

УДК 681.513, 521.382

КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТРОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Н. Н. Балан, канд. техн. наук; В. А. Васин, канд. техн. наук;

Е. Н. Ивашов, д-р техн. наук; П. С. Костомаров;

С. В. Степанчиков, канд. техн. наук

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ
(Технический университет), Россия

Рассмотрен подход, позволяющий осуществлять выбор параметров нового технического решения, принимаемого за основу при создании оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии. Представлено устройство, обеспечивающее возможность формирования дорожек нанометрового диапазона с проектными нормами не более 32 нм и минимальной технологической дефектностью процесса.

© Балан Н. Н., Васин В. А., Ивашов Е. Н., Костомаров П. С., Степанчиков С. В., 2012

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, иммерсионная ультрафиолетовая литография, обобщенный критерий оценки качества, устройство для формирования нанодорожек, технологическая дефектность процесса.

Метод иммерсии в литографии позволяет повысить разрешающую способность путем увеличения числовой апертуры за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив — воздушный зазор (между объективом и пластиной) [1].

При экспонировании резистов в жидкости возникает ряд проблем. Значительная часть работы направлена на оценку поведения выбранных резистов, нижнего антиотражающего покрытия, материалов для верхнего защитного слоя в процессе иммерсионной литографии и интеграцию этих новых материалов в технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов. Выщелачивание (растворение) компонентов резиста (кислот и/или гасителя люминесценции) в иммерсионную жидкость остается основным вопросом практического применения иммерсионной литографии с точки зрения сохранности (времени жизни) объектива и уровня дефектности. Необходима оценка влияния этого явления в течение первой секунды после контакта с водой (время контакта реального экспонирования поля).

В течение последних лет были протестированы различные резисты и верхние защитные покрытия [2]. Был отмечен значительный прогресс в улучшении общего качества этих материалов в части литографических и специфических иммерсионных характеристик, но уровень дефектности этих новых иммерсионных резистов еще не достиг приемлемого значения для промышленного применения без верхнего защитного покрытия [3].

Жидкости с более высоким, чем у воды, значением показателя преломления могут продлить жизненный цикл иммерсионной литографии за счет увеличения числовой апертуры проекционного объектива до значений $NA > 1,4$ [4].

Для исследования дефектности полупроводниковых пластин применяют два вида приборов: установку контроля дефектности в светлом поле микроскопа для измерений на пластинах с топологическим рисунком и систему для контроля пластин без рисунка. Также требуется прибор для измерения контактного угла смачивания, позволяющий проводить динамические измерения контактных углов.

В иммерсионной среде на экспонированных резистах наблюдается несколько различных типов дефектов: образование воздушных пузырьков, появление водяных капель на окружающей поверхности резиста или верхнего защитного

покрытия, образование перемычек из продуктов выщелачивания резиста, а также дефекты промывки.

Пузырьки. Воздушные пузырьки (2–50 мкм), присутствующие на поверхности во время экспонирования, оставляют круглые области неэкспонированного резиста, окруженные кольцом переэкспонированных элементов (рис. 1). Более мелкие пузырьки дают в результате затенение и искажение рисунка, расположенного под ними. Такое поведение пузырьков было предсказано моделированием. Пузырьки появляются большей частью около краев пластины и на большем расстоянии от более гидрофобных поверхностей. Путем исправления конструкции сканера эта проблема была успешно решена концерном ASML, а вскоре и другими производителями [5].

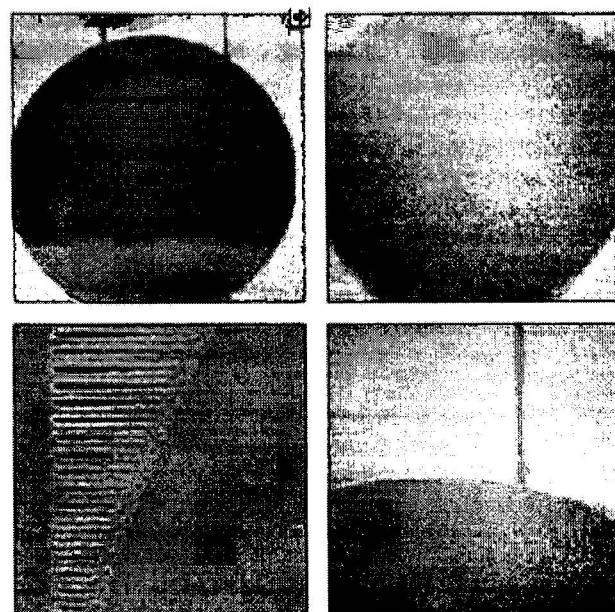


Рис. 1. Дефекты в виде пузырьков

Следы от воды и высохшие пятна. При наличии слоя воды под объективом и водяным сплом очень сложно избежать появления водяных капель на окружающей поверхности резиста или верхнего защитного покрытия, особенно при высокой скорости сканирования. Водяные капли, оставшиеся на поверхности после экспонирования, будут взаимодействовать с фоторезистом значительно более длительное время, чем во время самого экспонирования. Генератор фотокислоты и гаситель люминесценции продолж-

