

Модуль 2

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ
КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ И
ПРОВЕДЕНИЕ КАЛИБРОВКИ СОЗДАННЫХ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Содержание модуля 2

- 2.1. Анализ технических возможностей литографического оборудования для проектирования фотошаблонов заданного технологического уровня
- 2.2. Определение необходимости проведения коррекции оптических эффектов близости
- 2.3. Формирование скриптов коррекции и проведение коррекции оптических эффектов близости
- 2.4. Проведение анализа коррекции оптических эффектов близости
- 2.5. Определение параметров коррекции эффектов оптической близости для формирования технологического рисунка на фотошаблоне

2.1. Анализ технических возможностей литографического оборудования для проектирования фотошаблонов заданного технологического уровня

Современные проекты, уходящие всё глубже в нанометровый диапазон, сталкиваются со всё более сложными проблемами.

Топология современной интегральной схемы представляет собой сложную структуру, состоящую из десятков миллионов геометрических фигур.

При уменьшении критических размеров элементов СБИС в нанометровую область возможности точного переноса изображения на кремний определяются как фундаментальным пределом микролитографических систем, так и вариациями (т. е. случайными, неконтролируемыми изменениями) процесса фотолитографии.

Поэтому сегодня инструментом технолога стало программное обеспечение и моделирование.

Благодаря фундаментальному физическому подходу моделирование позволяет определить и оптимизировать параметры фотолитографического оборудования до этапа экспонирования пластины и моделировать трехмерную топографию элементов в фоторезисте на различных стадиях фотолитографической обработки.

В результате увеличивается выход годных изделий и полностью используются возможности существующего технологического оборудования.

Фотолитографическая установка (Рисунок 2.1) состоит из следующих основных компонентов: источник освещения, осветительная система, фотошаблон, проекционный объектив, полупроводниковая пластина с фоторезистом.

Так например, по мере уменьшения геометрических размеров полигонов зависимость параметров топологии от вариации процесса фотолитографии всё более увеличивается.

Даже незначительные отклонения параметров дозы облучения и фокусировки могут привести к отклонениям таких параметров, как задержка распространения и токов утечки.

Электромагнитное поле, излучаемое источником, распространяется через осветительную оптическую систему, которая формирует изображение источника в плоскости зрачка проекционного объектива.

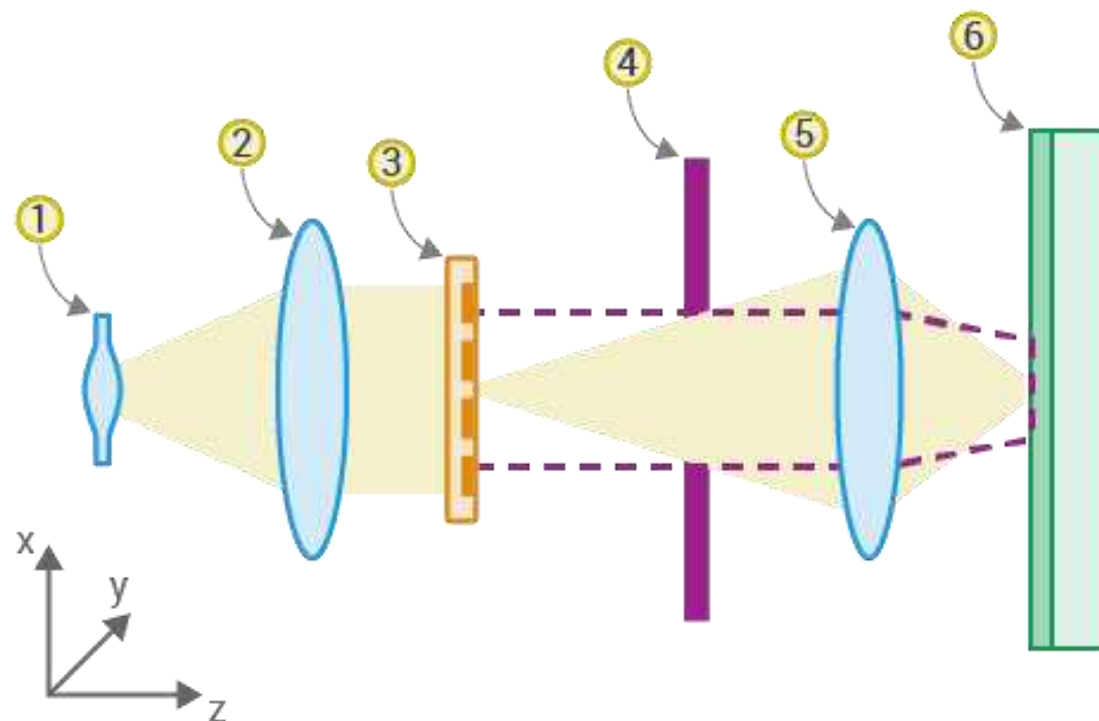


Рисунок 2.1 — Схема фотолитографической установки:
1 — источник освещения; 2 — осветительная система; 3 — фотошаблон;
4 — диафрагма (зрачок); 5 — проекционная оптическая система; 6 —
пластина с фоторезистом

Между осветительной системой и проекционным объективом находится фотошаблон, на элементах которого происходит дифракция проходящего света.

Далее, свет, прошедший через фотошаблон, преобразуется проекционным объективом, в результате чего на поверхности фоторезиста формируется воздушное изображение, а внутри фоторезиста — скрытое изображение.

Механизм влияния заключается в протяженном распределении энергии в изображении края элемента, построенного проекционным объективом, и бинарной характеристике энергетической чувствительности фоторезиста.

Другими словами, физические свойства фоторезиста изменяются скачкообразно при получении им энергии экспозиции, больше известного как порогового значения E_0 . Это явление иллюстрирует Рисунок 2.2.

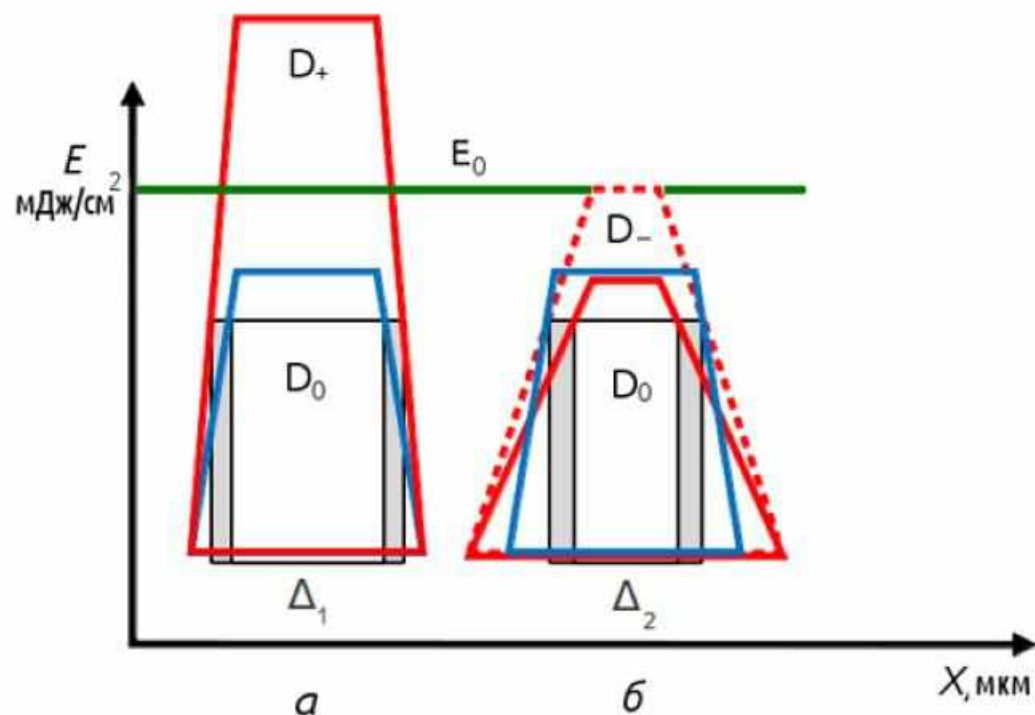


Рисунок 2.2 — Изменения в распределении энергии экспозиции: а — в изображении элемента при увеличении дозы; б — ухудшении фокусировки

Если разработчиком микросхемы заложен элемент с размером D_0 , то проекционная система литографической установки, проецируя с фотошаблона изображение элемента, должна обеспечить в зоне протяженностью D_0 превышение энергии экспозиции порогового уровня E_0 (Рисунок 2.2, а, синяя кривая).

Если увеличить энергию экспозиции E либо за счет возрастания световой мощности либо увеличения времени облучения (Рисунок 2.2, а, красная кривая), то размер зоны, в которой существует превышение порога E_0 , увеличится на величину Δ_1 , соответственно при этом также увеличится размер элемента.

В другом случае, если фокусировка объектива не оптимальна (Рисунок 2.2, б, красная кривая), распределение энергии в изображении края элемента размывается, и зона превышения порогового уровня энергии сужается на величину Δ_2 , размер элемента также уменьшается.

Когда значения Δ_1 и Δ_2 находятся в границах допуска на ширину элемента, то технологическая задача решена, а максимально допустимые величины Δ_1 и Δ_2 определяют размеры технологического окна процесса для отдельного элемента.

В противоположном случае процесс нужно корректировать.

Кроме вариаций технологического процесса, проблемой электронно-лучевой литографии являются так называемые **эффекты близости**. Они приводят к нежелательному экспонированию областей, в которые луч непосредственно не направлялся, при этом перенос рисунка с фотошаблона на маску сопровождается искажениями: элементы, расположенные под прямым углом, не прорабатываются на пластине, присутствует эффект скругления острых углов, а концы линий укорачиваются (Рисунок 2.3).

