

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРТИЗА ТЕХНИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ  
РЕШЕНИЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ФОТОШАБЛОНОВ ДЛЯ  
УФ - ЛИТОГРАФИИ**

© 2012 г. Н.Н. БАЛАН, В.А. ВАСИН, Е.Н. ИВАШОВ,  
М.Ю. КОРПАЧЁВ, П.А. ЛУЧНИКОВ, С.В. СТЕПАНЧИКОВ

Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ  
e-mail: mkorpachev@gmail.com

Улучшение разрешения в оптической микролитографии считается главной проблемой современной технологии микроэлектроники [1]. Эту проблему решают использованием глубокого ультрафиолетового излучения (ГУФ) и увеличением числовой апертуры объективов в установках проекционной печати. Используются также и иные пути достижения повышенного разрешения, такие, как использование технологии т.н. «фазосдвигающих» шаблонов, коррекция эффектов близости [1], применение т.н. «оптимальных» шаблонов [2, 3] 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 ( $\text{SiO}_2$ ) и флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) остаются достаточно прозрачными в данном диапазоне, а изготовление безабберационных высокоапертурных объективов на основе этих двух материалов, к тому же 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 соображениям стоимости и технологичности. В случае отражательного шаблона схема прохождения потоков света может быть представлена на Рис. 1 по сравнению с обычной схемой.

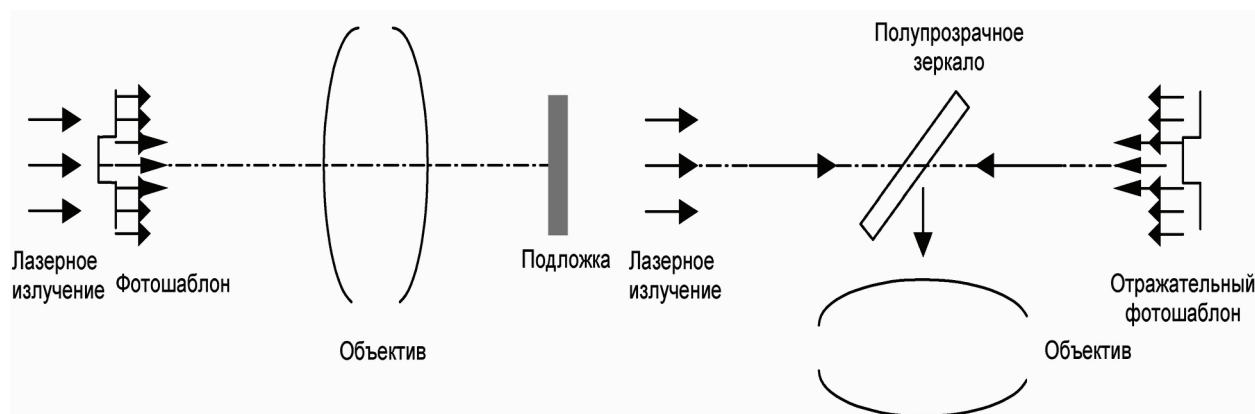


Рис. 1. Схемы прохождения потоков излучения.

Конечно, здесь добавлен новый элемент – полупрозрачное зеркало. Однако, в силу возможности изготовления его толщиной 1...3 мкм и обладания способностью пропускать свет в одном направлении и отражать в другом, потери энергии и рассеяние должны быть значительно меньше, чем в толще проходного шаблона.

Поток света после отражательного фотошаблона представляет собой суперпозицию излучения, отразившегося от металлических участков и излучения, отразившегося от подложки. Излучение, прошедшее через темные участки в обычном фотошаблоне значительно меньше излучения, прошедшего через светлые места вследствие почти полной непрозрачности темных мест; а излучение, отразившееся от подложки в отражательном фотошаблоне в достаточное количество (6 или более) раз меньше, чем отразившееся от металлической маски. Исходя из вышесказанного, фронт излучения, идущий от обыкновенного и отражательного шаблонов, можно считать образованным светом, идущим от светлых мест. Поля же излучения от светлых мест отличаются для этих фотошаблонов на некоторую величину по амплитуде и смещены по фазе. Анализируя смещения фаз, можно сделать вывод, что оно не приводит к изменениям в изображении маски фотошаблона на подложке.

