

УДК 621.382

Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии*

© 2019 г. Н. Н. Балан[§], В. В. Иванов, А. В. Кузовков, Е. В. Соколова, Е. С. Шамин*АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия*

Аннотация. В статье дан обзор основных моделей формирования фоторезистивной маски, используемых в настоящее время, и задач, в которых они применяются. Кратко рассмотрены этапы «полного» моделирования формирования маски, основанного на физико-химических принципах, в случае как традиционных нафтохинондиазидовых фоторезистов, так и фоторезистов с химическим усилением. Рассмотрена концепция основных применяемых в настоящее время компактных моделей, предсказывающих контур фоторезистивной маски для полноразмерной топологии изделия, а именно, моделей VT5 (Variable Threshold 5) и CM1 (Compact Model 1). Приводятся примеры некоторых расчетов с использованием как полного моделирования формирования маски, так и компактных моделей. При помощи полного моделирования формирования фоторезистивной маски был оптимизирован литографический стек для перспективного технологического процесса. Найдены оптимальные соотношения толщин для бинарного антиотражающего слоя, применяемого в литографическом процессе с водной иммерсией. При калибровке компактной модели VT5 решена задача определения оптимальной выборки калибровочных структур, максимально охватывающих пространство параметров оптического изображения, используя при этом минимальное количество структур. Для решения указанной задачи использовался кластерный анализ. Кластеризация проводилась методом k -средних. Оптимальный размер выборки составил от 300 до 350 структур, среднеквадратичная ошибка при этом составляет 1,4 нм, что незначительно превышает шум технологического процесса для 100 нм структур. Использование СЭМ-контуров при калибровке модели VT5 позволяет снизить среднеквадратическую ошибку по 40 структурам до 1,18 нм.

Ключевые слова: фоторезист, проекционная фотолитография, VT5, CM1, кластеризация методом k -средних

Введение

Как известно из работы [1], разрешающая способность проекционной фотолитографии (в данном случае имеется в виду минимальный размер полупериода печатаемых структур) может быть определена соотношением Рэлея

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA},$$

где λ — длина волны экспонирующего излучения; $NA = n \sin \theta$ — числовая апертура проекционного объектива (θ — апертурный угол; n — показатель преломления среды); k_1 — коэффициент, зависящий от факторов технологического процесса. В клас-

сической рэлеевской формуле для разрешающей способности оптических систем он равен 0,61 [2]. Разнообразные технические приемы, направленные на уменьшение k_1 , как правило, именуется в литературе термином «RET» (*Resolution Enhancement Techniques*). К указанным приемам, реализуемым при помощи методов т.н. вычислительной литографии [3], можно отнести:

- применение внеосевого освещения [4];
- введение фазовых элементов на фотошаблоне [5—7];
- коррекцию оптической близости [8].

Корректное использование RET позволяет довести значение k_1 до 0,28 (и даже менее), добиваясь пропечатывания в резисте элементов с размерами

Балан Никита Николаевич[§] — кандидат техн. наук, инженер-конструктор 1 категории, e-mail: nbalan@niime.ru; **Иванов Владимир Викторович** — заместитель начальника Отдела проектирования фотошаблонов, e-mail: vlaivanov@niime.ru; **Кузовков Алексей Валерьевич** — магистр, инженер-конструктор 1 категории, e-mail: akuzovkov@niime.ru; **Соколова Евгения Васильевна** — магистр, инженер-конструктор 2 категории, e-mail: evsokolova@niime.ru; **Шамин Евгений Сергеевич** — бакалавр, младший научный сотрудник, e-mail: eshamin@niime.ru

[§] Автор для переписки

* Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на I-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 21—23 октября 2019 г.

значительно менее длины волны используемого излучения.

Важнейшим разделом вычислительной литографии является моделирование процесса формирования фоторезистивной маски (ФРМ). Это моделирование, так или иначе всегда выполняемое при реализации перечисленных выше методик, направленных на уменьшение технологического коэффициента k_1 , реализуется в двух видах:

– «полное» моделирование, основанное на физико-химических принципах. Полное моделирование позволяет рассчитать трехмерную конфигурацию фоторезистивной маски на сравнительно небольших участках пластины (единицы или десятки мкм) (рис. 1, а);

– аппроксимационно-эмпирическое моделирование, дающее возможность относительно быстро рассчитать конфигурацию (как правило, только контур) получаемой маски для полноразмерной топологии кристалла при помощи ряда упрощенных интерполяционных моделей, называемых также «компактными» [9] (рис. 1, б). Этот вид моделирования по сути представляет собой различной степени сложности (в зависимости от решаемой задачи) пороговую обработку рассчитанного оптического изображения, формируемого в слое резиста проекционной системой литографической установки. Правила обработки изображения определяются путем анализа экспериментальных данных, полученных в результате измерения тестовых структур, пропечатанных на пластине в условиях реального производства (таким образом производится калибровка модели). Возможен также вариант модельного эксперимента, производимого при помощи полного моделирования пропечатки калибровочных структур.

В данной работе делается обзор основных используемых в настоящее время моделей формиро-

вания фоторезистивной маски и задач, в которых они применяются. Приводятся примеры некоторых расчетов для существующих и перспективных технологических процессов.

«Полное» моделирование формирования фоторезистивной маски на основе физико-химических принципов

«Полное» моделирование описывает с некоторой степенью подробности все этапы формирования фоторезистивной маски (рис. 2) — от нанесения пленок резистивного стека до экспонирования и проявления маски, пред- и постэкспозиционных термообработок и т. д. (см. рис. 2). Оно реализовано, как правило, в так называемых «процесных» САПР (KLA Prolith, GenISys Lab, Panoramic Hyperlith и др.), используемых при отработке технологических процессов фотолитографии, например, для подбора оптимальных параметров литографического стека, формы осветителя и т. п. Полное моделирование на основе физико-химических принципов используется при настройке процедуры коррекции оптической близости, при разработке правил расстановки вспомогательных непропечатываемых структур [10], определении правил введения фазового сдвига [5, 6, 11, 12]. В процессе разработки новых модификаций фоторезиста такой вид моделирования позволяет предсказывать зависимость конфигурации формируемой маски от концентрации отдельных составляющих исследуемой композиции.

Основным процессом, рассматриваемым при полном моделировании формирования фоторези-

