электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 681.382

Использование процедуры коррекции эффекта оптической близости в слое металлизации элементов библиотеки проектирования 0.25 мкм КМОП СБИС

***Ковалев Д.Д.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

Научный руководитель: Макарчук В.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
info@iu4.bmstu.ru

Введение

Для поддержания обороноспособности страны на должном уровне и создания электронной аппаратуры, способной работать в условиях космического пространства, необходима элементная база специального назначения. В случае применения СБИС в спутниках, в силу высокого радиационного воздействия космоса, при их разработке необходимо применение как специальных технологий (таких, например, как «кремний на изоляторе»), так и более сложных конструктивных решений, что, как правило, приводит к усложнению рисунка всех топологических слов СБИС. В первую очередь сказанное относится к топологическим слоям поликремния и первого уровня металлизации [1].

Необходимо особо отметить, что во многих топологических конфигурациях требуется выдержать размеры элементов с высокой точностью. Однако после выполнения технологических операций рисунок топологических слоев отличается от спроектированного по целому ряду причин. Одна из таких причин – это эффект оптической близости.

Вносимые эффектом оптической близости критические искажения возникают в случае, когда размеры топологических элементов разрабатываемой СБИС меньше длины волны экспонирующего излучения [2]. 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 [3]), но и топологический слой первого уровня металлизации (КЛР – 0,32 мкм [3]). 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, относятся: внеосевое освещение, фазосдвигающие маски, коррекция эффекта оптической близости и проч. Наиболее доступным среди них является коррекция эффекта оптической близости (*Optical Proximity Correction – OPC*), т.к. этот метод затрагивает лишь изображение рисунка топологического слоя на фотошаблоне.

Существующие методики коррекции эффекта оптической близости для топологического слоя поликремния не могут быть практически применены вследствие ряда причин: используются другие режимы литографических операций, отличается топологический рисунок слоя металлизации от слоя поликремния, кроме того, для слоя поликремния преобладающей задачей было выдерживание длины канала транзистора, а для слоя металлизации выдерживание ширины проводника выполняется лишь с целью сохранения RC-параметров цепи. Более значимая для слоя металлизации задача – это охват контактов.

Таким образом, коррекция искажений, возникающих вследствие эффекта оптической близости, для топологического слоя первого уровня металлизации является актуальной и важной задачей.

Основная цель данной работы заключается в сокращении количества искажений топологического рисунка и устранении критических нарушений правил верификации с помощью правил коррекции для слоя первого уровня металлизации, разработанных на примерах типовых топологических ситуаций, встречающихся в библиотеке стандартных элементов (БСЭ) для проектирования быстродействующих спецстойких КНИ СБИС с минимальным топологическим размером 0,25 мкм.

1 Анализ существующих методов коррекции эффекта оптической близости

Коррекцией эффекта оптической близости (*OPC*) называется комплекс методов повышения разрешающей способности литографии путем коррекции топологии СБИС на стадии проектирования фотошаблона [2].

Как правило, различают два метода *OPC*: основанный на правилах модификации топологического слоя (*Rule-Based OPC – RBOPC*) и основанный на литографическом

моделировании топологического слоя (*Model-Based OPC – MBOPC*). Названные методы *OPC* представлены на рис. 1.

При использовании *RBOPC* 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. Необходимость применения правил OPC для каждой ситуации определяется экспериментально. 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 *RBOPC*, 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 *RBOPC*, как правило, не применяется на производствах СБИС с минимальной проектной нормой менее 90 нм [4].

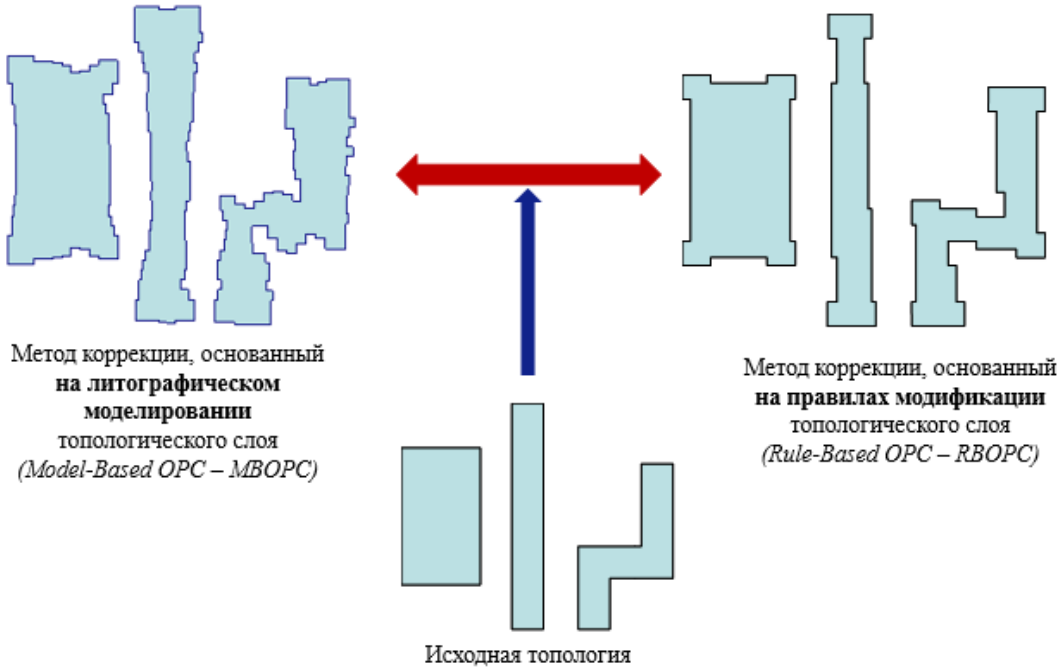


Рис. 1. Методы OPC

В методе *MBOPC* 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 [2]. Применение *MBOPC* позволяет существенно расширить возможности литографического процесса, однако требует наличия специальных дорогостоящих САПР и вычислительных кластерных комплексов.