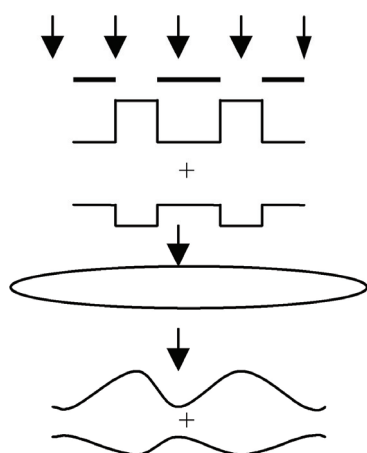


Рис. 2. Схема формирования изображения.

Схема формирования изображения фотошаблона изображена на Рис. 2:

Разница в освещенностях изображений для этих двух типов шаблонов будет связана с коэффициентом пропускания для проходного шаблона и с коэффициентом отражения для отражательного шаблона.

Таким образом, перенос изображения с помощью обыкновенного и отражательного шаблона проходит с эталона идентично. В этом смысле идентичны и установки совмещения и экспонирования с обычными и отражательными шаблонами [4].

Наличие полупрозрачного зеркала в принципе может внести некоторые искажения, которые устранимы при правильной конструкции и установке такого зеркала.

Важным достоинством отражательных шаблонов является возможность применять в качестве материала подложки пластины полупроводникового кремния и технологию их получения, полностью совпадающую с технологией изготовления интегральных схем.

Целесообразно несколько подробнее остановиться на вопросах сбора и обработки информации о предпочтениях разработчика при выборе технических решений отражательных фотошаблонов. Сравнить варианты по совокупности показателей можно на основе количественной или качественной информации о предпочтениях. Выбор типа информации определяется конечной целью исследования множества вариантов, характером исходных данных и характером сравнения вариантов. Конечной целью сравнения вариантов являются чисто качественные выводы о предпочтительности вариантов по совокупности признаков. Поэтому целесообразно строить процедуру сравнения, основываясь на качественной информации о предпочтениях.

Тем не менее, количественная информация удобна тем, что непосредственно по получению числовых оценок полезности свойств могут быть вычислены значения полезностей вариантов и по их величинам проведено ранжирование вариантов. Сложность состоит в том, что, несмотря на большое число процедур экспертного оценивания, позволяющих получать числовые оценки, следует признать, что такая информация о предпочтениях отличается меньшей надежностью и устойчивостью и приобретает более сложным путем, чем качественная информация.

Наряду с выявлением предпочтения при помощи решения перечисленных выше задач сравнения можно получать информацию путем перехода от качественного сравнения к оценке степени превосходства к установлению некоторых численных соотношений между сравниваемыми оценками, интервалами, векторными оценками. Так, из

$x_1 \geq x_2$  следует  $u(x_1) \geq u(x_2)$  или  $u(x_1)/u(x_2) \geq 1$  уточняя это соотношение, можно предложить эксперту назначить число  $a$ , такое, что  $u(x_1)/u(x_2) \geq a$ . Рассматривая неравенства, определяемые по результатам сравнения интервалов или векторных оценок в задачах различной сложности, можно отметить, что с ростом сложности увеличивается число оценок, входящих в неравенства, и число показателей, которым принадлежат эти оценки. При построении системы предпочтений разработчика по предложенной схеме остаются нерешенными две проблемы:

- 1) невозможно заранее определить вид информации, обеспечивающей решение задачи выбора вариантов технических решений отражательных шаблонов;
- 2) не всегда от эксперта можно получить решение задачи сравнения, выделенной в соответствии с приведенной схемой.