жат выщелачиваться в объем капли, пока она полностью не высохнет. Это приводит в результате к частичному или полному смыканию рисунка (следы от воды), иногда с пятном в центре (высохшие пятна, рис. 2). Верхнее покрытие не может предотвратить этот механизм, так как оно обладает в большинстве случаев заметной пористостью в воде. Критическим параметром для уменьшения количества остающихся на поверхности водяных капель является значение динамического заднего контактного угла смачивания: чем больше задний угол, тем меньше наблюдается следов от воды.

Микросмыкания. Это хорошо известный тип дефектов, наблюдаемый также и в "сухих" 193 нм резистах. Однако при использовании иммерсионной литографии наблюдается значительно большее их количество. Микросмыкания (рис. 3) могут наблюдаться случайным образом по всему рисунку или иногда в очень больших окружающих осадках от высохших капель. В последнем случае предполагается, что основным источником образующихся перемычек являются продукты выщелачивания из резиста. Первый случай наблюдался, когда поверх резиста наносили защитное покрытие. Газообразование во время постэкспозиционной термообработки, которое

блокируется под верхним защитным покрытием, может быть возможным источником таких дефектов.

Некоторые частицы (рис. 4) образуются из резиста так же, как при сухой литографии, но могут быть и другие источники загрязнений, типичные для иммерсионной литографии: образование смешанного слоя резиста и верхнего покрытия от больших высохших капель, что приводит к появлению частиц и осадков. Кроме того, физическое взаимодействие между элементами конструкции иммерсионных сопел и технологическими слоями на краю пластины может приводить к отслаиванию резиста или антиотражающего покрытия с образованием больших хлопьев (размером в несколько мкм). При последующем движении сопла над краем пластины эти частицы могут переноситься между столиком для пластины и пластинами. Частицы, присутствующие во время экспонирования, будут приводить к смыканию рисунков. Часть частиц может удаляться во время операций проявления и промывки, оставляя после себя перемычки между элементами рисунка, выглядящие иногда как следы от капель воды. Необходимо разработать специальные методы очистки в случае загрязнения частицами столика для пластин.

