

Модуль 9

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТИРОВАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ
РАЗРАБОТАННОГО МАРШРУТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ФОТОШАБЛОНОВ

Содержание модуля 9

9.1. Определение требований к тестовым топологическим элементам заданного технологического уровня, обусловленных технологическими возможностями используемого литографического оборудования

9.2. Разработка тестовых топологических элементов к фотошаблону заданного технологического уровня

9.3. Формирование наборов тестовых топологических структур для всех критических слоев с целью создания калибровочных моделей

9.4. Размещение тестовых элементов в рабочем поле фотошаблона (меток и служебной технологической информации)

9.5. Регламенты предприятия. Выполнение процедур передачи управляющей информации на технологический участок изготовления фотошаблонов

Содержание модуля 9

(продолжение)

9.6. Выполнение процедур запроса проведения контрольно-измерительных тестов изготовленного фотошаблона (толщина линий, наличие дефектов, геометрических отклонений)

9.7. Выполнение процедур запроса статистических данных для анализа корректности тестовых структур фотошаблонов

9.8. Формирование отчета о тестировании с использованием описания соответствия изготовленного фотошаблона исходным требованиям и рекомендациям по оптимизации размещения элементов топологии, выбору методов коррекции, повышению выхода годных

9.1. Определение требований к тестовым топологическим элементам заданного технологического уровня, обусловленных технологическими возможностями используемого литографического оборудования

Фотолитография – ключевой технологический процесс в производстве полупроводниковых приборов и микросхем. Суть процесса заключается в переносе оригинала топологии интегральной схемы на поверхность полупроводниковой пластины.

Характеристики микросхем зависят от точности изготовления их минимальных элементов, поэтому высокая степень брака ведет к переработке проекта и задержке выхода конечного продукта на несколько недель, что в результате может привести к потере рыночного сегмента.

Поэтому неотъемлемой частью технологического процесса изготовления фотошаблонов является операция автоматического контроля получившегося на фотошаблоне рисунка – поиска недопустимых дефектов и операции их устранения (Рисунок 9.1).



Рисунок 9.1 – Контроль рисунка на фотошаблоне

Для отработки и контроля технологического процесса применяют **тестовые топологические элементы**, представляющие собой специально сгенерированные топологические элементы, форма которых при последующем анализе позволяет судить о качестве воспроизводимости как отдельных элементов, так и о точности воспроизведения таких элементов по всей площади фотошаблона (Рисунок 9.2).

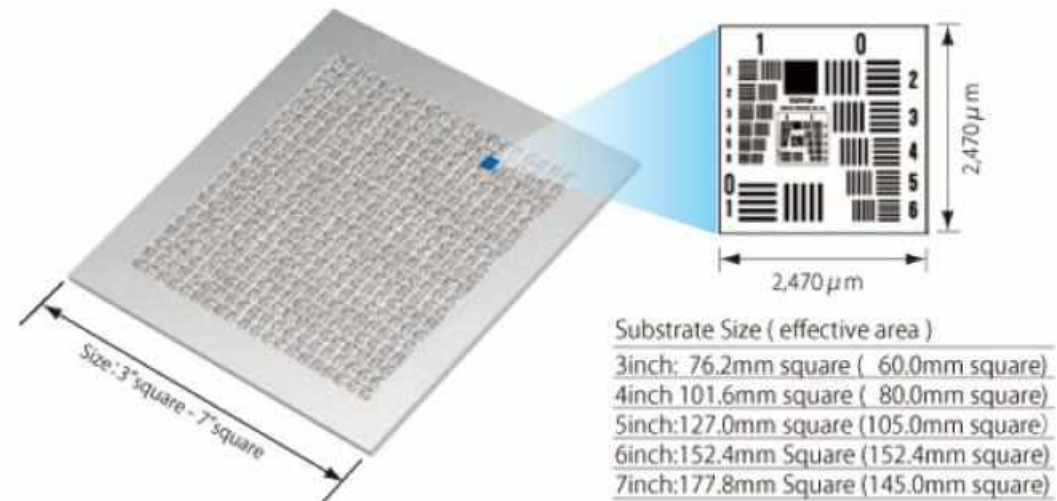


Рисунок 9.2 – Фотошаблон с тестовыми топологическими элементами для отработки технологических процессов

Требования к топологическим тестовым элементам вырабатываются отдельно для каждого технологического уровня.

При разработке требований необходимо привлечение технологов участка изготовления фотошаблонов и технологов метрологического участка, т.к. данные требования должны учитывать особенности используемого технологического оборудования (предельное разрешение, шаг позиционирования, коэффициент масштабирования, угол распространения экспонирующего пучка и т.д.) и контрольно-измерительного оборудования (Рисунок 9.3).