Аналитические модели сравниваемых вариантов дают большой простор для исследования свойств и особенностей вариантов, выяснения условий предпочтительности каждого из них, помогают выбрать направление опроса разработчика. Система неравенств выделяет в пространстве полезностей оценок вариантов по показателям область  $\Omega$  возможных значений полезностей оценок, согласованных с предпочтениями эксперта.

В общем случае для двух произвольных вариантов  $s_i, s_g \in S$  множество точек области  $\Omega$  делится на три непересекающихся подмножества:

$\omega_{ij}$ , на котором  $u(y_i) > u(y_g)$  и, следовательно,  $s_i > s_g$ ;

$\omega_{gi}$ , на котором  $u(y_g) > u(y_i)$  и, следовательно,  $s_g > s_i$ ;

$\omega_0$ , на котором  $u(y_i) = u(y_g)$  и, следовательно,  $s_i \sim s_g$ .

Если  $\omega_{ij} = \emptyset$  (либо  $\omega_{gi} = \emptyset$ ), то выбор сделан и  $s_i \geq s_g$  (либо  $s_g \geq s_i$ ). Иначе варианты  $s_i, s_g$  оказываются неподчиненными. Неоднозначность выбора является следствием неопределенности, связанной с неполнотой представления о системе предпочтений разработчика.

Подмножество  $\omega_0$  которое соответствует эквивалентности вариантов решений  $s_i$  и  $s_g$  в множестве точек области  $\Omega$ , можно определить, если систему неравенств дополнить условием  $\sum_{j=1}^m u(x_j^i) - \sum_{j=1}^m u(x_j^g) = 0$ .

Это уравнение называют парной границей вариантов  $s_i$  и  $s_g$ , а выделение в области  $\Omega$  областей предпочтительности вариантов  $s_i$  и  $s_g$  – районированием. Решение смешанной системы неравенств и равенства определяет точки

$$\beta_1 = (u_{11}(x_{11}), u_{12}(x_{12}), \dots, u_{1N}(x_{1N}));$$

$$\beta_2 = (u_{21}(x_{21}), u_{22}(x_{22}), \dots, u_{2N}(x_{2N}));$$

.....

$$\beta_p = (u_{p1}(x_{p1}), u_{p2}(x_{p2}), \dots, u_{pN}(x_{pN}));$$

$N$  – число оценок на шкалах показателей, выпуклая линейная комбинация которых вида

$$\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \dots + \alpha_p \beta_p = \left( \sum_{i=1}^p a_i u_{i1}(x_{i1}), \dots, \sum_{i=1}^p a_i u_{iN}(x_{iN}) \right)$$

позволяет определить, пределы, значений полезностей оценок, за которыми наступает доминирование одного из вариантов. Здесь  $a_i, i = 1, 2, \dots, p$  – произвольные неотрицательные числа.

Полезности оценок получаются непосредственно из:

$$u(x_k) = \sum_{i=1}^p a_i u_{ik}(x_{ik}), k = 1, 2, \dots, N$$

Из множества возможных соотношений между полезностями оценок необходимо отбирать для предъявления разработчику такие, которые приводят к простым задачам сравнения. Рассмотрим соотношение между полезностями двух оценок. Исследуя

соотношения вида 
$$\frac{u(x_k)}{u(x_r)} = \frac{\sum_{i=1}^p a_i u_{ik}(x_{ik})}{\sum_{i=1}^p a_i u_{ir}(x_{ir})}$$

при равенстве нулю всех коэффициентов  $a_i$ , кроме одного, получим рядний:  $u(x_k)/u(x_r) = c_1$ ;  $u(x_k)/u(x_r) = c_2$ ; ... ;  $u(x_k)/u(x_r) = c_p$ .

