

ЛАЗЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

КОРРЕКЦИЯ ФОРМЫ СУБМИКРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одной из проблем реализации процессов фотолитографии в производстве интегральных схем, которые во многом определяют уровень микроэлектроники в целом, является коррекция геометрической формы топологических элементов. Предлагаемый авторами метод основан на использовании структур компенсации оптического эффекта близости. Результаты, представленные в статье, получены на первой отечественной производственной линии, позволяющей изготавливать оригиналы топологии интегральных схем технологического уровня 350 нм. Моделирование процесса формирования изображений топологических структур фотошаблонов в светочувствительном слое (фоторезисте) проводилось на многоканальном лазерном генераторе изображений ЭМ-5189. В соответствии с разработанной математической моделью процесса экспонирования в Центре проектирования, каталогизации и изготовления фотошаблонов (МИЭТ) были изготовлены несколько комплектов оригиналов топологии.

Постоянное улучшение разрешающей способности оптических систем, предназначенных для реализации фотолитографических процессов, обуславливает необходимость использования фотошаблонов, изготовленных с применением техники увеличения разрешения. Формула Рэлея [1], используемая для определения разрешения оптических систем, позволяет дать количественную оценку результатов применения техники увеличения разрешения, что выражается в возможности уменьшения значения коэффициента K_1 , определяющего уровень технологии изготовления оптических компонентов. Чем меньше значение коэффициента K_1 , тем более высокое разрешение оптической системы можно получить при одних и тех же значениях длины волны экспонирующего излучения и числовой апертуры объектива, используемых в процессе фотолитографии. Если значение этого коэффициента равно 0,5 и более, то процесс фотолитографии можно выполнить при помощи традиционных, так называемых бинарных, шаб-

С.Аваков, д.т.н., В.Беспалов, д.т.н.,
В.Овчинников, Л.Пушкин, Е.Титко

лонов, имеющих два вида изображения – темное и светлое. Если значение коэффициента – 0,4 и менее, нужны элементы коррекции оптической близости (ОПС), которые обеспечивают улучшение формы элементов топологии на кремниевой пластине, а также фазосдвигающих элементов (PSM), повышающих контраст изображения на кремниевой пластине. При отработке технологии изготовления фотошаблонов структуры ОПС, предназначенные для улучшения качества формируемых изображений, могут использоваться в двух случаях: на этапе формирования топологических структур на фотошаблонах и на этапе переноса топологических структур с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

В первом случае описание структур ОПС вводится в проектные данные таким образом, что эти структуры не прорабатываются сами по себе, а только оказывают влияние на форму формируемых элементов топологии. При лазерной литографии такого эффекта можно достичь, изменяя интенсивность лазерного излучения (изменение дозы экспозиции).

Во втором случае описание структур ОПС вводится как описание элементов топологии, которые формируются на фотошаблоне. Описание таких специализированных структур можно получить, например, от кристалльного производства [2]. На их базе калибруется процесс формирования размеров базовых элементов топологии. При дальнейшем проекционном переносе изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину эти структуры не прорабатываются, так как их размеры меньше, чем разрешение установки совмещения и мультипликации (степпера).

Проблемы компенсации оптического эффекта близости и улучшения качества геометрического рисунка топологического элемента, формируемого в светочувствительном слое, возникают также и при производстве бинарных фотошаблонов. В этом случае на поверхности фотошаблона необходимо сформировать топологические элементы размером 0,6–1,5 мкм сложной конфигурации с произвольным углом наклона, которые при формировании изображения в маскирующем слое могут существенно отличаться от проектных данных. Для решения этой проблемы в соответствии с концеп-



цией бездефектного изготовления оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах [3, 4], основанной на расширении возможностей оптической литографии при формировании оригиналов топологии СБИС на фотошаблонах, для реализации технологии интегральных микросхем с проектными нормами 0,35–0,18 мкм авторами был разработан и внедрен метод компенсации эффектов близости и улучшения качества геометрической формы рисунка топологических элементов на фотошаблонах на базе многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5189 (МЛГИ).