Введение дополнительных геометрических преобразований исходной топологии на этапе проектирования фотошаблонов позволяет устранить указанные оптические эффекты при переносе топологии на кремниевую пластину.

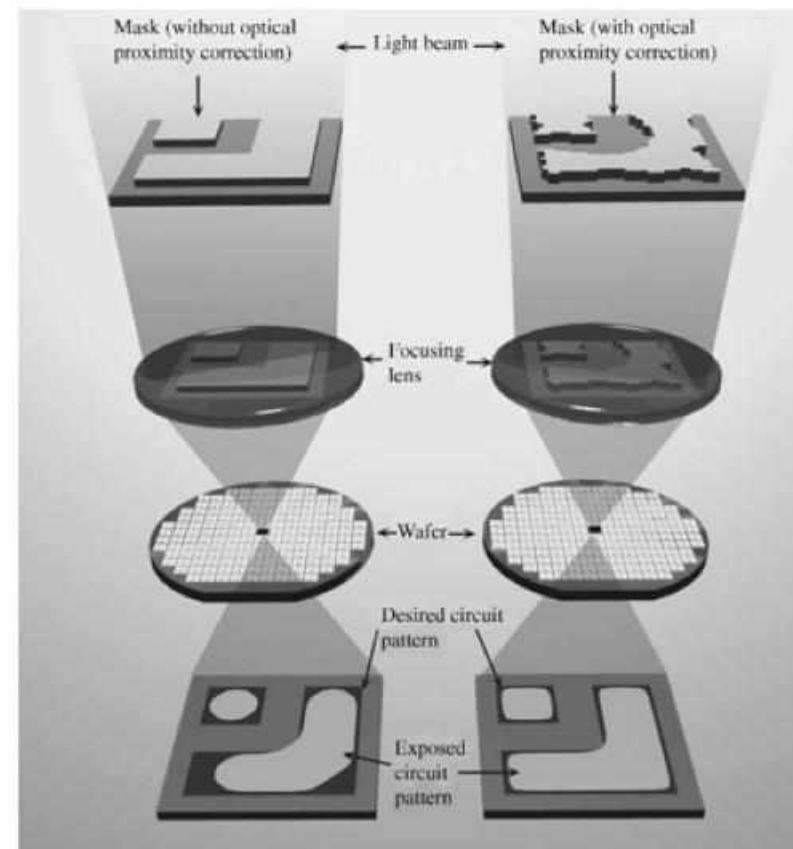


Рисунок 2.3 – Пример воздействия эффектов оптической близости на геометрическую форму элемента

Чтобы избежать этого эффекта при подготовке данных вводят специальные фигуры коррекции: serif, anti-serif, barrel, hammerhead, jogs и т.п. Этот процесс называют OPC (*Optical Proximity Correction*) — коррекция оптических эффектов близости.

Подробно эти фигуры коррекции будут рассмотрены в следующем разделе.

Массивы данных, необходимых для определения параметров технологического окна, получают путем контроля критических размеров, сформированных в процессе эксперимента на специализированном оборудовании, называемом установкой контроля критических размеров.

Следует отметить, что для этих исследований часто используют тестовый шаблон, облегчающий задачу получения необходимых данных.

В этом смысле контроль критических размеров сформированных в фоторезисте тестовых элементов решает задачу определения характеристик технологического процесса.

Таким образом, для корректного воспроизведения топографического рисунка на пластине необходимо при проектировании фотошаблонов проводить анализ технических возможностей литографического оборудования (разрешающая способность проекционной системы, используемые технологические процессы и пр.) с целью определения параметров и допусков для заданного технологического уровня.

Для оценки **разрешающей способности** фотолитографической установки (минимальный размер элементов, который установка дает возможность получить на поверхности пластины), определяют предельные значения **периода** и минимального размера формируемых полупроводниковых структур, который называется **критическим размером** (*Critical Dimension* – *CD*) (Рисунок 2.4).

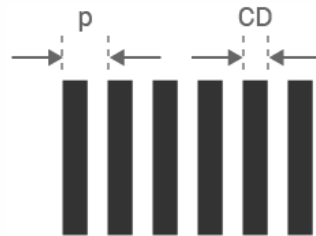


Рисунок 2.4 – Пример периодических линий и промежутков:
p – период, *CD* – критический размер

Критический размер элемента оценивается по известной формуле Релэя (2.1):

$$CD = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

где λ – длина волны излучения, NA – числовая апертура проекционного объектива, k_1 – множитель, зависящий от источника внеосевого излучения:

$k_1 = 0,5$ – минимальное значение (теоретический предел),

$k_1 = 0,6$ – теоретически достижимое значение,

$k_1 = 0,8$ – практически достижимое значение.

Из выражения (2.1) следует, что основной стратегией уменьшения размеров элементов на пластине является уменьшение длины волны излучения и увеличение числовой апертуры проекционного объектива.

Другой важной характеристикой фотолитографической установки является **глубина резкости** (*Depth Of Focus* - *DOF*), которую можно оценить по формуле:

$$DOF = \pm k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (2.2)$$

где $k_2 \approx 1$

Глубина резкости отображает качество переноса изображения по отношению к вариации фокуса, определяется как диапазон изменения фокусного расстояния, позволяющий получить печатаемое изображение внутри требуемого диапазона спецификаций (таких, как ширина линии, угол наклона края, потери фоторезиста и длительность экспозиции).

При разработке проекционных объективов стремятся к увеличению глубины резкости, но основная стратегия (уменьшение длины волны и увеличение апертуры) не способствует этому.

Поэтому для повышения качества процесса фотолитографии используются различные методы уменьшения минимального размера элементов и увеличения глубины резкости при неизменных длине волны и числовой апертуре.

Использование излучения в глубокой ультрафиолетовой области ($\lambda = 0,193$ мкм) позволяет получать размер элементов менее, чем длина волны (0,15 мкм и меньше).

Увеличение числовой апертуры проекционных объективов связано со значительными трудностями по коррекции aberrаций. Добиваться необходимой коррекции aberrаций позволяет усложнение схемы оптической системы проекционного объектива (Рисунок 2.5).

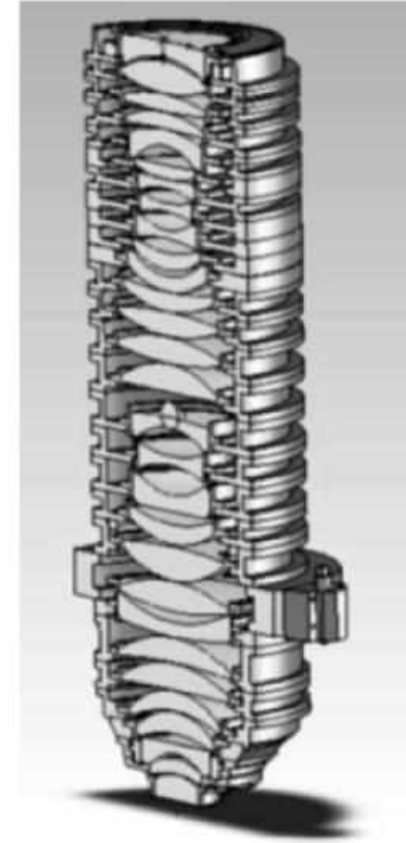


Рисунок 2.5 – Основной элемент оптической системы - объектив, изготовленный из кварца глубокой очистки и состоящий из трех десятков линз диаметром до 300 мм.

Как говорилось ранее, внутренние и взаимные эффекты близости являются главными проблемами систем фотолитографии.

Постоянное улучшение разрешающей способности оптических систем, предназначенных для реализации фотолитографических процессов, обуславливает необходимость использования фотошаблонов, изготовленных с применением **техник повышения разрешения** (*Resolution Enhancement Technology – RET*), которая позволяет значительно уменьшить величину k_1 в формуле (2.1) по сравнению с дифракционным критерием ($k_1 = 0,61$).

Оптимальное применение техник повышения разрешения проекционной оптической фотолитографии позволяет в настоящее время достичь значений $k_1 = 0,3$ (при теоретическом пределе $k_1 = 0,25$).

Подставляя $k_1 = 0,3$ в формулу (2.2) для наиболее совершенных проекционных систем с $NA = 0,93$, можно получить выражение:

$$L_{\min} = 0,32 \lambda, \quad (2.3)$$

из которого следует, что при $\lambda = 365$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 130$ нм, при $\lambda = 248$ нм можно достичь разрешения $L_{\min} = 90$ нм, при $\lambda = 193$ нм можно достичь разрешения $L_{\min} = 65$ нм.

Вносимые эффектом оптической близости критические искажения возникают в случае, когда размеры топологических элементов разрабатываемой СБИС меньше длины волны экспонирующего излучения.

Например, при производстве СБИС с минимальной проектной нормой 0,25 мкм с использованием литографической установки, работающей на длине волны экспонирующего излучения 365 нм (i-линия излучения ртути), этому условию будет удовлетворять уже не только топологический слой поликремния (критический линейный размер (КЛР) – 0,25 мкм), но и топологический слой первого уровня металлизации (КЛР – 0,32 мкм).

Последствия появления искажений из-за эффекта оптической близости по степени значимости могут быть различными: от незначительного закругления угла до сокращения длины линии на ее конце, что может привести к потере электрического контакта между элементами топологии СБИС.

Существуют методики, позволяющие повысить разрешение оптической системы. К ним, в частности, относят: внеосевое освещение (*Off-Axis Illumination – OAI*), фазосдвигающие маски (*Phase-Shift Masks – PSM*), коррекция эффектов оптической близости (*Optical Proximity Correction – OPC*) и другие.