Учитывая, что в технологическом процессе применяется литографическая установка – степпер ASML PAS5500 с длиной волны экспонирующего излучения 365 нм, в данном случае вполне обосновано применение метода *RBOPC*, поскольку искажения критических линейных размеров на порядок меньше самих размеров [4].

2 Верификация топологии

Под контуром в дальнейшем будем понимать сечение маскирующего слоя вдоль поверхности пластины на некотором заданном расстоянии от нее.

Верификация – это сравнение промоделированного контура с исходным топологическим рисунком. 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 эффекта оптической близости.

Наиболее часто имеют место искажения, представленные в таблице 1. Искажения проранжированы по степени важности от самого критичного (1) до незначительного (4) влияния.

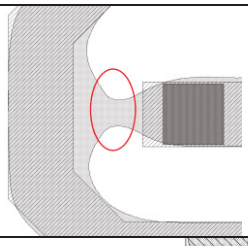
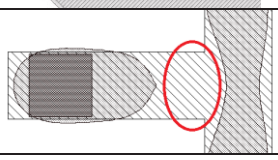
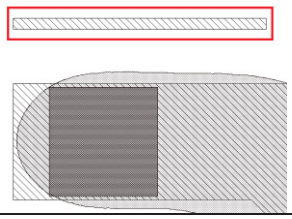
Все приведенные в таблице 1 искажения встречаются при визуальном анализе промоделированного контура топологического слоя первого уровня металлизации. Кроме того, все прочие искажения могут быть описаны как комбинация уже рассмотренных, более простых.

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. 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.

Таблица 1

Искажения топологического рисунка, возникающие вследствие эффекта оптической близости

Название	Описание	Ранг	Иллюстрация
short (hard bridge)	Замыкание цепи	1	
open (hard pinch)	Разрыв цепи	1	
fail print	Не пропечатавшиеся фрагменты топологического рисунка	1	

insufficient contact overlay	Недостаточное перекрытие слоя контактов шиной металлизации	2	
pinch (soft pinch)	Заужение проводника, место потенциального разрыва цепи	3	
bridge (soft bridge)	Заужение зазора между проводниками, место потенциального замыкания	3	
EPE (Edge Placement Error)	Ошибка размещения границы, отличие полученного контура от исходного топологического рисунка	4	

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.

Реализовать процедуру верификации в рамках программного обеспечения возможно в виде скриптов [5]. Для формирования скриптов нужен 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. Среди таких САПР наиболее известные САПР фирм *Synopsys,*

Mentor Graphics, Cadence Design Systems. В НИИСИ РАН для проведения операции OPC используется САПР «*Calibre*» фирмы *Mentor Graphics*.

3 Проведение коррекции эффекта оптической близости

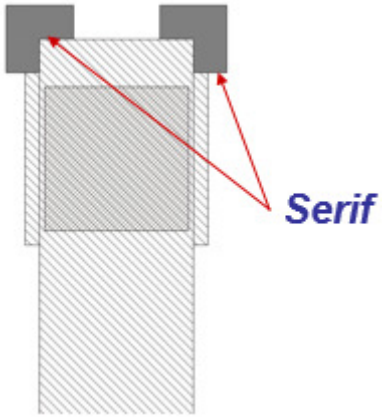
Для проведения *OPC* необходимо вначале определить набор правил, согласно которым будет проводиться коррекция. Правило в словесной форме представляет собой ответы на вопросы «что и как корректировать?». То, что корректировать, определяется с помощью проведенной ранее верификации. То, как корректировать, определяется путем подбора параметров фигур коррекции, с целью достижения наилучшего совпадения промоделированного контура с рисунком исходной топологии.