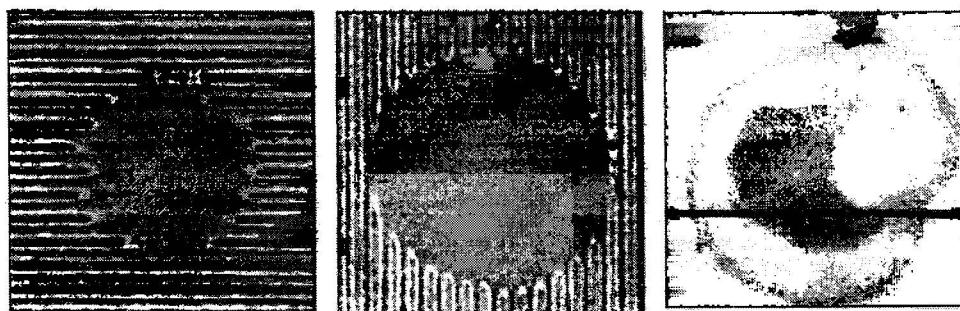


Рис. 2. Дефекты в виде следов от воды и высохших капель

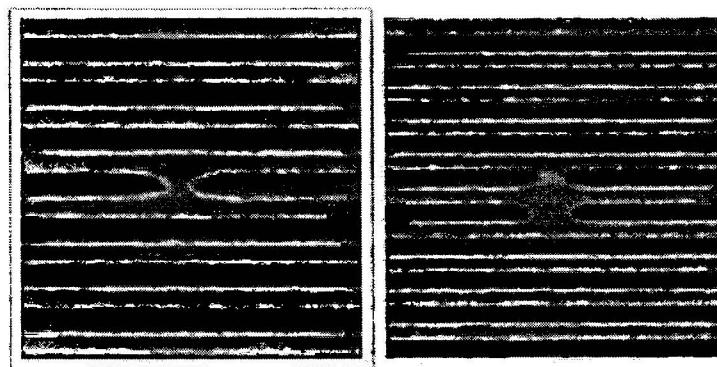


Рис. 3. Дефекты типа микросмыкания

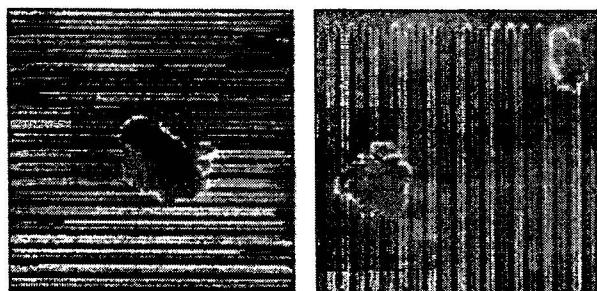


Рис. 4. Дефекты, вызванные попаданием частиц

Остатки после промывки. Это тип дефектов не связан напрямую с тем фактом, что во время экспонирования применялась вода, но является следствием оптимизации резиста, которая проводилась для его применения в иммерсионной литографии. Иммерсионные резисты более гидрофобны (их молекулы "стремятся" избежать контакта с жидкостью), чем фоторезисты для сухой 193 нм литографии, для того чтобы водя-

ное сопло могло двигаться с более высокой скоростью, не оставляя после себя водяных капель. При большой площади неэкспонированного резиста (как в случае топологии контактных окон) образуется много дефектов сопутствующего типа во время проявления и последующей промывки, когда не используется верхнее защитное покрытие. Поскольку процесс оптимизации резиста уже проведен, то единственный путь избежать таких дефектов — это использование защитного покрытия [2].

При автоматизированном проектировании оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии (ИУФЛ) следует учитывать не только технологическую дефектность процесса, но и другие показатели, обеспечивающие выполнение процесса.

Обобщенный критерий оценки качества оборудования ИУФЛ включает в себя технические, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии (рис. 5).

