

УДК 621.385.833

РАЗРЕШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОБЛЕМА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А. В. Никитин

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф. В. Лукина, Москва, Россия

В работе дан подробный анализ соотношения между разрешающей способностью проекционных оптических систем и размерами минимального элемента в изображении, сформированном такой системой. Рассмотрены два направления исследований и разработок, обсуждающиеся в публикациях и ставящих целью реализацию элементов изображения, меньших предела разрешения системы: а — создание шаблонов с оптимальной амплитудно-фазовой структурой для фотолитографии; б — использование внеосевого освещения предмета для тех же целей. Показано, что эти два направления идентичны по существу и различаются лишь по их технической реализации. Установлено, что в обоих случаях за счет управляемой интерференции световых волн в плоскости изображения можно реализовать элементы специальной формы с размерами, меньшими предела разрешения (сверхмалые элементы). При этом неизбежно искажается изображение в целом, но разрешение оптической системы не меняется. Приводятся примеры практической организации эксперимента для получения элементов сверхмалых размеров как при использовании оптимальных шаблонов, так и при реализации внеосевого освещения объекта.

Общеизвестно, что основное требование, предъявляемое к оптическим (линзовым или зеркальным) системам, формирующим изображение, является как можно более точное воспроизведение оптической структуры объекта. Класс таких оптических систем достаточно обширен и включает все виды оптической микроскопии, телескопии, проекционные системы различного назначения, системы для фотографии и др. Наиболее жесткие требования по точности передачи структуры объекта предъявляются, пожалуй, к проекционным системам переноса изображения, используемым в микроэлектронике на операциях фотолитографии и контроля. Ниже мы остановимся на анализе именно таких оптических систем, тем более, что в производстве современных интегральных схем они занимают доминирующее положение. Примем во внимание специфические особенности объекта, которым служит в этом случае шаблон с рисунком интегральной схемы. Будем считать, что такой шаблон освещается однородным когерентным световым потоком по направлению нормали к его поверхности. Геометрия устройства схематически представлена на рис. 1. Назовем поле световой волны, освещающей шаблон, комплексной "функцией осветителя" $\epsilon_0(x, y)$. Свойства любого объекта в оптической системе исчерпывающе описываются его комплексной функцией прозрачности (или функцией отражения) для поля:

$$\epsilon_1(x, y) = |\epsilon_1(x, y)| \exp[i\alpha(x, y)], \quad (1)$$

где $|\epsilon_1(x, y)|$ — прозрачность (для световой волны) шаблона в окрестностях точки с координатами x, y ; $\alpha(x, y)$ — фаза прошедшей волны в окрестностях той же точки.

Произведение двух функций: $\epsilon_0(x, y)$ и $\epsilon_1(x, y)$ в каждой точке объекта представляет собой поле $\epsilon(x, y)$ световой волны, покидающей объект по направлению к объективу. Распределение этого поля по координатам в плоскости объекта назовем комплексной "функцией объекта" — ΦO :

$$\Phi O = \epsilon(x, y) = \epsilon_0(x, y) \epsilon_1(x, y). \quad (2)$$

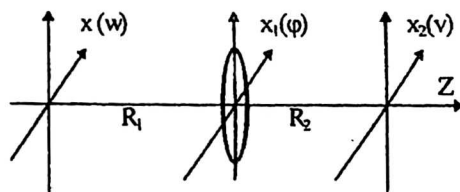


Рис. 1. Схема проекционного оптического устройства и используемая система координат

