

Модуль 4

ПРОВЕДЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТОПОЛОГИИ

Содержание модуля 4

4.1. Проведение верификации параметров исходной топологии (критичные размеры, габаритные размеры поля фотошаблона, координаты центра, наличие маркировки, метки совмещения, метки для проекционной литографии) **на соответствие правилам проектирования**

4.2. Проведение обработки топологии фотошаблона (операции позиционирования слоя, изменение тональности слоя, коррекции размеров для каждого слоя, коррекции эффектов оптической близости, коррекции фазового сдвига для слоя с применением фазосдвигающих масок)

4.3. Проведение оптимизации подготовки данных

4.1. Проведение верификации параметров исходной топологии на соответствие правилам проектирования

Рассмотрим последовательность обработки топологических данных при проведении верификации с помощью инструментария *Synopsys CATS*.

Входной файл с топологией в формате *GDSII* или *OASIS* загружается в *Synopsys CATS*.

Файл, содержащий несколько слоев, разбивается на несколько файлов с внутренним расширением *.cflt*, каждый из которых содержит один слой, и далее для каждого слоя производится первичная обработка топологии и задание технологических припусков, указанных в сопроводительной документации (Рисунке 4.1).

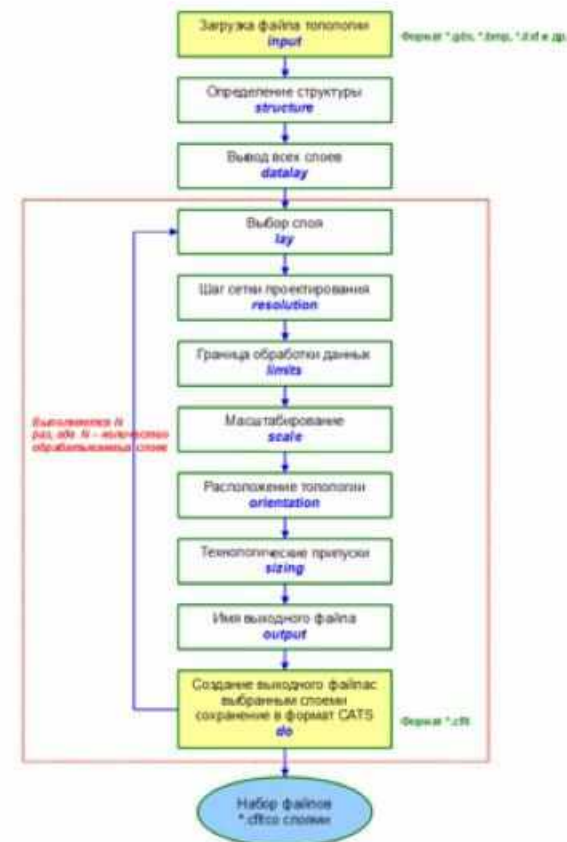


Рисунок 4.1 — Последовательность обработки топологических данных при проведении верификации

Далее проводится верификация на соответствие конструктивно-технологическим ограничениям (MRC) - проверка таких параметров топологии, как: тональность, критичные элементы, габаритные размеры поля фотошаблона, координаты центра, наличие маркировки, метки совмещения, метки для проекционной литографии и др. (Рисунок 4.2).

После проведенной проверки составляется файл отчета с информацией об отсутствии ошибок или, в случае ошибок, показываются те элементы, которые не соответствуют используемой технологической норме.

На основании отчета MRC принимается решение о необходимости применения того или иного метода обработки топологических данных.



Рисунок 4.2 – Последовательность операций при проведении MRC

Каждый из программных пакетов *Synopsys CATS* включает в себя комплект программных модулей, выполняющих определенную функцию.

Это обеспечивает возможность конфигурирования и настройки программного комплекса для реализации в кремнии топологических решений заказных проектов с заданным уровнем технологии, требуемыми проектными нормами.

Программный пакет *CATS* наряду с его основной функцией — подготовкой управляющей информации для изготовления фотошаблонов, используется также при разработке маршрута для проведения мероприятий по аттестации фотошаблонов и контролю критических размеров.

Также *CATS* обладает очень высокой степенью автоматизации благодаря встроенному специализированному языку *scripting language*.

Посредством написания скриптов упрощаются многие рутинные процессы проектирования фотошаблонов, и уменьшается процент ошибки из-за человеческого фактора (составляет примерно 70% всех ошибок). Поэтому данный пакет является весьма полезным и незаменимым во всех отношениях.

4.2. Проведение обработки топологии фотошаблона

Далее с каждым слоем производится обработка топологии – выполнение булевых операций (Рисунок 4.3) и повторное сохранение во внутренний формат *CATS*.