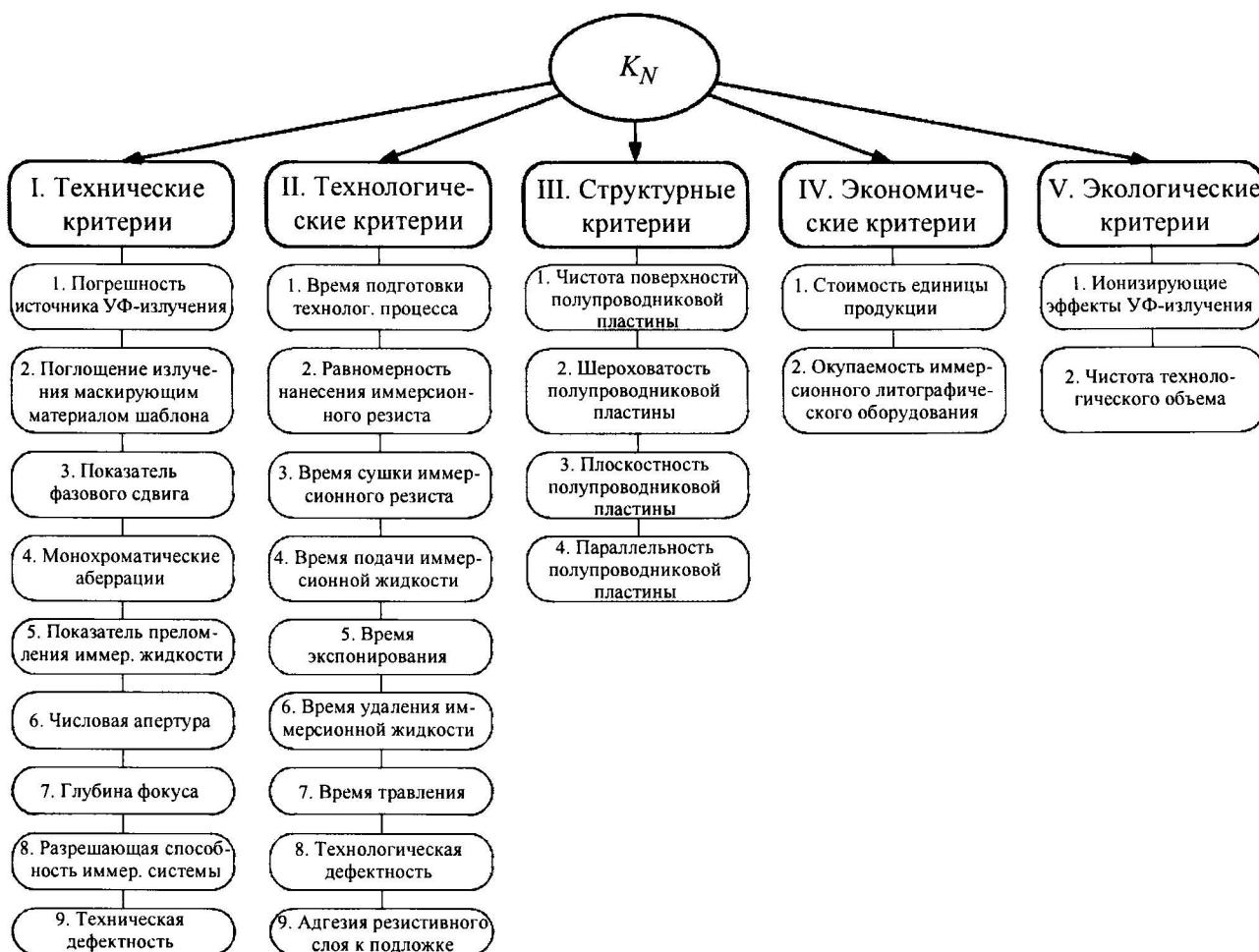


Рис. 5. Обобщенный критерий оценки качества оборудования ИУФЛ

Представим процесс потери качества оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии как некую абстрактную модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_k — параметры литографического оборудования, определяющие состояния, которые являются функциями времени. Принадлежность состояния X множеству состояний $G_X (X \in G_X)$ свидетельствует о том, что оборудование иммерсионной литографии отвечает критериям качества. Если значение параметров X_1, X_2, \dots, X_k больше допустимых $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{kp}$, т. е. $X_1 > X_{1p}, X_2 > X_{2p}, \dots, X_k > X_{kp}$, то оборудование ИУФЛ не удовлетворяет критериям качества. Если некоторые из значений параметров X_1, X_2, \dots, X_k будут больше допустимых, а другие меньше, то литографическое оборудование частично удовлетворяет критериям качества. Для условия полного удовлетворения параметры качества технологии и оборудования ИУФЛ $X_1 \leq X_{1p}, X_2 \leq X_{2p}, \dots, X_k \leq X_{kp}$, что соответствует тому, что множество $G_X \subset G_{Xp}$. При этом запас по качеству K_i будет определяться отношением $K_i = X_{ip}/X_i$. Качество по допустимой погрешности УФ-излучения $K_1 = X_{1p}/X_1$, по поглощению излучения маскирующим материалом шаблона $K_2 = X_{2p}/X_2$, по показателю фазового сдвига шаблона $K_3 = X_{3p}/X_3$, по допустимым монохроматическим aberrациям $K_4 = X_{4p}/X_4$, по показателю преломления иммерсионной жидкости $K_5 = X_{5p}/X_5$, по числовой апертуре $K_6 = X_{6p}/X_6$, по глубине фокуса $K_7 = X_{7p}/X_7$, разрешающей способности иммерсионной системы $K_8 = X_{8p}/X_8$, по технической дефектности $K_9 = X_{9p}/X_9$, по времени подготовки технологического процесса $K_{10} = X_{10p}/X_{10}$, по равномерности нанесения иммерсионного резиста $K_{11} = X_{11p}/X_{11}$, по времени сушки иммерсионного резиста $K_{12} = X_{12p}/X_{12}$, по времени подачи иммерсионной жидкости $K_{13} = X_{13p}/X_{13}$, по времени экспонирования $K_{14} = X_{14p}/X_{14}$, по времени удаления иммерсионной жидкости $K_{15} = X_{15p}/X_{15}$, по времени травления $K_{16} = X_{16p}/X_{16}$, по технологической дефектности $K_{17} = X_{17p}/X_{17}$, по адгезии резистивного слоя к полупроводниковой подложке $K_{18} = X_{18p}/X_{18}$, по чистоте поверхности полупроводниковой пластины $K_{19} = X_{19p}/X_{19}$, по шероховатости (R_a) полупроводниковой пластины $K_{20} = X_{20p}/X_{20}$, по плоскостности полупроводниковой пластины $K_{21} = X_{21p}/X_{21}$, по параллельно-

