности США и других зарубежных стран в вопросах создания радиационно стойкой электронной компонентной базы для космических применений

В результате проведенных исследований было установлено, что перед электронной отраслью США поставлены серьезные задачи по производству РС ЭКБ для бортового БРЭО РКТ, на выполнение которых наложены жесткие требования со специфическими условиями выпуска широкого разнообразия номенклатурного ряда малых объемов ПП-микроэлектроники с длительным жизненным циклом, высокой надёжностью, с приемлемой стоимостью изделий мелкосерийного производства и высокой стойкостью к ИИ иДФКП:

- разнообразие задач, решаемых РКТ, основанных на необходимости использования в бортовом РЭО многочисленной номенклатуры РС ЭКБ с мелкосерийным (от 10÷15 шт. до 100 тыс. шт.) и/или единичным (разовым) производством приборов с малой востребованностью и продолжительным временем безотказной работы (≥ 15 лет). Так, по материалам отчётов NASA – полные ряды номенклатуры ИМС и ЭКБ для РКТ составляют от 1500 (для «простых» космических проектов) до 10000 (для крупных космических программ);

- разработка, производство и совершенствования ПП-микроэлектроники и РС ЭКБ, тенденции развития которой, определяются Международной топологической картой для полупроводников (ITRS) и ориентированы на массовый её выпуск с коротким жизненным циклом, быстрой сменой их номенклатурных типов, и требования ITRS должны быть сосредоточены на:

- прогнозировании появления перспективных передовых технологий в сфере ПП-микроэлектроники, в т.ч. РС ЭКБ, позволяющих осуществить

переход отрасли электронной промышленности на выпуск требуемой продукции, но с постоянным улучшением требуемых характеристик;

- разработки высоких стандартов надёжности (безотказности при длительных сроках эксплуатации), предъявляемых к перспективным изделиям РС ЭКБ с показателями безотказности активных элементов $\geq 10^{-9} \div 10^{-10}$ и для пассивных – $\sim 10^{-11} \div 10^{-12}$;
- обеспечении высокой РС ЭКБ к воздействию ДФКП и систем направленной энергии и ИИ ядерного взрыва (рисунок 1) с $D_{\text{нак}} \geq 50$ крад(Si).



Рисунок 1 – Специфика РС ЭКБ для бортового РЭО КА

Радиационная обстановка в космическом пространстве зависит от траектории движения КА и является величиной переменной как во времени, так и в пространстве, а т.к. любое космическое излучение генерируется частицами, испускаемыми множеством источников, как в пределах, так и вне нашей Солнечной системы, то эффекты радиационного воздействия излучений этих частиц могут вызывать не только снижение эффективности работы бортовых РЭС, но и привести к полному отказу ЭКБ бортовой аппаратуры РКТ. Источниками радиации выступают радиационные пояса Земли (пояса

Ван Аллена), галактические космические лучи; солнечная радиация, вызванная протонами солнечного происхождения; а также ИИ ядерного взрыва; источников систем, генерирующих направленную энергию. Основную опасность для ЭКБ несут три вида ИИ ЯВ (рисунок 2) и системы излучения направленной энергии:

- *световое излучение* зависит от мощности и характера ЯВ, вспышка имеет длительность от долей до нескольких секунд и несёт 30÷50% всей энергии ЯВ, где преобладают фотоны оптического, ИК- и УФ- диапазонов волн;

- *ионизирующее излучение* ЯВ несёт до 5% энергии взрыва и представляет собой поток нейтронов, гамма-излучения и заряженных частиц;

- *электромагнитный импульс (ЭМИ)* – вторичное явление, вызванное ЯВ, возникает как излучение проводников, находящихся вблизи зоны взрыва. Выводит из строя всё бортовое РЭО, наводя в цепях мощные броски напряжения или тока, приводящих к выгоранию элементов схем ПП-приборов;

- *системы излучения направленной энергии* включают искусственно создаваемые потоки излучений: мощное электромагнитное излучение (ЭМИ); направленное излучение сверхвысоких радиочастот (СВЧ); излучение лазерного оружия.

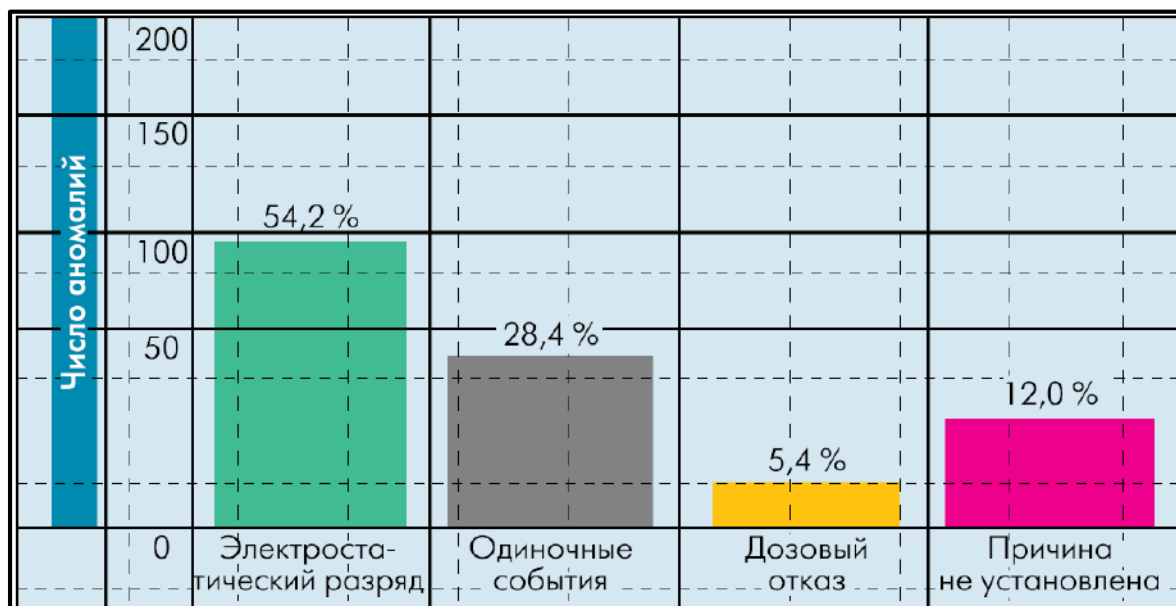


Рисунок 2 – Статистические данные аномалий в функционировании РЭО для РКТ в условиях ДФКП и иных видов ИИ (данные по 299 аномалиям)

Мощные излучения ЭМИ/СВЧ высокой интенсивности в диапазоне частот от 200 МГц до 5 ГГц могут приводить к временному или необратимому повреждению ЭКБ критически важного бортового РЭО.

1.2 Радиационная стойкость электронной компонентной базы

1.2.1 Радиационная стойкость полупроводниковой ЭКБ к видам радиационного воздействия

Под радиационной стойкостью полупроводниковой ЭКБ для РКТ понимается её стойкость к деградации параметров, обусловленных воздействием ИИ, по дозе поглощения, по мощности дозы и по плотности потока нейтронов:

– *доза поглощения накопленной дозы радиации* – суммарное количество излучения, полученное ИМС в течение определённого интервала времени. Выражается в долгосрочном ухудшении параметров ИМС, доза поглощения обычно накапливается в результате работы систем в течение промежутка времени на околоземной орбите (на высоте ~ 10000 км), где воздействуют пояса Ван Аллена (норма, лучше 5×10^5 рад (S_i);

– *мощность дозы* – проявляется в ухудшении параметров ИМС в результате воздействия рентгеновского излучения, гамма-излучения или потока нейтронов в космосе или в процессе ЯВ. Мощность дозы определяется как скорость, с которой ИМС получает дозу радиации в любой данный момент времени. Воздействие мощности дозы приводит к появлению фотонов, которые могут вызвать падение напряжения и функциональные нарушения. Такие радиационные эффекты приводят к временным сбоям или к катастрофическим отказам (норма, лучше 1×10^8 рад (S_i)/C);

– *нейтронная доза* – результат воздействия импульса нейтронов, возникающего после ядерной детонации. Нейтроны при столкновении с атомами S_i кристаллической решётки смещают атомы S_i и создают локальные дефекты, что сокращает время жизни неосновных носителей и весьма разрушительно для биполярных транзисторов (норма, лучше 1×10^{14} н/см²);

– *одноразовый сбой* – вызывается облучением работающей ИМС, когда заряженные частицы радиационных поясов или космического излучения в процессе прохождения среды (ИМС) теряют энергию и оставляют след на электронно-дырочных парах. Сбой одиночного события представляет собой быстропротекающий случайный процесс, не приводящий к необратимым разрушениям. Последующий возврат в исходное состояние или перезапись восстановят нормальное функционирование устройства (норма устойчивости к одиночному воздействию и устойчивости к мощности дозы излучений 1×10^8 рад (S_i)/с и выше);

– *однократное фиксирование воздействия* обусловлено тем, что ИИ вызывает переходные токи, провоцирующие срабатывание паразитных триодных тиристоров, относится к неисправимым ошибкам, имеющим разрушительные последствия (норма, 1×10^{-7} или меньше ошибок/бит/день);

– *неисправности ЭКБ*, полученные в результате ЭЕС (рисунок 3), подразделяются на отказы устойчивые (hard error) и отказы исправимые (soft error).

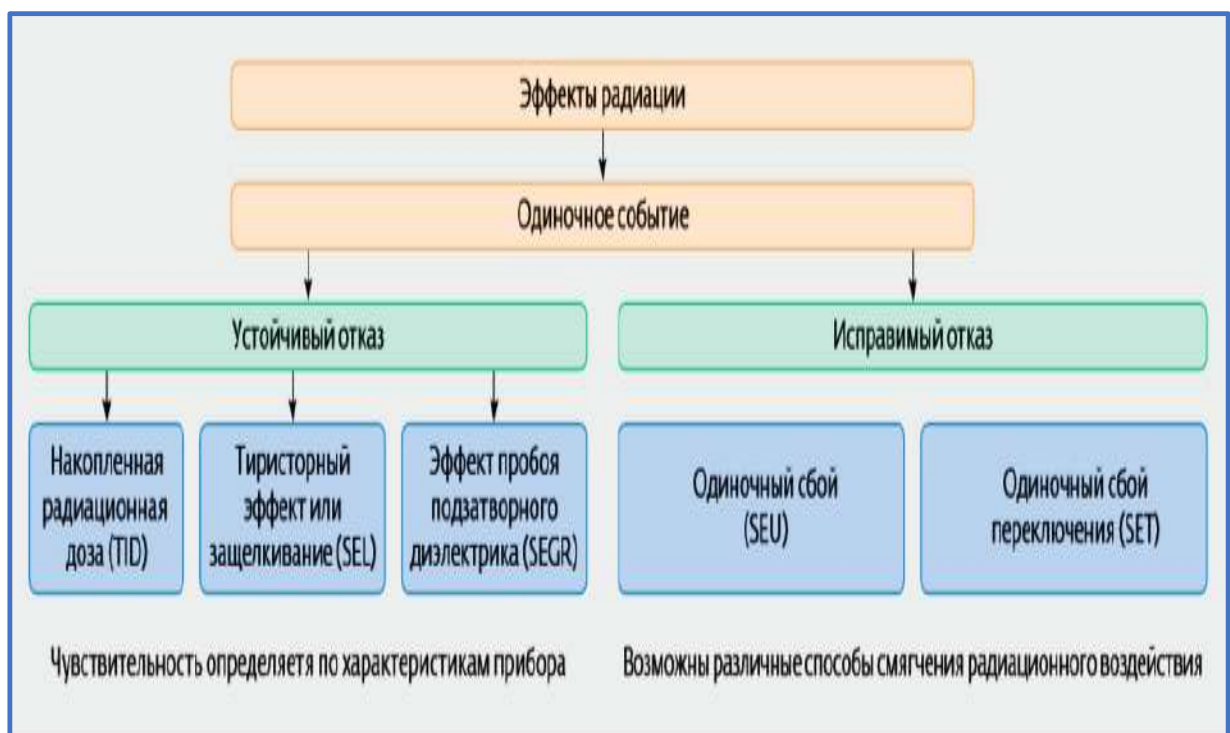


Рисунок 3 – Виды радиационных воздействий, приводящих к отказам

Считается, что основной радиационной угрозой для современной ЭКБ является эффект единичного события (ЭЕС²), вызванный воздействием высокоэнергетических частиц (ИИ³), т.е. электронами и протонами, а также квантами ЭМИ с энергией, близкой к энергии запрещённой зоны.

1.2.2 Результаты воздействия дозовых эффектов накопленной радиации

Дозовые эффекты накопленной радиации (TID) связаны с генерацией электронно-дырочных пар в слое диэлектрика МОП-транзистора, это увеличивает пороговое напряжение транзистора с каналом *p*-типа и уменьшает пороговое напряжение транзистора с каналом *n*-типа, а также приводит к росту тока истока.

С нарастанием этих эффектов возможен параметрический или устойчивый отказ ЭКБ. Кроме того, накопление заряда приводит к возникновению в оксиде поля, нарастающей по мере увеличения НДР, что может привести к пробойу окисла, т.е. к *катастрофическому отказу ЭКБ*. Пробой может быть вызван и током, возникшим при генерации пар в результате ИИ.

Важным открытием учёных в процессе исследований явилось исследование зависимости дозовых эффектов в ПП-ЭКБ от мощности НДР. Установлено, что максимальная деградация ПП-элементов ЭКБ возникает при малых мощностях ионизирующего излучения порядка $D_{III} \sim 1$ рад(Si)/с.

В ходе проведённых экспериментов ученые наблюдали процессы, происходящие в МОП-структурах при их облучении различными дозами ($D_{нак}$), которые можно охарактеризовать следующими изменениями:

²SEE, Single Event Effects – эффект единичного события (ЭЕС) – это временный или постоянный сбой в работе ЭКБ, вызванный проникновением в объём (тело) ИМС одной радиоактивной частицы.

³**Ионизирующее** излучение (ionizing radiation), воздействуя на кристалл, приводит к образованию электронно-дырочных пар за счёт выбивания электронов из атомов кристаллической решётки.

- при $D_{\text{нак}} = 101 \div 102$ Гр.⁴ возникает деградация ПП-ЭКБ с зарядовой связью (ухудшение эффективности переноса из-за уменьшения времени релаксации процессов неравновесного обеднения и роста тока генерации);
- при $D_{\text{нак}} = 102 \div 103$ Гр. происходит деградация параметров в БИС и СБИС (инверсия заряда p^+ -охранного слоя, рост потребляемой мощности, усиление паразитных связей между ячейками вследствие роста величины объёмного заряда в толстых (до ~ 1 мкм) пассивирующих слоях SiO_2);
- при $D_{\text{нак}} = 103 \div 104$ Гр. происходит деградация МОП-структур (уход величины порогового напряжения, снижение быстродействия, уменьшение крутизны характеристик вследствие роста объёмного заряда в подзатворном слое SiO_2 ($\sim 10 \div 50$ нм) и плотности БПС, $N_{\text{SS}} 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$);
- при $D_{\text{нак}} = 104 \div 105$ Гр. происходит деградация КМОП-структур, приводящая к стиранию записанной информации вследствие неконтролируемого накопления объёмного заряда в слоях Si_3N_4 и SiO_2 ;
- при $D_{\text{нак}} = 105 \div 106$ Гр. происходит деградация МДП-структур со сверхтонким (< 10 нм) диэлектриком вследствие накопления избыточного объёмного заряда в слоях SiO_2 , Si_3N_4 и т.д.;
- при $D_{\text{нак}} = 106 \div 107$ Гр. активизируется процесс дефектообразования в объёме Si и всех диэлектрических слоёв (растёт величина токов через диэлектрик и изменяется концентрация основных носителей в полупроводнике);
- при $D_{\text{нак}} = 107 \div 108$ Гр. наступает эффект электрического пробоя подзатворных диэлектриков.

⁴ **Gy** (Грей, Гр.) – единица измерения в системе СИ – поглощённая доза облучения равна одному Грею, если в результате поглощения ионизирующего излучения вещество получило один Джоуль энергии в расчёте на один килограмм массы, то есть $1 \text{ Гр.} = 100 \text{ рад.} = \text{Дж/кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$.

Rad, radiation absorbed dose (рад) – внесистемная единица измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения. Рад равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 грамм передаётся энергия ионизирующего излучения 100 эрг ($1 \text{ Рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр.}$). Материал всегда указывается в круглых скобках, например, рад (Si).

1.2.3 Тиристорный эффект (SEL) или «защёлкивание»

Тиристорный эффект (SEL) или «защёлкивание» (рисунок 4) - это проблема ИМС на КМОП-структуре, появляющаяся в условиях её облучения высокоэнергетическими частицами и/или протонами, которая может привести к «защёлкиванию» канала и вызвать включение, присущее структуре паразитного *pn-pn*-тиристора в ИМС, что и спровоцирует катастрофический отказ схемы. При нормальном смещении в тиристоре ИМС, потенциал подложки *p*-типа самый низкий, а кармана *n*-типа – самый высокий. Ни один из переходов *pn-pn*-структуры тиристора не смещён в прямом направлении и он отключается.

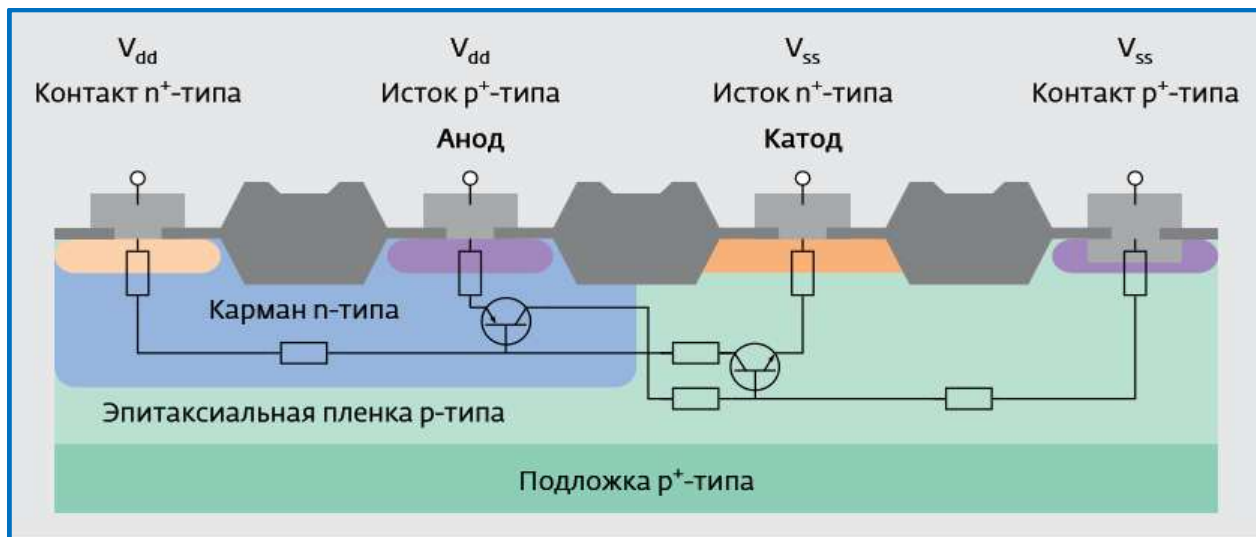


Рисунок 4 – Эффект «защёлкивания» КМОП-структуры, выполненной на эпитаксиальной подложке p-типа

Однако ионизирующее воздействие одиночной высокоэнергетической частицы может вызвать появление такого переходного тока, который инжектирует заряд в области катодного или анодного управляющего электрода тиристора ИМС. Падение напряжения, вызываемое током, протекающим к контакту кармана (подложки), может оказаться достаточным для прямого смещения перехода тиристора ИМС и приводит к включению БТ, работающего с положительной *обратной связью* и поддерживающего ток в канале «защёлкивания».

Канал станет проводить ток до тех пор, пока его напряжение не уменьшится до напряжения тиристора в открытом состоянии и равного $V_{\theta\sigma}(\text{вкл.}) + V_{K\sigma}(\text{нас.})$, а поскольку общее сопротивление канала невелико и ток, возникающий между соседними контактами V_{dd} и V_{ss} , может стать большим и достаточным, чтобы выжечь металлизацию и привести к отказу ИМС. В целях уменьшения восприимчивости прибора к эффекту «защёлкивания» применяется несколько конструктивных приёмов. Согласно принципу работы модели транзистора с перекрёстными обратными связями (рисунок 4), эффект «защёлкивания» не может сработать, если суммарный коллекторный ток от произведения усиления *npn*- и *pnp*-транзисторов будет меньше единицы. Также эффект «защёлкивания» канала не сработает, если переходы управляющих электродов тиристора (катодного (К) или анодного (А) закорочены.

1.2.4 Эффект пробоя подзатворного диэлектрика (SEGR) ИМС

Эффект пробоя подзатворного диэлектрика (SEGR) ИМС вызывает смещение атомов кристаллической решётки, приводит к образованию вакансий и выбиванию атомов в пространство между её узлами. Дефекты смещения образуются потоками нейтронов и протонов, а законы сохранения энергии импульса приводят к сложной зависимости интенсивности образования этих дефектов от энергии потока частиц. Поток электронов создаёт дефекты смещения с гораздо меньшей интенсивностью, чем нейтроны, а поток гамма-квантов с ещё меньшей интенсивностью. Проявившиеся дефекты оказывают воздействие на электропроводность ПП-структур за счёт уменьшения концентрации атомов основных носителей и снижения их подвижности, что приводит к изменению характеристик ПП-ЭКБ и определяет их радиационную стойкость. Дефекты смещения образуют в запрещённой зоне ПП-ЭКБ глубокие рекомбинационные уровни и мелкие уровни прилипания, которые вызывают изменения времени жизни неосновных носителей заряда, определяющих параметры радиационной стойкости ПП-ЭКБ.

1.2.5 Результаты воздействия одиночных сбоев (SEU)

Одиночные сбои (SEU) – это наиболее распространённые и наименее опасные результаты воздействия ИИ, производимые одной частицей с достаточно высокой энергией, создающей множественные электронно-дырочные пары в теле ПП-элементов ЭКБ.

Наиболее чувствительными к SEU являются микросхемы цифровой логики и элементы оперативных ЗУ (ОЗУ). В них генерируются свободные носители заряда, создающие импульс тока, который ложным срабатыванием может перевести прибор в его другое стабильное состояние. Большая амплитуда импульса тока может вызвать разрушительное воздействие одного из электродов ПП-элементов ЭКБ. Неисправность, вызванная *одиночным сбоем* (SEU), как правило, не приводит к серьёзному ухудшению работы прибора и рассматривается как исправимая ошибка. Однако исследования показали, что число одиночных сбоев ПП-элементов прибора постоянно возрастает с увеличивающимся объёмом ОЗУ, а следовательно, растёт и число регистрируемых его одиночных сбоев. Борьбу по смягчению последствий от сбоев следует начинать с выбора структуры, позволяющей минимизировать накопление импульсов тока. Для этого лучше использовать тонкий эпитаксиальный слой, самый высокий уровень легирования подложки и различные модификации топологии ПП-элементов прибора. Например, для уменьшения поперечного сечения уязвимых узлов полевых транзисторов необходимо минимизировать их поверхности в удалённых областях стока, используемых в качестве перемычек межсоединений и промежуточных трассировочных слоёв. В замкнутых конструкциях ПП-элементов прибора ЭКБ предполагается использовать их внутренние области как стоки, поскольку их поверхности крайне малы. Необходимо подчеркнуть, что работа биполярных⁵ элементов ЭКБ зависит от величины тока неосновных носителей, протекающих через

⁵ В элементах ЭКБ на базе КМОП/КНС труднее достичь радиационной стойкости к НДР ($D_{\text{нак}}$), чем в КМОП с монокристаллической подложкой. Однако ЭКБ на КМОП/КНС обладают преимуществом по мощности НДР в отношении одиночных случайных эффектов. Один из методов компенсации эффектов возникновения тока утечки заключается в использовании технологии изоляции диэлектриком биполярных элементов полупроводниковой ЭКБ.

подложку, МОП-структуры работают с током основных носителей на поверхности подложки, поэтому их взаимодействие с ИИ оценивается различными методами и способами (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение радиационной стойкости элементов ЭКБ

Радиационно стойкая ЭКБ для РЭО ВВТ и РКТ	
Технология производства	Радиационная стойкость к полной накопленной дозе радиации $D_{\text{нак}} \sim \text{рад (Si)}$
Биполярные элементы:	
TTL/STTL	1×10^6
ECL	1×10^7
IIL	1×10^6
Линейные	1×10^4
Элементы на МОП-структурах	
NMOS	7×10^2
CMOS (Bulk)	3×10^3
CMOS/RH	1×10^7
CMOS-SOS	1×10^6

Различия и особенности структур *двуокиси кремния* (SiO_2) и *нитрида кремния* (Si_3N_4) также могут изменять показатели устойчивости биполярных линейных элементов к воздействию ИИ до уровня НДР, равной значению $D_{\text{нак}} \sim 1 \text{ Мрад(Si)}$.

Нитрид кремния (Si_3N_4) имеет очень низкую плотность ($3,21 \text{ г/см}^3$) и хорошую ударную вязкость (850 МПа), при высокой устойчивости к тепловым ударам (тепловое напряжение $\sim 569 \text{ К}$), что позволяет нитриду кремния (Si_3N_4) сохранять свои рабочие характеристики при максимальных температурах в $-1300 \text{ }^\circ\text{C}$ в окисленной атмосфере, в нейтральной атмосфере при $-1600 \text{ }^\circ\text{C}$. В таких условиях электронная структура Si_3N_4 становится подобна электронной структуре SiO_2 .

1.3 Воздействие ионизирующих излучений на полупроводниковую электронную компонентную базу

При проектировании радиационно стойких микросхем ЭКБ необходимо учитывать зависимость параметров интегральных элементов от воздействия различных видов излучений (гамма-излучение, поток нейтронов или иных частиц) и их характеристик (накопленная доза, мощность дозы, величина потока частиц и их энергия) ионизирующего излучения (ИИ). Так, гамма-излучение обычно оказывает слабое влияние на структуру объёма кремния (Si), но вызывает значительные переходные процессы (фототоки) из-за генерации электронно-дырочных пар, а повреждение объёма кремния (Si) наступает только при большой энергии квантов облучения.

1.3.1 Различные воздействия на МОП-транзисторы

Воздействие гамма-излучения приводит к появлению положительного (Q^+) заряда в окисле (SiO_2) и в поверхностных состояниях на границе раздела $\text{Si} \leftrightarrow \text{SiO}_2$ при большой величине НДР. Положительный заряд (Q^+), захваченный ловушками в окисле SiO_2 , индуцирует отрицательный заряд (Q^-) в кремнии на границе раздела $\text{Si} \leftrightarrow \text{SiO}_2$, который может создать область обеднения, а инверсионный слой в кремнии *p*-типа - область обогащения в кремнии *n*-типа. Инверсионный слой соединяет две области *n*-типа с разным потенциалом, что создает возможность появления тока утечки. При одновременном использовании в работе замкнутой структуры транзистора и *p*⁺-ограничителей канала под влиянием общего НДР ($D_{\text{нак}}$) токи утечки под защитным слоем оксида снижаются, а характеристики *n*- и *p*-канальных транзисторов под воздействием ИИ изменяются незначительно (рисунок 5). Изменения характеристик транзистора по мере накопления дозы радиации ($D_{\text{нак}}$) связаны с появлением положительного заряда под оксидом и с формированием переходного

состояния (БПС⁶). Положительный заряд, захваченный под оксидом в *n*-канальном транзисторе, снижает пороговое напряжение и транзистор начинает работать в режиме обеднения. В результате снижается его помехоустойчивость и растёт ток утечки в закрытом состоянии, а в результате уменьшения толщины этих оксидов стойкость транзистора к НДР должна возрастать.

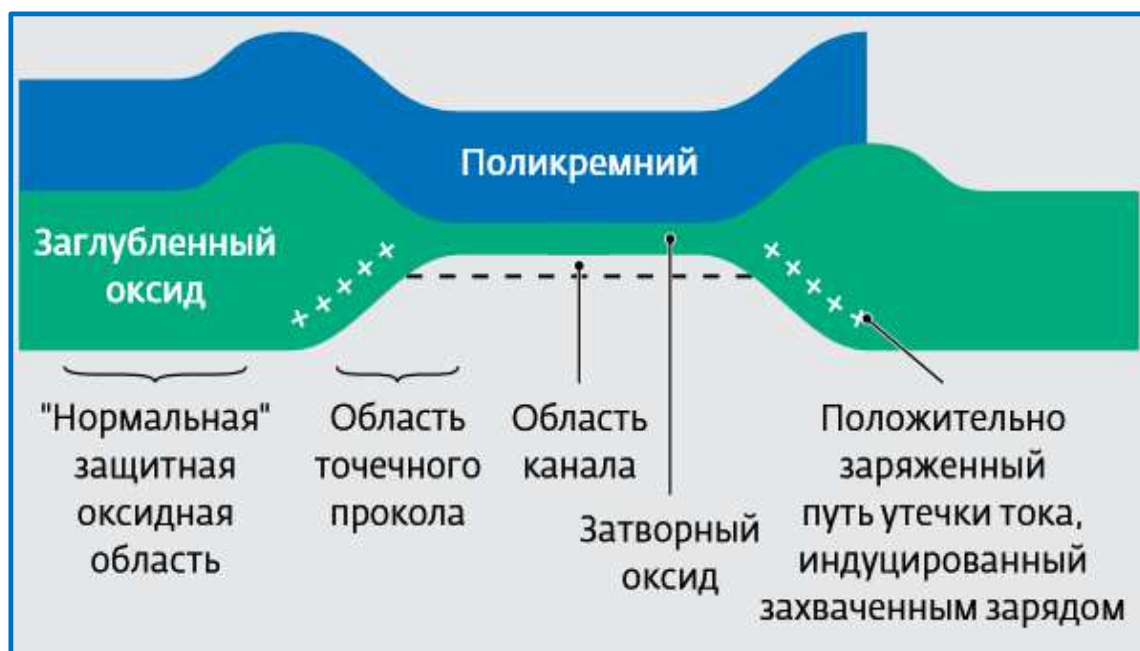


Рисунок 5 – Поперечное сечение МОП-транзистора

1.3.2 Пограничные состояния МОП-транзистора

Пограничные состояния в МОП-транзисторе вызывают изменения пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных транзисторов, снижают подвижность носителей и уменьшают управляющий ток. Кроме того, пограничные состояния уменьшают крутизну подпороговых вольтамперных характеристик (ВАХ) в *n*- и *p*-канальных транзисторах и приводят к увеличению тока утечки. Число пограничных состояний, возникающих под воздействием общего НДР, сложным образом зависит от процесса изготовления прибора. Особенно вредны насыщенные водородом среды,

⁶ Дефекты в переходном слое ДПП – это электроактивные центры, называемые поверхностными состояниями (ПС). Если ПС располагаются вблизи поверхности ПП (~10 нм) и имеют время перезарядки ~1 мкс, то они называются быстрыми (БПС). Состояния, формируемые в глубине переходного слоя ДПП, имеют большое время релаксации (≥1 мс) и называются медленными (МПС).

используемые в технологических операциях. При этом определения степени влияния промышленного технологического процесса на формирование пограничных состояний МОП-транзистора в результате ИИ нет.

1.3.3 Паразитные утечки в n -МОП-транзисторе по кромке «Д↔ПП»

Паразитные утечки по кромке «Д↔ПП» на границе раздела Si↔SiO₂ перехода в n -МОП-транзисторе (рисунок 6) – это второй значительный эффект, вызываемый воздействием гамма-излучения. Наличие тока утечки по кромке «Д↔ПП» обычно фиксируется быстрым ростом тока источника питания с увеличением общей НДР, а также паразитными токами «исток↔сток» по шунтированию основного транзистора. В результате воздействия ИИ под переходом между толстой защитной и тонкой затворной оксидными плёнками (SiO₂) происходит захват носителей и формирование паразитного воздействия. По мере увеличения НДР, утечка электронов по кромке проводящего канала возрастает и ток утечки становится почти равным току транзистора в открытом состоянии. На поверхности p -типа проводимости, применяемой в n -МОП-транзисторах, поверхностные состояния заряжаются до нейтральной или отрицательной величины и, уменьшают влияние положительного заряда окисла. После воздействия гамма-излучения среднего уровня (кривая 1, рисунок 6) в окисле вблизи границы раздела происходит накопление заряда, что приводит к уменьшению порогового напряжения V_{TH} , вплоть до появления в транзисторе встроенного канала (изменения полярности напряжения, соответствующего точке пересечения кривой $f(V_{GS})$ с осью V_{GS}).

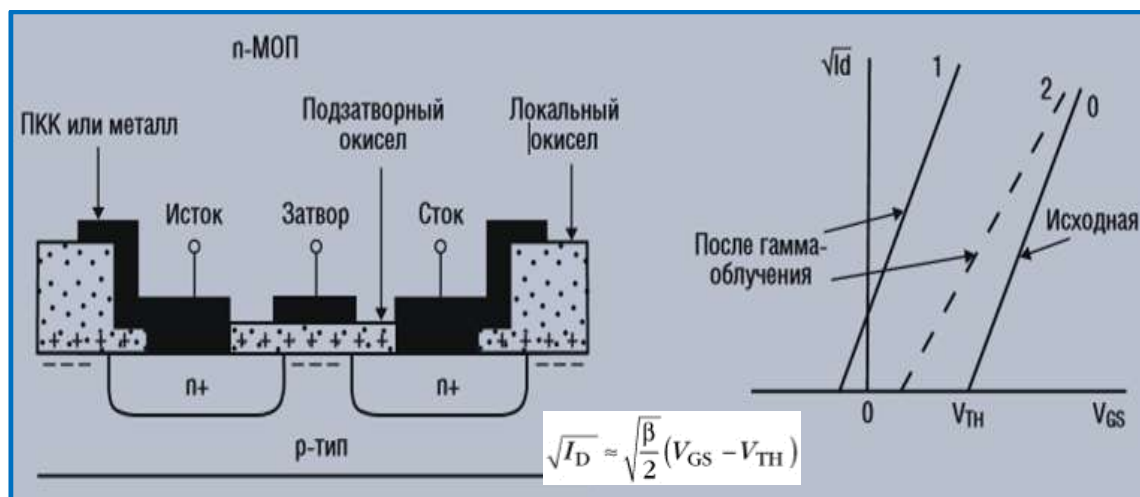


Рисунок 6 – Влияние гамма-излучения на кремниевый n-МОП-транзистор и его характеристики⁷

При высоком уровне воздействия гамма-излучения появляющиеся поверхностные состояния уменьшают влияние положительного заряда на пороговое напряжение (пороговое напряжение растёт), одновременно уменьшают и подвижность носителей заряда и их крутизну (кривая 2, рисунок 6).

Как следует из графика на рисунке 7а, накопленная доза радиации от воздействия гамма-излучения сильно зависит от величины изменения (сдвига) порогового напряжения ΔV_{TH} , от толщины слоя окисла, применяемого при формировании МОП-транзистора и от величины напряжения на затворе транзистора.

⁷ Где I_D – ток стока, β – удельная крутизна передаточной характеристики, V_{GS} – напряжение затвор-исток, V_{TH} – пороговое напряжение.

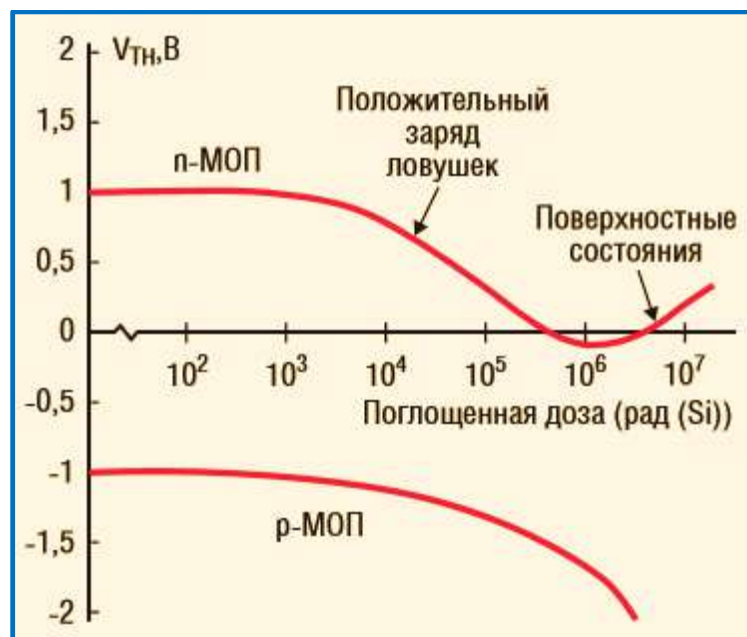


Рисунок 7а – Зависимость порогового напряжения от НДР гамма-излучения в кремниевых МОП-транзисторах

Таким образом, установлено, что гамма-облучение значительно ухудшает характеристики МОП-транзисторов:

- при малых НДР пороговое напряжение транзисторов с типами проводимости *n*-МОП и *p*-МОП уменьшается;
- большие дозы НДР продолжают уменьшать пороговое напряжение у *p*-типа МОП-транзисторов и начинают увеличивать - у *n*-МОП-транзисторов, при этом крутизна МОП-транзистора с любым типом проводимости канала уменьшается;
- встроенный положительный заряд в окисле приводит к появлению утечек «сток↔исток» в *n*-МОП-транзисторах и «коллектор↔эмиттер» в *n-p-n*-транзисторах вдоль любых слаболегированных областей *p*-типа;
- статический коэффициент передачи тока биполярных транзисторов (БТ) в схеме с общим эмиттером (β) уменьшается. Если на БТ воздействует низкоэнергетическое излучение, то спад тока в такой схеме обусловлен усилением рекомбинационных процессов в увеличившихся областях пространственного заряда на поверхностях, площадь и спад усиления которых прямо пропорциональны периметру эмиттерного перехода *n-p-n*-БТ.