Файлы с топологическими данными могут иметь очень большие размеры – от десятков до нескольких сотен гигабайт на каждый слой, поэтому для работы используют специализированные программно-аппаратные комплексы, включающие в себя от одного до нескольких десятков серверов и вычислительных кластеров.

Платформа *CATS* имеет большой потенциал, так как предоставляет возможность встраивания дополнительных прикладных модулей *OPC* и *PSM*, которые позволяют готовить данные не только для проектных норм 0,25 мкм и 0,18 мкм, но и более современного уровня – вплоть до 32 нм.

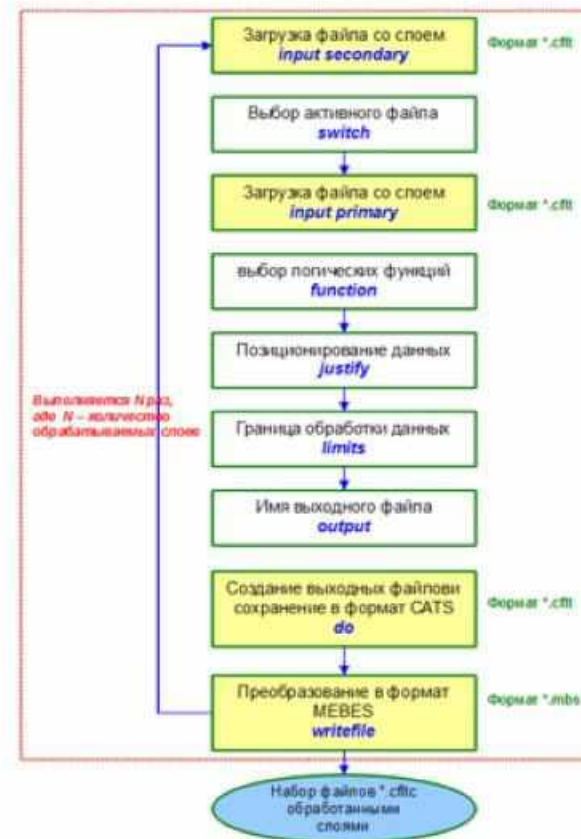


Рисунок 4.3 — Проведение обработки топологии фотошаблона

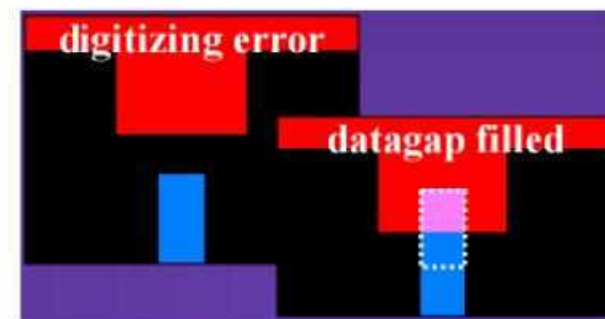
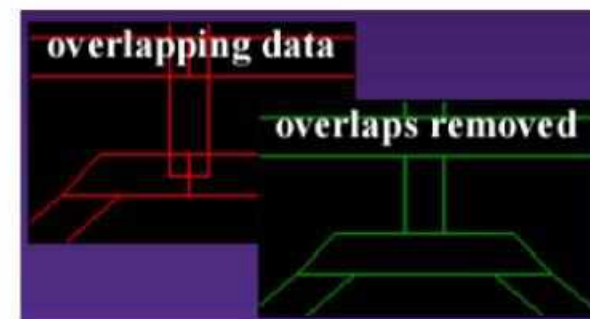
В процессе обработки данных, также важны манипуляции с данными. Вы можете увеличить рисунок, или изменить размеры в определенном месте не меняя размеры всего рисунка.

Также можно объединять слои или два разных файла (образца), перед этим обработав их по отдельности.

CATS дает возможность перед объединением загрузить два файла и работать с ними по отдельности — измерять, вращать, отражать или изменять размеры.

Рассмотрим некоторые команды работы с топологией в *Synopsys CATS*.

На Рисунке 4.4 показаны фрагменты проведения операций изменения тональности слоя и устранения разрывов контуров и перекрытий контуров.



Рисунке 4.4 — Изменения тональности слоя (слева),
устранения разрывов контуров и перекрытий контуров (справа)

Sizing

Задание припусков (Рисунок 4.5). Часто необходимо изменить размеры фигуры, не затронув проект. CATS поддерживает 4 возможных алгоритма для этой операции, и от выбора опций зависит эффект изменения размеров.

Scaling

Изменение размеров всего проекта по коэффициенту. Если нужно уменьшить размер на 25%, нужно использовать коэффициент 0,75. Это часто используется, в случаях когда проектирование ведется, к примеру, на сетке 0,5 мкм, а фактическая сетка продукции 0,375 мкм.

