

УДК 621.382

ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ОКОН ПО ТЕХНОЛОГИИ С МИНИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ НОРМОЙ 0.25 МКМ

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

*Научный руководитель: Макаруч В.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия
Shakhnov@iu4.bmstu.ru*

Введение

Технологический процесс производства СБИС состоит из множества производственных операций. Около 40% производственных затрат приходится на литографические процессы. Проекционная литография на сегодняшний день является одним из ключевых и широко используемых процессов в микроэлектронике [1].

Наиболее быстрыми темпами этот вид литографии стала развиваться с 1970-х годов. Так уже в 1992 году с его использованием были изготовлены СБИС, спроектированные по минимальной проектной норме 0.35 мкм. В этом процессе в качестве источника экспонирующего излучения использовалось излучение ртутной лампы высокого давления, а именно спектральная линия излучения с длиной волны 365 нм.

Дальнейшее уменьшение минимальных размеров элементов СБИС происходило путем сокращения длины волны источника экспонирующего излучения. Уже в 1996-98 г. в качестве такового стали использовать излучение эксимерных лазеров, которые имели меньшую длину волны источника экспонирующего излучения. Применения KrF-лазеров позволило сократить ее до 248 нм, а ArF-лазеров - и до 193 нм [2].

Вследствие непрерывного роста числа компонентов современных СБИС и ограничений на размер кадра проекционной оптической системы появилась необходимость постоянного увеличения разрешающей способности процесса литографии и соответствующего улучшения точности совмещения слоев топологического рисунка [2].

Известно, что теоретические основы проекционной литографии описываются классическим уравнением Рэлея [3] для разрешающей способности проекционной оптической системы:

$$R = \frac{k_1 \cdot \lambda}{N.A.}$$

R – разрешающая способность оптической системы,

k_1 – коэффициент уровня технологии (имеет значение в диапазоне 0.5-1.0),

λ – длина волны экспонирующего излучения,

$N.A.$ – числовая апертура объектива проекционной установки.

Как следует из вышеприведенной формулы, чем меньше коэффициент уровня технологии и больше числовая апертура, тем выше разрешающая способность проекционной системы.

С целью уменьшения значения коэффициента k_1 было предложено несколько технических решений, таких как применение многослойных резистов, различных модифицированных проявителей, а также использование внеосевого освещения и фазосдвигающих шаблонов. Однако применение некоторых решений, например, таких как использование многослойных резистов, имеет весьма ограниченный характер, поскольку приводит к значительному усложнению и удорожанию самого литографического процесса.

Известно [3], что числовая апертура объектива определяется как:

$$N.A. = n \cdot \sin\theta = \frac{D}{2 \cdot f}$$

$N.A.$ – числовая апертура объектива проекционной установки;

n – показатель преломления оптической среды;

$\sin\theta$ – синус угла между крайним лучом конического светового пучка на входе оптической системы и ее оптической осью.

Другое важное математическое выражение, имеющее отношение к характеристикам литографического процесса, связывает глубину резкости изображения с длиной волны экспонирующего излучения и числовой апертурой объектива [3]:

$$DOF = \frac{k_2 \cdot \lambda}{N.A.^2}$$

DOF – глубина резкости изображения,

k_2 – коэффициент качества объектива (максимальное значение 2),

λ – длина волны экспонирующего излучения,

$N.A.$ – числовая апертура объектива.

Значение числовой апертуры объектива – это мера светособирающей способности оптики. Изготовители современных литографических систем используют в них специальное устройство, обеспечивающее возможность изменения значения числовой

апертуры объектива, в результате чего появляется возможность выбора его оптимального значения для каждого топологического слоя СБИС.

Основными материалами для осуществления литографических процессов служат резисты. Резистами называются химические вещества или их смеси, из которых формируются пленки, изменяющие под действием УФ - излучения свои физико-химические свойства и предохраняющие защищаемую поверхность подложки от воздействия на ее материал агрессивных сред и физических объектов (например, плазмы, ионных и электронных потоков и т.п.). Согласно этому определению наиболее важным функциональным свойством резиста является его чувствительность к действию УФ - излучения, иначе говоря - светочувствительность. По определению светочувствительность - это величина, обратная дозе УФ - излучения, поглощенной резистом и достаточной для получения резистной маски при дальнейшем проявлении, иначе говоря, дозе, необходимой для перевода резиста в нерастворимое (негативный резист) или растворимое (позитивный резист) состояние [4].

