

Модуль 1

ПРОВЕДЕНИЕ ВЕРИФИКАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

Содержание модуля 1

- 1.1. Понятие фотошаблона. Маршрут подготовки данных для изготовления фотошаблонов
- 1.2. Анализ первичных данных (описание слоев фотошаблона, перечень необходимых операций со слоями, описание необходимых технологических элементов)
- 1.3. Проведение верификации исходных данных на корректность предоставленных данных
- 1.4. Регламенты предприятия. Формирование отчета (записи в журнале) о начале работы над проектом

1.1. Понятие фотошаблона.

Маршрут подготовки данных для изготовления фотошаблонов

Для начала давайте уточним определение фотошаблона и его роль в процессе изготовления **интегральной схемы** (ИС).

Интегральная схема претерпевает множество преобразований от момента создания проекта, описанного на соответствующем уровне проектных решений в виде логической, электрической схемы и топологии, до реализации в кремнии (Рисунок 1.1).

Сверхбольшие интегральные схемы (СБИС, Рисунок 1.2 и Рисунок 1.3), **системы на кристалле** (СНК) и **микросистемы** (МСТ) являются основой для создания информационно-коммуникационных систем, а также систем автоматического управления.

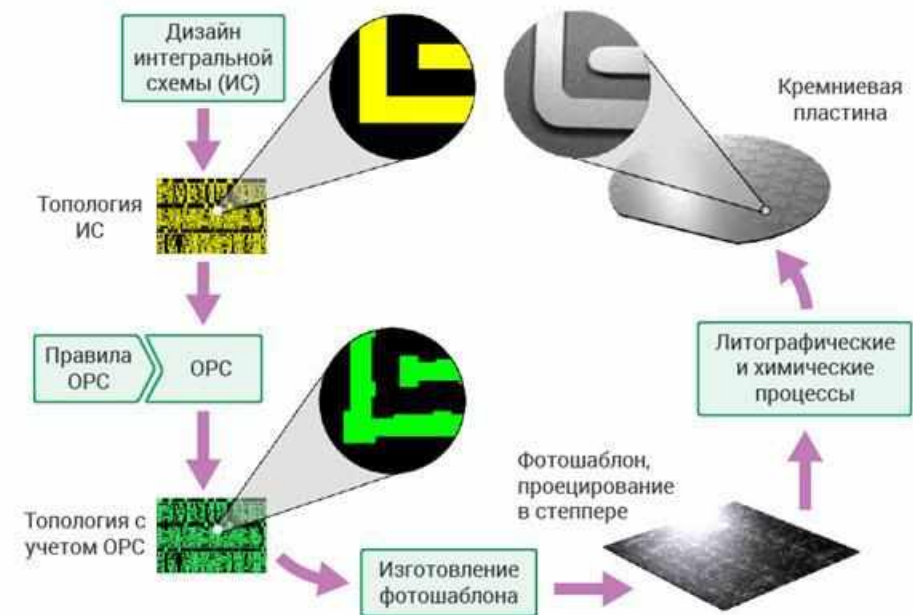


Рисунок 1.1 – Технологическая цепочка реализации СБИС от электрической схемы до чипа на пластине