Понятно, что изображение, создаваемое оптической системой, представляет собой именно функцию объекта, преобразованную объективом и определяемую соотношением (2). При однородном освещении объекта $\epsilon_0(x, y)$ есть константа (нормированная единица), а функция объекта $\epsilon(x, y)$ совпадает с распределением прозрачности $\epsilon_1(x, y)$. В общем случае ΦO и, значит, структура изображения зависят как от поля освещающей волны $\epsilon_0(x, y)$, так и от комплексной прозрачности (либо комплексного коэффициента отражения) объекта $\epsilon_1(x, y)$. Таким образом, влиять на структуру изображения, в частности, на разрешение, в принципе можно двояким способом: либо при однородном освещении ($\epsilon_0(x, y) = \text{const}$) изыскивать специальный вид распределения прозрачности объекта $\epsilon_1(x, y)$, либо при заданной амплитудно-фазовой структуре объекта $\epsilon_1(x, y)$ подыскивать наиболее подходящий вид "функции осветителя" $\epsilon_0(x, y)$. Возможны, конечно, и смешанные воздействия.

Формулировка проблемы

В целях упрощения дальнейшего анализа примем, что рисунок на шаблоне одномерный, т. е. его оптические характеристики зависят только от одной координаты — x . Для суждений о соотношении структуры объекта и его изображения необходимо рассчитать структуру изображения, т. е. распределение интенсивности I в зависимости от координаты X_2 , в плоскости изображения, или функцию $I(X_2)$:

$$I(X_2) = E(X_2) E^*(X_2), \quad (3)$$

где $E(X_2)$ — комплексное поле в точке $E^*(X_2)$ — комплексно сопряженное поле.

При расчетах поля $E(X_2)$ воспользуемся известным соотношением Френеля-Кирхгофа [1] и примем во внимание, что характерные размеры элементов рисунка

на шаблоне и в плоскости изображения много меньше, чем типичные значения расстояний R_1 и R_2 (см. рис. 1), что позволяет использовать Фраунгоферовское приближение. В итоге для случая точной фокусировки получим:

$$E(v) = (1/2\pi) \int_{-1}^1 \exp(-i v \varphi) d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(w) \exp(-i \varphi w) dw. \quad (4)$$

Здесь использованы безразмерные величины взамен обычных размерных: $v = X_2 k(a/R_2)$; $w = X k(a/R_1)$; $\varphi = X_1/a$; a — радиус зрачка объектива; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света.

По формулам (3), (4) можно рассчитать структуру изображения произвольного одномерного объекта. В частности, если освещение объекта считать однородным, а в качестве объекта выбрать чисто амплитудный рисунок: прозрачную полосу безразмерной ширины $2B$, тогда функция $\varepsilon(x)$ приобретет П-образную форму и будет иметь нормированное значение $\varepsilon = 1$ в интервале от $-B$ до B и $\varepsilon = 0$ вне этого интервала. Формула (4) для этого случая преобразуется к виду:

$$E(v) = 2/\pi \int_0^1 \cos(\varphi v) \frac{\sin(B\varphi)}{\varphi} d\varphi. \quad (5)$$

По этой формуле удобно проводить расчеты структуры изображения. Кривая 1 на рис. 2 представляет распределение интенсивности для полосы с безразмерной шириной $2B = 10$, что соответствует изображению реальной полосы шириной 1,66 мкм, сформированному объективом с числовой апертурой 0,35 в когерентном свете с длиной волны $\lambda = 0,365$ мкм. Видно, что изображение полосы лишь аналогично структуре оригинала, но не является его копией. В частности, резкие границы полосы на шаблоне, где $\varepsilon_1(x)$ меняется скачком, отображаются здесь переходными зонами — наклонными участками кривой $I(X_2)$, ширина которых служит мерой разрешения объектива.



Рис. 2. Распределения интенсивности в изображении светлой полосы шириной 10 безразмерных единиц в когерентном свете: 1 — обычный объектив; 2 — объектив с утроенной числовой апертурой

Чтобы улучшить разрешение, обычно увеличивают радиус зрачка a (или, точнее, отношение a/R_1 , имеющее смысл апертуры объектива) либо увеличивают волновое число k , т. е. уменьшают длину волны света λ . Обсуждаются и альтернативные пути: поиски структуры т. н. "оптимальных" шаблонов [2] и использование внеосевого освещения [3]. Рассмотрим подробнее возможности этих методов переноса изображений, учитывая возрастающий интерес к ним со стороны пользователей [4].