Из этого ряда выберем для предъявления разработчику два отношения  $u(x_k) > c_{max}u(x_r)$  и  $u(x_k) < c_{min}u(x_r)$ , где  $c_{max}$ ,  $c_{min}$  - соответственно максимальное и минимальное значения из  $c_1, c_2, \dots, c_p$ . Признав одно из неравенств справедливым, разработчик определяет выбор между вариантами. Содержательно вопрос формулируется в зависимости от принадлежности оценок одному или различным показателям.

Если  $x_k$  и  $x_r$  - оценки по одному показателю, то вопрос сводится к сравнению по полезности либо векторных оценок, различающихся оценками по одному показателю, либо интервалов на шкале показателя между оценками  $x_k$ ,  $x_r$  и оценкой  $x_r$  и худшей оценкой этого показателя (полезность худшей оценки каждого показателя принимается равной нулю).

Если  $x_k$  и  $x_r$  - оценки по разным показателям, то вопрос сводится к сравнению векторных оценок, одна из которых имеет оценку  $x_k$  по показателю  $X_j$ , и худшие оценки по остальным показателям, а другая - оценку  $z$  по показателю  $X_t$ , полезность которой в  $s$  раз выше полезности оценки  $x_r$  и худшие оценки по остальным показателям.

Соотношение между полезностями трех оценок. Исследуются от ношения вида

$$\frac{[u(x_r) - u(x_k)]}{u(x_q)} = \frac{\sum_{i=1}^p a_i [u_i(x_{ir}) - u_i(x_{ik})]}{\sum_{i=1}^p a_i u_i(x_{iq})}$$

или

$$\frac{[u(x_r) + u(x_k)]}{u(x_q)} = \frac{\sum_{i=1}^p a_i [u_i(x_{ir}) + u_i(x_{ik})]}{\sum_{i=1}^p a_i u_i(x_{iq})},$$

$k, r, q = 1, 2, \dots, N$ ;  $r \neq k$  при равенстве нулю всех  $a$ , кроме одного. Вопросы к эксперту строят на основе выражений  $u(x_r) - u(x_k) > c_{max}u(x_q)$  или  $u(x_r) - u(x_k) > c_{min}u(x_q)$ .

Если  $x_k, x_r, x_q$  - оценки шкалы одного показателя, то вопрос ставится в следующем виде: может ли превосходить (не превосходить) по полезности интервал между оценками  $x_k$  и  $x_r$  другой интервал, находящийся между оценкой  $x_q$  и худшей оценкой этого показателя, в  $c_{max}(c_{min})$  раз. Аналогично строится вопрос, если оценки принадлежат шкалам двух показателей [5].

В случае, если оценки относятся к шкалам разных показателей, задача сравнения становится достаточно сложной и сводится к сравнению совокупностей интервалов или векторных оценок, различающихся по трем показателям. Подобным образом можно генерировать задачи сравнения и с большим числом оценок по показателям.

Решение задачи районирования при количестве вариантов  $n > 2$  осуществляется путем совместного рассмотрения всех возможных пар вариантов. При  $n$  вариантах можно составить  $C_n^2$  пар вариантов и для каждой пары разбить область  $\Omega$  на два подмножества предпочтительности вариантов  $s_i$  и  $s_g - \Omega_i^n$ , и  $\Omega_g^n$ ,  $i, g = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $i \neq g$ . В результате проведения парных границ множество  $\Omega$  разобьется на  $2n$  частных подмножеств, в каждом из которых любой вариант по отношению к любому другому варианту повсюду либо строго предпочтителен, либо строго подчинен. Объединяя частные подмножества, в которых предпочтителен определенный вариант, получаем разбиение области  $\Omega$  на районы  $\Omega_i^n$  предпочтительности варианта  $s_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Если какое-либо множество  $\Omega_i^n = \emptyset$ , то соответствующий ему вариант  $s_i$ , подчинен и может быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

После того как определены границы значений полезности оценок, отвечающие предпочтительности каждого варианта, можно перейти к целенаправленному получению экспертной информации, которая позволила бы сузить область  $\Omega$ . до величины района  $\Omega_i^n$ . Реализация такого принципа предварительного анализа оценок вариантов по совокупности показателей и выработки вопросов к разработчику осуществляется в следующей последовательности.

