

# Модуль 3

---

НАСТРОЙКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ

## Содержание модуля 3

3.1. Проведение верификации полученной топологии кристалла СБИС

3.2. Проведение анализа и выбор способов коррекции оптических искажений при проектировании фотошаблонов

3.3. Подбор совокупности параметров настройки математической модели литографического процесса для проведения коррекции оптических эффектов близости

### 3.1. Проведение верификации полученной топологии кристалла СБИС

Верификация полученной топологии – это автоматизированное (реже – ручное или полуавтоматизированное) сравнение промоделированного контура (сечение маскирующего слоя вдоль поверхности пластины на некотором заданном расстоянии от нее) с исходным топологическим рисунком (Рисунок 3.1).

Цель верификации заключается в выявлении на этапе проектирования фотошаблона топологических ситуаций, которые могут привести к дефектам при изготовлении СБИС.

Дефекты зачастую являются следствием искажений контура топологических структур. Искажения возникают, как правило, в результате действия эффектов оптической близости.

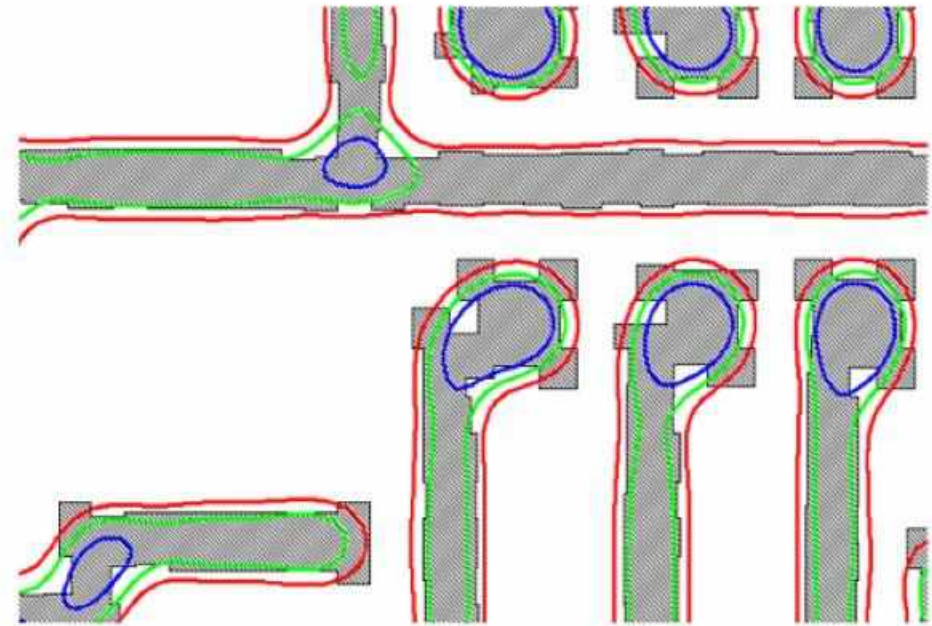


Рисунок 3.1 – Контурные различных режимов моделирования, наложенные на изображение фрагмента топологии на кристалле

Наиболее часто имеют место искажения, представленные на Рисунках 3.2 – 3.8. Искажения проранжированы по степени важности от самого критичного (1) до незначительного (4) влияния.

Все приведенные искажения встречаются при визуальном анализе промоделированного контура топологического слоя первого уровня металлизации. Кроме того, все прочие искажения могут быть описаны как комбинация уже рассмотренных, более простых.

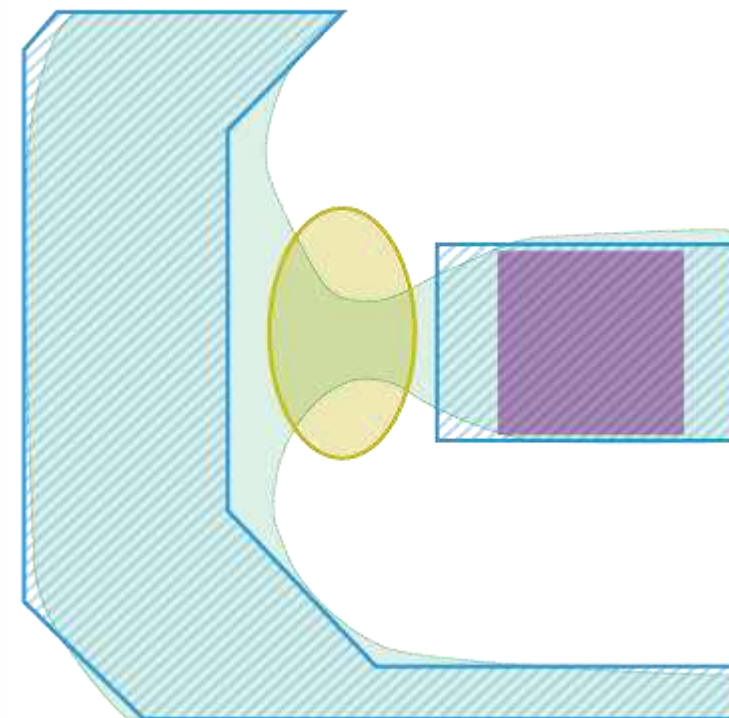


Рисунок 3.2 – Замыкание цепи (hard bridge). Уровень критичности: 1



Каждый вид искажений в разной степени влияет на общую нестабильность.

Очевидно, что явные замыкания, разрывы цепи, непропечатавшиеся фрагменты – оказывают самое негативное влияние и приводят к неработоспособности всей схемы.

Следующими по степени опасности являются дефекты, связанные с разрушением межслойных связей, с потерей контакта между слоями первого уровня металлизации и поликремния. Это также может привести к полной неработоспособности устройства.

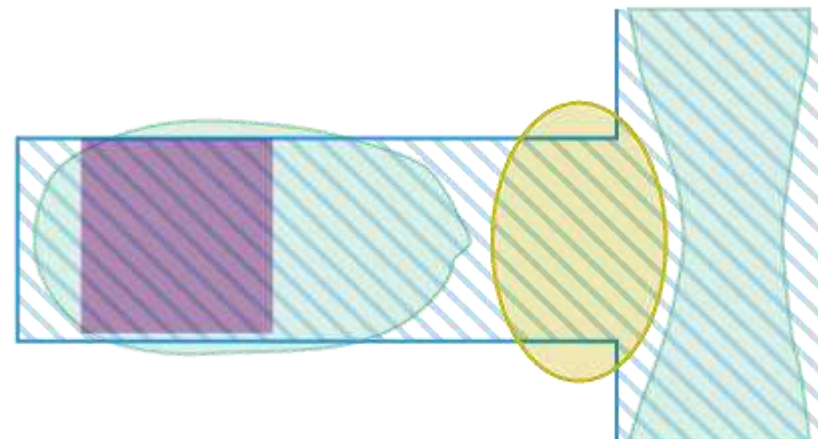


Рисунок 3.3 – Разрыв цепи (hard pinch). Уровень критичности: 1

Потеря контакта происходит в основном за счет рассовмещения между слоями или в случае сокращения линии, на конце которой располагался контакт.