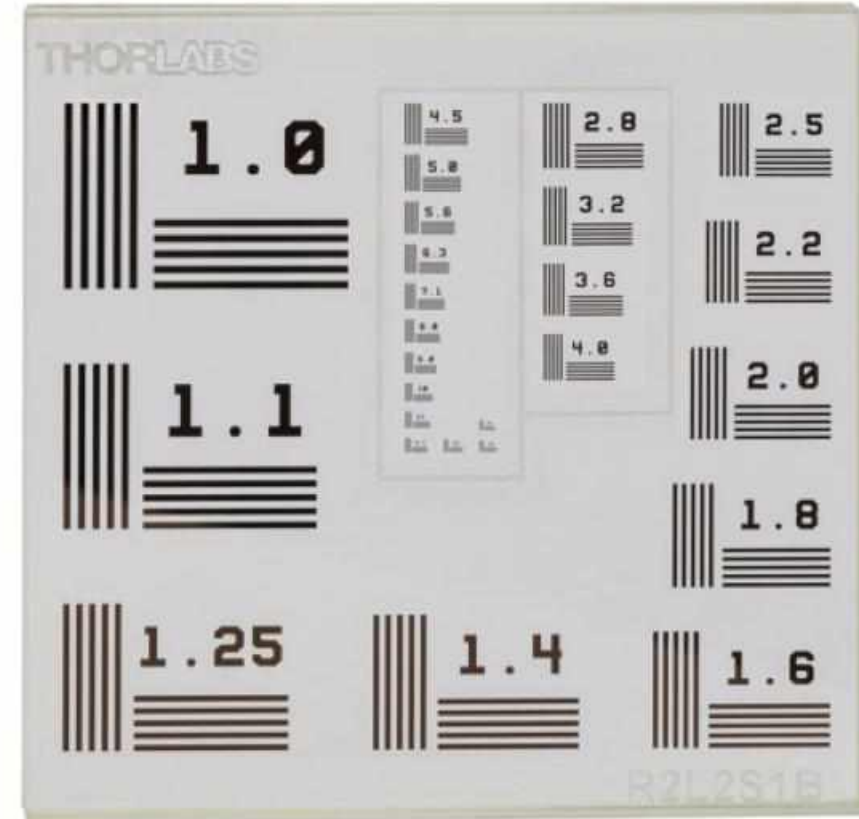


Рисунок 9.3 – Тестовые топологические элементы для определения разрешающей способности оптической системы

9.2. Разработка тестовых топологических элементов к фотошаблонам заданного технологического уровня

В фотолитографии особую актуальность приобретает правило «если нельзя измерить, то невозможно и изготовить».

На состав топологии сильно влияет принцип межсоединений, т.е. то, как связана ячейка с общей структурой кристалла, и как она сообщается с соседними ячейками (Рисунок 9.4).

Систематические дефекты, вызванные, к примеру, несовмещением проводника и перехода из-за непропечатываемости рисунка на фотошаблоне, являются следствием отклонения технологического процесса при производстве кристалла.

Для характеристики параметра несовмещения проводника и перехода необходимо разработать специализированные тестовые структуры.

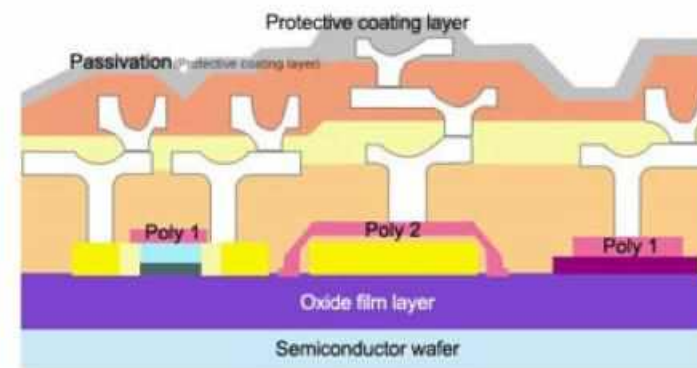


Рисунок 9.4 – Схема межсоединений в кристалле СБИС. Каждый слой – это отдельный фотошаблон с уникальным топологическим рисунком

Поэтому наряду с данными о выходе годных и величине сопротивления, в данном случае, важно получить метрологические данные из самого технологического процесса. Эти данные обычно подлежат сбору и статистической обработке на регулярной основе в процессе изготовления фотошаблона.

Для примера рассмотрим тестовые структуры типа «Chain» (цепочки межслойных переходов), которые в данном случае являются наиболее оптимальными для определения катастрофических отказов.

На Рисунке 9.5 показан пример подобной тестовой структуры и как она может быть использована для характеристики влияния несовмещения проводника и перехода на выход годных. В данной структуре каждый горизонтальный ряд представляет собой цепочку межслойных переходов.

