

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 микроэлектроники [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 ( $\text{SiO}_2$ ) и флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) остаются достаточно прозрачными в данном диапазоне, а изготовление безабберационных 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).

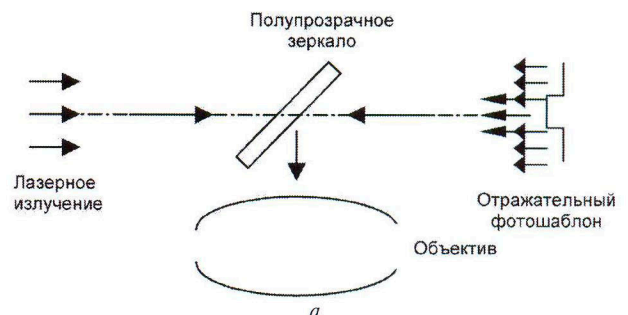
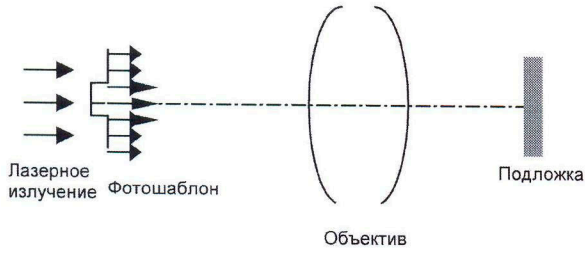


Рис. 1. Схемы прохождения потоков света





б  
Рис. 1. Окончание

В схеме добавлен новый элемент — полупрозрачное зеркало. Однако в силу возможности изготовления его толщиной 1–3 мкм и способности 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 положение 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. Таким образом, фронт излучения, идущий от обыкновенного и отражательного шаблонов, можно считать образованным светом, идущим от светлых мест. Поля 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.

Схема формирования изображения фотошаблона представлена на рис. 2.

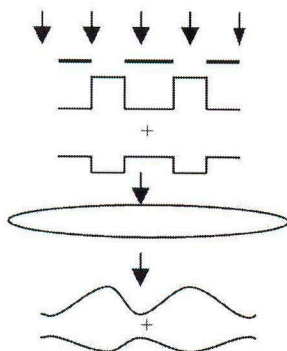


Рис. 2. Схема формирования изображения

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 [3].

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

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

Рассмотрим два варианта отражательных шаблонов.

*Вариант первый* (рис. 3).

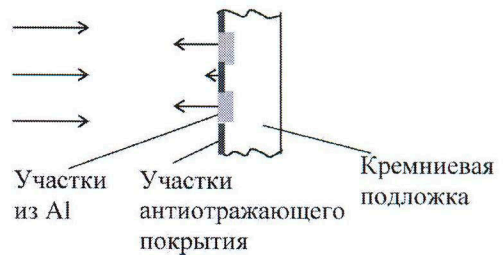


Рис. 3. Отражательный шаблон алюминиевым отражающим покрытием

Алюминиевые участки толщиной 0,6 мкм отражают падающее излучение коэффициентом отражения по интенсивности  $R_{Al} = 0,92$  на используемой длине волны 193 нм. Данное значение толщины больше толщины скин-слоя металлов ~10 нм, в котором формируется отраженная волна и поглощается проникающее излучение. Алюминий обладает наиболее высоким коэффициентом отражения на длине волны 193 нм среди возможных к применению металлов [4]. Темные участки из подрезистного антиотражающего покрытия ARC DUV 42/42P фирмы Brewer Science с толщиной 0,4 мкм обладают коэффициентом отражения по интенсивности  $R_{ARC} \approx 0,09$ .

Подрезистные антиотражающие покрытия широко применяются в современной литографии для улучшения профиля засвеченных участков резиста путем подавления отраженного пластичной света. Антиотражающие покрытия нано-



сятся на пластину, как и резист, центрифугированием подающегося раствора. Снимается антиотражающее покрытие анизотропным травлением соответствующим веществом. Время жизни антиотражающих покрытий Brewer Science ARC DUV 30/30J составляет минимум 120 дней, что позволяет надеяться на приблизительно такое же время жизни выбранного антиотражающего покрытия ARC DUV 42/42P.