1.3.4 Воздействие потока нейтронов на ЭКБ

Воздействие потока нейтронов на ЭКБ вызывает проявление радиационных дефектов, оказывающих сильное воздействие на электрофизические характеристики материала ПП-прибора, уменьшают время жизни неосновных носителей заряда, на концентрацию основных носителей заряда и их подвижность. При этом изменяются следующие параметры прибора ЭКБ:

- уменьшается коэффициент передачи тока β и увеличиваются обратные токи и напряжение насыщения БТ;
- деградирует усиление БТ прямо пропорционально времени пролёта неосновных носителей заряда через базовую область;
- возрастает дифференциальное сопротивление диодов в прямом направлении и наблюдается прямое падение напряжения диодов обратного напряжения и обратных токов пробоя;
- практически полностью исчезают выпрямительные свойства диода при высоких уровнях облучения;
- изменения параметров ПТП и МОП-транзисторов незначительно.

Все вышеперечисленные изменения параметров с прошествием времени могут частично восстанавливаться в зависимости от температуры полупроводника (*отжигаться*).

При промышленном производстве РС ЭКБ для ослабления эффекта утечки по кромке перехода прибора требуется модификация его топологии. Наиболее эффективной, или стойкой к общей НДР, является замкнутая (reentrant) структура для *n*-канального транзистора, устраняющая границу перехода «тонкий ↔ толстый» оксид. Однако создание ЭКБ с подобной структурой весьма затруднительно, т.к. занимаемая площадь его кристалла и электрические параметры выше, чем у предыдущего поколения, к тому же у *p*-канальных транзисторов замкнутая структура не используется, поскольку утечки тока на краях перехода не чувствительны к радиации.

1.3.5 Утечки подзатворного оксида в ИМС

Утечки в подзатворном оксиде (рисунок 6) связаны с инверсией проводимости под оксидом затвора и появлением тока канала утечки, являются основной причиной неисправности многих промышленных ИМС. Так, если до ионизирующего облучения для инверсии проводимости и образования тока в канале утечки требовалось напряжение $V \sim 15$ В, то при НДР $D_{\text{нак}} = 10$ крад(Si) значительный ток утечки появлялся уже при $V \sim 5$ В, а если доза радиации накапливается до $D_{\text{нак}} = 30$ крад(Si), то ИМС переходит в нерабочее состояние. Неисправность в ИМС возникает вследствие значительного превышения тока источника питания, и/или входных/выходных токов утечки относительно значений, приведённых в технических условиях, и/или в результате катастрофической функциональной неисправности. Значительный рост статического тока источника питания в результате увеличения НДР является показателем инверсии области под оксидом затвора (рисунок 7b).

1.3.6 Типы тока каналов утечки, формируемые в результате воздействия ИИ

Возможны два типа тока каналов утечки, формируемых в результате воздействия ИИ на области *p*-типа под оксидом затвора *n*-канального транзистора. *Первый тип* возникает между карманом стока *n*-типа (напряжение которого равно $\sim V_{dd}$) и истоком *n*+-типа (напряжение которого равно $\sim V_{ss}$). *Второй тип* образуется в результате перекрытия промежутка между *n*+-областями стока/истока соседних *n*-канальных транзисторов.

Для устранения вероятности образования подобного канала необходим промежуточный ограничитель канала, т.е. следует создать область с высокой концентрацией примеси *p*-типа, имплантируемой в кремний под оксидом, что затрудняет её инверсию и эффективно предотвращает формирование тока в канале утечки (рисунок 7b).

Такой подход значительно увеличивает расстояние между соседними *n*+-областями, между *n*-карманом и *n*+-областями. Данный метод эффективно ограничивает токи в канале утечки.

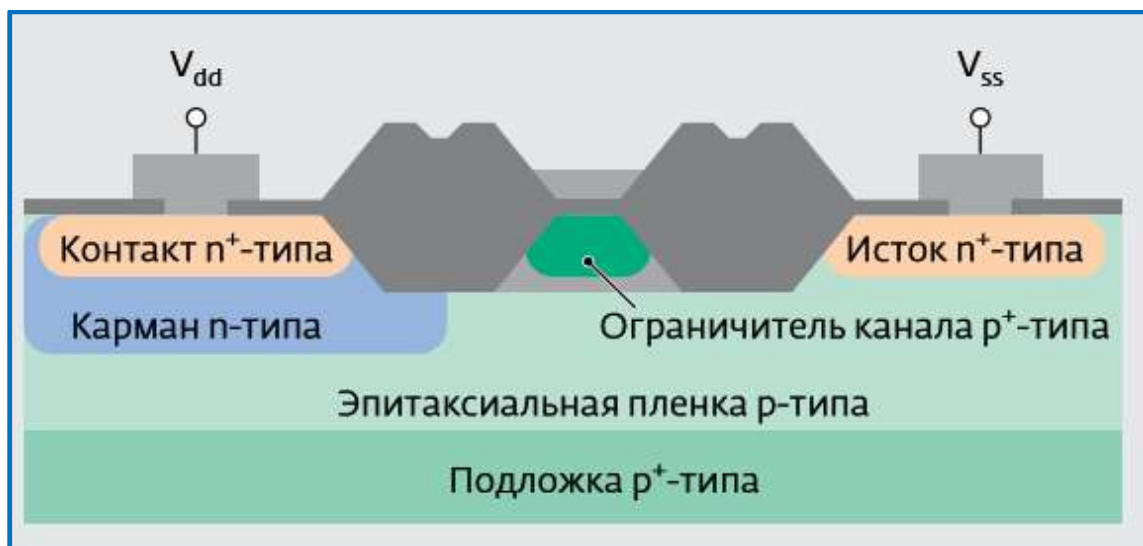


Рисунок 7b – Имплантируемый p^+ -ограничитель канала под разделительным слоем оксида

1.4 Анализ результатов исследований, проводимых за рубежом в сфере промышленной интеграции процессов производства полупроводниковой микроэлектроники

Анализ результатов исследований, проведённых в США, Израиле и странах ЮВА в сфере промышленной интеграции технологических процессов производства и использования новых перспективных материалов и технологий изготовления ПП-микроэлектроники, в т.ч. ИС и ЭКБ, в целом позволил вскрыть нерешённые проблемы и определить основные направления их преодоления:

- *уменьшение габаритов S_i КМОП*: планарных габаритов КМОП-схем; изготовление надёжной SOI и затвора MG-структуры; контроль в допустимых пределах последовательного сопротивления исток/сток; уменьшение габаритов для материалов высокого качества $-k$ ($k>30$); настройка порогового напряжения и контроль металлического затвора и высококачественной упаковки; создание в новых структурах необходимых напряжений;

- *обеспечение в КМОП канала с диэлектрическими материалами высокой подвижности*: контроль использования высококачественных диэлектриков с высоким числом k и поверхностных состояний D_{it} ; CMOS (**n**-и **p**-канал);

решение монолитной интеграции конструкций; эпитаксия на S_i -подложке материалов с несовпадающей кристаллической решеткой; сложность совместимости процессов в условиях существенных тепловых ограничений;

- *масштабирование ДОЗУ и СОЗУ*: для ДОЗУ- сохранение ёмкости в транзисторах доступа и достаточной ёмкости хранения при уменьшении размеров элемента с высокой защитой; низкие утечки в транзисторах доступа и конденсаторах памяти; реализация схороненного затвора полевого транзистора типа Saddle/Fin; повышение плотности записи и снижение себестоимости производства с достижением размера ячейки $4F^2$; для СОЗУ- сохранение запаса помехоустойчивости, нестабильности кодов управления и исправления ошибок; сложность использования процессов литографии, травления или гравировки плат;

- *идентификация и реализация структур памяти*: масштабирование конденсатора хранения в ДОЗУ; принятие решений на замену ДОЗУ на СОЗУ;

- *масштабирование высокоплотной энергонезависимой памяти*: строгое выполнение требований по сроку службы, уровню шума; надежности; многоуровневых ячеек с нормой <20 нм и 4 бита/1; немасштабируемость туннельного диэлектрика и интерполидиэлектрика у флэш-памяти; трудности поддержания высокого коэффициента связи затвора для флэш-памяти с плавающим затвором; ограничение устройств памяти с малым объемом электронов и напряжением пробоя линии; себестоимость объемной литографии; реализация трехмерных схем памяти И-НЕ; решение проблемы с временем задержки в памяти систем;

- *масштабирование мощности*: снижение энергопотребления по напряжению динамической плотности мощности V_{dd} ; контроль допорогового тока и/или допороговой характеристики; предел запаса V_{dd} ;

- *интеграция для функциональной диверсификации*: трехмерная интеграция; интеграции разнообразных функций на S_i базе структуры КМОП;

- *реализация передовых многозатворных структур*: изготовление передовых непланарных МОП-полевых транзисторов с рядом затворов длиной менее 10 нм; контроль эффектов короткого канала; проектирование истока/стока для контроля паразитного сопротивления; тепловая скорость и механизм квазибаллистики, усиленные напряжениями;

- *эффективная экономически установка трехмерных схем И-НЕ на 512 Гб÷4 Тб*: реализация ЗУ с энергонезависимой памятью (NVM) на дешевых, высокоплотных, маломощных схемах памяти с высоким быстродействием для больших систем;

- *решение проблем надёжности при внедрении новых материалов, процессов и структурных изменений*: надёжность трехмерных соединений; электромиграция (образование пор в межсоединениях); возрастание статических колебаний внутренних механизмов отказов в масштабируемых и непланарных приборах; необходимость управления пределами надёжности для правильного понимания надёжности на уровне микросхем; надёжность встроеной электроники в экстремальных и критических условиях; TDDB, NBTI, PBTI, HCI, RTN в масштабируемых и непланарных приборах;

- *повышение надёжности современных приборов, структур и материалов*: контроль механизмов отказа, связанных с новыми материалами и структурами для транзисторов и соединительных элементов; увеличение уровня надёжности систем с ненадёжными приборами.

1.5 Основные направления развития радиационно стойкой электронной компонентной базы, используемой в РКТ

Для создания БРЭО для РКТ используются сотни различных номиналов микросхем в интегральном и гибридном исполнении, а также широкий спектр дискретных ПП-элементов ЭКБ различной мощности и частоты использования. Все характеристики БРЭО находятся в прямой зависимости от используемых процессоров и/или микропроцессоров (Core Processing Unit – CPU). На рисунке 8 представлена упрощённая структура основных направлений развития ПП-микроэлектронной ЭКБ для космических применений: микропроцессоры (МП);

различные типы ОЗУ; логические и интерфейсные микросхемы, микросхемы организации электропитания и т.п., и все они подразделяются на сотни номиналов различных микросхем, микропроцессоров или процессоров различной мощности и частоты, от которых зависят характеристики БРЭО.

1.5.1 Развитие микропроцессоров, используемых в БРЭО

Микропроцессор (МП) – это программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессами обработки, выполненными на одной или нескольких интегральных схемах (ИС) с высокой степенью интеграции электронных элементов (БИС, СБИС).



Рисунок 8 – Упрощённая структура основных направлений развития РС полупроводниковой ЭКБ для РЭА, используемой в РКТ

1.5.2 Основные направления развития микропроцессоров, микроконтроллеров и сигнальных микропроцессоров

Микропроцессоры подразделяются на три основных типа:

- универсальные микропроцессоры (УМП) – используются для построения систем: ПЭВМ, вычислительных комплексов, бортовых систем управления (БСУ), параллельных суперЭВМ. Основной характеристикой УМП является наличие встроенных устройств эффективной реализации операций с плавающей запятой над 32- и 64- разрядными и более длинными операндами;
- микроконтроллеры (МК) – используются во всех встроенных системах управления РКТ. Интегрируя на одном кристалле, высокопроизводительный процессор, память и набор периферийных устройств, МК позволяют с минимальными затратами реализовать широкую номенклатуру систем управления различными объектами и процессами. Использование МК в БСУ и обработки информации обеспечивает исключительно высокие показатели эффективности при низкой стоимости, поэтому у МК практически нет альтернативной элементной базы для построения качественных и дешёвых систем;
- сигнальные микропроцессоры (СМП) – предназначены для обработки в реальном времени цифровых потоков, образованных путём оцифровывания полученных от датчиков аналоговых сигналов. Они используются для решения задач, которые традиционно решала аналоговая схемотехника. СМП различаются: по стоимости; габаритам; по потребляемой мощности и по разбросу значений этих характеристик в сравнении с МК, также к сигнальным микропроцессорам предъявляются и специфические требования, такие как: максимальное быстродействие; малые габариты; быстрая стыковка с аналого-цифровыми (Analogous-Digital – AD) и цифро-аналоговыми (Digital-to-Analog –DA) преобразователями; большая разрядность обрабатываемых данных и минимальный набор математических операций, обязательно включающий операцию умножения/накопления и аппаратную организацию циклов.

Все микропроцессоры можно классифицировать с помощью такого параметра, как «архитектура». Термин «архитектура», по международному стандарту ISO 15704 означает описание, т.е. способ организации и взаимодействия компонентов МП, обусловленных характеристиками этих компонентов, принципами их проектирования, взаимными связями и развитием, а также включает описание работы логических (программных), функциональных и физических компонентов МП в процессе обработки данных. Описание логических (программных) компонентов включает набор команд, способы адресации, поддерживаемые типы ответвлений и переходов, обращений и наименований регистров микропроцессора. Функциональные и аппаратные компоненты МП включают: описание количества и разрядности компонентов; способы связи между компонентами при обмене данными, командами и управляющими сигналами; описание способов передачи синхросигналов; временные диаграммы работы компонентов МП; описание физического размещения компонента на кристалле. От выбора архитектуры зависит производительность, а также время разработки и стоимость устройств. Архитектура современных микропроцессоров (микроконтроллеров) разных производителей содержит много общего, что позволяет её унифицировать, а это особенно важно для РЭО РКТ с крайне низкими объёмами их потребления.

В настоящее время радиационно стойкими микропроцессорами (РС МП) занимаются компании: BAE Systems; Atmel Cor.; Aeroflex Colorado Springs; Honeywell. Технологии и связанные с ними группы БРЭО, входящего в состав РКТ, условно разделить на группы (рисунок 9):

- ИС управления (биполярные аналоговые и силовые);
- стабилизаторы напряжения, мостовые схемы и ключи, изготовленные по биполярной силовой технологии DOPL;
- стабилизаторы напряжения, мостовые схемы, ключи и системные ИС, изготовленные на платформе КМОП-ДМОП-структур по технологии SPT с BCD;
- мостовые схемы и ключи CD, изготовленные по силовой технологии КМОП-МОП-структур и Smart-интеллектуальных структур;

- ключи и транзисторы D, изготовленные по технологии силовой МОП-структуры и FET-полевые транзисторы.

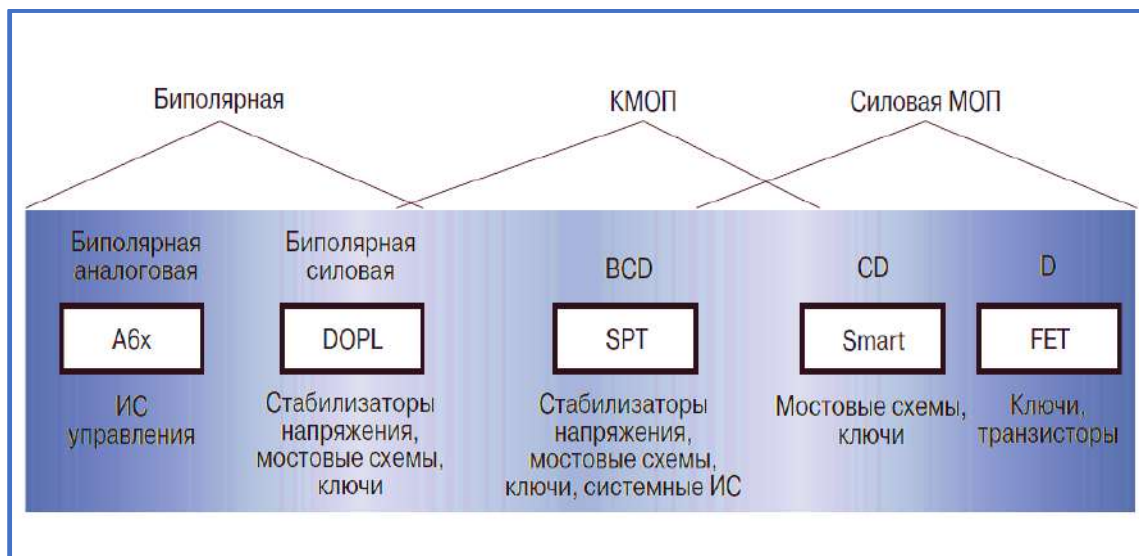


Рисунок 9 – Обзор технологий и групп БРЭО для РКТ

1.5.3 Биполярные технологические процессы изготовления транзисторов

В биполярной технологии изготовления (bipolar processing) в качестве активных элементов используются переходы типа *npn*- и *pnp*- в структурах биполярных транзисторов. Для биполярных структур не требуются затворы из поликристаллического кремния (поликремния-материала, состоящего из мелких кристаллитов кремния, занимающего промежуточное положение между аморфным и монокристаллическим кремнием). Такие технологические процессы содержат меньшее количество технологических операций и поэтому более рентабельны, а степень их интеграции зависит от класса по пробивному напряжению, а класс пробивного напряжения – от размеров интегральных транзисторов.

1.5.4 Технологический процесс изготовления структуры КМОП- транзистора

Структура КМОП (комплементарная металл-оксидный полупроводник (CMOS)-транзистора - это технология, в которой используются только *p*- и *n*-канальные МОП-транзисторы с затвором из поликремния; конденсаторы и резисторы в качестве слоя поликремния. Обкладками конденсатора служит

слой поликремния и легированная подложка, а диэлектриком – оксидный слой. Технология КМОП-транзистора оптимизирована для решения логических функций, что позволяет создавать устройства небольшого размера с высокой степенью интеграции и с низкими напряжениями питания (5В; 3В; 1,8В).

1.5.5 Технологический процесс изготовления структуры МОП-транзистора методом двойной диффузии ДМОП-транзистора

Структура ДМОП - это силовая технология изготовления МОП-транзистора методом двойной диффузии (Double diffused metal-oxide-semiconductor DMOS), который оптимизирован для работы в коммутационных схемах с большими токами и высокими напряжениями. Транзисторы имеют длинный канал, благодаря чему достигается высокое пробивное напряжение. Если в прибор, изготовленный по силовой ДМОП-технологии, добавить дополнительные карманы *p*- и *n*-типа, то появляется возможность сочетания дополнительных функций в одном устройстве, т.е. МОП-транзисторы становятся интеллектуальными.

1.5.6 Технологический процесс выращивания высококачественных окислов МОП-транзистора

Выращивание высококачественных окислов для МОП-транзистора является главной проблемой для использования разработанного технологического процесса, ибо большинство материалов из окислов III–V групп не обладают высокой подвижностью носителей *p*-типа. Для обоих типов каналов (*n*- и *p*-типа) предпочтительно использовать одинаковые элементы типа германий (G_e), который по сравнению с кремнием (Si) имеет более высокую подвижность носителей *n*- и *p*-типа, а чтобы добиться требуемых величин пороговых напряжений при объединении S_i -КМОП с G_e -КМОП необходимо при изготовлении такого прибора ПП-ЭКБ использовать три типа высококачественных диэлектриков и несколько видов металлических затворов для разных рабочих функций. При этом длина затвора транзистора уменьшается

до 10 нм, что позволяет эффективно осуществлять контроль коротких каналов сверхтонкого многозатворного МОП-полевого транзистора с легированными каналами с толщиной тела, соответствующей значению ≤ 5 нм, что накладывает дополнительные ограничения на требования, предъявляемые к паразитному сопротивлению «исток/сток».

1.5.7 Технологические процессы изготовления твердотельных СВЧ-приборов

Твердотельные СВЧ-приборы – это особый ряд электронно-вакуумных приборов, объединённых с твердотельными СВЧ-интегральными схемами, которые заметно улучшают их электрические характеристики и позволяют реализовывать специфические режимы генерации мощности в требуемых частотных диапазонах. Данная технология имеет двойное назначение и её применение в производстве ЭКБ в США составляет около 80%.

1.5.8 Технологический процесс производства радиационно стойких полевых транзисторов на основе антимонидов щелочных металлов (GaAs, InP, SiC)

Ведущие микроэлектронные компании мира особое внимание уделяют производству РС полевых транзисторов со структурами на основе антимонидов щелочных металлов (G_aAs , I_nP , S_iC) типа:

- полупроводниковый транзистор с высокой подвижностью электронов (high-electron-mobility transistor – HEMT);
- биполярный гетеротранзистор (bipolar heterotransistor – HBT);
- полевой транзистор (field-effect transistor – FET);
- полевой транзистор с барьером Шоттки (metal-semiconductor barrier MES);
- МОП-транзистор с боковой диффузией (lateral diffusion metal oxide semiconductor – LD MOS).

Основные направления развития твердотельной электронной компонентной базы для классов СВЧ – приборов представлены в таблице 2 с их основными ТТХ и запланированными достижимыми численными значениями параметров по годам (на 2011, 2015 и 2020 гг.):

- генераторные СВЧ-диоды на широкозонных полупроводниковых материалах;
- твердотельные генераторы шума;
- полевые генераторные СВЧ-транзисторы;
- полевые малошумящие СВЧ-транзисторы;
- синтезаторы частот для РЛС и средств РЭП;
- твердотельные генераторы шума на полевых СВЧ-транзисторах;
- высокостабильные малошумящие ММІС-генераторы;
- ММІС-генераторы с электрической перестройкой частоты;
- малошумящие монолитные усилители см- и мм- диапазонов длин волн (в т. ч. на НЕМТ-структурах и тройных соединениях);
- малошумящие широкополосные ММІС-усилители;
- сверхширокополосные ММІС-усилители мощности;
- ММІС и устройства для приемопередающих модулей АФАРХ-диапазона;
- ММІС-преобразователи сигналов (умножители, делители, коммутаторы, детекторы и др.);
- линии задержки.

Таблица 2 – Основные направления развития твердотельной СВЧ-ЭКБ на период до 2020 г.

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
1. Генераторные СВЧ-диоды на широкозонных полупроводниковых материалах			
Мощность генерации на частоте, мВт/ГГц	500/37; 100/100	30-50/300	50-50/300
2. Генераторные СВЧ- транзисторы			
Выходная мощность на частоте, Вт/ГГц	500/1; 40/3; 6/10	1000/1; 100/3; 10/10	1000/1; 200/3; 15/10
3. Малошумящие СВЧ- транзисторы			
Коэффициент шума на частоте, дБ/ГГц	0,3/12; 1,5/60	0,3/12; 1,5/60	1 ÷ 1,5/100
4. ММIS-генераторы высокостабильные и малошумящие			
Верхняя частота, ГГц	37,5	60÷100	220
Нестабильность частоты, отн.ед.	$10^{-4} \div 10^{-6}$	$10^{-5} \div 10^{-7}$	$10^{-5} \div 10^{-7}$
Непрерывная выходная мощность, мВт	10 ÷ 30	20 ÷ 50	20 ÷ 50
5. ММIS-генераторы с электрической перестройкой частоты			
Диапазон частот, ГГц	0,3 ÷ 100	0,3 ÷ 200	0,3 ÷ 300
Выходная мощность, мВт	10 ÷ 300	10 ÷ 300	10 ÷ 300
Полоса перестройки, %	10 ÷ 67	10 ÷ 67	10 ÷ 67
Долговременная нестабильность частоты, отн.ед.	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
6. Генераторы шума твердотельные			
Диапазон частот, ГГц	0,3 ÷ 150	0,3 ÷ 300	0,3 ÷ 300
Уровень СПМШ, дБ / κT^0	20	30	30

**7. Малошумящие монолитные усилители см- и мм- диапазонов длин волн
(в т.ч. на НЕМТ-структурах и тройных соединениях)**

Коэффициент шума на частоте 44 ГГц, дБ	1 ÷ 2	0,8	0,5
Коэффициент шума на частоте 60 ГГц, дБ	3 ÷ 4	2,5	1,5
Коэффициент шума на частоте 44 ГГц, дБ	5 ÷ 6	4 ÷ 5	3,5
Полоса частот, %	10 ÷ 33	10 ÷ 66	10 ÷ 66

8. ММІС-усилители малошумящие широкополосные

Диапазон частот, ГГц	1 ÷ 26, 26 ÷ 40	1 ÷ 60	1 ÷ 60
Коэффициент шума, дБ	6	5	5

9. ММІС-усилители мощности

Выходная мощность на частоте 9 ГГц, Вт	10 ÷ 12	20	30
Выходная мощность на частоте 40 ГГц, Вт	5	8	10
Выходная мощность на частоте 110 ГГц, Вт	1 ÷ 1,5	2	3
Удельная мощность на частоте 10 ГГц, Вт/мм	0,7 ÷ 0,8	1,5 ÷ 1,8	3,0 ÷ 3,5
КПД в см диапазоне, %	35	Более 40	40 ÷ 50
КПД в мм диапазоне, %	20 ÷ 25	25 ÷ 30	30 ÷ 40

10. сверхширокополосные ММІС-усилители мощности

Диапазон частот, ГГц	1 ÷ 18, 18 ÷ 26, 26 ÷ 40	1 ÷ 18, 18 ÷ 26, 26 ÷ 40	1 ÷ 110
Мощность, Вт	1 ÷ 2	2 ÷ 3	5
Удельная мощность, Вт/мм	0,7 ÷ 0,8	1,5 ÷ 1,8	3,0 ÷ 3,5

11. ММІС и функциональные устройства для приемопередающих модулей АФАР X-диапазона

Диапазон частот, ГГц	9 ÷ 10,5	8 ÷ 12,5	8 ÷ 12,5
Выходная мощность импульсная, Вт	10 ÷ 12	15	25
КПД, %	30	45	45 ÷ 50

Продолжение таблицы 2

Коэффициент шума, дБ	1,5 ÷ 1	менее 1	менее 1
Дискрет фазы, град	5,128	2,8	2,8
Время переключения фазы, мкс	0,05	0,025	0,0125
12. Модули-синтезаторы частот для РЛС и средств РЭП			
Диапазон частот, ГГц	0,3 ÷ 0,05	0,5 ÷ 170	0,5 ÷ 170
Время переключения, мкс	0,05	0,1 ÷ 0,003	0,1 ÷ 0,003
Нестабильность частоты, отн.ед.	10 ⁻⁵⁰	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²
13. ММIS-преобразователи сигналов (умножители, делители, коммутаторы, аттенюаторы, детекторы, смесители и пр.)			
Диапазон частот, ГГц	0,9 ÷ 30	0,3 ÷ 60	0,3 ÷ 100
14. Линии задержки			
Задержка, мкс	3	10	до 100

1.5.9 Технологический процесс изготовления запоминающих устройств в микропроцессорах БРЭО КА

Микросхемы адресных запоминающих устройств (рисунок 10) широко используются в бортовых микропроцессорных системах РЭО, применяемого в РКТ с целью сохранения команд управления, данных и др. необходимой информации и классифицируются как:

- оперативные запоминающие устройства (ОЗУ - random access memory RAM,); статические (static random access membraneless – SRAM); динамические (dynamic random-access memory – DRAM); регистровые (RG) и постоянные запоминающие устройства (ПЗУ-ROM, read-only memory), обеспечивают сохранение информации без электропитания: масочные; однократно программируемые пользователем (на заводе); многократно стираемое программируемое ПЗУ (erasable programmable read-only membraneless – EPROM) и электрически стираемое ППЗУ (electrically erasable programmable read-only memory – EEPROM);

- ферроэлектрическое ОЗУ (ferroelectric random-access memory – FRAM) или ферримагнитная память начала использоваться в качестве ОЗУ с 2007 г. В настоящее время для изготовления перспективных ОЗУ применяются два альтернативных оксида из элементов $PZT-P_b(Z_r, T_i)O_3$ и $SBT-S_r(Bi_2, Ta_2)O_9$, а также, изучаются и другие перспективные материалы на элементах типа: $BLT-(Bi_3La)_4Ti_3O_{12}$ и $BFO-(BiFeO_3)$;

- энергонезависимость в микросхеме FRAM достигается переключением состояния поляризации ферроэлектрического конденсатора. Для считывания информации из FRAM-памяти необходимо отследить петлю гистерезиса фотоэлектрического конденсатора и после считывания снова записать данные. «Разрушительный» режим считывания требует обязательного подбора ферроэлектрических материалов при изготовлении электрода, обеспечивающего изменение поляризации и необходимую стабильность в течение длительного рабочего цикла. Схемы FRAM-памяти обладают быстроедействием с малой мощностью применения и удобны для встроенных применений;

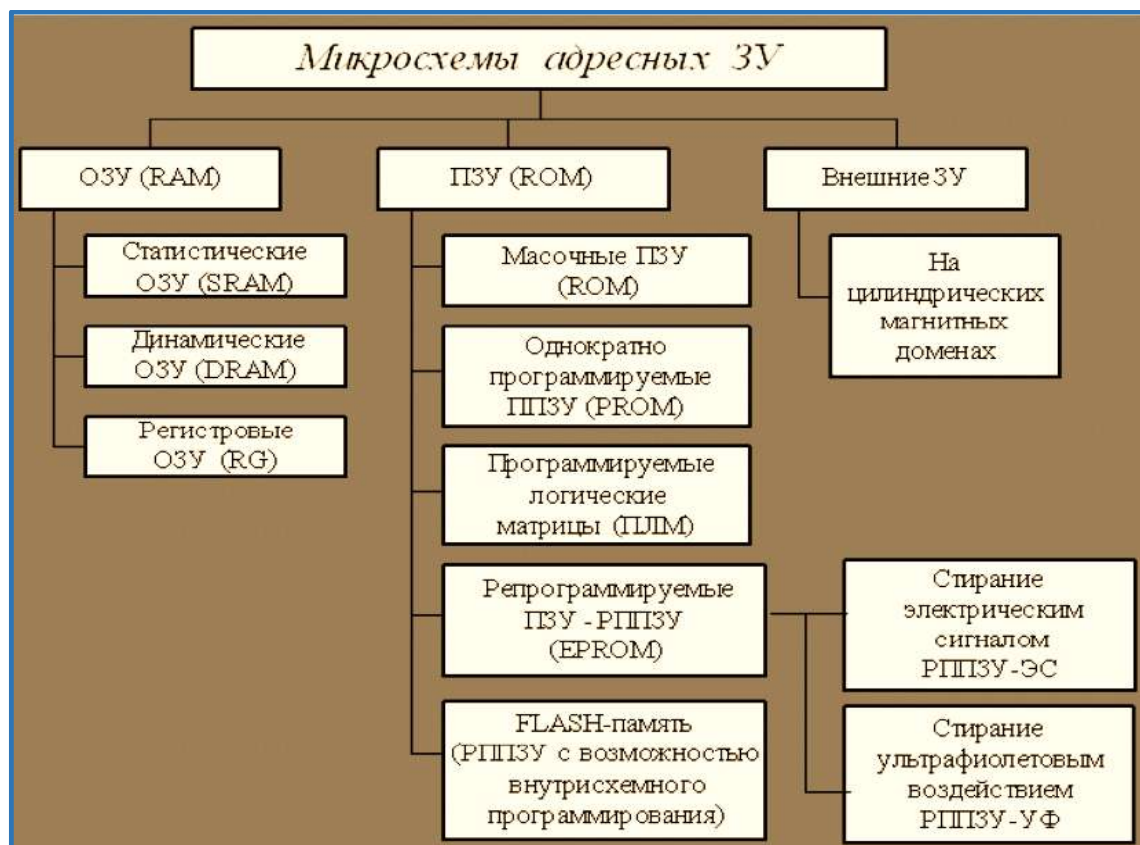


Рисунок 10 – Классификация оперативных запоминающих устройств

- в магниторезистивном ОЗУ или магнитном запоминающем устройстве (magnetoresistive random access memory – MRAM) используется магнитный туннельный переход и элемент памяти. Ячейка магнитного туннельного перехода состоит из двух ферромагнитных материалов (слоёв), разделённых тонким изолирующим слоем, работающим как туннельный барьер. Считывание информации из MRAM осуществляется измерением электрического сопротивления «ячейки» и определением полярности перезаписываемого слоя. Одинаковая ориентация намагниченности в слоях элемента интерпретируется как $|0\rangle$, а противоположное направление намагниченности слоёв, характеризующееся более высоким сопротивлением – как $|1\rangle$. MRAM обеспечивает быстроедействие как у статического ОЗУ (SRAM) при меньшем, чем у динамического ОЗУ (DRAM) энергопотреблении и не подвержен деградации, как Flash-память, что делает MRAM «универсальной памятью» для БРЭО ПКТ;

- нерешённой остаётся задача использования в схемах памяти типа DRAM управления величиной большого тока, используемого для восстановления/изме-

нения фазы ОЗУ при относительно большом времени настройки. Взаимодействие материала изменения фазы с материалом электрода может обеспечить долгосрочную надёжность и ограничить стойкость к циклам;

- счётчик команд (Current-Instruction Register – CIR) – это один из важных регистров, следящих за последовательностью выполнения команда (текущая, затем следующая).

Регистры (RG) используют для кратковременного хранения небольших по объёму данных. Технология записи информации в регистр (ОЗУ) построена на принципе реализации разницы удельного сопротивления между аморфным и кристаллическим состоянием халькогенидного стекла ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ или GST) для запоминания логических бинарных уровней |1| и |0|. Прибор состоит из верхнего электрода, слоя изменяющейся халькогенидной фазы и нижнего электрода. Канал утечки отсекается транзистором доступа, последовательно соединённым с элементом изменения фазы.

В таблице 3 приведены показатели РС микросхем памяти основных компаний-производителей ПП РС ЭКБ для использования в РЭО авиакосмического назначения.

1.5.10 Технологический процесс изготовления переноса спинового момента SST в магниторезистивном ОЗУ или магнитном запоминающем устройстве

Технологический процесс изготовления переноса спинового момента (Spin-torque-transfer – SST) является наиболее перспективным, он использует электроны с заданным состоянием поляризации спина «поляризованные», прямого вращения. Это уменьшает величину тока, необходимую для записи информации в «ячейку» MRAM и потребление тока становится одинаковым при чтении и записи. Использование технологии STT наиболее актуально при технологическом процессе 65 нм и менее.

Таблица 3 – Типовые показатели радиационной стойкости микросхем памяти основных компаний-производителей

Компании производи- тели	Выпускаемые ИС-памяти	Технология	Суммарная доза, Pafl (Si), 10 ⁵	Мощность дозы импульсного излу- чения, pafl(Si)/с			Эффекты от ОЯЧ			SEU _{thn} , МэВ ÷см ² /мг 10 ¹⁴
				Отказы, 10 ¹¹	Сбои, 10 ⁹	Защелкива- ние, Ю ¹⁰	SEU _{th} , МэВ- см ² /мг	SEL _{th} , МэВ- см ² /мг	CTsat, см ² /бит10 ⁸	
Honeywell (США)	SRAM, ROM	КНИ, КМОП	3÷10	0,1÷10	1÷10	нет		нет	0,01	0,01÷1
Intersil (США)	SRAM, PROM	КМОП	>3	*	>0,5	*	*	*	0,5÷10	*
Aeroflex - UMTS	SRAM, SDRAM	КМОП	<(0,1÷3)	*	1	>10	*	>4÷100	0,5÷10	3
Amtel Cor. (США)	SRAM, EEPROM, FIFO	КМОП	0,3-3	*	*	*	1-7	>80	7-20	
Maxwell	SRAM, DRAM, EEPROM, OTP, EPROM, FLASH	КМОП	1	*	*	*	>(3÷90)	>(68÷120)	<0,8	*
BAE Systems	SRAM, PROM	КМОП	>(2÷10)	>10	>1	*	*	нет	*	1

* У компании-производителя информация отсутствует.