Уравнение парной границы вариантов  $s_i$  и  $s_g$  имеет вид [5]:

$$y_{ig}(x) = U(y_i) - U(y_g) = \sum_{j=1}^m u_j(x_j^i) - \sum_{j=1}^m u_j(x_j^g) = \sum_{j=1}^m (u_i(x_j^i) - u_j(x_j^g)) = 0.$$

Условие предпочтительности варианта  $s_i$  над вариантом  $s_g$  будет

$$\max_{\Omega} y_{ig}(x) \leq 0$$

Основная проблема, которую решает предварительный анализ свойств вариантов, состоит в переносе части работы с разработчика на исследователя вариантов технических решений, что обеспечивает ускоренную подготовку и решение задачи.

Рассмотрим применение отражательных шаблонов, для устройства формирования нанодорожек.

В основу идеи положена задача повышения производительности нанесения нанодорожек на подложку.

Согласно предложенному техническому решению, источник лазерного излучения выполнен в виде пучка лучей, расстояние  $l$  между которыми, составляет

$l = (5 \dots 10 \lambda)$  длин волн излучения  $\lambda$ , отражатель выполнен в виде зеркала, состоящего из основы дифторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ), на котором нанесена пленка родия (Rh), устройство дополнительно снабжено обращателем волнового фронта, выполненным в виде полого цилиндра с газообразным метаном, находящимся под давлением  $(5 \div 10)$  атмосфер, и полупрозрачным зеркалом.

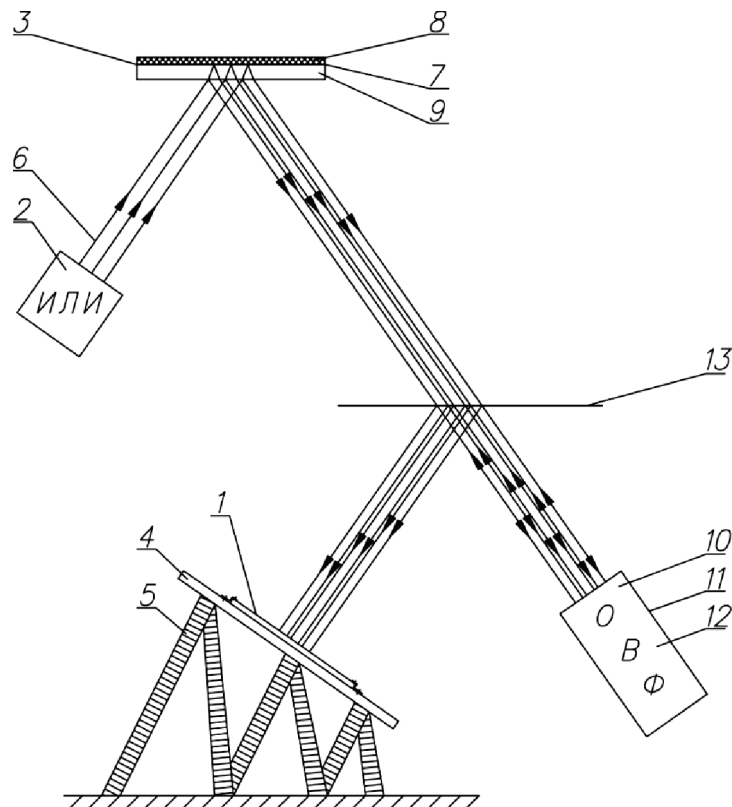


Рис. 3. Устройство для формирования нанодорожек на подложке (принципиальная схема без объектива).