Для изготовления отражательного шаблона предлагается метод, состоящий из нескольких операций технологии изготовления интегральных схем на кремниевой пластине, схематично показанный на рис. 4. Толщина пластины составляет порядка 500 мкм. На нанесенном алюминии образуется слой окисла  $Al_2O_3$  толщиной 20–30 нм, например, сапфир прозрачен для излучения с длиной волны 193 нм. Операции 1, 5, 8 выполняются литографией. Возможными установками совмещения и экспонирования могут являться: TWINSCAN XT:1700Fi (ASML) с минимальным размером элемента  $\leq 45$  нм или электронно-лучевая установка JBX-9300FS (JEOL Ltd.) с минимальным размером формируемого элемента 20 нм.

Для выполнения операции 8 окна в фоторезисте должны быть больше размеров элементов.

Это необходимо для снятия антиотражающего покрытия с бортиков в структуре подложки (рис. 5).



Рис. 5. Корректировка антиотражающего покрытия

Существуют две разновидности подрезистных антиотражающих покрытий: планаризирующие, которые сглаживают топологический рельеф подложки, и конформные, слой которых повторяет рельеф подложки. Предлагаемое антиотражающее покрытие ARC DUV 42/42P является конформным. Конформное покрытие было выбрано для того, чтобы в результате оно находилось внутри заполняемой канавки и не выступало из нее, что привело бы к ограничению распространения отраженного от алюминиевого участка света.

Возможно, что в результате выполнения операции 9 (см. рис. 4) по снятию участков антиотражающего покрытия травлением будет повреждена поверхность низлежащего алюминия; в этом случае потребуется последующая полировка алюминия.

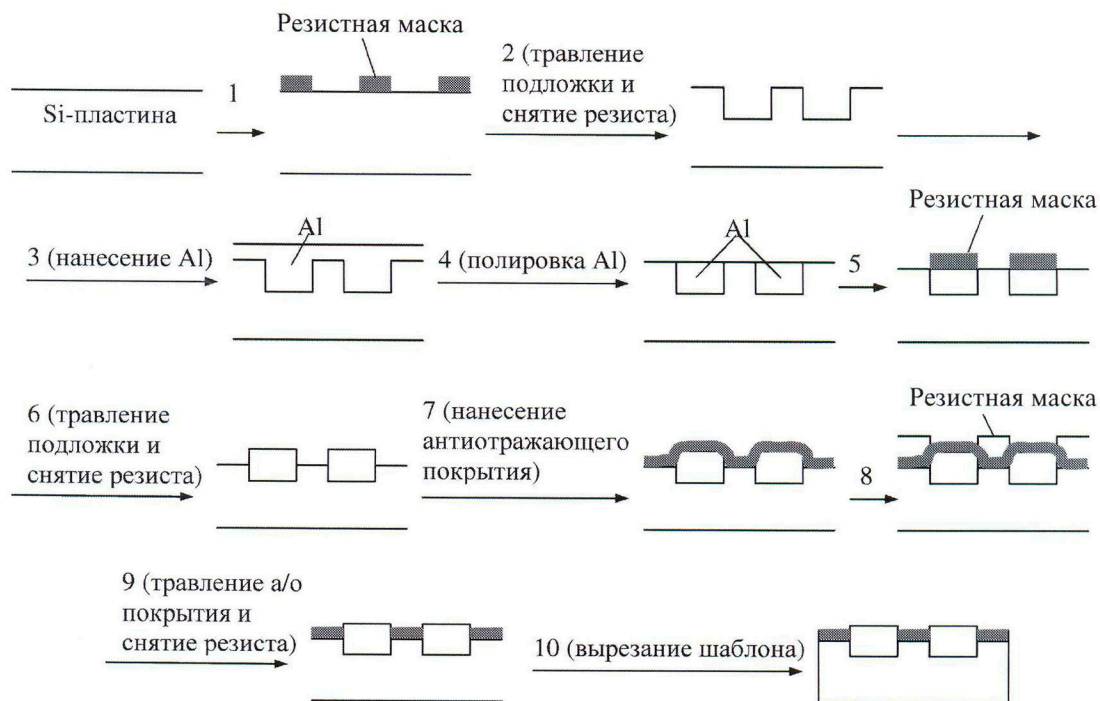


Рис. 4. Метод изготовления отражательного шаблона с алюминиевым отражающим покрытием

Вариант второй (рис. 6).