Наиболее доступным среди них является коррекция эффекта оптической близости (OPC), т.к. этот метод затрагивает лишь изображение рисунка топологического слоя на фотошаблоне, который и будет рассмотрен в данном курсе.

Коррекция эффектов оптической близости — один из наиболее широко используемых методов повышения разрешающей способности путем простой модификации фигур на фотошаблоне для улучшения качества фигур, переносимых на кремний.

Метод заключается во введении в исходный топологический проект элементов специальной формы, призванных подавить дифракционные эффекты.

В зависимости от технологического уровня, для проведения коррекции эффектов оптической близости могут потребоваться различные методы коррекции. Например, для технологии уровня 90 нм и менее требуется не только применение OPC, но и PSM (Рисунок 2.6).

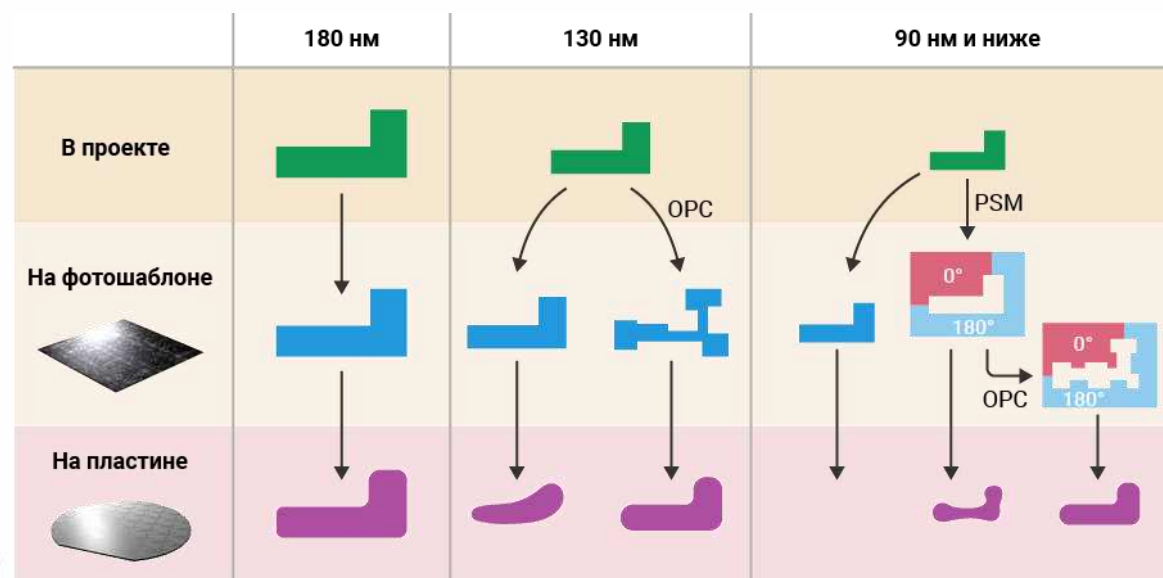


Рисунок 2.6 – Использование уровня технологии 90нм и менее требует не только применения OPC, но и RET

Существующие методы коррекции ОРС можно разбить на две группы:

- методы, основанные на моделировании процесса формирования изображения,
- методы, основанные на формировании набора правил, сформированных на базе эмпирических зависимостей.

Первая группа методов основана на использовании модели процесса формирования изображения в фоторезисте в процессе экспонирования.

Эта модель позволяет путем решения обратной задачи – определения исходной формы топологических структур, при которой результирующее изображение будет иметь требуемую форму – определить конфигурацию дополнительных элементов изображения, введение которых в топологическую структуру обеспечит воспроизведение требуемой формы топологических элементов.

Вторая группа методов основана на определении конфигурации дополнительных элементов изображения эмпирическим путем, при помощи выполнения серии пробных циклов экспонирования.

Необходимость применения правил ОРС для каждой ситуации определяется экспериментально.

Введение коррекций в исходную топологию позволяет:

- обеспечить заданные параметры получаемых на пластине структур;
- повысить стабильность технологического процесса;
- повысить процент выхода годных кристаллов на пластине;
- исключить из производственного цикла стадию отработки технологического процесса под конкретный тип изделия.

Игнорирование влияния вариаций процесса на OPC может приводить к ошибкам анализа быстродействия, потребляемой мощности и выхода годных СБИС.

Например, временной анализ, основанный на изображении на кремнии после OPC, значительно отличается от временного анализа, основанного на требуемом изображении (к слову, запас по быстродействию может отличаться на 36% при значительном переупорядочении критических путей).

Методы статистического моделирования показали отображение вариаций процесса фотолитографии в CD или быстродействие СБИС.

Вариации ширины линий на кристалле могут приводить к разнице в быстродействии СБИС между наилучшим и наихудшим случаями до 40%.

Непрямоугольность затворов после OPC необходимо учитывать для более точной оценки быстродействия и токов утечки.

Следовательно, при проведении OPC необходимо учитывать и вариации процесса.

2.3. Формирование скриптов коррекции и проведение коррекции оптических эффектов близости

Основной алгоритм проведения OPC состоит из трех этапов: фрагментации, моделирования и коррекции.

Для примера покажем базовые шаги выполнения оптической коррекции эффектов близости при помощи программной платформа **Mentor Graphics Calibre OPCpro**.

Во-первых, рассмотрим оптическую коррекцию с использованием непечатаемых вспомогательных фигур (SRAF – *Sub-Resolution Assist Features*). В этом случае на спроектированную топологию накладываются (в соответствии с имеющимся в Calibre алгоритмом) вспомогательные фигуры SRAF, такие, как рассеивающие полосы.

При выполнении OPC фигуры SRAF не фрагментируются и не подвергаются коррекции, поскольку они не печатаются на фотошаблоне. Однако при проведении моделирования для фигур основного корректируемого слоя наличие этих фигур учитывается, как если бы они присутствовали в том же слое. Это делает результаты моделирования более точными.

На Рисунке 2.7 показана исходная топология с добавленными фигурами SRAF, а также результат оптической коррекции (пример приведен для проектных норм 90 нм).

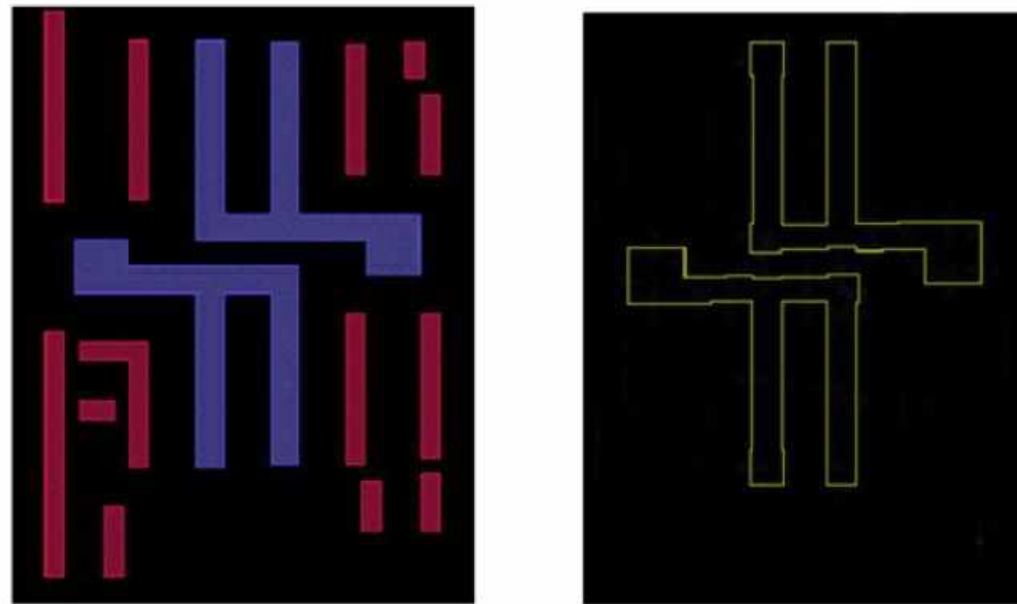


Рисунок 2.7 – Исходная топология с добавленными фигурами **SRAF** (слева), и результат оптической коррекции (справа); синий цвет – поликремний, красный – фигуры **SRAF**

Во-вторых, рассмотрим оптическую коррекцию с использованием печатаемых вспомогательных фигур (PAF – *Printing Assisted Features*).

В этом случае фигуры PAF (такие, как заполнители слоя) действительно печатаются (в соответствии с имеющимся в Calibre алгоритмом) на фотошаблоне наряду с основным (корректируемым) слоем, однако, сами они не подвергаются коррекции.

Возможно одновременное использование как фигур PAF, так и фигур SRAF в одном и том же проекте.

На Рисунке 2.8. показана исходная топология и результаты оптической коррекции с одновременным использованием как фигур PAF, так и фигур SRAF.