Примечание: в таблице 3 используются следующие сокращения

SRAM – статические ОЗУ; ROM – ПЗУ; PROM – программируемые ПЗУ; EPROM – ПЗУ с электрическим стиранием;

FIFO – память с организацией «первым вошел-первым вышел»; DRAM – динамические ОЗУ;

EEPROM – электрически-перепрограммируемые ПЗУ; FLASH – флэш-память;

SEU_{th}, SEL_{th} – пороги возникновения одиночных сбоев и эффектов защелкивания от ОЯЧ;

SEU_{thn} –порог возникновения одиночных сбоев от нейтронов.

1.6 Сертификация радиационно стойкой ЭКБ для БРЭО космических применений

Мировой опыт свидетельствует о том, что процесс сертификации необходимых технологий производства РС ЭКБ реализуется механизмами частного партнёрства через заинтересованные государственные институты.

1.6.1 Сертификация производства РС ЭКБ в США

Вопросами сертификации производства РС ЭКБ в США организационно занимаются три ведомства: Министерство обороны, Министерство энергетики (МЭ) и NASA. С 2001 г. МО США реализует программу ускоренного развития РС ЭКБ в рамках Программы производства вооружений (Defense Production Act, Title III). Эта Программа контролируется Агентством по уменьшению военной угрозы, подчиняющимся заместителю МО США по закупкам, технологиям и логистике. Поставки ЭКБ для нужд МО США и для др. ведомств контролирует Центр снабжения ВС США в Колумбусе (DSCC), а производство РС ЭКБ реализуют в основном несертифицированные компании типа: Сандийские лаборатории МЭ США; небольшие компании частного бизнеса типа Peregrine Semiconductor, а их взаимодействие с промышленностью и различными ведомствами координирует Центр микроэлектроники (DMEA) в Сакраменто, шт. Калифорния, США.

Качество выпускаемой ими продукции контролируется по стандартам национальных и международных программ с оценкой:

- уровня качества технологий производства с формированием базы данных на квалифицированных производителей и фиксацией их в реестре сертифицированных изготовителей ЭКБ в Центре DSCC МО США (Qualified Manufacturers List – QML);

- работы технологических линий, выполняемых производителями по технологиям производства полупроводников (FSC5961), интегральных и гибридных микросхем (FSC5962);

- уровня качества ПП-продукции с формированием базы данных по номенклатуре выпускаемой продукции и с перечнем элементов, разрешённых к применению (Qualified Parts List – QPL).

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) США проводит работы по сертификации РС микроэлектроники в Лаборатории реактивного движения Стэнфордского университета (JPL).

1.6.2 Сертификация производства РС ЭКБ в Европейском космическом агентстве

Европейское космическое агентство (ESA) имеет опыт кооперации при создании специализированной РС ЭКБ совместно с компаниями Atmel и Aeroflex (США). Европейский координационный комитет по космическим компонентам ESCC (European Space Components Coordination) действует под эгидой ESA и осуществляет координацию организаций и компаний, занятых в производстве электронных компонентов, задействованных в сфере изучения космоса, в т. ч. и национальных космических агентств Великобритании, Германии, Италии, Ирландии и Франции. В своей повседневной деятельности ESCC занимается разработкой документов по стандартизации и сотрудничеству в сфере космического приборостроения, поддерживает базу данных по нормативно-технической документации и занимается вопросами качества применительно к РС ЭКБ для РКТ, а также оказывает поддержку в разработке, согласовании и корректировке нормативно-технической документации: справочники и руководства по ЭКБ и РЭА для космических применений; стандарты ESCC; спецификации ESCC на отдельные типы РС ЭКБ, используемые в РЭА для РКТ. Комитетом ESCC выпускаются следующие документы: ESCC REP005 – Перечень по квалифицированной продукции; ESCC REP006 – Перечень по квалифицированным производителям; EPPL – Европейский список приоритетных ПП-изделий ЭКБ, в том числе и радиационно стойких.

1.6.3 Сертификация производства и стандартизации космического приборостроения на основе РС ЭКБ Японским агентством аэрокосмических исследований

Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) совместно с рядом компаний создало специализированное производство изделий РС ЭКБ для РКТ. Институт космических исследований и астронавтики совместно с JAXA разработали технологию производства РС логических ИМС с высокой и приемлемой стоимостью на полупроводниковую продукцию. Это было достигнуто путём интеграции технологий проектирования РС ИМС с современной технологией полупроводниковых структур «кремний на сапфире» от компании-производителя Mitsubishi Heavy Industries Ltd; была создана библиотека блоков для проектирования ИМС с перспективой их применения в других секторах радиоэлектронной промышленности.

Агентство (JAXA) занимается разработкой, согласованием и корректировкой нормативно-технической документации на следующих уровнях: спецификации квалификационных тестов на отдельные виды ЭКБ космического применения; данных по использованию ЭКБ на отдельные виды РКТ.

В документах агентства (JAXA) хорошо просматривается согласованность нормативной и технической документации, принятой Центром DSCC США, NASA и Советом ESCC. Вопросы, методологически и организационно связанные с качеством ЭКБ, государственными организациями (DSCC, NASA, ESCC и JAXA), решаются идентично, это относится также и к сертификации технологических производств, занятых процессом контроля качества РС ЭКБ.

Только у Европейского координационного комитета по космическим компонентам (ESCC) проявляются некоторые организационные и технические решения, связанные с различиями в оценках уровней качества РС ЭКБ и наличием постоянных инспекторов Комитета ESCC на каждом предприятии, сертифицированном по программам QML и QPL, где все РС изделия ЭКБ:

- успешно протестированы в соответствии со стандартом ESCC-Q-60;
- включены в список квалифицированных производителей ESCC;

- входят в программу QML по классам V, K и S, выданную Центром МО США DSCC;

- входят в QPL-каталоги, выпускаемые организациями: ESCC и DSCC – MIL (класс S, ER уровень R); JAXA (класс S, ER уровень R) и включены в перечень NASA NPSL, с уровнем 1, 2 и 3.

Радиационно стойкая ЭКБ из перечня EPPL при производстве должна отвечать требованиям хоть одного из критериев по QPL-каталогам организаций: Центр МО США DSCC – MIL-стандарт (уровень B, JANTXV, ER уровень P); Комитет ESCC-регистр; Агентство JAXA (уровень B, ER уровень P);

- РС ЭКБ, компоненты которой, принадлежат к QML класса Q, класса H, класса B или JANTXV, выданные Центром МО США DSCC;

- РС ЭКБ, компоненты которой оценены как используемые в космических проектах, и для производства которых существует минимальный набор данных: анализ конструкции; электрические характеристики; результаты ресурсных испытаний; механические данные (для электромеханических компонентов); данные радиационных испытаний (для чувствительных компонентов);

- РС ЭКБ, компоненты которой также имеют следующие данные производителя: квалификационные данные; технологические данные, данные о ресурсных испытаниях, надежности, данные об эксплуатационных и сертификационных испытаниях.

Наиболее значимыми профессиональными некоммерческими ассоциациям электронной промышленности, которые занимаются вопросами организации стандартизации электронных, электрических и смежных технологий производства и использования ПП-микроэлектроники относятся Международная электротехническая комиссия (International Electrical Commission – IEC) и Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization – ISO).

1.6.4 Применение системы MIL-стандартов в категорировании продукции ЭКБ в США, ЕС и других странах мира

Особо следует вспомнить области применения системы MIL-стандартов в категорировании продукции ЭКБ в США, которая получила широкое признание и использование во всем мире:

- Military (военного назначения), к ней предъявляются высокие требования по критериям отказоустойчивости, используемых материалов и применяемых промышленных технологий;

- Space (космического назначения) является самой высокотехнологической продукцией и имеет жесткие ограничения по ряду параметров в сравнении с продукцией военного назначения, обладает более высокими требованиями по радиационной стойкости, отказоустойчивости и скорости передачи данных;

- Industrial (индустриального назначения) соответствует стандартам международных профессиональных ассоциаций (объединений) промышленности. Качество продукции подтверждается сертификатами соответствия, выданными компанией-производителю этими профессиональными ассоциациями промышленности;

- Commercial (коммерческого назначения) соответствует спецификациям компании производителя, разработанным исходя из маркетинговых концепций продвижения ЭКБ на рынок; при этом гарантом качества данной продукции является только внутренняя система менеджмента и качества предприятия.

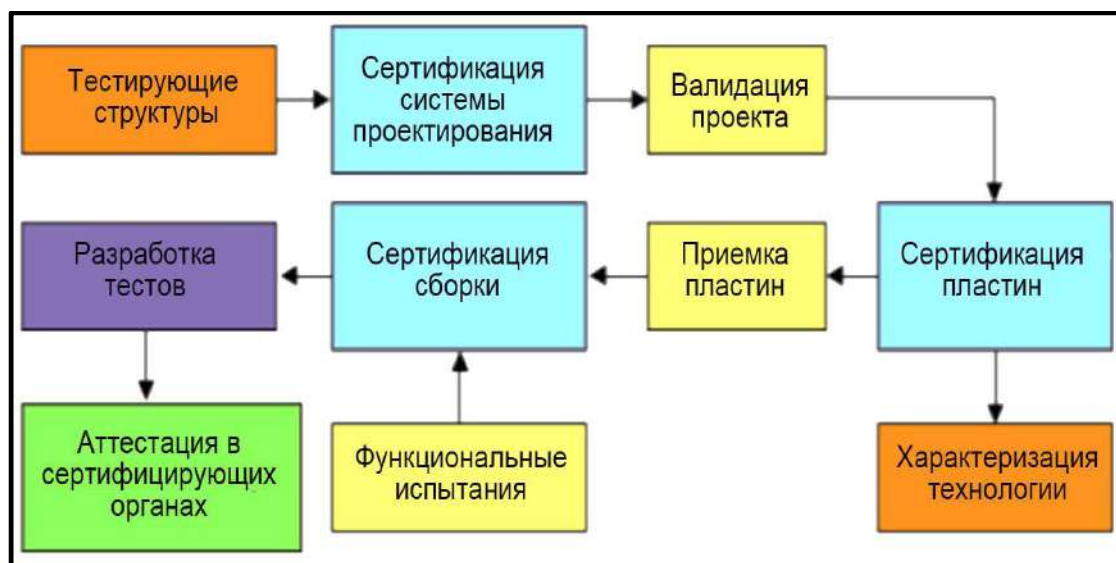


Рисунок 25 – Схема сертификации СБИС MIL-стандарта и категории Space

Самые жёсткие требования, которые предъявляются к процессам организации производства и сертификации РС ЭКБ, рассмотрены на стандартной схеме последовательности выполнения процесса сертификации СБИС, изготавливаемой для РКТ и построенной на требованиях MIL-стандартов категории Space от этапа их разработки до начала производства, представлена на (рисунок 25).

Каждая СБИС MIL-стандарта и категории Space проходит обязательную сертификацию, предусматривающую большое количество испытаний электрических и механических свойств прибора в условиях ДФКП и ИИ, являющихся критерием отказоустойчивости ЭКБ.

Как показано на гистограмме (рисунок 26), приборы (ЭКБ), изготовленные на технологических линиях с разными требованиями, согласно MIL-стандартам, и выдержавшие испытания, будут иметь и разную частоту отказов (λ), а следовательно, разное время жизненного цикла и надёжность их эксплуатации в РКТ.

Точки (черные и белые на гистограмме) показывают два этапа отбраковки в соответствии уровнем качества сертифицируемой ЭКБ: на заводе-изготовителе ЭКБ, где обеспечивается основной отсев потенциально ненадёжных компонентов и в сертификационном центре, где осуществляется окончательная очистка партий ЭКБ, оставленных по заказу.

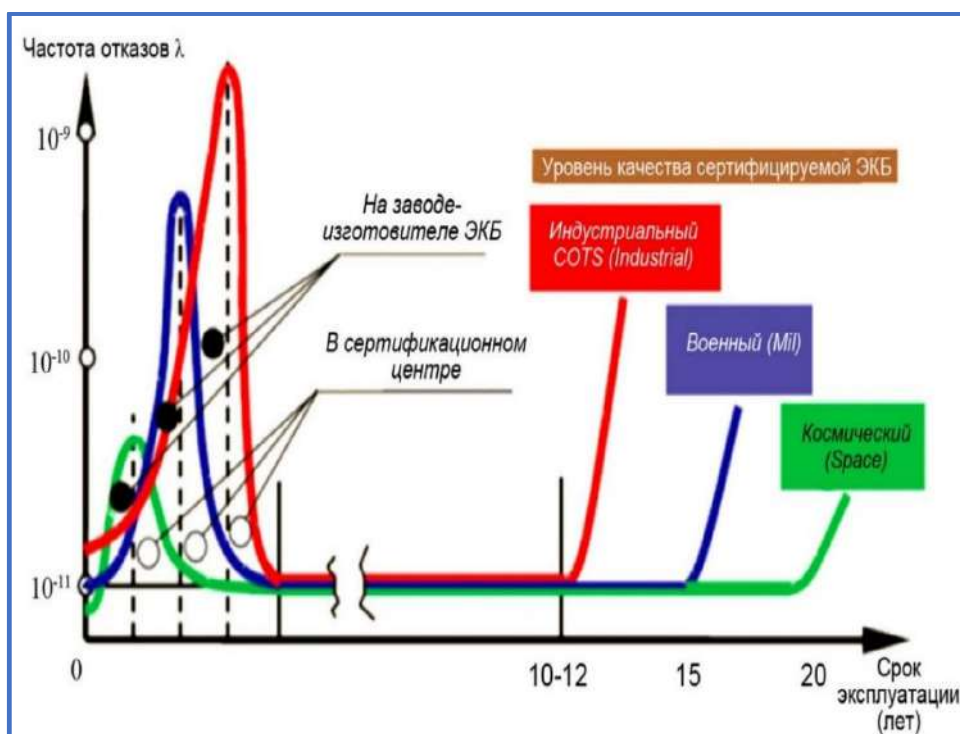


Рисунок 26 – Уровни качества и надёжности ЭКБ согласно MIL-стандарту

2 АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННО СТОЙКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Анализ материалов исследований, проведённых в США, ЕС, Израиле, Японии, Китае, Индии и др. странах Юго-Восточной Азии (ЮВА) по вопросам развития и совершенствования ПП-микроэлектроники, позволили выявить и сформулировать следующие основные проявившиеся тенденции:

- ряд научных центров мира проводят исследования по активному изучению и поиску новых перспективных структур соединений из элементов и материалов с повышенной подвижностью носителей **n**- и **p**- типа для изготовления подложек каналов полевых транзисторов, причем указанные технологические изыскания настолько важны, что их осознание, понимание, моделирование и внедрение признаны крайне необходимыми;

- покупка и поставка специализированной РС ЭКБ из США, ЕС и стран ЮВА в другие страны стали жестко ограничиваться вводимыми и действующими контрольными списками и санкциями;

- производство компонентов ЭКБ БРЭО для космических применений осуществляется под контролем специально выработанных стандартов с высокими требованиями к радиационной стойкости и надёжности ПП-микроэлектроники, а также к специфике условий её производства и эксплуатации;

- изготовление номенклатурных рядов перспективных изделий ПП-микроэлектроники: ИМС, СБИС, микропроцессоры, вентили и матрицы и т.д., осуществляется по специальным технологиям КМОП/КНИ, КМОП/КНС на карбиде кремния (SiC); на арсениде галлия (GaAs); на нитриде бора (BN), а также на промышленном алмазе с применением соединений из элементов типа T_iN ; Ru ; RuO_2 ; Ir ; IrO_2 ;

- объединение структур соединений из элементов типа Si КМОП с Ge КМОП выполняется посредством использования диэлектриков с высокой диэлектрической постоянной $k \sim 100$, которые увеличивают подвижность носителей **p**- и **n**-типа;

- использование уникальных технологий применения новых структур «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП) совместно с высококачественными диэлектриками и новыми металлическими электродами в затворах направлено на: улучшение характеристик изготавливаемых компонентов; качества сопутствующих материалов; расширение перечня функциональной номенклатуры ЭКБ;

- для формирования канала полевого транзистора в нем технологически создаются специальные деформации, которые обеспечивают сверхвысокую подвижность носителей, а во взаимодействии с новыми соединениями позволяют выращивать новые кристаллические структуры со сверхтонкими слоями, на крайне обеднённом сапфире FinFET (Field Effect Transistor with Fin с затвором «рыбий плавник»);

- по мнению ученых, более перспективно внедрение разработанного технологического процесса перспективного масштабирования магнитной оперативной памяти на структуре «метал-оксид-полупроводник» полевого транзистора (МОП-ПТ), чем масштабирование полностью обедненного кремния на изоляторе (SOI);

- создание и освоение новых конструктивных решений для изготовления многозатворных структур МОП-ПТ, подложек и многослойных конструкций затвора на металлических электродах;

- внедрение многозатворных приборов структур МОП-ПТ посредством использования чистой меди вместо золота, золотого покрытия и/или других специальных материалов предполагает появление и изготовление новых типов ИМС и микросхем памяти, а также использование новых высококачественных диэлектриков при изготовлении затворов МГ-структур и металлических затворов, которые тесно связаны со свойствами КМОП-структур, но со значительно улучшенными характеристиками;

- производство в США комплементарных МОП-структур (КМОП) представлено широкими номенклатурными классами ИМС, логических схем и микросхем памяти, которые занимают значительный объем в производстве в общем сегменте ПП-микроэлектроники и являются одними из главных источников финансовых доходов компаний и фирм в данном сегменте отрасли;

- совершенствование технологических линий по изготовлению новых ИС с динамической и статической энергонезависимой памятью и расширение производства ИМС (чипов памяти), управляющих технологическими процессами с резким расширением и увеличением ассортимента номенклатуры их производства, позволили основным американским компаниям-производителям ПП-микроэлектроники упрочить свои позиции на мировых рынках данной товарной продукции для широкого коммерческого потребления, но с определенным временным отставанием;

- использование мировыми ведущими компаниями-производителями ПП-микроэлектроники защитных экранов и пленок при корпусировании, препятствующих проникновению ДФКП и ИИ в приборы для повышения их РС;

- уменьшение проектных норм изготовления РС СБИС. Так, компания BAE Systems (США) приступила к выпуску специализированных РС СБИС с топологией 45 нм, а корпорация Samsung (Южная Корея) производит ИМС типа NAND-flash-памяти, выпускаемые на технологических линиях с топологией 60 нм и 42 нм;

- интеграция в условиях функциональной диверсификации данного сектора промышленного производства строится в основном на специальных характеристиках кристаллов, используемых в технологиях при их изготовлении, которые позволяют выполнять варьирование не только быстродействием, степенью интеграции, мощностью, уровнем шума, надёжностью, но и многофункциональностью выпускаемых приборов на одном кристалле, примером тому являются датчики, микроэлектромеханические системы, фотогальваника, приборы энергосбережения, радиочастотные приборы миллиметрового диапазона длин волн;

- перед микроэлектронной промышленностью поставлена одна из важнейших задач по увеличению плотности интеграции одного кристалла, вплоть до создания трехмерной интеграции и выше, но серьёзным препятствием в решении этой задачи являются такие факторы, как: индуцированные напряжения и токи наводки, высокие температурные режимы работы приборов, паразитные ёмкости, интерфейсы, высокие требования к используемым диэлектрикам, к процес-

сам совместимости приборов друг с другом, изготавливаемых на кристалле, которые при их проектировании, моделировании, создании и изготовлении необходимо тщательно изучать ученым и разбираться технологам производств;

- технологические достижения в ПП микроэлектронике в какой-то момент позволят реализовать новые технологические решения, например исполнение схем токопроводящих дорожек между элементами оптических соединений или использование углеродных нанотрубок, или замена классических МОП-ПТ структур на полевые транзисторы с туннельным эффектом. Это потребует проведения серьезных исследований и компьютерного моделирования, а полученная информация позволит оценить надежность новых конструкций корпусов, защитных экранов, провести испытания как статической, так и физической модели с варьированием напряжениями, геометрией структур, изучением применения новых материалов и срока их службы;

- основные поставки РС ЭКБ для широкого применения в ВВТ и РКТ выполняют компании с богатым производственным опытом такие, как Raytheon, Harris, Maxwell и др., которые уже 40÷50 лет работают по контрактам в интересах МО США и NASA, а исследования, проводимые Управлением перспективных исследований и разработок (DARPA) в области производства перспективной РС мелкосерийной ЭКБ, будут реализованы на новых технологических линиях, разработанных ими и запуск которых намечен в 2020 г.;

- в мире наметился неуклонный рост доли гражданского рынка в производстве ПП-микроэлектроники. Так, в 2016 г. общий объем продаж РС ЭКБ составил уже более 30%, что обусловлено активным развитием коммерческих фирм и компаний, занимающихся спутниковыми телекоммуникационными системами и БРЭО для военных и космических применений;

- прослеживается увеличение спроса на ряд РС ЭКБ с низкой ценовой планкой, связанной с созданием и развитием малых, сверхмалых и наноКА (SmallSat, CubeSat и NanoSat), жизненный цикл существования которых не превышает 2÷3 года. В связи с этим многие мировые производители РС ЭКБ начинают применять практику стандартизации и сертификации номенклатурных рядов и для самой нижней ценовой категории изделий;

- производством изготовления кристаллов кремния, наряду с другими редкоземельными металлами, обладают всего несколько стран в мире, что практически исключает возможность приобретения на международном рынке исходных материалов, необходимого сырья и соответствующих технологий в силу их ограниченного количества и жесткой конкуренции рынка сверхчистых материалов;

- электронная промышленность США, выпускающая ПП-микроэлектронику, контролирует более 50% всего глобального рынка, а ёмкость всего рынка в 2016 г. оценивалась в 336 млрд долл. США, обеспечив более 250 тыс. высокотехнологичных рабочих мест;

- аналитиками МО США и NASA установлено, что ряд фирм мирового рынка производителей, активно подключившихся к поставкам РС ЭКБ, стали выпускать на рынок контрафактную продукцию. В результате этого встала необходимость тщательного контроля продукции всех рынков ПП-микроэлектроники, с целью выявления таких компаний и недопущения их к государственным контрактам, ибо только за 2012 г. США выявлено 396 фирм-производителей РС ЭКБ из Великобритании, Китая, США и др. стран, поставивших контрафактную продукцию по спецзаказам для РЭО в интересах ВВТ и РКТ. Такое положение дел привело к многочисленным расследованиям и принятию срочных мер по недопущению подобной продукции к контрактам компаний, занятых в выпуске изделий для МО США и NASA.

3 ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА, ОСНОВАННЫХ НА СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДАХ И ПОДХОДАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКОЙ ЭКБ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В США И ДРУГИХ СТРАНАХ ДО 2026 ГОДА

В настоящее время в США активизированы НИОКР в сфере технологий производства ПП-микроэлектроники с целью создания новых поколений РС ЭКБ для РЭО перспективных систем ВВТ, авионики и РКТ. Современные методы, способы и подходы, используемые для создания и обеспечения радиационной стойкости специализированной ЭКБ космического назначения можно разделить на следующие основные группы: технологические методы (способы) повышения стойкости; схемотехнические и конструкционные способы, а также методы математического моделирования воздействия ИИДФКП на этапе проектирования ЭКБ и проведения полноволнового планарного (2,5D) или пространственного (3D) ЭМ-анализа с целью получения данных о функционировании приборов в составе устройства (рисунок 27).



Рисунок 27 – Подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства

Меры, обеспечивающие проектирование и создание радиационной стойкости ЭКБ для космических применений зависят от двух независимых факторов, а именно - специальных конструкторских решений по применению защиты ЭКБ от различных воздействий ИИДФКП и устранение дефектов, снижающих их стойкость. Для реализации этих решений и

устранения выявленных дефектов и был разработан специальный комплекс организационно-технических мероприятий, существенно увеличивший затраты изготовления РС ИМС, но в целом оказавшийся менее затратным, чем весь процесс разработки новой РС ИМС с последующим внедрением её в производство.

Анализ отказов ЭКБ показал, что на понижение РС сильно влияют разнообразные дефекты, нарушающие запроектированную геометрию прибора и внутреннюю однородность его элементов, такие как: врождённые дефекты исходного материала (вакансии); дефекты, возникшие от термических процессов; дефекты фотолитографии и т.д.

3.1 Использование перспективных специализированных технологических методов и процессов изготовления приборов полупроводниковой микроэлектроники и специализированных материалов в РС ЭКБ для БРЭО космических применений

3.1.1 Технологические методы и способы создания специализированной ЭКБ для космической отрасли

Технологические методы и способы, используемые в создании специализированной ЭКБ, чрезвычайно дорогостоящие и потому были реализованы на малом числе производственных линий, а ведущими производителями изготовления подобных ЭКБ стали компании Honeywell и Peregrine Semiconductors (США) и ряд других.

По прогнозам американских аналитиков к 2026 г. наряду с использованием традиционных технологий изготовления ПП-структур типа (КНС) «кремний на сапфире» (SOS) и (КНИ) «кремний на изоляторе» (SOI) ожидается:

- внедрение усовершенствованных технологических линий со сложными ПП-соединениями, в частности карбида кремния (SiC);
- изготовление передовых сверхтонких многозатворных сильно масштабированных МОП–ПТ с легко легированными каналами и с длиной затвора до 10 нм, позволяющих эффективно использовать все достоинства прибора и осуществлять контроль коротких каналов с толщиной тела (плавника) менее 5 нм,

но при этом эффекты квантовых ограничений и рассеяния на поверхности тонких структур ещё до конца не выявлены, т.к. начинают проявляться дополнительные требования к паразитному сопротивлению *исток/сток*;

- обновление конструкции и архитектуры схемы регулирования параметров и мощности транзистора использованием *метода параллелизма*, как подхода для улучшения работы схем и параметров системы в целом, при резком снижении мощности пассивных транзисторов обеспечивает применение необходимых кристаллов с нужными параметрами и требуемым рассеянием мощности. Из-за фундаментальных ограничений допороговой крутизны в 60 мВ/декада трудно масштабировать напряжение динамической плотности мощности V_{dd} в отличие от других параметров. Характерно, что указанная тенденция значительно усложняется, с достижением напряжения в 0,6 В, и вместе с ростом плотности тока на единицу площади начинает увеличиваться динамическая плотность мощности (пропорционально V_{dd}^2), хотя при этом мощность транзистора падает до недопустимых пределов;

- в разработках последних 10 лет ученые активно исследовали возможность перехода ЭКБ на применение в серийном производстве схем памяти на пластинах из кремния (Si) диаметром $d \sim 450$ мм вместо 300 мм. В 2012 году эта проблема получила логическое решение. Пять крупнейших производителей микроэлектроники мира, включая фирмы IBM, Intel (США) и IMEC (Бельгия), объединили свои усилия, создав единый консорциум Global-450 Consortium и подписали между собой соглашение на производство высококачественных кремниевых пластин диаметром 450 мм. Начало их серийного производства ожидается в 2018÷2020 гг. Параллельно был разработан и принят единый международный стандарт на автоматизированную линию обработки кремниевых пластин, на порты выгрузки-загрузки, объемы загрузки и кассеты, также была доработана технологическая линия по производству микросхем памяти, которая позволяет выпускать как пластины диаметром 450 мм, так и пластины диаметром 300 мм, и тем самым создает условия для производства ИМС из кремниевых пластин высокого качества с диаметром $d \sim 450$ мм;

- исследована возможность перехода на широкое применение в серийном производстве схем памяти на кристаллах арсенида галлия, благодаря его высокой радиационной стойкости при использовании в микроэлектронных приборах РЭО

космического применения. На практике было установлено, что приборы, изготовленные на кристаллах арсенида галлия ($GaAs$), обладают радиационной стойкостью, значительно превышающей свойства приборов на пластинах из кремния (Si) в условиях воздействия радиационных ИИ.

3.1.2 Технологические способы интеграции кристаллов в одном корпусе (СБИС типа СВК)

Технологические способы интеграции кристаллов в одном корпусе (СБИС типа СВК) являются перспективными и основаны на применении подхода «система в корпусе». Данное технологическое производство типа СВК (система в корпусе/System in Package - SiP) - это система, состоящая из комбинации из нескольких активных элементов различной функциональности, собранная в единый модуль корпуса, обеспечивающая реализацию разных функций и имеющая пассивные и оптические компоненты, МЭМС и другие приборы и устройства в корпусе. Объединение различных компонентов в одном корпусе дает существенные преимущества: конструкция, основанная на ранее разработанных, сертифицированных кристаллах и/или на бескорпусных микросхемах (МП, ОЗУ, ПЗУ, ИМС) с многократным повтором их использования на всех этапах проектирования и изготовления, становится значительно меньше, легче, надёжней и дешевле. Технологическая цепочка разработки и изготовления ЭКБ с высокой степенью интеграции (СБИС типа СВК) включает ряд обособленных технологических подциклов, которые могут выполняться на различных производственных площадях и иметь формализованные процедуры контроля и приёма результатов от каждого подцикла. Важнейший этап этой цепочки – производственное изготовление СБИС типа СВК, партии пластин с кристаллами микросхем, с высокими показателями отказоустойчивости в условиях воздействия ИИДФКП, которые целесообразно применять с технологиями КНИ («кремний на изоляторе») или КМОП ОК («объёмный кремний»).

3.1.3 Технологический способ КМОП КНИ («кремний на изоляторе»)

Технологический способ КМОП КНИ обладает преимуществами по сравнению с технологией КМОП ОК подавляет «тиристорный эффект»; повышает

стойкость к одиночным сбоям; обеспечивает высокое быстродействие и пониженное энергопотребление.

Существенно увеличивается радиационная стойкость ИМС путём применения схемотехнических и конструктивно-технологических решений (рисунок 28):

- использованием как подложки МОП-структуры, тонкой слаболегированной эпитаксиальной плёнки (карман), расположенной на скрытом слое сильнолегированной подложки, так и применением диэлектрической изоляции в интегральных элементах для устранения эффекта «защёлкивания» ***p-n-p-n***-структур, возникающего из-за «протекания фототоков»;
- формированием резистора на сильнолегированных полупроводниковых слоях или применением тонкоплёночных резисторов;
- уменьшением толщины окисла и максимальным увеличением концентрации примеси в области ***p***-типа проводимости;
- формированием вокруг ***n***-МОП-транзисторов сильнолегированных охранных колец ***p***-типа проводимости (рисунок 28 б);
- исключением контакта ***n+*** эмиттерной области БТ с окислом и уменьшением периметра ***n+*** эмиттерной области;
- максимальным увеличением плотности эмиттерного тока БТ за счёт уменьшения площади эмиттера;
- выполнением эмиттера и коллектора горизонтальных ***p-n-p***-транзисторов с помощью сильнолегированных ПП-областей и образованием инверсионного слоя посредством аккумуляции индуцированного ИИ положительного заряда в окисле кремния (SiO_2), который приводит к появлению токов утечки «исток» ↔ «сток» и между областями ***n***⁺-типа ближайших МОП-транзисторов ИМС.

Для компенсации дефектов в КМОП ИМС, связанных с паразитными ***pn-pn*** структурами, предложено использовать элементы, разрывающие цепи паразитных тиристоров. Примером может служить конструкция с двумя охранными кольцами, с изолирующими канавками, с буферным слоем, тип проводимости которого противоположен типу проводимости подложки, благодаря чему возникает ***p-n***-переход. При изготовлении затвора МОП-транзистора в качестве

диэлектрика используется слой SiO_2 определенной толщины, полученный в результате травления, а переходная область окисла используется для концентрации зарядов;

Утечку тока «исток» \leftrightarrow «сток» можно устранить в структуре с замкнутым затвором, если ток «стока» будет протекать только под затвором. Для устранения утечек между n -МОП-транзисторами сформированы охранные кольца p -типа проводимости, к которым подведено максимальное количество токопроводящих контактов, соединённых с отрицательным напряжением источника электропитания (рисунок 28b).

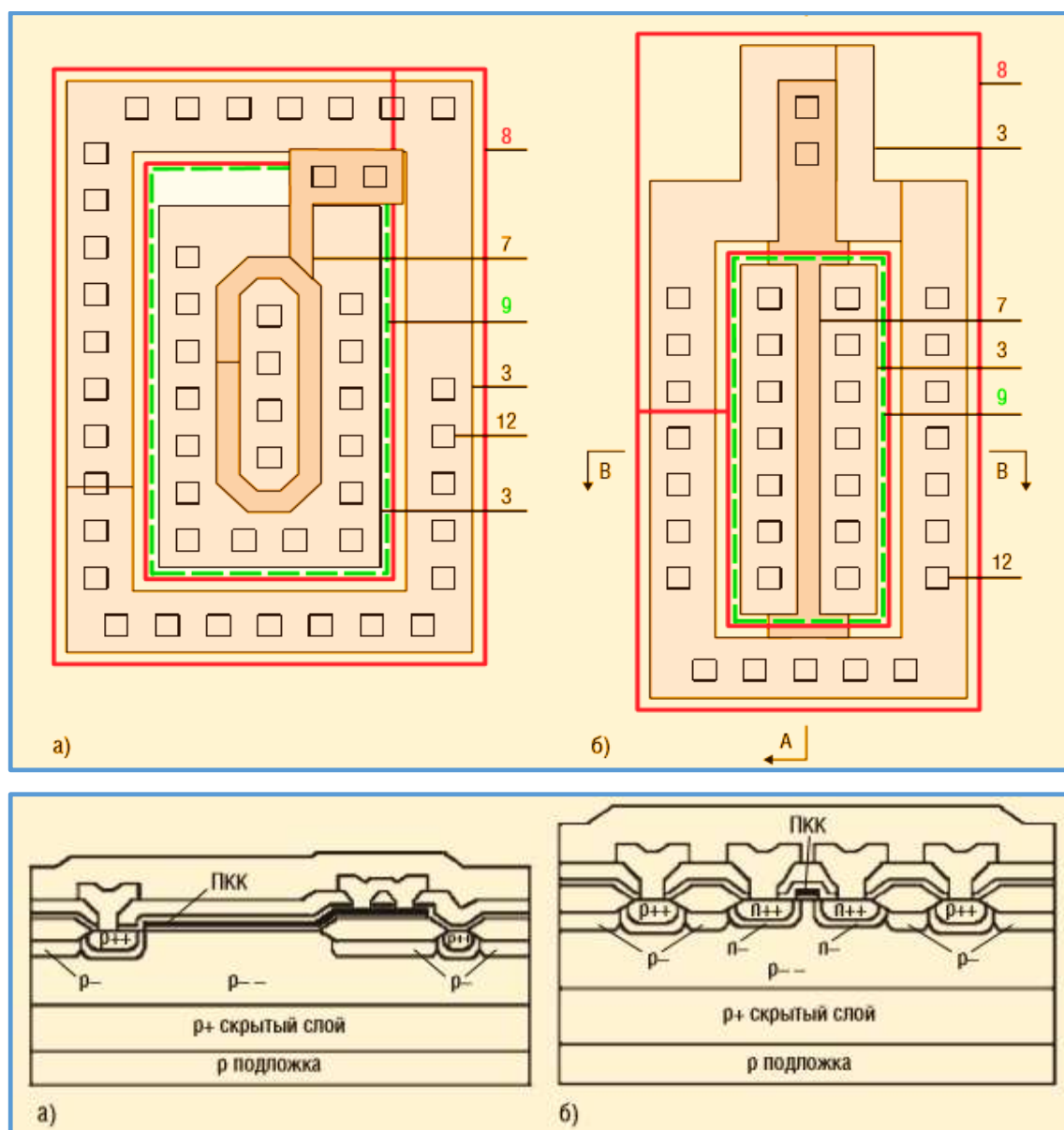


Рисунок 28 – Эскиз топологии и разрез конструкции n -МОП-транзисторов с замкнутым затвором (а), с охранным кольцом (б)

Значения цифр на рисунке 28 соответствуют: 3 – разделение (вне слоя 3 – локальный окисел), 7 – ПКК-затвор, 8 – p^+ - «исток», 9 – n^+ - «исток», 12 – контакты.

Для устранения утечек между n -МОП-транзисторами сформированы охранные кольца проводимости p^+ -типа, к которым подведено максимальное количество контактов, покрытых токопроводящими межсоединениями с отрицательным напряжением. Уменьшение сопротивления охранных колец устраняет эффект «защёлкивания» p - n - p - n -структур. В альтернативной конструкции n -МОП-транзистора (рисунок 28а) для предотвращения утечки между n^+ -областями «исток» \leftrightarrow «сток» вдоль толстого локального окисла «затвор» выводится охранный кольцо по тонкому подзатворному окислу.

Исключительно высокая стоимость современных субмикронных производственных линий по изготовлению кристаллов для многих типов приборов РЭО, используемого в ПП-микроэлектронике, требует привлечения многих предприятий подрядчиков, работающих по коммерческим технологиям и не обладающих системами контроля качества, которые соответствовали бы требованиям производства изделий как для космического, так и для военного применения. Это предполагает наличие соответствующих точек входа в технологическую цепочку производства ЭКБ для несертифицированных комплектующих в виде полуфабрикатов пластин с кристаллами для ИМС.

3.1.4 Технологические методы интегрированной защиты РС ЭКБ ®Maxwell

В данном направлении серьезно продвинулась корпорация Maxwell Technologies Inc., производственные технологические линии обработки и изготовления специально отобранных коммерческих кристаллов для ЭКБ которой подтверждены соответствующими патентами США. Технологические методы интегрированной защиты РС ЭКБ ®Maxwell (рисунок 29а) являются собственностью корпорации и распространяются на производственные процессы изготовления изделий:

- интегрированной защиты типа Rad-Pak®;
- интегрированной защиты от рентгеновского излучения Xray-Pak®;

- многоуровневого корпусирования Rad-Stak[®];
- от защелкивания LPT[®].