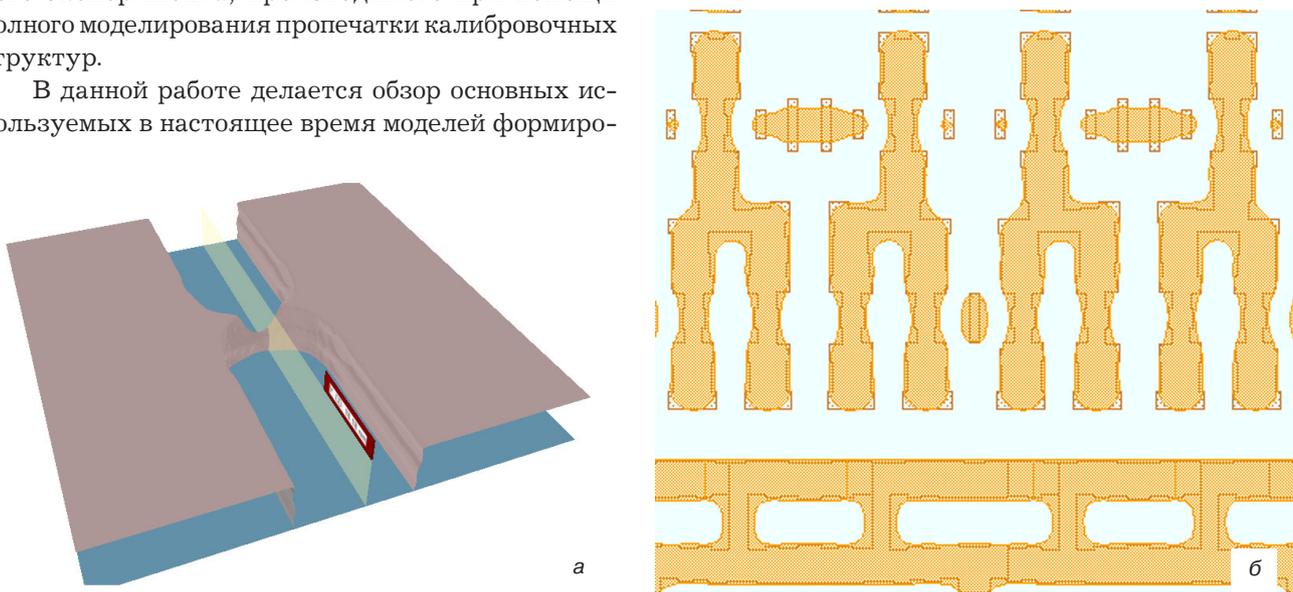


Рис. 1. Примеры результатов моделирования формирования фоторезистивной маски:

а — расчет трехмерной конфигурации фоторезистивной маски при помощи «полного» моделирования, основанного на физических принципах (САПР KLA Prolith); б — расчет контура фоторезистивной маски при помощи компактных моделей (САПР Mentor Graphics Calibre)

Fig. 1. Resist mask formation simulation examples: (a) 3D resist configuration computation using “full” simulation based on physical fundamentals (KLA Prolith CAD); (b) resist contour computation using compact models (Mentor Graphics Calibre CAD)

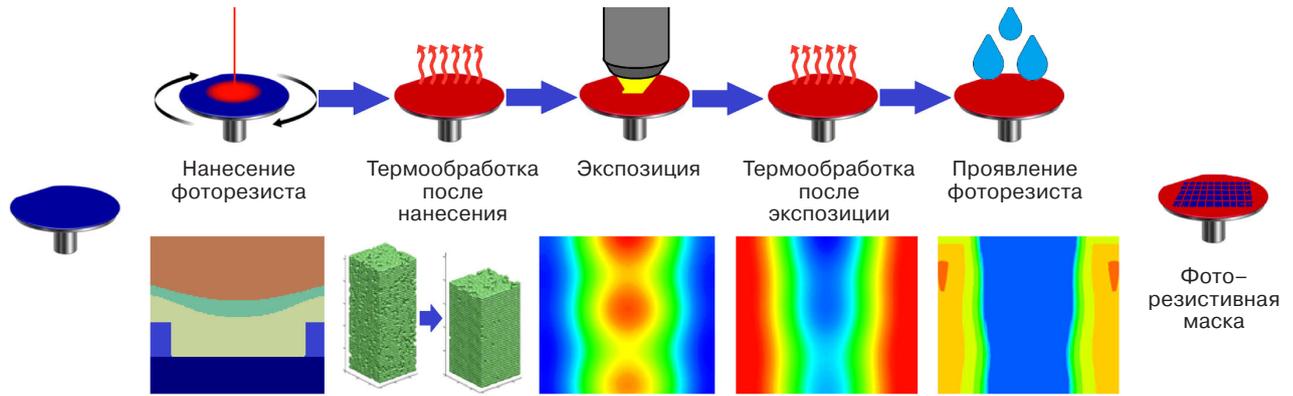


Рис. 2. Процесс формирования фоторезистивной маски
Fig. 2. Resist mask formation process

стивной маски, является образование скрытого изображения в слое фоторезиста при экспозиции.

Двумерное распределение интенсивности в плоскости пластины при освещении фотошаблона протяженным пространственно-некогерентным источником излучения (так называемое «воздушное» изображение) рассчитывается, как правило, методом Хопкинса [1, 13]

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} TCC(f_x, \tilde{f}_x) \Gamma_m(f_x) T_m^*(\tilde{f}_x) e^{2\pi i(f_x - \tilde{f}_x)x} df_x d\tilde{f}_x,$$

где $TCC(f_x, \tilde{f}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f_x + f'_x) P^*(\tilde{f}_x + f'_x) \tilde{S}(f'_x) df'_x$ — так называемый «передаточный кросс-коэффициент» (transmission cross-coefficient), зависящий только от свойств оптической системы и формы освещителя;

$$P(f_x) = \begin{cases} 1, & f_x \leq \frac{NA}{\lambda}; \\ 0, & f_x > \frac{NA}{\lambda} \end{cases} \text{ — функция зрачка;}$$

$\tilde{S}(f_x)$ — нормализованная функция осветителя; $T_m(f_x) = F\{E_i(x)t_m(x)\}$ — фурье-образ произведения амплитуды падающего на фотошаблон излучения на функцию пропускания фотошаблона (в общем случае комплексную), собственно и являющуюся исходным изображением. Для простоты рассмотрен одномерный случай.

Главное достоинство метода Хопкинса состоит в том, что передаточный кросс-коэффициент TCC (в двумерном дискретном случае это четырехмерная матрица) может быть определен единственный раз, после чего можно производить расчеты распределения интенсивности для абсолютно различных исходных изображений с использованием уже посчитанного TCC , что значительно сокращает время расчета.

Следующим этапом является определение объемного распределения интенсивности светового излучения в пленке фоторезиста. Оно может быть рассчитано с использованием ряда приближений,

простейшим из которых является представление распределения интенсивности в форме

$$I(x, z) = I_I(x)I_S(z),$$

где $I_I(x)$ — интенсивность «воздушного» изображения, определенная, например, методом Хопкинса; $I_S(z)$ — распределение интенсивности по толщине пленки, рассчитываемое с использованием соотношений Френеля [1, 2] в предположении нормального падения плоской волны на поверхность резиста. Это простейшее приближение было использовано Ф. Диллом в 1975 г. в работе [14] при выводе известных уравнений, описывающих формирование скрытого изображения в слое фоторезиста. Распределение интенсивности по толщине пленки часто имеет осциллирующий характер в силу интерференции прошедшей и отраженной волн. Применение антиотражающих слоев (BARC — Bottom Anti-Reflecting Coating), согласованных по толщинам и показателям преломления с пленкой резиста, позволяет свести к минимуму осцилляции интенсивности. К сожалению, рассмотренное приближение удовлетворительно работает лишь для малых числовых апертур, в случае же $NA > 0,35$ необходимо использовать более сложные и точные модели, подробно описанные в работе [1].

Далее необходимо произвести моделирование формирования скрытого изображения в слое фоторезиста в процессе его засветки. Здесь используется закон Гротгуса—Дрейпера (первый закон фотохимии), согласно которому химическую реакцию в веществе может вызвать только поглощенная часть падающего на него света. Поглощение же света, в свою очередь описывается законом Бугера—Ламберта, определяющим падение интенсивности при прохождении излучения в поглощающей среде

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z),$$

где I_0 — интенсивность падающего на материал излучения; z — координата внутри материала с на-

чалом осчета на поверхности резистивной пленки; α — коэффициент поглощения [1].

Важно понимать, что каждая составляющая светочувствительной композиции имеет свой молярный коэффициент поглощения, и, в общем случае, значение α зависит от концентраций этих компонент. Для типовых позитивных фоторезистов, предназначенных для работы на длинах волн 436 и 365 нм, основными компонентами являются новолачная смола и фотоувствительная составляющая на нафтохинондиазидах (НХД или DNQ) (рис. 3). Кроме того, присутствуют органический растворитель и продукты фотохимической реакции (рис. 4).