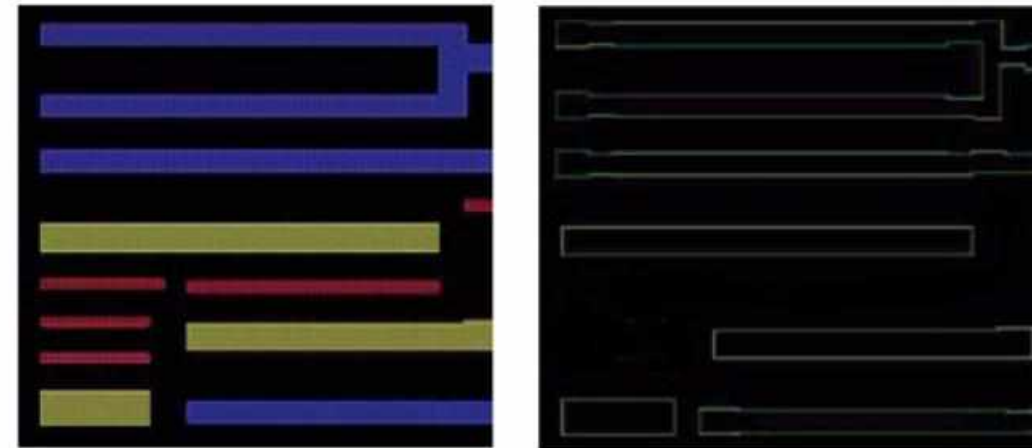


Рисунок 2.8 – Исходная топология с добавленными фигурами PAF и SRAF (слева) и результаты оптической коррекции (справа); синий цвет – поликремний, желтый – фигуры PAF, красный – фигуры SRAF

Процесс оптической коррекции состоит из этапа подготовки пакета необходимых данных для проведения OPC и выполняется один раз для выбранной технологии и оборудования.

Необходимыми данными для проведения OPC являются:

- оптическая модель;
- набор правил (rules) для выполнения OPC.

При изменении техпроцесса, замене технологического оборудования и других вмешательствах в производственную цепочку необходимо заново сформировать пакет необходимых данных для проведения OPC и заново выполнить OPC для выбранной технологии и оборудования.

Создание и калибровка оптической модели

При выполнении непосредственно процесса коррекции Calibre должен постоянно контролировать изменяемые параметры, например, достаточно ли утолщена линия или достаточно ли раздвинуты углы и т.д. Для этого требуется провести моделирование и понять, как будет выглядеть фигура после экспозиции.

Процесс создания модели заключается в выборе существующей счётной модели и её калибровке, т.е. подгонки под конкретное оборудование.

Существуют счётные модели разной степени детализации, например, с учётом искажений в фоторезисте или без них. Calibre поддерживает все самые современные модели, позволяющие уже сейчас проводить моделирование для являющихся в данный момент только перспективными технологий вплоть до 32nm, и позволяет подобрать оптимальное соотношение производительность / качество для любой выбранной технологии.

Процесс калибровки состоит из следующих этапов:

1
этап

- создание тестовых структур различных форм и параметров; существует возможность использовать как рекомендуемый фирмой *Mentor Graphics* минимально-необходимый набор тестовых структур, так и дополнить его своими элементами, а также разработать полностью свои тестовые структуры.

2
этап

- изготовление тестовой микросхемы и получение при помощи сканирующего электронного микроскопа изображения реализованных структур, а также выполнение различных геометрических измерений; разработка управляющей программы для автоматизированных измерений сканирующим электронным микроскопом является очень длительным и трудоёмким процессом; Calibre позволяет сгенерировать управляющую программу в автоматическом режиме.

3
этап

- используя измеренные данные, устанавливаем в параметрах модели конкретные значения, моделируем исходные тестовые структуры и сравниваем промоделированное изображение с отсканированным изображением. При несоответствии изображений уточняются калибровочные параметры достижения положительного результата.

Создание правил (rules) для выполнения OPC

Во всех используемых модулях Calibre используются два базовых элемента:

- 1) счётное ядро *mnDRC*, выделяющее из геометрических структур необходимые параметры для измерений;
- 2) язык описания правил *SVRF*.

Для решения задачи проверки правил проектирования (DRC) решение *Calibre mnDRC* является признанным лидером, об этом говорит почти стопроцентный показатель использования *Calibre mnDRC* в Европе и высокий процент распространения в мире.

Учитывая это, является абсолютно логичным использование для решения задачи оптической коррекции решения *Calibre OPC*, т. к. *Calibre OPC* использует вычислительное ядро *Calibre mnDRC*.

Использование единого языка описания правил как для DRC и OPC, так и для модулей, которые, возможно, потребуются в будущем, позволяет существенно сократить накладные расходы, связанные с переобучением специалистов.

Использование единого языка описания правил совместно с использованием единого счётного ядра *mnDRC* позволяет сформировать уникальный маршрут, заключающийся в передаче данных от одного модуля другому без использования промежуточной базы данных на жёстком диске, т.е. все данные хранятся только в оперативной памяти.

Такой подход позволяет сформировать файл правил, который будет на входе будет получать исходную топологию, а на выходе выдавать уже фрагментированные (Fractured) данные. При этом все этапы, включая OPC, будут произведены без создания промежуточной базы данных, что существенно ускоряет процесс.

Реализация правил коррекции эффекта оптической близости для типовых топологических ситуаций осуществляется с помощью скриптов на языке SVRF (*Standard Verification Rule Format* – стандартный формат проверки правил) – язык, операции и операторы которого используются для создания файлов, содержащих правила коррекции (SVRF Rule File).

Правила, формализованные в виде блоков внутри SVRF-файлов, представляют собой операции над слоями.

Функциональность этих операций заключается в выборе границ и/или полигонов (в соответствии с выполняемым правилом) и изменение их, реализуемое в виде параллельного сдвига, поворота, удлинения, утолщения границ, добавления дополнительных полигонов и проч.

Ко всем созданным таким образом элементам топологии и исходному топологическому слою применяется операция «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ», результатом которой является слой с проведенной OPC.

При проведении в дальнейшем повторной верификации этот слой будет выбран для моделирования контура.

После проведения OPC процедуру верификации необходимо повторить.

Этот процесс является итеративным. Применять процедуру сразу на всей библиотеке является неэффективной задачей.

Необходимо повторять цикл верификации-коррекции до тех пор пока не будут устранены все критические нарушения в пределах нескольких контрольных ячеек. После этого можно экстраполировать применение процедуры на всю библиотеку и анализировать топологические ситуации, которые не были скорректированы существующими правилами.

Выполнение коррекции

Сам процесс коррекции представляет собой запуск соответствующего модуля Calibre с указанием файла правил, в котором описаны правила ссылки на исходные данные: топологию, модели т.д. Процесс коррекции может быть распределён как на несколько процессоров многопроцессорного сервера, так и на несколько серверов в рамках локальной сети.

После выполнения OPC выполняется процесс дополнительной верификации скорректированных данных при помощи модуля OPCVerify, который моделирует скорректированную топологию и выполняет измерения. Важным преимуществом Calibre является возможность верификации фрагментированных данных с исходной топологией.

Запуск модулей возможен как в интерактивном режиме, т.е. через графический интерфейс, что актуально при отладке моделей и файлов правил, так и в пакетном режиме, т.е. без использования графического интерфейса, что актуально при практической работе с реальными проектами.

Обучение работе с различными модулями Calibre и последующие консультации возможны как с привлечением англоговорящих сотрудников *Mentor Graphics*, так и с привлечением российских специалистов- по выбору заказчика.

Модуль Calibre OPCpro выполняет коррекцию топологии на основе правил.

Точкой входа для Calibre OPCpro является Calibre DRC, т.е. командой для запуска будет *calibre -drc* ...

Технически Calibre OPCpro представляет собой набор команд серии LITHO.

Например, SVRF- файл, содержащий команды оптической коррекции модулем Calibre OPCpro, может выглядеть так:

```
LAYOUT SYSTEM GDS
LAYOUT PATH "gds/example.gds"
LAYOUT PRIMARY "*"
PRECISION 1000
DRC MAXIMUM RESULTS ALL
DRC SUMMARY REPORT "reports/example.rep"
DRC RESULTS DATABASE "gdsout/example_out.gds" GDS
LAYER POLY 4
MY_OPC {
LITHO OPC FILE "setup/setup.in" POLY
}
DRC CHECK MAP POLY 4
DRC CHECK MAP MY_OPC 104
```

В приведенном выше листинге “*setup.in*” – это конфигурационный файл для работы Calibre OPCpro, который может выглядеть так:

```
# ----- Simulation models -----
```

```
modelpath ./models
```

```
opticalmodel lab.opt
```

```
resistpolyfile lab.mod
```

```
# ----- OPC algorithm -----#
```

```
# Define parameters that control simulation and correction
```

```
iterations 4
```

```
tilemicrons 160.000000
```

```
stepsize 0.001
```

```
gridsize 0.001
```

```
siteinfo RESIST
```

```
cornerSiteStyle SITES_ON_ARC
```

```
lineEndAdjDist 0.190000
```

```
convexAdjDist 0.140000
```

```
concaveAdjDist 0.140000
```

```
# ----- Fragmentation -----#
```

```
# Define the process for breaking edges into fragments
```

```
minfeature 0.180000
```

```
minedgelength 0.130000
```

```
maxedgelength 1000.000000
```

```
cornedge 0.130000
```

```
concavecorn 0.130000
```

```
interfeature -interdistance 0.290000 -ripplelen 0.130000 -num 0
```

```
seriftype 0
```

```
minjog 0.120000
```

```
lineEndLength 0.320000
```

```
# ----- Layer info -----#
```

```
# Use the layer keyword to define the input layer.
```

```
background clear
```

```
# Layers
```

```
layer 4 POLY 17 0 opc dark
```

```
#-- Arbitrary Commands Can Follow This Line. Don't delete this line!--
```

```
sse OPC_MIN_INTERNAL .13
```

```
sse OPC_MIN_EXTERNAL .16
```

```
sse LITHO_NEW_OPC 1
```

Что происходит в процессе работы OРСpro?

1. Разбивка длинных граней на фрагменты
(Рисунок 2.9.).