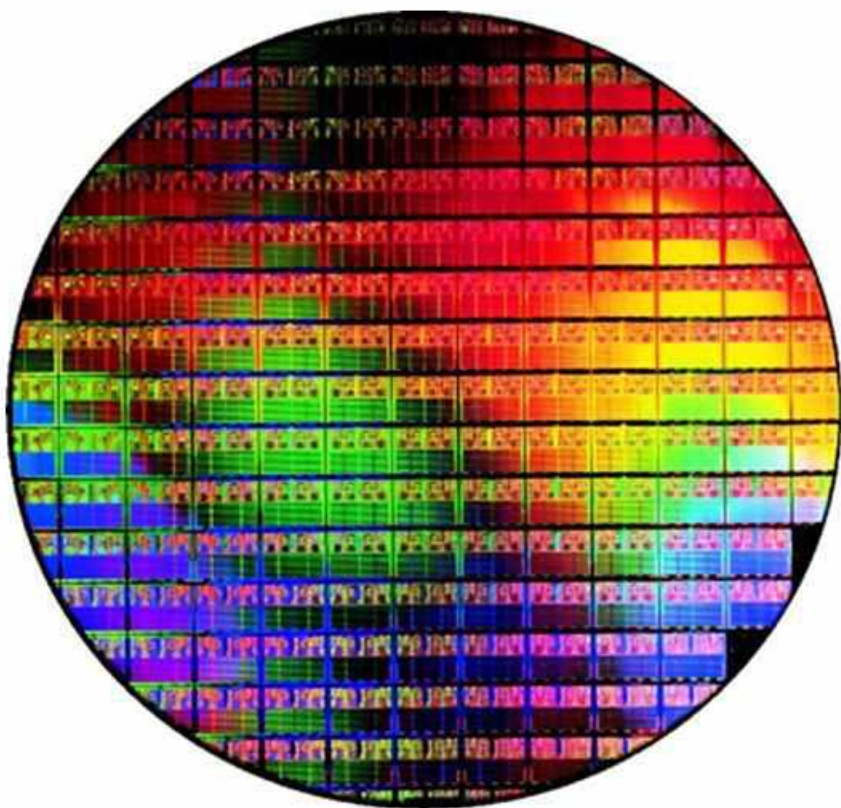


Рисунок 1.2 – Кремниевая пластина с изготовленными кристаллами СБИС

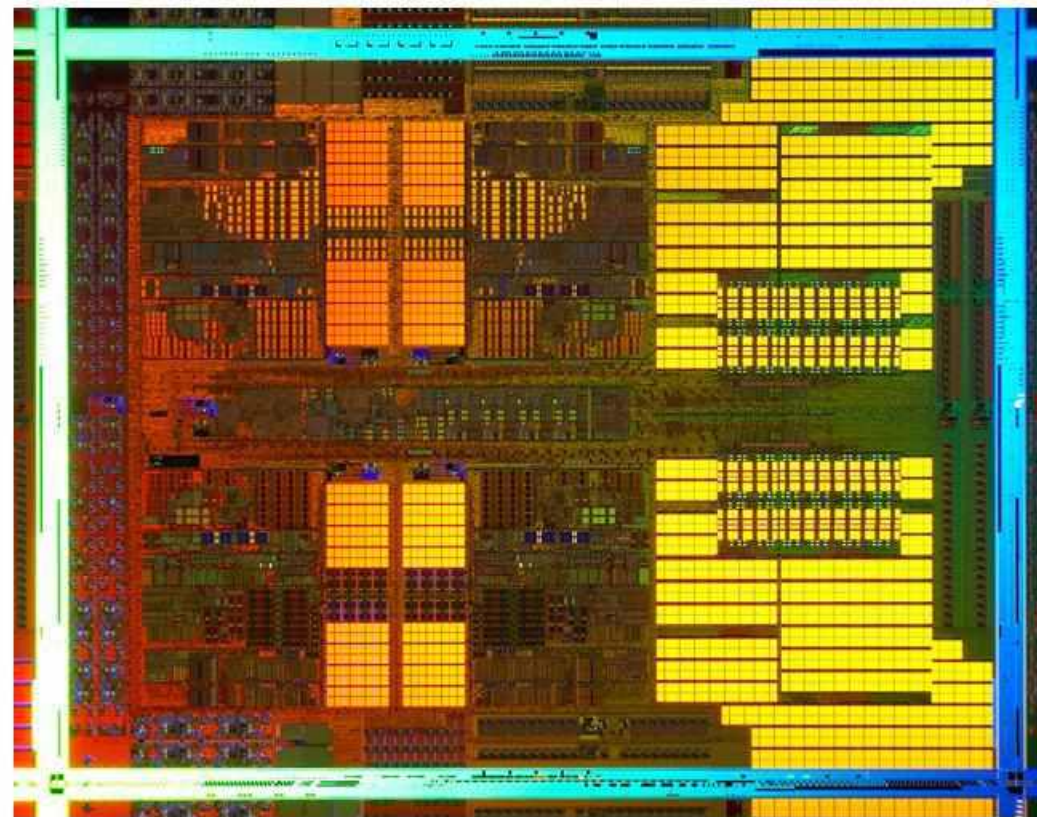


Рисунок 1.3 – Кристалл СБИС, выполненный по технологии 45 нм, серийно выпускаемый компанией AMD

Именно эти изделия определяют потребительские характеристики современной высокотехнологичной продукции, включая продукцию специального применения.

Как же получается топологический рисунок на пластине?

Для изготовления СБИС, СНК и МСТ требуются специальная высокоточная оснастка - **фотошаблоны**, с помощью которых на кремниевой пластине формируется топологический рисунок отдельных элементов и их взаимного расположения (Рисунок 1.4).