Несмотря на различия, кажущиеся принципиальными, базовая идея у этих двух направлений по сути одна и та же. Эта идея состоит в том, что в соответствии с (4) любые изменения вида функции объекта $\varepsilon(x)$ (независимо от того, осуществляются ли они за счет подбора функции прозрачности объекта $\varepsilon_1(x)$ или "функции осветителя" $\varepsilon_0(x)$) приводят к соответствующим изменениям в структуре изображения. Возможно, существует такая функция $\varepsilon(x)$, которая порождает распределение интенсивности ступенчатого П-образного вида без наклонных участков или переходных зон, что можно трактовать как реализацию высокого разрешения рисунка. Поиски такой "оптимальной" функции объекта представляют собой весьма заманчивую задачу. Если был бы известен вид функции объекта, обеспечивающий высокое разрешение рисунка, можно было бы выбрать тот или иной способ ее технической реализации: то ли за счет создания изоэдрической амплитудно-фазовой структуры шаблона при его однородном освещении, то ли за счет использования множественных источников, реализующих внеосевое освещение шаблона.

Заметим, что найти вид $\varepsilon(w)$ по заданной (желательной) форме $E(v)$, т. е. разрешить уравнение (4) относительно $\varepsilon(w)$ весьма непросто. По принятой классификации [5] соотношение (4) является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода, не имеющим аналитических решений и наиболее трудно поддающимся разрешению при использовании численных методов. Поэтому прежде чем пытаться так или иначе решать эту задачу, целесообразно определить: имеет ли она решение и является ли это решение единственным.

Рассмотрим эту проблему вначале применительно к направлению исследований, связанных с отысканием структуры "оптимального шаблона", освещаемого однородным по амплитуде и фазе световым пучком.

Отыскание оптической структуры "оптимального шаблона"

Для анализа увеличим мысленно апертуру объектива в n раз. Формула (5) приобретает вид:

$$E_n(v) = (1/\pi) \int_{-1}^1 \cos(vn\vartheta) \frac{\sin(Bn\vartheta)}{\vartheta} d\vartheta, \quad (6)$$

где дополнительно сделана замена переменной интегрирования: $\vartheta = \varphi/n$. Вид функции $I_n(v)$ для $n = 3$ представлен кривой 2 на рис. 2. Видно, что эта кривая действительно лучше соответствует требующейся ступенчатой форме, чем кривая 1. Нет сомнений, что, увеличивая и далее n , мы будем получать функции $I_n(v)$, как угодно близкие к П-образной форме. К сожалению, однако, такую процедуру можно выполнить лишь мысленно. На практике апертура объектива фиксирована и не может быть увеличена произвольно.

Анализируя полученное выражение (6), напомним, что здесь второй множитель под интегралом так же, как и в (5), есть поле на входном зрачке объектива.

Заменив в числителе этого множителя в формуле (6) произведение nB на B' , мы придадим формуле (6) сходство с (5), однако этого еще недостаточно. Как следует из (5), реальный объектив с фиксированной апертурой преобразует входное поле путем домножения его на $\cos(\varphi\nu)$, но не $\cos(n\varphi\nu)$ (!) и последующего интегрирования. Воспользовавшись стандартными тригонометрическими соотношениями для кратных углов, формулу (6) при $n = 2$ можно преобразовать к виду:

$$E_2(\nu) = 2/\pi \int_{-1}^1 \cos(\nu\vartheta) \left[\cos(\nu\vartheta) \frac{\sin(B'\vartheta)}{\vartheta} \right] d\vartheta - 1/\pi \int_{-1}^1 \frac{\sin(B'\vartheta)}{\vartheta} d\vartheta. \quad (7)$$