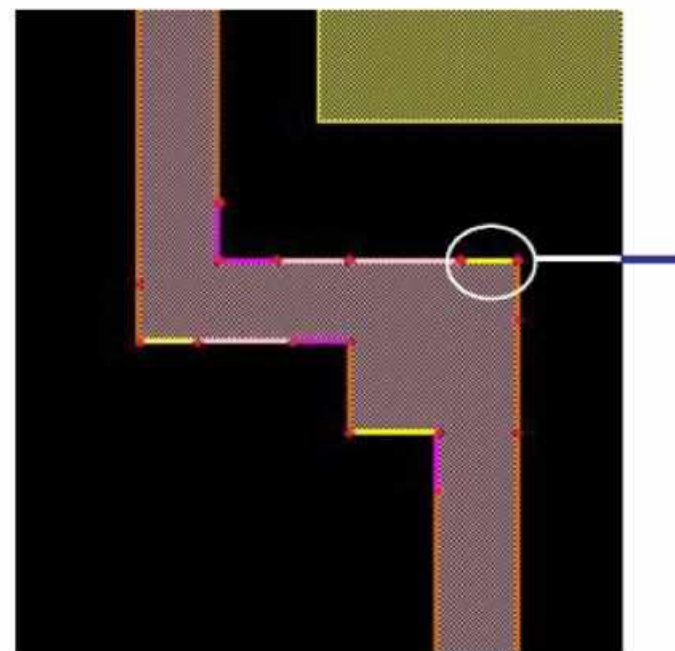


Рисунок 2.9 – Влияние разброса параметров технологического окна на пропечатаваемость элементов топологии

2. Моделирование изображения, получаемого на кристалле, и вычисление для каждого фрагмента так называемого EPE – Edge Placement Error, т.е. ошибки позиционирования грани (Рисунок 2.10).

Измерения происходят вдоль так называемых управляющих сайтов – Control Sites.

Для каждого фрагмента строится один сайт.

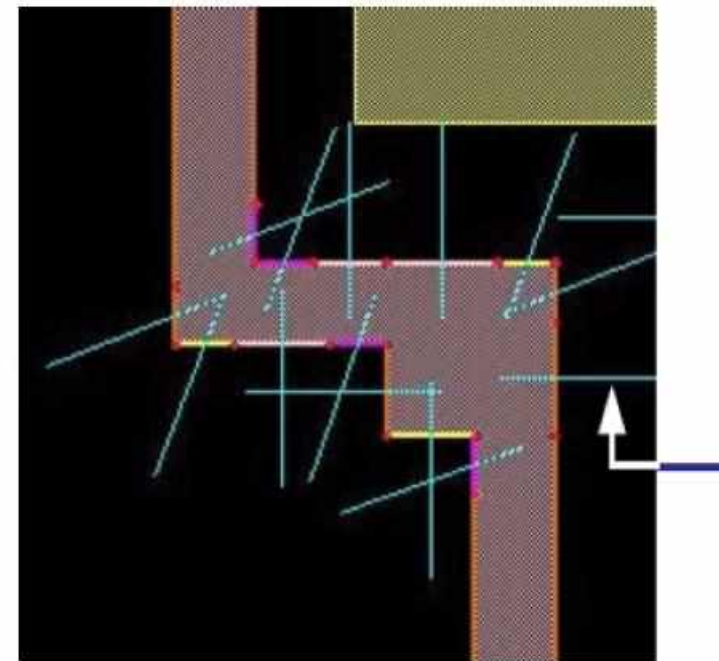


Рисунок 2.10 – Вычисление Edge Placement Error (EPE)

3. Каждый фрагмент перемещается на дистанцию, вычисляемую на основе рассчитанного ранее значения EPE (Рисунок 2.11.).

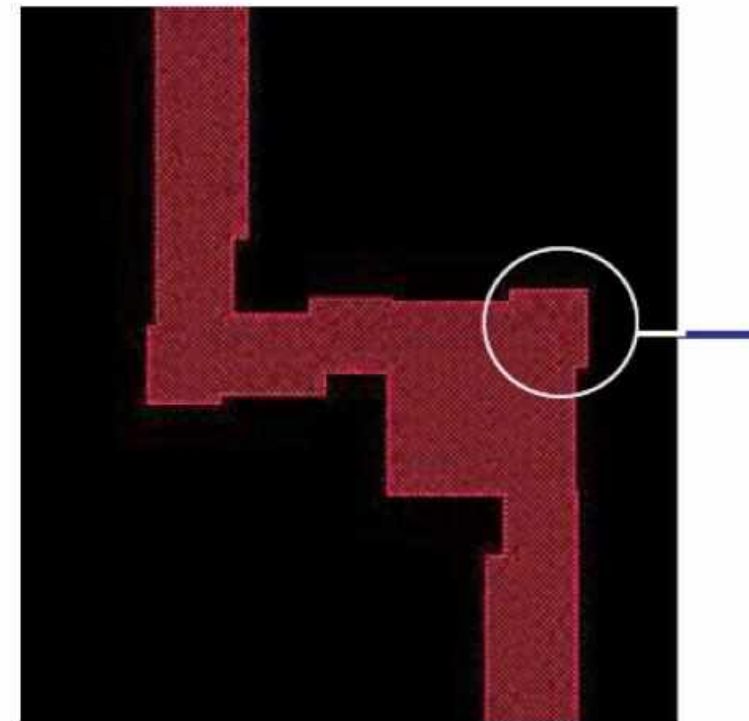


Рисунок 2.11 – Преобразованная топология с учетом EPE

4. Предыдущие операции повторяются до тех пор, пока результаты моделирования модифицированной формы не будут максимально приближаться к исходной, немодифицированной форме (Рисунок 2.12).

Стоит отметить, что в одном и том же скрипте можно сделать все необходимые операции для подготовки данных (включая все логические операции, припуски, фрагментацию и вывод данных в формате используемого технологического оборудования).

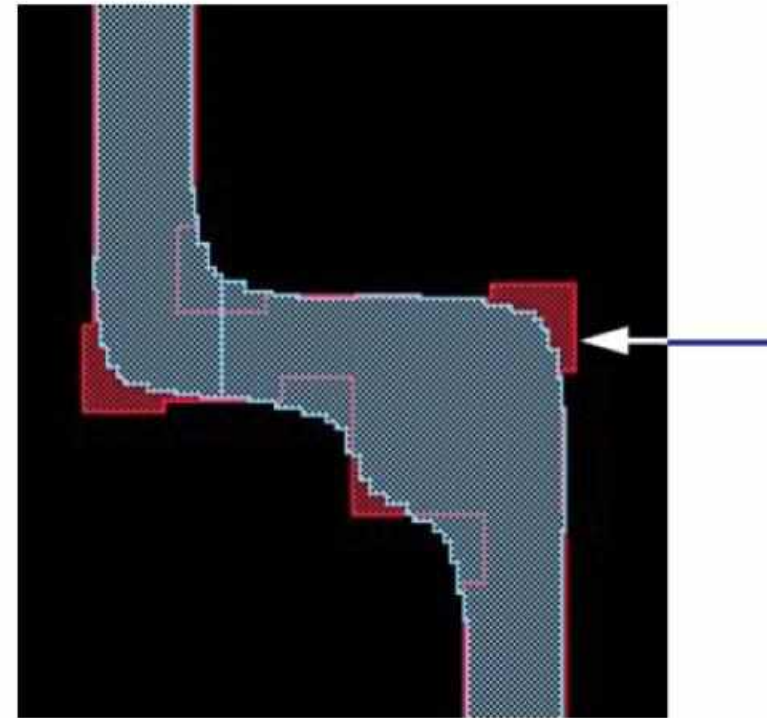


Рисунок 2.12 – Максимальное приближение к исходной топологии

Calibre nmOPC

Calibre OPC производит непосредственно оптическую коррекцию модифицируя формы полигонов так, чтобы уменьшить оптические искажения.

Модификации могут быть выполнены, как просто на основе правил корректировки, так и с использованием оптических моделей. Оптические модели формируются при помощи модуля Calibre WORKbench.

Отличие от модуля OPCpro заключается в том, что расчёт потенциально опасных мест осуществляется не на основе фрагментов, сайтов и EPE, а на основе промоделированного изображения (Рисунок 2.13).

При этом отпадает необходимость в сайтах и фрагментах, и при этом учитываются эффекты, возникающие в технологиях 65нм и ниже. Специально для модуля nmOPC для учёта новых особенностей, возникающих на технологиях 65нм и ниже, была разработана новая счётная модель Compact Model 1 – CM1, которая также используется и в модулях Calibre OPCverify и Calibre LFD9.