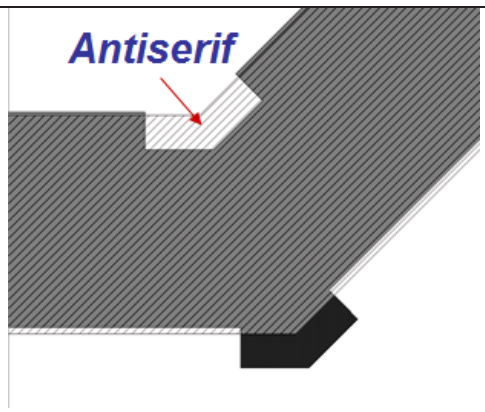
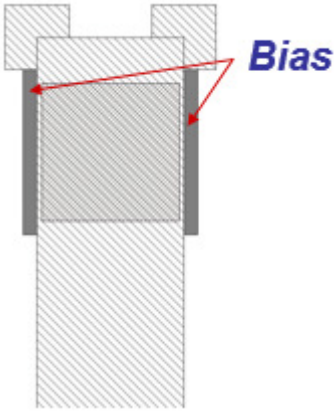
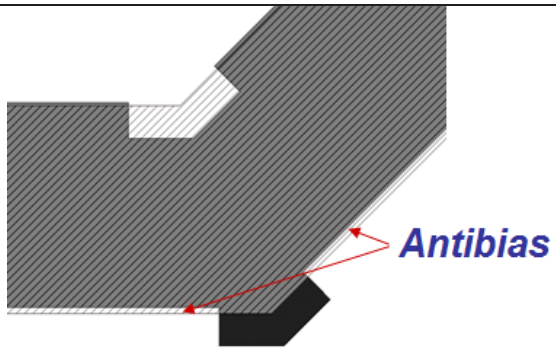
Все элементы коррекции можно разбить на две больших группы: позитивные и негативные. Под позитивными будем понимать элементы, которые добавляют многоугольники к исходному топологическому рисунку, а следовательно под негативными будем понимать те, которые вычитают многоугольники из исходного топологического рисунка. В таблице 2 представлены типовые элементы коррекции.

На основе этих базовых элементов можно строить более сложные конфигурации, например, удвоенные: *Double Serif* или *Double Antiserif* – что в некоторых случаях дает лучший эффект по сравнению с одиночными элементами.

Таблица 2

Типовые элементы коррекции эффекта оптической близости

Название и описание элемента	Иллюстрация
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*	
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	

Реализация правил коррекции эффекта оптической близости для типовых топологических ситуаций осуществляется с помощью скриптов на языке *SVRF*.

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.

4 Сравнительный анализ топологического рисунка элементов библиотеки с помощью процедуры верификации до и после введения коррекции

Проведем анализ на примере одного из элементов библиотеки под названием «*TBUFLX16*». Данная ячейка была выбрана из соображений наличия большого числа разнообразных топологических конфигураций. Исходный топологический рисунок ячейки представлен на рис. 2.

После проведения процедуры коррекции топологический рисунок примет вид, отраженный на рис. 3.

После проведения моделирования контура топологического рисунка, будет получено изображение, представленное на рис. 4.

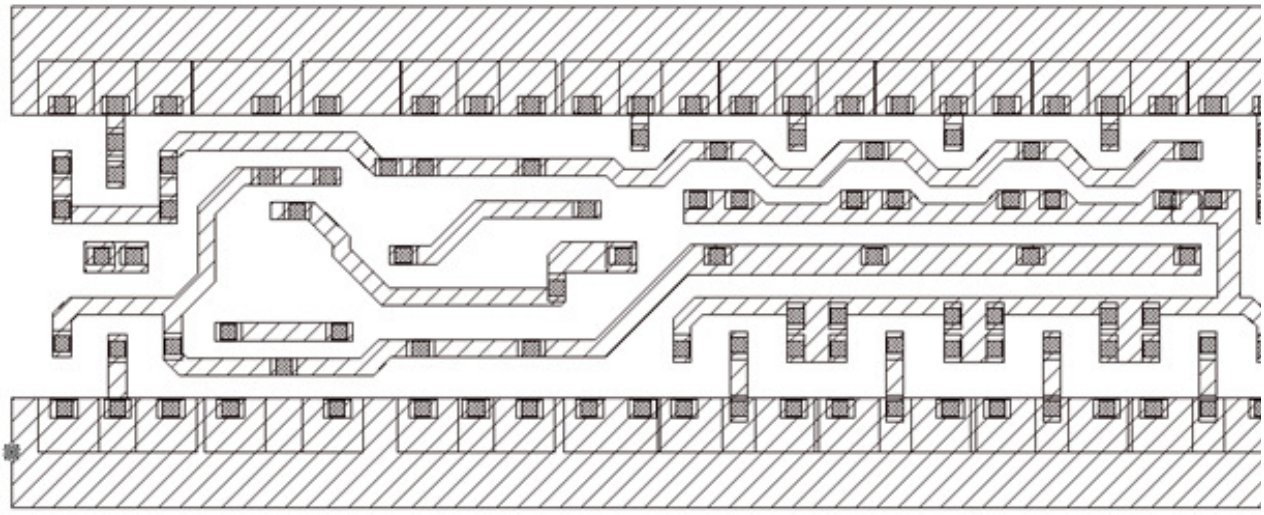


Рис. 2. Топология ячейки «*TBUFLX16*»