Технологические методы интегрированной защиты РС ЭКБ типа Rad-Pak[®] Maxwell – являются базовыми в линиях производственных процессов и позволяют значительно повышать накопленную предельно-допустимую дозу ИИ для коммерческого кристалла в составе РС ЭКБ путём применения методов его изоляции и экранирования.

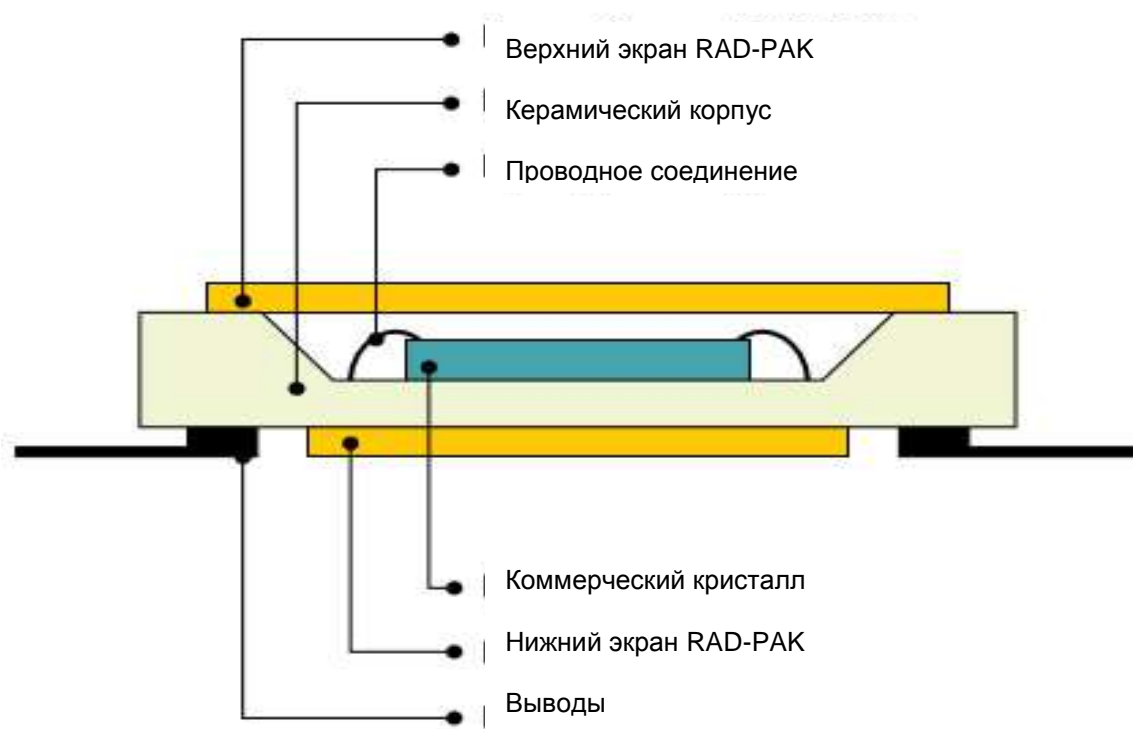


Рисунок 29а – Схема интегрированной защиты RAD-PAK[®] Maxwell

3.1.5 Технологический метод Xray-Pak[®] Maxwell

Обеспечивает защиту от рентгеновского излучения в результате дополнительного экранирования с торцов корпуса ИМС.

3.1.6 Технологический метод Rad-Stak[®] Maxwell

Применяется для изготовления ОЗУ памяти с информационной ёмкостью ≥ 1 Гбит типа SDRAM, что позволяет значительно снизить габаритные размеры ИМС и обеспечивает высокую плотность размещения кристаллов внутри её корпуса.

3.1.7 Технологический метод LPT® Maxwell

Указанный технологический метод LPT® (Latch Up Protection Technology) Maxwell – защищает ИМС от эффекта «защёлкивания», возникающего вследствие воздействия на прибор тяжёлых частиц (протоны, электроны, альфа-частицы). Динамика защитных свойств интегрированной РС ЭКБ Rad-Pak® Maxwell, используемой в БРЭО КА изменяется в зависимости от орбиты нахождения КА:

- на ГСО радиационная стойкость ЭКБ Rad-Pak® от воздействия ИИ повышается в 500 раз, т.е. $D_{\text{нак}} \geq 100$ крад(Si);
- на НОО технология Rad-Pak® усиливает радиационную стойкость ЭКБ в 7 раз;
- на СВО – только в 4 раза.

В корпорации Maxwell могут смоделировать результаты воздействия жёсткого ИИ на конкретный кристалл изделия, доступного на коммерческом рынке ИМС, находящегося на борту КА при известных параметрах его пространственного местоположения на околоземной орбите, и определить его пригодность для работы в условиях воздействия ДФКП. Высокое качество РС ЭКБ компании Maxwell подтверждается применением её приборов в различных программах типа: AIM, Calipso, GPSII, ATV, Express, Glonass, AMOS-3.

3.2 Использование технологического метода низкой статической мощности в микросхемах памяти

Технологический метод низкой статической мощности при изготовлении микросхем памяти позволяет выполнять быструю замену низких параметров быстрого действия или низкой мощности рассеяния:

- ведутся разработки по созданию и производству РС энергонезависимых оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), которые подразделяются на:

- ферримагнитные ОЗУ (ferroelectric random access memory – FRAM);
- магнитоэлектрические (магниторезистивные) ОЗУ (magnetoresistive random-access memory – MRAM);
- энергонезависимые наномеханические ОЗУ (nonvolatile random access membraneless – NRAM);

- голографические схемы памяти (holographic circuit) на халькогенидных соединениях ОЗУ с изменяемым фазовым состоянием (Phase Change RAM – PCRAM);

- реализуются новые структуры памяти ОЗУ в направлении уменьшения размеров элементов схем памяти динамического оперативного запоминающего устройства (ДОЗУ), что в свою очередь приводит к возрастанию сложности процесса изготовления, особенно при уменьшении размеров площади конденсатора ОЗУ и требует использования сверхтонких диэлектриков с эквивалентной толщиной окисла из высококачественных материалов, чтобы обеспечить очень низкие токи утечки и низкое рассеяние мощности.

Замена схемы памяти на статическое ОЗУ (СОЗУ) приводит к весьма положительному решению, связанному с отказом от применения в схеме памяти от конденсатора:

- уже существующая структура СОЗУ на 6 транзисторах меньше по размерам и обеспечивает наибольший эффект, а быстродействующие энергонезависимые схемы памяти с высокой плотностью топологии и малой мощностью потребления в настоящее время крайне необходимы;

- долгосрочная надёжность новых приборов СОЗУ связана с новыми изменениями в структурах, материалах и, возможно, потребует масштабирования трехмерной монокристаллической архитектуры типа вертикально упакованной матрицы ячеек схемы памяти с нужными параметрами и хорошим качеством выпуска годных приборов;

- энергонезависимая память на несвязанных ОЗУ трансформируется в трехмерную структуру и может достичь терабитной плотности, а успех решения зависит только от выбора прибора с эффективной изоляцией (диэлектриком), но потребует для окончательного доведения до промышленного производства проведения ряда исследовательских разработок, чтобы увеличить плотность топологии схемы памяти до 1 терабита и выше.

3.3 Технологические методы производства монолитных интегральных ММІС СВЧ-схем за рубежом

К настоящему времени стандартизованы системы автоматизированного проектирования монолитных интегральных СВЧ-схем (САПР ММІС СВЧ), сконструированных на основе объёмного электродинамического моделирования, нелинейного анализа и применения шаблонных решений, реализованных на технологических линиях предприятий, занимающихся разработкой и организацией серийного производства РЭО гражданского, двойного, а также специального назначения по выпуску мощных рабочих станций телекоммуникационных систем.

Заканчивается переход предприятий ПП-микроэлектроники на серийный выпуск кристаллических пластин арсенид галлия ($GaAs$) диаметром 150÷200 мм, ставших основным материалом для изготовления твердотельной СВЧ-электроники и мощных вакуумных СВЧ-приборов миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн. Главными потребителями ММІС СВЧ-приборов и устройств, являются предприятия космической отрасли:

- в последние годы за рубежом (США, Англия, Франция, Япония, Германия и др.) наиболее бурно развивались твердотельная СВЧ-электроника и мощные вакуумные СВЧ-приборы миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн;

- технология монолитных интегральных СВЧ-схем (ММІС) СВЧ-диапазона, работающих на частотах 30÷40 ГГц с длиной затвора 0,25 мкм, стала эталонным стандартом в результате выполнения программ ММІС, MASFET (США), а многие компании уже освоили технологии 0,1÷0,15 мкм для изготовления приборов СВЧ-диапазона в миллиметровом диапазоне длин волн;

- созданы и выпускаются промышленностью США:

- сверхширокополосные монолитные усилители с коэффициентом шума менее 3 дБ в полосе частот 2÷18 ГГц;
- широкополосные монолитные усилители на полосы частот до 100 ГГц;
- монолитные усилители мощности с выходной мощностью до 5 Вт на кристаллах для полосы частот 6÷18 ГГц и с КПД до 60%;
- гибридные твердотельно-вакуумные усилители с удельной мощностью свыше 80÷100 Вт/кг в полосе 6÷18 ГГц и КПД 25÷40%;

- ряд компаний освоили технологическое производство многофункциональных ММІС с площадью пластин $20 \div 40 \text{ мм}^2$ (годностью производства в $50 \div 75\%$ на выходе) на базе гетероструктурных биполярных транзисторов, обеспечивающих $1,5 \div 2$ -кратное увеличение КПД и удельную мощность широкополосных ММІС;

- псевдоаморфные гетероструктурные полевые транзисторы с мощностью до 1,5 Вт на частоты 18 ГГц при КПД 50% и усилении 9,5 дБ.

Основными материалами, используемыми для производственного изготовления монокристаллов для интегральных СВЧ-схем (ММІС) являются:

- кремний (Si), для низкочастотных ММІС;
- кремний-германий (SiGa), для НЧ ММІС-схем управления и обработки;
- арсенид галлия (GaAs), для высокочастотных ММІС;
- фосфид индия, нитрид галлия ($\text{In GaAs} / \text{GaAs}$), для ММІС-схем на миллиметровый диапазон длин волн.

В количественном соотношении наиболее массовыми являются СВЧ-приборы на основе арсенида галлия (GaAs). Говоря об арсениде галлия, прежде всего имеют в виду гетероструктуры типа AlGaAs/GaAs , InGaAs/GaAs и т.д. и созданные на их основе транзисторы (биполярные и полевые НЕМТ с барьером Шоттки).

Подвижность электронов ($8500 \text{ см}^2/\text{В с}$), ширина запрещённой зоны и напряжённость поля пробоя ($1,42 \text{ эВ}$ и $4 \times 10^5 \text{ В/см}$ соответственно) делают GaAs предпочтительнее кремния (Si) в области СВЧ. Более 95% рынка монокристаллов арсенида галлия составляют два типа материалов, равны по объёму производства: полуизолирующий GaAs с удельным электросопротивлением $> 10^7 \text{ Ом см}$, используемый при производстве СВЧ-приборов; а GaAs с сильно легированным кремнием ($10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и с низкой плотностью дислокаций применяется при изготовлении СД и лазеров. Эпитаксиальные технологии продолжают оставаться основным методом изготовления активных слоев СВЧ-приборов на ионной имплантации непосредственно в подложку арсенида галлия и именно эта технология задает основные тактико-технические требования на изготовление данных полуизолирующих материалов: высокое удельное сопротивление, обеспечивающее надежную изоляцию активных областей ($> 10^7 \text{ Ом см}$); низкое содержание фоновых примесей, присутствие которых снижает концентрацию носителей заряда в активном слое; высокую

однородность распределения электрофизических параметров по поперечному сечению слитка, выращенного методом кристаллографии. Все эти требования в объемном материале выполнить трудно, поэтому был разработан и предложен технологический метод создания буферных слоев на полуизолирующей подложке арсенида галлия выращиванием толстого эпитаксиального слоя с высоким удельным сопротивлением. Активный буферный слой создается либо эпитаксиальным наращиванием, либо методом ионной имплантации буферного слоя. Использование данного метода позволяет маскировать нежелательные свойства подложки, но при этом, усложняется процесс и увеличивается стоимость изготовления прибора.

В результате проведенных исследований полуизолирующего арсенида галлия появилась возможность практически создавать активный слой, удовлетворяющий всем требованиям, непосредственно прямо на подложке. Структурное качество и однородность свойств подложечного материала определяют и параметры отдельного прибора, и процент выхода годных приборов с пластины в целом. Для того чтобы выращивать структуры с минимальным содержанием дислокаций несоответствия, используются подложки того же материала, что и наращиваемые эпитаксиальные слои, при этом обязательным остается соблюдение правила минимального рассогласования периодов решетки, также возникает проблема в получении высококачественных однородных, полуизолирующих монокристаллических подложек, используемых в приборах СВЧ-электроники, а также оптоэлектроники, микро- и нанoeлектроники, силовой электроники, вычислительной и лазерной техники и электроэнергетики;

- актуальным продолжает оставаться вопрос получения подложек с высокими значениями удельного сопротивления, высокой подвижностью, макро- и микрооднородностью распределения свойств по пластине;

- ведётся разработка ЭКБ активных СВЧ-приборов, включающих создание базовых технологий производства транзисторов и монолитных ММІС СВЧ-микросхем на основе гетероструктур материалов группы A_3B_5 , приемопередающих СВЧ-субмодулей на L-, S-, C- и X-диапазонах длин волн, многофункциональных ММІС СВЧ на основе нитридных гетероэпитаксиальных структур ($AlGaAs/GaAs$, $InGaAs/GaAs$), гетероструктур «кремний-германий» ($SiGe$) и т.д.;

- снижение динамической мощности достигается применением технологии низких параметров, что особенно важно в логических микросхемах с высокими параметрами, когда увеличение сложности кристалла и повышение тока включения транзистора, наряду с выполнением жестких целей масштабирования параметров, трудно реализовать, не потеряв контроля рассеяния статической мощности на кристалле.

3.4 Использование технологических методов нанотехнологий

Научно-исследовательские центры NASA и МО США занимаются выполнением широкомасштабных НИОКР по разработке РС ЭКБ на основе наноразмерных материалов. Проводимые исследования мотивируются возможностью снижения стоимости изделий, улучшением технических характеристик приборов и повышением РС ЭКБ. В ходе работ по созданию РС наноматериалов и ЭКБ на их основе учёные установили, что наиболее высокой РС обладают: нанопорошки металлов; наноразмерные углеродные трубки; графены; наноразмерные структуры на квантовых точках и квантовых ямах и пористые материалы. При этом использовались результаты как экспериментальной отработки, так и компьютерного моделирования, что позволило уже на этапе изготовления прогнозировать и учитывать радиационную обстановку на конкретном участке расчетной траектории ракеты-носителя или орбиты КА, уровень энергии и поток ионизирующих частиц, а также и прогнозируемый срок эксплуатации БРЭА.

Механизм образования радиационных дефектов в наноматериалах связан со смещением узловых атомов кристаллической решётки высокоэнергетическими частицами ионизирующего излучения и образованием неравновесных вакансий и атомов в междоузлиях. При последующем отжиге наноматериалов (например, углеродных наноразмерных трубок при температуре +450°C) образовавшиеся радиационные дефекты могут быть устранены. Высокая радиационная стойкость наноматериалов и по критерию деградации параметров, и по критерию скорости образования радиационных дефектов однозначно связана с эффектом наномасштаба. По одной из моделей только 20% смущённых под воздействием

ИИ узловых атомов наноматериалов формируют структурные дефекты (т.е. рекомбинируют 80% смущённых узлов атомов). При достижении определённого размера наноструктурных элементов возможна близкая к 100% рекомбинация и практически полное восстановление структуры наноматериала.

3.4.1 Наноматериалы на углеродных наноразмерных трубках

Наноматериалы на углеродных наноразмерных трубках (Carbon nanotube CNT). Углеродные наноразмерные трубки (УНТР) обладают высокой проводимостью, перспективны в функциональных компонентах электронных приборов и предназначены для работы в условиях длительного воздействия на них ИИ.

С помощью УНРТ можно создать полевой транзистор с принципом действия, полностью эквивалентным работе традиционного полевого транзистора, но при этом каналом переноса носителей заряда станет УНРТ. Для изготовления прибора на кремниевую пластину наносят пару электродов «сток/ исток», между которыми располагают УНРТ, а сам кристалл кремниевой пластины является «затвором». В обычном состоянии канал закрыт, т.к. имеется потенциальный барьер для дырок (рисунок 30а). Зона проводимости и валентная зона разделены запрещённой зоной с шириной в несколько эВ (рисунок 30б).

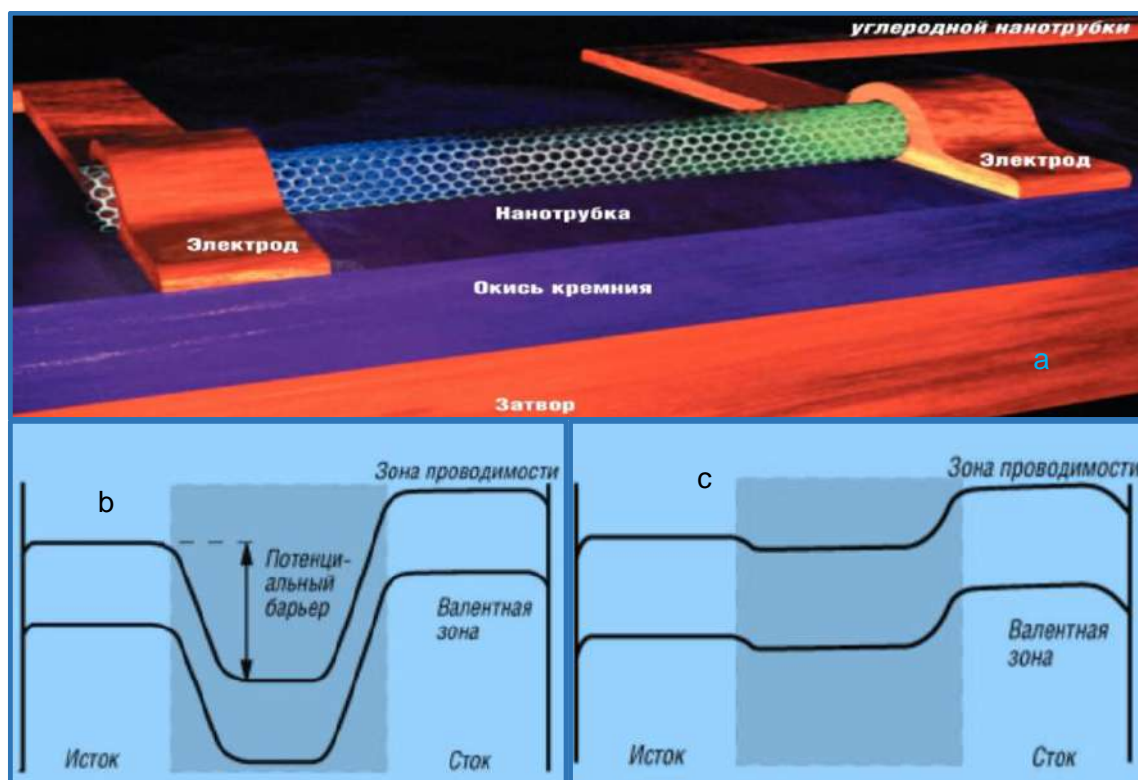


Рисунок 30 – Схема транзистора на углеродных наноразмерных трубках

Если на «затвор», подавать напряжение, которое приведёт к возникновению электрического поля там, где находится УНРТ, то её зонная диаграмма перестраивается (рисунок 30с). Меняя напряжение на «затворе», можно управлять проводимостью нанотрубки и открывать или запирают полевой транзистор.

3.4.2 Наноматериал типа графена

Наноматериал типа графен имеет несколько меньшую, чем у УНРТ радиационную стойкость. Современные высококачественные МОП-транзисторы выполняются по технологии «самосовмещённого затвора». В данном технологическом методе (MOS) «затвор» используется в качестве маски для формирования «стока/истока», вследствие чего точность позиционирования элементов готового устройства увеличивается, но при использовании такого метода в работе в структуре графена появляются *дефекты*, резко ухудшающие характеристики полевого транзистора.

Учёным Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе удалось модифицировать технологический метод и сформировать затвор с помощью нанопровода из силицида кобальта (Co_2Si) с тонкой изолирующей оболочкой из оксида алюминия Al_2O_3 (рисунок 31). Эта структура помещалась на графеновом листе, после чего часть оксидного слоя снималась, чтобы обеспечить контакт между проводящей сердцевинкой и тонкими слоями золота и титана, которые покрывают один конец провода. Слева и справа «стока/истока» размещались контакты, также выполненные из золота и титана. Всё это покрывалось слоем платины толщиной в 10 нм, который разрывался у краёв нанопровода.

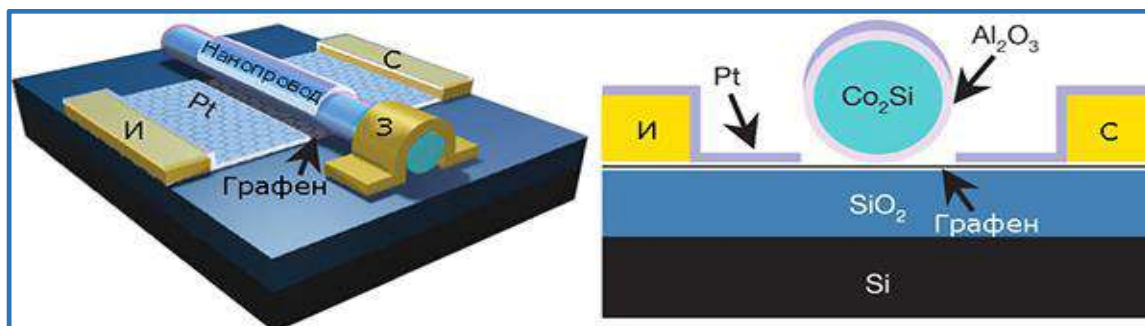


Рисунок 31 – Схема полевого транзистора на графеновом листе, где С – сток, З – затвор, И – источник.

В результате пограничную частоту, на которой коэффициент усиления по току снижается до единицы, удалось увеличить до 300 ГГц.

3.4.3 Элементы ЭКБ на квантовых точках

Элементы ЭКБ на квантовых точках в отличие от квантовых ям, оказались наиболее радиационно стойкими, что прежде всего связано с ростом рассеяния носителей и усилением процессов рекомбинации.

Согласно концепции NASA, конечным результатом фундаментальных исследований в области нанотехнологий становится создание новейших многофункциональных самообучающихся приборов для БРЭО космических систем, адаптирующихся к изменениям ДФКП, обладающих высокой надежностью и радиационной стойкостью.

Особое внимание при этом уделяется технологическим методам разработки наноматериалов и наноустройств, формируемых путем контролируемого процесса сборки из исходных молекулярных структур.

Элементы ЭКБ на квантовых точках являются наиболее радиационно стойкими, в отличие от квантовых ям, что связано с ростом рассеяния носителей и усилением процессов рекомбинации.

Сопоставимые данные по радиационной стойкости полупроводниковых соединений GaAs и GaAs/InGaAs, используемых в матричных фотодиодах на квантовых точках, квантовых ямах и **p-n** переходах и их зависимость от воздействия пучка протонов различной энергии представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Сопоставимые данные по радиационной стойкости матричных фотодиодов на квантовых точках, квантовых ямах и *p-n* переходах при воздействии пучка протонов различной энергии

Полупроводниковое соединение	Структурный элемент	Вид ионизирующего излучения	Энергетические потери от др.*** воздействий МэВ·см ² /г	Фактический флюенс частиц, частиц/см ²	Приведенный флюенс частиц для протонов с энергией 2 МэВ, частиц/см ² ***	Приведенное значение фотолюми-несценции облучённых образцов**
GaAs (объемный материал)	<i>p-n</i> -переход	Протоны, 50 МэВ	$3,45 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{10}$	$5,56 \cdot 10^9$	0,87
GaAs/InGaAs	Квантовая яма	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^9$	$5,66 \cdot 10^9$	0,0*
GaAs/InGaAs	Квантовые точки	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^9$	$5,66 \cdot 10^9$	0,0*
GaAs/InGaAs	Квантовая яма	Протоны, 2,4 МэВ	$2,5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^{13}$	$8,1 \cdot 10^{12}$	0,993
GaAs/InGaAs	Квантовые точки	Протоны, 2,4 МэВ	$2,5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{13}$	0,71
GaAs/InGaAs	Квантовая яма	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^{13}$	$9,7 \cdot 10^{13}$	0,997
GaAs/InGaAs	Квантовые точки	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^{13}$	$9,7 \cdot 10^{13}$	0,4-0,8
GaAs/InGaAs	Квантовая яма	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{13}$	$6,4 \cdot 10^{13}$	0,995
GaAs/InGaAs	Квантовые точки	Протоны, 1,5 МэВ	$5 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{13}$	$6,4 \cdot 10^{13}$	0,75

Примечание: *Экстраполированное значение параметра.

**По отношению к необлученным образцам.

***Учтены не ионизационные энергетические потери

В настоящее время наиболее перспективным широкозонным материалом микроэлектроники для ЭКБ является наноструктурированное полупроводниковое соединение нитрида галлия (GaN), радиационная стойкость которого в 3 раза выше, чем у кристаллических образцов.

В таблице 7 приведены физические свойства разных широкозонных полупроводниковых соединений Si, GaAs, SiC и GaN, анализ материалов которых, позволяет добиться реального улучшения характеристик производства приборов.

Таблица 7 – Сравнение свойств основных полупроводниковых материалов

Характеристики материалов	Si	GaAs	SiC	GaN
Ширина запрещённой зоны, эВ	1,1	1,4	3,2	3,5
Критическая напряжённость электрического поля, $\times 10^6$ В/см	0,3	0,4	3	3,3
Теплопроводность, Вт/м \times К	1,5	0,5	4,9	$\geq 1,5$
Подвижность электронов, см ² В \times с	1350	8500	700	2000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, $\times 10^7$ см/с	1,0	2,0	2,0	2,7

Вопросами контроля и обеспечения РС нанотехнологической продукции занимается ряд специализированных национальных НИЦ NASA, МЭ и МО США, высококвалифицированный персонал которых, работает на стыке ядерной физики, физики твёрдого тела, электроники и методологий проведения испытаний. По оценкам аналитиков из США, в 2015 г. объем продаж продукции и услуг на базе нанотехнологий составил около 2 трлн долл. США, из которых ~120 млрд долл. США (6%) освоены авиационно-космическим сектором промышленности.

3.5 Технологические способы изготовления арсенида галлия (GaAs) с его исключительными свойствами для РС ЭКБ космических применений

Арсенид галлия (GaAs) - это химическое соединение галлия и мышьяка, ПП, третий по масштабам применения в промышленности после кремния (Si) и германия (Ge) используемый в монолитных интегральных СВЧ-схемах; светодиодах, лазерных диодах, диодах Шоттки, туннельных диодах и детекторах ядерных излучений. Специфические электронные свойства GaAs превосходят свойства кремния

(Si), т.к. носители заряда в арсениде галлия обладают высокой подвижностью, позволяющей работать на частотах до 250 ГГц, а приборы на основе GaAs генерируют меньше шума, чем кремниевые на той же операционной частоте и могут работать в режимах больших мощностей из-за высокого уровня напряжения пробоя. По физическим характеристикам GaAs более хрупкий и менее теплопроводный материал, чем кремний (Si). Подложки из GaAs гораздо сложнее в изготовлении и примерно в пять раз дороже, чем кремниевые, что серьёзно ограничивает применение этого материала. Для синтеза GaAs используются направленная кристаллизация, зонная плавка и метод Чохральского.

Экспериментально установлено, что набор дозы ионов «малыми порциями» позволяет при прочих равных условиях существенно улучшить электрофизические свойства ионно-легированных слоёв носителей типа **n**-GaAs. Кроме того, импульсное облучение может изменить кинетику зарождения, роста и взаимодействия дефектов, а также привести к их отжигу во время паузы между импульсами. Поэтому цель лабораторных исследований, проведённых в США и ЕС заключалась в исследовании вопроса накопления радиационных повреждений GaAs при его непрерывной и импульсной имплантации ионами. Исследования выполнялись на GaAs структурах **n-ni**-типа. Эпитаксиальную плёнку (**n**-слой) выращивали по хлоридной технологии на полу изолирующей подложке (**ni**-слой), ориентированной в плоскости. Концентрация электронов в **n**-слое составляла около $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при толщине $0,13 \div 0,14 \text{ мкм}$ и проводимости $160 \div 200 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Пластины GaAs обрабатывались в травителе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:100$, после чего изготавливались образцы в виде параллелепипедов, на концах грани с **n**-слоем которых закреплялись омические контакты Au+Ge+Ni. Затем образцы с помощью галлий-индиевой пасты закреплялись на массивном латунном держателе и при комнатной температуре, и в вакууме 10^{-5} Па проводилась имплантация ионов ^{32}S , ^{12}C и ^4He в непрерывном и импульсном режимах. Длительность импульсов составляла $1,3 \times 10^{-2} \text{ с}$ со скважностью 100. Дозы имплантации варьировались в пределах $1 \times 10^9 \div 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с плотностью ионного тока $1 \times 10^{-9} \div 3 \times 10^{-6} \text{ А см}^{-2}$.

Энергию ионов при имплантации выбирали таким образом, чтобы радиационные дефекты образовывались по всей толщине эпитаксиального слоя - $100 \div 150$

кэВ на плёнке $0,13 \div 0,14$ мкм. Во время имплантации измеряли сопротивление образцов при напряжённости электрического поля не более 10 В см^{-1} , с учётом геометрии её пересчитывали в проводимость, при этом температуру образцов контролировали с помощью датчика температуры с базовым терморезистивным элементом, изготовленным фотолитографией на имплантируемой поверхности пластины-свидетеля, а также с помощью хромель-алюмелевой термопары. При максимальной поглощённой мощности, равной $0,6 \text{ Вт см}^{-2}$, температура образцов не превышала 310 К. Имплантационные нарушения после облучения ионами ^{32}S дозой $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ исследовали методом резерфордовского обратного рассеяния каналированных ионов гелия с энергией частиц 1,8 МэВ. Энергетические спектры измеряли кремниевым поверхностно-барьерным детектором, установленным под углом 165° к направлению падения пучка. Энергетическое разрешение спектрометрического тракта составляло 25 кэВ, что соответствовало разрешению по глубине 40 нм.

На рисунке 32 приведена графическая зависимость проводимости эпитаксиальных слоёв **n**- арсенида галлия и плёнок **B** от дозы имплантации Φ . Так, при имплантации в импульсном режиме в области малых доз ($\Phi < 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, кривые 1÷4) значения **B** с ростом Φ уменьшаются, при этом чем меньше масса иона, тем большая доза необходима для снижения проводимости эпитаксиальных слоёв **n**- GaAs до уровня $\sim 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$: $1,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для ^{32}S (кривая 1), $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для ^{12}C (кривая 2), $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $1,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для ^4He (кривые 3 и 4) при плотностях ионного тока 1×10^{-9} и $5 \times 10^{-9} \text{ А см}^{-2}$ соответственно. Считая, что в GaAs с **B** $\approx 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, уровень Ферми располагается вблизи середины запрещённой зоны, а снижение концентрации свободных носителей заряда объясняется компенсацией мелкого донорного уровня дефектами, образующимися вдоль трека ионов. Такие локальные «трековые» дефектные области при **B** $\approx 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ перекрывают весь объём **n**-слоя, согласно модели «эффективной среды» их усреднённый внутренний радиус будет равен 8,1 нм для ^{32}S , 1,86 нм для ^{12}C , 0,96 и 0,58 нм для ^4He ($1 \times 10^{-9} \text{ А см}^{-2}$ и $5 \times 10^{-9} \text{ А см}^{-2}$ соответственно).

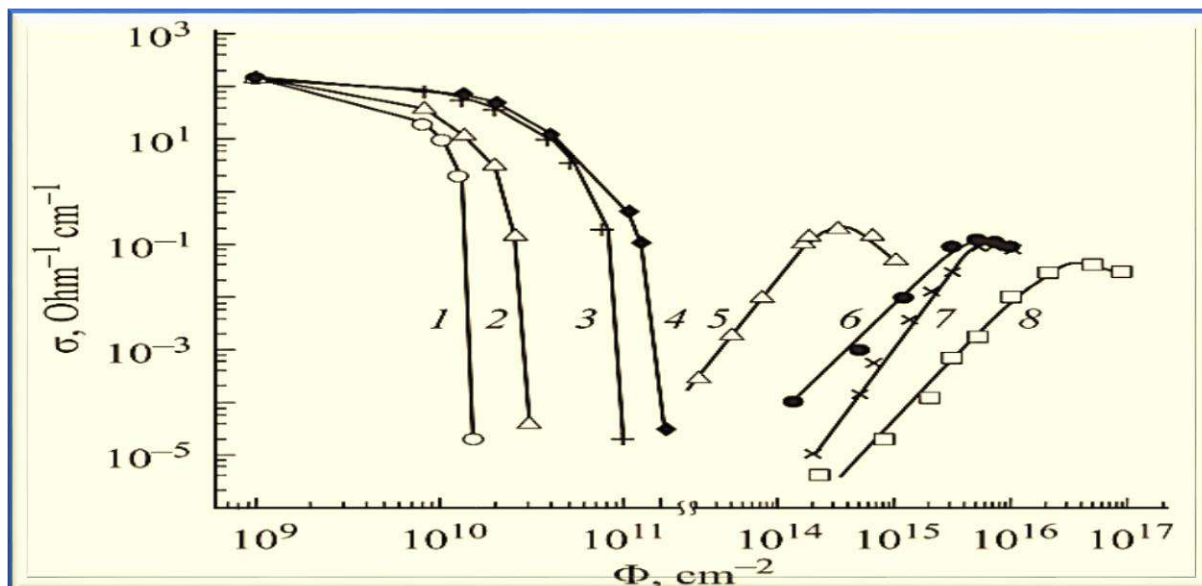


Рисунок 32 – Зависимость проводимости эпитаксиальных слоёв n- арсенида галлия от дозы имплантации (Φ , см⁻²)

Вышеприведённые данные согласуются с увеличением размеров дефектных областей и с ростом массы внедряемых ионов, но причина, по которой увеличение плотности тока одного и того же иона приводит к снижению радиуса области дефектообразования (4He, кривые 3 и 4), пока не совсем ясна. После набора дозы, при которой σ падала до уровня 10^{-5} Ом⁻¹см⁻¹ и после выключения ионной пушки у всех видов ионов наблюдалась релаксация (увеличение) проводимости. Кривая релаксации подчинялась экспоненциальному закону и характеризовалась двумя участками: быстрым (характерное время единицы секунд) и последующим медленным (сотни секунд).

При непрерывной имплантации в области больших доз ($\Phi > 2 \times 10^{13}$ см⁻², кривые 5, 7 и 8) проводимость арсенида галлия увеличивается, достигая максимума $0,04 \div 0,20$ Ом⁻¹ см⁻¹ при дозах 3×10^{14} см⁻² (32S, кривая 5), 6×10^{15} см⁻² (12C, кривая 7) и 5×10^{16} см⁻² (4He, кривая 8). Следовательно, в области малых доз с ростом имплантации увеличивается концентрация генерируемых дефектов. Наименьшему значению σ (Φ) соответствует полная компенсация мелкого донорного уровня дефектами. Дальнейшее увеличение дозы, когда концентрация дефектов превысит концентрацию локализованных электронов, последние начинают перераспределяться между свободными и занятыми дефектами. Также на рисунке 32 приведены зави-

симости β (Φ) для непрерывного импульсного режима имплантации 32S при плотности ионного тока $3 \times 10^{-6} \text{ Асм}^{-2}$ (кривые 5 и 6). Из графика видно, что максимум β (Φ) при импульсном облучении (кривая 6) соответствует дозе $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что более чем на порядок превышает положение максимума β (Φ) при непрерывном облучении (кривая 5). Если принять, что увеличение проводимости вызвано ростом концентрации дефектов, то при непрерывном наборе некоторой дозы Φ^* образуется концентрация дефектов $N_{\text{def}}(\Phi^*)$, большая, чем при наборе этой же дозы «порциями» при импульсной имплантации $N_{\text{def}}(\sum_i \Phi_i^* = \Phi^*)$. Т.е. при изменении процесса облучения полупроводника ионами от непрерывного к импульсному, величина генерируемых радиационных дефектов перестаёт быть аддитивной. Этот эффект, сложно объяснить корректно но, возможно, имеет место проявление отжига части дефектов в период паузы между импульсами. Следовательно, напрашивается вывод, что при импульсной имплантации дозой ионов $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при плотности тока $3 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ структура облучённого слоя хотя и становится сильно нарушенной, но не достигает аморфного состояния. Это согласуется с результатами графической зависимости проводимости эпитаксиальных слоёв n - GaAs плёнок β от дозы имплантации Φ (рисунок 32), если при непрерывной и импульсной имплантации (кривые 5 и 6) с $\Phi = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (кривая 5) значение β находится на участке «насыщения» проводимости, то во втором случае (кривая 6) $\beta \approx 0,01 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ располагается на возрастающем участке зависимости β (Φ), а это свидетельствует о недостигнутой аморфизации облученного слоя.