МЛГИ ЭМ-5189 входит в состав комплекта специального технологического оборудования для бездефектного производства фотошаблонов, состоящего из генератора изображений, установки автоматического контроля топологии и установки устранения дефектов топологии. Комплект представляет собой основу технологической цепочки в производстве фотошаблонов и определяет технологический уровень этого производства [5].

Основные технические характеристики установки представлены в таблице. Для решения проблемы компенсации эффекта близости и улучшения качества формирования геометрических элементов топологического рисунка на фотошаблоне были разработаны алгоритм (рис.1) и математическая модель моделирования процесса экспонирования на генераторе изображений ЭМ-5189 в режиме онлайн.

Существующие методы коррекции формы элементов можно разбить на две группы: методы, основанные на моделировании процесса формирования изображения, и 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.

Методы первой группы наиболее эффективны при оценке процессов проекционного переноса изображений с фотошаблона на кремниевую пластину, так как во время этого процесса все изображение формируется целиком. Проекционная система генератора изображений строит изображение одного пиксела, поэтому результаты моделирования изображения, составленного из группы фрагментов, могут оказаться менее точными. По этой причине для коррекции формы элементов, сформированных на лазерном генераторе

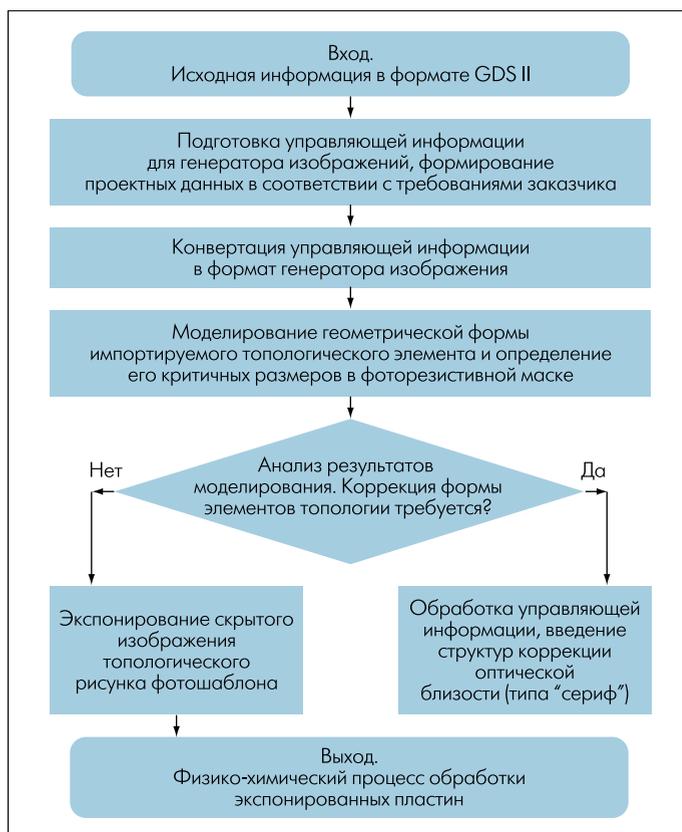


Рис.1. Алгоритмическое описание модели формирования фоторезистивной маски

ре изображений, лучшие результаты дает метод, основанный на эмпирических закономерностях.

Формула распределения энергии в пятне для лазерного генератора изображений имеет следующий вид:

$$I(x, y, u) = I_0 \times e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega_x^2} - \frac{2(y-y_0)^2}{\omega_y^2}}, \quad (1)$$

$$I_0 = F_0 + \left(\frac{(U-S-P_u) \times A_l}{-2 \times P_u} + \frac{(U-S+P_u) \times A_r}{2 \times P_u} \right) \times \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{U-S}{P_u} \right), \quad (2)$$

где F_0 – фон (т. е. минимальное значение интенсивности, при значении напряжения $U = S$); U – напряжение, B ; S –

Основные технические характеристики установки ЭМ-5189

Размер минимального основного элемента, нм	600
Размер минимального вспомогательного элемента, нм	400
Возможность изготовления RET-фотошаблонов	CoG, OPC, EPSPM, AltPSM*
Однородность размера, нм	40
Неровность края элементов топологии, нм	40
Однородность сканирования, нм	40
Совместимость комплекта фотошаблонов, нм	60
Совместимость второго слоя, нм	75
Время экспонирования участка 100×100мм, мин.	70
Размер рабочего поля в базовом исполнении, мм	215×215
Возможность увеличения размера рабочего поля по заказу, мм	300×300

* Фотошаблоны с переменным фазовым сдвигом (AltPSM) изготавливаются путем выполнения двух фотолитографий.