Процесс преобразования оптического изображения в скрытое (то есть кинетика фотохимической реакции) описывается упомянутой ранее системой дифференциальных уравнений Дилла [14]

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -I(z,t)[AM(z,t) + B];$$

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial t} = -I(z,t)M(z,t)C,$$

где t — время; $M(z,t)$ — относительная концентрация фотоувствительной составляющей; A — часть коэффициента поглощения, зависящая от экспозиции; B — постоянная часть коэффициента поглощения; C — скорость разрушения фотоувствительной составляющей резиста. Параметры A , B и C , называемые также параметрами Дилла, определяются экспериментально (см., например, [15, 16] или [1]). Разрушение фотоувствительной составляющей (см. рис. 4) приводит к резкому увеличению растворимости резистивной пленки в щелочных растворах.

В ходе моделирования засветки и проявления НХД фоторезистов должны быть учтены эффекты, вызываемые предварительной термообработкой, а также влияние остаточного растворителя на диффузию продуктов реакции в ходе постэкспозиционной термообработки. Основное назначение предварительной термообработки (или термообработки после нанесения (см. рис. 2) состоит в испарении и диффузии растворителя, кроме того, происходит частичное

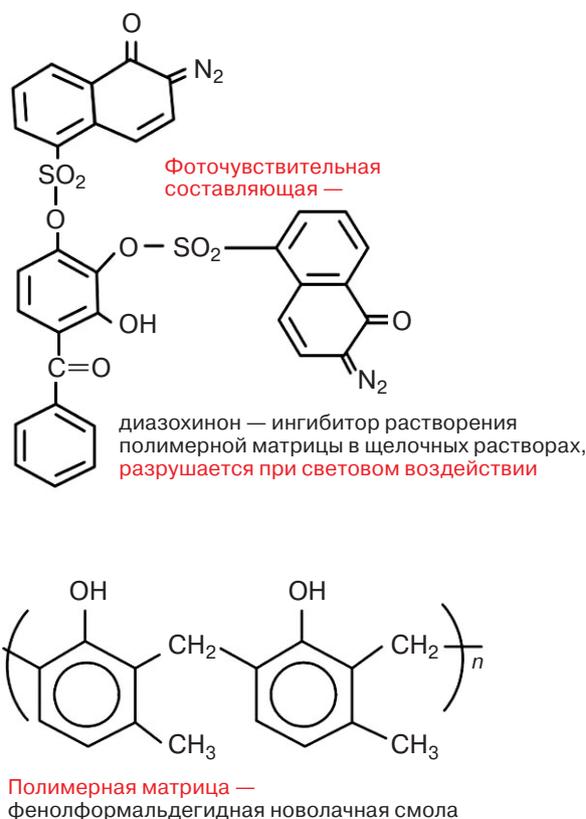


Рис. 3. Основные компоненты НХД-фоторезистов

Fig. 3. Main DNQ photoresist components

разложение светочувствительной составляющей. Эти явления в конечном итоге приводят к некоторой вариации параметров Дилла.

При использовании рабочих длин волн от 248 нм и менее традиционные фоторезисты перестают эффективно работать по причине сильного поглощения света новолачной смолой. Соответственно, были созданы так называемые «химически усиленные» фоторезисты, в которых с излучением реагирует фотокислотный генератор (PAG — *Photo Acid Generator*) (рис. 5). Выделенная при экспозиции кислота модифицирует полимерную матрицу при постэкспозиционной термообработке, делая полимер растворимым (рис. 6) и практически не расходуясь в процессе реакции. Здесь реализуется принцип

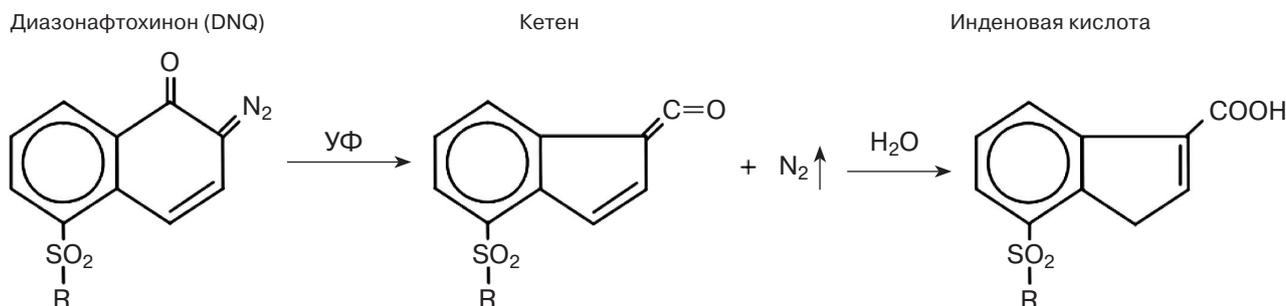


Рис. 4. Разрушение НХД в процессе засветки УФ-излучением

Fig. 4. DNQ resist UV decomposition

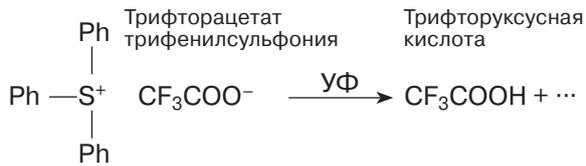


Рис. 5. Разложение фотокислотного генератора под действием УФ-излучения в химически усиленных фоторезистах
 Fig. 5. Photoacid generator UV decomposition in chemically enhanced resists

катализа: индуцированная нагреванием кислота диффундирует внутрь полимера и реагирует с макромолекулами, вызывая разрушение защитных гидрофобных групп с образованием гидрофильных, после чего вновь высвобождается [17]. Число реакционных актов на один поглощенный квант света составляет около сотни.

Кроме того, в химически усиленные резисты вводятся в небольшой концентрации специальные замедлители реакции — гидроксиды, призванные нейтрализовать кислоту, выделенную на низких дозах экспозиции. Это позволяет добиться необходимой пороговой характеристики резиста, уменьшить чувствительность резиста к диффузии кислоты в неэкспонированные участки, а также к его загрязнению основаниями из атмосферы.

Процесс экспонирования химически усиленных резистов также описывается системой уравнений Дилла, однако в данном случае ключевое значение приобретает моделирование кинетики процесса постэкспозиционной термообработки, значительно более химически сложного в сравнении с НХД-фоторезистами.

Далее экспонированные участки удаляются в щелочном проявителе, в качестве которого для обоих видов фоторезистов используется, как правило, раствор гидроксида тетраметиламмония. Существует ряд методов моделирования процесса проявления экспонированного фоторезиста, использующих достаточно сложные и ресурсоемкие модели, основанные на теории клеточных автоматов [18], однако

зачастую применяется простое эмпирическое соотношение для скорости проявления [17]

$$D(M) = \exp(E_1 + E_2M + E_3M^2),$$

где $M(x,z)$ — скрытое изображение или концентрация светочувствительной составляющей; E_1, E_2, E_3 — коэффициенты, определяемые экспериментально.

Возможность расчета профиля ФРМ в процессе полного моделирования позволяет прогнозировать возникновение стоячих волн, получать так называемые «колебательные кривые» — зависимости какого-либо параметра (например, критического размера или дозы полной засветки) от толщины фоторезистивной маски, а также оценивать так называемые «окна процесса» — области в координатах доза-дефокусировка, в которых формируемая фоторезистивная маска сохраняет геометрические параметры, приемлемые для технологического процесса.