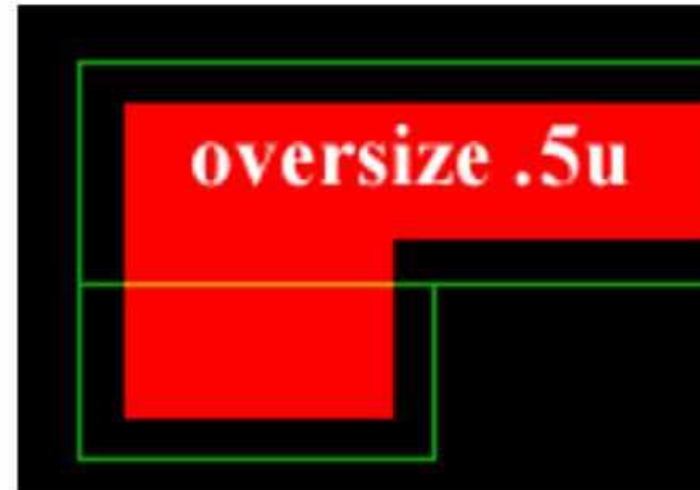


Рисунок 4.5 — Задание припусков в Synopsys CATS

Orientation

CATS поддерживает возможность вращения проекта с шагом в 90 градусов, и зеркальное отражение изображения с шагом в 45 градусов. Это используется перед слиянием двух файлов или использованием логических операций.

Логические операции

CATS поддерживает стандартные булевы операции. Объявление операции задается параметром *Function* в разделе *Fracture Setup* (Рисунок 4.6). Логические операции используются при слиянии топологических слоев, частей рисунка или двух файлов.

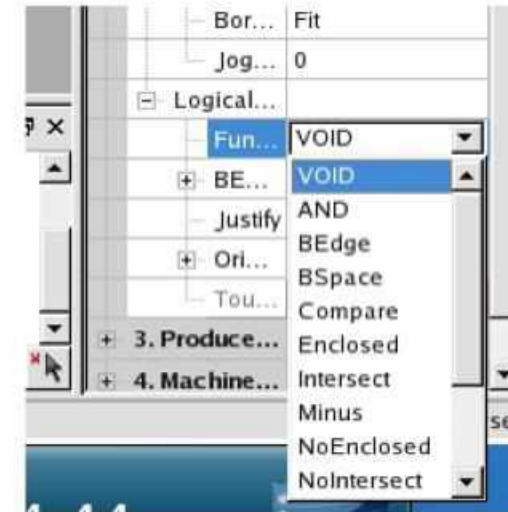


Рисунок 4.6 – Диалог выбора логической функции для выполнения булевых операций в Synopsys CATS

Для проектов с уровнем технологии 90 нм и менее проводится коррекция эффектов оптической близости (OPC).

Для проектов с уровнем технологии 65 нм и менее дополнительно проводится создание управляющей информации для второго экспонирования фазосдвигающих фотошаблонов – PSM.

Операции коррекции эффектов оптической близости необходимо проводить для каждого слоя (Рисунок 4.7-4.9).

Для проведения OPC разрабатываются математические модели (под конкретное технологическое оборудование) и проводится их калибровка.