Компромисс быстродействия с низким током выключения или с низкой резервной мощностью и является достижением внедрения в производство данной технологии.

3.6 Разработка технологических методов создания перспективных полупроводниковых СВЧ-приборов для терагерцевых систем радиовидения космического применения

В настоящее время в рамках Европейской программы общей поддержки развития технологий (General Support Technology Programme – GSTP) под руководством Комитета по промышленной политике ESA (Industrial Policy Committee – IPC) ведутся разработки технологических методов создания терагерцевых

ММІС СВЧ (условное обозначение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок – G627-080EE).

По оценке специалистов, основным преимуществом работы с активными системами *радиовидения в терагерцевом (ТГц) диапазоне*, является предъявление низких требований к чувствительности создаваемого приемника, благодаря чему в этих приемниках, работающих при комнатных температурах, появляется возможность использовать такие приборы, как диоды с барьером Шоттки или монолитные интегральные СВЧ-схемы (ММІС).

3.6.1 Терагерцевый диапазон занимает промежуточное положение между оптическим и микроволновым диапазонами

На высокочастотную область терагерцевого диапазона приходится тепловое излучение предметов комнатной температуры, однако излучение естественных терагерцевых источников не является когерентным, и до недавнего времени большая часть терагерцевого спектра не использовалась, т.к. отсутствовали источники и приемники когерентного излучения этого диапазона.

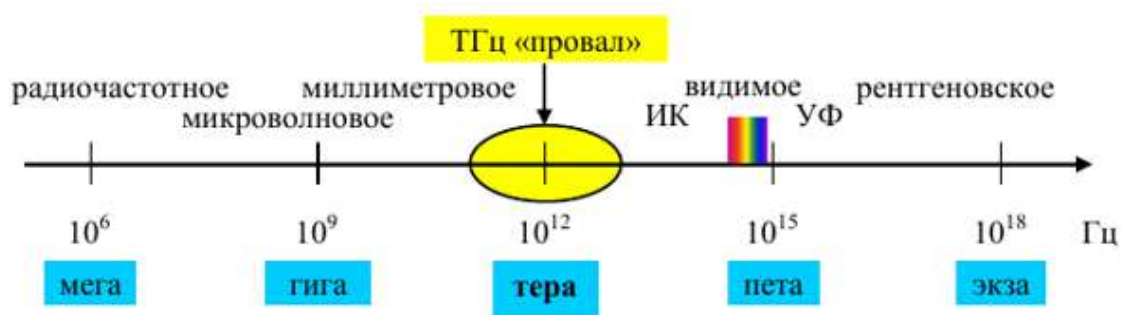


Рисунок 33 – Спектр электромагнитных волн и терагерцевый «провал»

Терагерцевый участок электромагнитного спектра называется «терагерцевый провал», а развитие приборов терагерцевого диапазона разделило всю полупроводниковую технику на ниши:

- до 1 ТГц, где эффективнее работают электронные СВЧ-устройства;
- свыше 1 ТГц, где лучше работают фотонные устройства.

В рамках исследований были установлены условия взаимодействия терагерцевого излучения с веществом, и были выявлены определённые его свойства:

- электромагнитные волны терагерцевого диапазона, проникая сквозь мелкодисперсные безводные среды (пластмассы, бумага, текстильные материалы),

резко понижают их уровень рэлеевского рассеяния ($\sim\lambda^{-4}$), но отражаются от металлических поверхностей;

- квант терагерцевого излучения не является ионизирующим;
- частота терагерцевого излучения при сравнении на порядок выше рабочих частот существующих СВЧ-приборов ЭКБ, что позволяет осуществлять передачу больших объемов информации.

Следовательно, терагерцевое излучение можно использовать для просвечивания определённых предметов (веществ) и там, где в настоящее время используется рентгеновское излучение, однако в отличие от рентгеновских лучей, терагерцевое излучение является не опасным, поскольку не производит ионизации среды и не вызывает повреждения биомолекул.

Высокая проникающая способность терагерцевого (субмиллиметрового) диапазона длин волн излучения может позволить создавать системы для получения изображений объектов, скрытых (препятствием, одеждой и т.п.) от наблюдателя в других диапазонах длин волн. Специалисты проявляют большой интерес к астрофизическим исследованиям в терагерцевом диапазоне частот, поскольку приблизительно половина суммарного свечения и 98% эмитированных фотонов со времени Большого взрыва находятся в субмиллиметровом и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах длин волн.

В настоящее время реализуется ряд проектов, направленных на исследования терагерцевого диапазона длин волн:

- планируется к запуску в 2018 г. космический телескоп, для исследований диапазона длин волн от 0,6 до 28 мкм;
- космический телескоп для изучения космоса в ИК- диапазоне на длинах волн от 3 до 180 мкм;
- космический телескоп, работающий в диапазоне от 60 до 670 мкм.

Все перечисленные космические телескопы работают на охлаждаемых приемниках и зеркалах, что ограничивает срок их службы.

Приёмники терагерцевого диапазона в настоящее время также используются в реализуемых космических проектах, таких как JUICE (Jupiter Icy Moons

Explorer, проект Европейского космического агентства, направленный на исследование Юпитера и его спутников); в метеорологических КА, оснащенных инструментами субмиллиметрового диапазона длин волн, таких как CIWSIR, GOMOS, PREMIER и MetOp.

Для приема терагерцового излучения активно развиваются конкурирующие друг с другом технологии, каждая из которых обладает как преимуществами, так и недостатками. Одни устройства при эксплуатации требуют сложного криогенного оборудования, другие способны работать при комнатной температуре, обеспечивая невысокую чувствительность.

3.6.2 Активные системы радиовидения в терагерцовом диапазоне

Терагерцовые системы радиовидения создаются по принципу построения активных или пассивных систем (рисунок 34).

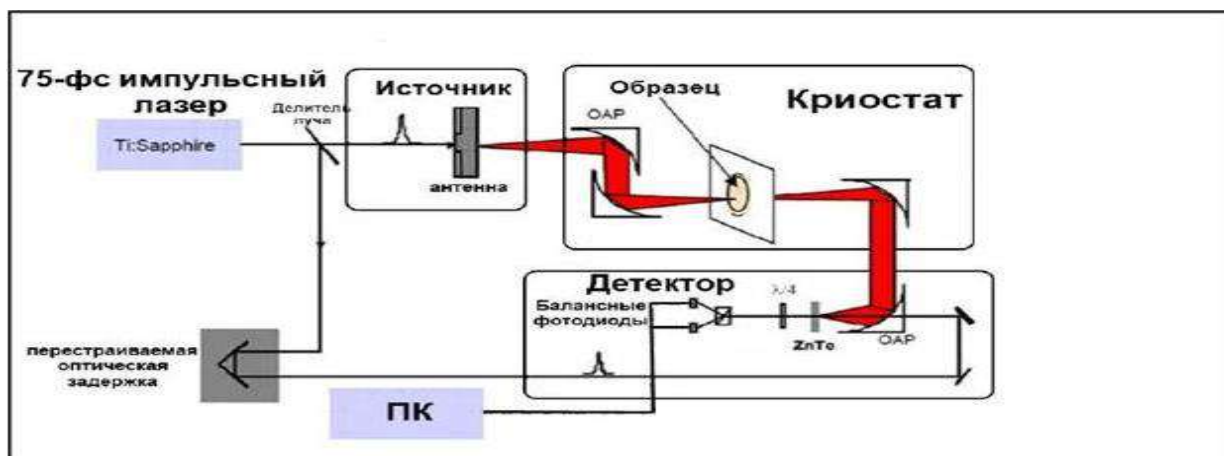


Рисунок 34 – Блок схема активной системы радиовидения

В блок-схеме, представленной на рисунке выделяется три отдельных блока:

- блок генерации импульса терагерцового излучения;
- блок детектирования;
- блок системы согласования терагерцового излучения с исследуемым образцом.

При этом сам образец может перемещаться, что позволяет получать изображения объекта его сканированием. В приведенном примере исследуется излучение, прошедшее сквозь образец, а сигнал приемника зависит от коэффициентов пропускания, отражения, от величин поглощения и рассеяния в объекте. Криогенная секция (криостат) предназначена для:

- установки и охлаждения смесительного элемента;
- изоляции приёмных элементов от нагрева их тепловым излучением;
- фокусировки изображения в субмиллиметровом диапазоне длин волн на приёмные элементы;
- установки и охлаждения широкополосных предусилителей видеосигнала;
- ввода напряжений питания и управляющих сигналов системы приёма изображения в субмиллиметровом диапазоне;
- передачи СВЧ-сигнала в радиометрический тракт регистрации.

В ходе исследований были использованы два различных подхода к получению изображений активными способами: в первом - приемник принимает излучение, прошедшее сквозь объект, а контраст изображения определяется коэффициентом пропускания разных частей объекта. Во втором случае принимается отраженное от объекта излучение и изображение определяется распределением коэффициента отражения наблюдаемого объекта.

Основным достоинством работы с активными системами радиовидения являются низкие требования к чувствительности приемника, что дает возможность использовать приемники при комнатных температурах, на диодах с барьером Шоттки или на ММІС –структурах СВЧ-диапазона длин волн. Также можно проводить спектральные исследования объектов наблюдения, имея источник излучения с изменяемой частотой.

Основными минусами подобных систем являются высокие требования к оптической схеме приемника, позволяющей предотвратить появление бликов, связанных с переотражениями от объекта, стен помещения и предметов, окружающих объект. В случае, когда активная система построения радиоизображения используется в условиях большого рассеяния или поглощения сигнала (открытое пространство на больших расстояниях), необходимо использовать высокочувствительные приемные устройства.

На рисунке 35 представлена структурная схема активной системы терагерцового радиовидения с супергетеродинным приемником в качестве приемного элемента, где объект облучается при помощи терагерцевого лазера, снабжённого обратной связью для стабилизации мощности излучения. В качестве приемного

элемента используется смеситель на эффекте туннельных структур (СИС-смеситель), а гетеродином является твердотельный СВЧ-источник с умножителем частоты. Для согласования мощности гетеродина со смесителем задействовали поляризационный интерферометр Мартин-Папплетт.

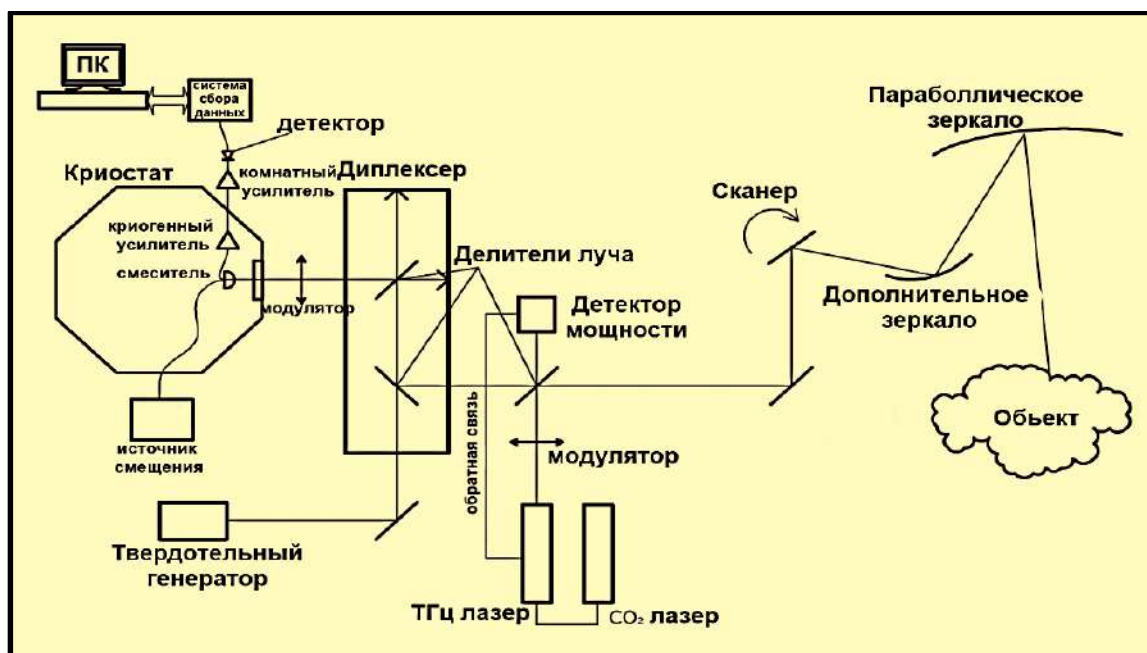


Рисунок 35 – Активная система терагерцевого радиовидения на основе супергетеродинного приемника

В устройствах приема и передачи излучения терагерцевого диапазона длин волн используются апертурные антенны, преимущественно рупорные:

- антенна передатчика терагерцевого излучения представляет собой параболлическую антенну диаметром порядка 0,1 м;
- приемная антенна представляет собой массив рупорных антенн с входным круглым отверстием диаметра 1 см, точно расположенных в квадрате со стороной 1 м;
- детектор терагерцевого излучения с чувствительностью 1 кВ/Вт, в каждой рупорной антенне свой. Все рупорные антенны соединены между собой последовательно.

В настоящее время разработан ряд СВЧ-микросхем с интегрированным СИС-смесителем, сопряженных с квазиоптической планарной антенной, сверхпроводящим гетеродином и гармоническим смесителем, предназначенным для

реализации режима фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Гармонический смеситель изготавливается по той же технологии, что и СИС-смеситель приемника (рисунки 36-37).

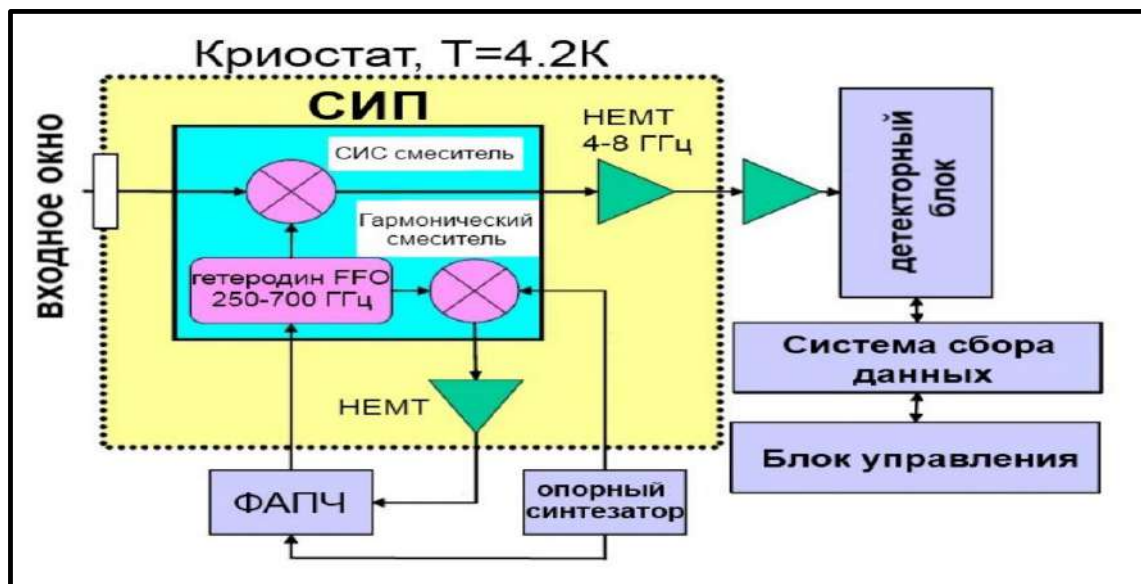


Рисунок 36 – Блок-схема сверхпроводящего интегрального приемника

Для создания терагерцового источника сигнала были использованы джозефсоновские структуры с распределённым туннельным переходом. В таких структурах для достижения процесса возникновения высокочастотного тока используется вязкое течение джозефсоновских вихрей, каждый из которых окружен экранирующим током. В момент прихода такого вихря на конце туннельного перехода возникает импульс тока в передающей линии.

Управление частотой и величиной возникающего высокочастотного тока осуществляется за счет процесса управления скоростью течения и плотностью вихря через изменение величины магнитного поля, пронизывающего туннельный переход, и постоянного напряжения смещения, приложенного к сверхпроводящим контактам туннельного перехода.

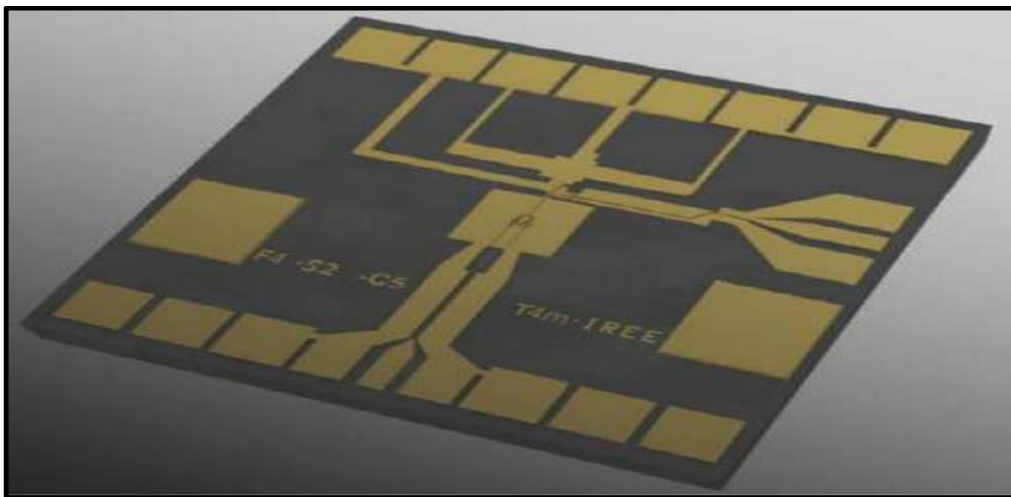


Рисунок 37 – Внешний вид сверхпроводящего интегрального приемника

На использовании принципа этого эффекта создан генератор вязкого течения джозефсоновских вихрей (FFO), обладающий приемлемыми характеристиками, чтобы создать интегральный супергетеродинный приемник (ИСП). Поскольку выходной импеданс FFO существенно отличается от входных импедансов СИС-смесителя и гармонического смесителя, то для согласования элементов схемы требуется использование ВЧ-трансформаторов импеданса. Мощность ВЧ передается от FFO к СИС-смесителю и гармоническому смесителю при помощи сверхпроводящих микрополосковых линий.

Для подавления нежелательных шумов, причиной которых может служить нестационарный эффект Джозефсона, а также для изменения режима работы гетеродина используются специальные контрольные линии. Постоянный ток, протекающий по контрольной линии задает величину магнитного поля, пронизывающего туннельный переход СИС-смесителя и FFO. В целом для работы ИСП в качестве полнофункционального спектрометра необходимы постоянные напряжения, при этом частота генерации FFO прямо пропорциональна напряжению, приложенному к туннельному переходу структуры (коэффициент пропорциональности $f/U = 2e/h = 482,6$ ГГц/мВ). Несмотря на широкий частотный диапазон, в котором осуществляется согласование FFO со смесителем, рабочий диапазон ИСП определяется качеством согласования смесителя с приемной антенной, в качестве которой используется либо двухщелевая антенна, либо двойной диполь. Среди супергетеродинных приемников терагерцового диапазона частот

наиболее продвинутыми являются смесители на диодах с барьером Шоттки, смесители на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниках, а также СИС-смесители, являющиеся в настоящее время наиболее чувствительными когерентными приемниками в диапазоне частот 100-1500 ГГц. При этом передача на частотах свыше 300 ГГц подразумевает увеличение скорости передачи, следовательно, детекторы должны обладать повышенным быстродействием.

3.7 Схемотехнические методы, реализованные на существующих и перспективных технологических линиях для серийного производства РС ЭКБ

Большинство схемотехнических методов, способов и подходов были реализованы на существующих и перспективных технологических линиях серийного производства РС ЭКБ по стандартным технологиям и направлены на повышение отказоустойчивости изделий для космических применений с помощью: метода избыточного кодирования; метода контроля и исправления (коррекции) ошибок и метода резервирования. Так, например, метод избыточного кодирования позволяет осуществлять контроль по чётности по кодам Хэмминга и Рида-Соломона и предполагает постоянную работу с избыточностью ПП-приборов, используемых в РЭО как основу для обнаружения и исправления ошибок, а методы контроля работоспособности и автоматической замены неисправных блоков РЭО являются резервированием (рисунок 38).

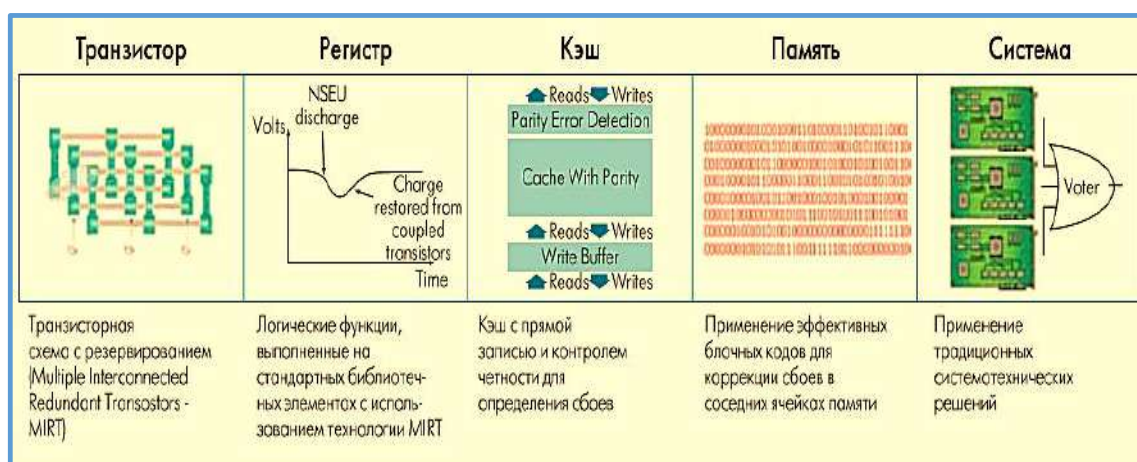


Рисунок 38 – Методы повышения отказоустойчивости элементов ЭКБ

Указанные методы успешно реализованы и работают на технологических линиях серийного производства РС ЭКБ у компаний MHS (Франция) и Aeroflex

Inc. (США). Использование данных методов позволяет повысить РС ЭКБ, сопоставимо с применением технологического подхода, но значительно (в $5\div 7$ раз) уменьшив стоимость их производства.

3.7.1 Схемотехнические подходы: применение библиотек элементов с резервированием

Использование схемотехнических подходов (rad hard by design) основано на применении библиотек элементов с мажоритированием (mazhoritirovaniye – выборка, резервирование) на уровне приборов (вентилей, кодеров, декодеров Хэмминга), т.н. «усиленных» библиотек элементов, отбора библиотечных компонентов и ряда других приёмов. Одним из этапов подтверждения стойкости ЭКБ к ДФКП является расчёт локальных условий функционирования РС ЭКБ в составе БРЭА КА на околоземной орбите, включающий расчёт энергетических спектров частиц ИИ космического пространства на поверхности КА, на основании параметров околоземной орбиты, времени полёта и моделей используемых потоков заряженных частиц (например, солнечная активность, солнечный цикл, вероятность СКЛ). Для расчёта, как правило, используется специализированное программное обеспечение (ПО): SPENVIS CREME96, COSRAD, OMERE, ОСОТ. Учёт геометрии защиты от воздействия ИИ ДФКП в точке расположения РС ЭКБ на околоземной орбите и соответствующая оценка стойкости ЭКБ согласно действующим нормативным документам осуществляются в один или несколько этапов в зависимости от результатов методов оценки стойкости:

- «наихудший случай» (минимальная полная массовая толщина);
- «секторирования» или «лучевого анализа», т.е. определения защиты на уровне конструкторской документации без учёта или с учётом компоновки ЭКБ и внутренних элементов конструкции БРЭО, размещённой в КА.

3.8 Конструктивный (конструкционный) способ повышения радиационной стойкости

Конструктивный способ повышения радиационной стойкости (Radiation Hardening by Design - RHbD) основан на конструктивных решениях повышения радиационной стойкости и состоит из внедрения в конструкцию ИМС элементов,

тем или иным способом нейтрализующих радиационные дефекты. Самым универсальным вариантом является экранирование ИМС от воздействия ИИ внешним экраном или *экраном радиационной защиты (ЭРЗ)*, введённым в корпус ПП-прибора. Однако следует отметить, что ЭРЗ весьма эффективны только для защиты ЭКБ от воздействия мягких компонент космического излучения (электронов, протонов), которые не способны глубоко проникать в многослойные структуры и композиционные материалы приборов ЭКБ. Что касается ИИ с более высокой проникающей способностью (рентгеновское излучение, гамма-излучение, ТЗЧ и др.), то защита ЭКБ посредством ЭРЗ становится менее эффективной.

Следовательно, при конструировании РС ЭКБ необходимо подбирать материалы и способы установки ЭРЗ, которые обеспечат защиту РС ЭКБ от высокой проникающей способности вторичных излучений.

Самые распространенные способы создания ЭРЗ для ЭКБ разработаны и внедрены американскими компаниями: RAD-COAT (Space Electronics Inc.), RAD-PAK (Maxwell Technologies) и X-Ray (Actel) и компанией WALOPACK 3D-Plus из Франции. Принципиально важным моментом защиты ЭКБ от воздействия ИИ ДФКП является то, что её эффективность зависит от параметров околоземной орбиты, сроков эксплуатации и компоновки экранов радиационной защиты в ЭКБ БРЭО КА и высоты орбит расположения зон электронных (протонных) ловушек:

- для ГСО является высота 36000 км;
- для СВО - высота 2000 км;
- для НОО - высота 400÷1500 км.

Зарубежные компании предлагают следующие конструкции корпусов ИМС для БРЭА РКТ, защищающие от воздействия ИИ (рисунок 39).

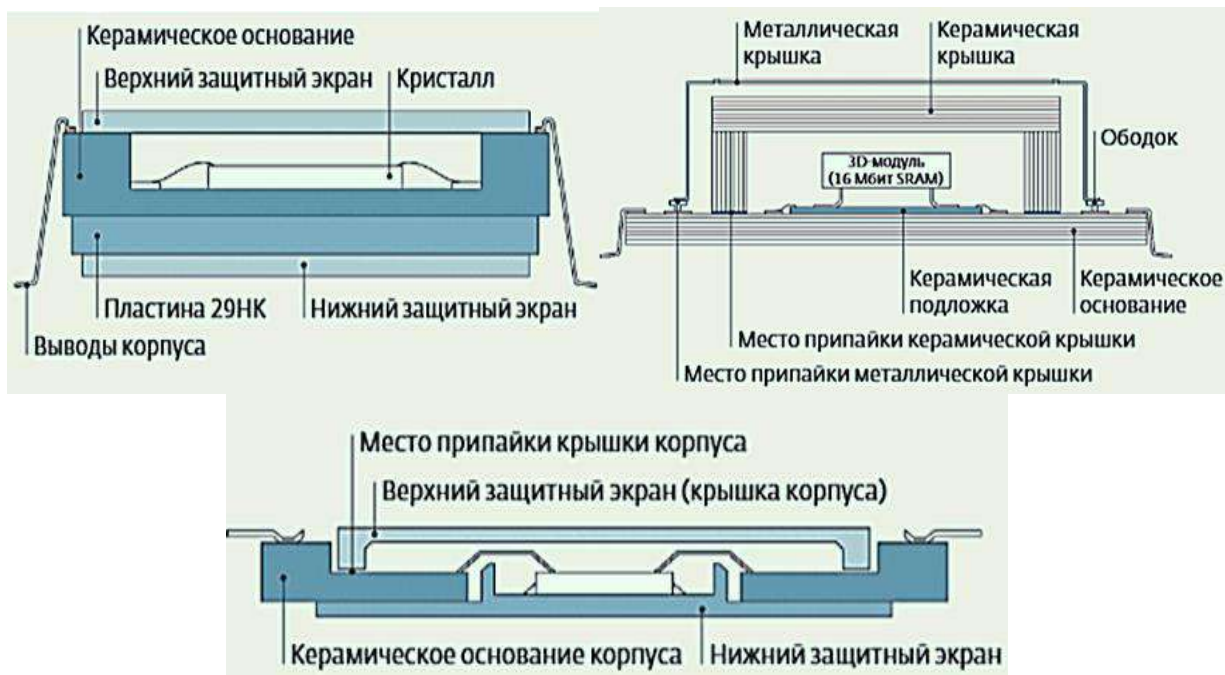


Рисунок 39 – Конструкции корпусов ИМС с интегрированными ЭРЗ, используемые рядом зарубежных компаний

Как показали проведённые исследования, наибольшими защитными свойствами обладают многослойные структуры из композиционных материалов, использование которых позволяет в несколько раз снизить ДНР в приборах ЭКБ, находящихся в БРЭО КА с одновременным уменьшением их массогабаритных характеристик. К таким изделиям относятся ЭРЗ компании WALOPACK, представляющие собой структуры с чередующимися слоями керамики Al_2O_3 и порошкообразного вольфрама. Практически было доказано, что максимально эффективной защитой является трёхслойная композиция, в которой материал с высоким атомным номером Z располагается между слоями с низким Z , композиция A_1-W-A_1 .

Своей конфигурацией и размерами ЭРЗ должны соответствовать стандартным корпусам ЭКБ, следовательно, технология нанесения защитных покрытий RAD-COAT является универсальной и не привязана к конструкции стандартного корпуса ИМС (рисунок 40) в отличие от технологий RAD-ПАК, WALOPACK.

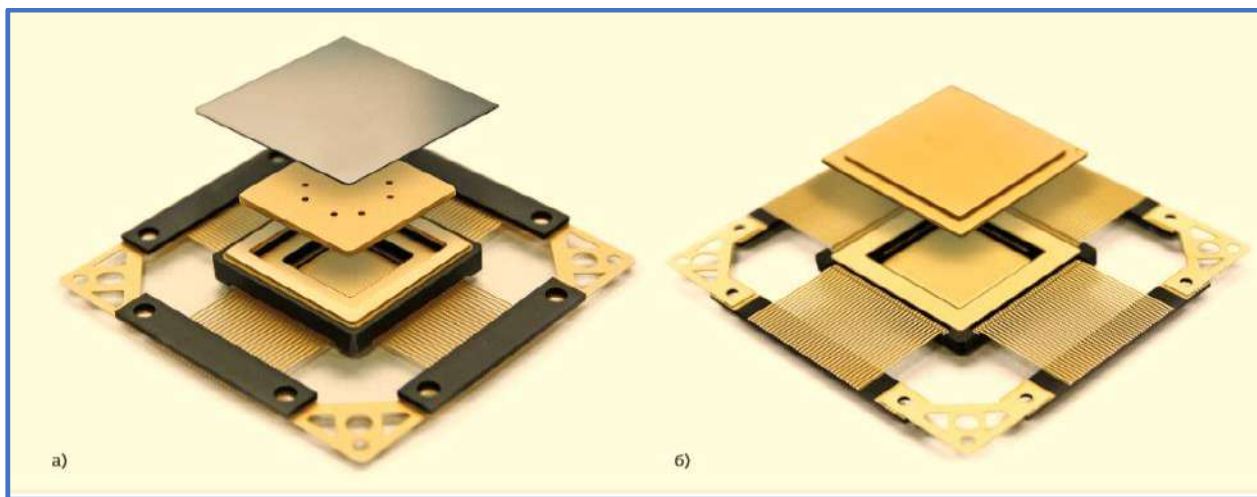


Рисунок 40 – Варианты металлокерамического корпуса ИМС с интегрированным ЭРЗ на основе композитного материала W-Cu: а) 100-выводной планарный корпус с герметизацией пайкой, б) 144-выводной планарный корпус с герметизацией шовно-роликовой сваркой

3.8.1 Покрытия типа RAD-COAT

Конструктивный способ повышения радиационной стойкости с использованием покрытия типа RAD-COAT реализован на основе пластичной матрицы с наполнителем в виде порошка вольфрама. Однако с учётом плотности этих покрытий ($\rho \sim 13 \text{ г/см}^3$) можно предположить, что по эффективности они уступают защите типа RAD-PAK и WALOPACK.

Более эффективным способом является интегрирование в корпуса РС ЭКБ дополнительных экранов из композиционного материала W-Cu ($\rho \sim 16,6 \text{ г/см}^3$). Так, уже при толщине ЭРЗ $d = 0,6 \text{ мм}$ достигаются более высокие защитные свойства, чем у ЭРЗ на основе сплава Fe-Ni-Co (29НК) или керамики Al_2O_3 . Чрезмерное наращивание толщины W-Cu ЭРЗ не даёт существенного выигрыша в защитных свойствах от электронного и протонного облучений. Экспериментально доказано, что оптимальной толщиной ЭРЗ из W-Cu покрытия является $d = 0,9 \div 1,2 \text{ мм}$). Исследователи полагают, что это обусловлено увеличением тормозного пути для ИИ с высокой проникающей способностью. С учётом этого были спроектированы корпуса для ИМС с интегрированными в них ЭРЗ, выполненными на основе композитного материала W-Cu.

3.9 Математическое моделирование эффектов воздействия ИИ и ДФКП при проектировании приборов РС ЭКБ

Математическое моделирование эффектов воздействия ДФКП и ИИ на этапе проектирования приборов РС ЭКБ типа СБИС предполагается выполнять с использованием оригинальных численных методов, призванных эффективно ускорять процесс моделирования с помощью динамической декомпозиции большой системы нелинейных дифференциальных уравнений на каждом шаге интегрирования с распараллеливанием вычислений и:

- проведением «лучевого анализа» геометрии КА и БРЭА используются системы автоматизированного проектирования САПР (Solid Works, CATIA, 3D MAX) с целью создания модели объектов и определения распределения толщин защиты от телесного угла из точки расположения РС ЭКБ в БРЭА. В процессе реализации «лучевого анализа», как правило, используется ПО: Local Dose&SEE, FASTRAD, SPENVIS, Space Radiation;

- расчётом локальных условий воздействия ДФКП в точке расположения РС ЭКБ в составе БРЭА на КА, т.е. моделирование прохождения элементарных частиц сквозь вещество. При этом исследователи, как правило, пользуются специализированным ПО: SPENVIS, GEANT4, MCNPX, CREME96 (таблица 8), а для моделирования взаимодействия ИИ со сложной структурой РС ЭКБ космического приборостроения ими все чаще применяется разработанный в Европейском центре ядерных исследований (ENRC)⁸ пакет программ GEANT4, основанный на методе Монте-Карло⁹.

Моделирование прохождения частиц ИИ через вещество включает описания:

- химического состава исследуемых материалов (арсенид галлия ($GaAs$) с плотностью $5,32 \text{ г/см}^3$ и молярной массой $144,63 \text{ г/моль}$);
- геометрии РС ЭКБ;
- типов частиц, учтенных в моделировании;

⁸ENRC, European Nuclear Research Center – Европейском центре ядерных исследований.

⁹Методы Монте-Карло (Monte Carlo method) – общее название группы численных методов, основанных на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

- физических процессов и первичного события, т.е. вылет первичной частицы из источника (рисунок 41).