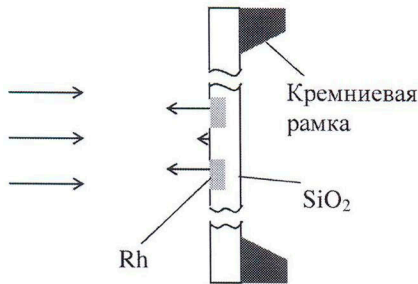


Рис. 6. Отражательный шаблон с родиевым отражающим покрытием

Как уже упоминалось, размеры шаблона могут составлять до 30×30 мм. Высота кремниевой рамки есть толщина кремниевой пластины и приблизительно равна 500 мкм. Толщина слоя SiO<sub>2</sub> — 1 мкм. Толщина участков из родия 0,3 мкм.

Принцип действия отражательного шаблона состоит в том, что падающее излучение будет отражаться родиевыми участками (коэффициент отражения по интенсивности  $R_{Rh} = 0,57$ ) и почти не отражаться кварцевыми участками (коэф-

фициент отражения по интенсивности  $R_{SiO_2} = 0,04$ ) [5].

Родий был выбран как отражающий материал из-за того, что в предлагающейся ниже структурной схеме технологии изготовления присутствует операция травления в щелочной среде КОН, которая воздействует на алюминий. Из приведенных в [5] коэффициентов отражения стойких к КОН металлов, а именно золота, платины и родия, родий обладает наибольшим коэффициентом отражения света.

Для изготовления шаблона предлагается метод, также состоящий из нескольких операций технологии изготовления интегральных схем на кремниевой пластине, представленный на рис. 7. Операции 2, 6 выполняются литографией. Для выполнения операций могут применяться способы, указанные для первого варианта отражательного шаблона. Перспективным способом может стать метод оттисковой печати. Для формирования нескольких шаблонов на пластине штамп последовательно прижимается на свободные участки. Существенно то, что не требуется высокая точность позиционирования штампа на пластине.

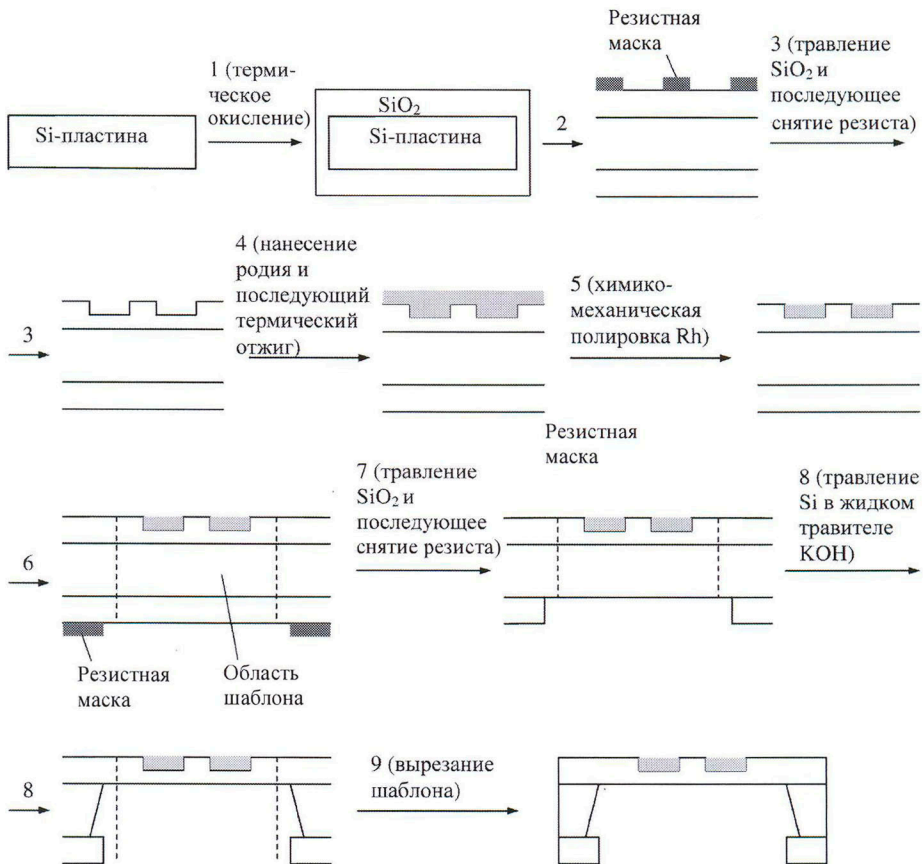


Рис. 7. Структурная схема изготовления отражательного шаблона с родиевым отражающим покрытием



Термический отжиг в операции 4 обусловлен необходимостью снятия напряжения в родии и проводится при температуре 300—400 °С.