Следующим важным свойством резиста является его адгезия. В приложении к литографическому процессу адгезия – это способность слоя резиста сцепляться с подложкой по всей площади создаваемой резистной маски. Качество адгезии резистного слоя определяют как время отрыва от подложки его слоя заданных размеров в ламинарном потоке растворителя.

И, наконец, чрезвычайно важным свойством резиста служит дефектность сформированной из него резистной маски. Под дефектностью понимается количество микроскопических дефектов пленки, проявляющих себя на последующих стадиях технологических обработок подложки через резистную маску [4].

Общую последовательность операций литографического процесса можно представить следующим образом (рисунок 1):

- подготовка поверхности пластины (дегидратация (Prebake), гидрофобизация (Prime), охлаждение пластины (Chill));
- нанесение светочувствительной пленки (Нанесение пленки резиста (Coat), мягкая сушка (Softbake), охлаждение пластины (Chill));
- получение скрытого изображения в пленке (экспонирование (Exposure));
- постэкспозиционная термообработка, ПЭТ (Post Exposure Bake, PEB);
- проявление скрытого изображения в пленке,
- проявление (Develop), окончательная сушка, задубливание (Hardbake), охлаждение пластины (Chill).

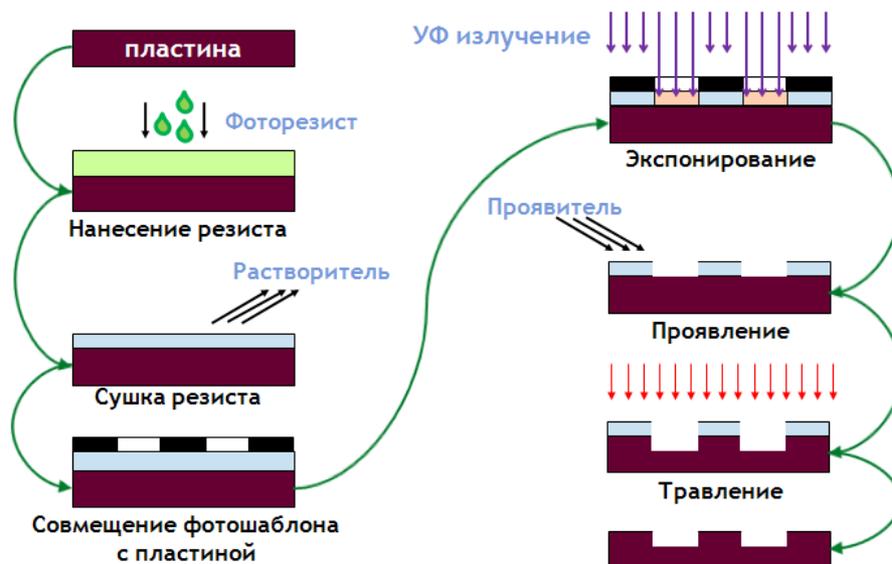


Рис. 1. Основные операции литографического процесса

При производстве современных СБИС топологические размеры всех элементов лежат в субмикронной области, что обуславливает важность точных расчетов их линейных размеров и четкого воспроизведения их при заданных параметрах производства. Современные СБИС представляют собой многослойные структуры. Для электрического взаимодействия слоев в них необходимо смоделировать и создать контактные и переходные окна. От полноты построения их математической модели и четкости их воспроизведения зависит качество электрических соединений и, следовательно, работоспособность и надежность всей СБИС.

Вид контактных и переходных окон зависит от характера и потребностей производства. Однако наиболее часто используются контактные окна в виде окружностей (рисунок 2).

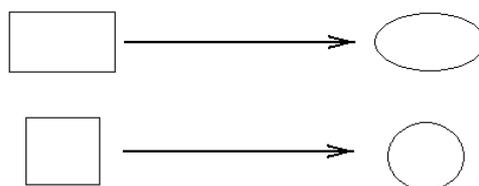


Рис. 2. Воспроизведение контактного окна

В современном производстве контактные окна разрабатываются и воспроизводятся с различной плотностью распределения по топологическому слою (рисунок 3).