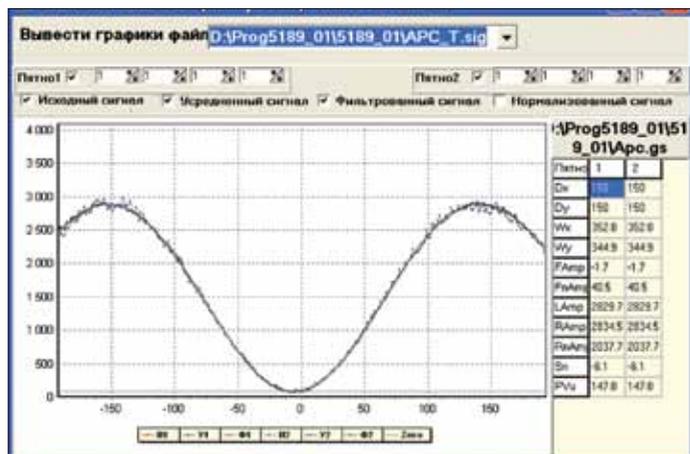


Рис.2. График зависимости интенсивности света от напряжения, подаваемого на электрооптический модулятор

смещение нуля (напряжение, при котором значение интенсивности светового пучка минимально), V ; P_u – полувольтное напряжение, V ; A_l – значение максимальной интенсивности при отрицательных напряжениях на электрооптическом модуляторе; A_r – значение максимальной интенсивности при положительных напряжениях; X_0, Y_0 – координаты центра пятна, nm ; W_x, W_y – размеры пятна (полуширины пятен на уровне $1/e^2$), nm .

Формула (1) – это стандартное двумерное нормальное распределение интенсивности по Гауссу. Как известно, интенсивность поляризованного света пропорциональна квадрату напряжения, подаваемого на электрооптическое устройство.

Формула (2) получена эмпирически, полагая, что при аттестации по интенсивности характер функции зависимости интенсивности света от напряжения, подаваемого на электрооптический модулятор (затвор), имеет следующий вид:

$$f(u) = \int_{x=-\infty}^{\infty} \int_{y=-\infty}^{\infty} I(x, y, u). \quad (3)$$

График функции (3) приведен на рис.2.

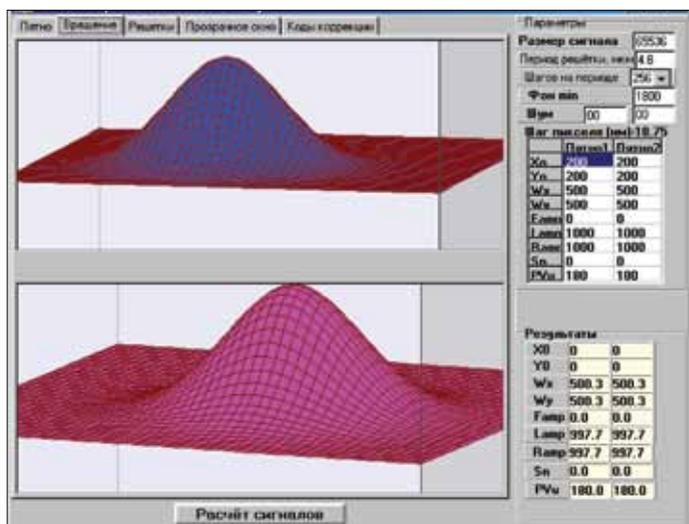


Рис.3. Модель пятна Гаусса

Эффект улучшения формы достигается за счет введения корректирующих коэффициентов для значений интенсивности. Минимальный элемент формируется двумя пятнами Гаусса (рис.3).