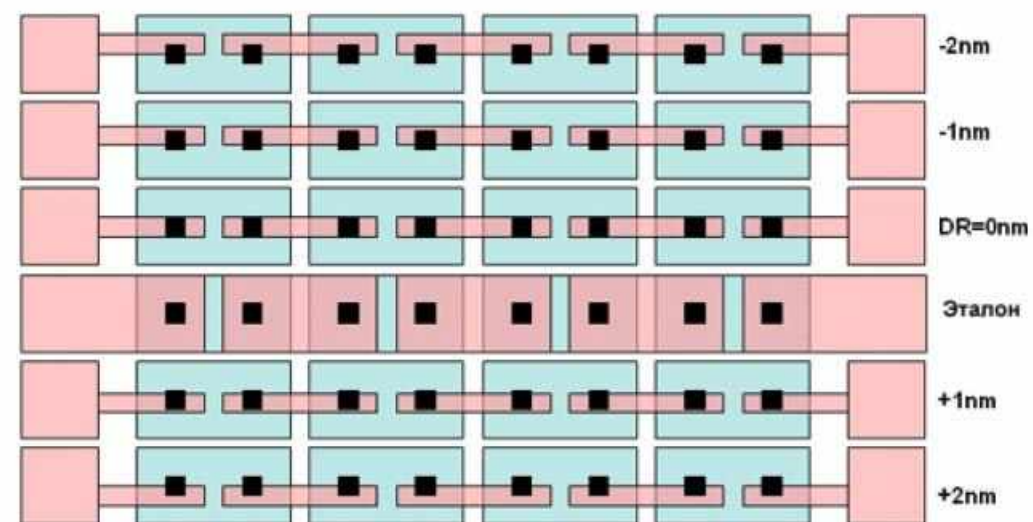


Рисунок 9.5 – Тестовая структура «Chain» для характеристики несовмещения проводника и перехода

Для того чтобы определить частоту отказов, цепочки могут иметь большую длину. Средний ряд (эталон) имеет очень большой запас устойчивости к систематическим отказам за счет 100% совмещения, поэтому он может быть использован как фоновая структура для определения плотности случайных отказов.

Ряд, помеченный DR=0 нм, представляет номинальное значение перекрытия перехода с верхним слоем металла. При этом нижний слой металла также выполнен с большим запасом по перекрытию, чтобы обеспечить отдельную характеристику систематических и случайных дефектов.

Другие ряды выполнены с той или иной величиной несовмещения. Чтобы обеспечить симметрию механизма характеристики, несовмещение имеет как положительный, так и отрицательный знак (в ту и другую сторону).

Для извлечения полезной информации из данных, полученных на тестовом кристалле, необходимо иметь ясную и детальную методологию обработки таких данных.

Структура «Chain» наилучшим образом подходит как для характеристики плотности случайных дефектов, так и для систематических дефектов, поскольку с помощью данной структуры достаточно легко протестировать большое количество переходов.

Ключевым моментом является необходимость сбора данных как по систематическим дефектам, так и по вариативности самого технологического процесса.

Не следует смешивать данные, полученные от разных технологических процессов на одном оборудовании. Например, если исследуется влияние несовмещения металла и перехода, необходимо учитывать данные, полученные при изготовлении конкретного слоя, в котором находится данный переход, поскольку другие слои имеют другие правила проектирования и условия технологического процесса.

Для характеристики дефекта несовмещения перехода и металлического проводника необходимо получить зависимость частоты катастрофических отказов от несовмещения.

На Рисунке 9.6 показано, как может выглядеть такая зависимость. Темно-синяя кривая показывает, что выход годных близок к 100% при отсутствии несовмещения или при небольшом несовмещении. Он не достигает 100% из-за наличия отказов от случайных дефектов.

При увеличении несовмещения выход годных резко падает и при некоторой величине достигает нуля. При этом механизмы отказов из-за несовмещения могут быть различны, но в данном случае это несущественно.

Следует отметить, что кривая несимметрична относительно нулевой точки. Это объясняется вариациями технологического процесса при каждом запуске тестовой структуры, т.е. смещение может варьироваться даже от пластины к пластине на одном запуске.

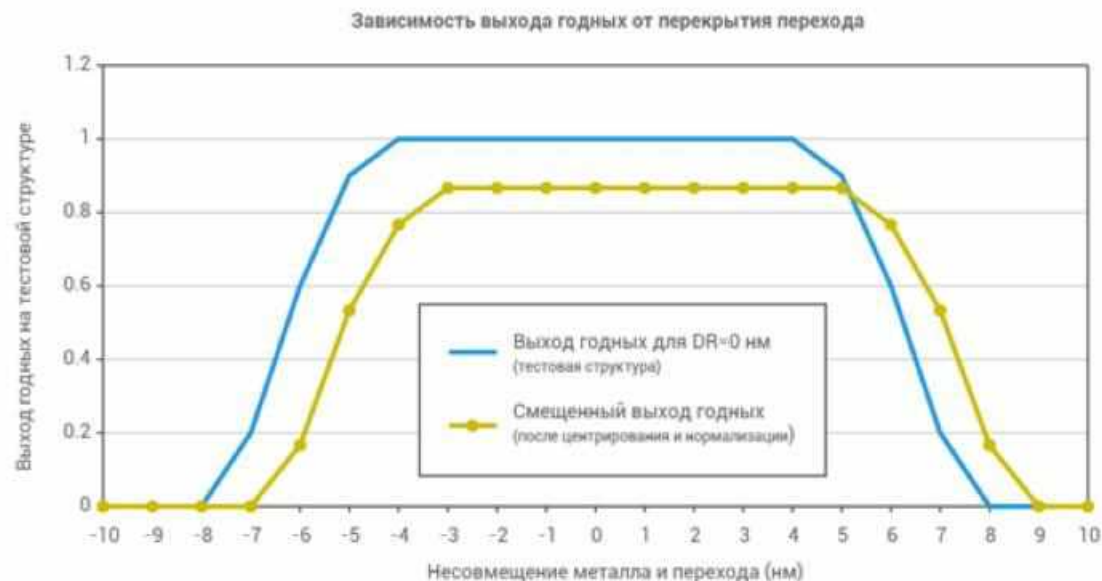


Рисунок 9.6 – Зависимость частоты катастрофических отказов от несовмещения

9.3. Формирование наборов тестовых топологических структур для всех критических слоев с целью создания калибровочных моделей

Калибровочная модель – это набор тестовых топологических структур, разработанный для всех критических слоев на используемом уровне технологии.