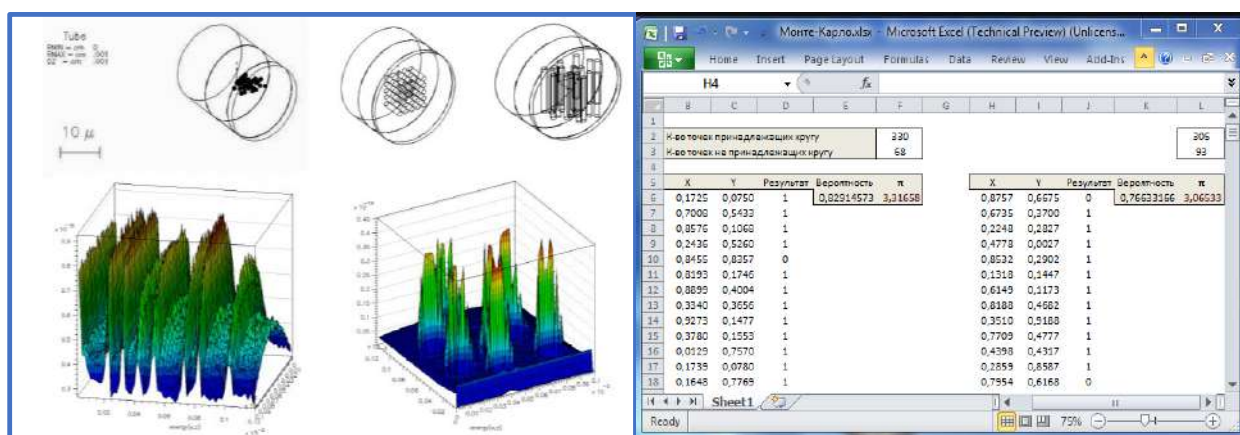


Рисунок 41 – Моделирование прохождения элементарных частиц через вещество ЭКБ с использованием методов Монте-Карло

Таблица 8 – Программное обеспечение для моделирования процессов воздействия ДФКП на различные материалы БРЭО

Программное обеспечение (ПО) для моделирования процессов	
Наименование ПО	Возможности программного обеспечения
GEANT-4; CASCADE/INPE; MCNPX	Полное моделирование
CASCADE/ASF; ALICE/ASH	Моделирование ядро-ядерных взаимодействий в сочетании с моделью Monte Carlo и детерминистическим методом
MARLOWE	Моделирование радиационных эффектов в материалах, движения частиц и ядер, каскадов смещений методом BCA
IOTA	Моделирование радиационных эффектов в материалах с использованием объединенного метода BCA и MD
TRIM	Подсчет числа дефектов с использованием метода BCA
PRECO-2000; TALYS; GNASH/INPE	Моделирование нуклон-ядерных взаимодействий и расчет спектров и сечений реакций
CREME96	http://crsp3.nrl.navy.mil/creme96
LocalDose&SEE	Для реализации метода «лучевого анализа»
Space Radiation	www.spacerad.com

3.10 Выбор метода анализа на основании требований, предъявляемых к моделированию ИС

Требования, предъявляемые к моделированию различных типов интегральных схем показаны на рисунке 42, определяются электрическими размерами структур в их составе (отношением физических длин токовых путей к длине волны сигнала на рабочей частоте).



Рисунок 42 – Зависимости электрической длины межсоединений от их количества, рассчитываются различными способами для разных типов приборов (аналоговых и цифровых ИС, RFIC, MMIC, MIC) РС ЭКБ

В отличие от квазистатического приближения, распределённые модели, получаемые на основе моделирования полноволнового ЭМ-анализа, используются для СВЧ-схем (MMIC на рисунке 42), в которых межсоединения обладают значимыми электрическими длинами, и поэтому, требуется учитывать фазовые задержки и явления, связанные с протяжённостью линии связи.

Моделирование MMIC целиком – это посильная задача такому инструменту, как метод численного анализа AXIEM, который способен отыскивать решения для систем со 100 000 неизвестных за время в несколько десятков минут для каждой частотной точки, с использованием техники быстрых вычислений. Наиболее часто для моделирования радиочастотных и СВЧ-цепей применяются программы полноволнового ЭМ-анализа с матрицами рассеяния (S-параметры), чтобы представить распределённые межсоединения и пассивные компоненты в частотной области.

Требования, предъявляемые к моделированию RFIC-приемника при его разработке являются промежуточными между MMIC (A_3-B_5) и аналоговыми ИС на основе кремния (рисунок 42) и реализуются применением метода ЭМ-анализа, одной из трудностей проектирования которых является подбор и применение

ние подходящих алгоритмов ЭМ-моделирования ИС на основе различных тех-процессов с использованием экстракции сосредоточенных RC-элементов и экстракции паразитных компонентов от межсоединений активных компонентов и инструментов полноволнового анализа для индуктивностей и прочих развитых структур. Ещё одну сложность представляет разделение общей модели RFIC на области с помощью использования различных вычислительных методов их анализа. На рисунке 43 приведена топология трёхканального RFIC-приёмника со спиральными индуктивностями, требующими проведения полноволнового моделирования с помощью 2,5D-анализа планарной модификацией метода моментов в AXIEM или 3D-анализа методом конечных элементов в Analyst. В таком случае разработчик может пойти по одному из трёх путей:

- моделировать каждую из согласующих индуктивностей отдельно;
- моделировать их вместе в одном канале;
- моделировать все каналы в общей структуре.

Выбранный из трех способ серьезно повлияет на скорость ЭМ-анализа и, возможно, но не обязательно, на общую точность расчёта, в зависимости от степени взаимовлияния отдельных компонентов в общем процессе моделирования.

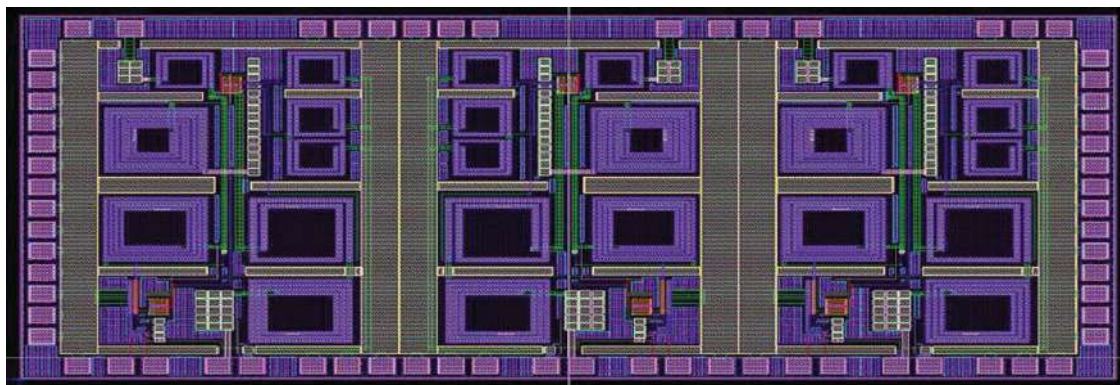


Рисунок 43 – Топология трёхканального RFIC-приёмника

3.11 Особенности применения метода электромагнитного моделирования для разработки радиочастотных интегральных схем RFIC-приемников

Радиочастотные интегральные схемы (RFIC) содержат множество различных межсоединений и пассивных компонентов, вычисление характеристик которых при их проектировании требует применения специализированных методов

электромагнитного анализа (ЭМ-анализа) с целью получения точных результатов по всем параметрам за приемлемое время. Так, цепь питания транзистора может рассматриваться как сложная система электрически коротких проводников, которые эффективнее всего проектировать *квазистатическим методом* для последующего вычисления величин эквивалентных паразитных компонентов схемы (экстракции паразитных компонентов). С другой стороны, электрические структуры, типа межкаскадных линий, или распределённые компоненты структуры на подложке (спиральные индуктивности и т.д.) требуют проведения полноволнового планарного (2,5D) и/или пространственного (3D) ЭМ-анализа для получения данных об особенностях их функционирования в составе устройства. Компоненты поверхностного монтажа (Flip-Chip, в BGA-корпусах или в бескорпусном исполнении с проволочными соединениями) могут быть корректно спрогнозированы и смоделированы только с помощью полноволновых пространственных методов (3D) ЭМ-анализа.

Современные технологии проектирования радиочастотных интегральных схем RFIC-приемников были реализованы в программном комплексе NI AWR Design Environment, тем самым предоставив разработчикам широкий выбор разнообразных инструментов для проведения схемотехнического и электромагнитного анализа структуры и моделирования, в т.ч. с учётом технологических особенностей производства, корпусирования, выполнения электрических контактов и использования компонентов поверхностного монтажа.

Производство RFIC-приемников основано на кремниевой (Si) или кремниево-германиевой (SiGe) технологических методах изготовления. Изначально они разрабатывались для использования на рабочих частотах вплоть до СВЧ-диапазона. Плотность транзисторов в таких схемах значительно выше, чем в монолитных интегральных схемах (MMIC) СВЧ-диапазона, базирующихся на ПП-соединениях АЗ–В5 (типа арсенид галлия (GaAs) или нитрид галлия (GaN) для применения в вычислительных и коммуникационных системах. RFIC-приемники работают на большом количестве транзисторов, соединённых в сложную сеть очень короткими электрическими линиями, называемыми «сетями». Эти «сети» обычно моделируются методом квазистатического приближения с применением

дискретных сопротивлений и ёмкостей, а паразитные эффекты, ухудшающие характеристики «сети» прибора, должны быть выявлены и учтены на этапе проектирования. В моделировании методом ЭМ-анализа с квазистатическим приближением понимают формулирование задачи математическими уравнениями, не содержащими временных производных, даже если некоторые из рассматриваемых величин медленно изменяются во времени. В результате получается численная модель, которая применима для описания электрически малых структур, не вызывающих возбуждения электромагнитных волн. Такой метод позволяет разработчикам учитывать влияние паразитных компонентов на характеристики устройства в целом, обеспечивая моделирование ЭМ-анализом сложной топологии при использовании достаточно простых моделей на эквивалентных электрических цепях.

3.12 Особенности применения метода электромагнитного моделирования при разработке монолитной интегральной СВЧ-схемы типа ММИС

Монолитные интегральные СВЧ-схемы (ММИС) функционируют в СВЧ- и более высокочастотных диапазонах волн, а электрические длины их связей чаще всего превышают пренебрежимо малую величину. Поэтому для проектирования их характеристик требуется применение пространственных методов (3D) ЭМ-анализа. Непосредственные элементы схемы топологии прибора являются ключевыми в разработке и моделировании монолитных интегральных СВЧ-схем (ММИС), поэтому с самого начала процесса проектирования требуется обеспечение точности вычисления их характеристик. Для анализа пассивных компонентов и межсоединений в ММИС, смоделированных в первом приближении в соответствии с теорией длинных линий, удобно применять метод ЭМ-анализа на основе планарной модификации (2,5D) метода моментов (МоМ), который позволяет проводить расчёт сложных и многокомпонентных структур. Данная технология всё глубже интегрируется в инструменты разработки устройств радиочастотного и СВЧ-диапазонов, а недавние обновления встроенного в программный комплекс NI AWR инструмента моделирования AXIEM обеспечивают возмож-

ность анализа больших структур со скоростью, позволяющей проводить моделирование топологии MMIC методом ЭМ-анализа непосредственно и полностью в среде разработки программного продукта NI AWR Design Environment, а именно, с использованием схемного моделирования в Microwave Office.

Современные конструкции RFIC-приемников совмещают структуры MMIC и аналоговых ИС с целью достижения высокой функциональности и плотности упаковки корпуса СВЧ-прибора в мм-диапазоне длин волн для его применения в аэрокосмическом и телекоммуникационном приборостроении. Типичная схема RFIC-приемника содержит ряд структур, требующих анализа электрических характеристик: от относительно больших спиральных индуктивностей до крайне малых, плотно упакованных межсоединений. В зависимости от электрической длины в схеме, не все критичные части топологии могут быть корректно смоделированы из-за экстракции паразитных компонентов, поэтому разработчики обязаны применять в моделировании методы полноволнового ЭМ-анализа.

3.13 Сравнение методов и скорости моделирования с требованиями получения заданных характеристик и экстракций паразитных компонентов при разработке и проектировании ИС

Использование наиболее распространённых методов ЭМ-анализа при разработке и проектировании ИС и их влияние на топологию электрической сети создаваемой модели с её характеристиками показаны в таблице 9.

Использование метода классической экстракции паразитных компонентов в реализуемой топологии электрической цепи при помощи квазистатической модели метода ЭМ-анализа позволяет создавать таблицу соединений – Netlist (рис. 44) для моделируемой модели. Таблица предстаёт в виде модели совокупности сопротивлений каждой проводящей линии и их собственных ёмкостей относительно «земли». При этом учитываются и взаимные ёмкости между различными линиями. Одной из проблем при таком моделировании является корректное определение «земли». У кремниевых ИС обычно нет «земли» и она специально формируется в отдельном слое.

Таблица 9 – Методы ЭМ-анализа в разработке интегральных схем

Метод моделирования	Скорость моделирования	Требования по объёму памяти	Характеристики
Экстракция паразитных компонентов	Самая высокая	Низкие/средние	Анализ R, C и L и переходных процессов
Квазистатическая модель	Очень высокая	Низкие	Анализ линии передачи по поперечному сечению
Квазистатическое приближение метода моментов	Высокая	Низкие/средние	Анализ электрически малых структур
Метод моментов (полноволновой)	Средняя	Средние	Планарный метод (2.5D), расчёт токов боковых стенок, сетка разбиения только для проводников
Метод конечных элементов (полноволновой)	Низкая	Средние	Анализ произвольных структур (3D), разбиение объёма задачи

Увеличение достижимой точности результатов моделирования

В конструкции RFIC-приемника легированный кремниевый слой выполняет роль «земли» и проектируются специальные проводники для соединения с ней. В борьбе со спиральными индуктивностями под ними располагают металлическую сетку или прокладывают защитное кольцо, которое обеспечивает «землю» и соответствующие пути отвода возвратных токов. Дополнительные металлические элементы в топологии вносят добавочные паразитные ёмкости, влияющие на характеристики схемы, но наличие «земли» повышает точность расчёта модели, существенно сокращая риск возникновения отказа из-за ошибок проектирования. Некоторые алгоритмы экстракции паразитных компонентов на более высоких частотах могут рассчитывать парциальную индуктивность, однако приводят к получению неточных результатов в случае, если контур тока не задан корректно.

Технология автоматической экстракции компонентов (Automated Circuit Extraction, ACE), встроенная в программный пакет NIAWR Design Environment, обеспечивает высокую точность расчёта на основе распределённых моделей для таких структур, как линии передачи тока и межслойные переходы. ACE моделирует межсоединения как каскадное соединение линий передачи, резисторов и даже моделей связанных линий для параллельных участков топологии (рисунок 44).

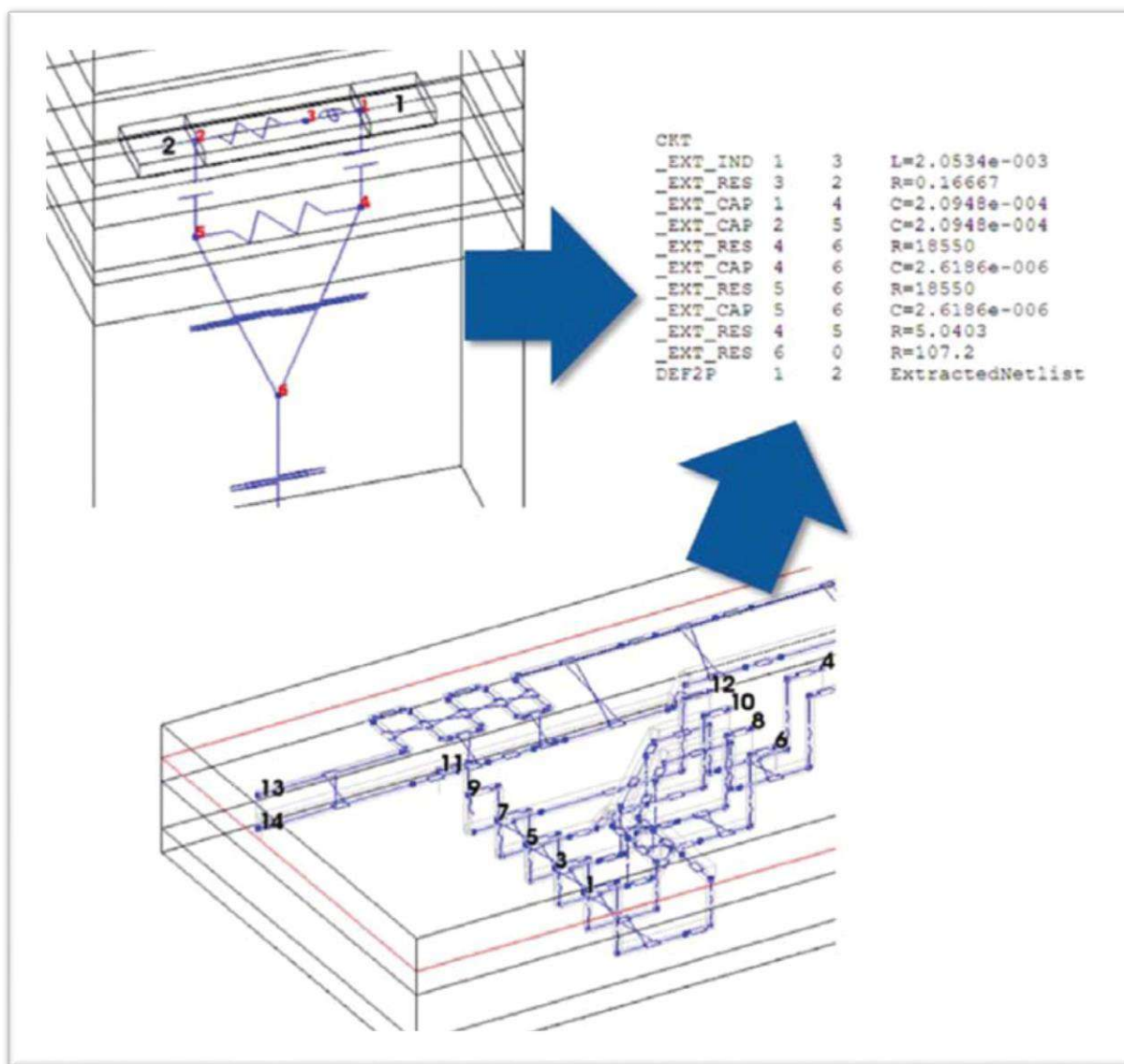


Рисунок 44 – Таблицы соединений (Netlist) при экстракции паразитных компонентов на основе структуры топологии схемы

Алгоритмы программного обеспечения (ПО) ACE расширяют возможности метода экстракции паразитных RLGC-компонентов для работы с электрическими длинными линиями на наиболее важных участках топологии в качестве альтернативы полноволнового моделирования с помощью 2,5D ЭМ-анализа планарной модификацией метода моментов. При этом точность распределённой модели зависит от качества определения спроектированной «земли» как соответствующего пути для возвратных токов.

3.14 Квазистатические алгоритмы анализа в поперечном сечении (2D)

Использование квазистатических алгоритмов 2D-анализа при моделировании предназначено для разработки поперечных сечений подложек и проводников ИС (рисунок 45). При этом выполняются вычисления погонной ёмкости структуры для последующего расчёта зависимостей от рабочей частоты и погонных индуктивностей и сопротивления линий передачи ИС.

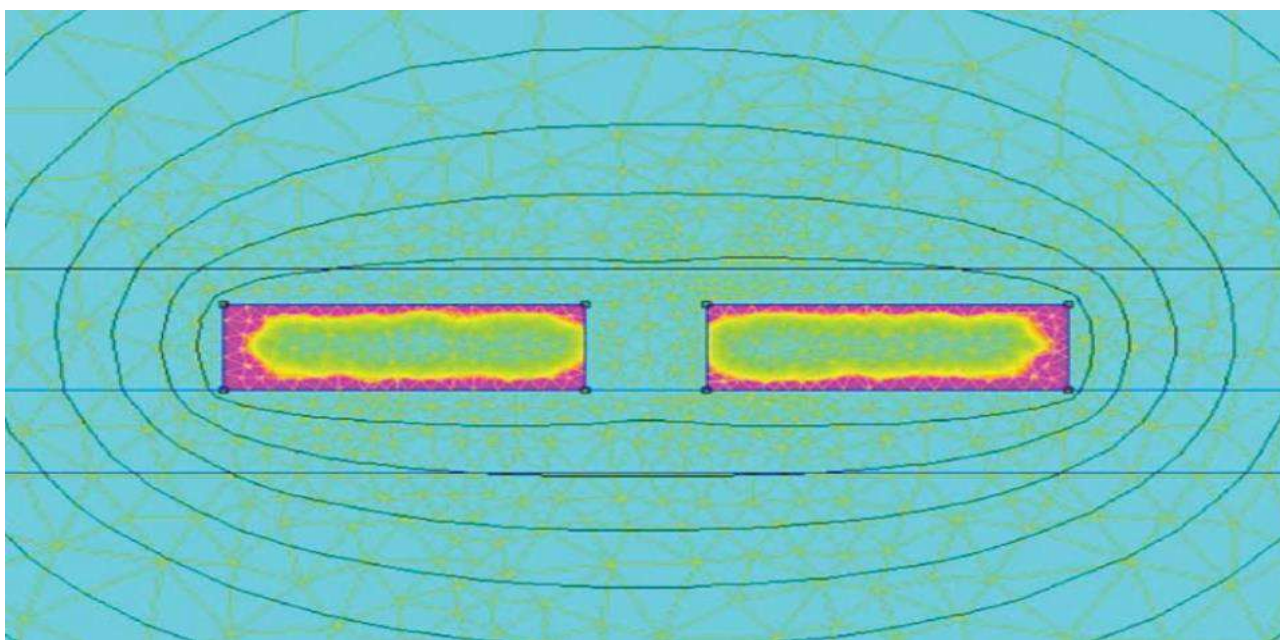


Рисунок 45 – Применение квазистатического алгоритма 2D-анализа при расчете поперечного сечения полупроводниковых ИС

Упрощённая форма этого алгоритма используется в методе экстракции паразитных компонентов при формировании матрицы статических ёмкостей. Более сложная версия включает в себя также расчет частотно-зависимых параметров (например, учитывает потери в кремниевой подложке) и используется в некоторых встроенных в NI AWR Design Environment моделях линий передачи на кремниевой подложке. Данный метод работает быстро и незаметно для пользователя. Разумеется, разработчик по-прежнему может вручную провести анализ межсоединения отрезка линии передачи или использовать ACE для метода экстракции модели. Алгоритм анализа линии передачи в поперечном сечении гарантирует точность её модели, но лишь при условии правильно заданных исходных данных.

3.15 Метод моментов (планарная модификация, 2,5D)

Метод моментов обеспечивает отыскание алгоритма решения в частотной области ИС при наложении сетки разбиения только на проводящие элементы конструкции и при использовании функций Грина для учёта взаимного влияния токов на них (рисунок 46). В процессе проектирования RFIC-приемника метод моментов используется для анализа распределённых линий и их межслойных переходов, где особенно важно определение фазовой задержки. К числу таких структур относятся, например, индуктивности, разветвления, неоднородности и участки длинных линий между активными компонентами. При использовании метода моментов для расчёта топологии на кремниевой подложке необходимо учитывать использование в RFIC-приемнике алюминия в качестве материала металлизации для верхнего слоя.

Обычно вычислительные алгоритмы при моделировании на основе метода моментов учитывают потери, используя импедансные граничные условия на поверхности металлического проводника с конечной проводимостью. При этом расчёт распределения токов внутри проводника не проводится, а это может приводить к неточностям при анализе сопротивления. Этот недостаток становится существенным при точном вычислении добротности спиральных индуктивностей, поэтому анализ добротности необходимо проводить при помощи полно-волнового (3D) моделирования методом ЭМ-анализа, например с помощью ПО Analyst, который за счёт разбиения внутреннего объёма проводника обеспечивает более точный результат.

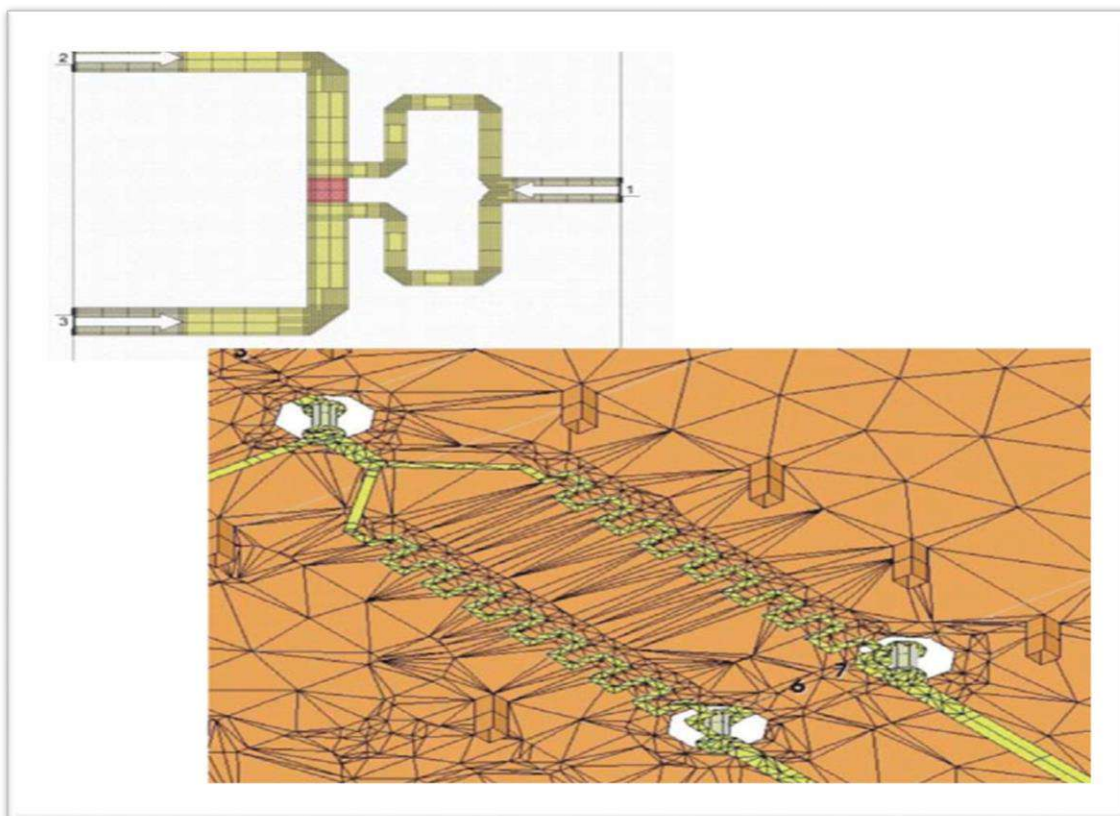


Рисунок 46 – Разбиение проводников для анализа методом моментов

3.16 Метод конечных элементов (3D)

В специализированном ПО Analyst используется полноволновой вычислительный алгоритм, отыскивающий решение уравнений Максвелла для моделей с объёмным (3D) разбиением на основе метода конечных элементов (FEM) (рисунок 47).

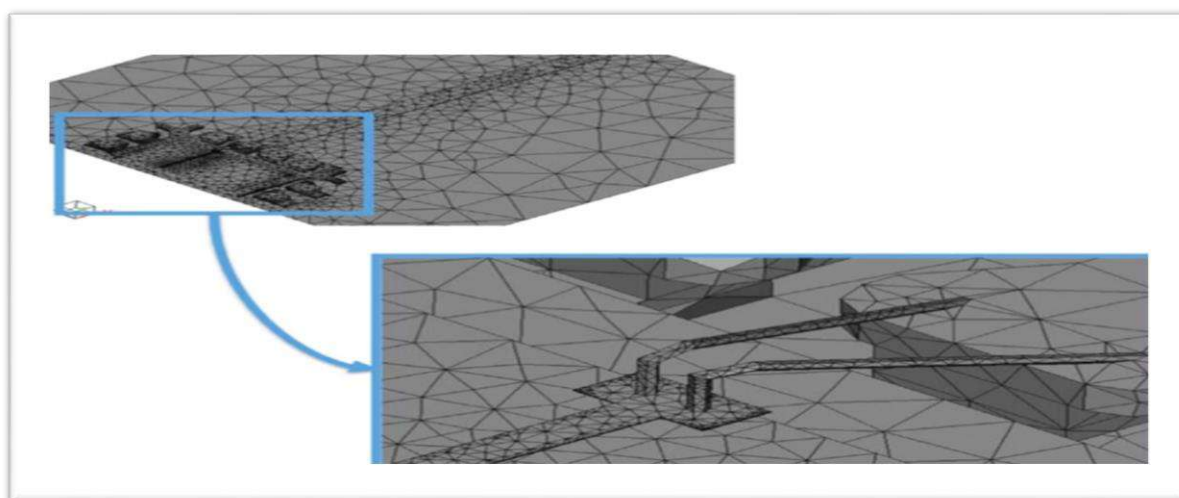


Рисунок 47 – Объёмное разбиение структур с произвольной геометрией для ЭМ-анализа методом конечных элементов

ПО Analyst может работать со структурами произвольной геометрии (например, проволочными соединениями), однако его вычислительный аппарат является наиболее ресурсоёмким и требует большего времени по сравнению с другими методами, используемыми при моделировании.

3.17 Интеграция методов ЭМ-анализа в средства разработки

При проектировании RFIC-приемников моделирование методом ЭМ-анализа является наиболее эффективным при условии, что плотность интегрированности разработки схемы объединяет и включает схемотехническое моделирование, оптимизацию, анализ выхода годных и поддержку технологических библиотек (PDK). Разработчикам, применяющим при моделировании различные методы ЭМ-анализа для создания точной схемы модели, необходима возможность легко переключаться между методами и сравнивать получаемые результаты для определения наиболее подходящего алгоритма в работе с конкретной структурой. В программе Microwave Office предусмотрена функция Switch Lists, предназначенная для перебора различных вариантов моделей на основе методов, рассмотренных нами выше, заменяющих в общей схеме один тип модели другим. Поддержка различных методов ЭМ-анализа в проекте необходима для полномасштабного моделирования гетерогенных RFIC-структур без необходимости импорта в ЭМ-модель сторонних программ. Например, NI AWR Design Environment поддерживает совместный анализ схемы в Microwave Office и Analog Office с обрабатываемыми в Analyst BGA-выводами, промоделированными в AXIEM спиральными индуктивностями со сложной цепью питания транзистора, рассчитанной при помощи ACE.

3.18 Совместное использование схемотехнического метода и метода ЭМ-анализа при моделировании топологии ИС для космического применения

Встраивание топологии метода ЭМ-анализа в иерархическую схему, объединяющую модели всех значимых структур RFIC-приемника с остальными активными и пассивными компонентами, даст возможность существенно повысить точности расчёта при проверке алгоритмов правильности проектных решений.

На рисунке 48 показана общая конструкция RFIC-приемника, активные компоненты которого объединены с моделью топологии при помощи In-Situ портов. Такая организация моделирования схемы прибора и анализ её алгоритма возможны благодаря специальным внутренним портам и функционалу AXIEM по исключению паразитных влияний. Специальные калибровочные линии служат для устранения неестественного взаимовлияния моделируемого порта и ближайших элементов топологии (De-Embedding).

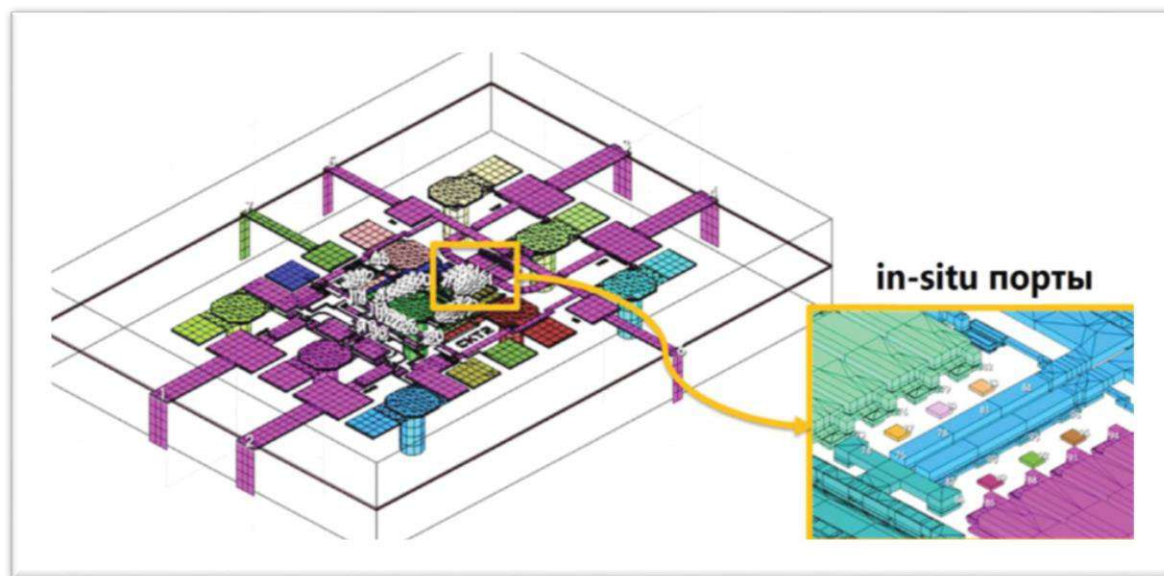


Рисунок 48 – Моделирование топологии ИС с внутренними портами

Для достижения точного совместного схемотехнического и ЭМ-анализа при моделировании необходимы определённые возможности соответствующих алгоритмов. Моделирование схемы в случае RFIC-приемника часто проводится в частотной и временной областях. ПО Microwave Office обеспечивает расчёт переходных процессов в цепях проводимых во времени, в то время как анализ в частотной области применяется для исследований в режиме большого сигнала с использованием метода гармонического баланса. Достижение точных результатов в этом случае обеспечивается наличием данных об импедансе цепи на всех выводах транзистора в широкой полосе частот, в т.ч. и на постоянном токе, на частоте сигнала и на частотах гармоник.

Некорректно определённый импеданс на постоянном токе приводит к неверному выбору смещения транзистора, а неправильно заданные нагрузки гармоническим составляющим рабочих частот оказывают влияние на характеристики транзистора в рабочей полосе частот. Некорректные значения импеданса на постоянном токе

чаще всего получаются при ошибочной экстраполяции S-параметров в точку $f = 0$ (рисунок 49).

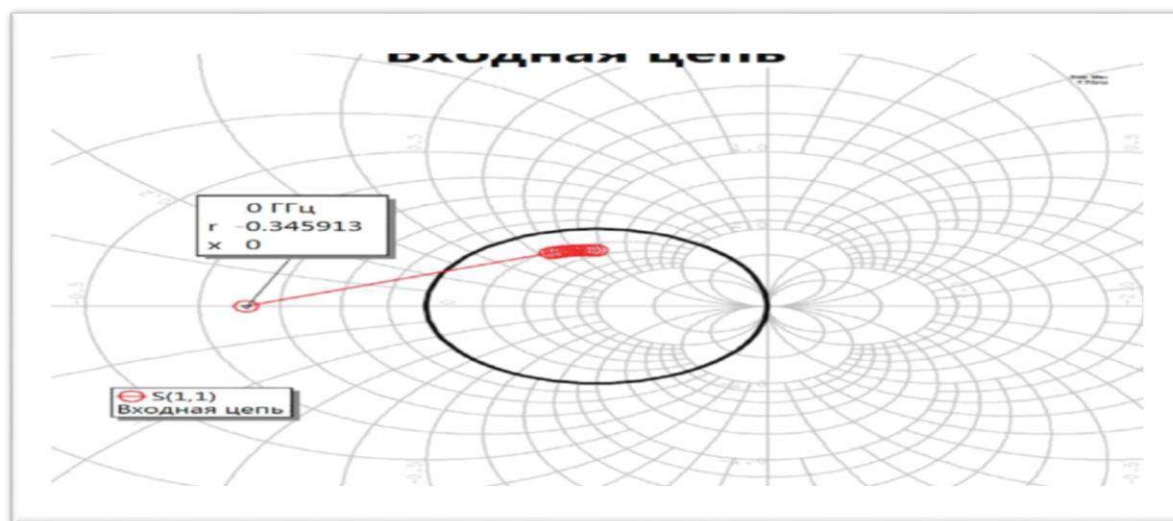


Рисунок 49 – Данные о входном импедансе цепи для моделирования параметров в режиме большого сигнала

Некоторые методы ЭМ-анализа, такие как метод конечных элементов, не лучшим образом подходят для вычисления импеданса на постоянном токе и на низких рабочих частотах. По этой причине в ПО Analyst нижним пределом при моделировании является частота 10 МГц, в то время как в AXIEM встроен специальный алгоритм расчёта импеданса на низких частотах, что позволяет применять его в задачах моделирования даже на постоянном токе. Для экстракции паразитных компонентов на постоянном токе разработчик может использовать программы AXIEM, ACE или аналогичную стороннюю программу метода ЭМ-анализа, которую можно подключить к компьютеру при помощи интерфейса EM Socket. Доступность и гибкость при использовании различных методов моделирования позволяют разработчикам ИС работать с большим количеством разнообразных структур, используя модели, обеспечивающие точные результаты вычислений. Применение метода ЭМ-анализа обладает рядом преимуществ, которые заключаются в большей гибкости при выборе плоскости отсчёта (задании измерительного порта), что при проведении практических измерений возможно с ограничениями и использованием векторного анализатора цепей. Однако обеспечение достоверности интерпретации результатов и калибровочное исключе-

ние RFIC-структур могут быть затруднены в модели большим количеством портов вследствие необходимости их учёта из-за близкого расположения друг к другу. Это приводит к ухудшению развязки между ними и увеличению ошибок при моделировании схемы ИС. Корректное определение опорной «земли» также является важным фактором, позволяющим избежать различий между результатами моделирования и экспериментальными данными.