При этом значение длины формируемого линейного участка может быть представлено как функция размера вспомогательного элемента: $L = F(S)$, где L – длина линейного участка генерируемого элемента топологии; S – размер вспомогательного элемента (например, серифа).

Особенность разработанного метода моделирования в том, что после подготовки управляющей информации в формате генератора изображений ЭМ-5189 можно просмотреть, как будут сформированы в светочувствительном слое все критичные элементы топологического рисунка фотошаблона. Просмотр производится в режиме онлайн непосредственно на компиляторе установки до проведения операции "экспонирование". Затем по результатам анализа моделей принимается решение о необходимости введения элементов компенсации, их размерах и форме.

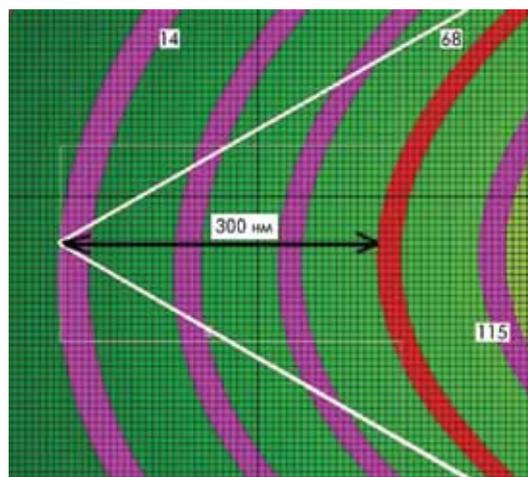


Рис.4. Модель изображения элемента в виде треугольника со стороной 2,5 мкм

Экспериментально достоверность разработанного метода моделирования подтверждена при изготовлении фотошаблона с элементами топологического рисунка в форме равнобедренного треугольника со стороной 2,5 мкм.

При моделировании процесса экспонирования было установлено, что размер топологического элемента в форме треугольника на фотошаблоне за счет распределения энергии и способа экспонирования будет меньше номинального значения на 300 нм с каждой стороны (рис.4), а реальный размер топологического элемента будет составлять всего 1,9 мкм вместо номинального значения 2,5 мкм.

По экспериментальным данным и в результате моделирования процесса экспонирования было исследовано влияние элементов коррекции на формирование геометрического размера элемента топологии, определены группы топологических элементов, для которых необходима компенсация оп-

тических эффектов близости, и разработана библиотека данных элементов (типа "сериф").

Было установлено, что размеры самих элементов коррекции влияют на формирование геометрического размера элемента топологии при моделировании процесса экспонирования (рис.5а, б).

Полученные экспериментальные данные (размеры и местоположение структур коррекции формы элементов топологии) использовались при подготовке управляющей информации для генерации изображения топологического рисунка фотошаблона в фоторезисте.

Фрагменты топологического рисунка с элементами типа "треугольник", сформированные в маскирующем слое фотошаблона, представлены на рис.6а, б. Номинальное значение размера стороны треугольника составляет 2,5 мкм.

Полученные результаты измерений фотошаблона с элементами коррекции полностью подтвердили эффективность разработанного метода моделирования процесса по улучшению качества геометрической формы элементов топологического рисунка при формировании скрытого изображения в фоторезистивном слое на лазерном генераторе изображений ЭМ-5189.

Таким образом, проблему компенсации эффекта близости и улучшения качества формирования геометрических

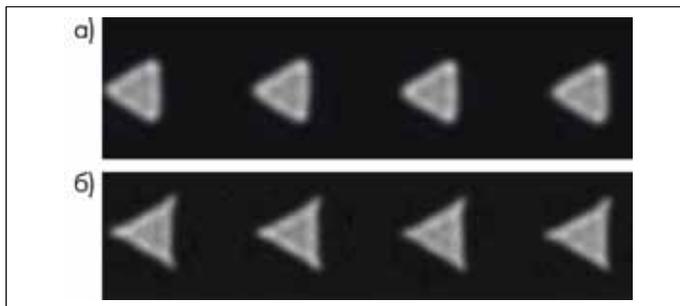


Рис.6. Топологический элемент (треугольник) в маскирующем слое: а – изображение без элементов, улучшающих качество формы элементов топологии (измеренное значение стороны треугольника равно 1,8840 мкм); б – изображение с применением элементов, улучшающих качество формы элементов топологии (измеренное значение стороны треугольника равно 2,5 мкм)