Калибровочная модель позволяет выставить параметры оборудования таким образом, чтобы попасть в технологическое окно (см. раздел 7.2), т.е. чтобы получаемый на фотошаблоне рисунок максимально соответствовал проектному изображению и, соответственно, максимальному выходу годных (Рисунок 9.7).

Данные наборы разрабатываются, как правило, с учетом требований участка изготовления фотошаблонов, но могут и поставляться производителем технологического и контрольно-измерительного оборудования.

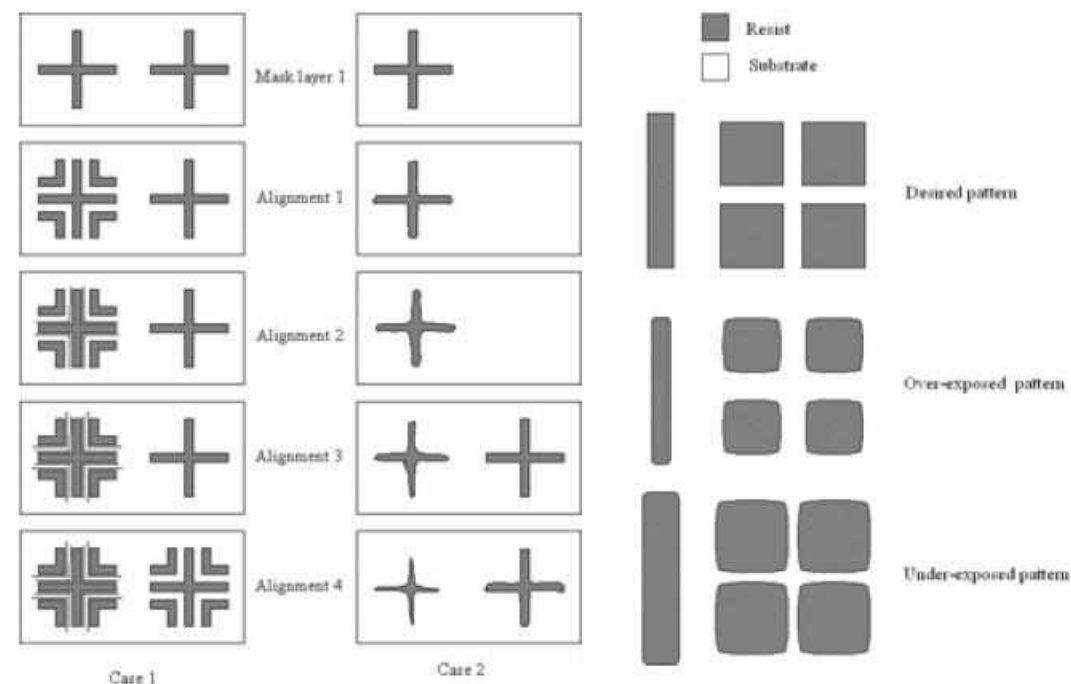


Рисунок 9.7 – Пропечатаваемость топологического рисунка на фотошаблоне при вариациях мощности пучка излучения (слева) и при вариациях времени экспозиции (справа)

Принцип использования калибровочных моделей следующий:

1. Создаются тестовые топологические структуры, форма и размеры которых определяются заданным уровнем технологии.
2. Создается «прототип» (виртуальная модель) фотошаблона с использованием данных тестовых структур.
3. Проводится моделирование техпроцесса изготовления фотошаблона, учитывающая особенности данного класса литографического оборудования.
4. В прототип фотошаблона вносятся результаты моделирования с целью «грубой» корректировки параметров, влияющих на качество получаемого на фотошаблоне изображения.
5. На основе разработанного прототипа проводится изготовление серии фотошаблонов, отличающихся незначительными вариациями технологического процесса.
6. Для каждого фотошаблона из серии выполняются метрологические измерения с целью выявления параметров техпроцесса, позволяющего наиболее точно воспроизвести рисунок.
7. В прототип фотошаблона вносятся «поправочные коэффициенты», основанные на результатах измерений с целью «точной» корректировки параметров, влияющих на качество получаемого на фотошаблоне изображения.
8. Пп. 5 – 7 итерационно повторяют до тех пор, пока не будет получен удовлетворительный результат, позволяющий максимально обеспечить стабильность и повторяемость результатов при изготовлении фотошаблона.

Полученные параметры сохраняются как эталонная калибровочная модель.

Параметры, полученные из этой калибровочной модели заносят в технологическую карту для данного уровня технологии, по которой изготавливают все последующие «серийные» комплекты фотошаблонов.

При изменении состава оборудования или маршрута изготовления фотошаблонов необходимо заново провести весь цикл разработки калибровочной модели.

На Рисунке 9.8 изображен процесс разработки и использования наборов тестовых топологических структур для создания калибровочных моделей.