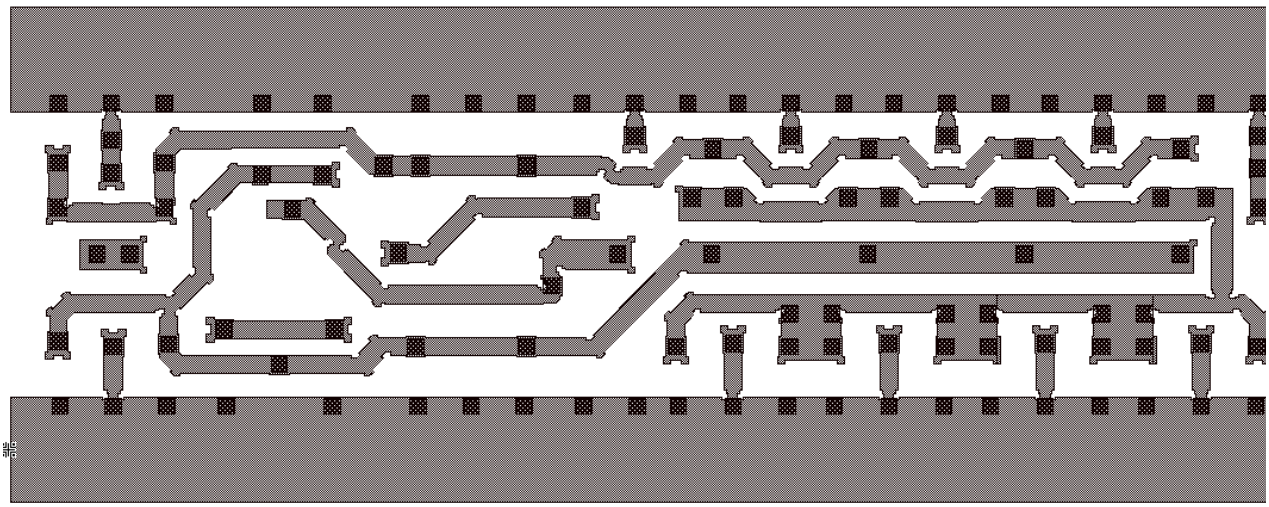


Рис. 3. Топологический рисунок ячейки «*TBUFLX16*» после проведения ОРС

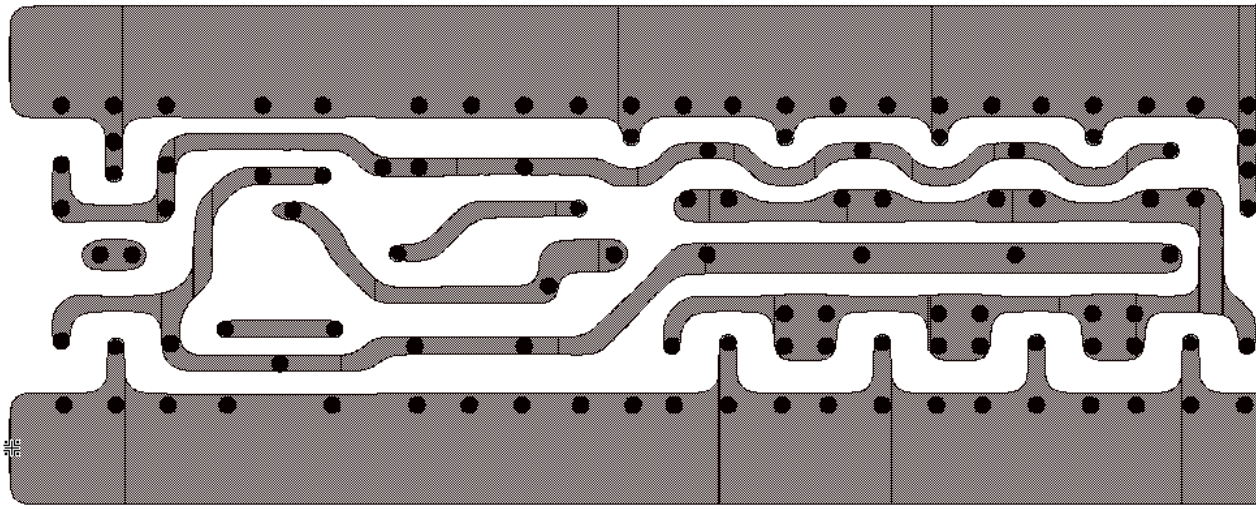


Рис. 4. Топологический рисунок ячейки «*TBUFLX16*» после проведения моделирования

Рассмотрим один из фрагментов топологии в увеличенном масштабе (рис. 5).

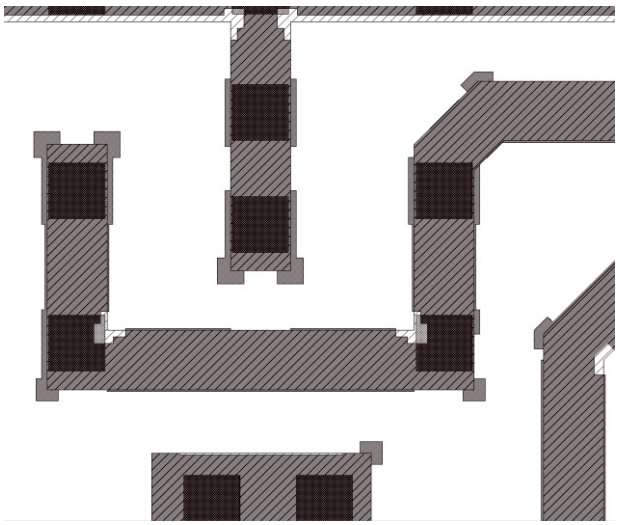


Рис. 5. Фрагмент топологии ячейки «*TBUFLX16*» после проведения *OPC*

Штриховкой на рис. 5 обозначен исходный топологический рисунок слоя металлизации, непрозрачным серым – топологический рисунок после применения *OPC*, темно-серым – контактные окна к слою поликремния. На рис. 6 представлено изображение контура структуры после травления до применения процедуры *OPC* (темно-серый) и после нее (светло-серый).