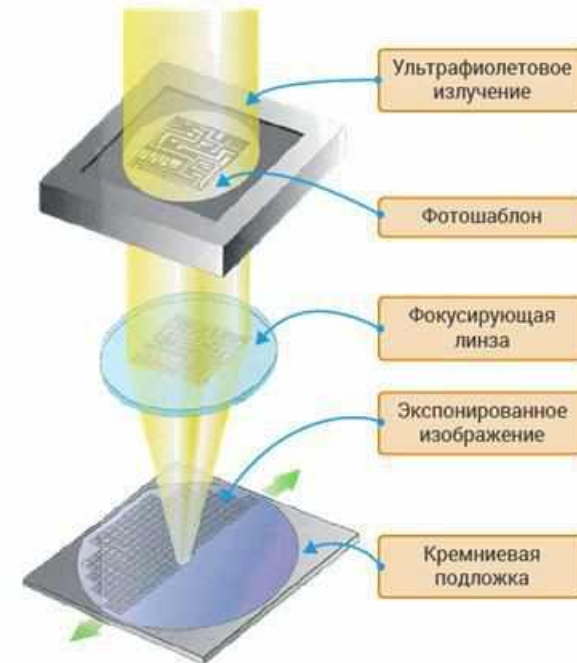


Рисунок 1.4 – Литография – процесс формирования топологического изображения на кремниевой пластине с помощью фотошаблона

В процессе изготовления СБИС (Рисунок 1.5) на подложке формируются топологические слои, которые должны быть последовательно воспроизведены в заданных относительно друг друга позициях, определяемых разработчиком СБИС. С уменьшением технологических норм производства количество промежуточных этапов только возрастает.

Для большинства СБИС требования на допуск при совмещении составляют около $1/4$ минимального размера элемента, т. е. должна быть обеспечена точность совмещения топологии функциональных слоев на пластинах не хуже 30–40% от значения минимального размера элемента топологии.



Рисунок 1.5 – Этапы формирования СБИС

Создание интегральных схем требует многократного выполнения операций фотолитографии для получения необходимой структуры.

Литография – процесс переноса топологических решений спроектированной интегральной схемы на поверхность полупроводниковой пластины.

Задача литографии – обеспечить качественное формирование топологических решений на всем поле кремниевой пластины с соблюдением допусковых отклонений размеров элементов и их расположения относительно нижележащих структур, сформированных в предыдущем цикле.

При переходе к микро- и нанометровому технологическому уровню изготовления электронной компонентной базы, соответствующей мировым стандартам, фотошаблоны становятся наиболее критичной и дорогостоящей составляющей литографического цикла, поскольку возможность их изготовления, контроля и аттестации приблизились к предельным возможностям специализированного технологического оборудования.

Фотошаблоны фактически являются материальным носителем конструктивно-технологической информации, которая представляет собой интеллектуальную собственность разработчика топологии и подлежит патентованию.

Литография, являясь на сегодняшний день одной из наиболее часто и широко используемых в микроэлектронике операций, открывает широкие возможности для получения защитных масок с элементами субмикронного размера и в то же время представляет собой один из наиболее сложных процессов в производстве микроэлектронных компонентов.

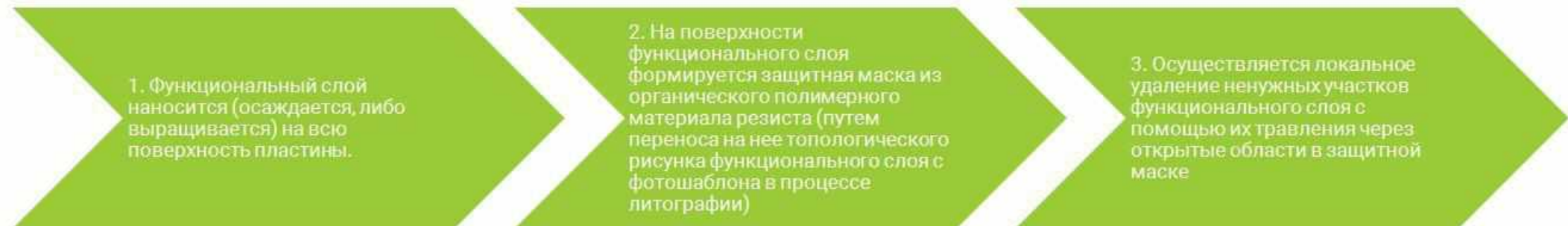
Необходимо отметить, что, несмотря на указанные сложности, в настоящий момент только литография обеспечивает возможность массового производства ИС с минимальными критическими размерами.

Важнейшей характеристикой литографического процесса является его *разрешающая способность*. От разрешающей способности напрямую зависит минимальная толщина линии, которую можно нанести на фоторезисте. Более подробно о разрешающей способности будет сказано в следующем разделе.