сти полупроводниковой пластины $K_{22} = X_{22p}/X_{22}$, по стоимости единицы продукции $K_{23} = X_{23p}/X_{23}$, по окупаемости иммерсионного литографического комплекса $K_{24} = X_{24p}/X_{24}$, по (допустимым) ионизирующему эффектам дальнего УФ-излучения $K_{25} = X_{25p}/X_{25}$, по чистоте технологического объема $K_{26} = X_{26p}/X_{26}$. Здесь $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{26p}$ — допустимые значения погрешности источника УФ-излучения, поглощения излучения маскирующим материалом шаблона, показателя фазового сдвига шаблона, монохроматических aberrаций, показателя преломления иммерсионной жидкости, числовой апертуры, глубины фокуса, разрешающей способности иммерсионной системы, технической дефектности, времени подготовки технологического процесса, равномерности нанесения иммерсионного резиста, времени сушки иммерсионного резиста, времени подачи иммерсионной жидкости, времени экспонирования, времени удаления иммерсионной жидкости, времени травления, технологической дефектности, адгезии резистивного слоя к полупроводниковой подложке, чистоты поверхности полупроводниковой пластины, шероховатости (R_a) полупроводниковой пластины, плоскостности полупроводниковой пластины, параллельности полупроводниковой пластины, стоимости единицы продукции, окупаемости иммерсионного литографического комплекса, ионизирующего эффекта дальнего ультрафиолетового излучения, чистоты технологического объема, X_1, X_2, \dots, X_{26} — фактические значения указанных выше величин.

Тогда обобщенный критерий оценки качества в соответствии со схемой, представленной на рис. 5, принимается в виде:

$$\frac{1}{K_N} = \frac{a_1}{K_1} + \frac{a_2}{K_2} + \dots + \frac{a_{26}}{K_{26}}, \quad (1)$$

где a_1, a_2, \dots, a_{26} — нормированные весовые коэффициенты (для определения этих коэффициентов используется метод экспертных оценок), удовлетворяющие соотношению

$$\sum_{i=1}^{26} a_i = 1,$$

а в общем виде обобщенный критерий оценки качества технологии и оборудования ИУФЛ

$$K_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^{26} \left(\frac{a_i}{K_i} \right)}. \quad (2)$$

Выбранный вариант технического решения оборудования ИУФЛ окончательно оценивается по критерию экономичности. Оптимальным вариантом технического решения оборудования и

технологии иммерсионной литографии будет тот, который обеспечивает снижение стоимости совокупной общественной продукции [6]:

$$\sum_{j=1}^{Z_h} Q_j G_{tj} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Z_h — число типоразмеров конечной совокупности продукции;

Q_j — объем производства продукции j -го вида;

G_{tj} — индивидуальная стоимость единицы продукции.

Иммерсионной ультрафиолетовой литографии требуются дополнительные капиталовложения, которые берутся из фонда накопления. Направляя определенную часть ресурсов из фонда на создание и внедрение новых средств для получения нужной продукции в ту или иную область проектирования технологии и оборудования иммерсионной литографии, необходимо быть уверенным, что экономия на затратах в данной области будет больше, чем неполучаемая экономия в других областях, куда эти ресурсы не поступают. В этом и состоит критерий сравнительной экономичности сопоставимых вариантов. Мерой соответствия этому критерию выступают определенные показатели, которые по своей структуре могут быть частными и обобщенными. В качестве частных показателей используются: снижение трудоемкости продукции или рост производительности труда, высвобождение рабочих, снижение материоемкости и энергоемкости. В качестве обобщенного показателя используются приведенные экономические затраты. Экономический эффект от производства и использования новых технологических решений оборудования ИУФЛ с учетом морального износа рекомендуется определять по формуле

$$\begin{aligned} \Theta = & \left[3_1 \frac{B_{\Gamma 2}}{B_{\Gamma 1}} \frac{P_{A1} + E_H}{P_{A2} + E_H} + \right. \\ & \left. + \frac{(I'_1 + I'_2) - E_H(K'_1 + K'_2)}{P_{A2} + E_H} - 3_2 \right] A_{\Gamma 2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $3_1, 3_2$ — приведенные затраты, обусловленные производством базового (существующего) и нового объекта, руб./ед.;

$B_{\Gamma 1}, B_{\Gamma 2}$ — годовые объемы работ при использовании оборудования ИУФЛ на основе базового и нового варианта в натуральных единицах;

P_{A1}, P_{A2} — доля амортизационных отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базового и нового варианта литографического оборудования (определяется как ве-

личина, обратная сроку службы с учетом морального старения);

E_H — нормативный коэффициент эффективности;

I'_1, I'_2 — годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании базового и нового вариантов оборудования;

K'_1, K'_2 — капитальные вложения потребителя при использовании базового и нового вариантов;

$A_{\Gamma 2}$ — годовой объем производства новых изделий.