Применение «компактных» моделей при расчете контура ФРМ для полноразмерной топологии изделия

Основное предназначение аппроксимационно-эмпирического моделирования при расчете контура ФРМ состоит, как правило, в быстром получении двумерной геометрии фоторезистивной маски на полноразмерной топологии литографического слоя в процессе реализации топологической коррекции искажений, обусловленных эффектом оптической близости. Как уже отмечалось выше, такое моделирование по сути является пороговой обработкой двумерного воздушного изображения, рассчитанного методом Хопкинса.

Так называемые «конструкторско-технологические» САПР, реализующие такое моделирование, демонстрируют колоссальный выигрыш по времени расчета контура ФРМ в сравнении с про-

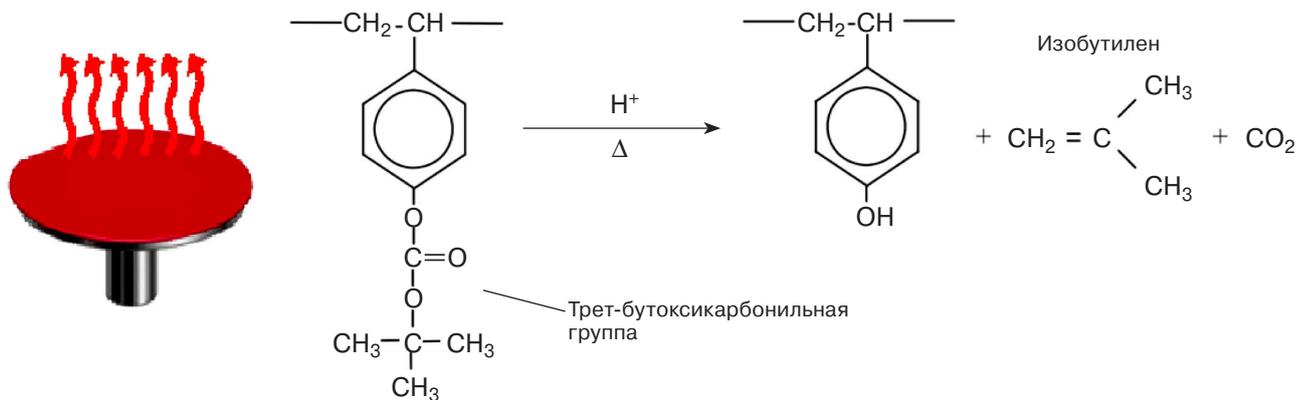


Рис. 6. Разрушение гидрофобных групп полимерной матрицы химически усиленных фоторезистов в процессе постэкспозиционной термообработки
 Fig. 6. Polymer matrix hydrophobic group decomposition in chemically enhanced resists during post-exposure heat treatment

цессными [19], однако точность в данном случае находится в сильной зависимости от количества и качества калибровочных данных, которые, помимо экспериментов, в некоторых случаях могут быть получены при помощи процессных САПР.

Иногда становится целесообразным применение компактных моделей формирования ФРМ для задач процессного моделирования. Таким образом, например, может быть произведена оптимизация формы осветителя [4] или экспресс-оценка площади окна процесса [20], опираясь по сути лишь на рассчитанное оптическое изображение.

Существует несколько видов компактных моделей, применяемых для расчета двумерной конфигурации ФРМ для полноразмерной топологии изделия. Наиболее популярными в настоящее время являются модели VT5 (Variable Threshold 5) и CM1 (Compact Model 1), в частности, реализованные в САПР Mentor Graphics Calibre.

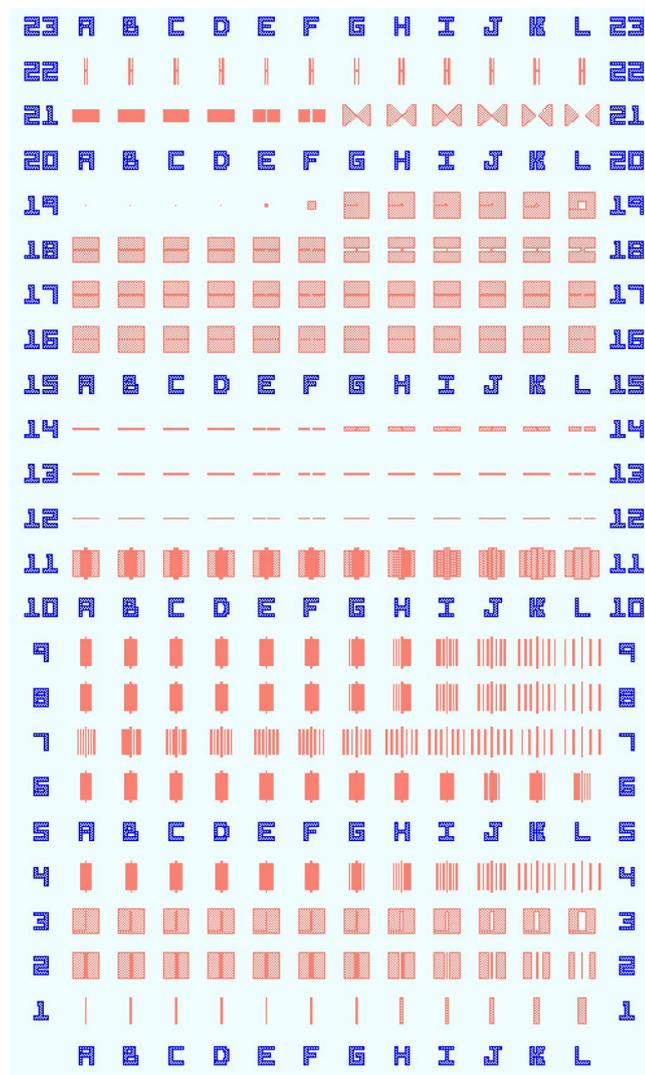


Рис. 7. Пример тестовой калибровочной матрицы (упрощенной), предназначенной для калибровки компактных моделей формирования ФРМ

Fig. 7. Example of test calibration matrix (simplified) for compact model calibration

Модель VT5 является результатом развития более простых моделей переменного порога, таких как VTR и VTRE, и функционирует по следующему принципу. На границах полигонов топологии расставляются контрольные метки, для которых определяются параметры изображения: максимальная и минимальная интенсивность вдоль метки, а также первая и вторая производная интенсивности по координате в точке, где интенсивность равна значению, называемому «опорным» порогом (*reference threshold*). Положение стенки фоторезиста определяется через значение порога T , зависящее в свою очередь от установленных параметров воздушного изображения $T = T(I_{max}, I_{min}, dI/dx, dI^2/dx^2)$. Функция определения порога T представляет собой, как правило, полином первого или второго порядка. Точность моделирования положения стенки фоторезиста в рамках рассматриваемой модели может быть увеличена, если вместо исходного изображения использовать результат его свертки с предварительно определенным набором ядер и уже к полученному распределению применять функцию порога. Такой подход позволяет учесть эффекты диффузии компонент фоторезиста и эффекты травления [21].

Калибровка модели сводится к определению коэффициентов полинома T в процессе анализа результатов пропечатки так называемой тестовой калибровочной матрицы, содержащей набор простых структур (рис. 7), обеспечивающих максимально возможный охват пространства параметров воздушного изображения.