Возможные места замыканий и разрывов служат еще менее критичным искажением, в связи с тем, что далеко не каждое из этих искажений действительно приведет к реальному замыканию или разрыву. Однако искажения все равно требуют контроля.

Замыкания происходят, в основном, вследствие близкого расположения проводников. Заужения характерны для средней части длинных прямых проводящих линий в отсутствии других близко расположенных элементов топологии.

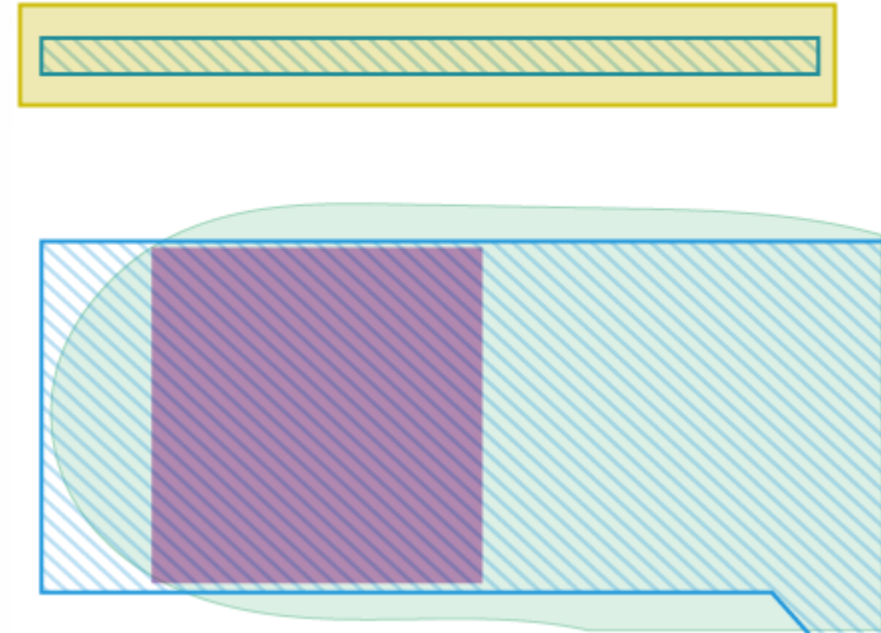


Рисунок 3.4 – Непропечатавшиеся фрагменты топологического рисунка (fail print). Уровень критичности: 1

Самый низкий ранг влияния на работоспособность конечной схемы оказывает ошибка размещения границы.

В малых пределах изменение толщины проводника приводит лишь к изменениям RC-параметров схемы, что в свою очередь может привести к увеличению продолжительности фронтов сигналов, и, как следствие, к так называемой «гонке сигналов».

При больших значениях ошибки размещения границы это искажение вырождается в возможное замыкание или возможный разрыв контактной цепи.

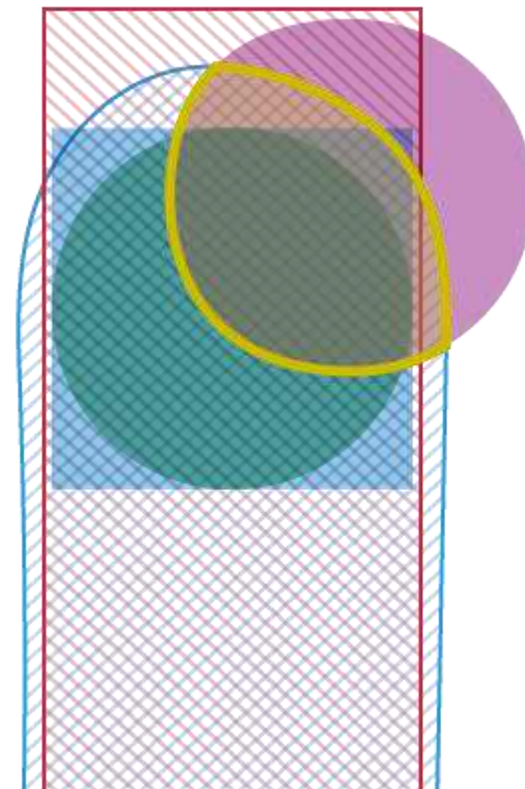


Рисунок 3.5 – Недостаточное перекрытие слоя контактов шиной металлизации (insufficient contact overlay). Уровень критичности: 2



Реализовать процедуру автоматизированной верификации в рамках используемого программного обеспечения возможно в виде скриптов – как правило, большинство специализированных САПР имеют данную возможность. Среди таких САПР наиболее известные САПР – компаний Synopsys, Mentor Graphics, Cadence Design Systems.

Для формирования скриптов необходим набор технологических правил, составленный на основе экспериментальных данных, показывающих недопустимые отклонения параметров от требуемых, а также на основе данных по калибровке модели, зависимости критических размеров от величины шага и т.д.

В дальнейшем этот набор правил формализуется с помощью специального языка программирования. В зависимости от используемой САПР для проведения OPC этот язык может быть различным.