Основной целью НИОКР проводимых ESA в области систем радиовидения в терагерцевом (ТГц) диапазоне, является разработка и проектно-исследовательское моделирование (макетирование) интегрированного гетеродинного приемника с двойной поляризацией на частоте 424 ГГц на базе монолитной интегральной СВЧ-схемы (мембраны ММИС) на диоде Шоттки, собранном на арсениде галлия. По мнению экспертов, использование такого супергетеродинного приемника позволит получать спектральную информацию и сделает данный прибор незаменимым при проектировании систем построения терагерцевых изображений. Теоретически предельная чувствительность супергетеродинного приемника близка к чувствительности приемников прямого детектирования, а теоретический предел флуктуационной чувствительности супергетеродинного приемника совпадает по порядку величины с соответствующим значением показателей лучших приемников прямого детектирования. Вместе с тем супергетеродинный приемник обладает рядом преимуществ по сравнению с приемником прямого детектирования, прежде всего, возможностью измерения спектральных характеристик теплового излучения объектов, наблюдаемых в пассивном режиме, а также получения информации о фазе принимаемого сигнала.

4 КОМПАНИИ-ПРОИЗВОДИТЕЛИ РАДИАЦИОННО СТОЙКОЙ ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Технологии изготовления РС ЭКБ космического применения интенсивно совершенствуются в направлении достижения приемлемой стоимости мелкосерийного производства с безусловным обеспечением требований: широкой номенклатуры; длительности жизненного цикла; надёжности; стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости, что обусловлено их возрастающей ролью в новейших системах РКТ.

По прогнозам экспертов США, в среднесрочной перспективе изготовление этого класса продукции будет увеличиваться на 3%÷4% в год, и ожидается, что к концу 2022 г. объем мирового производства РС ЭКБ достигнет в денежном выражении 1,3 млрд долл. США (в 2016 г. – 0,96 млн долл. США). Безусловными лидерами в данном сегменте являются 20 крупнейших компаний США и ЕС, на долю которых в 2017 г. пришлось более 45% и 20% соответственно мирового глобального рынка. При этом 12 из них - компании США: Honeywell Aerospace, Micro semi Cor., Xilinx, Texas Instruments, Maxwell Technologies, Cobham, Northrop Grumman, Atmel Cor., Linear Technology Cor., Aeroflex, Microchip Technology и Intersil Cor.

Зарубежный рынок достаточно обширен и насчитывает более 50 производителей РС ЭКБ в разных странах мира. По оценкам экспертов, общий объём рынка в 2105 г. составил 935,9 млн долл. США, совокупные темпы годового роста 4,46%, а к 2022 г. ожидается его увеличение до 1,4÷1,5 млрд долл. США. Рост рынка обусловлен повышенным спросом на ПП микроэлектронную продукцию, внедрением программируемых вентильных матриц и многоядерных процессоров в сферах военной и космической промышленности и существенным увеличением потребностей БРЭО для телекоммуникационных КА и применения в ядерной энергетике. По данным зарубежных источников, 35% производителей РС ЭКБ в мире имеют годовые обороты более миллиарда долларов США, а 45% – от полумиллиарда до миллиарда. По территориальному признаку 45% компаний

работают в Северной Америке (основном в США), 20% – в Европе (включая и РФ), 30% – в Азии и 5% – в других регионах.

При создании космического приборостроения используются сотни номиналов различных микросхем в интегральном и гибридном исполнении, а также широкий спектр дискретных ПП РС ЭКБ различной мощности и частоты. В архитектуре современных микропроцессоров и микроконтроллеров разных компаний-изготовителей имеется много общего, что дает унифицировать их архитектуру, а это особенно важно для РКТ с её крайне малыми объёмами потребления РС ЭКБ по сравнению с другими секторами (рисунок 50).

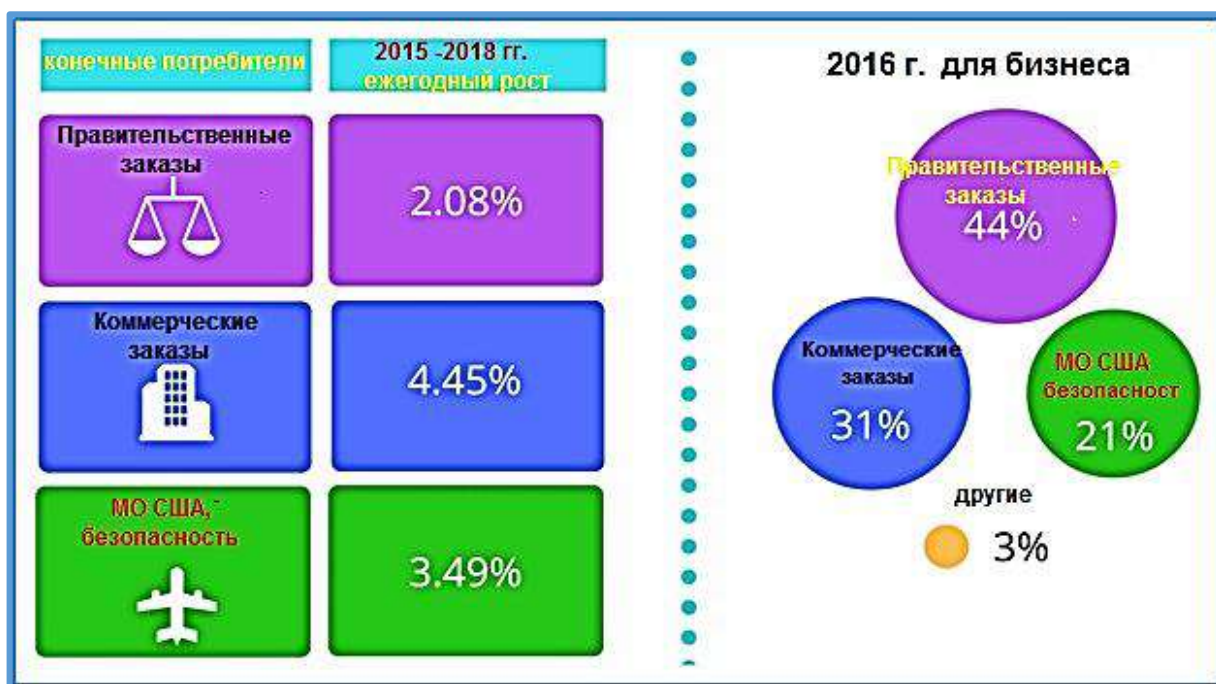


Рисунок 50 – Темпы роста и распределение потребностей в РС ЭКБ по конечному пользователю

4.1 Анализ компаний мира, занимающихся выпуском радиационно стойкой ЭКБ полупроводниковой микроэлектроники

В настоящее время развитием и выпуском продукции РС ЭКБ занимаются следующие компании: Honeywell Aerospace, Aeroflex Colorado Springs, Texas Instruments, Inc., Micro semi Cor., Xilinx, Inc., Raytheon, Harris Cor., Maxwell Technologies Inc., США; BAE Systems, Великобритания; Atmel Cor., Франция, Италия; STMicroelectronics, Швейцария.

4.1.1 Компания Honeywell Inc. (США)

В сфере РС ЭКБ зарубежные эксперты отводят лидирующие позиции компании Honeywell Inc., г. Мористаун, шт. Нью-Джерси (США). Годовой оборот компании в 2015 г. составил 38,58 млрд долл. США, с чистой прибылью – 4,75 млрд долл. США при общей численности сотрудников 131 тыс. чел.

Компания выпускает широкий набор РС ЭКБ на базе технологии «кремний на диэлектрике» с проектными нормами до 0,15 мкм, которая в сочетании с металл-оксид-полупроводниковой технологией (CMOS) обеспечивает низкие значения утечки тока и остаточной ёмкости при высоком уровне изоляции для смежных сигналов. Всё это в комплексе обеспечивает высокую РС ЭКБ и позволяет уменьшить вероятность одиночных сбоев (рисунок 51).

Руководство компании Honeywell Inc. производит и поставляет на рынок магистральные коммуникационные шины (SERDES, LVDS, RS422) на диапазон БСП в 1÷10 Гбит/с, которые соответствуют стандарту РС ЭКБ для РКТ и обеспечивают надёжную передачу и преобразование больших высокоскоростных потоков данных. Перспективным является микропроцессор с архитектурой PowerPC, изготовленный по технологии 0,35 мкм «кремний на изоляторе», с тактовой частотой $f_{такт} \sim 80$ МГц.

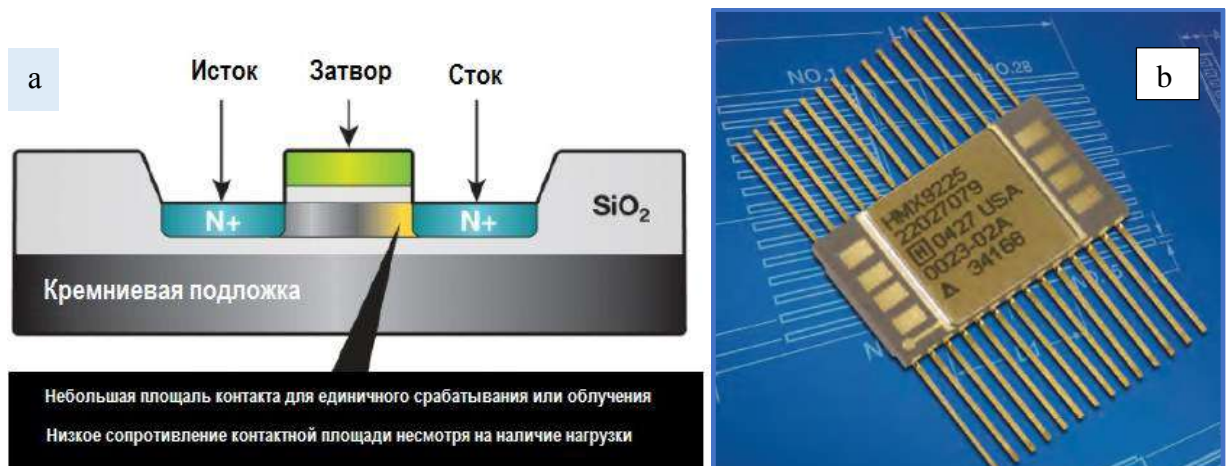


Рисунок 51 – Схематическое изображение технологии «кремний на диэлектрике» SOI CMOS (a); радиационно стойкие 12-разрядные АЦП HMXADC9225 (b)

Стойкость к накопленной дозе ≥ 300 крад(Si) гарантирует полное отсутствие тиристорного эффекта, а частота сбоев на ГСОО $\sim 1,5 \times 10^{-5}$ чип/день.

Кроме того, компания производит:

- низковольтные модули хранения данных на базе 4-ядерных МП с $f_{\text{макт}} \sim 100$ МГц;
- логические модули; 16- и 32-битные процессоры с $f_{\text{макт}} \sim 40$ МГц;
- вентильные матрицы (FPGA) программируемые пользователем, а также энергонезависимые высокотемпературные ОЗУ (MRAM) со стойкостью к НДР ≥ 1 Мрад (Si).

4.1.2 Международная военно-промышленная корпорация BAE Systems (Великобритания)

На втором месте по объёмам и значимости производимой продукции находится международная военно-промышленная корпорация BAE Systems (Великобритания) со штаб-квартирой в г. Фарнборо. Работы с заказчиками в США осуществляются через дочернее предприятие BAE Systems Inc. Годовой оборот за 2015 г. корпорации составил 17,9 млрд долл. США, чистая прибыль - 0,94 млрд долл. США при общей численности персонала – 86,5 тыс. чел.

Центр полупроводниковых технологий BAE Systems Inc., расположенный в г. Манассас, шт. Вирджиния (США), выпускает ЭКБ для БРЭА РКТ и на протяжении многих лет является мировым лидером в области нанотехнологий. В центре осуществляется полный цикл изготовления ИМС от первичного контроля материалов и оптической литографии схем, до корпусирования и полномасштабного тестирования приборов, произведённых по КМОП-технологии с нормами $0,8 \div 0,15$ мкм. Центр сертифицирован МО США в соответствии с MIL-стандартами и включён по категории 1А в список квалифицированных производителей (QML) и список доверенных поставщиков МО США.

Научная деятельность центра сосредоточена на двух направлениях: дальнейшем повышении РС технологии R15 и развитии технологий халькогенидных ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) наноэлементов энергонезависимой памяти. Полупроводниковая ЭКБ, изготовленная по технологиям R15 (КМОП $\sim 0,15$ мкм) и R25 (КМОП $\sim 0,25$ мкм), обеспечивает уникальные характеристики по РС (рисунок 52):

- работоспособность при накопленной дозе $D_{\text{н}} \geq 200$ крад(Si);
- бесперебойная работа при кратковременном облучении $\sim 2 \times 10^7$ рад/с;
- сохранение работоспособности после ИИ-облучения $\sim 1 \times 10^{12}$ рад/с;

- стойкость к тяжёлым заряженным частицам с $W_p \sim 120 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$;
- стойкость к нейтронному потоку до $1 \times 10^{13} \text{ нейтрон/см}^2$.

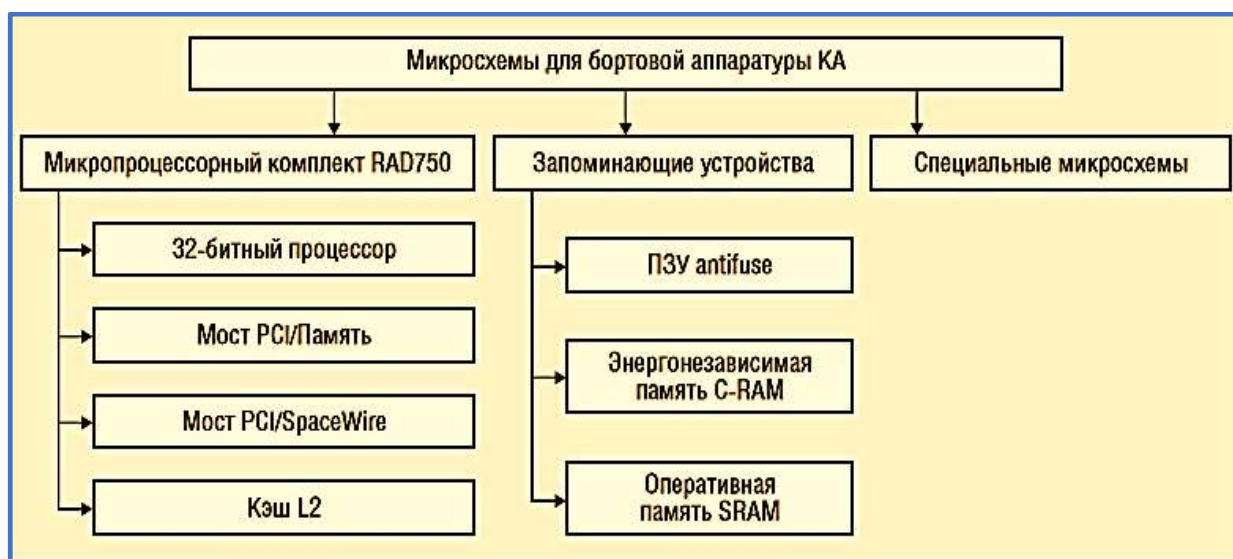


Рисунок 52 – Приборы радиационно стойкой ЭКБ компании BAE Systems

Для цифрового БРЭО ракетно-космического применения компания BAE выпускает 32-разрядный многоядерный микропроцессор с архитектурой PowerPC RAD750 с $f_{\text{такт}} \sim 200 \text{ МГц}$, изготовленный по PC КМОП-технологии 0,15 мкм в керамическом корпусе типа CCGA-360 с потребляемой мощностью МП RAD750 от 400 мВт до 5 Вт, стойкостью к накопленной дозе радиации $D_n \sim 1 \text{ мрад (Si)}$, с гарантированным отсутствием тиристорного эффекта и приемлемыми показателями стойкости к одиночным сбоям (рисунок 53).



Рисунок 53 – Внешний вид PC ЭКБ, производимой в BAE Systems

Компания BAE Systems (США) производит кремниевые пластины (подложки) по нормам 250 нм и 150 нм, широкий ассортимент микросхем памяти, работающих с различными напряжениями питания, статическую оперативную память объёмом до 80 Мбит и временем доступа до 7,5 нс, однократно программируемую память antifuse и энергонезависимую память.

Компания BAЕ Systems первая в мире освоила промышленный выпуск РС энергонезависимой памяти (СRAM) на основе халькогенидных ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) нано-элементов. Достигнутое количество циклов перезаписи одной ячейки без потери надёжности составляет 10^8 . Существенным преимуществом СRAM по сравнению с другими методами хранения информации является полная нечувствительность хранимой информации к электромагнитному полю, импульсам, ИИ и ДФКП. Микросхемы СRAM выпускаются в корпусах flatpack с 40 и 84 выводами и доступны в различных конфигурациях от $256\text{K} \times 8$ до $512\text{K} \times 32$. Доступны варианты со встроенной системой коррекции ошибок (ЕСС), которая уменьшает полезный объём сохраняемой информации в два раза, но значительно повышает надёжность хранения. Помимо РС ЭКБ для NASA, компания BAЕ разрабатывает, изготавливает и поставляет радиационно стойкие бортовые ЭВМ для КА в форм-факторе 3U и 6U.

4.1.3 Компания Atmel Cor. (США)

Компания Atmel Cor. в Сан-Хосе, шт. Калифорния (США) – один из лидеров по производству микроконтроллеров (MCS-51, ARM, AVR, AVR32), решений ёмкостного сенсорного ввода, сложной логики, устройств обработки смешанных сигналов, модулей энергонезависимой памяти и радиочастотных компонентов, предлагает потребителям «систему на кристалле» (SoC): если в качестве элементной базы выбирается ПЛИС, то используется термин (SoPC); если SoC содержит несколько процессоров, то в зависимости от архитектуры либо однокристалльный мультипроцессор (MPSoC), либо многоядерная система (multicore system).

Компания Atmel Cor. получила сертификацию на выпускаемую продукцию по стандартам MIL-PRF-38535, ESCC 9000, DSCC QML на уровне Q (военный) и V (космос), ESCC 2549000 (ESCC QML), а также квалифицирована агентствами: ESA, ФКА и NASA.

В QML-каталог включены РС ИМС категории ASIC (application specific integrated circuit) – заказываемая, специализированная ИМС для РЭО в авионике,

РКТ и телекоммуникациях; FPGA-микросхемы для РКТ; ИМС-памяти; микропроцессоры; микросхемы для военной промышленности, авионики и РКТ.

Потребителями продукции Atmel являются многие компании и агентства, в том числе Lockheed Martin, Northrop Grumman, Raytheon, EADS, Boeing и др.

Для космических применений компания предлагает РС ИМС типа SoG (Sea of Gates – «море транзисторов» (вентилей): специализированные ASIC ИМС на базе библиотеки ATC18RHA и 32-разрядные SPARC (Scalable Processor ARChitecture) с архитектурой процессора с изменяемой вычислительной мощностью, предназначенные для бортовых ЭВМ в составе РКТ. Производимая Atmel РС ЭКБ сохраняет работоспособность при ДНР до 300 крад(S_i) по стандарту MIL-STD 883 (метод1019). Для устранения одиночных сбоев и случайных переключений, вызванных SEU/SET (Single EffectLatchup и Single EventTransient), процессоры изготавливаются по технологии SOI, поддерживают тройное модульное резервирование критических узлов схем TMR (triple modular redundancy), а также оборудованы устройствами обнаружения/исправления ошибок (Error Detection and Correction – EDAC) и схемами проверки на чётность кэш-памяти. В условиях их эксплуатации в составе БРЭО КА, находящихся на ГСО, события типа SEU или SET могут происходить не чаще, чем один раз в 200 лет.

В январе 2016 г. компания Atmel Cor. была продана в корпорацию Microchip (США), сумма сделки составила 3,56 млрд долл. США. В настоящее время Microchip является владельцем всех линеек продукции компании Atmel, брендов, патентов, технологий и производственных мощностей.

4.1.4 Корпорация Microchip Technology Inc. (США)

Корпорация Microchip Technology Inc., расположенная в г.Чандлер, шт. Аризона (США), является производителем микроэлектроники с годовым оборотом в 2016 г. – 2,173 млрд долл. США, с чистой прибылью в 0,14 млрд долл. США и общей численностью персонала более 10 тыс. чел. Контроль качества на всех этапах производства соответствует стандарту ISO 9001.

Компания Atmel в составе Microchip продолжила выпуск РС ЭКБ для РКТ и авиационных систем военного назначения по ранее сертифицированным технологиям выпускаемых микросхем:

- *ATC18RHA*–*ASIC* – семейство ASIC-микросхем на базе библиотечных элементов, изготовленных по КМОП-технологии с пятислойной металлизацией и топологическими нормами 0,18 мкм. Ячейки памяти для ИМС разработаны с помощью САПР компании Cadence на базе ячеек, устойчивых к одиночным сбоям (SEU). Возможно использование до 6,5 млн логических ячеек, эквивалентных NAND₂. В микросхемы интегрировано EDAC-устройство. Допустимая по стандарту MIL-STD 883 (метод 1019) ДНР в пределах 300 крад (Si), диапазон рабочих температур -55 ÷ +125°C. Соответствуют стандартам качества: Mil-PRF 38535 QML-Q и QML-V; ESCC9000 (рисунок 54а).

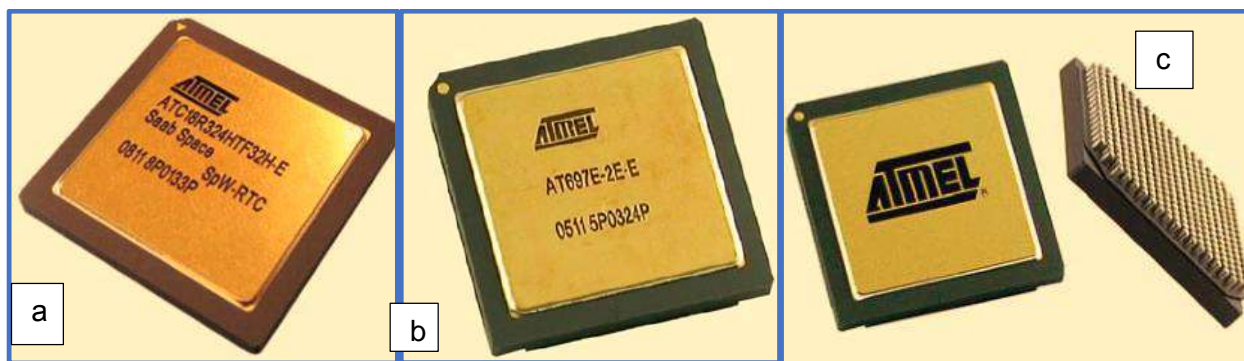


Рисунок 54 – Внешний вид интегральных микросхем корпорации Microchip Technology Inc. семейства ATC18RH (a); AT697E (b); AT913E (c)

Микросхема помещена в защищённый корпус MQFP (до 352 выводов) или MLGA (до 625 выводов). Предусмотрено пять исполнений ИМС с различным числом контактных площадок (216÷544) и используемых логических элементов (от 1 M gates/ATC18HA95 – 216 до 6,5 M gates/ATC18RHA – 544), размеры корпусов от 6,19×6,19 мм до 14,0×14,03 мм;

- *AT697E (F)* – высокопроизводительный 32-разрядный встраиваемый RISC-процессор высокой степени интеграции, основанный на отказоустойчивой модели LEON-2 (ЕКА) и выполненный на базе архитектуры SPARK V8 (рисунок 54b). Производится по РС КМОП-технологии AT58KRHA на пластине 0,18 мкм в корпусе MCGA 349 (9g) или MQFP 256. Поддерживает $f_{\text{max}} \sim 100$ МГц при мощности потребления до 1 Вт и обеспечивает производительность 86 MIPS/МГц

(миллион команд в секунду/МГц) (Dhrystone 2.1), MFLOPS (Whetstone). Архитектура AT697E включает стандартную внутреннюю шину Amba Bus для построения системы на кристалле, пятиступенчатую конвейерную организацию; 32 Кбит ассоциативной (с 4-мя входами) кэш-памяти инструкций; 16 Кбит ассоциативной (с 2-мя входами) кэш-памяти данных. Периферия на кристалле объединяет интерфейсы памяти PROM, SRAM, SDRAM, два 24-разрядных таймера, сторожевой таймер, два 8-разрядных UART; контроллер прерываний с 4-мя внешними программируемыми входами; 32 параллельных интерфейса ввода/вывода; интерфейс PCI 2.2 (33 МГц); интегрированный 64/32-разрядный модуль операций с плавающей точкой по IEEE 754. Стойкость к полной НДР составляет: для AT697E до $D_{нак} \geq 60$ крад(Si) и для AT697F до $D_{нак} \geq 300$ крад(Si) в соответствии со стандартом MIL STD 883 (метод тестирования 1019); SEU-поток ошибок $\leq 1 \times 10^{-5}$ ошибок/прибор/в день ($1 \times E^{-5}$). Гарантируется отсутствие тиристорного эффекта до уровня линейного порога передачи ≥ 70 МэВ·см²/мг, а прогнозируемая частота сбоя на ГСО $\sim 0,00001$ на чип/день.

Высокая отказоустойчивость достигнута за счёт применения полного тройного резервирования (TMR), исправления ошибок (EDAC), проверки чётности (Parity Protection), уровни качества производства ESCC/9512/003; QML-Q или V/5962-00540. Диапазоны рабочих температур от -5 до +125°C и напряжений питания $3,3 \pm 0,3$ В для ввода/вывода и $1,8 \pm 0,15$ В для ядра.

Микропроцессор AT697E совместно с внешней памятью и периферийными устройствами используется в бортовых ЭВМ РКТ (ПО «управление системой на лету»). Корпорация Microchip Technology Inc. для наиболее важных потребителей перерабатывает под брендом Atmel некоторые специализированные ИМС в стандартную ЭКБ, имеющую наибольший спрос на международном рынке. Одним из таких вариантов является набор изделий SpiceWire, позволяющих создавать телекоммуникационные сети на РС интегральных микросхемах.

- *AT7910E 10×SpaceWire Router* – маршрутизатор обеспечивает возможность коммутации узлов телекоммуникационной сети. Состоит из восьми интер-

фейсов SpaceWire и матрицы маршрутизации, которая позволяет передавать пакеты данных с одного устройства на другие. Микросхемы изготавливаются на основе библиотеки ячеек MH1RT по КМОП-технологии с нормами 0,35 мкм;

- *AT7913E* – контроллер терминалов дистанционного управления для обслуживания телекоммуникационных сетей типа SpaceWire (рисунок 54с), выполнен по технологии система на кристалле, с задачами ядра LEON2 FT SPARC V8 совместно с MEIKO FPU (стандарт IEEE-754). Подобная архитектура позволяет эффективно выполнять обработку данных на уровне платформы с мощной обработкой данных на уровне полезной нагрузки (payload level), которая состоит из интерфейсов CAN и SpaceWire для скоростной передачи информации от сетей датчиков; встроенный микропроцессор; АЦП/ЦАП; (CAN) контроллер; стандартных устройств ввода/вывода и ресурсов типа (UART, таймеры). Основные параметры микросхемы: 4 Кбит кэш-памяти инструкций; 4 Кбит кэш-памяти данных; интерфейсы типа ОЗУ, GPIO, FIFO, JTAG; две двунаправленные линии SpaceWire с поддержкой RMAP, полнодуплексные коммуникации (1,25÷200 Мбит/с в каждом направлении); с рабочим напряжением питания: ядра-1,6 ÷ 1,95В, ввода/вывода-3 ÷ 3,6 В, с диапазоном рабочих температур: -55÷+125°С; потребляемой мощностью 1 Вт при $f_{такт} = 50$ МГц и общей НДР до 300 крад(Si) по стандарту MIL-STD883 (метод 1019); ни одного случайного срабатывания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см². Прибор размещается в корпусах MCGA, MLGA (349 выводов) и CQFP (352 вывода);

- *AT7911E*–быстродействующий контроллер SpaceWire link, который содержит интерфейс связи между тремя линиям SpaceWire по стандарту ECSS-E-50-12A, узел обработки данных на базе микропроцессора и ИМС-памяти. Микросхема производится на основе библиотеки устойчивых к одиночным сбоям ячеек (MG2RT) и поддерживает выполнение основной части протоколов для линий межпроцессорных связей (рисунок 55а);

- *AT7912E* – одинарный быстродействующий контроллер, обеспечивающий связь между интерфейсом SpaceWire с другими интерфейсами. Микросхема изготавливается на основе SEU-библиотеки PC ячеек MG2RT (рисунок 55b). Компания Atmel при проектировании приборов на ЭКБ для РКТ с относительно

небольшим количеством вентиляй (Low gate count designs), предлагает использовать программируемые пользователем вентиляльные матрицы типа FPGA вместо ASIC.

Например, *ATF280* – статическое ОЗУ на основе матрицы FPGA, которое компания изготавливает по КМОП-технологии Atmel AT58KRHA с нормами 0,18 мкм (рисунок 55с).

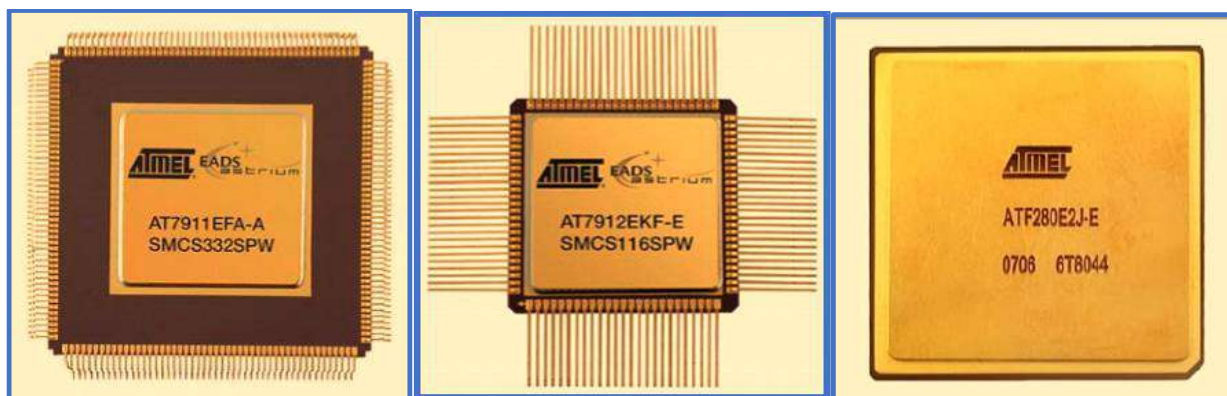


Рисунок 55 – Внешний вид микросхем семейства Atmel AT7911EFA (a); AT7912EKF (b); ATF280E2J(c)

При проектировании РС ЭКБ для РКТ с относительно небольшим количеством вентиляй компания Atmel предлагает FPGA-микросхемы (вместо ASIC). Так, ATF28 - статическое ОЗУ на основе FPGA, которое изготавливается по КМОП-технологии Atmel AT58KRHA с нормами 0,18 мкм. На основании приобретённого опыта в разработке РС ЭКБ компания Atmel доработала свои коммерческие статические ОЗУ на основе перепрограммирования FPGA для использования в жестких условиях ИИ ДФКП. Изделия прошли испытания при НДР ~60 крад(Si) в диапазоне рабочих температур $-55 \div +125^{\circ}\text{C}$ и с питанием от рабочего напряжения $3 \text{ В} \div 3,6 \text{ В}$.

4.1.5 Компания Aeroflex Colorado Springs, Inc. (США)

Компания Aeroflex Colorado Springs, Inc. в Колорадо-Спрингс, шт. Колорадо (США), ранее была известна как Aeroflex UTMC Microelectronic Systems, Inc. Компания прошла сертификацию РС ЭКБ и внесена в QML-каталоги для классов Q, T и V. Кроме того, подтверждено соответствие технологического процесса производства ЭКБ по классификации ISO 9001. Компания производит и

продвигает семейство микропроцессоров на основе ядра LEON3FTR-TAX и радиационно стойких ПЛИС RTAX2000S от компании Actel в корпусах: CQFP352 или CQFP624. Все модификации МКП LEON3FT-RTAX работают на $f_{\text{макс}} \sim 25$ МГц; обеспечивают стойкость к НДР $D_{\text{нак}} \sim 300$ крад(Si); гарантируют отсутствие «тиристорного» эффекта до уровня ЛПЭ не менее $104 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ и порог к одиночным сбоям ЛПЭ не менее $37 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

В мае 2009 г. компания Aeroflex Colorado Springs, Inc выпустила микропроцессор U699E на твердотельной микросхеме с целочисленным ядром типа SPARC V8, изготавливаемым по КМОП-технологии $0,25 \text{ мкм}$, с $f_{\text{макс}} \sim 66$ МГц, стойкостью к НДР – $D_{\text{нак}} \geq 300$ крад (Si), с гарантией отсутствия тиристорного эффекта до уровня ЛПЭ не менее $108 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

Микропроцессоры компании Aeroflex (рисунок 56) успешно используются в БРЭО на более 100 действующих КА общего и специального назначения США, NASA, Европейского космического агентства, Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) и др.

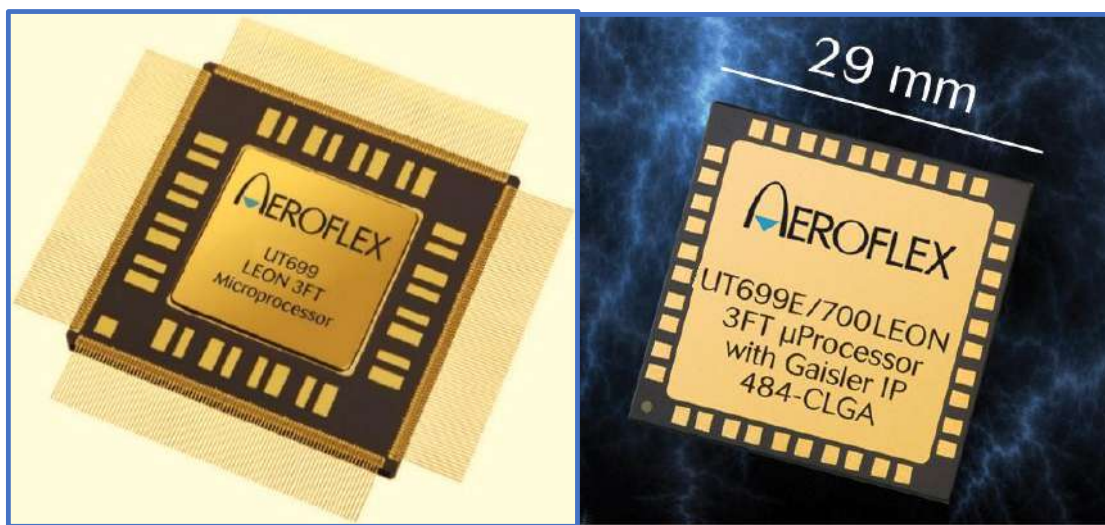


Рисунок 56 – Внешний вид микросхем LEON 3FTR-TAX и UT699E

4.1.6 Компания Aitech Defense Systems (США)

Компания Aitech Defense Systems, в Чатсворт, шт. Калифорния (США), предлагает COTS-продукцию, сертифицированную для военного и космического применения по стандарту Military Specification. Производит специализированные миниЭВМ для применения в БРЭО РКТ. Среди последних разработок следует отметить одноплатную миниЭВМ SP0-S с открытой VMEbus-архитектурой,

выполненную в типоразмере 3U CompactPCI, на основе PC микропроцессора NXP SOI MPC8548E PowerQUICC-III, на $f_{\text{такт}} \sim 833 \text{ МГц} \div 1,166 \text{ ГГц}$ со скоростью центральной шины ядра (Core Complex Bus – CCB) $\sim 333,3 \text{ МГц}$, кэш-памятью 64 КБ первого уровня и кэш-памятью 512 КБ второго уровня. Поддерживает оперативную память DDR2 ECC SDRAM 1 Гб, энергонезависимую память EEPROM 2 Мб для встроенного ПО и флэш-память 8 Гб для прикладных программ и передачи данных. Потребляемая мощность электропитания SP0-S не более 10 Вт. Обеспечивает стойкость к НДР $D_{\text{ндр}} \sim 100 \text{ крад (Si)}$ и стойкость к тяжёлым заряженным частицам с энергией $W_p \geq 65 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$ (рисунок 57). К достоинствам производитель относит наличие встроенных датчиков температуры и микроконтроллера со встроенными АЦП, позволяющего контролировать значения напряжений питания и разнообразные средства ввода/вывода. Оснащение SP0-S включает два порта Gigabit Ethernet, четыре асинхронных последовательных порта RS422, линии GPIO, слот РМС и две PCI-шины.