При сравнении вариантов конструктивных решений технологии и оборудования ИУФЛ предпочтение отдается тому из них, который обладает большим значением ожидаемого экономического эффекта.

На этапе принятия решения еще не известны окончательные параметры нового технического решения, которое будет принято за основу при создании оборудования ИУФЛ. Экономическое сравнение имеет приближенный характер. Но оно ориентирует технолога в выборе технических решений для создания оборудования ИУФЛ по составляющим элементам и позволяет использовать при этом функционально-стоимостной анализ [6]. Рассмотрим одно из подобных технических решений.

В основу данного технического решения положена задача обеспечить возможность формирования дорожек нанометрового диапазона [7].

Согласно предложенном техническому решению [8] источник лазерного излучения выполнен щелевым с размером щели $\delta = (2-3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4-6) \lambda$ длин волн излучения. Отражатель состоит из двух зеркал, установленных друг к другу под углом, близким к 180° . Подложка закреплена на подложкодержателе, выполненном в виде кюветы с жидкостью и установленном на шестикоординатном пьезоприводе, закрепленном на неподвижном основании.

Введение в устройство для формирования на дорожек лазерного излучения выполнено щелевым с размером щели $\delta = (2-3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4-6) \lambda$ длин волн излучения, отражателя, состоящего из двух зеркал, установленных друг к другу под углом, близким к 180° , подложки, закрепленной на подложкодержателе, выполненном в виде кюветы с жидкостью и установленном на шестикоординатном пьезоприводе, закрепленном на неподвижном основании, обеспечивает возможность формирования дорожек нанометрового диапазона.

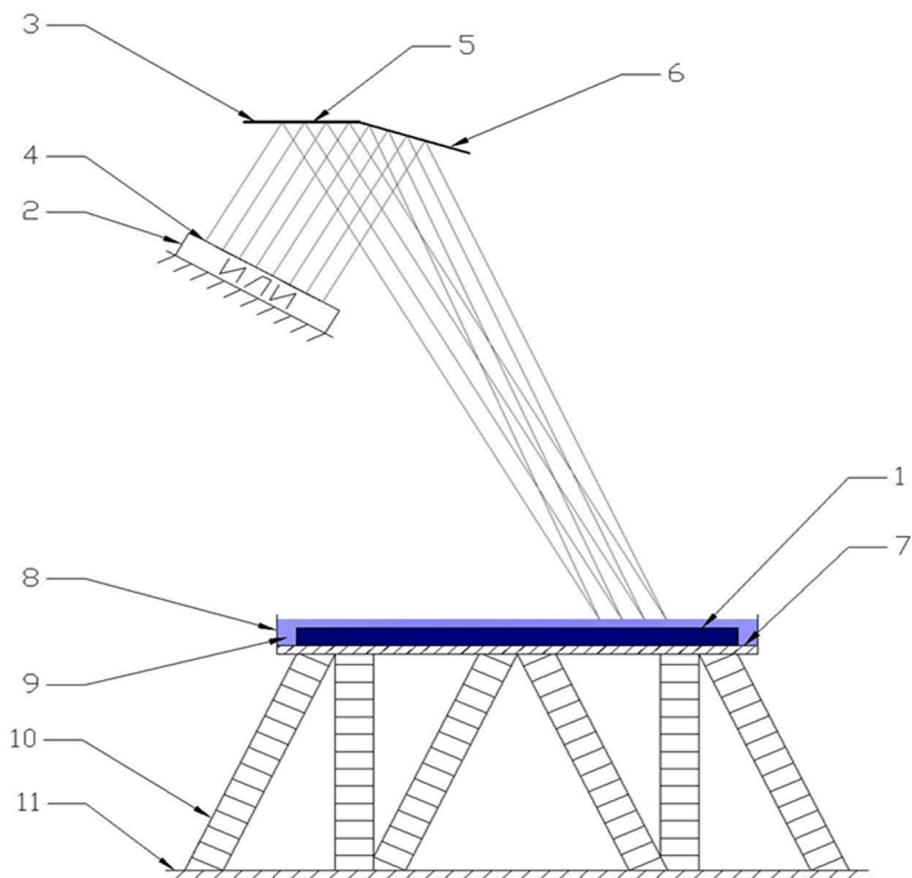
Устройство для формирования нанодорожек (рис. 6) содержит подложку 1, источник лазерного излучения 2 и отражатель 3, причем источник лазерного излучения выполнен щелевым с размером щели 4, $\delta = (2-3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4-6) \lambda$ длин волн излучения, отражатель состоит из двух зеркал 5, 6, поставленных друг к другу под углом, близким к 180° , подложка закреплена на подложкодержателе 7, выполненном в виде кюветы 8 с жидкостью 9 и установленном на шестикоординатном пьезоприводе 10, закрепленном на неподвижном основании 11.