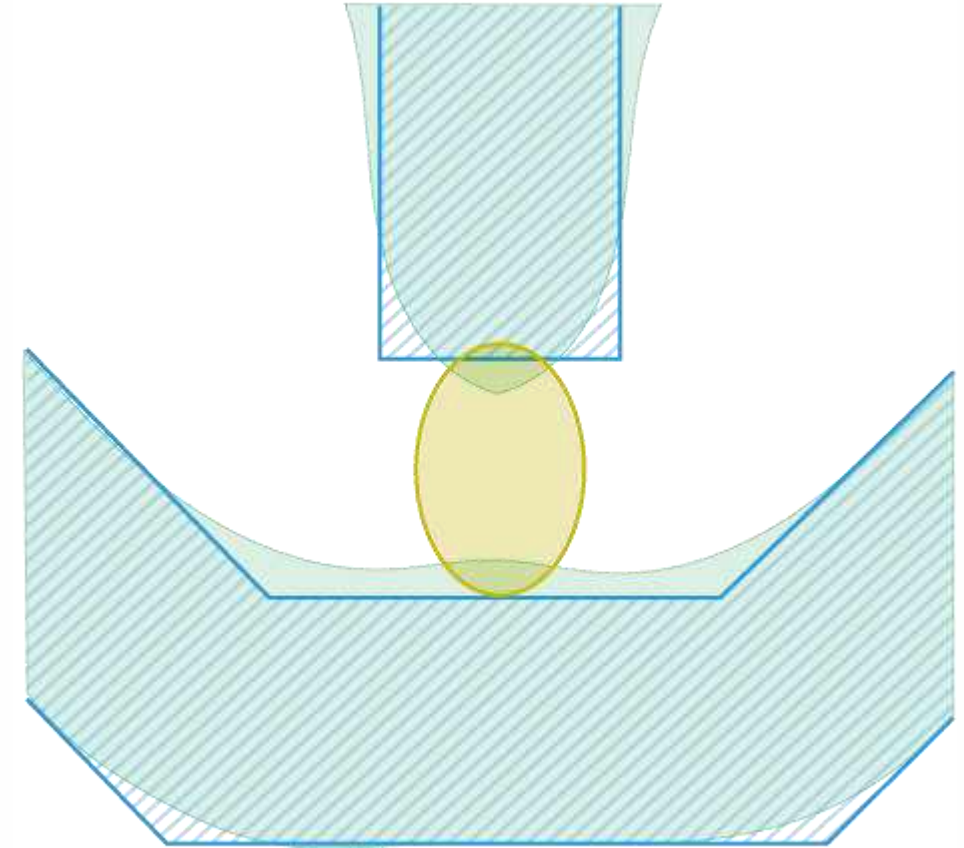


Рисунок 3.6 – Заужение зазора между проводниками, место потенциального замыкания (soft bridge). Уровень критичности: 3





Рисунок 3.7 – Заужение проводника, место потенциального разрыва цепи (soft pinch). Уровень критичности: 3

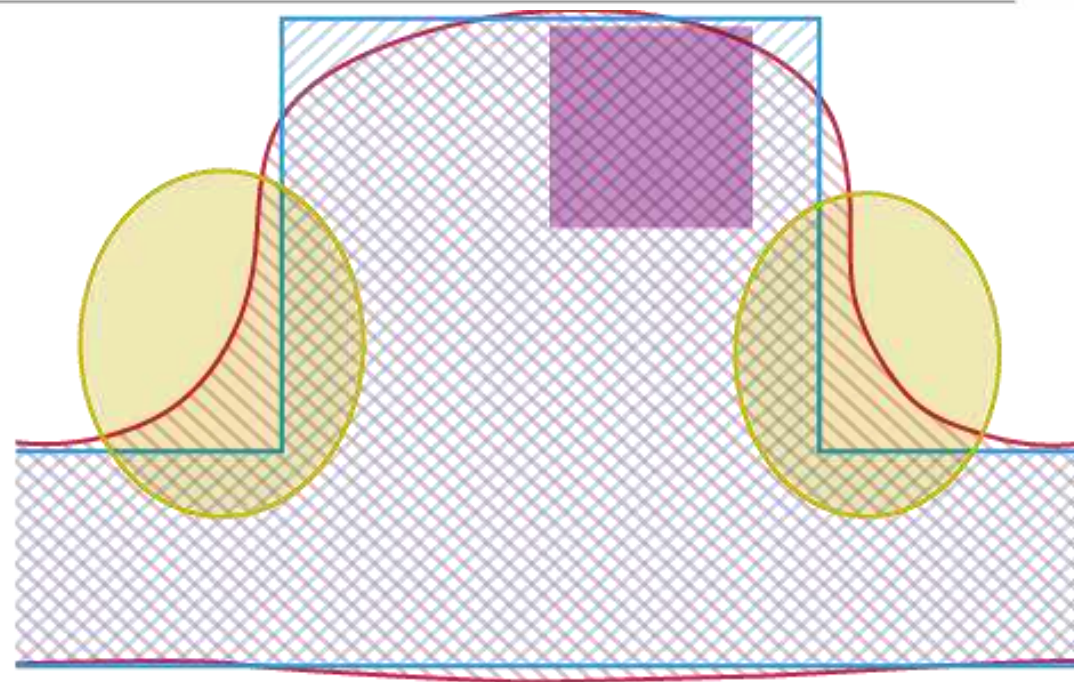


Рисунок 3.8 – Ошибка размещения границы, отличие полученного контура от исходного топологического рисунка (Edge Placement Error). Уровень критичности: 4

## 3.2. Проведение анализа и выбор способов коррекции оптических искажений при проектировании фотошаблонов

Для проведения ОРС необходимо вначале определить набор правил, согласно которым будет проводиться коррекция.

Обобщенно правило представляет собой ответы на вопросы «что и как корректировать?»

То, что корректировать, определяется с помощью проведенной ранее верификации.

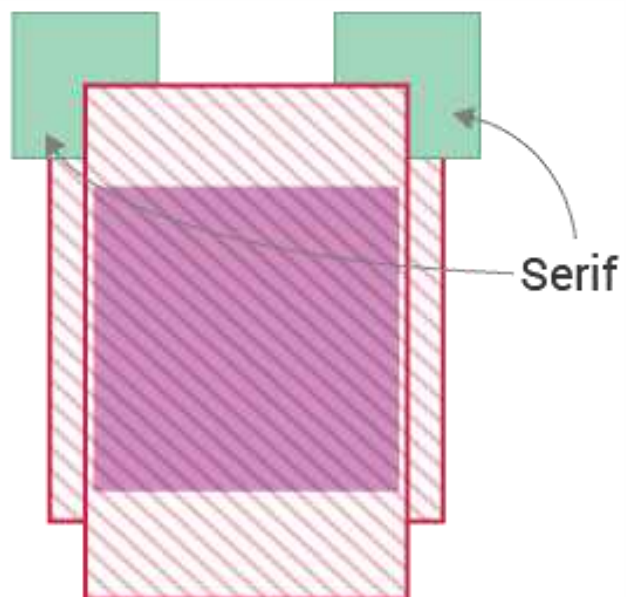
То, как корректировать, определяется путем подбора параметров фигур коррекции, с целью достижения наилучшего совпадения промоделированного контура с рисунком исходной топологии.

Все элементы коррекции можно разбить на две больших группы: **позитивные** и **негативные**.

Под позитивными будем понимать элементы, которые добавляют многоугольники к исходному топологическому рисунку, а следовательно под негативными будем понимать те, которые вычитают многоугольники из исходного топологического рисунка.

На Рисунке 3.9 представлены типовые элементы коррекции.

Serif – позитивный компенсирующий элемент, используемый на внешних угловых элементах топологического рисунка. Как правило, имеет прямоугольную форму, но может иметь форму, повторяющую конфигурацию угла.