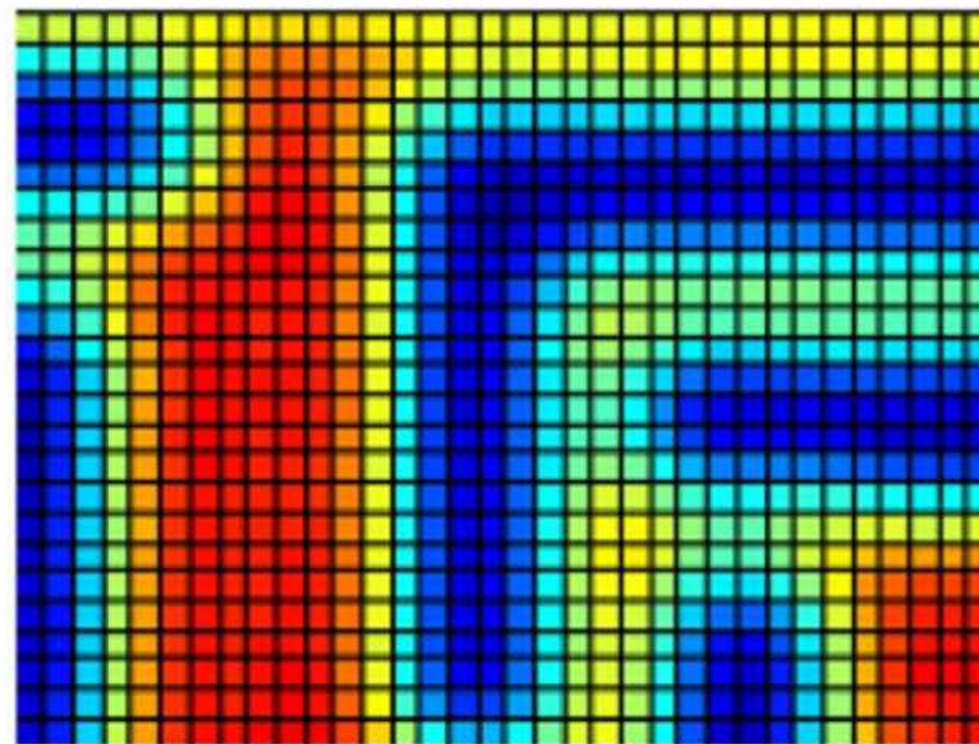


Рисунок 2.13 – Распределение моделирования плотности

2.4. Проведение анализа коррекции оптических эффектов близости

Напомним, что коррекцией эффекта оптической близости (OPC) называется комплекс методов повышения разрешающей способности литографии путем коррекции топологии СБИС на стадии проектирования фотошаблона.

Как правило, различают два метода OPC:

- основанный на правилах модификации топологического слоя (Rule-Based OPC);
- основанный на литографическом моделировании топологического слоя (Model-Based OPC).

Названные методы OPC представлены на Рисунке 2.14.

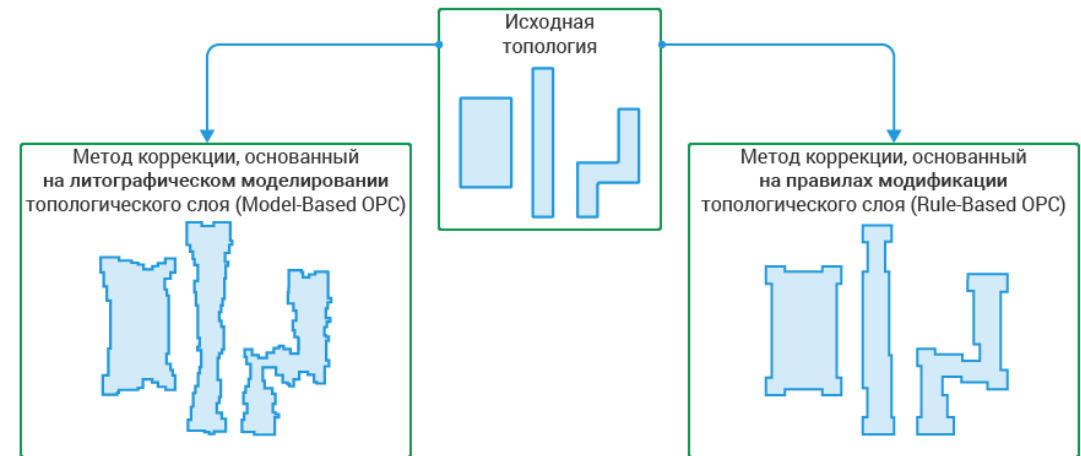


Рисунок 2.14 – Методы коррекции эффектов оптической близости

При использовании *Rule-Based OPC* необходимо выделить определенные топологические конфигурации. Например, внутренние или внешние угловые элементы, параллельно расположенные проводящие линии, окончание проводящих линий и т.д. Далее проводится обобщение и типизация описания этих конфигураций, для того чтобы стало возможным сформулировать правила.

Правило коррекции представляет собой описание топологической конфигурации, требующей коррекции, и, собственно, описание проведения коррекции. При появлении какой-либо ранее не определенной ситуации необходимо дополнить ранее существовавшие правила новым.

Однако в этом и заключается главный недостаток метода *Rule-Based OPC*, поскольку с ростом точности проводимой OPC количество правил коррекции резко возрастает. Из-за того что параметры коррекции различных топологических структур требуют экспериментальной проверки, затрачиваемые усилия и средства также растут слишком быстро даже при небольшом увеличении точности OPC.

По этим причинам метод *Rule-Based OPC*, как правило, не применяется на производствах СБИС с минимальной проектной нормой менее 90 нм.

В методе *Model-Based OPC* взамен экспериментально полученных правил коррекции используется откалиброванная по экспериментальным данным модель литографического процесса.

Топологический слой в этом случае представляется набором полигонов. Их границы итеративно сдвигаются до тех пор, пока промоделированный рисунок маски фоторезиста не достигнет исходной топологии с требуемой точностью.

Для корректной работы методу MBOPC требуется всего лишь несколько правил проверки. Поэтому к нему предъявляют, в основном, два требования: высокой точности и высокой скорости обработки топологического слоя работы в совокупности с возможностью реализации многопоточных вычислений.

Применение MBOPC позволяет существенно расширить возможности литографического процесса, однако требует наличия специальных дорогостоящих САПР и вычислительных кластерных комплексов.

Независимо от методов коррекции, в технологии OPC выделяют три вида фигур коррекции (Рисунок 2.15):

- изменение номинального размера на фотошаблоне на величины, определяемые технологическим уходом при проведении операций фотолитографии и травления (bias);
- введение дополнительных линий (assist line или auxiliary);
- введение дополнительных фигур (serif, anti serif, barrel, hammerhead).

Рассмотрим принципы действия всех вышеперечисленных фигур коррекции.

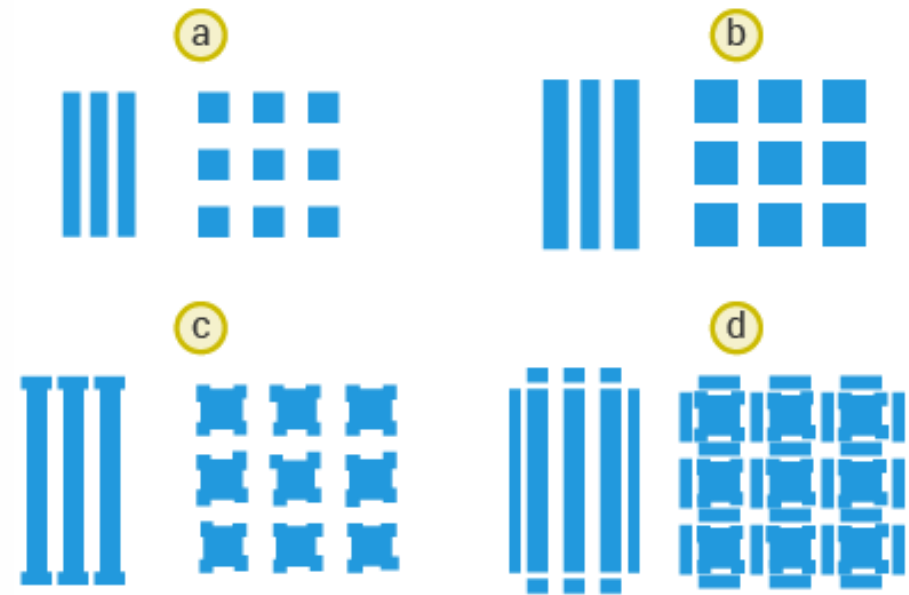


Рисунок 2.15 – Варианты коррекции оптического эффекта близости.
(a) – без OPC; (b) – простое OPC (коррекция размеров элементов);
(c) – умеренное OPC (введение дополнительных линий);
(d) – агрессивное OPC (введение дополнительных фигур)

Анализ уходов размеров элементов (как одиночных, так и в массиве) в процессе производства (bias) позволяет сделать вывод о том, каким должен быть номинальный размер проводника на фотошаблоне, чтобы на пластине получился заданный по ТЗ номинальный размер.

Дополнительные вспомогательные линии (Assist line) вводят, чтобы создать эффект плотно упакованных структур для одиночного элемента. Различия в проработке одиночных и плотно упакованных проводников возникают в результате дифракции лучей света на соседних проводниках, в результате этого плотно упакованные структуры засвечиваются большей дозой.

Дополнительные линии имеют размер $1/2-1/3$ от проектной нормы. За счет этого эти линии не прорабатываются на пластине, но дифракция лучей света на них все же происходит, в результате на пластине получается одиночный проводник, имеющий размерные характеристики плотно упакованного.

Calibre OPCverify: верификация результатов OPC

Для проверки результатов проведённой оптической коррекции предназначен модуль Calibre OPCverify, который моделирует изображение, получаемое от скорректированной маски и проверяет на соответствие допускам. Например, команды для проведения пост OPC-верификации при помощи Calibre OPCverify могут выглядеть так, как изображено на Рисунке 2.16.

Технически, запуск модуля Calibre OPCverify выполняется через DRC, т.е. команда для запуска будет начинаться с `calibre -drc ...`. OPCverify для своей работы использует оптические модели, в приведённом выше примере командного файла они подключаются командой `optical_model_load`.

Модуль Calibre OPCverify может быть запущен как в пакетном режиме, так и через центр верификации (Verification Center) программы Calibre WORKbench.

```
modelpath          $envy(DESIGN_DIR)/models
optical_model_load  o1 DUV10tab
optical_model_load  o2 DUV10tab_plus1

background clear
layer POLY visible dark
layer TEST hidden  dark

imagegrid .04
stairstep 1
#setlayer commands below this line

setlayer ti0 = build_tolerance inner POLY max .16 stepsize .01
setlayer ti = cornerchop ti0 .03 .03
setlayer to0 = build_tolerance outer POLY max .16 stepsize .01
setlayer to = cornerchop to0 .03 .03

setlayer i1 = image optical o1 aerial_contour 0.3
setlayer i2 = image optical o2 aerial_contour 0.3

setlayer b1 = bridge_tolerance i1 ti
setlayer b2 = bridge_tolerance i2 to
```

Optical Model Input

Layer setup

These **setlayer** commands create OPCverify "context" layers for later use.