В промышленном масштабе для экспонирования фоторезистивных слоев на пластинах применяют проекционные фотолитографические системы – *степперы* (от англ. stepper) или *степперы-сканеры*. В таких системах под воздействием излучения (чаще всего света определенной длины волны) происходит пошаговый перенос (экспонирование) топологического рисунка кристалла с фотошаблона на покрытую слоем фоторезистивную пластину, расположенную на координатном столе.

Литографический цикл обычно содержит от 15 до 30 технологических операций, общее же количество операций в технологическом маршруте изготовления кристаллов современных СБИС, в зависимости от степени интеграции (минимального размера элемента), может составлять от 300 до 800.

Для литографического формирования топологического рисунка в функциональных слоях кристаллов СБИС в технологии микроэлектроники реализуется стратегический подход «сверху вниз» (top-down), который заключается в следующей последовательности:



При таком подходе точность воспроизведения размеров элементов СБИС (разрешение, локальность травления) в горизонтальной плоскости обеспечивается с помощью резистивных масок, сформированных в процессах литографии.

Набор фотошаблонов для реализации проектных решений СБИС в кремнии соответствует последовательности технологических операций изготовления микросхемы (Рисунок 1.6).

Фотошаблон представляет собой специальный прецизионный инструмент, несущий информацию о топологии (layout) функционального слоя сверхбольшой интегральной схемы (СБИС) для конкретной технологической операции.

Другими словами, фотошаблоны – это оснастка литографического оборудования (stepper) для «вжигания» проектных решений соответствующей электронной компонентной базы (ЭКБ) в кремний или другой полупроводниковый материал.

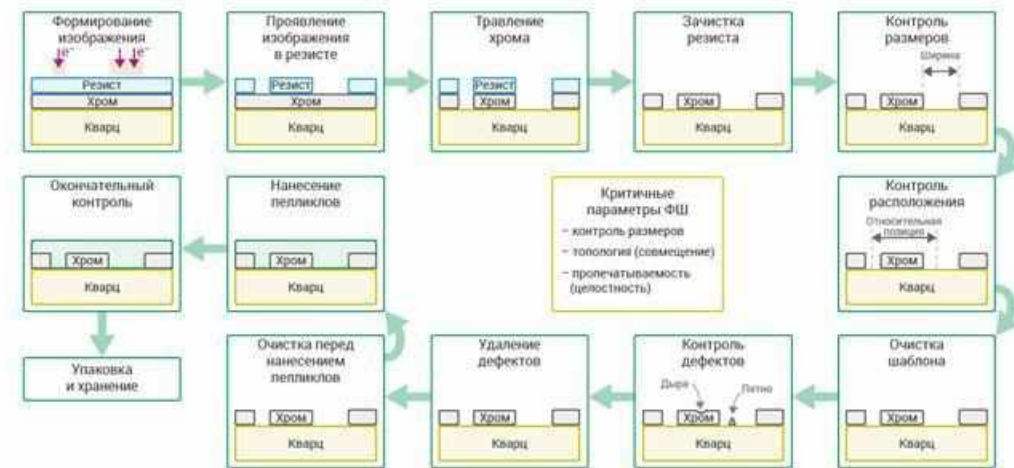


Рисунок 1.6 – Технологический цикл изготовления фотошаблонов

Фотошаблон представляет собой плоскопараллельную прозрачную пластину, с нанесенным непрозрачным покрытием, как правило, тонким слоем хрома (Рисунок 1.7).

Материал фотошаблона:

- Кварцевое стекло
 - ▶ прозрачно для дальнего УФ (250, 193 нм);
 - ▶ имеет минимальное термическое расширения.
- Содово-известковое стекло (Na_2O , CaO , SiO_2)

Размеры фотошаблона:

- квадратные пластины 100 – 150 мм (4x4 – 6x6 дюймов);
- толщина: 2,25 – 6,25 мм (0,09 – 0,250 дюймов).

Хромовое покрытие толщиной 0,1 мкм блокирует 99.9% света, очень стойкое. Под данное покрытие разработаны и отлажены методы травления.



Рисунок 1.7 – Фотошаблон

Весь процесс изготовления фотошаблона можно разделить на три этапа производственной деятельности (Рисунок 1.8):

1. подготовка данных (*Data Preparation* – DP);
2. изготовление (*Front-End of Line* – FEOL);
3. аттестация (*Back-End of Line* – BEOL).

Разумеется, реальные процессы могут включать в себя ветвления или повторения многих шагов в показанном маршруте.