Antiserif (mousebit) – негативный компенсирующий элемент, используемый на внутренних угловых элементах топологического рисунка. Как правило, имеет прямоугольную форму, но может иметь форму, повторяющую конфигурацию угла. Является обратным элементу Serif

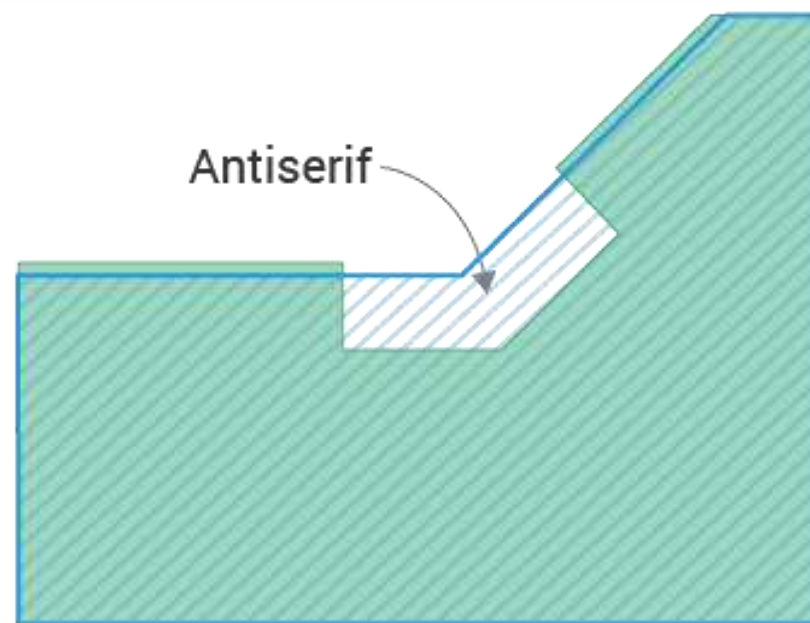
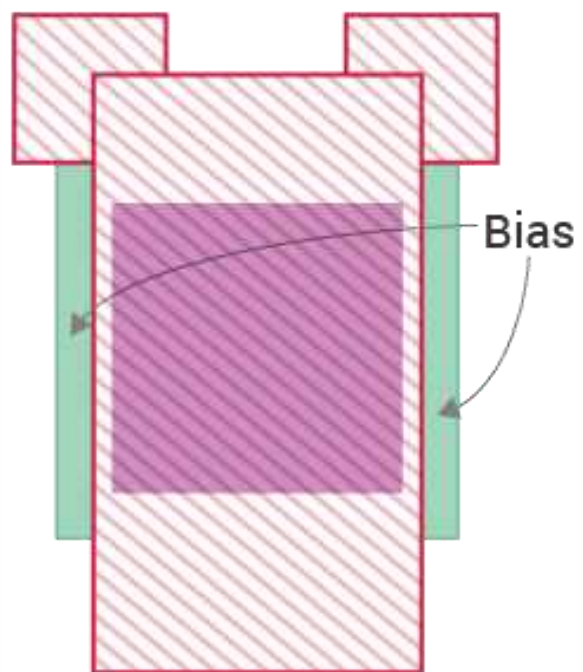


Рисунок 3.9 – типовые элементы коррекции



Bias – позитивный компенсирующий элемент, представляющий собой утолщение многоугольника на протяжении всей его грани либо только какой-либо определенной ее части



Antibias – негативный компенсирующий элемент, представляющий собой заужение многоугольника на протяжении всей его грани либо только какой-либо определенной ее части

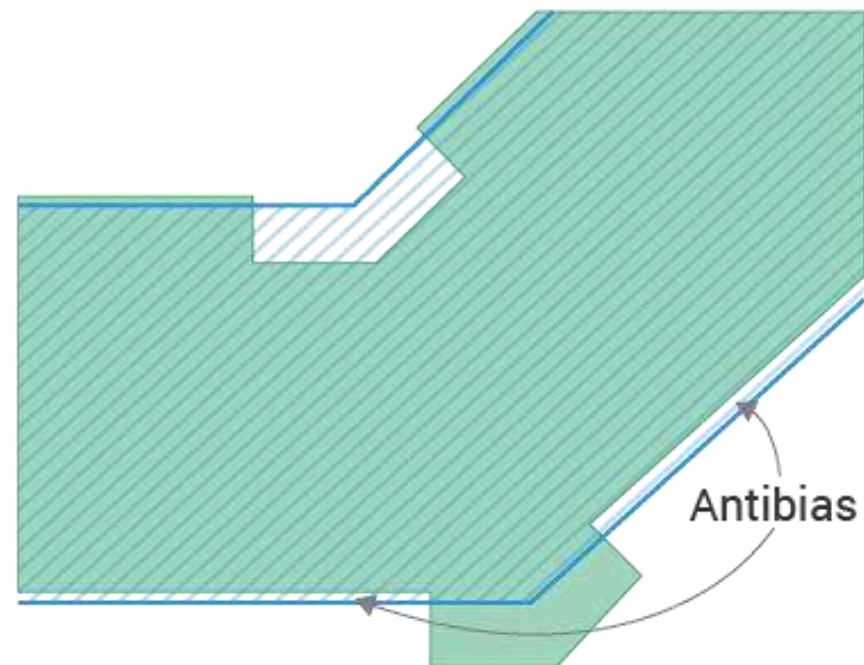


Рисунок 3.9 – Типовые элементы коррекции (продолжение)



Разработчики управляющей информации для изготовления фотошаблонов должны провести анализ предоставленной топологии для определения необходимости проведения коррекции оптических искажений и выбора методов коррекции.

Рассмотрим последовательность операций при проведении анализа средствами САПР *Synopsys CATS*.

*Synopsys CATS* предназначено для просмотра больших файлов с описанием топологии, проведения различных измерений, просмотра с наложением одних фрагментов топологии на другие, проведения фрагментации (fracture) топологии, а также выполнения коррекции эффектов оптической близости. Рисунок 3.10. показывает основной графический интерфейс программы *CATS*.