Устройство для формирования нанодорожек работает следующим образом.

Источник лазерного излучения формирует когерентный волновой пучок, который, выходя из источника 2, разделяется щелями на систему лучей, распространяющихся вдоль параллельных прямых, причем расстояние между соседними лучами составляет $\gamma = (4-6) \lambda$ длин волн. Далее излучение, отражаясь от зеркал, проходит слой жидкости, уменьшая длину волны пропорци-

онально показателю преломления этой жидкости, и попадает на подложку. Угол между зеркалами подобран так, что, достигая подложки, когерентные лучи интерферируют, образуя череду равнодаленных максимумов интенсивности излучения, в местах которых происходит интенсивный выброс материала подложки, что при необходимом перемещении шестикоординатного пьезопривода обеспечивает формирование нанодорожек на подложке. Шаговое перемещение шестикоординатного пьезопривода на величину $(2-3) \lambda$ длины волны в направлении, перпендикулярном сформированным дорожкам, и повторение вышеизложенных операций формирования нанодорожек позволит уменьшить количество дорожек на площади подложки.

Применение предлагаемого устройства для формирования нанодорожек позволяет обеспечить возможность формирования дорожек нанометрового диапазона (при использовании методов повышения разрешающей способности проекционной литографии предполагается получать элементы с проектными нормами не более 32 нм).



*Rис. 6. Принципиальная схема устройства для формирования нанодорожек
(без изображения элементов оптической системы)*

Заключение

В настоящее время передовыми производителями СБИС используются литографические установки с λ , равными 248 и 193 нм. В классическом случае применения проекционной оптики минимальные размеры (Critical Dimension) элементов СБИС составляют не менее 90 % от λ . Попытка дальнейшего уменьшения размеров элементов приводит к их деструкции при экспонировании в результате негативного влияния явлений дифракции и интерференции. Используемые методы повышения разрешения, в частности, метод иммерсии и коррекции оптического эффекта близости требует применения сложных САПР для функционального моделирования процессов литографии и травления, а

также обработки больших массивов данных по технологической дефектности.

Предложен подход, определяющий научно обоснованный, технически целесообразный, технологически и экономически выгодный выбор параметров нового технического решения, которое будет принято за основу при создании оборудования ИУФЛ.

Предложено техническое решение, удовлетворяющее данному подходу, позволяющее обеспечить возможность формирования дорожек нанометрового диапазона с проектными нормами не более 32 нм, так как за счет когерентного волнового пучка достигается уменьшение пятна размытия и снижается технологическая дефектность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hand A. Double Patterning Wrings More From Immersion Lithography // Semiconductor International, 2007. January. – 17 p.
2. IMEC. CMOS based technology R&D programs URL http://www imec be/ScientificReport/SR2008/HTML/files/pdf/Brochure_CMORE.pdf
3. Yayi Wei, Robert L. Brainard. Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography / SPIE Publications. 2009. – 360 p.
4. URL <http://arstechnica.com/hardware/news/2008/12/despite-economic-slowdown-intel-on-track-with-32nm-of-win.ars>
5. Official site of ASML URL <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=427>
6. Карлик Е. М., Великанов К. М., Власов В. Ф. и др. Экономика машиностроения/Под общ. ред. Е. М. Карлика. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1985. – 392 с.
7. Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С. Формированиеnanoобъектов литографическим методом/Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2010): Матер. VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23–27 ноября 2010 г. – М.: Энергоатомиздат, 2010. Ч. 2. С. 332, 333.
8. Патент на полезную модель 104509 РФ, МПК⁷ 7H01J 37/28. Устройство для формирования на дорожек/П. С. Костомаров, Е. Н. Ивашов, М. Ю. Корпачев; заявитель и патентообладатель МИЭМ. № 2010146415/07; Заявл. 15.11.2010; Опубл. 20.05.2011. Бюл. № 14.