Рис. 3. Контактные окна

При литографическом воспроизведении контактных окон с различной плотностью распределения у окон в групповых областях происходит уход размеров в большую сторону относительно отдельно стоящих окон, что может сказаться на дальнейшем производственном процессе и качестве интегральной схемы. В связи с этим необходимо разработать способы решения данной проблемы.

В процессе разработки и производства СБИС при проектировании контактных окон на производстве необходимо соблюдать основные правила их разработки, приведенные в проектных нормах для каждой технологии. Ниже перечислены основные правила разработки слоя контактных окон для технологического процесса с минимальной проектной нормой 0.25 мкм:

- топологический элемент слоя контактных окон (контактное окно) должен быть охвачен фигурами из слоев, которые он соединяет;
- все топологические элементы контактного слоя должны быть выполнены в виде отдельных фигур с заданными размерами и формой;
- не допускается перекрытие контактного окна элементами слоев, которые оно не соединяет;
- необходимо соблюдать заданные минимальные расстояния между контактными и окнами и структурами с различным напряжением питания;
- не допускается нулевой охват топологическими элементами соединяемых слоев смежных сторон переходного окна;
- охват контактных и переходных окон топологическим элементом не должен быть меньше заданного для данного технологического процесса минимального значения;
- расстояние между топологическими элементами (контактными окнами) не должно быть меньше заданного для данного технологического процесса минимального расстояния;

– расстояние между контактными окнами и элементами в соединяющихся слоях не должно быть меньше заданного для данного технологического процесса минимального расстояния.

Для каждого конкретного производства существуют свои проектные нормы и правила разработки топологии контактных окон.

При проектировании СБИС разрабатывается и рассчитывается ее электрическая схема. По расчету электрической схемы определяется сопротивление контактного окна (для каждого производства данные значения заданы в проектных нормах):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{0.25 \cdot \pi \cdot d^2}$$

R – сопротивление контактного окна,

ρ – удельное сопротивление материала,

l – глубина контактного окна,

d – диаметр контактного окна.

Диапазон значений электрического сопротивления контактных окон находится в рамках 5-7 Ом, а глубина контактного окна – толщина слоя примерно 9500 – 1100 Å. Для упрощения расчета примем, что материалом, заполняющим контактное окно, является вольфрам.

Расчет минимального диаметра контактного окна:

$$d_0 \geq h \cdot \alpha$$

d₀ – минимальный диаметр контактного окна,

h – толщина контактного слоя,

α – аспектное отношение окна.

По данной формуле можно оценить минимально необходимый диаметр контактного окна. Аспектное отношение контактного окна задано в производственных проектных нормах (оно влияет на селективность травления).

Оценка номинального диаметра контактного окна:

$$d - \Delta d_{н.о} \geq d_{с.о} + r$$

d – номинальный диаметр контактного окна,

$\Delta d_{н.о}$ – нижнее предельное отклонение контактного окна,

$d_{в.о}$ – верхнее предельное отклонение контактного окна,

r – разность между минимальным и максимальным значениями диаметра контактного окна.

Зная, все производственные допуски и отклонения для воспроизведения контактных окон можно оценить его номинальный диаметр для данного типа технологии.

На производстве теоретические размеры, полученные по расчетам, проверяются экспериментально. Технологический процесс получения контактных окон представляет собой стандартный набор ключевых операций, использующихся при воспроизведении остальных слоев, но так же используются некоторые технологические операции, характерные только для получения слоя контактных окон.

Данный процесс можно разбить на четыре основных этапа, которые представлены на рисунке 4.