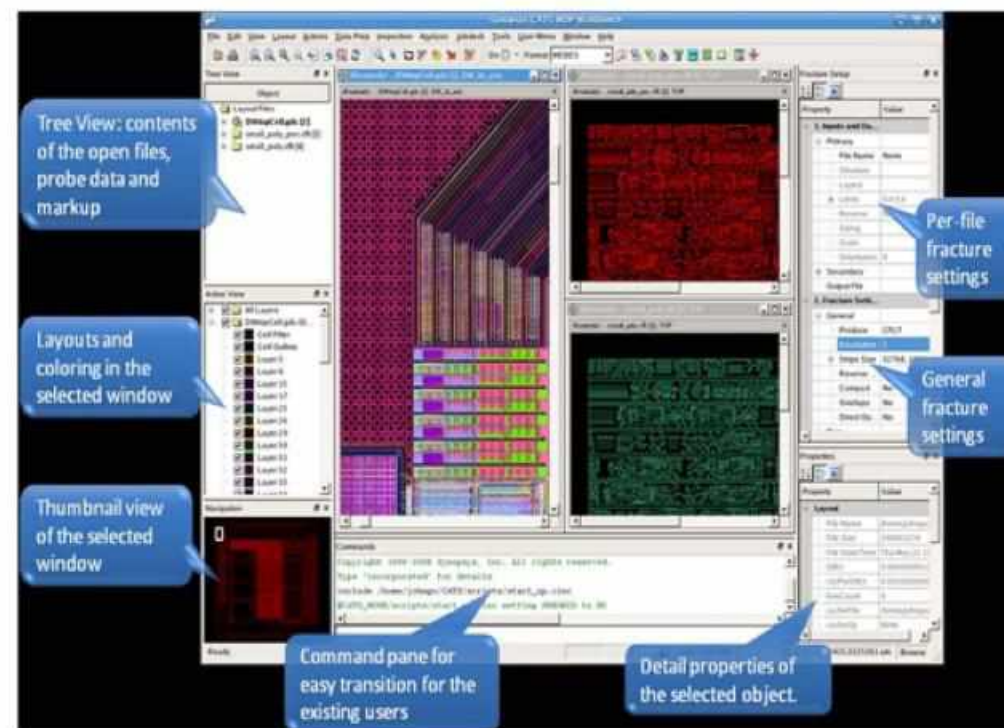


Рисунок 3.10 – Основной графический интерфейс программы CATS

---

## Манипуляция с данными

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.

***Sizing*** – задание припусков. 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.

***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 окне *Fracture*.

Логические операции используются при слиянии слоев, частей рисунка или двух файлов.

Булевы операции таковы:

- при использовании функции *OR* слияние происходит без вырезания фрагментов фигур;
- при использовании функции *XOR* слияние происходит с вырезом тех фрагментов, где фигуры совпадают;
- функция *MINUS* используется в случаях, когда из одного рисунка нужно вырезать совпадающие фрагменты фигур другого рисунка;
- функция *AND* — в конечном итоге получаем только тот рисунок, где фрагменты фигур совпадали на обоих рисунках.



---

## Выборочная обработка данных

При подготовки данных иногда требуется выполнение операции разбиения или измерение размера выборочного участка рисунка проекта. Определенные команды *CATS* позволяют выборочную обработку данных.

Чтобы произвести разбиение входного файла в определенном участке, можно воспользоваться командой *LIMITS* или *CLIP*.

Также можно воспользоваться командой *PRUNE*, чтобы игнорировать определенную структуру или несколько структур при обработке и отображении.

Команда *SELECT* может использоваться для выборной обработки данных, создания баркода, текстовой маркировки и т.д.

Также *CATS* обладает 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).



Для визуального контроля используется программный модуль *ICWorkBench Plus (ICWB+)*, который имеет функциональные возможности для визуализации иерархической топологии, анализа и редактирования файлов в форматах *GDS* и *OASIS*.

Главное окно *ICWB+* показано на Рисунке 3.11. Оно содержит окна для просмотра топологии и навигации по ней, а также различные меню.

Вдобавок, на одной картинке можно совмещать различные технологические слои (без слияния соответствующих файлов).

При помощи данного модуля также можно производить высокоскоростное моделирование процесса фотолитографии и отладки сценариев работы с ПО *Synopsys Proteus*.

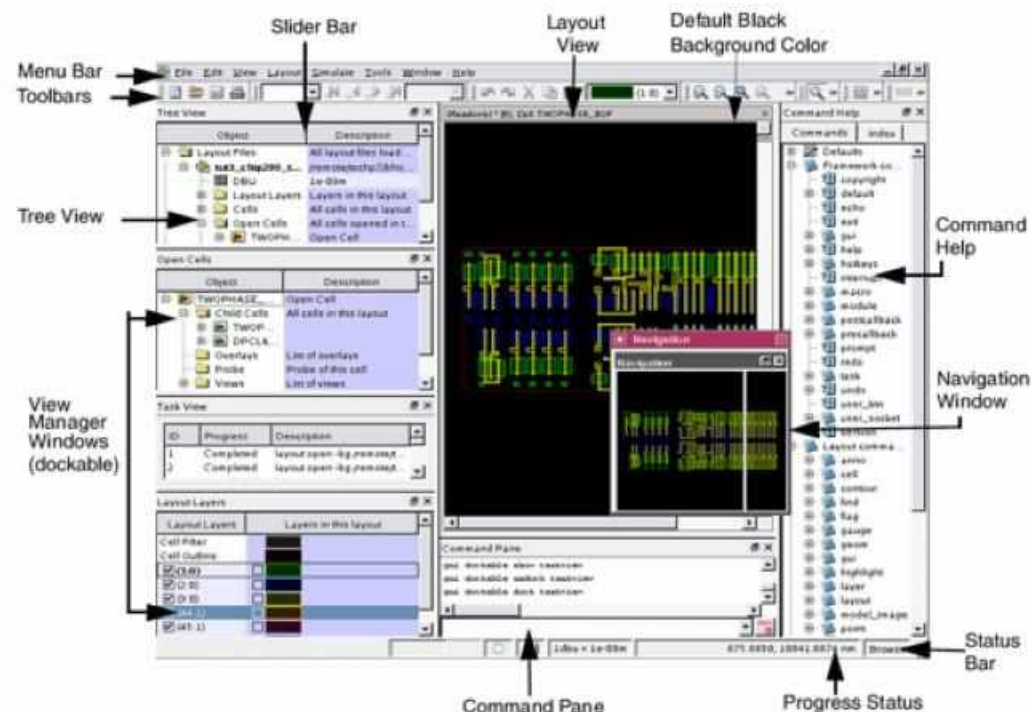


Рисунок 3.11 – Главное окно программы *ICWB+*

На Рисунке 3.12 показан увеличенный фрагмент топологии. Разными цветами показаны слои проекта.