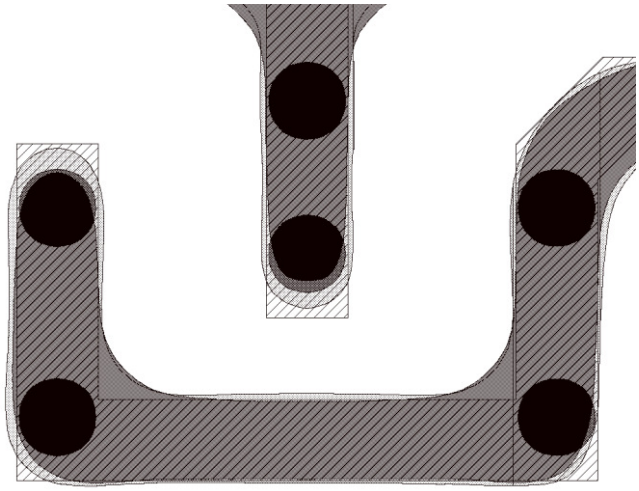


Рис. 6. Изображение контура структуры после травления
до применения процедуры *OPC* (темно-серый) и после нее (светло-серый)

Также на рис. 6 для сравнения и визуальной оценки показан исходный топологический рисунок (заштрихован) и перекрытия контактов (темные круги).

Визуально на качественном уровне можно предварительно оценить результаты применения процедуры *OPC*: на рисунке отчетливо видно, что было обеспечено перекрытие контактов.

5 Сравнительный анализ количества нарушений правил верификации в рамках библиотеки до и после введения коррекции

Качественного анализа недостаточно для определения эффективности проведенной работы. В связи с этим необходим количественный анализ. При этом стоит отметить, что достоверность полученных результатов основывается на оптической модели и модели формирования контура после травления. Модели были откалиброваны по экспериментальным данным.

Поскольку разработка и отладка скриптов производилась сначала в пределах одной ячейки «*TBUFLX16*», то и сравнительный анализ количества нарушений правил верификации и оставшихся искажений, проводился для этой самой ячейки.

Количество и значения нарушений типа *EPE* проиллюстрировано гистограммой на рис. 7, а распределение искажений и нарушений по топологии до введения коррекции представлено на рис. 8.

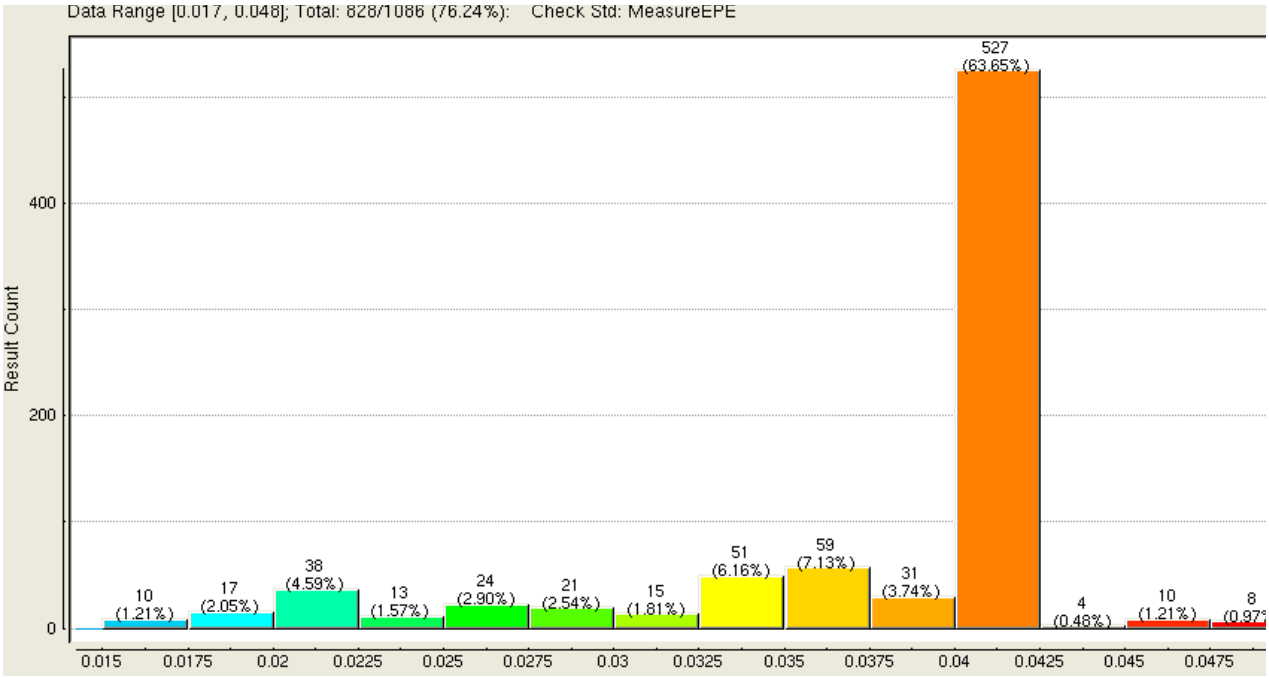


Рис. 7. Гистограмма значений нарушений и искажений типа *EPE* в пределах ячейки «*TBUFLX16*» до введения *OPC*

На гистограмме отображены искажения и нарушения со значением 15-50 нм. До введения OPC их количество в этом диапазоне составляет 76,24 % (828) от общего числа нарушений (1086). Оставшиеся нарушения превышают значение 50 нм. Подавляющее большинство нарушений (527 – 48,3 %) находится в диапазоне 40-42,5 нм.