Более совершенная модель CM1 дает в качестве результата контур, полученный срезом на постоянном пороге поверхности $R(x,y)$, соответствующей скрытому изображению в резисте [22]. Поверхность $R(x,y)$ определяется линейной комбинацией

$$R(x,y) = \sum_i c_i M_i(x,y), \tag{4}$$

где c_i — коэффициенты, определяемые при калибровке модели, $M_i(x,y)$ — члены, получаемые преобразованиями оптического изображения $I(x,y)$:

$$M(x,y) = \left[\left(\nabla^k I_{\pm b}(x,y) \right)^n \otimes G_{s,p}(x,y) \right]^{1/n}, \tag{5}$$

где $G_{s,p}(x,y)$ — функция Гаусса—Лагерра, параметры k, n и r для каждого слагаемого задаются пользователем, а b и s вычисляются в процессе калибровки модели. Параметр b определяет кусочно-линейное преобразование функции $I(x,y)$ и соответствует характеру взаимодействия кислот и оснований в слое фоторезиста, а s — длине диффузии активных составляющих.

Модель CM1 демонстрирует большую точность по отношению к VT5 в технологиях уровня 65 нм и менее, в частности, по причине того, что в ней опо-

средовано используется моделирование на основе физических принципов.

Подбор оптимальных толщин слоев литографического стека

В настоящем разделе описывается пример применения «полного» моделирования формирования ФРМ на основе физических принципов в задаче подбора оптимальных толщин слоев литографического стека для перспективного технологического процесса.

В ситуации, когда слои литографического стека не согласованы по толщинам и показателям преломления, общий коэффициент отражения стека квазипериодически меняется в диапазоне 20—60 % с изменением первоначальной толщины пленки резиста. Поэтому примерно в таких же пределах меняется эффективное значение энергии, поглощаемой в слое резиста, а, следовательно, — и обрабатываемый критический размер структуры. Кривая, описывающая подобную зависимость, называется в литературе «колебательной кривой» (*Swing Curve*) [1]. Варьирование толщин и показателей преломления слоев стека (в особенности, антиотражающих слоев), как правило, позволяет добиться минимума амплитуды описанной колебательной зависимости путем минимизации длины колебательной кривой

$$L = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \sqrt{1 + \left(\frac{dCD(h)}{dh}\right)^2} dh = \min.$$

В данном случае моделировался литографический процесс на длине волны 193 нм в иммерсионной среде с показателем преломления 1,44 с ослабляющим фазовым фотошаблоном с коэффициентом пропускания темных областей 0,06 и вращением фазы 180°. Тон фотошаблона предполагался темным. Параметры осветителя: Quasar, ориентация Cross, угол выреза = 34°, $\sigma_{\text{внеш.}} = 0,9$, и $\sigma_{\text{внут.}} = 0,8$. Исследовалась периодическая линейчатая структура, состоящая из светлых линий шириной 50 нм, расположенных с периодом 100 нм. На рис. 8, а изображены колебательная CD-кривая и профиль ФРМ высотой 120 нм на дозе 21,398 мДж/см² для неоптимизированного литографического стека. Из рис. 8 видно, что рассмотренный литографический стек не является оптимальным.

Варьирование толщин нижних антиотражающих слоев с одновременным расчетом и анализом получаемых колебательных CD-кривых дает возможность подобрать оптимальные параметры литографического стека.

Наилучшими значениями толщин нижних антиотражающих слоев оказались

hB1 = 22 нм и hB2 = 26 нм. Соответствующие данным значениям толщин колебательная CD-кривая стека и профиль резистивной маски высотой 120 нм на дозе 21,398 мДж/см². приведены на рис. 8, б. Видно, что в профиле резиста отсутствуют стоячие волны. Данный литографический стек был признан приемлемым. Толщины слоев стека, а также действительные и мнимые компоненты показателей преломления материалов пленок стека приведены в таблице.

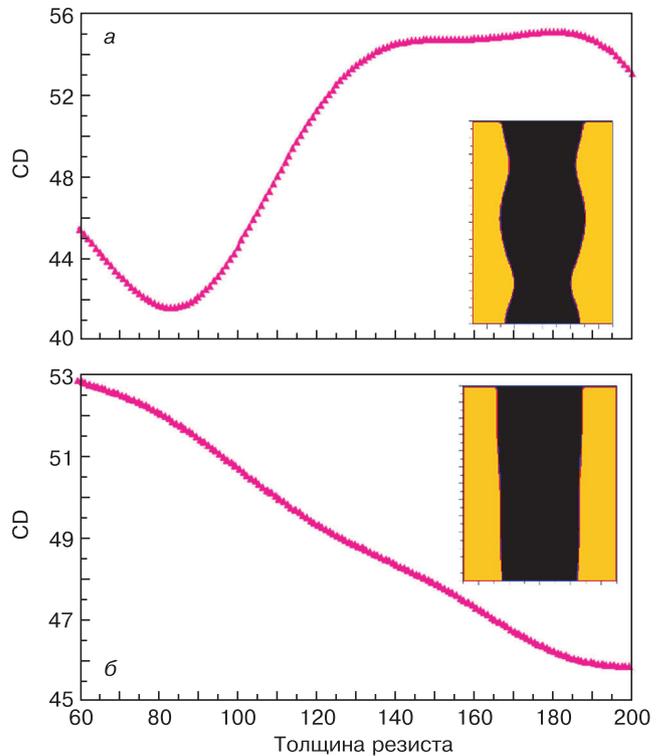


Рис. 8. Колебательные CD-кривые и профили резистивной маски (высота 120 нм, доза 21,398 мДж/см²): а — для неоптимизированного литографического стека; б — для оптимизированного литографического стека

Fig. 8. CD swing curves and resist profiles (120 nm height, 21.298 mJ/cm² dose): (a) non-optimized lithographic stack; (b) optimized lithographic stack

Параметры литографических стеков
[Lithographic stack parameters]

Литографический стек	Обозначение	Неоптимальный	Оптимальный
Иммерсия	nI	1,44	1,44
BARC1	hB1, нм	16	22
	nB1	1,9064	1,9064
	kB1	0,6711	0,6711
BARC2	hB2, нм	23	26
	nB2	1,7021	1,7021
	kB2	0,196	0,196
Резист	hR, нм	120	120
	nR	1,706	1,706
	kR	0,00922	0,00922
Иммерсионное защитное покрытие	hI, нм	90	90
	nI	1,53	1,53

Калибровка модели VT5 при разработке процедуры топологической коррекции

Наиболее длительным этапом в процедуре калибровки компактных моделей является сбор измерений, если не принимать во внимание изготовление образцов. В случае неавтоматизированных измерений сбор данных может занимать десятки часов, что существенно задерживает время разработки ОРС-модели и ОРС-решения в целом. Необ-

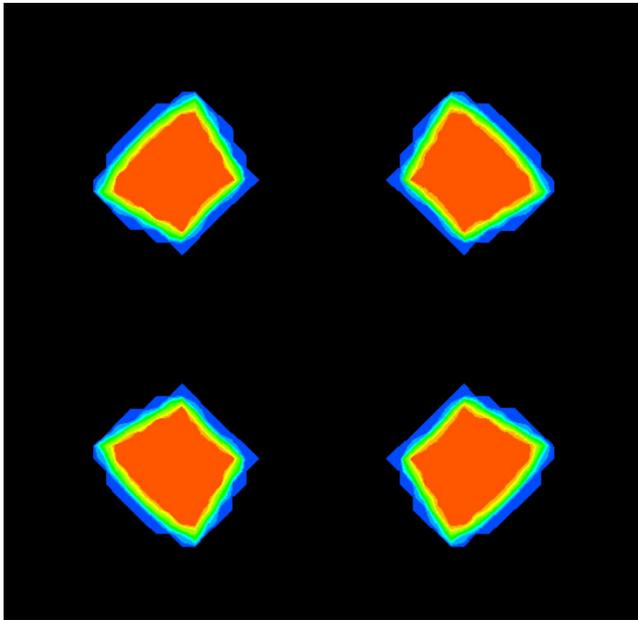


Рис. 9. Форма осветителя (Quasar, $\sigma_{\text{внут.}} = 0,5$, $\sigma_{\text{внеш.}} = 0,8$, угол выреза = 30°), используемая в литографическом процессе, для которого калибровалась модель VT5