Второй интеграл в этом выражении есть константа. Структура первого свидетельствует, что реальный объектив производит нужное преобразование входного поля, если такое входное поле описывается выражением, заключенным в квадратные скобки. Из (7) отчетливо видно, что "оптимальное" входное поле, являясь функцией координаты φ (или ϑ) на зрачке, зависит также от структуры шаблона (от величины B') и, что самое важное, должно меняться с изменением точки наблюдения — координаты ν ! Другими словами: не существует такого "оптимального" фиксированного входного поля (и, значит, оптимальной фиксированной структуры шаблона, порождающего это поле), которое при его преобразовании реальным объективом приводило бы к желательной форме $I(\nu)$ во всех точках ν . Этот вывод справедлив, конечно, и для любых других целочисленных значений n .

Таким образом установлено, что двукратное (и более) улучшение разрешения рисунка этим путем реализовать не удастся.

Коль скоро кардинальное улучшение разрешения недостижимо, можно было бы удовольствоваться паллиативным решением: отысканием такой формы $e(w)$, которая обеспечивала бы улучшение разрешения хотя бы в некоторой небольшой мере. Напомним, что множитель n в формуле (6) есть кратность улучшения разрешения. Скромному улучшению разрешения соответствует значение n , ненамного превосходящее единицу.

Возвратимся к формуле (6) и воспользуемся известным разложением косинуса при нецелочисленном сомножителе n :

$$\cos(nu) = \frac{2n \sin(\pi n)}{\pi} \left\{ \frac{1}{2n^2} + \frac{\cos(u)}{1^2 - n^2} - \frac{\cos(2u)}{2^2 - n^2} + \frac{\cos(3u)}{3^2 - n^2} \dots \right\},$$

где $u = \varphi\nu$. Подстановка этого выражения в (6) приводит к бесконечному ряду интегралов, и этот ряд уместно анализировать почленно. Первый интеграл в этом ряду есть константа; вклад этого члена в итоговое изображение сводится к созданию фона постоянного уровня, не зависящего от координаты ν . Второй интеграл воспроизводит классическую структуру изображения при стандартном разрешении. Таким образом, если и можно (хотя бы ненамного) улучшить разрешение рисунка в данном случае, то только за счет вкладов третьего и последующих членов ряда. К сожалению, все эти члены содержат косинусы кратных аргументов, что возвращает нас к предыдущей задаче, которая, как установлено, является неразрешимой.

Приходится признать, что проблема отыскания оптимальной структуры шаблона, обеспечивающей повышенное разрешение проекционных систем литографии, ни кардинальных, ни паллиативных решений не имеет.

Внеосевое освещение

Поясним идею использования внеосевого освещения для улучшения разрешения рисунка. Эта идея состоит в том, что при таком освещении шаблона в зрачок объектива попадают периферийные, более высокочастотные участки спектра шаблона, которые совместно с центральной областью его спектра могли бы обеспечить соответствующее улучшение разрешения. В соответствии с принципом суперпозиции световых волн, если облучать шаблон тремя пучками когерентного света, один из которых направлен вдоль оптической оси, а два других наклонены к оси на углы $+\varphi_0$ и $-\varphi_0$ соответственно, то поле в плоскости изображения для светлой полосы может быть записано в виде:

$$E(v) = E_0 + E_{+\varphi_0} + E_{-\varphi_0}, \quad (8)$$

где E_0 — поле в плоскости изображения, обусловленное пучком света, освещающим объект по нормали; $E_{+\varphi_0}$ и $E_{-\varphi_0}$ — поля, отвечающие световым пучкам, направленным под углами $+\varphi_0$ и $-\varphi_0$ соответственно.