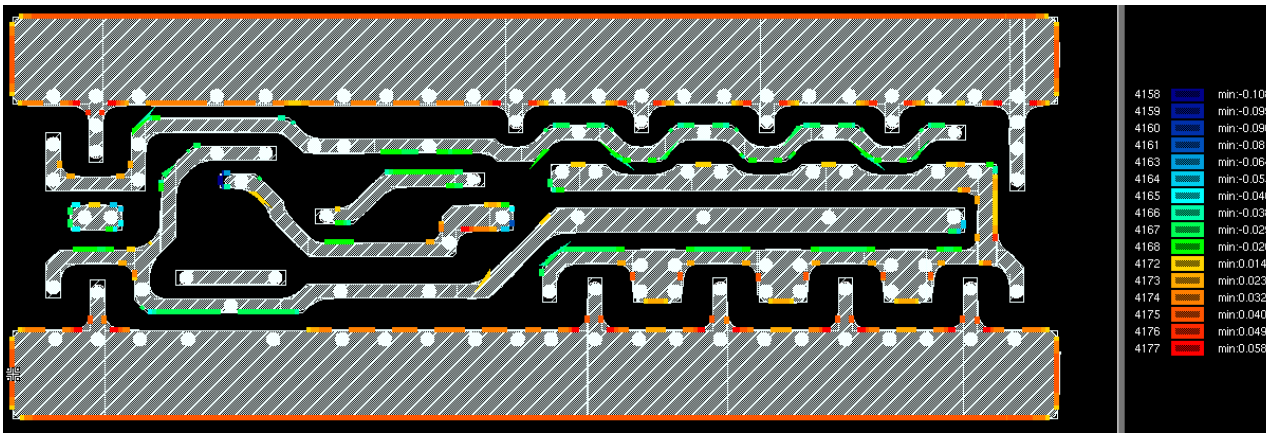


Рис. 8. Распределение искажений и нарушений типа *EPE* с учетом количественных параметров по топологии ячейки «*TBUFLX16*» до введения *OPC*

Количество и значения нарушений после введения коррекции проиллюстрировано гистограммой на рис. 9, а распределение выглядит следующим образом (рис. 10).

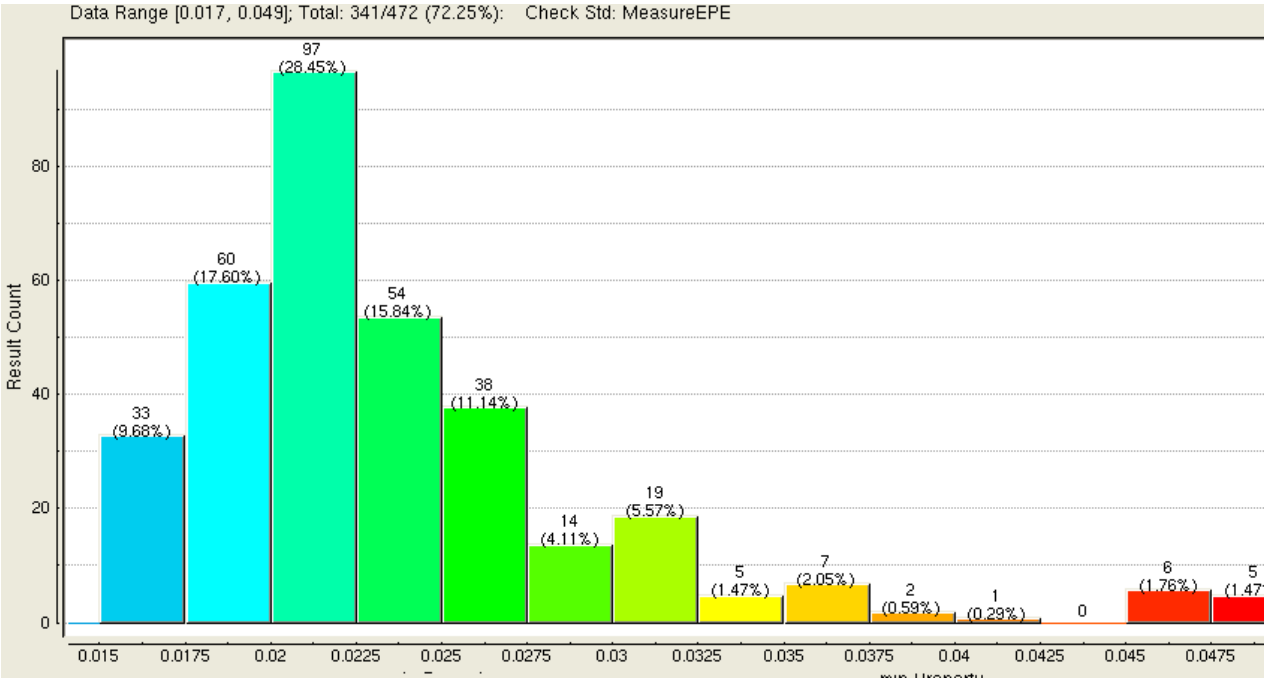


Рис. 9. Гистограмма значений нарушений и искажений типа *EPE* в пределах ячейки «*TBUFLX16*» после введения *OPC*

Из гистограммы отчетливо видно, что центр распределения сместился в сторону более низких значений (20 нм), и, кроме того, общее количество нарушений снизилось на 52,8 % (472). Стоит отметить, что при ширине проводника 320 нм 5 % составляют 16 нм. С учетом погрешностей модели и отклонений во время техпроцесса искажения в 20 нм возможно считать некритичными.