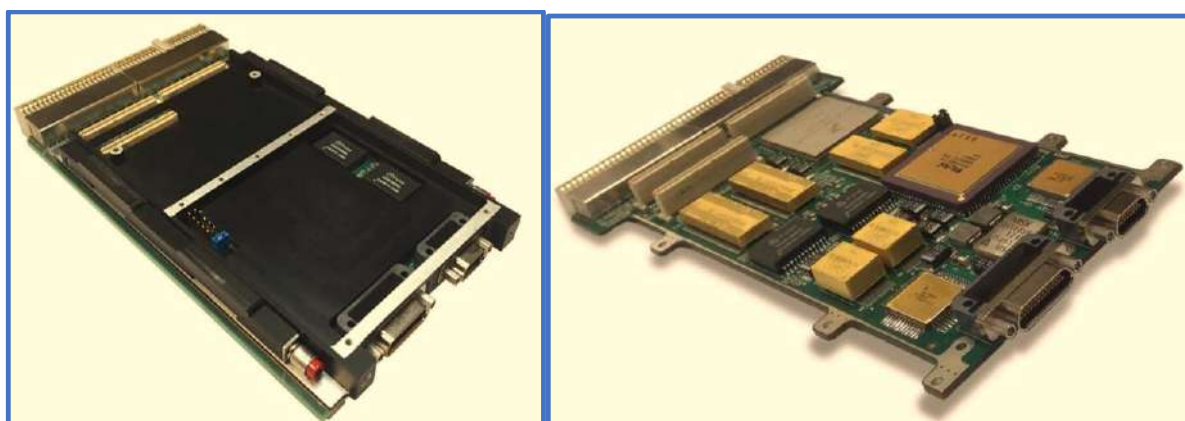


Рисунок 57 – Внешний вид радиационно стойкой одноплатной ЭВМ SP0-S

4.1.7 Компания Maxwell Technologies Inc. (США)

Компания Maxwell Technologies Inc., г. Сан-Диего, шт. Калифорния (США), более 45 лет занимается разработкой технологий и PC ЭКБ для БРЭО РКТ. Штат компании – более 450 сотрудников, работающих в США, Швейцарии, Германии, Китае и Корее. У компании запатентовано более 100 уникальных разработок, правами на которые она обладает.

В настоящее время компания Maxwell Technologies Inc. является одним из ведущих производителей широкого номенклатурного ряда PC ЭКБ для ВВТ и РКТ: микросхем памяти (EEPROM, SRAM, SDRAM, PROM, Flash); логических

ИМС; операционных усилителей; компараторов; мультиплексоров; АЦП/ЦАП; детекторов излучений и одноплатных миниЭВМ для использования БРЭА РКТ, отличающейся повышенной надёжностью, радиационной стойкостью и широкой функциональностью.

Продукция компании производится по принципу «готовое изделие является доступным на коммерческом рынке» (COTS), основанному на перенесении коммерческих технологий в сферу ЭКБ специального назначения. Такой подход позволяет использовать в качестве опытных образцов доступную на рынке коммерческую ЭКБ, что значительно снижает затраты на стадии их разработки для РЭА РКТ и ВВТ. Процесс производства начинается с тестирования чувствительности коммерческого кристалла к воздействию ИИ. В результате производится выбор партии изделий с максимальной устойчивостью к случайным воздействиям (SEE, SEL, SEU) и предельной НДР (TID), при которой сохраняется работоспособность РС ЭКБ. Вся продукция компании Maxwell проходит множественные отбраковочные испытания с использованием методов стандарта MIL-STD-883 и по окончании производственного процесса полностью соответствует стандартам MIL-PRF-38535 (класс S, QML-V, класс B, QML-Q) для монолитных микросхем и MIL-PRF-38534 (класс K, класс H) для гибридных микросхем.

В основном при производстве РС ЭКБ применяются технологии Rad-Pak[®] Maxwell (рисунок 58).


Изображение	Наименование	Краткие характеристики
	48SD1616	SDRAM, 256 Мбит (4М×16×4), 3,3 В
	48SD3208	SDRAM, 256 Мбит (8М×8×4), 3,3 В
	48SD6404	SDRAM, 256 Мбит (16М×4×4), 3,3 В
	72SD3232	SDRAM, 1 Гбит (8М×32×4), 3,3 В
	97SD3232	SDRAM, 1 Гбит (8М×32×4), 3,3 В
	97SD3240	SDRAM, 1,28 Гбит (8М×40×4), 3,3 В
	97SD3248	SDRAM, 1,5 Гбит (8М×48×4), 3,3 В
	29F0408	Flash, 32 Мбит (4М×8), 5 В
	69F1608	Flash, 128 Мбит (16М×8), 5 В, MKM
	28C256T	EEPROM, 256 кбит (32К×8), 5 В
	28C010T	EEPROM, 1 Мбит (128К×8), 5 В
	28C011T	EEPROM, 1 Мбит (128К×8), 5 В
	28LV010	EEPROM, 1 Мбит (128К×8), 3,3 В
	28LV011	EEPROM, 1Мбит (128К×8), 3,3 В
	79C0408RP	EEPROM, 4 Мбит (512К×8), 5 В, MKM
	79LV0408	EEPROM, 4 Мбит (512К×8), 3,3 В, MKM
	79C0832RP	EEPROM, 8 Мбит (512К×16), 5 В, MKM
	79LV0832	EEPROM, 8 Мбит (512К×16), 3,3 В, MKM
	79C2040RP	EEPROM, 20 Мбит (512К×40), 5 В, MKM
	79LV2040	EEPROM, 20 Мбит (512К×40), 3,3 В, MKM
	33C108	SRAM, 1 Мбит (128К×8), 5 В
	32C408B	SRAM, 4 Мбит (512К×8), 5 В
	33LV408	SRAM, 4 Мбит (512К×8), 3,3 В
	89LV1632	SRAM, 16 Мбит (512К×32), 3,3 В, MKM
	7025E	Двухпортовое ОЗУ (8К×16), 5 В
	7206F	FIFO (16К×9), 5 В
Изображение	Наименование	Описание
	7672	12-разрядный АЦП, 100 kSPS
	7805ALP	16-разрядный АЦП с параллельным интерфейсом, 100 kSPS
	7809LP	16-разрядный АЦП с последовательным интерфейсом, 100 kSPS
	7820	8-разрядный АЦП, 73,5 kSPS
	7872	14-разрядный АЦП, 83 kSPS
	9042	12-разрядный АЦП, 41 MSPS
	9240LP	14-разрядный АЦП, 10 MSPS
	7545A	12-разрядный умножающий ЦАП
	7846A	16-разрядный маломощный ЦАП
	8143	12-разрядный ЦАП с последовательным интерфейсом
	8408	8-разрядный КМОП ЦАП с памятью
	5675	16-разрядный быстродействующий ЦАП
Изображение	Наименование	Описание
	306	16-канальный аналоговый мультиплексор
	338	8-канальный аналоговый мультиплексор
	358	8-канальный аналоговый мультиплексор
	81840	128-канальный мультиплексор
	124	Четыре маломощных ОУ
	6484	Четыре КМОП ОУ
	OP220	Два микромощных ОУ
	OP284	ОУ
	OP400	Четыре маломощных ОУ с низким напряжением смещения
	OP490	Четыре микромощных ОУ
	139	Четыре компаратора с низким напряжением смещения
	903	Быстродействующий, малопотребляющий ОУ
	54BCT244	Восемь буферных элементов с тремя состояниями на выходе, 5 В
	54BCT245	8-разрядный приемопередатчик с тремя состояниями на выходе, 5 В
	54LVTH162244	Восемь буферных элементов с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	54LVTH162245	8-разрядный приемопередатчик с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	54LVTH162373	16-разрядный триггер-защелка с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	54LVT16373	16-разрядный триггер-защелка с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	54LVTH244A	Восемь буферных элементов с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	54LVTH245A	8-разрядный приемопередатчик с тремя состояниями на выходе, 3,3 В
	7B991	Управляемый формирователь тактовых импульсов
Изображение	Наименование	Описание
	HSN-3000	Радиационно-стойкий датчик (100% screen) с флагом наличия радиационного излучения
	HSN-2000	Радиационно-стойкий датчик (10% screen) с флагом наличия радиационного излучения
	HSN-1000	Радиационно-стойкий датчик (100% screen)
	HSN-500	Радиационно-стойкий датчик (10% screen)

Рисунок 58 – Перечень ЭКБ, производимой по технологиям Rad-Pak® Maxwell

4.1.8 Франко-итальянская компания STMicroelectronics (Швейцария)

Франко-итальянская компания STMicroelectronics (STM) была образована в 1987 г. путём слияния компаний SGS Microelettronica (Италия) и Thomson Semiconducteurs (Франция) и зарегистрирована в г. Женева (Швейцария). Общая численность персонала – 49,45 тыс. чел. в 35-и странах, а инновационное лидерство подтверждено 16-ю тысячами зарегистрированных патентов. Годовой оборот компании в 2015 г. составил 7,5 млрд долл. США, чистая прибыль – 0,2 млрд долл. США. Компания STM производит более 3000 различных типов ЭКБ: специализированные микросхемы (СБИС); микроконтроллеры; микросхемы памяти; ИМС со стандартной логикой и другие дискретные приборы. ЭКБ разрабатывается во многих странах Европы, в США, Индии и североафриканских странах, где развёрнута всемирная сеть исследовательских (12) и дизайнерских центров (32), а также заводов (17). Производство кристаллов для ЭКБ осуществляется в Италии, Франции и Сингапуре, а их тестирование и корпусирование – в Китае, Малайзии, Мальте, Марокко и Сингапуре. Среди заказчиков кристаллов у компании STM такие производители РС ЭКБ, как: Alcatel, Bosch, Daimler Chrysler, Ford, Hewlett-Packard, IBM, Motorola, Nokia, Nortel Networks, Philips, Seagate Technology, Siemens, Sony, Thomson Multimedia.

По данным, опубликованным на сайте компании STM, её производство полностью сертифицировано по стандартам ISO/TS 16949, QML-V, ISO9000, TL9000 и QS9000, а РС ЭКБ прошла сертификацию по стандартам ESA, JAN-S, и RHA по спецификации MIL-PRF-38535 с тестированием TM1019 по стандарту MIL-STD-883. Более 60 наименований РС ЭКБ обеспечивают стойкость к НДР $D_{\text{нак}} \sim 300$ крад (Si), поддерживают рабочий диапазон температур от -55 до +150° С и зарегистрированы в реестре QLM агентства МО США DSCC. В ассортимент РС ЭКБ для РКТ компании STM входят: MOSFET-транзисторы; биполярные транзисторы; диоды, 8, 16, 32-битные микроконтроллеры; ИМС-логические АС-MOS и HCMOS; ИМС управления питанием; дискретные компоненты; операционные усилители и компараторы; ИМС памяти типа EEPROM; датчики и MEMS (рисунки 58, 59, 60).



Рисунок 58 – Обзор номенклатурной линейки PC ЭКБ компании STM

В настоящее время компания STM производит два типа интегральных микросхем АЦП: 12-битную RHF1201 (85 мВт, 50 миллионов выборок в секунду (Mega Samples per Second – Msps) и 14-битную RHF1401 (85 мВт, 20 Msps), которые устойчивы к накопленной дозе радиации $D_{\text{нак}} \sim 300$ крад(Si) по методу TID-ELDRS (travelling ionospheric disturbance-Enhanced Low Dose Rate Sensitivity) перемещающихся ионосферных возмущений с расширенной низкой чувствительностью к уровню мощности излучения дозы и квалифицированы по американскому стандарту программы QML-V (рисунок 59а).

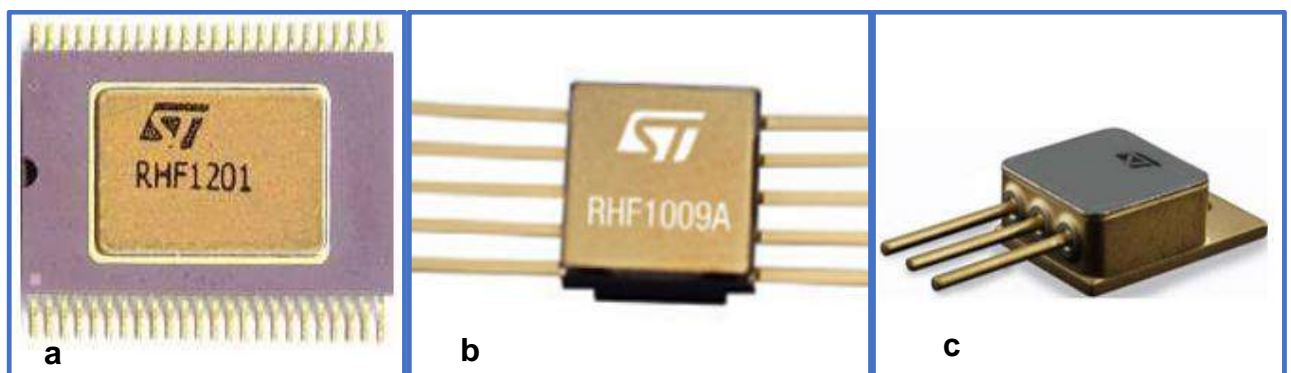


Рисунок 59 – Радиационно стойкие интегральные микросхемы компании STM АЦП RHF1201 (a); RHF1009A (b); диод Шоттки (c)

Источники напряжения у интегральных микросхем: RHF1009 с фиксированным $\pm 1,2$ В и RHF1009A – регулируемый (2,5 В \leftrightarrow 5,5 В) прецизионный шунтовой источник, обеспечивают стойкость к ДНР до 300 крад(Si) при облучении ТЗЧ 120

МэВ*см²/мг. Имеют высокую стабильность 15 ppm/°C¹⁰ при температуре от -55 до +125 °С и широкий диапазон рабочих токов $I_{раб} = 40 \text{ мкА} \div 12 \text{ мА}$. Устройства выпускаются в металлокерамических 10-контактных корпусах (рисунок 59b)

Диод Шоттки

Наименование	Uобр. макс., В	Iпрям. макс., А	Uпрям. макс., В	TID LDR/HDR, крад (Si)	ESCC квалификация	Корпус
1N5819U	45	1.0	0.490	150/3000	5106/021	LCC-2B
1N5822U	40	3.0	0.485	150/3000	5106/020	LCC-2B
STPS1045HR	45	2×10	0.750		5106/017	SMD.5
STPS6045HR	45	2×30	0.750		5106/018	TO-254
STPS20100HR	100	1&2×20	1.000		5106/016	TO-254 – SMD.5
STPS40100HR	100	2×20	0.900		5106/019	TO-254

Биполярные диоды

Наименование	Uобр. макс., В	Iпрям. макс., А	Uпрям. макс., В	Твремя вост., нс	TID LDR/HDR, крад (Si)	ESCC квалификация	Корпус
1N6640U	75	0.3	1.06	9	–/3000	5101/026	LCC-2D
1N6642U	100	0.3	1.20	9	–/3000	5101/027	LCC-2D
1N5806U	150	2.5	1.00	30	150/3000	5101/014	LCC-2A
1N5811U	150	6.0	0.95	35	150/3000	5101/013	LCC-2B
BYV52HR	200	30	1.15	55		5103/030	TO-254
BYV54HR	200	40	1.30	60		5103/031	TO-254AA
BYW81HR	200	1×15 A 2×15A	1.10	40		5103/029	TO254-SMD.5

MOSFET-транзисторы

Наименование	Тип	Uси, В	Iс макс. (25 °С), А	Rси макс., мОм	Qз макс., нКл	TID, крад	Корпус	Корпуса в разработке
STRH40N6	N	60	30	45	52	70	SMD 0.5	TO-257AA
STRH100N6	N	60	50	13.5	161	70	TO254AA	SMD2
STRH8N10	N	100	8	300	22	70	SMD.5	TO-254AA
STRH100N10	N	100	48	35	162	70	TO254AA	SMD2
STRH12P10	P	–100	10	340	44	100	TO257AA	SMD.5
STRH40P10	P	–100	34	75	200	100	TO254AA	SMD2

Биполярные транзисторы

Наименование	Тип	Uкз, В	Iк, А	Усиление
2N2222A	NPN	40	0.8	100
2N2907A	PNP	–60	0.8	100
2N2907A*	NPN	60	0.03	300
2N3700	NPN	80	1.0	100
2N3810*	PNP	–60	0.05	150
2N5153	PNP	–80	5.0	70
2N5154	NPN	80	5	70
2N5401	PNP	–150	0.6	60
2N5551	NPN	150	0.6	60



ШИМ-контроллеры ST-1843 – ST-1845

Рисунок 60 – Характеристики полупроводниковой РС ЭКБ компании STMicroelectronics

¹⁰ppm, parts per million – миллионная доля – единица измерения относительных величин, равная 1×10^{-6} от базового показателя. Температурные коэффициенты напряжения – обозначаются как ppm/°C.

Особой группой выпускаемых приборов являются ШИМ-контроллеры (Pulse-Width Modulation - PWM) – это приборы, которые осуществляют кодирование аналогового сигнала путём изменения ширины (длительности) прямоугольных импульсов несущей частоты.

4.1.9 Международная компания TowerJazz (Израиль)

Компании Израиля располагают высокоразвитой базой для производства специализированной высокотехнологичной РС ЭКБ различного назначения. Зарубежные эксперты по аналогии с «кремниевой долиной» США называют пригород Тель-Авива «силиконовой долиной» Израиля.

Основным производителем РС ЭКБ в Израиле является международная компания Tower Jazz, под эгидой которой совместно работают: компании Tower Semiconductor Ltd. (NASDAQ: TSEM, TASE: TSEM) и полностью принадлежащие ей подразделения: в США-Jazz Semiconductor Inc., в Японии-TowerJazz Japan Ltd. Эти компании являются ведущими мировыми производителями ПП-ЭКБ, производящими ИМС с широким выбором гибких производственных технологий, таких как:

-кремний-германиевая (SiGe) молекулярно-лучевая эпитаксия (molecular beam epitaxy MBE);

-биполярная КМОП-технология (BiCMOS);

-КМОП-технология для смешанных применений (Mixed-Signal/CMOS);

- датчики изображения по КМОП-технологии;

- радиочастотные КМОП-технологии (RFCMOS) и

- микроэлектромеханические MEMS-системы.

Компания TowerJazz имеет производственные мощности в трёх географических регионах Земли, что позволяет обеспечить поставку ежегодно более 2,3 млн кремниевых подложек (пластин) из монокристаллического кремния. WaferWorld (Si) и является основой для производства ПП ЭКБ. От чистоты и бездефектности кремниевых подложек зависят качество и функциональные возмож-

ности ЭКБ. Пластины изготавливают ($dd \sim 200$ мм, 300 мм и 400 мм) в соответствии с международным стандартом SEMI, производство сертифицировано и соответствует стандартам AS9100:2004/ISO9001:2008.

Две фабрики, расположенные в Мигдале Хаемек, (Израиль), производят пластины $dd \sim 150$ мм и ~ 200 мм; одна фабрика ($d \sim 200$ мм) – в Ньюпорт-Бич, шт. Калифорния (США), одна – в Сан-Антонио, шт. Техас (США). Кроме того, три фабрики, производящие кристаллы ($dd \sim 200$ мм и 300 мм), управляются международной радиоэлектронной компанией TPSCo (TowerJazz Panasonic Semiconductor Co. Ltd.) в Хокурику (Япония). Производство второго поколения РС ЭКБ с применением технологии 0,18 мкр по технологии RHBD (Rad-Hard by Design) осуществляется с 2011 г. на предприятии в Мигдал Химер (Израиль).

Компания TowerJazz предлагает проектировочную платформу мирового класса, обеспечивающую быстрый и точный цикл разработки и предоставляет всем компаниям-производителям интегральных схем и нуждающимся в расширении мощностей, но не имеющим такого производства, услуги по оптимизации производственной технологии (TOPS).

4.1.10 Компании Fujitsu Ltd и Mitsubishi Heavy Industries (MHI) (Япония)

В Японии, производством полупроводниковой микроэлектроники занимаются порядка 10 предприятий, сосредоточенные в городке Минато, пригороде Токио. Анализ имеющихся материалов показал, что: компания Fujitsu Ltd с числом сотрудников $\sim 172\,438$ чел. и компания Mitsubishi Heavy Industries (MHI) с числом сотрудников $\sim 68\,816$ чел. являются основными производителями РС ЭКБ:

- компания MHI при содействии Аэрокосмического агентства Японии (JAXA) ввела в эксплуатацию уникальную производственную линию по изготовлению ИМС специального и космического применения. В планах MHI расширение номенклатуры и объёмов производства РС ЭКБ; внедрение передовых технологий производства, повышение качества и надёжности изделий. Предполагается, что данная продукция относится к одному из наиболее дорогостоящих видов ПП-микроэлектроники и, помимо ее традиционного использования в атомной энергетике, производстве радиоэлектронной аппаратуры космического

назначения, в ближайшие годы станут активно внедряться и в другие отрасли промышленности. В настоящее время потребности в РС ЭКБ для микроэлектронной промышленности Японии удовлетворяются в основном за счёт импорта. Исходя из того что РС ЭКБ в ценовом эквиваленте составляют лишь 10% от общей стоимости БРЭО КА, это существенно снижает конкурентоспособность космической техники и услуг Японии. По мнению аналитиков, это является основным препятствием развития национального производства ЭКБ для БРЭО космического применения, космической отрасли в целом и угрожает технологической независимости страны. Правительством Японии принято решение отнести производство РС ЭКБ к категории стратегически значимых изделий с импортозамещением, а в качестве *главной* - поставлена задача создания производств РС ЭКБ для устойчивого обеспечения национальной промышленности критическими ЭКБ на долгосрочный период. По мнению экспертов, подобный подход учитывает также и прогнозируемое на ближайшую перспективу увеличение мирового спроса на РС ЭКБ в отраслях, связанных с эксплуатацией радиоэлектронного оборудования в экстремальных условиях.

Для выпуска специализированной РС ЭКБ с улучшенными ТТХ (быстродействие, энергопотребление, надежность, термостабильность и др.) в компании МНІ внедряется усовершенствованная версия технологического процесса «кремний на изоляторе» (SOI). На основе данной технологии в Институте космических и астрономических наук (JAXA ISAS) создана РС ИМС системного уровня (SOI SOC) с проектными нормами $d \sim 200$ нм и менее. Основными потребителями РС ЭКБ являются предприятия-производители вооружений и аэрокосмической отрасли, военной и специальной техники. Одновременно специалисты в Японии изучают запросы всех заинтересованных отраслей страны, чтобы путём анализа параметров и планируемых потребностей в ПП-ЭКБ добиться возможной унификации, сократить номенклатуру, расширить библиотеки стандартных элементов ИМС и выйти на коммерчески обоснованные объёмы их выпуска;

- компания Sumitomo, Токио, с числом сотрудников 5148 чел. – разрабатывает и производит: монолитные СВЧ-микросхемы; усилители; транзисторы в

диапазоне рабочих частот до 100 ГГц для РЭО космического применения, телекоммуникации, радиолокации;

- компания Nippon Electric Company (NEC), Токио, с числом сотрудников 153 922 чел.—разрабатывает решения для: мобильных и фиксированных сетей; широкополосных систем связи; решений в сфере полупроводников; IT и Интернет-сетей и входит в двадцатку ведущих мировых производителей ПП-ЭКБ. В своём составе имеет: 334-дочерние компании; 18-представительств в 18 странах, 23-завода в 12 странах; 61-компанию по сбыту в 26 странах. Одним из достижений компании NEC является разработанное в кооперации с Национальным институтом передовой промышленной науки и технологии, производство перспективных программируемых пользователем вентильных матриц NB-FPGA с памятью на нанопереходах, обладающей крайне высокой радиационной стойкостью.

В совместных исследованиях с JAXA и в наземных испытаниях в условиях сильного радиационного заражения (по всей видимости, в зоне аварии АЭС Фукусима) изделие показало высокую устойчивость к НДР и полное отсутствие единичных отказов или сбоев при крайне низком потреблении энергии.

4.2 Кооперация разработчиков и производителей РС ЭКБ

При создании и производстве РС ЭКБ для применения в БРЭО РКТ базовой является задача обеспечения приемлемой стоимости мелкосерийного производства изделий при безусловном обеспечении требований: широкой номенклатуры; длительного жизненного цикла; надежности; стойкости к ДФКП и отказоустойчивости. Выпуск высоконадежных компонентов РС ЭКБ в небольшом количестве нерентабелен для крупных предприятий электронной промышленности, однако представляет весьма доходный и динамично развивающийся бизнес как для небольших специализированных компаний (в США – Aeroflex, в Японии – Sumitomo), так и для создаваемых специализированных подразделений в крупных корпорациях (BAE Systems (Великобритания), General Dynamics, Honeywell (США) и TowerJazz (Израиль)). В кооперации, как правило, задействуются ведущие производители металлокерамических корпусов, кристаллов (подложек) и изделий из специализированных элементов (материалов), а так как основным потребителем РС ЭКБ до сих пор остаются

США, то самым распространенным вариантом организации международной кооперации является создание филиалов зарубежных компаний на территории США. Подобным образом работают филиалы компаний: BAE Systems (Великобритания); Jazz Semiconductor (Израиль); STMicroelectronics (Франция-Италия) и др. Еще одним вариантом организации международной кооперации в США является размещение научно-исследовательских лабораторий в других дружественных странах. Например, в Израиле функционируют аналогичные подразделения известных научных лабораторий из США и ЕС, а кооперация внутри стран получила ещё более широкое распространение, поскольку лишь небольшое количество компаний имеет технологические и производственные возможности по изготовлению готовых функциональных устройств и широко сотрудничает в плане поставок элементной базы ЭКБ (особенно кристаллов и РС корпусов для ИМС).

В рамках существующей международной кооперации все западные компании указывают на то, что они строго придерживаются международных, но в большей мере американских ограничений на продажу элементов и технологий по производству РС ЭКБ. Вариант кооперации по производству РС ЭКБ для РКТ наглядно демонстрирует рисунок 61, который отражает алгоритм работы компании Telecommunication Systems, Inc, США.



Рисунок 61 – Кооперация компании TCS в процессе разработки, испытаний и производства РС ЭКТ

5. О ФОРМИРОВАНИИ В США НОВОГО ГЛОБАЛЬНОГО РЫНКА КОМПЛЕКСНЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В США реализуется программа формирования нового глобального рынка с 5,3 %-м годовым ростом ВВП, с ключевым технико-экономическим показателем роста объемов товарного производства полупроводников, в том числе и СР ЭКБ, в котором в течение последних двадцати лет наметилось снижение стоимости одного транзистора при переходе на меньшие проектные нормы, а стоимость одного бита микросхем памяти ежегодно снижалась на 30÷35 %. Однако при переходе от проектных норм 28 нм к 20 нм стоимость транзистора перестала снижаться. Причем использование новых технологий повлияло на рост затрат при разработке технологического процесса (до 1 млрд долл. США) и стоимости завода (10млрд долл. США) из-за высокой стоимости и сложности технологического оборудования. К примеру, для фотолитографических устройств и фотошаблонов, стоимость комплекта которых в проектных нормах 32 нм составляет от 4 до 6 млн долл. США, рост операционных расходов современного завода, обеспечивающего массовое производство полупроводников, в значительной степени определяется возросшим энергопотреблением в среднем до 100 МВт. Как следствие, существенно снизилась доходность производства ПП и выросли риски достижения технических, энергетических, экологических и ресурсных барьеров в ближайшие 5÷10 лет. Стало очевидно, что прежняя модель развития электронной отрасли США, основанная на высокой доходности, себя практически исчерпала. Ответом на это стало создание программы «Цифровая экономика США» с целью обеспечения многократного увеличения объемов производства и продаж полупроводниковой микроэлектроники как внутри страны, так и за рубежом. По сути, эта программа стала началом передела крупнейшими компаниями США сложившихся глобальных рынков по продажам ПП-микроэлектроники на вновь создаваемые с финансовой поддержкой инвестиционными компаниями, лидерами которых в настоящее время являются перечисленные выше компании. Все сформированные к настоящему времени векторы развития электронной промышленности, такие как современные технологии двойного назначения, «промышленный Интернет», «умный дом», умный город», «цифровое предприятие», «средство передвижения без водителя», «криптовалюта» и т. д. — это прежде всего массовые потребители полупроводниковой, микроэлектронной и радиоэлектронной аппаратуры, а значит появились новые перспективы для корпораций заработать большие деньги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей производства РС ЭКБ для авиационного и космического применения является обеспечение приемлемой стоимости мелкосерийных производств электронно-компонентной базы при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного жизненного цикла, высокой надёжности и стойкости к ДФКП ИИ.

Анализ исследований в сфере организации разработок и производства РС полупроводниковой микроэлектроники в США, ЕС, Израили, Японии, Китае, Индии и странах ЮВА, а также поиск новых перспективных направлений развития технологий, процессов производства и материалов для РС ЭКБ показывает следующее:

- поставки специализированной ЭКБ из США и ЕС в другие страны ограничены контрольными списками и санкциями;

- перспективные ПП-изделия: ИМС, СБИС, МКП, матрицы, вентили, ЦАП/АЦП и др., изготавливаются по технологиям КМОП/КНИ, КМОП/КНС на арсениде галлия ($GaAs$), нитриде бора (BN), карбиде кремния (SiC), алмазе с применением перспективных соединений TiN , Ru , RuO_2 , Ir , IrO_2 . Происходит объединение структур S_i КМОП с G_e КМОП, используются диэлектрики с высокой величиной диэлектрической постоянной $k \sim 100$ и с увеличенной подвижностью носителей *p*- и *n*-типа;

- ведется активный поиск и изучение ПП-материалов с повышенной подвижностью носителей *n*- и *p*- типа для изготовления канала полевого транзистора, осваиваются новые конструктивные решения изготовления транзисторов со сверхтонкими объемами полностью обедненного сапфира, структуры типа FinFET («рыбий плавник»), новых металлических электродов и многослойных конструкций затвора и многозатворных структур МОП-ПТ;

- масштабирование МОП-ПТ более перспективно, чем масштабирование полностью обедненного кремния на изоляторе МОП-ПТ; идеальным МОП-ПТ в ближайшее время станет многозатворный прибор; предполагается, что новые схемы памяти будут тесно связаны со свойствами КМОП-структур;

- для защиты БРЭО в составе РКТ от ИИ и ДФКП ведущие компании используют радиационно стойкие защитные экраны, пленки и разрабатывают РС приборы, в которых используются: кристаллы и подложки кремния (S_i), германия (G_e), галлия (G_a) и др. перспективные соединения, структур, оксидов и ранее не используемых элементов;

- совместное стратегическое решение, принятое в США и Европе, по производству автоматизированной линии обработки кремниевых пластин диаметром 450 мм и 300 мм для выпуска ИМС;

- наблюдается уменьшение проектных норм изготовления РС СБИС. Так, компания BAE Systems (США) приступила к выпуску специализированных РС СБИС с топологией 45 нм, а корпорация Samsung (Южная Корея) представила РС ИМС типа NAND-flash-памяти, выполненных с технологическим полушагом 60 и 42 нм;

- в соответствии с планами масштабирования микросхем памяти определён курс на уменьшение размеров элементов памяти с полушага 40 нм, 32 нм, 22 нм, 16 нм, 11 нм, 8 нм и 6,5 нм, с использованием метода жесткой УФ-литографии; намечена разработка и производство нового поколения оборудования для УФ-литографии, приспособлений и химикатов, используемых в серийном производстве новых конструкций и разных классов схем памяти, которые намечено реализовывать вплоть до 2026 года;

- разрабатывается, тестируется и готовится к серийному производству новая «этажерочная» архитектура ячеек памяти; активно прорабатывается новая конструкция перспективного нанополевого транзистора со «скрученным затвором», который, как предполагается, приведет к революционному развитию программы масштабирования схем памяти;

- разработчикам, занимающимся математическим моделированием технологических процессов производства ПП-микроэлектроники, необходимо четкое понимание современных методов, которые наилучшим образом подходят для эффективного управления процессами проектирования и моделирования широкого ряда конкретных топологий микросхем, монолитных интегральных СВЧ-схем (MMIC) и RFIC-приемников целиком и вариантов их корпусирования с учетом оптимальных соотношений рабочих частот, скорости и точности расчёта используемого программного обеспечения типа NI AWR Design Environment, благодаря его широким вычислительным возможностям и встроенному интерфейсу

EM Socket, для совместного моделирования в Microwave Office как перспективной платформы для интеграции различных методов ЭМ-анализа, позволяющей им использовать возможности моделирования специального ПО AXIEM, Analyst и ACE, а также алгоритмов сторонних разработчиков;

- основной целью НИОКР, проводимых ESA в области систем радиовидения в терагерцовом диапазоне, является разработка и проектно-исследовательское моделирование (макетирование) интегрированного гетеродинного приемника с двойной поляризацией частоты терагерцового диапазона на основе мембраны MMIC с диодом Шоттки на GaAs. По мнению экспертов, использование супергетеродинного приемника позволит получать спектральную информацию, что сделает данный прибор незаменимым при проектировании систем построения изображения в терагерцовом диапазоне длин волн;

- наблюдается рост гражданского рынка РС ЭКБ, так, в 2016 г. объем его доли в РС ЭКБ составил более 30% от общих продаж, это обусловлено активным развитием коммерческих спутниковых телекоммуникационных систем;

- прослеживается увеличение спроса на РС ЭКБ с низкой ценовой категорией, что связано с концепцией создания малых и сверхмалых КА (SmallSat, CubeSat и NanoSat), жизненный цикл которых не превышает 2-3 года. В связи с этим многие производители ЭКБ начинают переходить к практике стандартизации и сертификации своих изделий в нижней категории качества ЭКБ;

- по оценке аналитиков, самыми распространенными вариантами организации международной кооперации в области ПП-микроэлектроники и технологий является создание филиалов зарубежных компаний на территории США и размещение в рамках международной кооперации научно-исследовательских лабораторий в странах-компаньонах;

- анализ мирового рынка серийного производства ПП-микроэлектроники показывает, что основные поставки РС ЭКБ осуществляют компании Raytheon, Harris, Maxwell, с которыми МО США, NASA и DARPA сотрудничают по контрактам уже в течение 40÷50 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). Austin. TX. 2016. Carroll J. M., Dunn J. Electromagnetic Simulation Challenges in RFIC Design.
2. IEEE NSPEC Short Course, July 1990. E.G. Stasinopoulos, "Radiation Environment in Space.
3. IEEE NSREC. Short Course, 2003. Radiation effects in advanced Lcoe R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies.
4. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-27, No 6, December 1980. David. M Long, "Hardness of MOS & Bipolar Integrated Circuits".
5. Proceedings of SPIE, Advanced Lithography 2012, 12÷16 February 2012, San Jose, California, USA_L. Martin, S. Manakli, S. Bayle, J. Belledent, S. Soulan, P. Wiedemann, A. Farah, P. Schiavone. Combined dose and geometry correction (DMG) for low energy multyelectron beam lithography (5kV): application to the 16 nm node [8323_1W].
6. RF Globalnet. February.2007. Dunn J. Interconnect Modeling and Simulation for RFIC Design.
7. High Frequency Electronics. Vol. 6. No. 6. June 2007. Heimlich M. Circuit Extraction Techniques Provide Faster Interconnect Modeling and Analysis.
8. 41st European Microwave Conference. Manchester. 2011. Dunn J., Veremey V. Accurate Q Prediction for RFIC Spiral Inductors Using Planar EM Solvers.
9. Microwave Journal. July. 2014. Hartung J. Interoperability Enables a Complete RFIC/Package/Board Co-Design Flow.
10. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta. GA. 2008. Rautio J.C. Perfectly Calibrated Internal Ports in EM Analysis of Planar Circuits.
11. "The Effects of Radiation on Electronic Systems," George C. Messenger, and Milton S. Ash, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1986.
12. International Technology Roadmap for Semiconductors, 2011
13. Realizing Lateral Wrap-Gated Nanowire FET's: Controlling Gate Length with Chemistry Rather than Lithography, Nano Letters, 2012, 12, 1÷6.

14. Commercial technologies: How design scaling has affected the selection of space borne electronics. July 2003, 2003 Monterey. California, p. II-1–II-142.
15. Oldham T.R. How device scaling affects single event effects sensitivity.
16. Ionizing radiation effects in MOS devices & circuits/Ed. by Ma T.P. and Dressendorfer P.V./John Wiley and Sons, 1989.
17. <http://www.raith.de/inhalt/bilder/Electron20beam20lithography>.
18. http://www.mapper/lithography.com/technology/mapper_technology
19. <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/rosnanoinvest>.
20. <http://www.portalnano.ru/read/sci/basic/orlikovskiy>.
21. <http://www.portalnano.ru/read/ezaurus/definitions/electron/beam/lithograph>
«Электронно-лучевая литография».
22. http://news.cnet.com/2300_11386_3_10014338_4.html IBM carbon nanotube placement demonstration.
23. http://www.techradar.com/news/computing_components/processors/ibm
claims carbon/nanotube/chip/development/breakthrough/1109104.
24. http://www.efind.ru/forum/showthread.php_45998 «Intel видит техническую возможность производства 10 нм кристаллов».
25. <http://csr.ru/newsik/platforme-budushego> «To the platform of the future».
26. <http://newsroom.intel.Com/docs/DOC-2032> “Дорожная карта INTEL”.
27. http://promwad.ru/news/10_07_2012-design_center_t-nano.html «В России будет создан новый дизайн центр микроэлектроники «Т_Нано». 2012. Июль».
28. Shklyaruk Marias The state as a platform 2017÷2035» installation on the foresight session 02-16-2017.