Рисунок 2.16 – Команды для проведения пост OPC верификации при помощи Calibre OPCverify

Calibre LFD: конечная верификация

Calibre LFD является средством конечной верификации, которое позволяет решить проблему зависимости проекта от вариации процесса фотолитографии (Рисунок 2.17).

Стандартный подход, основанный на DRC, подразумевает, что для уменьшения влияния вариаций параметров на всё более совершенные технологические нормы, требуется разработка всё более больших и сложных файлов правил.

Но всё большие доработки и ужесточения правил не позволяют увидеть целостную картину, которая требуется для учёта взаимного влияния соседних элементов и позволяет учитывать последующее применение модулей RET.

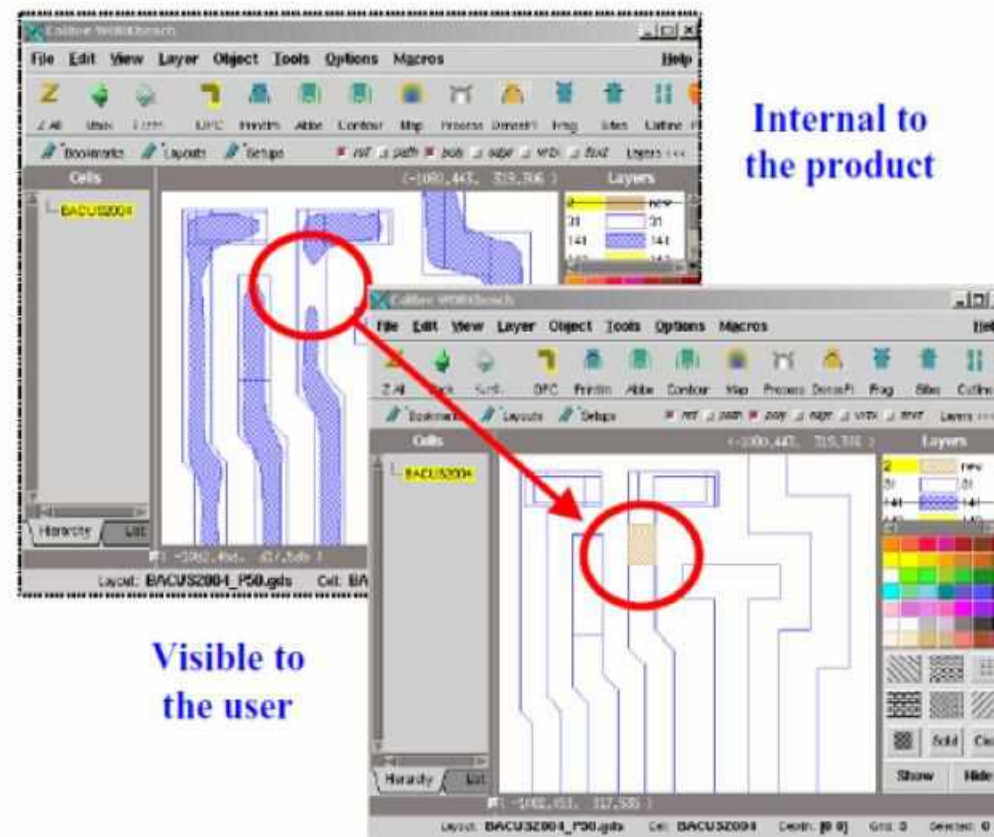


Рисунок 2.17 – Проблемное место, выявленное в результате работы модуля Calibre LFD Checks

LFD характеризует вариацию процесса в зависимости от конкретного проекта. Используя моделирование на основе оптических моделей, LFD создаёт новые элементы PV-bands, что в английском варианте расшифровывается, как process variability bands, что можно примерно перевести как полоса пропускания технологического процесса.

Технически PV-bands создаются моделями RET/OPC, используя последовательность условий процесса (sequence of process conditions). PV-bands показывают насколько сильно и где проявляется влияние разброса параметров технологического процесса.

Результатом работы элемента LFD Checks является то, что пользователь может увидеть проблемное место (Рисунок 2.18).

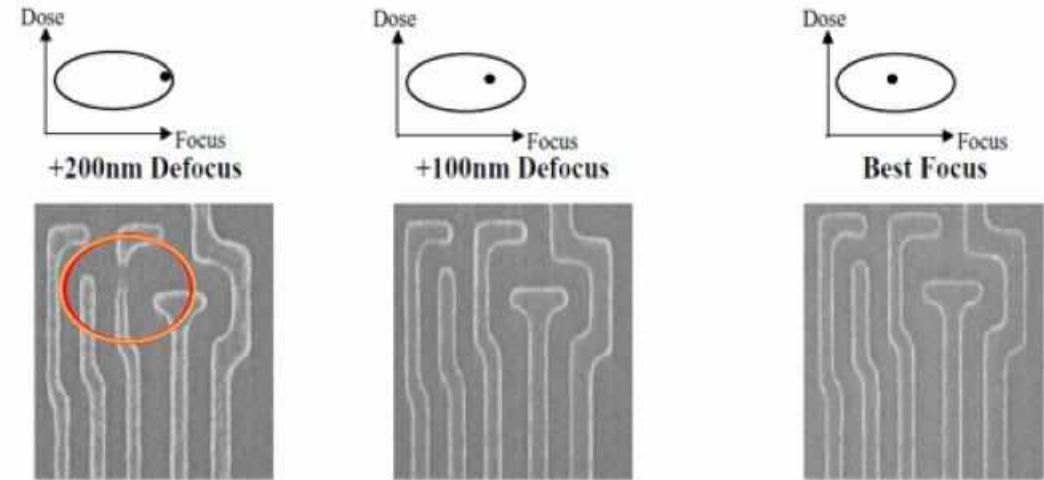


Рисунок 2.18 – Влияние разброса параметров технологического окна на печатаемость элементов топологии

2.5. Определение параметров коррекции эффектов оптической близости для формирования технологического рисунка на фотошаблоне

Выполнение оптической коррекции OPC возможно в одном из двух режимах.

1) *Коррекция на основе правил.* В этом режиме при помощи SVRF- команд формируются правила, которыми выявляются участки топологии, требующие коррекции, и в зависимости от категории найденного участка этими же правилами описывается, как должна производиться коррекция. Существуют различные типы коррекции. Например, на Рисунке 2.19 показано добавление элементов Bias, Serif, Hammerhead.

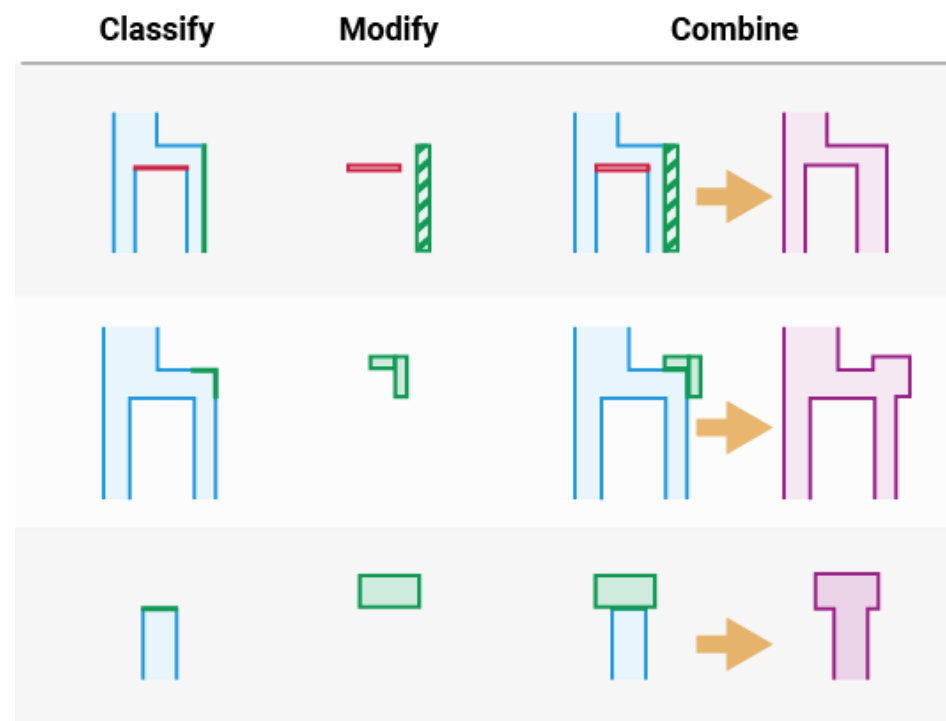


Рисунок 2.19 – Добавление элементов Bias (вверху), Serif (в центре), Hammerhead (внизу)

2) *Коррекция на основе оптических моделей.*

Оптические модели моделируют распространения света от источника и в качестве результата выдают изображение того, как в процессе экспонирования топология будет проецироваться на кремний.

Для выполнения коррекции на основе моделей перед началом непосредственно коррекции требуется создать эти модели.

Под словом «создать» подразумевается не написание математических формул, а выбор готового счётного ядра и его параметризация.

Calibre поддерживает два основных типа моделей: TCCcalc (совместно с rapidTCC) и SPLAT.

Принципиальное отличие заключается в том, что модели типа SPLAT моделируют поведение света только в воздухе, без учёта характеристик фоторезиста.