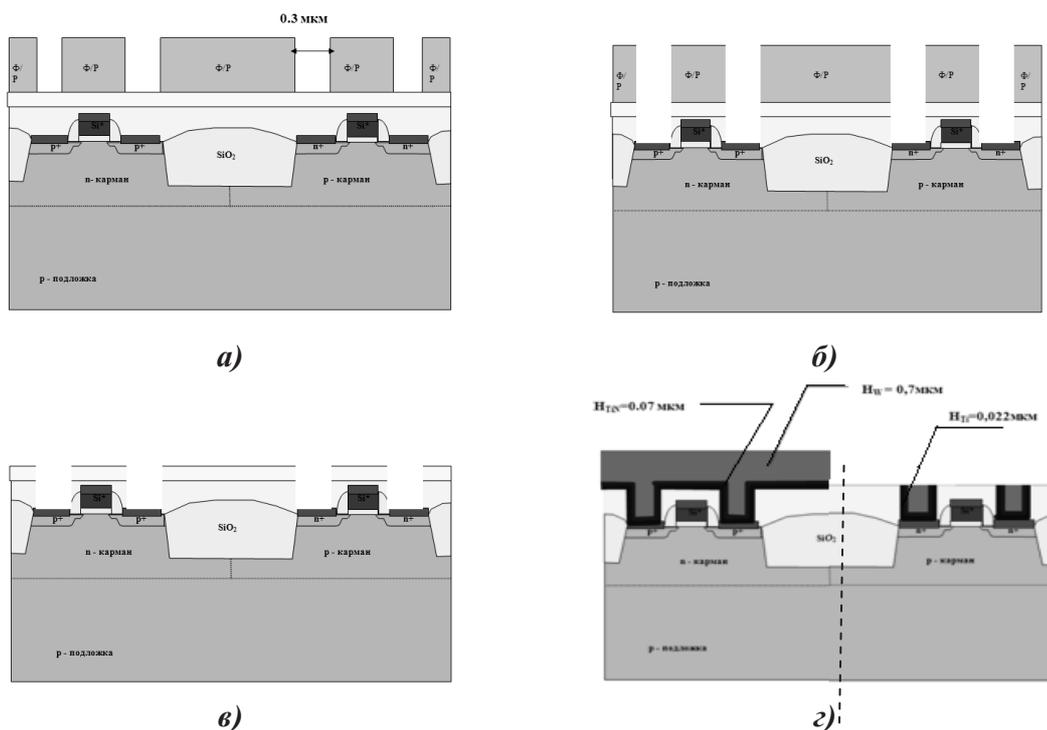


Рис. 3. Технологический процесс получения контактных слоев

На первом этапе происходит нанесение резиста на поверхность планаризованного предыдущего слоя, его экспонирование и проявление (а). Второй этап представляет собой анизотропное травление оксида кремния в местах, незащищенных резистивной маской (б). На третьем этапе в специальном растворителе удаляется резист и производится химическая очистка (отмывка) поверхности пластины (в). Четвертый этап – это осаждение на поверхность проводящего слоя, состоящего из таких веществ как титан Ti, нитрид титана TiN и вольфрам W. После их осаждения проводят полировку, в результате которой с поверхности пластины частично удаляется проводящий слой. В результате он остается только в вытравленных областях и создает проводящие «пробки» (г). На завершающей стадии этапа происходит отмывка пластины, с целью удаления с нее возможных загрязнений.

Экспонирование резиста осуществляется на установке пошаговой мультипликации (степпер) PAS5500/250C фирмы ASML.

Установка PAS5500/250C фирмы ASML (Голландия)

Это высокопроизводительная проекционная установка (рисунок 4), обладающая высоким разрешением. Среди аналогичных установок использующих i-линию излучения ртути эта модель отличается гибкостью настройки большого числа процессных параметров [2].



Рис. 4. Проекционная литографическая установка PAS5500/250C

Конструктивно установка выполнена в виде нескольких модулей. Основой главного модуля является массивная стальная рама, непосредственно на которой смонтирована оптическая система.

Линзы объектива объединены корпусом, имеющим жесткую герметичную конструкцию (рисунок 5).



Рис. 5. Система проекционных линз

В таблице 1 приведены технологические параметры установки.