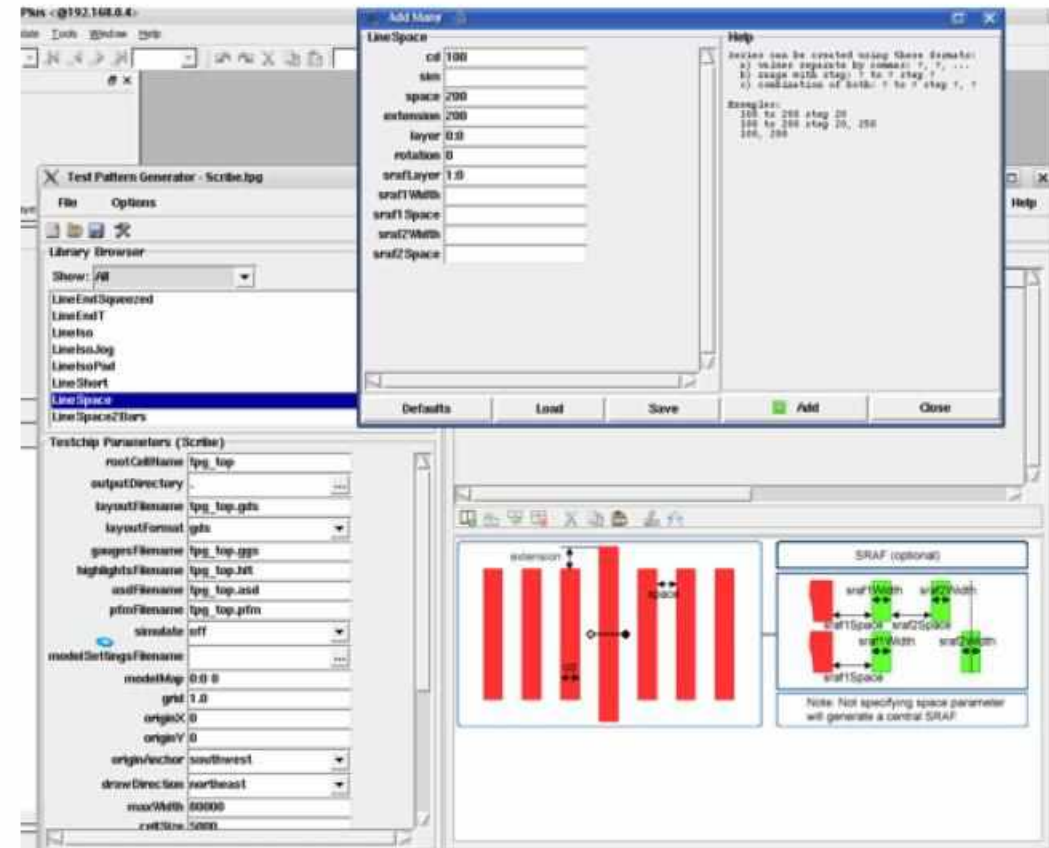


Рисунок 4.7 – Задание технологических параметров в Synopsys CATS для проведения Model-based OPC