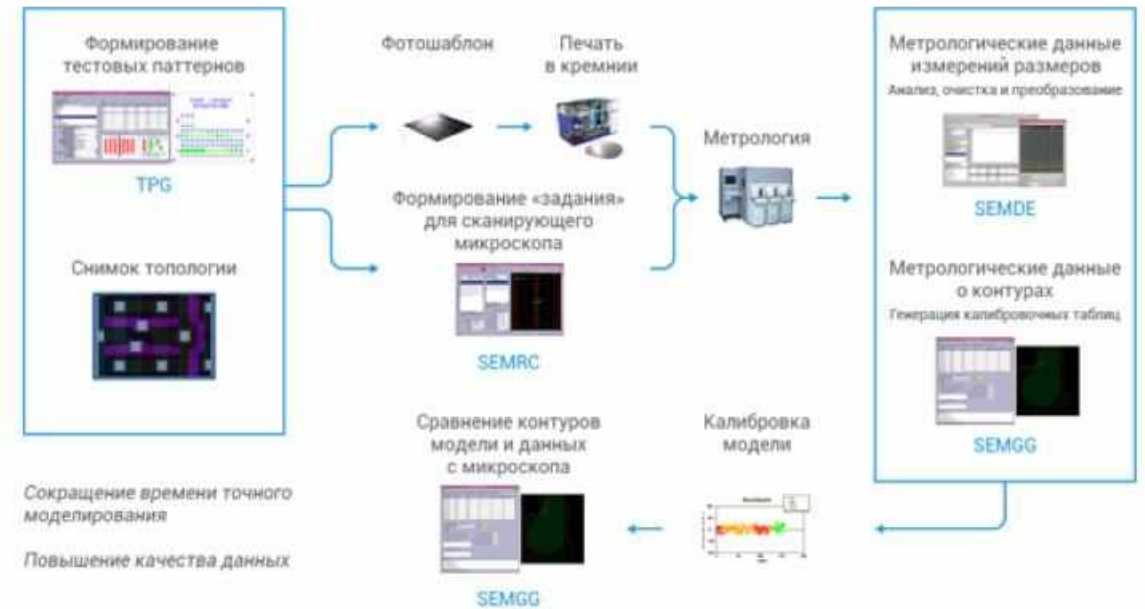


Рисунок 9.8 – Процесс разработки и использования наборов тестовых топологических структур для создания калибровочных моделей

9.4. Размещение тестовых элементов в рабочем поле фотошаблона (меток и служебной технологической информации)

Тестовые элементы, необходимые для контроля технологических процессов, могут быть размещены в следующих местах:

- в рабочем поле фотошаблона, в дорожках реза, т.е. между блоками с топологией (*Scribe*);
- на периферии фотошаблона, в местах, свободных от технологических меток (Рисунок 9.9);
- в рабочем поле фотошаблона, на месте некоторых блоков с топологией (*Die*).

Правила размещения тестовых элементов определяются требованиями технического задания и требованиями предприятия-изготовителя фотошаблонов.

Использование элементов для измерения критических размеров, расположенных в рабочем поле фотошаблона - в дорожках реза, либо на месте некоторых блоков с топологией заказчика позволяет получить точное представление о размерах в центре маски и диапазон расхождений критических размеров на фотошаблоне по мере приближения к краям фотошаблона.

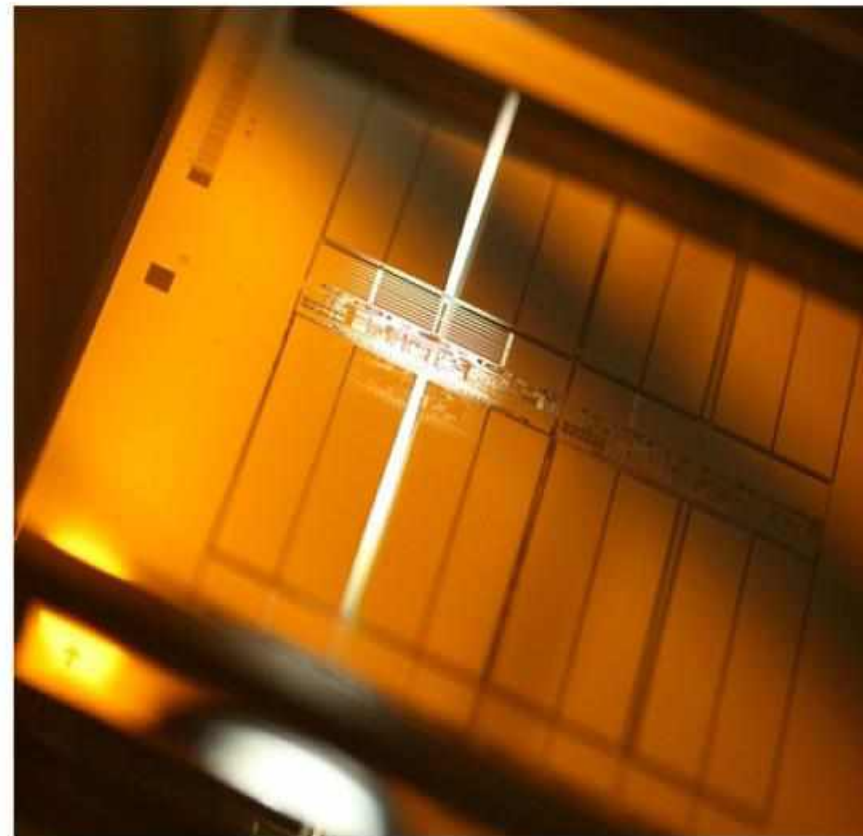


Рисунок 9.9 – Тестовые структуры, размещенные между блоков с топологией

9.5. Регламенты предприятия. Выполнение процедур передачи управляющей информации на технологический участок изготовления фотошаблонов

Проектирование фотошаблонов завершается созданием комплекта файлов в формате, который поддерживается непосредственно генераторами изображений – технологическим оборудованием для изготовления фотошаблонов.