Таблица 1

Технические параметры установки PAS5500/250С

Коэффициент отъема	5:1
Источник излучения	<i>i</i> -line Hg
Длина волны	365 нм
Числовая апертура	0.48-0.6
Разрешение	0.3 мкм
Размер кадра	22×22 мм
Рассовмещение	40 нм
Оптическая дисторсия	40 нм
Размер пластин	6", 8"
Производительность	120 (6"), 90 (8") пластин/час

Пластина загружается из кассеты, размещаемой во входном порту транспортной подсистемы. Стол экспонирования перемещается по полированной плите на воздушной подушке. Перемещение осуществляется за счет трех ленточных шаговых двигателей. Два двигателя одной из координат позволяют производить разворот стола на небольшие углы путем одновременного перемещения противоположных сторон стола в различных направлениях. Контроль положения стола осуществляется с помощью шести лазерных интерферометров (рисунок 6) [2].

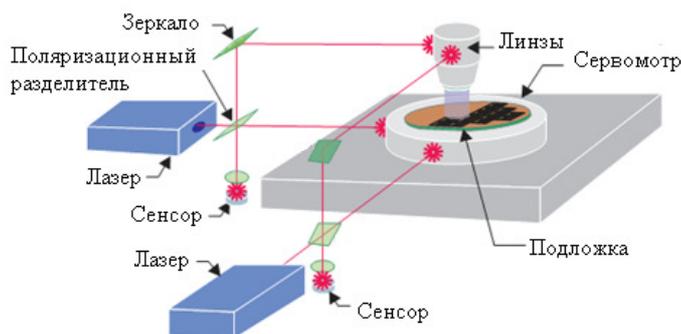


Рис. 6. Система перемещения степпера

Совмещение фотошаблона с пластиной осуществляется с помощью подсистемы совмещения. Фокусировка оптики производится с помощью специальной подсистемы датчика уровня. Современные СБИС содержат 20-30 топологических слоев, поэтому учитывая субмикронные размеры элементов, необходимо проводить точное послойное совмещение, для этого на каждом слое предварительно впечатываются метки совмещения [2].

Экспонирование ведется по оптимальному алгоритму обхода пластины с учетом доступности в текущий момент информации от датчика уровня. На крайних кадрах один из лучей датчика уровня может выйти за пределы пластины, тогда этот кадр будет проэкспонирован лишь после того, как будут проэкспонированы соседние кадры. Вовремя их экспонирования система собирает статистическую информацию по профилю поверхности пластины для фокусировки при обработке крайнего кадра с неполной информацией от датчика уровня.

Установка NanoSEM 3D (CD-SEM)

В качестве инструмента для измерения линейных размеров получающихся после литографии элементов на пластине использовалась измерительная установка NanoSEM 3D (CD-SEM) (рисунок 7).



Рис. 7. Установка NanoSEM 3D (CD-SEM)

Основные метрологические характеристики установки представлены в таблице 2.

Основные метрологические характеристики установки NanoSEM 3D (CD-SEM)

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений по осям X и Y, мкм (не менее)	0 - 10
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений линейных размеров по осям X и Y, нм	3

При выполнении операций измерения необходимо: поставить кассету на один из портов (загрузочных модулей); вписать необходимую информацию в поля автоматически появившегося окна; выбрать необходимую измерительную программу для каждой пластины.

Для каждой пластины выполняется процедура ее загрузки из кассеты на стол установки, с последующим выполнением требуемых измерений и ее выгрузка обратно в кассету. Измерительная программа выполняется автоматически и содержит все инструкции, необходимые для измерений контролируемых размеров элементов топологии СБИС [5].

После завершения процесса измерений все пластины выгружаются в те же самые слоты, из которых они были загружены, а результаты измерений – появляются в окне результатов.

Сравнительный анализ размеров контактных окон с разной плотностью распределения

Для решения поставленной выше задачи был выполнен эксперимент по воспроизведению и измерению размеров одиночных и групповых контактных окон с номинальным размером в интервале 0.28 – 0.34 мкм (рисунок 8).