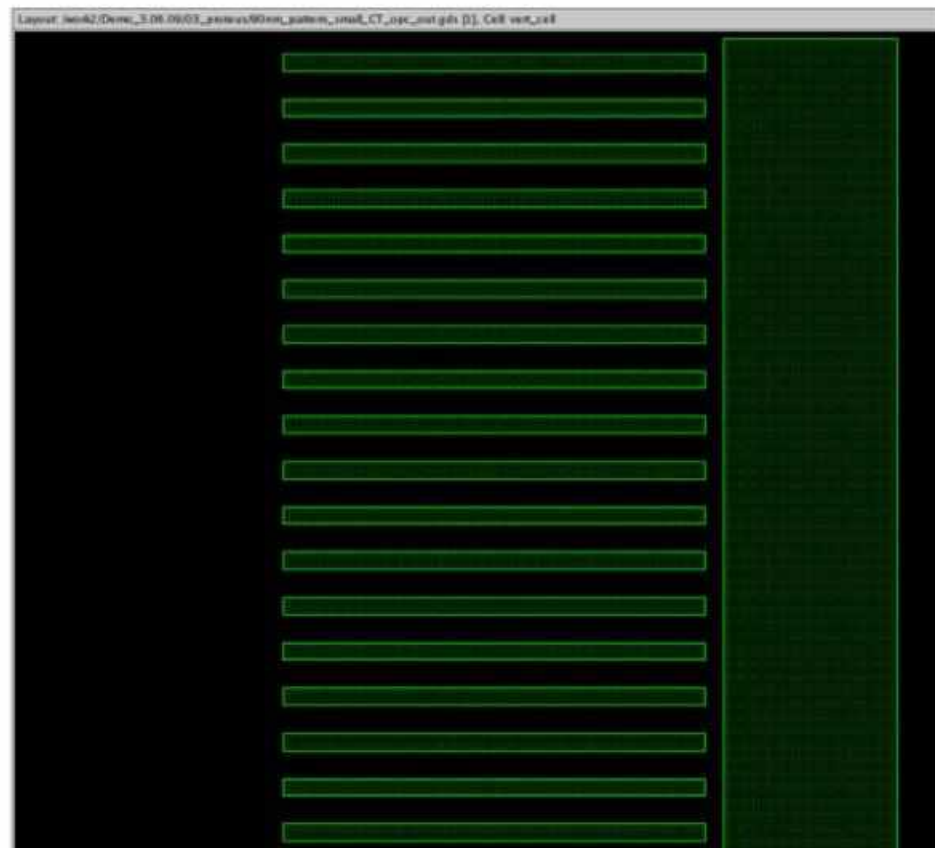


Рисунок 4.8 — Изображение слоя Layer_0 без OPC

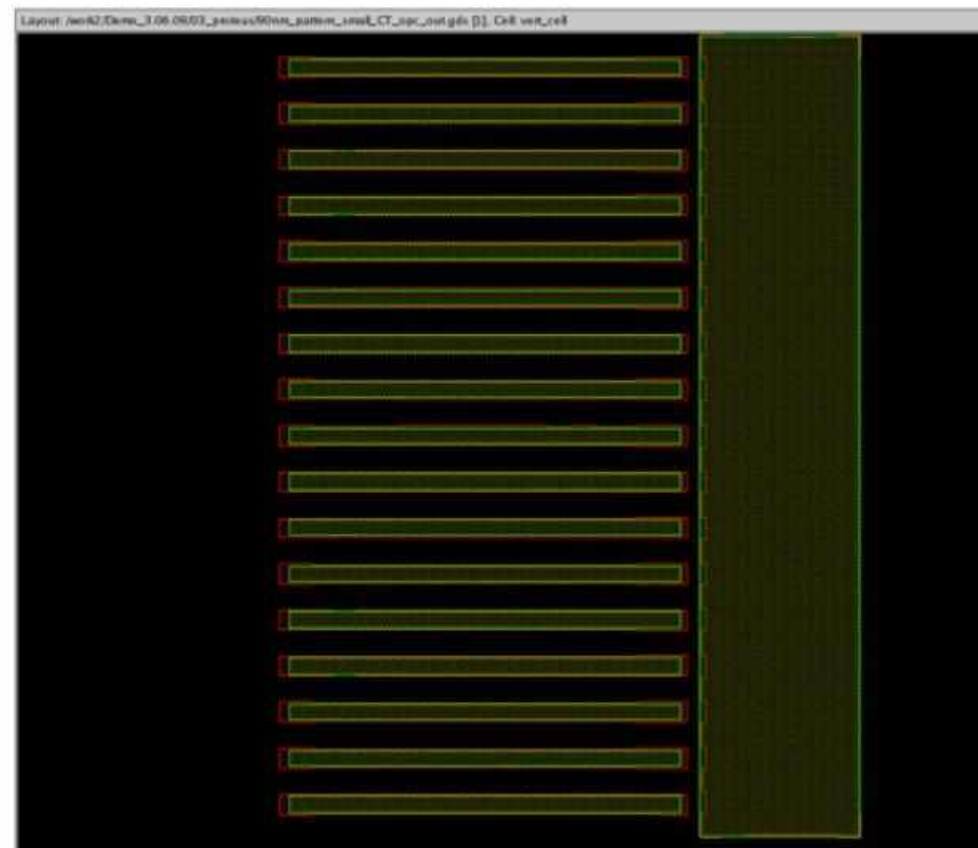


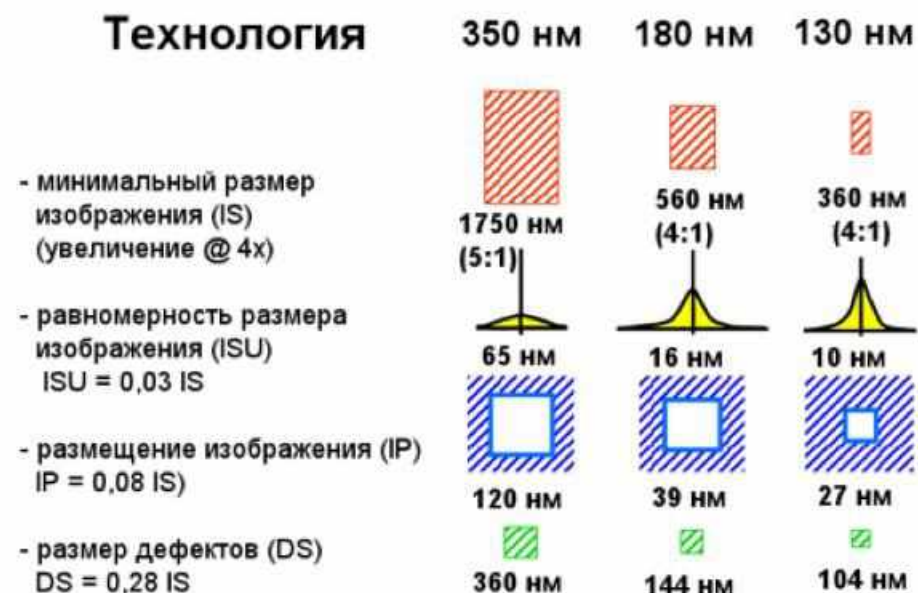
Рисунок 4.9 — Изображение слоя Layer_0 с OPC

4.3. Проведение оптимизации подготовки данных

Переход к новому технологическому уровню примерно через каждые 2-3 года открывает возможности постоянной модернизации электронной компонентной базы.

При этом необходимо 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 (Рисунок 4.10).

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



Источник: INTERNATIONAL SEMATECH



Рисунок 4.10 – Технологические нормы для 350–130 нм

Все эти отдельные факторы приводят к увеличению на порядки объемов обрабатываемой информации при проектировании фотошаблонов и существенному увеличению времени выполнения операции подготовки данных (Рисунок 4.11).

В больших проектах объём промежуточных данных может измеряться гигабайтами, поэтому работа только в оперативной памяти существенно ускоряет процесс. Все этапы, поддающиеся распараллеливанию, могут быть распределены на вычислительные мощности как однородной, так и гетерогенной локальной сети.