Для унификации всех технологических требований была принята и ежегодно обновляется **Международная карта развития технологий для полупроводниковой промышленности** (*International technology roadmap for semiconductors* – ITRS).

Основные требования к фотошаблонам для оптической фотолитографии согласно ITRS будут приведены в Модуле 7.



Рисунок 1.8 – Основные этапы изготовления фотошаблона

Маршрут подготовки данных для изготовления фотошаблонов представлен на Рисунке 1.9.

Заметим, что необходимо на высочайшем уровне обеспечить соответствующее качество всех составляющих производственного цикла изготовления набора фотошаблонов (фотошаблонных заготовок, фоторезиста, химических компонентов для травления и проявления, оборудования генерации изображений, контроля критических размеров, однородности линейности, аттестации на дефектность и др.), так как ошибка на любом из циклов приведет к необходимости заново проводить всю цепочку подготовки данных.



Рисунок 1.9 – Маршрут подготовки данных для изготовления фотошаблонов

1.2. Анализ первичных данных

Проектирование (дизайн) фотошаблона включает в себя преобразование и компоновку исходных данных заказчика в соответствии с техническими требованиями, а также добавление служебных, тестовых и других специальных элементов, необходимых для работы технологического и контрольно-измерительного оборудования.

Полученная разработчиками фотошаблонов топология (Рисунок 1.10) является входной информацией для подготовки управляющей информации, используемой при изготовлении фотошаблонов.

Для описания топологии применяются различные форматы, наиболее распространенными являются форматы DXF, GDSII, OASIS. Файлы с описанием топологии передаются либо на переносном носителе информации, либо по FTP-протоколу с применением шифрования передаваемых данных.

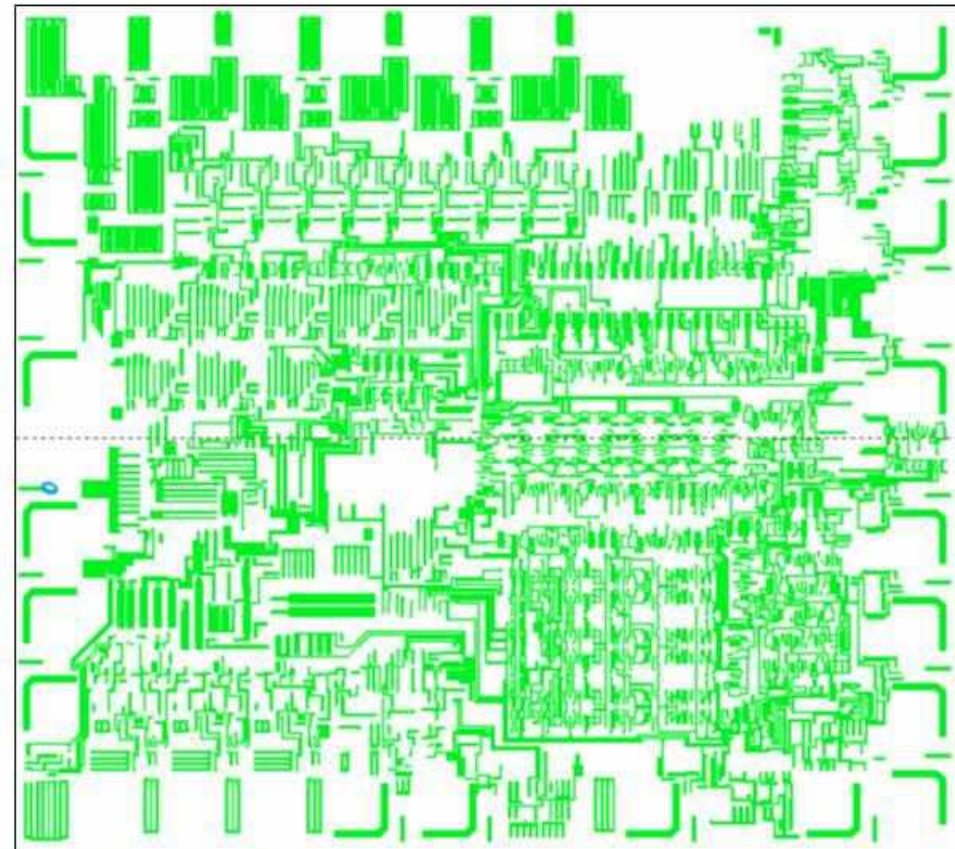


Рисунок 1.10 – Пример топологии одного из слоев кристалла

Кроме этого, изготовителю фотошаблонов предоставляется техническое задание – информация, описывающая все топологические слои для изготовления, критические размеры, шаг сетки проектирования, полярность слоев, необходимость проведения оптической и фазовой коррекции (в том числе с какими слоями) и другие параметры.