TCCcalc совместно с rapidTCC моделируют ещё и распространение света в фоторезисте, учитывая такие эффекты, как отражение, рассеивание, преломление и т.д.

Calibre поддерживает следующий набор моделей: CTR, VTR, VTRE и VT5.

Несмотря на то, что модели типа TCCcalc являются более точными, они же являются и более быстрыми по сравнению со SPLAT.

Подготовка моделей

Создание моделей происходит в четыре шага:

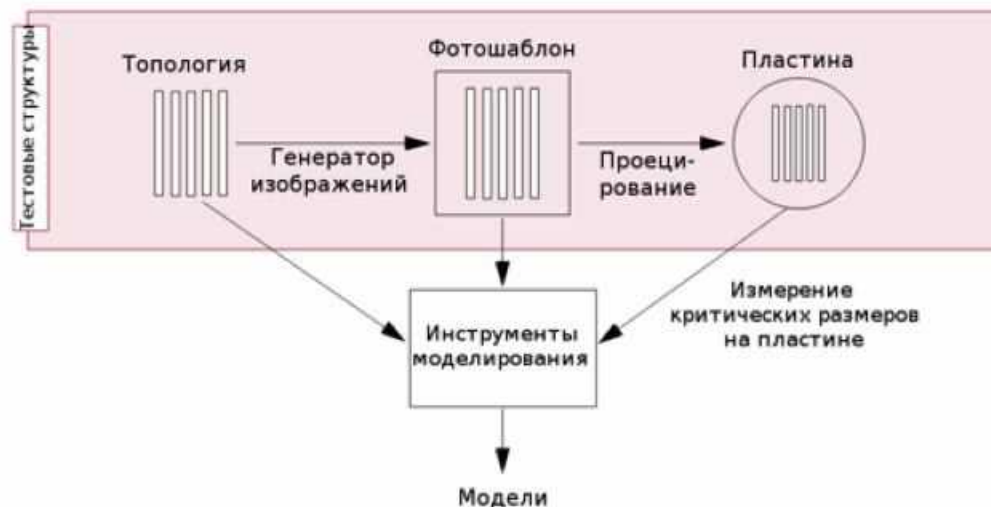
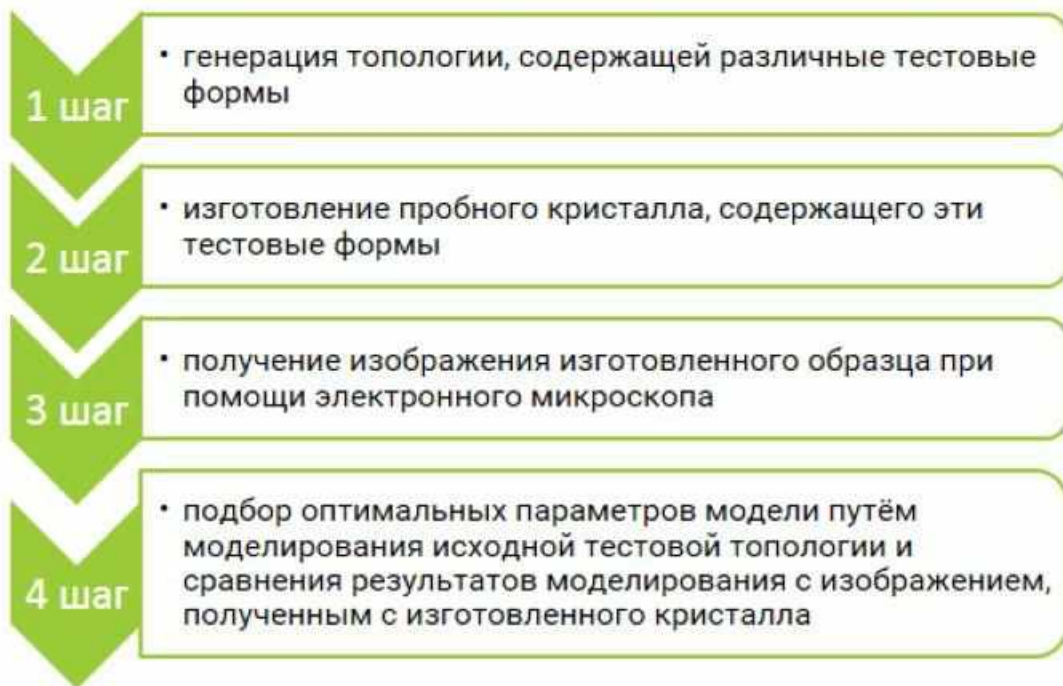


Рисунок 2.20 – Процесс формирования корректирующей модели на основании измерений критических размеров на предварительно изготовленном фотошаблоне

Для генерации топологии с тестовыми формами в Calibre WORKbench присутствует меню *Tools > Test Pattern*.

Данная команда после задания различных параметров, таких, как критические размеры – CD, шаг сетки, имён файлов и слоёв и т.д., автоматически генерирует типовой набор форм для тестирования.

После генерации GDSII или OASIS- файла он автоматически открывается в топологическом редакторе Calibre WORKbench (Рисунок 2.21).

Созданный файл пригоден для произвольного редактирования, поэтому состав и количество тестовых форм может быть произвольно изменено.

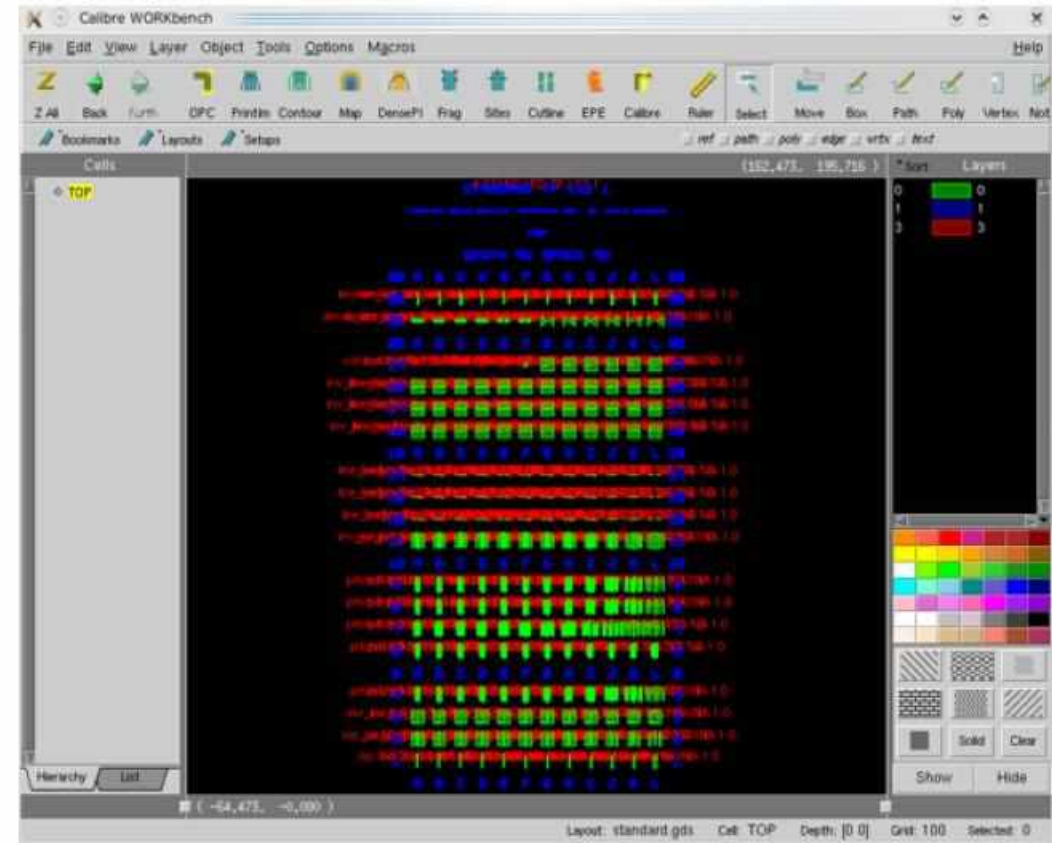


Рисунок 2.21 – Тестовые структуры в Calibre WORKbench

После проведения сканирования электронным микроскопом необходимо выполнить ряд автоматизированных измерений.

Для их проведения необходимо подготовить специализированные файлы, подающиеся на вход электронного микроскопа.

Так как процесс подготовки такого файла даже для одной тестовой формы является очень трудоёмким, а при калибровке оптической модели требуется проводить измерения большого количества тестовых форм, то возникает необходимость автоматизации этого процесса.

Calibre позволяет автоматизировать процесс подготовки файлов управления измерениями. Поддерживаются наиболее распространённые форматы: DBM (AMAT) и Hitachi.

Для решения данной задачи используется модуль Calibre Metro Link.

После получения изображения с электронного микроскопа его необходимо подгрузить в Calibre WORKbench и подготовить к работе. Для этого используются инструменты, запускаемые из меню Tools > SEMoverlay и Tools > SEMcal. При этом отсканированное, далее - эталонное изображение будет фоном по отношению к изображению топологии.

Далее, при помощи кнопок на панели инструментов или меню выполняются различные модификации и/или, построение промоделированного изображения, которое при помощи соответствующих инструментов сравнивается с эталонным. Если различия являются неприемлемо большими, то выполняется ручная модификация параметров модели, после чего моделирование повторяется.

Для создания файла с описанием параметров модели в Calibre WORKbench предусмотрены несколько различных диалоговых окон, содержимое которых зависит от выбранной степени детализации модели. Все эти окна вызываются из меню Tools. Например: Optical Model, Model Flow, Model Center, CM1 Center.