С другой стороны, требования к фотошаблону с каждым поколением становятся все жестче, оставляя все меньше времени для процесса MDP.

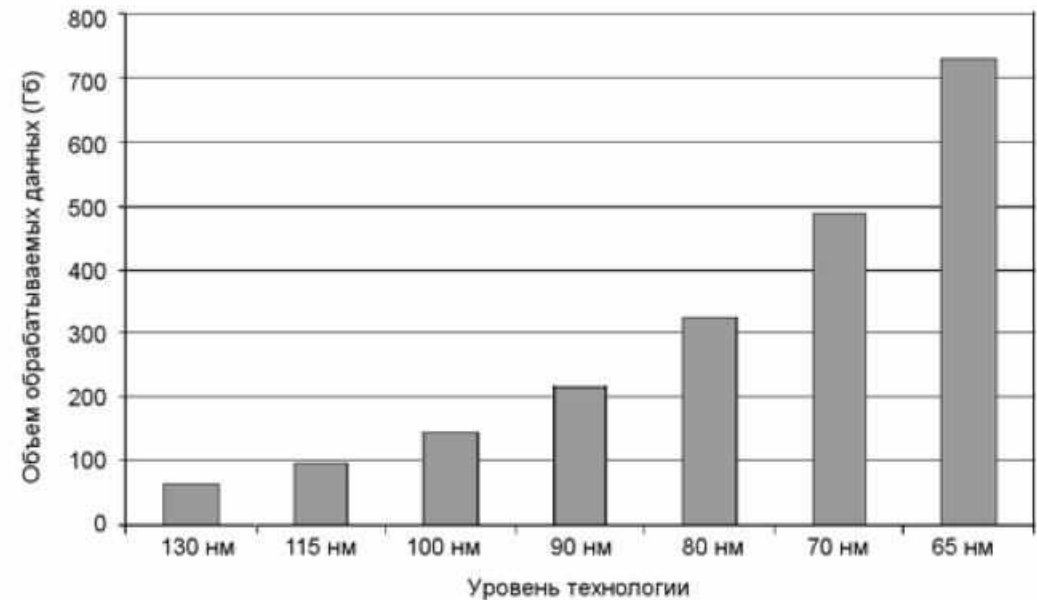


Рисунок 4.11 — Расчетные данные объема обрабатываемой информации при проектировании фотошаблонов для уровня технологии 130–65 нм

Это приводит к резкому увеличению сложности **процесса подготовки данных** (*Mask Data Preparation* - MDP), причиной чего являются:

- внедрение технологии повышения разрешающей способности (RET);
- увеличение количества слоев из-за повышения сложности ИС;
- увеличение количества масок для каждого процесса (включая применение PSM);
- значительное увеличение объема данных из-за функций фрагментации;
- другие коррекции систематических вариаций технологических процессов литографии.

Существуют различные способы снижения времени выполнения MDP, за исключением самого очевидного – использования более производительных вычислительных средств (более быстрых компьютеров).

Один из таких способов заключается в оптимизации потоков данных. Например, выполнение операций генерации и записи больших промежуточных файлов, а также некоторых логических операций, может быть весьма затратным по использованию процессорного времени.

Настройка потока обработки данных может быть проделана таким образом, что медленные операции начинают выполняться раньше быстрых, общее время выполнения сокращается.

Еще один способ снижения времени выполнения MDP – это обработка данных путем распараллеливания процессов. Есть несколько вариантов достижения этого: использование нескольких процессоров на одной вычислительной станции и разделение общей задачи на несколько машин в кластере (Рисунок 4.12).

Возможно и сочетание этих двух подходов.

Третий способ оптимизации заключается в структуризации данных таким образом, что повторяющиеся элементы, к примеру ячейки памяти, обсчитываются только один раз, а при повторении их в схеме используются уже обработанные данные.

В некоторых случаях применение такой оптимизации позволяет сократить время обработки на 30–40%.

Однако здесь многое зависит от окружения, и в других случаях, например, из-за возникновения эффекта близости при оптической или электронно-лучевой литографии, приходится обсчитывать отдельно даже повторяющиеся элементы.