Как правило, это унифицированный формат *MEBES*, однако, некоторые установки принимают только свой, проприетарный формат.

Для изготовления фотошаблонов необходим **технологический участок**, оснащенный «чистыми комнатами», представляющими собой изолированное от внешней среды производственное помещение, имеющее свой климат, в котором контролируется счетная концентрация аэрозольных частиц и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения (Рисунок 9.10).



Рисунок 9.10 – Чистые комнаты: внутри поддерживается постоянный микроклимат. Изменение температуры более чем на 1 градус или влажности на 3% потребует остановки производства, так как это нарушение технологии

Организация и функционирование технологических участков по производству фотошаблонов – весьма дорогостоящая процедура, требующая, к тому же, сложной инфраструктуры (включая жесткие требования к подаче электроэнергии, химреактивам, фундаменту, экологичности производства и пр.), поэтому часто они территориально выделены в отдельную единицу.

Несколько технологических участков с окружающей инфраструктурой представляют собой уже **полупроводниковую фабрику** – Fab (Рисунок 9.11).



Рисунок 9.11 – Fab компании GlobalFoundries в Дрездене (Германия) производительностью 25-80 тысяч пластин диаметром 300 мм в месяц (техпроцесс 45нм)

По вышеуказанным причинам участки проектирования фотошаблонов и участок их производства могут быть разнесены как по этажам здания (малое или экспериментальное производство), так и находится в разных городах и странах (малосерийное и промышленное производство).

Соответственно, необходимы административные процедуры передачи информации, необходимой для изготовления фотошаблонов, между участками, описываемые как внутренними **регламентами предприятия**, так и международными стандартами обеспечения качества.

На Рисунке 9.12 представлена простейшая блок-схема регламента взаимодействия организационных подразделений для выполнения процедур изготовления фотошаблонов.



Рисунок 9.12 – Упрощенный регламент взаимодействия организационных подразделений для выполнения процедур изготовления фотошаблонов



Рисунок 9.13 – Изготовленный фотошаблон, представляющий собой один слой топологии СБИС

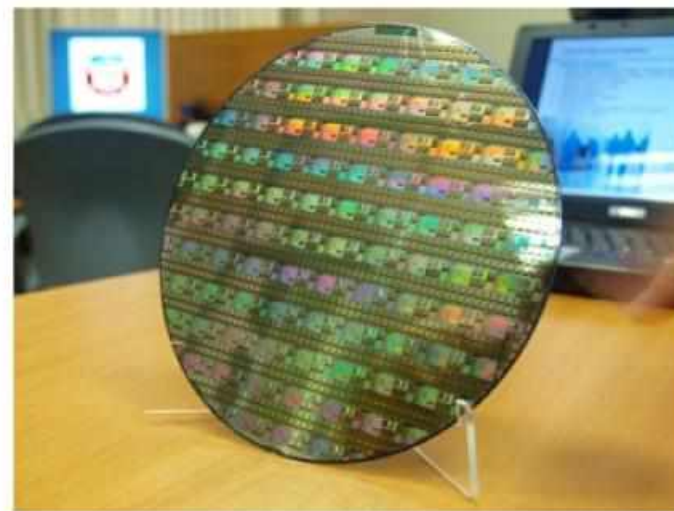


Рисунок 9.14 – Изготовленная кремниевая пластина диаметром 250-мм, с 84 кристаллами СБИС. После нарезки на чипы из нее получится около 50-60 микросхем (остальные не пройдут тест)

9.6. Выполнение процедур запроса проведения контрольно-измерительных тестов изготовленного фотошаблона

Процессы формирования топологического рисунка на фотошаблонах и литографический процесс его проекционного переноса на полупроводниковые пластины являются сложными и многогранными технологическими процессами, которые характеризуются большим количеством технологических операций, в которых используются подложки с различными физическими свойствами.

При этом литографический процесс определяет технологический уровень кристалльного производства в целом. Получение информации об изменении критических размеров элементов полупроводниковых структур – одна из основных задач в фотолитографии.

Анализ этой информации позволяет настраивать технологическое окно процесса фотолитографии и корректировать параметры литографического оборудования.

Это предполагает использование большого числа и типов контрольного оборудования для выполнения контроля этого процесса самым тщательным образом, что определяется, с одной стороны, отсутствием возможности реализации некорректируемых процессов бездефектного генерирования и проекционного переноса изображений даже для приборов невысокой топологической сложности, а с другой стороны – высокой критичностью к дефектам процесса в целом даже один пропущенный дефект на одном слое топологии интегральной схемы делает всю схему неработоспособной в рамках всей партии запуска, что приводит к многомиллионным убыткам.