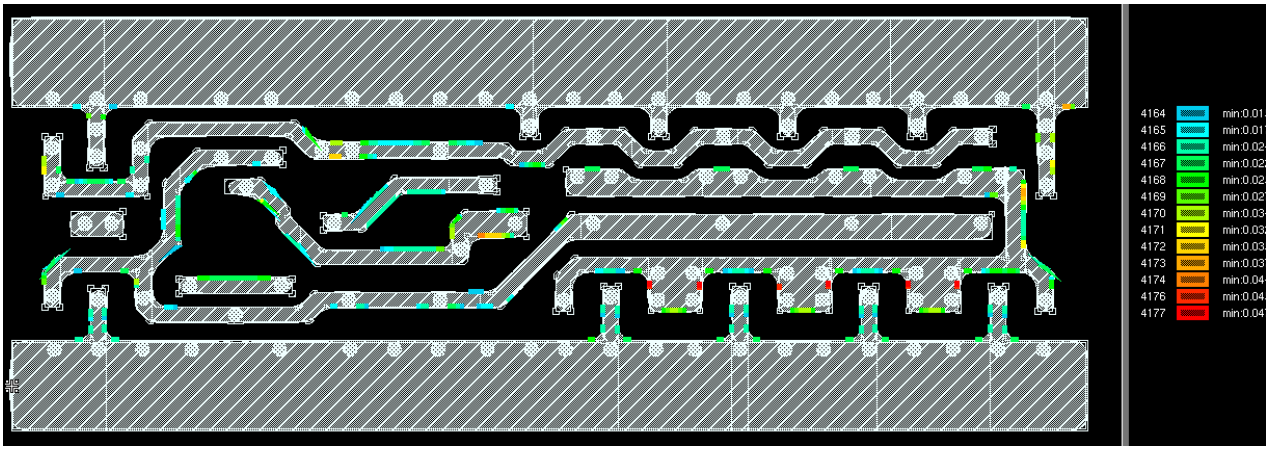


Рис. 10. Распределение искажений и нарушений типа *EPE* с учетом количественных параметров по топологии ячейки «*TBUFLX16*» после введения *OPC*

В таблице 3 зафиксировано количество нарушений каждого правила верификации до и после применения OPC.

Таблица 3

Нарушения правил верификации до и после применения *OPC* в рамках ячейки «*TBUFLX16*»

Тип искажения/нарушения	Количество искажений/нарушений	
	До применения *OPC*	После применения *OPC*
Short	0	0
Open	0	0
Pinch	39	10
Bridge	2	0
EPE	1086	472
EPE в области близкого расположения контактов	213	88
insufficient contact overlay	**23**	**0**

В результате применения *OPC* в рамках ячейки достигнуты требуемые результаты: устранены все критические нарушения одного из правил верификации, согласно которому контакт в исходном положении должен быть на 95 % перекрыт слоем металлизации, а при максимальном рассовмещении слоя первого уровня металлизации и слоя контактов равном 100 нм перекрытие должно составлять не менее 50 %. Именно в результате наступления этих нарушений возможность отбраковки СБИС наиболее высока.

В таблице 4 и на рис. 11 представлена информация о количестве нарушений правил верификации до и после введения *OPC* в рамках всей БСЭ для проектирования спецстойких СБИС. Кроме того, для некоторых категорий в таблице указано общее количество элементов, на которых возможно данное нарушение:

– для нарушений типа *EPE* – это общее количество фрагментов граней многоугольников исходного топологического рисунка;

– для нарушений типа *insufficient contact overlay* – общее количество контактов.

Таблица 4

Нарушения правил верификации до и после применения *OPC* в рамках всей БСЭ для проектирования спецстойких СБИС

Тип искажения/нарушения	Количество искажений/ нарушений		Общее количество элементов, на которых возможно нарушение
	До *OPC*	После *OPC*	
Short	0	0	–
Open	0	0	–
Pinch	5913	1608	–
Bridge	1112	669	–
EPE	448049	108716	642094
EPE в области близкого расположения контактов	49664	1163	103207
insufficient contact overlay	4352	70	17489