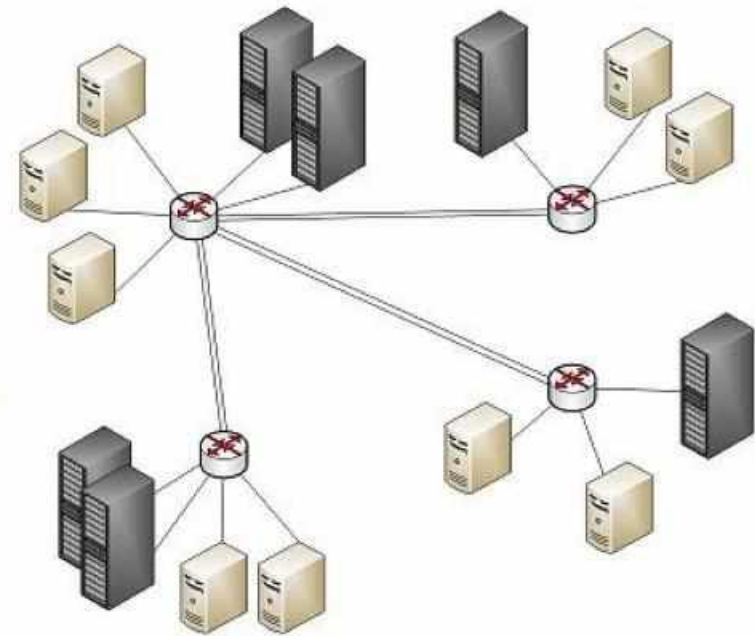


Рисунок 4.12 – Объединение вычислительных мощностей в кластер для снижения времени выполнения MDP

Общее время конвертации данных - от процесса MRC до записи готовой управляющей информации - сегодня иногда превышает время, необходимое для непосредственной химико-физической обработки фотошаблона.

Особую роль на этапах подготовки и проектирования управляющей информации для изготовления фотошаблонов играют методы и средства автоматизации, выполняющие обработку исходной информации заказных проектов и оперирующие гига- и терабайтными объемами информации - операции подготовки управляющей информации проводятся с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования фотошаблонов и подготовки управляющей информации (MDP) для их изготовления.

Данные системы должны удовлетворять следующим требованиям:

- автоматическое формирование компоновки фотошаблона и визуальный контроль правильного взаиморасположения составляющих компонентов фотошаблона;
- компиляция данных в форматы специализированного технологического оборудования, используемого при изготовлении фотошаблонов;
- контроль топологии на соблюдение проектных норм.

Это позволяет не только на порядки ускорить исходный процесс, но и изготовить бездефектные фотошаблоны для производства суб- и наносистем.

При переходе размера в диапазон 100 нм и ниже наблюдается нарастание проблемы выхода годных.

Приведенный на Рисунке 4.13 график показывает зависимость выхода конкретного показателя (например, зазора между элементами) от размера критического элемента для различных технологических норм.

Для каждого узла выход достигает практически 100% для соответствующего размера. По мере уменьшения размера выход годных существенно падает. При достижении определенного размера практически невозможно получить работающую структуру.

Рекомендованное правило* (красная точка) показывает точку на графике, фиксирующую наименьший возможный размер, при котором обеспечивается 100% выход годных для данной технологии.

* Рекомендованные правила поставляются фабрикой-изготовителем как часть файла правил DRC.

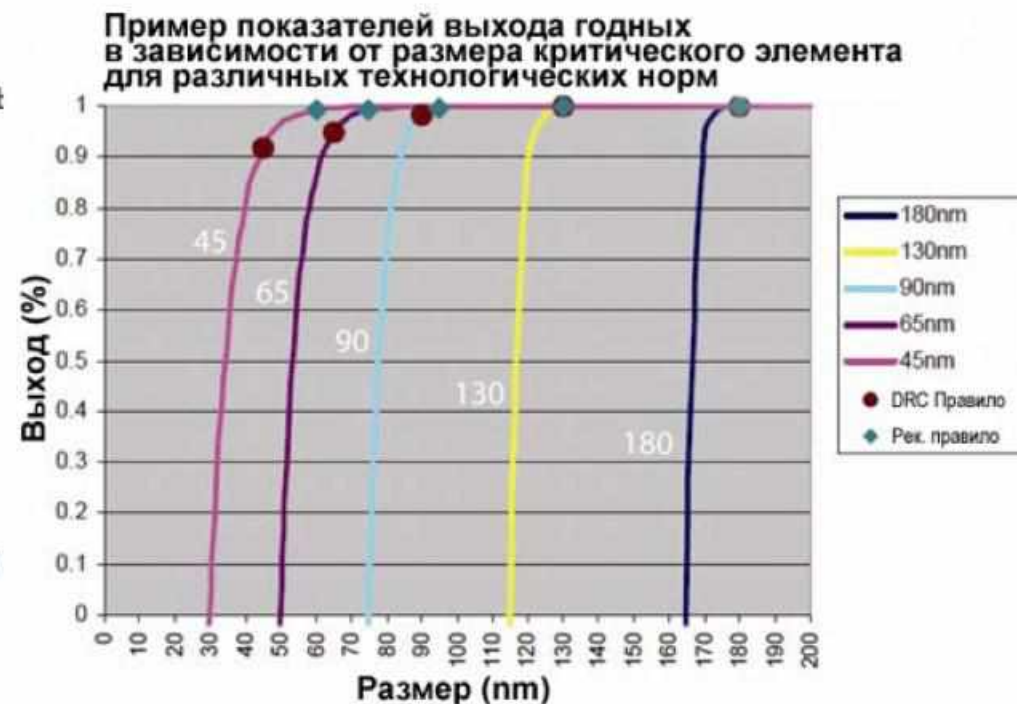


Рисунок 4.13 — Показатели выхода годных в зависимости от размера критического элемента

Сравнение кривых для 180 нм и 65-45 нм показывает, что по мере уменьшения технологических норм, кривая выхода годных становится более плавной.