Поскольку скорость травления кремния в вертикальном направлении кристалла 110 больше скорости травления в горизонтальных направлениях, то полученный в результате выполнения операции 8 профиль протравленного участка будет иметь наклонные боковые участки.

При изготовлении шаблонов по предлагаемым способам на одной пластине можно формировать несколько шаблонов.

Шаблоны создаются стандартной операцией — вырезанием кристаллов из пластины путем скрайбирования. При этом ширина кремниевой рамки (второй способ) должна быть достаточной для этой операции.

Сравнивая два предлагаемых варианта отражательного шаблона, можно сделать вывод, что несомненным достоинством первого варианта является прочность шаблона по сравнению с крайне хрупким шаблоном, изготовленным по второму варианту. Достоинства второго варианта — лучшая контрастность изображения и возможность выполнения операций литографии методом оттисковой печати.

*Сбор и обработка информации о предпочтениях разработчика при выборе технических решений отражательных фотошаблонов*

Сравнивать 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. К такому же выводу можно прийти, анализируя совокупность показателей, по которым сравниваются варианты. При комплексной оценке свойств вариантов технических решений наряду с количественными показателями могут использоваться нечисловые, имеющие шкалу оценок, заданных описательно. Сведение этих показателей к числовым может внести в оценки дополнительную информацию, влияющую на результаты исследования. Однако для упорядочения вариантов на основе качественной информации о предпочтениях может потребоваться большой объем сложной информации. Так, при сравнении вариантов при независимости показателей по предпочтению, ориентированном на использование каче-

ственной информации, может возникнуть необходимость на заключительном этапе процедуры в сравнении векторных оценок конкурсных вариантов [6].

Количественная информация удобна тем, что непосредственно по получению числовых оценок полезности свойств могут быть вычислены значения полезностей вариантов и по их величинам проведено ранжирование. 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.

Для получения информации о предпочтениях эксперту могут предъявляться для сравнения варианты реальные и гипотетические, соответствующие им векторные оценки или интервалы между оценками на шкалах показателей. Считается, что информация, полученная при сравнении вариантов, более надежна, чем из других источников. Трудность состоит в том, чтобы дать "портрет" вариантов, отвечающих определенным векторным оценкам. Поскольку все особенности вариантов  $x$  должны выражаться через векторные оценки, то будем рассматривать задачи сравнения векторных оценок и интервалов на шкалах показателей, предполагая, что содержательная интерпретация объектов сравнения будет проводиться при опросе экспертов.

Наряду с выявлением предпочтения с помощью решения перечисленных выше задач сравнения можно получать информацию путем перехода от качественного сравнения к оценке степени превосходства и 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:

- невозможно заранее определить вид информации, обеспечивающей решение задачи выбора вариантов технических решений отражательных шаблонов;



• не всегда от экспертов можно получить решение задачи сравнения, выделенной в соответствии с приведенной схемой.

Аналитические модели сравниваемых вариантов дают больший 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 экспертов.

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  $s_i \gtrsim s_g$  (либо  $s_g \gtrsim s_i$ ). Иначе варианты  $s_i, s_g$  называются 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

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

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

$$\dots$$

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

где  $N$  — число оценок на шкалах показателей, выпуклая линейная комбинация которых

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

позволяет определить пределы значений полезностей оценок, за которыми наступает домини-

рование 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 некоторые виды соотношений.

Исследуя соотношения вида

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

при равенстве нулю всех коэффициентов  $a_i$ , кроме одного, получим ряд отношений:

$$u(x_k)/u(x_r) = c_1;$$

$$u(x_k)/u(x_r) = c_2; \dots; u(x_k)/u(x_r) = c_p.$$

Из этого ряда выберем для предъявления разработчику два отношения

$$u(x_k) > c_{\max} u(x_r) \text{ и } u(x_k) > c_{\min} u(x_r),$$

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  $X_r$ , полезность которой в  $c$  раз выше полезности оценки  $x_r$ , и худшие оценки по остальным показателям.

Соотношение между полезностями трех оценок. Исследуются отношения вида

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



или

$$\begin{aligned} & \left[ u(x_r) + u(x_k) \right] / u(x_q) = \\ & = \sum_{i=1}^p a_i \left[ u_i(x_{ir}) + u_i(x_{ik}) \right] / \sum_{i=1}^p a_i u_i(x_{iq}), \end{aligned}$$

$k, r, q = 1, 2, \dots, N; r \neq k$  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 [6].

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 [6]. 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 выра-

ботки вопросов к разработчику осуществляется в следующей последовательности.