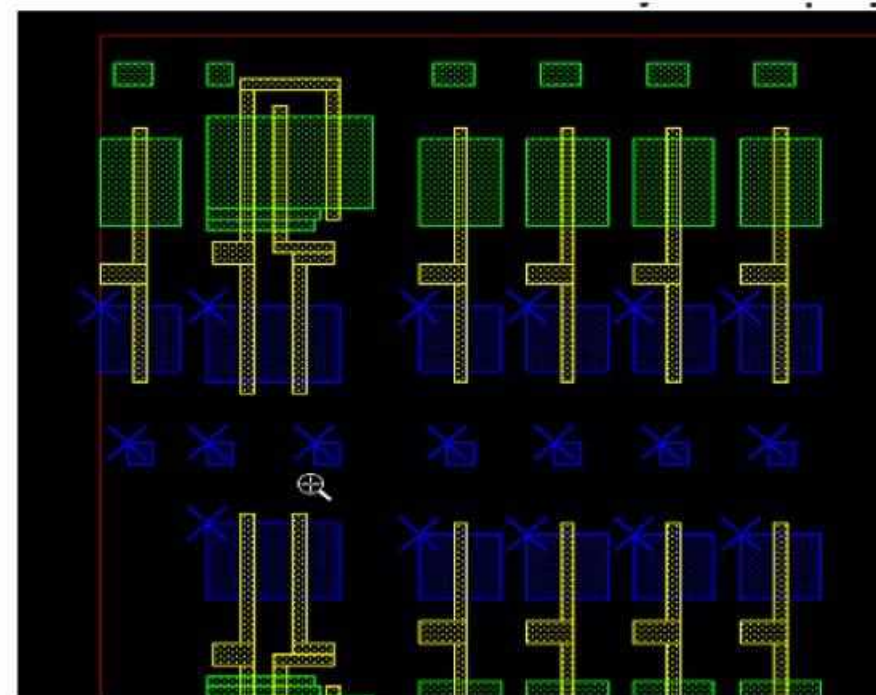


Рисунок 3.12 – Фрагмент топологии при увеличении

На Рисунке 3.13. проиллюстрировано выполнение измерений некоторых размеров на фрагменте топологии.

Если результаты измерений не соответствуют регламентированным правилам для данного технологического уровня и правилам изготовления, принимается решение об использовании методов OPC.

Если результаты моделирования покажут, что применение OPC все равно не даст положительного эффекта (схема с высокой вероятностью окажется неработоспособной), то проект отправляется заказчику на доработку с описанием причин.

Также на рисунке хорошо видны элементы коррекции Serif и Antiserif.



Рисунок 3.13 – Измерение размеров на фрагменте топологии

---

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

На этапе фрагментации на стороны многоугольников, образующих топологический рисунок в слое, помещаются вершины, разбивающие эти стороны на достаточно мелкие фрагменты.

Фрагментация производится именно на том рисунке, который требуется перенести в кремний.

Процесс фрагментации схематически изображен на Рисунке 3.14.

Результаты фрагментации участка топологии показан на Рисунке 3.15.

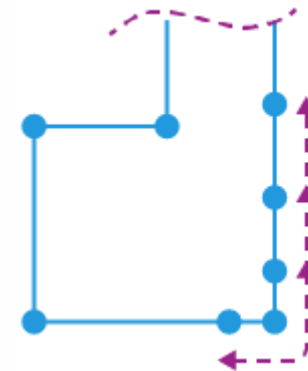


Рисунок 3.14 – Схематическое изображение фрагментации

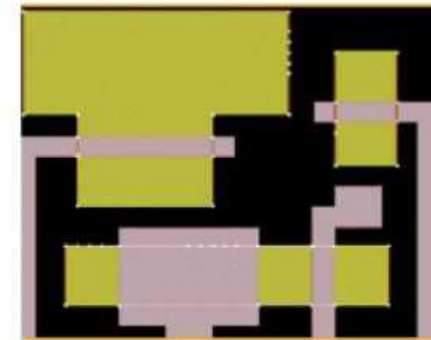


Рисунок 3.15 – Результаты фрагментации топологии



На этапе моделирования в центр каждого фрагмента помещается так называемый участок контроля, содержащий набор точек контроля, выстроенных в линию (Рисунок 3.16).

В каждой из точек контроля производится моделирование интенсивности электромагнитного поля на поверхности кремниевой пластины.

По результатам моделирования участка контроля рассчитывается EPE (Edge Placement Error), т.е. ошибка, вносимая дифракционными эффектами в расположение соответствующего фрагмента на кремниевой пластине.

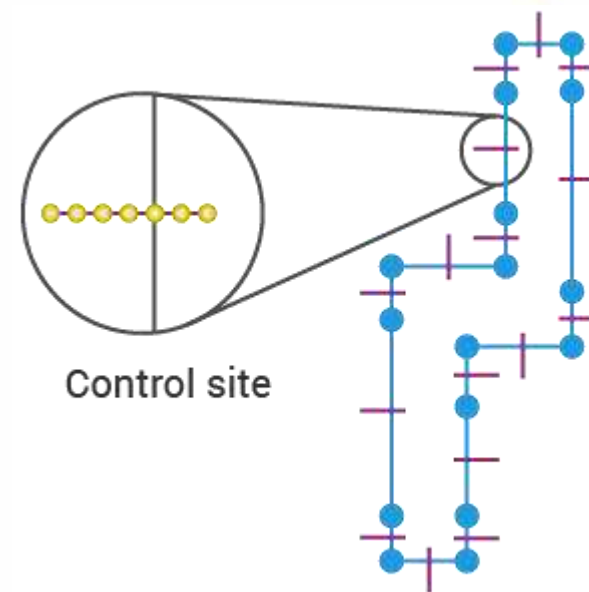


Рисунок 3.16 – Результаты фрагментации топологии

### 3.3. Подбор совокупности параметров настройки математической модели литографического процесса для проведения коррекции оптических эффектов близости

При работе с субмикронными размерами, становится явным отличие в проработке одиночных и плотноупакованных структур (Рисунок 3.17).

На фотографиях эти различия отчетливо видны. Центральный проводник, отвечающий параметрам одиночной структуры, имеет больший размер и угол наклона боковой стенки профиля резиста, боковые проводники также утолщены со «свободной» стороны. Поэтому для одиночных и плотноупакованных структур необходимы различные режимы технологической обработки.

Таким образом, необходимо либо обеспечить равномерную плотность структур по всему кристаллу микросхемы, либо произвести «тонкий» (очень точный) подбор технологических режимов. Обеспечить равномерную плотность структур при проектировании кристалла микросхемы на практике невозможно.