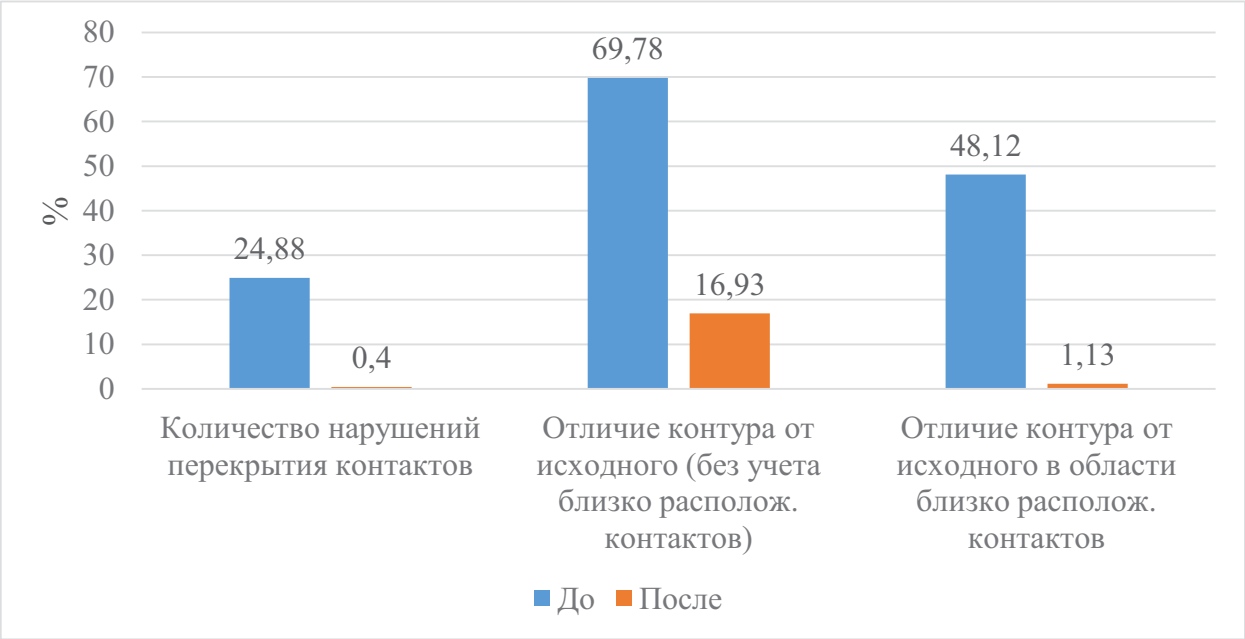


Рис. 11. Количественный анализ нарушений правил верификации до и после введения коррекции

Необходимо оценить эффективность применения разработанной процедуры коррекции на основе этих данных. Для этого были проведены расчеты и сделаны следующие выводы:

– отличие промоделированного контура от исходного топологического рисунка (без учета областей близкого расположения контактов) снизилось с 69,78 % до 16,93 %;

– отличие промоделированного контура от исходного топологического рисунка в областях близкого расположения контактов снизилось с 48,12 % до 1,13 %;

– количество контактов, для которых не обеспечено перекрытие на требуемом уровне, снизилось с 24,88 % до 0,4 %;

– количество возможных замыканий и разрывов относительно их количества до проведения коррекции снизилось на 72,81 % и 39,84 % соответственно;

– недопустимые нарушения (разрывы и замыкания цепи, непропечатавшиеся фрагменты) в результате проведения коррекции в топологическом слое отсутствуют.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты.

Предложен вариант повышения разрешающей способности литографического оборудования только с помощью коррекции эффекта оптической близости. Проведен анализ существующих методов коррекции эффекта оптической близости, в результате чего обоснован выбор метода коррекции, основанного на правилах (*RBOPC*), в качестве применяемого в данной работе.

Проведен анализ типовых недопустимых отклонений и искажений, возникающих вследствие эффекта оптической близости. Проведено ранжирование их по степени значимости, а также проанализированы возможные последствия, которые наступят, в случае возникновения этих искажений.

Разработаны скрипты верификации и коррекции топологических слоев быстродействующих спецстойких КНИ СБИС с минимальным топологическим размеров 0,25 мкм.

Приведено описание основных элементов *OPC*, которые применены при разработке скриптов *OPC*. Предложены параметры элементов коррекции, позволяющих скомпенсировать возникающие критические искажения.

Предложена методика отладки скриптов верификации и коррекции, согласно которой отладка производится сначала в пределах малой ячейки, затем в пределах более крупных топологических элементов, и после этого – в рамках всей библиотеки.

Проведен сравнительный анализ топологического рисунка до и после введения корректирующих элементов на примере конкретных элементов и библиотеки в целом, показавший резкое снижение количества искажений топологии.

Дальнейшая задача состоит в модификации скриптов коррекции эффекта оптической близости, что позволит повысить качество процесса литографии и, тем самым, увеличит процент выхода годных СБИС.

Список литературы

1. Волков С.И., Глушко А.А., Морозов С.А. Исследование и моделирование факторов, ограничивающих радиационную стойкость КНИ // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. 2011. Т. 1. №1. С. 51-56.
2. Chris Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. Austin: Wiley, 2007. 534 p.
3. Design Rules MOSIS Scalable CMOS (SCMOS) (Revision 8.00) Режим доступа: http://www.mosis.com/files/scmos/scmos.pdf (дата обращения 23.07.2014).

4. Демин С.В., Амирханов А.В., Михальцов Е.П., Родионов И.А., Тафинцева Е.В. Особенности топологического проектирования субмикронных КМОП СБИС с учетом литографических ограничений // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: сб. науч. тр. Москва, 2009. С. 24-31.
5. Ковалев Д.Д. Разработка правил коррекции и верификации типовых топологических ситуаций в слое металлизации библиотеки проектирования 0,25 мкм КМОП СБИС // XVI Международная молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 23-24 апреля 2014 г.): труды. Москва, 2014. С. 195-208.