Контрольно-измерительные тесты подразделяются на две категории: **регистрация фотошаблона** и **дефектоскопия фотошаблона**.

Регистрация фотошаблона – это проверка расположения данных на фотошаблоне и расхождения между фотошаблонами внутри одного комплекта.

Проведение измерений на взаимное расхождение элементов топологии двух слоев (рассовмещение) позволяет определить точность наложения структур.

При регистрации проводятся измерения известных точек на фотошаблоне, сравниваются с расположением тех же точек в файле с исходными данными. Это позволяет определить, насколько точно размещены элементы на фотошаблоне, и увидеть места перекрытия элементов с элементами на других шаблонах, измеренных в той же координатной сетке.

На Рисунке 9.15 показана метрологическая станция Vistec (Leica) LMS IPRO.



Рисунок 9.15 – Метрологическая станция Vistec (Leica) LMS IPRO

Дефекты могут образовываться в процессе изготовления фотошаблона — вследствие неправильного подбора режимов экспонирования, проявления и травления (некачественное проявление ведет к последующему подтравливанию под край маски из резиста, появлению вырывов других нарушений маскирующего рисунка, плохая отмывка оставляет на поверхности пятна).

К дефектам также относят пузырьки в стекле и неплоскостность стеклянных заготовок шаблона, из-за чего ухудшается воспроизведение рисунка.

Дефекты могут образоваться образуются вследствие попадания частиц пыли и волокон из воздуха, при этом тень частицы воспроизводится в процессе экспонирования при изготовлении как приборов, так и рабочих копий шаблонов с оригиналов (Рисунок 9.16).

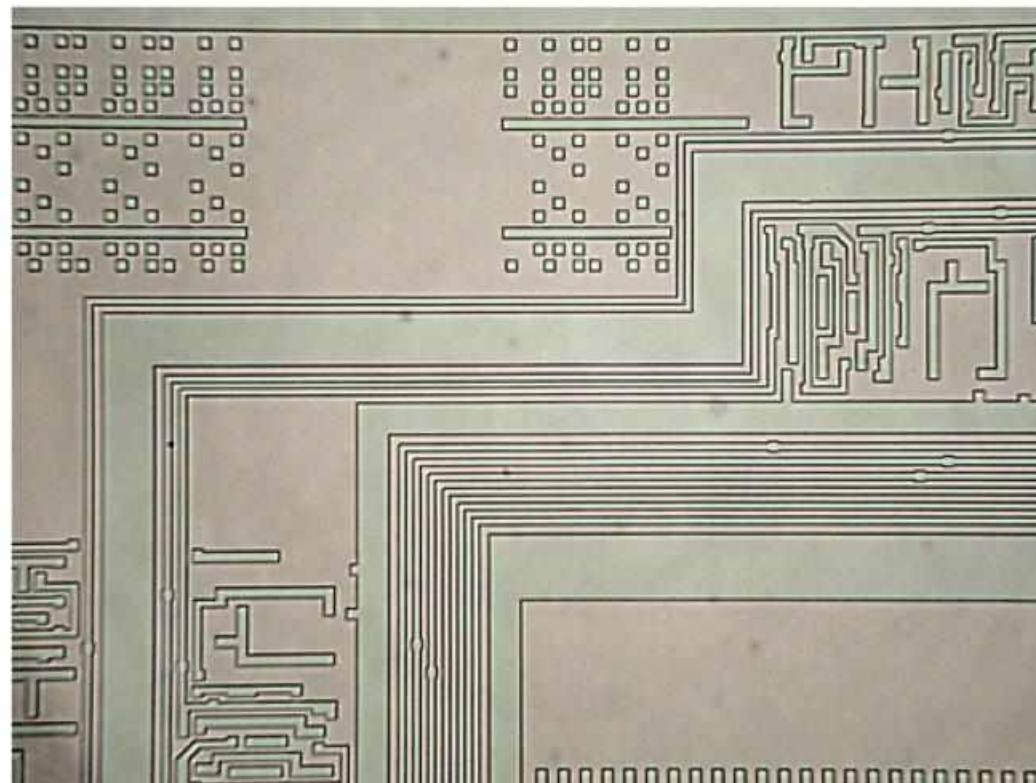


Рисунок 9.16 – Дефекты в виде утолщений линий, вызванные ошибкой позиционирования излучающей головки, могут привести к замыканию дорожек

С точки зрения необходимой полноты контроля, все возможные **дефекты фотошаблона** подразделяются на две большие группы:

Дефекты первой группы (к ним относятся дефекты критических размеров и совмещаемости, а также микродефекты на пластинах) контролируются только на стадии отработки технологического процесса. Полученный в результате воспроизводимый технологический процесс будет гарантировать отсутствие таких дефектов и в дальнейшем.

В процессе работы будет требоваться только периодическое подтверждение того, что технологический процесс не вышел за рамки допустимых границ. Обнаружение недопустимых отклонений этих параметров должно повлечь за собой остановку работы и выполнение процедуры корректировки технологического процесса.

Дефекты второй группы (к ним относятся технологические дефекты) могут возникать и в отлаженном технологическом процессе.

Эти дефекты контролируются стопроцентно на всех изделиях и в случае их обнаружения соответствующие фрагменты топологии корректируются в рамках ранее отработанного технологического процесса.