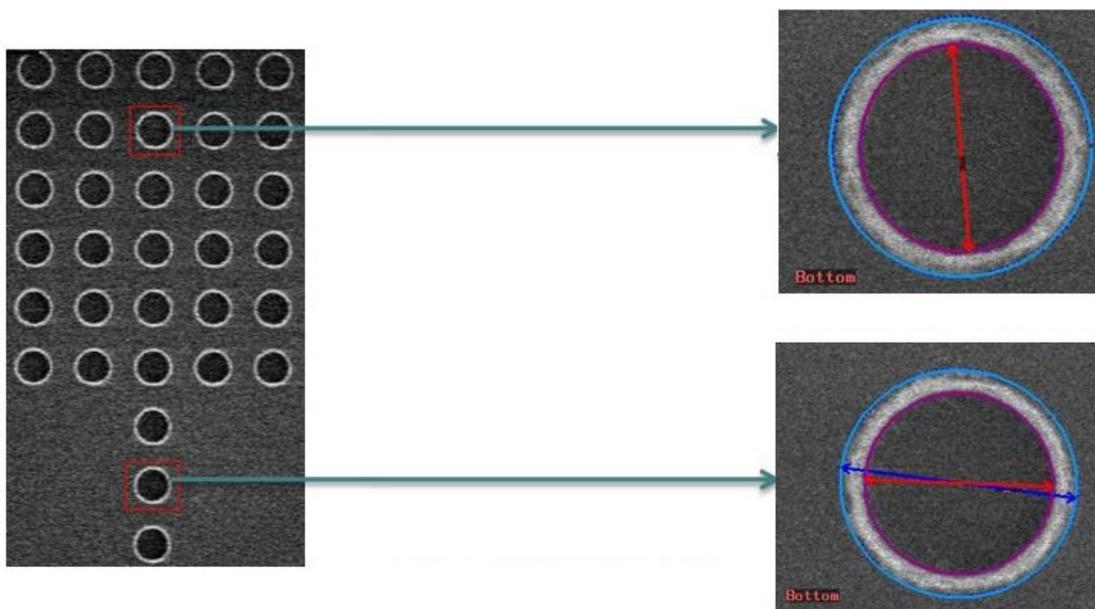


Рис. 9. Размеры контактных окон при различной плотности заполнения

Измерения могут проводиться по верхней плоскости контактного окна, нижней плоскости и центру. В данном эксперименте, измерения проводились по нижней плоскости контактного окна и были сведены в общую таблицу. Результаты измерений в координатах «фокус — доза экспозиции» для одиночных окон представлены в таблице 3, а для групповых – в таблице 4. Исходные параметры для экспонирования были выбраны, опираясь на сведения о материале резиста и предыдущих опытах: доза экспонирования $E=800\pm 14$ мДж/см², фокус $F = -0.1 \pm 0.1$, освещение анулярное $\sigma_{in}=0.35$, $\sigma_{out}=0.7$.

По результатам измерения были выбраны процессные окна. Из результатов, представленных в таблицах, были выбраны те из них, которые удовлетворяют заданному интервалу номинальных размеров контактных окон. Кроме того необходимо учитывать, что выбранные результаты должны быть представлены единой областью в таблице. После анализа результатов была выбрана область, для которой выполняются все поставленные ограничения. Эта область и является процессным окном для получения контактных слоев с необходимыми размерами.

Таблица 3

Результаты измерений одиночных контактных окон

Доза/Фокус	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
670	0.256	0.290	0.284	0.277	0.286	0.286	0.207
685	0.152	0.279	0.280	0.279	0.263	0.278	0.275
700	0.293	0.281	0.286	0.281	0.276	0.253	0.238
715	0.272	0.265	0.287	0.291	0.274	0.262	0.248
730	0.293	0.297	0.297	0.292	0.288	0.279	0.155
745	0.260	0.303	0.304	0.299	0.298	0.282	0.290

760	0.287	0.305	0.308	0.311	0.312	0.305	0.278
775	0.319	0.302	0.321	0.317	0.304	0.259	0.276
790	0.309	0.319	0.326	0.327	0.322	0.322	0.280
805	0.32	0.333	0.334	0.334	0.335	0.324	0.297
820	0.335	0.343	0.342	0.346	0.337	0.326	0.313