Уравнение парной границы вариантов  $s_i$  и  $s_g$  имеет вид

$$\begin{aligned} y_{ig}(x) &= U(y_i) - U(y_g) = \sum_{j=1}^m u_j(x_j^i) - \\ & - \sum_{j=1}^m u_j(x_j^g) = \sum_{j=1}^m \left( u_j(x_j^i) - u_j(x_j^g) \right) = 0. \end{aligned}$$

Условием предпочтительности варианта  $s_i$  над вариантом  $s_g$  является

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

Исходными данными для определения области  $\Omega$  в пространстве полезностей оценок являются неравенства, построенные на основе упорядочения оценок  $s_i$ , на шкале каждого показателя:  $x_j^i \gtrsim x_j^{j^{r-1}} \gtrsim \dots \gtrsim x_j^1; j = 1, 2, \dots, m$ .

Впоследствии к ним добавляются неравенства, полученные в результате сравнения по полезности оценок для разработчика, интервалов между оценками и т. д.

Для каждого варианта  $s_i$  записывается  $(n - 1)$  условий вида  $\max_{\Omega} y_{ig}(x) \leq 0$ , которые определяют область предпочтительности варианта  $s_i$  над остальными вариантами в пространстве полезностей оценок. Совместное решение неравенств, описывающих условия  $\max_{\Omega} y_{ig}(x) \leq 0$  и область  $\Omega$ , позволяет найти область  $\Omega_i^n$  возможных, с точки зрения эксперта, значений полезностей оценок, при которых вариант  $s_i$  не менее предпочтителен. Области  $\Omega_i^n$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , задаются точками  $\beta_g^i(u_g(x_{g1}), \dots, u_g(x_{gN})); g = 1, 2, \dots, p$ , в  $N$ -мерном пространстве. Поскольку частичные подмножества эквивалентности вариантов совпадают с границами областей  $\Omega_i^n$ , то внутренним точкам этой области соответствует строгое доминирование варианта  $s_i$ .

Одной из таких точек является геометрический центр области

$$C_i \left( \frac{\sum_{g=1}^p u_g(x_{g1})}{p}, \frac{\sum_{g=1}^p u_g(x_{g2})}{p}, \dots, \frac{\sum_{g=1}^p u_g(x_{gN})}{p} \right).$$

Значения координат центра  $C_i$  дают представление о соотношениях между полезностями оценок, о соотношении по полезности интервалов между оценками одного и разных показателей [6].

Таким образом, предварительное исследование задачи позволяет получить представление о системе предпочтений, обуславливающей выбор



каждого варианта. Разработчику можно предъявлять либо всю совокупность условий, либо последовательно отдельные задачи сравнения. Разработчик может либо согласиться с одной из предложенных версий системы предпочтений в целом или с отдельными задачами, либо отвергнуть их. Вся полученная информация используется для сужения области  $\Omega$ . Для этого сужения разработчик представляет в виде неравенств и включает их в систему неравенств, описывающих область  $\Omega$ . Области  $\Omega_i^n, i = 1, 2, \dots, n$ , примут другой вид, и, следовательно, потребуются определить новые центры области и новые соотношения между полезностями оценок и интервалов.

Основные трудности на пути применения метода районирования для получения информации о предпочтениях связаны с большой размерностью пространства полезностей оценок, так как при этом часто теряется наглядность при интерпретации результатов анализа. Эффективность анализа существенно возрастает при использовании модели, в которой предметом экспертной оценки являются коэффициенты важности показателей.

Уравнение парной границы в этом случае имеет вид

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

Для  $k_j, j = 1, 2, \dots, m$  без нарушения общности можно ввести ограничения  $\sum_{j=1}^m k_j = 1, k_j \geq 0$ . Тогда множество значений  $k_j$  можно представить в виде части гиперплоскости, пересекающей оси координат на отметке 1 и заключенной в положительном ортанте  $m$ -мерного пространства. Путем районирования ограниченную гиперплоскость можно разделить на области, в которых значения коэффициентов важности обусловят предпочтительность одного из вариантов. Условие предпочтительности вариантов сохраняет вид  $\max_{\Omega} y_{ig}(x) \leq 0$ .

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.