В процессе проектирования фотошаблонов проводится проверка исходной информации в соответствии с правилами проектирования, проводится фрагментация данных, при необходимости применяется полнофункциональная система коррекции эффектов оптической близости, генерируется выходная информация.

На окончательном этапе полученные данные подвергаются преобразованию (конвертации) в управляющую информацию для генераторов изображения.

Необходимые операции с данными, такие как: масштабирование, булевы операции, фазовая коррекция, геометрическая коррекция, задание технологических припусков и другие, выполняются при помощи программно-аппаратного комплекса на базе современных САПР, что позволяет производить обработку входных данных в форматах DXF, GDSII, OASIS.

Прием **первичных данных** (описание параметров фотошаблона и описание топологии фотошаблона) производится либо в электронном виде (через интернет-сайт путем заполнения последовательности экранных форм), либо на физическом носителе, с сопроводительной документацией.

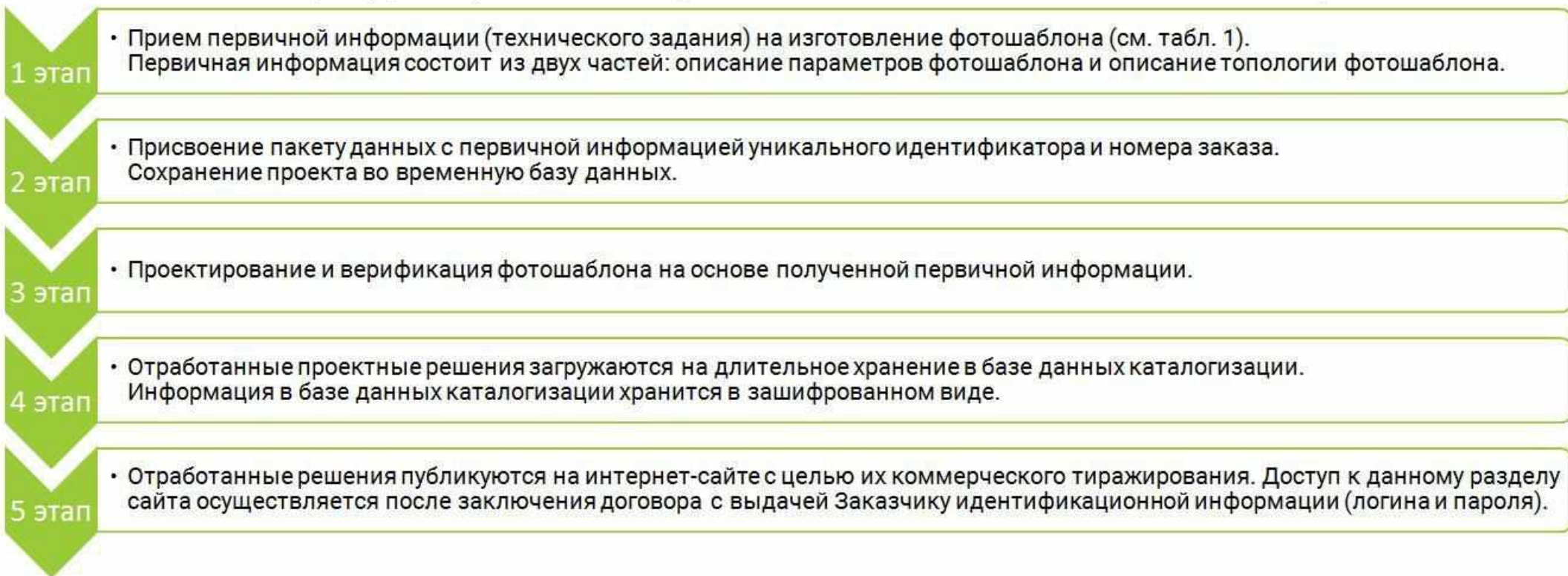
Топология кристалла поступает от отдела проектирования топологии, либо от заказчика; технологическая информация (о метках и маркировке комплекта фотошаблонов) — от заказчика и непосредственно от изготовителя интегральной схемы (например, спецификации на технологические параметры оборудования).