Такое «скругление» кривой приводит к экономическим проблемам. Если в спецификацию проекта внесены более жесткие требования к выходу годных, точка должна быть сдвинута в правую часть кривой.

Это означает, что при уменьшении технологических норм, разработчик оказывается более ограниченным в выборе размера критических элементов, что экономически не стимулирует переход к меньшим технологическим нормам.

Это побуждает фабрики сдвигать точку в левую часть кривой, обеспечивая разработчику больший маневр при выборе размера, но одновременно снижая выход годных.

Таким образом, разработчику приходится идти на компромисс между выходом годных и размером критического элемента.

Результатом этого компромисса является выбор рекомендованных правил проектирования, которые обеспечивают приемлемый выход годных при достаточной свободе и выборе критического размера.

Однако переход к рекомендованным правилам проектирования вместо традиционных DRC-правил не всегда приводит к увеличению доступной площади кристалла. Это объясняется тем обстоятельством, что не все проекты имеют 100% заполнение по плотности. В топологии всегда имеются «белые» или «пустые» области. Поэтому в существенном проценте случаев можно увеличить критический размер без потери площади.

Анализ кривизны на графике (Рисунке 4.13) между точками, относящимися к DRC правилам и рекомендованным правилам, показывает, что на начальном участке при перемещении вправо от точки DRC выход годных быстро нарастает.

По мере приближения к точке рекомендованных правил рост выхода годных заметно снижается.

Это означает, что если в проекте встречаются два критических случая, выполненные в соответствии с DRC правилами, наиболее оптимальным решением будет частично скорректировать оба этих элемента, а не полностью скорректировать один из них и оставить без изменения другой.

Другими словами влияние нарушения правила оценивается в соответствии с непрерывной математической зависимостью, а не по двоичному принципу «годен/не годен».

Вторая категория рекомендованных правил проектирования не связана с DRC-правилами проектирования. Эти правила описывают эффекты второго рода, которые не приводят к катастрофическому снижению выхода годных, но могут привести к деградации функционирования кристалла.

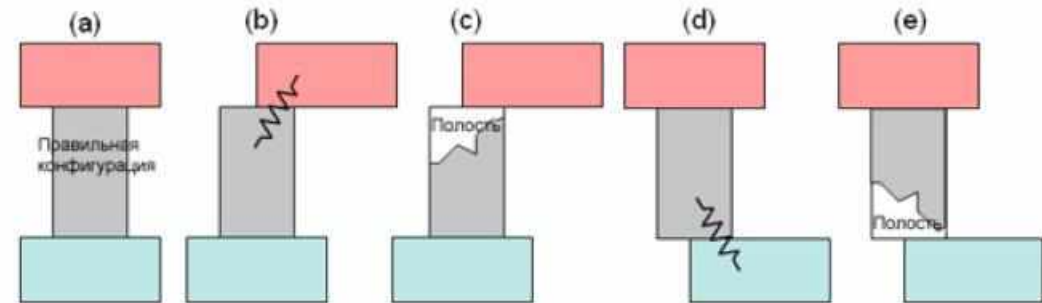
В эту категорию попадают правила, которые влияют на параметрическое поведение или производительность проекта. Подобные эффекты по своей природе имеют статистический характер. Например, накопление мощности статического заряда вызывается суммарным током утечки транзисторов на кристалле. Утечки одного или нескольких транзисторов не приводят к отказу схемы, но суммарное накопление токов утечек транзисторов в наихудшем случае может привести к отказу.

Цель выполнения рекомендованных правил второго рода – скорректировать структуру транзисторов таким образом, чтобы сделать ее более устойчивой к вышеуказанным эффектам.

В качестве примера рассмотрим правило, определяющее минимально необходимое перекрытие металла и переходного отверстия. Это правило предписывает увеличивать область перекрытия для того, чтобы сделать данный элемент более устойчивым к отклонениям фотолитографического процесса.

Если металлический проводник существенно смещен относительно перехода, который находится снизу или сверху от проводника, тогда либо верхняя, либо нижняя часть перехода могут оказаться частично открытыми.

Вышеуказанное смещение может привести к множеству разнообразных отказов. На Рисунке 4.14 показаны некоторые отказы, которые возникают при неполном перекрытии металла и переходного отверстия.



Рисунке 4.14 – Отказы при смещении проводника относительно перехода