*Применение отражательных шаблонов для устройства формирования нанодорожек.*

Согласно предложенному техническому решению [7] источник лазерного излучения вы-

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

Введение в устройство для формирования нанодорожек на подложке источника лазерного излучения, выполненного в виде пучка лучей, расстояние между которыми составляет  $l = (5-10) \lambda$  отражателя, выполненного в виде зеркала, состоящего из основы дифторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ), на котором нанесена пленка родия ( $\text{Rh}$ ), дополнительное снабжение устройства обращателем волнового фронта в виде полого цилиндра с газообразным метаном, находящимся под давлением  $(5-10)$  атмосфер, а также полупрозрачным зеркалом, обеспечивает повышение производительности нанесения нанодорожек на подложку.

Устройство для формирования нанодорожек на подложке (рис. 8) 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 ( $\text{Rh}$ ) 9, обращатель 10 волнового фронта, выполненный в виде полого цилиндра 11 с газообразным метаном 12 под давлением, и полупрозрачное зеркало 13.

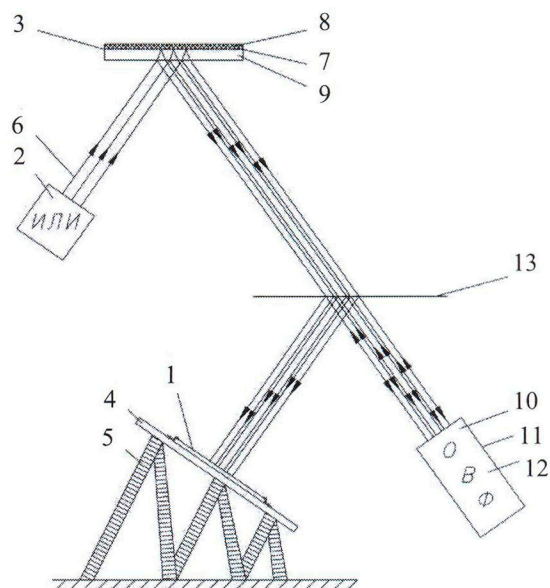


Рис. 8. Устройство для формирования нанодорожек на подложке (схема без объектива)



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

Излучение, проходя через среду с газообразным метаном обращателя волнового фронта, становится идеально направленным в соответствии с эффектом Манделъштама—Бриллюэна. Тем самым искажения волнового фронта, появившиеся после прохождения отражателя, компенсируются при прохождении пучком лучей обращателя волнового фронта. Подложкодержатель, закрепленный на пьезоприводе, обеспечивает возможность ориентации подложки 1 перпендикулярно падающему излучению от зеркала.

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

Применение предлагаемого устройства позволяет повысить производительность нанесения нанодорожек на подложки.

## Заключение

Предлагаемая аналитическая модель дает возможность исследования свойств и особенностей вариантов, выяснения условий предпочтительности каждого из них и помогает выбрать направление опроса проектировщиков отражательных фотошаблонов для оборудования ультрафиолетовой литографии. Эффективность анализа при обработке информации существенно возрастает при использовании модели, в которой предметом экспертной оценки являются коэффициенты важности показателей.

Предложено устройство, в котором использование эффекта обращения волнового фронта обеспечивает создание высоконаправленных пучков, компенсируя искажения по всей трассе прохождения пучка лучей, позволяет повысить производительность нанесения нанодорожек на подложку.

Представленный подход в поиске решений отражательных фотошаблонов для ультрафиолетовой литографии позволяет принимать научно обоснованное, технически целесообразное и экономически выгодное решение для последующего совершенствования известных и создания новых функциональных устройств и технологического оборудования в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Валиев К. А.** Физика субмикронной литографии. — М.: Наука, 1990. — 528 с.
2. **Никитин А. В.** Разрешение оптических систем и проблема воспроизведения минимальных элементов изображения // Прикладная физика, 1997. № 4. С. 32—41.
3. **Трунин Д. А., Ларищев В. П., Никитин А. В.** Оптические свойства отражательных фотошаблонов // Электронный журнал "Исследовано в России", 2000. С. 1—3.
4. **Трунин Д. А., Лаврищев В. П.** Расчет числовой апертуры схемы литографии, основанной на эффекте обращения волнового фронта с применением отражательного шаблона // Сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. "Новые материалы и технологии НМТ-2002". — М., 2002. С. 81, 82.
5. **Золотарёв В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В.** Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. — Л.: Химия, 1984. — 216 с.
6. **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.
7. Патент на полезную модель 104508 РФ, МПК7 В 28 В 1/29. Устройство для формирования нанодорожек на подложке // М. Ю. Корпачёв, 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.
8. **Ивашов Е. Н., Корпачёв М. Ю., Костомаров П. С.** Формирование нанобъектов 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. 232, 233.