Техническая **сопроводительная информация**, как правило, включает:

- габаритный размер фотошаблонной заготовки, тип стекла, плоскостность поверхности заготовки;
- названия обрабатываемых структур;
- границы области обработки данных;

- информацию о метках совмещения для степпера (модель степпера);
 - необходимые операции с топологическими данными для каждого обрабатываемого слоя (масштабирование, припуски, инверсия, изменение ориентации, шаг сетки проектирования, зеркальность, булевы операции со слоями, мультипликация данных);
 - информацию для проведения мероприятий по аттестации (указание расположения геометрических размеров и направления измерений, тональность контролируемых элементов, требования к рассовмещению шаблонов в комплекте, допуски на размер топологических элементов);
 - размер недопустимых дефектов в рабочем поле фотошаблона;
 - информацию для создания и размещения баркода;
 - наличие и содержание текстовой маркировки;
 - тип пелликла (односторонний, двусторонний).
- Могут выдвигаться и другие специальные требования.

Обобщенный маршрут обработки и хранения данных для изготовления фотошаблона



Пример формы с сопроводительной информацией, предоставляемой Заказчиком, приведен в Таблице 1.

Таблица 1. Пример формы ТЗ на изготовление фотошаблона

| | | | | |
|--|------------------------------------|--------------------------|---|---|
| Материал ФШЗ | Дата формирования заказа | Заказчик | | |
| Размер ФШЗ | Номер заказа | Контактное лицо | | |
| Толщина ФШЗ | Срок изготовления | Телефон | | |
| Плотность хрома | Название устройства экспонирования | Факс | | |
| Плоскостность поверхности заготовки Мкм\см | | E-mail | | |
| Размер рабочего поля фотошаблона | | Формат баркода | | |
| Размер единичного модуля, мм X= Y= | Шаг мультипликации, мм | Текст баркода | | |
| Формат данных | Масштаб входных данных 1:1 | Границы обработки данных | X | Y |
| Единицы измерения данных | Ориентация данных | Левый нижний угол | | |
| Имя файла | Имя структуры | Правый нижний угол | | |
| Контроль совмещения слоев (элементы совмещения) | | | | |

Таблица 1 (продолжение). Пример формы ТЗ на изготовление фотошаблона

[illegible]

1.3. Проведение верификации исходных данных на корректность предоставленных данных

Разработчики управляющей информации для изготовления фотошаблонов должны провести входной контроль предоставленной топологии на соответствие ТЗ и правилам проектирования* (**DRC** – *Design Rule Check*).

DRC содержит ряд строгих правил, продиктованных требованиями конкретного производственного процесса – 130 нм, 45 нм, 13 нм и т.д. Основными критериями правил DRC являются: допустимая **ширина** топологического элемента, допустимое **расстояние** между элементами (Рисунок 1.11) и допустимая **зона перекрытия** элементов, находящимися в разных слоях.

Далее проводится верификация на соответствие конструктивно-технологическим ограничениям (**MRC** – *Manufacturing Rule Check*). MRC является более глубоким анализом топологии, учитывающим уже параметры технологических процессов оборудования.

* Отметим, что в последнее время DRC проводится, как правило, непосредственно разработчиками топологии - еще до передачи проекта на фотошаблонное производство.

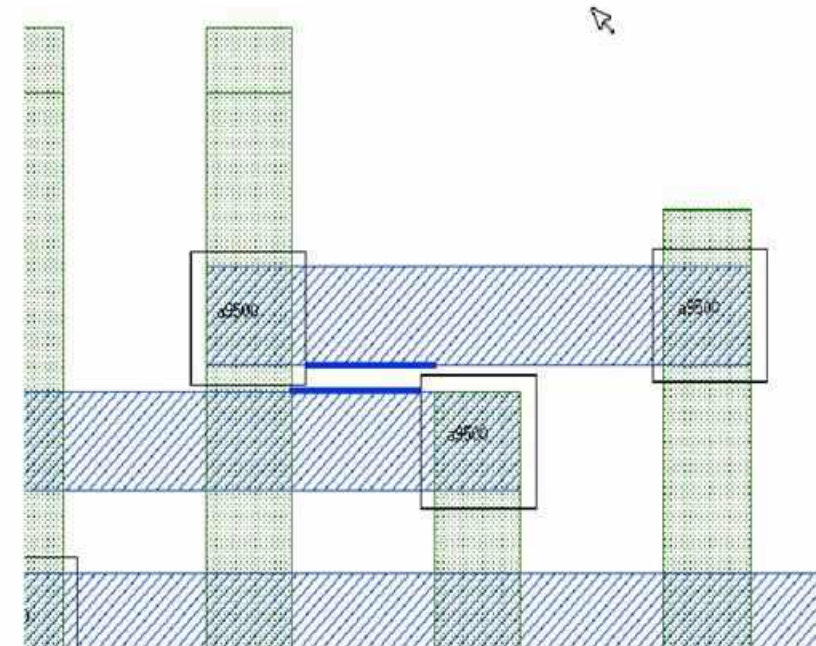


Рисунок 1.11 – Фрагмент топологии, содержащий ошибку DRC: нарушено минимальное расстояние между фигурами в слое metal1 (изображение из программного модуля Calibre nmDRC)