Введение в устройство для формирования нанодорожек на подложке источника лазерного излучения, выполненного в виде пучка лучей, расстояние  $l$  между которыми, составляет  $l = (5 \dots 10 \lambda)$  длин волн излучения  $\lambda$ , отражателя, выполненного в виде зеркала, состоящего из основы дифторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ), на котором нанесена пленка родия (Rh), и дополнительное снабжение устройства обращателем волнового фронта, в виде полого цилиндра с газообразным метаном, находящимся под давлением  $(5 \div 10)$

атмосфер, и полупрозрачного зеркала обеспечивает производительности нанесения нанодорожек на подложку.

Сущность полезной модели поясняется на Рис. 3, где показано устройство для формирования нанодорожек на подложке.

Устройство для формирования нанодорожек на подложке (Рис. 3) содержит источник лазерного излучения 2 в виде пучка лучей 6, отражатель 3, подложкодержатель 4, закрепленный на пьезоприводе 5, зеркало 7, состоящее из основы дифторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ) 8, на котором нанесена пленка родия (Rh) 9, обращатель 10 волнового фронта, выполненный в виде полого цилиндра 11 с газообразным метаном 12 под давлением, и полупрозрачное зеркало 13.

Устройство для формирования нанодорожек на подложке (Рис. 3) работает следующим образом [6].

Лазерное излучение от источника 2, падая на отражатель 3 попадает в среду с нерегулярными неоднородностями зеркала 7, где отражается от пленки родия 9 и основы дифторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ) 8, образуя интерференционную картину, затем проходит сквозь полупрозрачное зеркало 13. Расходящиеся неоднородные пучки лучей 6 попадают в полый цилиндр 11 с газообразным метаном 12, меняют направление на противоположное, т.е. происходит обращение волнового фронта лазерного излучения [7].

Лазерное излучение, проходя через среду с газообразным метаном 12 обращателя волнового фронта 10, становится идеально направленным в соответствии с эффектом Мандельштама – Бриллюэна. Тем самым искажения волнового фронта, появившиеся после прохождения отражателя 3, компенсируются при прохождении пучком лучей обращателя волнового фронта 10. Подложкодержатель 4 закрепленный на пьезоприводе 5 обеспечивает возможность ориентации подложки 1 перпендикулярно падающему излучению от зеркала 13.

Использование эффекта обращения волнового фронта обеспечивает создание высоконаправленных пучков, компенсируя искажения по всей трассе прохождения пучка лучей 6.

Применение предлагаемого устройства для формирования нанодорожек на подложке позволяет повысить производительность нанесения нанодорожек на подложку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. "The National Technology Roadmap for Semiconductor", SIA, 1997, p. 81.
2. Валиев К.А . Физика субмикронной литографии. – М.: Наука, 1990г., 528 с.
3. Никитин А.В. "Разрешение оптических систем и проблема воспроизведения минимальных элементов изображения" // Прикладная физика, 1997, № 4, с. 32-41.
4. Трунин Д.А., Ларищев В.П., Никитин А.В. Оптические свойства отражательных фотшаблонов // Электронный журнал «Исследовано в России». – 200, с. 1-3.
5. Слободин М. Ю., Царёв Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем // СПб.: Инфо-да, 2004, с. 85-91.
6. Патент на полезную модель 104508 Российская федерация, МПК7 В28В 1/29. Устройство для формирования нанодорожек на подложке [Текст] // М.Ю. Корпачев, П.С. Костомаров, П.С. Кузнецов, Е.Н. Ивашов, П.А. Лучников. Заявитель и патентообладатель МИЭМ. – № 2010146414/07; заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.
7. Корпачёв М.Ю. Формирование нанообъектов литографическим методом [Текст] // Е.Н. Ивашов, П.С. Костомаров, Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2010). // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23 - 27 ноября 2010 г. – М.: МИРЭА, 2010, ч. 2, с. 232-233.