Таблица 4

Результаты измерений групповых контактных окон

Доза/Фокус	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
670	0.328	0.333	0.329	0.328	0.330	0.334	0.309
685	0.305	0.325	0.326	0.325	0.321	0.330	0.325
700	0.339	0.332	0.325	0.326	0.326	0.315	0.313
715	0.333	0.324	0.333	0.332	0.333	0.326	0.322
730	0.343	0.342	0.342	0.337	0.337	0.335	0.303
745	0.337	0.349	0.349	0.343	0.346	0.340	0.344
760	0.352	0.356	0.356	0.355	0.359	0.352	0.341
775	0.368	0.359	0.365	0.363	0.361	0.349	0.352
790	0.370	0.372	0.371	0.366	0.370	0.370	0.356
805	0.382	0.387	0.381	0.383	0.381	0.376	0.374
820	0.393	0.393	0.391	0.391	0.387	0.387	0.383

Как видно из представленных таблиц процессные окна для воспроизведения одиночных и групповых контактных окон не пересекаются. Это говорит о невозможности получать их в одном технологическом цикле, что отрицательно скажется на производстве, поскольку они находятся в одном топологическом слое.

Для решения проблемы ухода размеров контактных окон можно применить коррекцию линейных размеров топологии (OPC).

Это комплекс методов повышения разрешающей способности литографии путем корректировки топологии СБИС на стадии проектирования шаблона. Топология разбивается на геометрические примитивы, которые корректируются либо по заранее определенным правилам «rule based OPC», либо по результатам литографического моделирования «model based OPC».

Возможно, выделить два основных способа коррекции:

- элементы коррекции типа *bais* – эскиз элемента с данной коррекцией аналогичен эскизу элемента без коррекции, но размер элемента (ширина, высота, длина...) скорректирован на определенную величину (рисунок 10а);
- элементы коррекции типа *serif* – эскиз элемента с данной коррекцией аналогичен эскизу элемента без коррекции с добавлением фигур коррекции типа *serif* (рисунок 10б).

– элементами коррекции типа assist line – эскиз элемента с данной коррекцией аналогичен эскизу элемента без коррекции с добавлением фигур коррекции типа assist line (рисунок 10в).

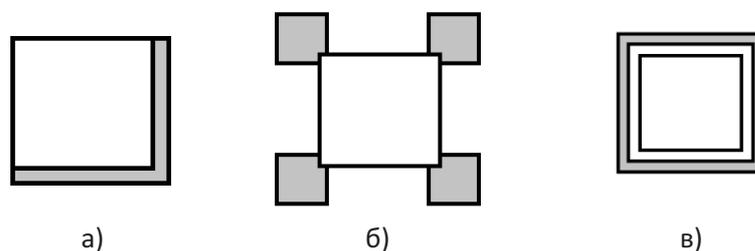


Рис. 10. Возможные способы коррекции

Объединив и рассчитав топологические коррекции для контактных окон в единую структуру, построив их модели в специальной проекционной среде Prolith 3D, можно создать необходимые правила применения разных видов топологической коррекции контактных окон при разработке технологических процессов производства СБИС с различными проектными нормами.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Были выбраны параметры для воспроизведения одиночных и групповых контактных окон с заданными размерами. Подбор режима был осуществлен путем построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции».

Однако для группы контактных окон и одиночных окон, результаты не пересекаются, что говорит о плохой воспроизводимости их в одном литографическом цикле.

Возможное решение – использование метода топологической коррекции при моделировании процесса.

Объединив и рассчитав топологические коррекции для контактных окон в единую структуру, построив их модели в специальной проекционной среде Prolith 3D, можно получить необходимые рекомендации по применению разных видов топологической коррекции слоя контактных окон при разработке технологических процессов производства СБИС с различными проектными нормами.

Список литературы

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / Под общ. редакцией В.А.Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. – 500 с.

2. Благова С.В. Разработка и исследование литографического процесса формирования топологических слоёв контактных окон по технологии с проектными нормами 0.25 мкм. Квалификационная работа бакалавра. — М: МГТУ, 2013.
3. Chris Mack. Fundamental principles of optical lithography. – Wiley, 2007. – 515 с.
4. Моро У. Микролитография. Принципы. Методы. Материалы. Часть 1. Перевод с английского под ред. канд. физ.-мат. наук Д.Ю. Зарослова — М: Мир, 1990. – 612 с.
5. Благова С.В. Оценка влияния толщины маскирующего покрытия фотошаблона на его литографические возможности. Режим доступа:
<http://sntbul.bmstu.ru/doc/593478.html> (дата обращения 27. 10. 2013).