Нетрудно показать, что для произвольного наклона освещающего пучка φ_0 поле в плоскости изображения может быть рассчитано согласно выражению:

$$E(v, \varphi_0) = (1 / \pi) \int_{-1}^1 \exp(-i v \varphi) \frac{\sin[B(\varphi + \varphi_0)]}{\varphi + \varphi_0} d\varphi \quad (9)$$

или после несложных преобразований с заменой $\varphi + \varphi_0$ на переменную s :

$$E(v, \varphi_0) = (1 / \pi) \exp(i v \varphi_0) \int_{-1+\varphi_0}^{1+\varphi_0} \exp(-i v s) \frac{\sin(Bs)}{s} ds, \quad (10)$$

Здесь φ_0 — угол наклона, измеренный в единицах апертурного угла; s — переменная интегрирования, имеющая смысл координаты в плоскости зрачка объектива. Заметим, что полученное подынтегральное выражение одинаково для всех трех освещающих пучков и совпадает с классическим, фигурирующим, например, в (5). Подставляя выражения (10), модифицированные в соответствии со значениями φ_0 , в (8), получаем три слагаемых, у которых подынтегральные выражения совпадают. Однако эти слагаемые различаются по виду предынтегральной экспоненты и по пределам интегрирования. Соответствующие пределы составляют:

для пучка света, идущего по нормали: от -1 до 1 ;

для пучка с $\varphi_0 = 2$: от 1 до 3 ;

для пучка с $\varphi_0 = -2$: от -3 до -1 .

Таким образом, наложение трех указанных пучков могло бы обеспечить интегрирование классического выражения для поля волны в пределах по s от -3 до $+3$, что соответствует трехкратному увеличению апертуры и соответствующему улучшению разрешения. Столь простому решению проблемы препятствует, однако, экспоненциальный множитель, стоящий перед интегралом в (10). Структура этого множителя такова, что для реализации повышенного разрешения необходимо дополнительно ввести фазовую коррекцию излучения, рассеянного на шаблоне, путем домножения поля дифрагировавшей волны на множитель $\exp(-i v \varphi_0)$, зависящий от координаты точки наблюдения v — обстоятельство, вполне аналогичное обнаруженному ранее для оптимальных шаблонов!. Имеются основания

полагать, что эта аналогия не случайна и обусловлена сходными причинами. Действительно, хорошо известно [6], что косое освещение отличается от осевого только тем, что фаза освещающей волны (a , следовательно, и фаза волны, прошедшей через шаблон, т. е. фаза функции объекта) линейно зависит от координаты на шаблоне. Поэтому комбинированное освещение шаблона несколькими пучками когерентного света, направленными под различными углами, приводит лишь к тому, что в этом случае на поверхности шаблона из-за интерференции налагающихся световых пучков реализуется своеобразная амплитудно-фазовая структура освещающего (и, значит, проходящего) поля. Естественно, что подобную структуру поля на шаблоне можно организовать и без использования внеосевых пучков, например, за счет обсуждавшегося выше прямого подбора амплитудно-фазовой структуры самого шаблона при его однородном осевом освещении.

Таким образом, использование внеосевого освещения, в сущности, оказывается одним из способов решения все той же проблемы — отыскания структуры оптимальной функции объекта. Оба рассмотренные выше направления поисков жестко связаны между собой и различаются лишь способами реализации. Общность проблемы порождает и общность заключений о возможности ее решения: если решение одной из них имеется, то обязательно существует и может быть найдено решение другой. Однако если проблема повышения разрешения не имеет решений на пути оптимизации структуры шаблона, то она не может быть решена и за счет совершенствования конструкции осветителя.

Обсуждение результатов

Сформулированные выше выводы могут быть признаны строгими либо слишком категоричными в зависимости от того, какой смысл мы придаем понятию “разрешение”. К сожалению, в научной литературе можно встретить весьма различающиеся трактовки этого понятия. Даже размерность величины, характеризующей разрешение, неодинакова у разных авторов; не всегда делаются различия между разрешением по линиям и по точкам, иногда игнорируется зависимость разрешения от контраста объекта и когерентности освещающего пучка.