элементов топологического рисунка на фотошаблоне удалось решить: был разработан алгоритм и математическая модель процесса экспонирования непосредственно на генераторе изображений ЭМ-5189 в режиме реального времени. Определены также группы топологических элементов, которые нуждаются в компенсации оптических эффектов при формировании скрытого изображения оригиналов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах, и выбраны параметры фигур коррекции. В соответствии с разработанной математической моделью процесса экспонирования на лазерном генераторе изображений ЭМ-5189 были изготовлены бинарный фотошаблон для проекционной литографии с геометрией элементов топологического рисунка, полностью соответствующей проектным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alfred Kwok-Kit Wong. Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography. – SPIE PRESS, USA 2001, p.1–2131.
2. Sundermann F., Trouiller Y., Urbani J.C. et. al. OPC Structures for Maskshops Qualification for the CMOS 65nm and CMOS 45 nm nodes. – Proc. of SPIE, vol. 6533, OE, pp. 1–13.
3. Avakaw S. High productivity object-oriented defect detection algorithms for the new modular die-to-database reticle inspection platform. – Proc. of SPIE, vol. 5835, Jun 2005, pp. 290–299.
4. Avakaw S., Iouditski V., Pushkin L., Tsitko A. A complete set of the special process equipment for the defect-free production of reticles. The 23rd European Mask and Lithography Conference EMLC-2007. – Grenoble, France, January 22–25, 2007, pp. 29–30.
5. Аваков С.М., Карпович С.Е., Овчинников В.А., Титко Е.А. Операции контроля топологии в технологическом процессе изготовления фотошаблонов. – Электроника инфо, 2008, №1, с 45.

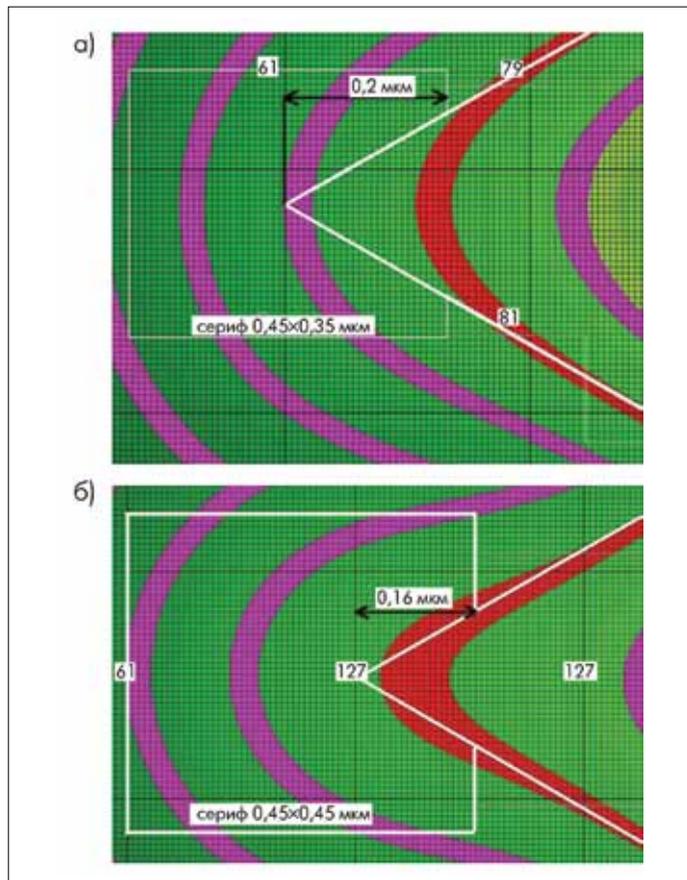


Рис.5. Влияние элементов коррекции на формирование геометрического размера элемента топологии: а – сериф 0,45×0,35 мкм с перекрытием вершины треугольника размером 200 нм; б – сериф 0,45×0,40 мкм с перекрытием вершины треугольника 160 нм