Fig. 9. The shape of the illuminator (Quasar, $\sigma_{\text{int}} = 0.5$, $\sigma_{\text{ext}} = 0.8$, cut angle = 30°) used in the lithographic process for which the VT5 model was calibrated

ходимость снижения количества измерений ставит нетривиальную задачу определения оптимального набора структур, подлежащих измерению. Как уже было отмечено, оптимальная выборка должна максимально охватывать пространство параметров оптического изображения, включая при этом минимальное количество структур.

Используемая калибровочная площадка включала 3300 тестовых периодических линейчатых структур с размером от 60 до 200 нм и с периодом от 140 до 1200 нм. Целью исследования являлось определение минимального количества структур, обеспечивающего приемлемую точность модели, которая оценивалась сравнением результатов моделирования с результатами измерений для 50 структур различной геометрии, не использовавшихся при калибровке. Характеристикой точности было выбрано среднее квадратическое значение ошибки результатов моделирования.

Длина волны рабочего излучения $\lambda = 193$ нм, $NA = 0,75$. Источник освещения — Quasar, $\sigma_{\text{внут.}} = 0,5$, $\sigma_{\text{внеш.}} = 0,8$, угол выреза = 30° (рис. 9).

В ходе исследования формировались различные наборы данных, включавшие от 40 до 360 структур с шагом 40. Каждой тестовой структуре соответствует точка в пространстве параметров изображения (рис. 10, а). При отборе точек, необходимо обеспечить максимальный охват области пространства, которую охватывает весь набор из 3300 структур. Провести такую фильтрацию позволяет кластерный анализ [23]: точки пространства группируются в кластеры, в каждом из которых геометрически выбирается одна точка-центроид (рис. 10, б). Центроиды соответствуют тестовым структурам, включаемым в

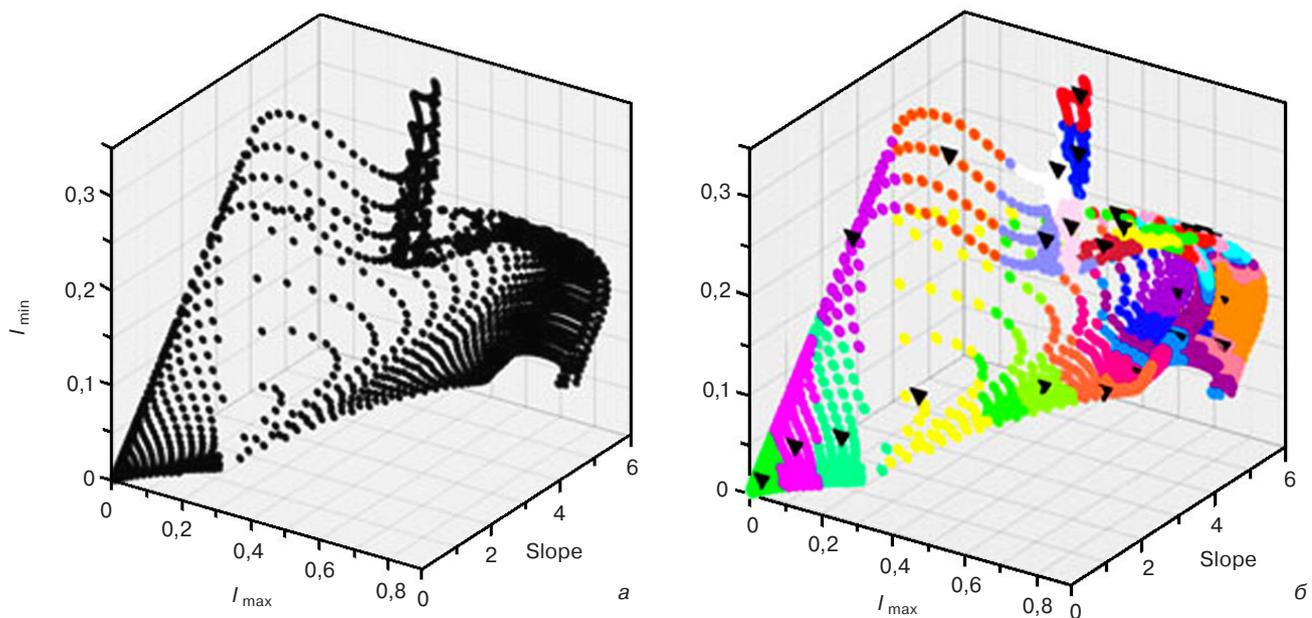


Рис. 10. Кластеризация точек в пространстве параметров изображения

Fig. 10. Point clustering in image parameters space

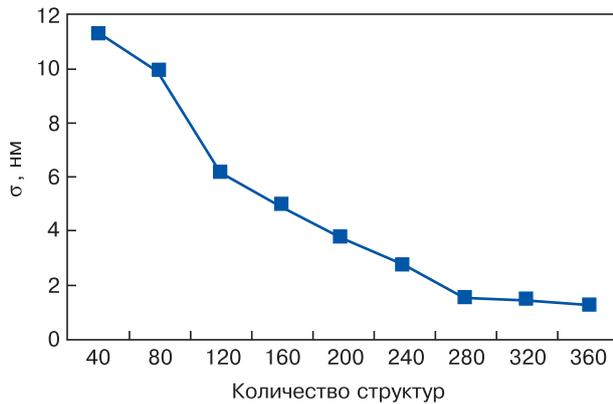


Рис. 11. Зависимость точности модели от числа измерений

Fig. 11. Model accuracy vs number of measurements

конечный набор. В данной работе кластеризация производилась методом k -средних.

Для каждого из сформированных наборов данных при помощи САПР Calibre (*Mentor Graphics*) была откалибрована модель VT5 и исследована её точность. Результат представлен на рис. 11.

Как и ожидалось, наборы, состоящие из 40 и 80 структур, дают большую ошибку, которая монотонно уменьшается с увеличением количества измерений. После 280 спад отклонения уменьшается и выходит почти на постоянный уровень 1,4 нм. Таким образом, можно заключить, что оптимальным вариантом будет использование для калибровки от 300 до 350 тестовых структур, при условии формирования выборки методом кластерного анализа. Использование СЭМ-контуров при калибровке модели VT5 позволяет снизить среднеквадратическую ошибку по 40 структурам до 1,18 нм. Результат моделирования показан на рис. 12.