Основными операциями контроля при этом являются контроль на соответствие топологии фотошаблонов и контроль макродефектов на полупроводниковых пластинах.

Понимание причин и механизмов возникновения дефектов может помочь их предупреждению и устранению.

К профилактическим мерам относятся аккуратное обращение с шаблонами, тщательная их очистка и отмывка от пыли и прочих загрязнений, отбор стекол заготовок, фильтрование фоторезиста, тщательное продумывание топологии приборов.

Уменьшение технологического брака обеспечивается регулярным контролем фотошаблонов; в частности, однотипные царапины на разных шаблонах свидетельствуют о недостатках устройств крепления в установках экспонирования.

9.7. Выполнение процедур запроса статистических данных для анализа корректности тестовых структур фотошаблонов

Объем метрологических данных для контроля критических размеров на пластинах, необходимый для качественного переноса изображения, значителен, и сегодня количество измерений может достигать 10 тыс. на одной пластине.

Даже с применением методов автоматизации это длительный процесс, т.к. в современных СБИС может быть до 30-70 топологических слоев, а, следовательно, и фотошаблонов.

Использование статистических подходов, основанных на накоплении и анализе результатов измерений, позволяет существенно ускорить процедуры проведения анализа корректности тестовых структур фотошаблонов, т.к. с большой долей вероятности они будут неизменны в пределах заданного технологического маршрута и используемого оборудования.

Из сказанного следует, что фотошаблоны, изготовленные в условиях жесткого метрологического контроля, обеспеченных новейшими достижениями измерительной техники, а также жестким соблюдением технологических параметров при их изготовлении, позволяют достичь показателей выхода годных, близким к 80-90%.

Однако следует помнить, что решение вопросов абсолютной точности и воспроизводимости требуют индивидуального подхода, и, следовательно более высокой стоимости и длительности процессов изготовления и метрологического контроля фотошаблонов.

В практике применения мер статистической обработки и коррекции параметров на основе эталонного моделирования следует учитывать следующие особенности:

- Область применимости калибровки существенно ограничивает различие физических характеристик поверхности модели и реальных объектов. В их число входят: высота перехода линии, промежутков, угол наклона этого перехода, параметры материалов маскирующего покрытия и подложки, коэффициент отражения от поверхности линии и промежутка. Отсюда вытекает необходимость иметь свои эталоны для каждого типа элементов, что и имеет место в практике измерений на фотошаблонах, которые изготовлены из стандартных материалов – кварцевой подложки с нанесенным рисунком в покрытии из хрома.

- Для обеспечения точности измерений методом моделирования необходимо быть уверенным, что при измерении в проходящем свете коэффициент пропускания хромовой пленки не отличаются от модели на длине волны измерения. Аддитивная погрешность, для фотошаблонов с коэффициентом пропускания больше чем $\sim 0,5\%$ может значительно отличаться от таковой для эталонной меры.
- Параметры измерительного оборудования должны быть постоянными. Например, для микроскопии – это рабочий диапазон длин волн осветителя, его апертура, равномерность освещенности в поле измерений и характеристики рабочего объектива. В связи с этим любое вмешательство в настройки и регулировки этих параметров влечет за собой необходимость новой калибровки системы и создания эталонной модели.

-
- При измерении в отраженном свете, мера ширины линии критического элемента и эталонной модели должны быть согласованы по большему числу параметров.
 - Важными для согласования являются комплексный коэффициент отражения маскирующей металлической пленки и прозрачной подложки, толщина и коэффициент пропускания маскирующей пленки. Указанием на то, что свойства ширины линии модели и пользовательского образцов сильно отличаются, является заметное различие форм их профилей интенсивности в изображениях.
 - С целью наилучшей реализации метода и унификации выполняемых действий необходимо разработать методику калибровки с указанием последовательности операций, условий и правил, выполнение которых обеспечивает получение наилучших результатов калибровки согласно данному методу и используемому измерительному оборудованию.

9.8. Формирование отчета о тестировании фотошаблона и рекомендациям по оптимизации

На всем протяжении технологического процесса изготовления фотошаблонов должны выполняться операции контроля топологических структур. К таким видам контроля относятся:

- автоматический контроль оригиналов топологии на фотошаблонах на соответствие проектным данным;
- контроль критических размеров оригиналов топологии на фотошаблонах;
- контроль совмещаемости комплекта фотошаблонов;
- автоматический контроль микро- и макродефектов топологических слоев на полупроводниковых пластинах;
- контроль критических размеров на полупроводниковых пластинах;
- контроль совмещаемости топологических слоев на полупроводниковых пластинах.

На каждом из метрологических этапов составляется отчет, отражающий результаты контроля, а также диапазон допустимых параметров технологических величин согласно используемому оборудованию.

На основании сводных результатов тестирования фотошаблонов формируются рекомендации по внесению в маршрутную кару поправочных коэффициентов и изменению технологических режимов работы оборудования с целью оптимизации технологического процесса изготовления фотошаблонов.

На основании рекомендаций, основанных на процессах моделирования и результатами тестирования, в маршрутную карту проектирования фотошаблонов вносят изменения, позволяющие оптимизировать технологические процессы изготовления фотошаблонов.