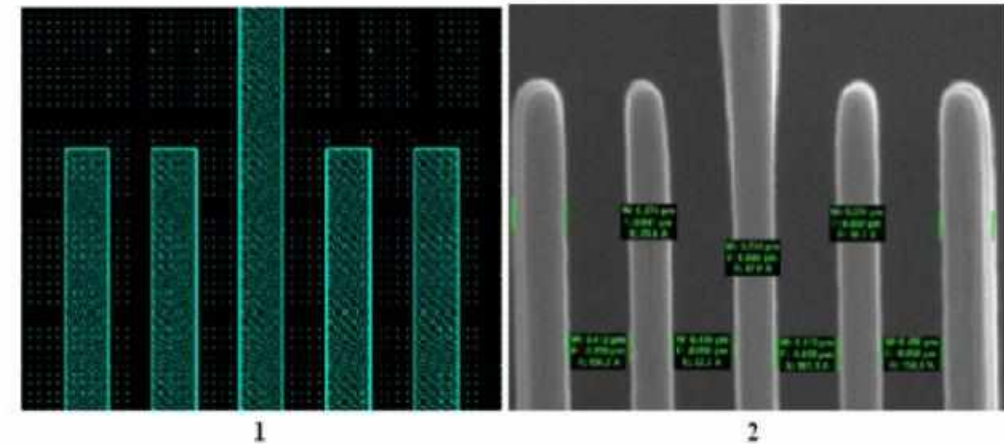


Рисунок 3.17 – Проработка фигуры контроля линейных размеров:  
1 – при проектировании, 2 – в кремнии

---

Для введения геометрических коррекций в исходную топологию необходимо предварительное проведение моделирования формирования фотолитографического изображения.

Математическая модель – «эквивалент» объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства. Используется для описания физических процессов построения единичного элемента.

Модель может создаваться как на основе чисто математических методов, так и на основе измерений критических размеров на предварительно изготовленном фотошаблоне.

Моделирование формирования фотолитографического изображения проводится с целью вычисления распределения интенсивности изображения фотошаблона при заданных условиях освещения в фотолитографической установке с заданными характеристиками оптической системы, т.е. с учетом всех перечисленных выше факторов.



Разработка и калибровка моделей процесса фотолитографии выполняется, как правило, средствами Synopsys Proteus MetroKit, Synopsys TCAD MS ProGen, Synopsys TCAD OPC ModGen.

На данном этапе проводится моделирование литографического процесса для контроля элементов, которые будут сформированы непосредственно на кремниевой пластине (Рисунок 3.18).

Моделирование позволяет выявить потенциально слабые места в топологии («слипание» или разрывы дорожек) и избежать тем самым процедуры повторного дорогостоящего изготовления фотошаблонов.

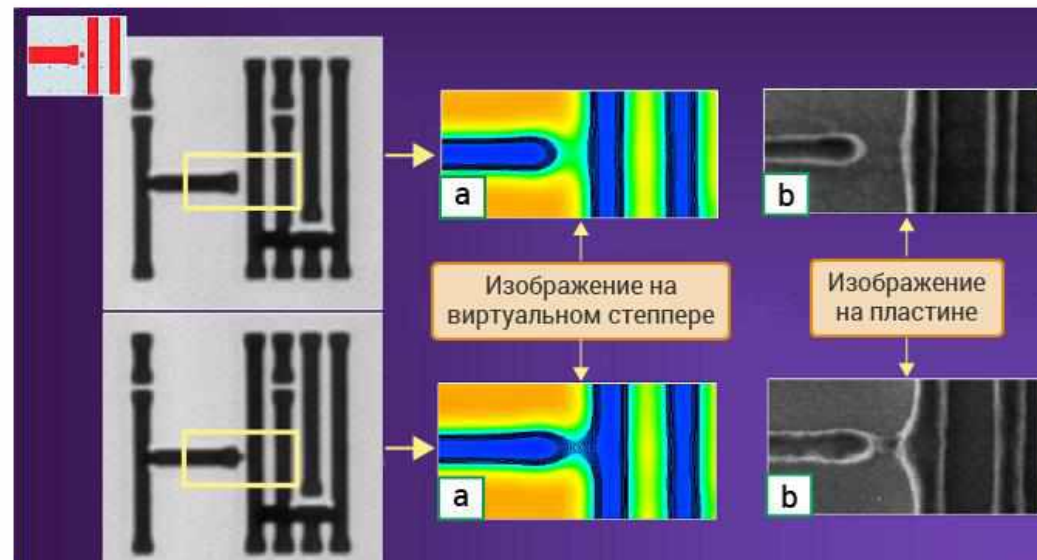


Рисунок 3.18 – Проведение моделирования для верификации проекта на соответствие правилам изготовления



---

Задачей моделирования формирования фотолитографического изображения является вычисление распределения интенсивности изображения произвольного фазосдвигающего фотошаблона при заданных условиях освещения в фотолитографической установке с заданными характеристиками оптической системы, т.е. с учетом всех перечисленных выше факторов.

Распределение интенсивности монохроматического поля в плоскости изображения часто называют воздушным изображением.

Вычисление распределения поля базируется на математических моделях, в основе которых лежат формулировки классической электродинамики. Эти формулировки по степени приближенности разделяются на скалярные и векторные.

Как скалярную, так и векторную модели формирования изображения удобно формулировать в так называемых канонических координатах, активно используемых при проектировании оптических систем.

Допустим, что формирование изображения моделируется в канонических координатах:

$\xi_x, \xi_y$  – канонические координаты на плоскости источника,

$\eta_x, \eta_y$  – предметные канонические координаты,

$\rho_x, \rho_y$  – канонические зрачковые координаты,

$\eta'_x, \eta'_y$  – канонические координаты на плоскости изображения.

---

В канонических координатах математическая модель формирования изображения имеет следующие свойства:

- 1) дифракция в оптической системе математически описывается преобразованием Фурье без масштабирующих множителей;
- 2) плоскость эффективного источника и плоскость зрачка имеют одинаковый масштаб, т.е.  $\rho_x = \xi_x$ ,  $\rho_y = \xi_y$ ;
- 3) увеличение оптической системы равно единице, т.е.  $\eta_x' = \eta_x$ ,  $\eta_y' = \eta_y$ ;
- 4) область зрачка оптической системы имеет форму круга единичного радиуса.

Для моделирования формирования фотолитографического изображения необходимо представить все влияющие на него факторы в виде функций, зависимостей и ограничений.

Когерентные свойства освещения описываются функцией распределения яркости по источнику.

Функция распределения яркости  $S(\xi_x, \xi_y)$  описывает эффективный источник произвольных формы и размеров с произвольным распределением яркости.

---

При моделировании формирования изображения на основе скалярной теории дифракции фазосдвигающий шаблон считается бесконечно тонким, а его действие описывается функцией комплексного пропускания предмета, которая в канонических координатах записывается следующим образом:

$$T(\eta_x, \eta_y) = t(\eta_x, \eta_y) \exp(i\varphi(\eta_x, \eta_y)), \quad (3.1)$$

где  $t(\eta_x, \eta_y) = |T(\eta_x, \eta_y)|$  - функция амплитудного пропускания предмета,  $\varphi(\eta_x, \eta_y) = \arg(T(\eta_x, \eta_y))$  - функция фазового сдвига на предмете.