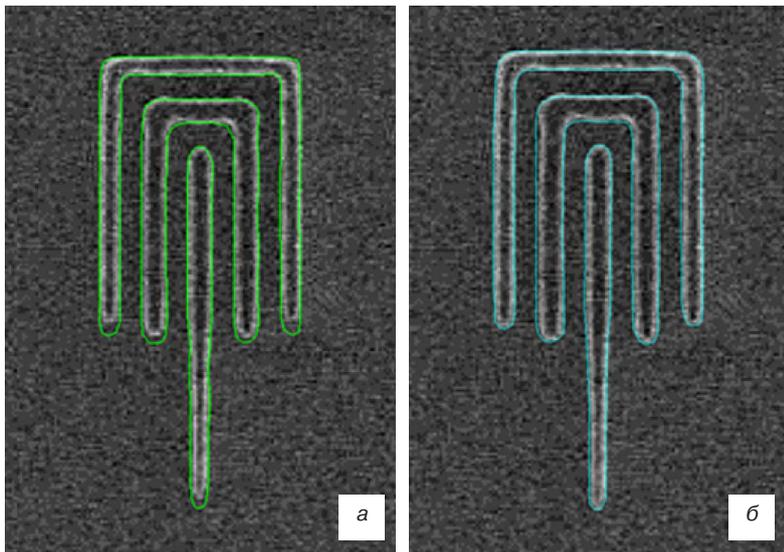


Рис. 12. Моделирование контура ФРМ:

а — модель откалибрована без использования СЭМ изображений;

б — калибровка проведена с использованием СЭМ контуров нескольких тестовых структур

Fig. 12. Resist contour simulation: (a) model calibrated without SEM images; (b) calibrated with SEM images of contours for several test structures

Заключение

В настоящей работе были описаны оба существующих подхода к моделированию процесса формирования фоторезистивной маски и продемонстрировано их применение в задачах разработки технологических процессов проекционной фотолитографии и методов топологической коррекции. При помощи полного моделирования формирования фоторезистивной маски был оптимизирован литографический стек для перспективного технологического процесса. Калибровка пороговой модели VT5 по различным наборам данных показала, что кластерный анализ является эффективным средством формирования выборки, а оптимальный размер выборки составляет от 300 до 350 структур.

Библиографический список

1. Mack C. A. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. John Wiley & Sons, 2007. 534 p.
2. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. М.: Наука, 1973. 722 с.
3. Ma X., Arce G. R. *Computational lithography*. John Wiley & Sons, Inc, 2010. 226 p. DOI: 10.1002/9780470618943
4. Балан Н. Н., Иванов В. В., Кузовков А. В. Форма осветителя как ключевой фактор при разработке методики дифракционной коррекции изображения в проекционной фотолитографии для технологий уровня 65 нм и менее. HOLOEXPO 2019. XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. Тезисы докладов. 2019. С. 208—215.
5. Балан Н. Н., Иванов В. В., Кузовков А. В., Шамин Е. С. Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии // *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*. 2019. № 2. С. 54—63.
6. Горнев Е. С., Гушин О. П., Мясин Л. М. Технология субмикронной оптической проекционной литографии с использованием фотошаблонов с фазовым сдвигом // Тезисы докладов Всероссийской НТК «Микро- и нанозлектроника 2001». Звенигород, 2001. Т. 1. С. 2—5.
7. Machin M., Savinskii N., Gutchin O., Prosii A., Gornev E. An integrated framework for aerial image simulation and proximity correction // *Software Development for Process and Materials Design, Satellite Symposium of Nano and Giga Challenges in Microelectronics, Satellite (NGCM 2002)*. Moscow, 2002.
8. Красников Г. Я., Синюков Д. В. Проблемы и перспективы развития методов коррекции оптической близости для современных уровней технологии // Труды научного совета РАН «Новые материалы с заданными функциями и высококачественные наноматериалы для создания элементной базы информационно-вычислительных и управляющих машин». М., 2018. Т. 2. С. 17—22.
9. Родионов И. А., Шахнов В. А. Расчет значений весовых коэффициентов топологических структур для калибровки литографических моделей // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2010. № 5. С. 149—160.
10. Шамин Е. С., Ипатова Е. В., Кузовков А. В., Иванов В. В., Балан Н. Н. Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения // *Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника*. 2019. Вып. 2(174). С. 36—41.
11. Савинский Н. Г., Берников А. Е., Курчидис В. А., Горнев Е. С., Гушин О. П., Просий А. Д. Оптическая субмикронная литография с фазосдвигающими шаблонами // Сб. трудов Юбилейной 2-й научно-технической конференции АООТ «НИИМЭ и Микрон» «Разработка, технология и производство полупроводниковых микросхем». М.; Зеленоград: Микрон-принт, 1999. С. 53—55.

12. Горнев Е. С., Гуцин О. П., Просий А. Д., Савинский Н. Г. Фазосдвигающие маски для низкоапертурных степперов // Сб. трудов 3-й научно-технической конференции АООТ «НИИМЭ и Микрон» «Разработка, технология и производство полупроводниковых микросхем». М.; Зеленоград: АООТ «НИИМЭ и Микрон», 2000. Т. 1. С. 115.

13. Hopkins H. H. On the diffraction theory of optical images // Proc. R. Soc. Lond. A. Mathematical and Physical Sciences. 1953. V. 217, Iss. 1130. P. 408—432. DOI: 10.1098/rspa.1953.0071

14. Dill F. H., Neureuther A. R., Tuttle J. A., Walker E. J. Modeling projection printing of positive photoresists // IEEE Transactions on Electron Devices. 1975. V. 22, Iss. 7. P. 456—464. DOI: 10.1109/T-ED.1975.18161

15. Mack C. A. Process Specification: Measurement of the Positive Photoresist Parameters A, B, and C // Department of Defense, Fort Meade. MD 20755, 1985.

16. Mack C. A. Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation. Austin (TX, USA): FINLE Technologies, 1997. 179 p. URL: http://www.lithoguru.com/scientist/litho_papers/Inside_PROLITH.pdf

17. Зеленцов С. В., Зеленцова Н. В. Современная фотолитография. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем». Нижний Новгород, 2006. 57 с.

18. Karafyllidis I., Hagouel P. I., Thanailakis A., Neureuther A. An efficient photoresist development simulator based on cellular automata with experimental verification // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2000. V. 13, Iss. 1. P. 61—75. DOI: 10.1109/66.827346

19. Амирханов А. В., Гладких А. А., Глушко А. А., Михальцов Е. П., Родионов И. А., Столяров А. А. Особенности методов проектирования СВИС с учетом результатов моделирования технологического процесса // Труды НИИСИ РАН. 2013. Т. 3, № 1. С. 10—19.

20. Харченко Е. Л., Шамин Е. С., Кузовков А. В., Иванов В. В. Разработка и применение экспресс-метода для увеличения окна литографического процесса // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 730—732. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.730.732

21. Calibre® WORKbench™. User's and Reference Manual, Software Version 2013.2. Mentor Graphics Corporation, 2013. URL: <https://www.mentor.com/products/ic-manufacturing/computational-lithography/calibre-workbench>

22. Granik Y., Medvedev D., Cobb N. Toward standard process models for OPC // Proc. SPIE 6520, Optical Microlithography XX. 2007. V. 6520. P. 1447—1452. DOI: 10.1117/12.712229

23. Vengertsev D., Kim K., Yang S., Shim S., Moon S., Shamsuarov A., Lee S., Choi S.-W., Choi J. H., Kang H.-K. The new test pattern selection method for OPC model calibration, based on the process of clustering in a hybrid space // Proc. SPIE 8522. Photomask Technology 2012. 2012. V. 8522. P. 387—394. DOI: 10.1117/12.953827

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 279—289. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-4-279-289

Basic approaches to photoresist mask formation modeling in computational lithography

N. N. Balan^{1,§}, V. V. Ivanov¹, A. K. Kuzovkov¹, E. V. Sokolova¹, E. S. Shamin¹

¹ *Molecular Electronics Research Institute (JSC MERI)
12/1 1st Zapadnyi Proezd, Zelenograd, Moscow 124460, Russia*

Abstract. The article gives an overview of the main currently used models for the formation of photoresist masks and the problems in which they are applied. The main stages of “full physical” modeling of mask formation are briefly considered in the case of both traditional DNQ photoresists and CA photoresists. The concept of compact models (VT5 and CM1), which predict the contour of the resist mask for a full-sized device topology is considered. Examples of some calculations using both full physical modeling and compact models are given. Using a full physical modeling of the resist mask formation the lithographic stack was optimized for a promising technological process. The optimum thickness ratios for the binary BARC used in the water immersion lithographic process are found. The problem of determining the optimal number of calibration structures that maximally cover the space of aerial image parameters was solved. To solve this problem, cluster analysis was used. Clustering was carried out using the *k*-means method. The optimal sample size was from 300 to 350 structures, the mean square error in this case is 1.4 nm, which slightly exceeds the noise of the process for 100 nm structures. Using SEM images for calibrating the VT5 model allows reducing the standard error of 40 structures to 1.18 nm.