Маршрут верификации исходных данных (контроль входной топологии):

- 1 шаг • Проверка корректности предоставленных сопроводительных данных
- 2 шаг • Проверка линий топологии на соответствие формату «полилиния» (для корректной конвертации исходного файла)
- 3 шаг • Проверка DRC: ширина элементов, расстояние между элементами, зона перекрытия элементов
- 4 шаг • Проверка MRC: по габаритам, по тональности, по ориентации, зеркальности, масштабу и др.
- 5 шаг • Проверка наличия линий и фигур, не предусмотренных ТЗ

После проведенной проверки составляется файл отчета с информацией об отсутствии ошибок или, в случае ошибок, показываются те элементы, которые не соответствуют используемой технологической норме. Изображения с проблемным участком направляются заказчику на исправление.

1.4. Регламенты предприятия. Формирование отчета (записи в журнале) о начале работы над проектом

Вся деятельность любого предприятия описывается сводом нормативных требований для внутреннего пользования, который учреждает методы производства, технические средства, технологические нормативы, условия и детальный порядок осуществления технологического процесса.

Данный документ позволяет получить готовую продукцию по качеству, отвечающую требованиям российских или международных стандартов. Также регламент вводит наиболее безопасные способы ведения работ, которые в то же время способствуют достижению оптимальных технико-экономических показателей производства.

Описание технологических производственных процессов содержатся в Технологических регламентах. Кроме них еще существуют стандарты предприятия, технологические карты, технологические и рабочие инструкции на процессы, методики и другая техническая документация.

Технологический регламент – это основной рабочий документ для инженерно-технического персонала и рабочих, участвующих в производственном процессе на данном предприятии.

В технологическом регламенте прописываются все процессы производства с высокой степенью детализации:

- какие операции и как выполнять в различных ситуациях;
- как правильно вести режим;
- какие температуры, давления и расходы выдерживать;
- как правильно изменять основные технологические параметры и характеристики;
- что и в какой последовательности открывать/закрывать.

Одним из требований технологического регламента является **документирование процесса**, в частности, формирование отчета о начале работы и ходе ведения проекта по подготовке данных для изготовления фотошаблона. Пример одного из отчетов - запись в журнал регистрации заказов представлен в таблице 2.

Таблица 2. Журнал регистрации заказов и передачи заказа на участок изготовления фотошаблона

[illegible]

Технологический регламент включает в себя сведения касательно разработки и производства конкретного товара, а также полную информацию о технологических процессах его изготовления, переработки, утилизации и других процедур.

Технологический регламент, успешно внедренный на производстве в качестве основного технического документа, позволяет предпринимателю выпускать только качественную продукцию, обладающую именно теми характеристиками и показателями, которые необходимы для полноценной и успешной работы и функционирования продукции.

Помимо качества самой продукции при внедрении в организации грамотно составленного технологического регламента повышается безопасность труда и улучшается соблюдение правил при осуществлении работ сотрудниками предприятия.

Следует отметить, что технологические регламенты разрабатываются отдельно для каждого вида товара – связано это с тем, что каждый отдельный вид продукции обладает индивидуальными свойствами и характеристиками, а также применяется в различных сферах и областях, а, следовательно, и процедура создания данной продукции отличается от производства других товаров.

В некоторых случаях можно составить один технологический регламент для товаров, схожих по назначению и изготовлению, а также по основным характеристикам.

Если предприятие сертифицируется на соответствие каким-либо стандартам, подразумевающим наличие регламентированных процессов (ISO, OHSAS, SA и т.п.), то состав таких процессов определяется напрямую требованиями этих стандартов или сложившейся практикой их внедрения.

Работа над регламентом, как правило, не заканчивается в момент введения в действие скорректированной по итогам «опытно-промышленной эксплуатации» версии регламента.

Бизнес организации меняется, практика применения регламента выявляет неточности, ошибки, а также детали, не замеченные разработчиками или «узаконенные» в регламенте не оптимальным образом.

Поэтому вполне естественны изменения и дополнения к регламенту. Когда объем этих изменений и дополнений станет достаточно большим, следует выпустить новую редакцию документа.