Действие оптической системы на проходящее поле сводится к следующему:

- оптическая система имеет конечные размеры, и апертурная диафрагма ограничивает размеры проходящего поля;
- оптическая система ослабляет амплитуду проходящего поля, так как энергия теряется на преломлении, отражении, рассеивании;
- оптическая система изменяет фазу проходящего поля, что обусловлено наличием aberrаций.



---

Все факторы воздействия оптической системы на проходящее поле полностью описываются **зрачковой функцией**.

В канонических координатах зрачковая функция определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} f(\rho_x, \rho_y) &= \sqrt{\tau(\rho_x, \rho_y)} \cdot \exp(-2\pi i W(\rho_x, \rho_y)) \\ f(\rho_x, \rho_y) &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

В этой формуле  $\tau(\rho_x, \rho_y)$  – функция амплитудного пропускания, описывающая ослабление энергии,  $W(\rho_x, \rho_y)$  – функция волновой аберрации, описывающая изменение фазы проходящего через оптическую систему поля.

Условия в формуле (3.2) описывают ограничение размеров проходящего через оптическую систему поля.

Таким образом, зрачковая функция является полной математической моделью оптической системы.

---

Для достижения компромисса между точностью коррекции и ограничениями по возможностям используемого оборудования (такими, как сетка фотошаблона и размер файла) в САПР Proteus пользователю предоставляется несколько опций для управления точностью коррекции и степенью детализации. Обработка углов, концов линий и других плоскостных структур может быть полностью настроена по условиям заказчика при помощи управляющих скриптов.

Коррекция влияний нескольких слоев фотошаблона может быть проведена несколькими способами. Один способ — это использование данных в соответствующих слоях для выделения зон, подлежащих коррекции. В продвинутых приложениях соответствующие слои могут быть использованы для моделирования нижних слоев топологии и для коррекции подложки.

Proteus поддерживает распределенную сетевую обработку для ускорения цикла обработки данных. Путем распределения задачи между несколькими платформами время цикла может быть укорочено в соответствии с вашими требованиями. Превосходная масштабируемость была достигнута с использованием более, чем 100 процессоров.

Proteus предоставляет расширенную поддержку различных приемов модификации фотошаблонов. Вспомогательные функции могут быть помещены в откорректированный фотошаблон с помощью управляющих скриптов. Это может быть использовано как разрешение вспомогательных функций для засечек, требуемых заказчиком, или заглушек, или для приложений распределения нагрузки.

---

Заметим, что метод подбора технологических режимов применяется в частных случаях, при этом является экономически невыгодным и требует больших временных затрат, что недопустимо в условиях промышленного изготовления.

Оптимальным способом решения указанных выше проблем является введение геометрических коррекций в исходную топологию на этапе проектирования фотошаблона, что используется всеми мировыми производителями полупроводниковой индустрии.

Для коррекции оптических эффектов близости при подготовке данных для изготовления фотошаблона используются, как правило, следующие программные продукты Synopsys: Proteus, Progen и Prospector.

*Proteus* — ядро корректирующего инструмента, включает в себя эффективное управление иерархией проекта и высокую скорость моделирования алгоритмов. Proteus обычно распараллеливает обработку среди вычислительных кластеров, в результате чего происходит надежная и точная коррекция всего кристалла и формирования компактных выходных файлов с быстрым циклом обработки данных.

*Progen* — средство разработки литографических моделей, позволяющее пользователям виртуально создавать профили распределения интенсивности излучения на подложке после прохождения фотошаблона и использовать их в качестве эмпирических данных. Результатом являются компактные эффективные модели, используемые корректирующим инструментом Proteus.



---

*Prospector* — средство интерактивной визуализации и анализа, с помощью которого взаимодействие моделей и фотошаблонов может быть проанализировано, измерено, упорядочено и экспортировано для использования другими инструментами.

Оптическая коррекция фотошаблонов играет все возрастающую роль. В процессе развития оптической литографии использование указанных выше инструментариев для подавления OPC увеличивает выход годных кристаллов и дает возможность целенаправленного продвижения в область глубокого субмикронного разрешения путем модификации геометрии исходной топологии.

Proteus также поддерживает несколько методологий коррекции фотошаблонов. Коррекции могут подвергаться одновременно фазовый и хромовый слои фотошаблона.

Многоуровневое программирование обеспечивает пользователей Proteus максимальным контролем над всеми аспектами процесса корректирования, сохраняя при этом простой пользовательский интерфейс.

Тщательная настройка назначения может быть выполнена путем прямой модификации скриптов.

Они привязаны к конфигурируемому графическому пользовательскому интерфейсу, поэтому назначения и настроенные заказчиком скрипты могут представить краткий пакет управления для пользователей- неспециалистов.

---

Prospector помогает выполнять следующее:

- визуализировать и измерять оптические эффекты с использованием интерактивного моделирования, включающего генерацию контура, обнаружение полей напряженности (intensity field) и программируемые функции обмера и графического представления;
- быстро анализировать и оптимизировать назначения коррекции (correction recipes) путем прямого сопряжения с узлом обработки коррекций;
- без труда создавать автоматические тесты с привлечением большого числа точек замера и условий модели с применением пакетной оценки и возможности записи и сохранения последовательности команд;
- интерактивно создавать и управлять топологическими шаблонами с целью анализа OPC, PSM и других передовых технологий;
- оптимизировать условия технологического процесса для OPC путем одновременной оценки и сравнения производительности OPC в зависимости от различных моделей.

---

**OPC на основе эмпирических правил** (Rule-based OPC) – это коррекция эффектов оптической близости (при минимальных размерах структур на кристалле меньше длины волны применяемого при фотолитографии источника излучения) при технологической норме 90 нм и более, которая компенсирует дифракционные и интерференционные эффекты, вызывающие дефекты в формируемых структурах: размеры элементов топологии экстрагируются из тестовых структур, затем помещаются в таблицы для определения необходимого сдвига элементов сторон многоугольников, подлежащих коррекции.

**OPC на основе моделей** (Model-based OPC) – это коррекция эффектов оптической близости при технологической норме менее 90 нм (65 нм и менее), которая основывается на более точных моделях физических процессов, происходящих непосредственно при литографии: искажения, подлежащие коррекции, предсказываются вначале с помощью моделей (из анализа физических эффектов или эмпирически), применяются непосредственно к переносимой топологии, результаты используются для вычисления обратных искажений, нейтрализующих эффекты близости.