THE CRITERION OF QUALITY IN COMPUTER-AIDED DESIGN EQUIPMENT FOR IMMERSION LITHOGRAPHY EQUIPMENT

N. N. Balan, V. A. Vasin, E. N. Ivashov, P. S. Kostomarov, S. V. Stepanchikov
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University), Russia

An approach that allows the selection of the parameters of the new technical solutions, taken as a basis for the establishment of the immersion ultraviolet lithography equipment. Presented by the device that provides the possibility of forming tracks nanometer design rules with no more than 32 μm , and a minimum of technological defect of the process.

Keywords: computer-aided design, ultraviolet immersion lithography, generalized quality criterion, device for the formation of nanotacks, technological defects of the process.

Балан Никита Никитович, главный специалист.

Васин Владимир Анатольевич, старший научный сотрудник.
E-mail: vacuumwa@list.ru

Ивашов Евгений Николаевич, профессор.
 Костомаров Павел Сергеевич, аспирант.
 Степанчиков Сергей Валентинович, доцент.
 Тел. 8 (499) 235-64-35. E-mail: ienmiem@mail.ru

Статья поступила в редакцию в апреле 2012 г.

УДК 681.513, 621.382

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О ПРЕДПОЧТЕНИЯХ ПРИ ПОИСКЕ РЕШЕНИЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ФОТОШАБЛОНОВ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

*Н. Н. Балан, канд. техн. наук; В. А. Васин, канд. техн. наук;
 Е. Н. Ивашов, д-р техн. наук; М. Ю. Корпачёв; С. В. Степанчиков, канд. техн. наук
 Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ
 (Технический университет), Россия*

Рассмотрены аналитические модели, позволяющие осуществить возможность исследования свойств и особенностей предпочтительных вариантов и помогающие выбрать направление опроса проектировщиков оборудования ультрафиолетовой литографии. Представлено устройство с использованием эффекта обращения волнового фронта, обеспечивающее создание высоконаправленных пучков, которое позволяет повысить производительность нанесения нанодорожек на подложку.

Ключевые слова: обработка информации в проектировании, ультрафиолетовая литография, отражательные фотошаблоны, устройство для формирования нанодорожек на подложке, повышение производительности.

Улучшение разрешения в оптической микролитографии считается главной проблемой современной технологии микрэлектроники [1]. Эту проблему решают использованием глубокого УФ-излучения и увеличением числовой апертуры объективов в установках проекционной печати. Используются также и иные пути достижения повышенного разрешения, такие как использование технологии "фазосдвигающих" шаблонов, коррекция эффектов близости [1], применение "оптимальных" шаблонов [2] и др. Эффективность подобных приемов оказывается тем выше, чем более когерентно используемое актиничное излучение. Особенно когерентен свет эксимерных лазеров, которые находят широкое применение в современной литографической практике.

Однако уменьшение длины волны актиничного излучения с переходом в область глубокого ультрафиолета с $\lambda = 250$ нм и менее резко сокращает номенклатуру материалов, используемых в оптическом тракте проекционных литографических установок. Лишь кварц (SiO_2) и флюорит (CaF_2) остаются достаточно прозрачными в данном диапазоне, а изготовление безаберрационных высокоапертурных объективов

на основе этих двух материалов, мало различающихся по показанию преломления, становится проблематичным. Альтернативным решением этой проблемы может считаться переход на зеркальную оптику. Эти соображения относятся, конечно, и к шаблону.

Обычный шаблон, используемый в режиме "на просвет", должен быть изготовлен из кварца либо флюорита, что не всегда приемлемо по стоимости и технологичности. Для случая отражательного шаблона схема прохождения потоков света представлена на рис. 1, а, в сравнении с обычной схемой (рис. 1, б).

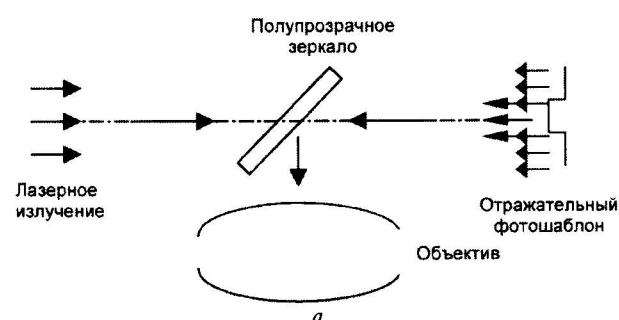


Рис. 1. Схемы прохождения потоков света

© Балан Н. Н., Васин В. А., Ивашов Е. Н., Корпачёв М. Ю., Степанчиков С. В., 2012