Keywords: photoresist, projection photolithography, VT5, CM1, *k*-means clustering

References

- Mack C. A. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. John Wiley & Sons, 2007, 534 p.
- Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Fundamentals of Optics]. Moscow: Nauka, 1973, 722 p. (In Russ.)
- Ma X., Arce G. R. *Computational lithography*. John Wiley &

Sons, Inc, 2010, 226 p. DOI: 10.1002/9780470618943

- Balan N. N., Ivanov V. V., Kuzovkov A. V. Illuminator shape as a key factor in the development of methods for diffraction image correction in projection photolithography for technologies of 65 nm and less. *HOLOEXPO 2019. XVI International Conference on Holography and Applied Optical Technologies*, 2019, pp. 208—215. (In Russ.)

Information about authors:

Nikita N. Balan^{1,§}: Cand. Sci. (Eng.), Design Engineer of the 1st category (nbalan@niime.ru); **Vladimir V. Ivanov**¹: Deputy Head of the Photomask Design Department (vivanov@niime.ru); **Alexey V. Kuzovkov**¹: Design Engineer of the 1st category (akuzovkov@niime.ru); **Evgenia V. Sokolova**¹: Design Engineer of the 2nd category (evsokolova@niime.ru); **Evgeniy S. Shamin**¹: Junior Researcher (eshamin@niime.ru)

§ Corresponding author

5. Balan N. N., Ivanov V. V., Kuzovkov A. V., Shamin E. C. The place of phase-shifting photomasks in modern semiconductor technology. *Electronic engineering. Series 3. Microelectronics*, 2019, no. 2, pp. 54—63. (In Russ.)
6. Gornev E. S., Gushchin O. P., Myachin L. M. Technology of submicron optical projection lithography using photomasks with a phase shift. *Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Complex «Micro- and Nanoelectronics 2001»*. Zvenigorod, 2001, vol. 1, pp. 2—5. (In Russ.)
7. Machin M., Savinskii N., Gutchin O., Prosii A., Gornev E. An integrated framework for aerial image simulation and proximity correction. *Software Development for Process and Materials Design, Satellite Symposium of Nano and Giga Challenges in Microelectronics. Satellite (NGCM 2002)*. Moscow, 2002.
8. Krasnikov G. Ya., Sinyukov D. V. Problems and prospects of development of optical proximity correction methods for modern levels of technology. *Proceedings of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences “New materials with specified functions and high-purity nanomaterials for creating an element base of information-computing and control machines”*. Moscow, 2018, vol. 2, pp. 17—22. (In Russ.)
9. Rodionov I. A., Shakhnov V. A. Calculation of the values of the weight coefficients of topological structures for the calibration of lithographic models. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2010, no. 5, pp. 149—160. (In Russ.)
10. Shamin E. S., Ipatova E. V., Kuzovkov A. V., Ivanov V. V., Balan N. N. Rule-based SRAF generation for two-dimensional topological structures with MRC rules being considered: problems and solutions. *Electronic engineering. Series 3: Microelectronics*, 2019, no. 2, pp. 36—41. (In Russ.)
11. Savinsky N. G., Bernikov A. E., Kurchidis V. A., Gornev E. S., Gushchin O. P., Prosy A. D. Optical submicron lithography with phase-shifting templates. *Proceedings of the Jubilee 2nd Scientific and Technical Conference of OJSC NIIME and Mikron «Development, Technology and Production of Semiconductor Microcircuits»*. Moscow; Zelenograd: Mikron-print, 1999, pp. 53—55. (In Russ.)
12. Gornev E. S., Gushchin O. P., Prosy A. D., Savinsky N. G. Phase-shifting masks for low-aperture steppers. *Proceedings of the 3rd scientific and technical conference of OJSC NIIME and Mikron «Development, technology and production of semiconductor microcircuits»*. Moscow; Zelenograd: OJSC NIIME and Mikron, 2000, vol. 1, pp. 115. (In Russ.)
13. Hopkins H. H. On the diffraction theory of optical images. *Proc. R. Soc. Lond. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1953, vol. 217, no. 1130, pp. 408—432. DOI: 10.1098/rspa.1953.0071
14. Dill F. H., Neureuther A. R., Tuttle J. A., Walker E. J. Modeling projection printing of positive photoresists. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, vol. 22, no. 7, pp. 456—464. DOI: 10.1109/T-ED.1975.18161
15. Mack C. A. Process Specification: Measurement of the Positive Photoresist Parameters A, B, and C. Department of Defense, Fort Meade. MD 20755, 1985.
16. Mack C. A. Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation. Austin (TX, USA): FINLE Technologies, 1997, 179 p. URL: http://www.lithoguru.com/scientist/litho_papers/Inside_PROLITH.pdf
17. Zelentsov S. V., Zelentsova N. V. *Sovremennaya fotolitografiya* [Modern photolithography]. Nizhny Novgorod, 2006, 57 p. (In Russ.)
18. Karafyllidis I., Hagouel P. I., Thanailakis A., Neureuther A. An efficient photoresist development simulator based on cellular automata with experimental verification. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2000, vol. 13, no. 1, pp. 61—75. DOI: 10.1109/66.827346
19. Amirkhanov A. V., Gladkikh A. A., Glushko A. A., Mikhal'tsov E. P., Rodionov I. A., Stolyarov A. A. Features of VLSI design methods taking into account the results of technological process modeling. *Proceedings NIISI RAS*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 10—19. (In Russ.)
20. Kharchenko E. L., Shamin E. S., Kuzovkov A. V., Ivanov V. V. Developing and using an express method of increasing the lithography process window. *Nanoindustry*, 2020, no. S96—2, pp. 730—732. (In Russ.). DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.730.732
21. Calibre® WORKbench™. User's and Reference Manual, Software Version 2013.2. Mentor Graphics Corporation, 2013. URL: <https://www.mentor.com/products/ic-manufacturing/computational-lithography/calibre-workbench>
22. Granik Y., Medvedev D., Cobb N. Toward standard process models for OPC. *Proc. SPIE 6520, Optical Microlithography XX*, 2007, vol. 6520, pp. 1447—1452. DOI: 10.1117/12.712229
23. Vengertsev D., Kim K., Yang S., Shim S., Moon S., Shamsuarov A., Lee S., Choi S.-W., Choi J. H., Kang H.-K. The new test pattern selection method for OPC model calibration, based on the process of clustering in a hybrid space. *Proc. SPIE 8522. Photomask Technology 2012*, 2012, vol. 8522, pp. 387—394. DOI: 10.1117/12.953827

Received December 26, 2019