Ниже мы будем следовать монографии [1] и определим разрешение оптической системы как ее способность воспроизводить в изображении малые детали объекта. Количественной мерой разрешения будем считать размер минимального фрагмента объекта, который воспроизводится с не слишком значительными (допустимыми) искажениями, так что удастся различить в сформированном изображении ориентацию этого фрагмента, оценить его форму, размер и яркость.

Такая трактовка по смыслу близка известному “критерию разрешения”, введенному в практику Релеем [1]. Таким образом, разрешаемый оптической системой фрагмент объекта должен быть в изображении “похож” на оригинал по всем его оптическим характеристикам. Только в этом случае можно гарантировать, что любой другой фрагмент объекта с неменьшими размерами будет заведомо разрешаться в указанном смысле данной оптической системой независимо от формы этого фрагмента, его ориентации и других обстоятельств, а установленный таким образом предел разрешения приобретет характер универсального параметра, характеризующего свойства оптической системы.

Выводы, сформулированные выше, являются вполне строгими, если разрешение понимать в указанном смысле. Однако это не означает, что с помощью выбранной оптической системы невозможно получить в изображении фрагменты меньших размеров, чем то следует из критерия разрешения Рэлея. Если снять требование “похожести” изображения на оригинал, то за счет удачно организованной интерференции световых волн в плоскости изображения можно реализовать некоторые специальные фигуры с размерами, меньшими, чем Рэлеевский предел разрешения. Например, условия теневого способа переноса изображений

можно подобрать таким образом, чтобы проявлялся т. н. "эффект дифракционного фокусирования" [7]. В результате будут реализованы элементы (полоски) с размерами, в четыре-пять раз меньшими, чем на шаблоне. Платой за такое "улучшение разрешения" окажутся ограничение на форму воспроизводимого элемента (только полоски или круги и обязательно светлые на более темном фоне), а также неизбежные искажения изображений торцов полоски, отмечавшиеся в [7].

Другим примером подобного рода может служить практика использования т. н. фазосдвигающих шаблонов в проекционных оптических системах литографии. И здесь выигрыш в размере минимального фрагмента изображения сопровождается ограничениями на тип воспроизводимого элемента (в данном случае это также полоски, но темные на более светлом поле), а также искажениями соотношений размеров и формы малых элементов [8].

Еще один пример. Результаты математического моделирования структуры оптического изображения, реализующегося в обычной проекционной установке и в системе с внеосевым освещением, представлены на рис. 3 и 4. Принято, что в обоих случаях масштаб переноса 10:1, длина волны излучения 248 нм (излучение KrF лазера), ширина светлой полоски на шаблоне 4,2 мкм, числовая апертура объектива 0,42, фокусировка изображения совершенная. Рис. 3 отвечает освещению шаблона одним источником вдоль оптической оси системы. Принимая во внимание введенный в [8] критерий устойчивости процесса литографии, можно заключить, что минимальным, устойчиво воспроизводимым элементом топологии в этом случае будет полоска шириной 182 нм.

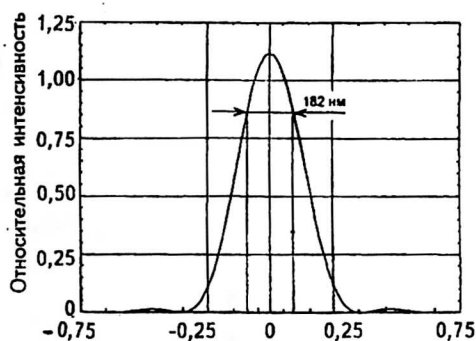


Рис. 3. Структура изображения светлой полоски, сформированного в когерентном свете при освещении объекта по нормали (минимальная ширина устойчиво реализуемой полоски 182 нм)

Рис. 4 соответствует освещению такого же шаблона тремя когерентными пучками света, один из которых направлен вдоль оси системы, а два других наклонены на углы $\pm \varphi_0$, причем $|\varphi_0| = 2,1$, а амплитуда волны в боковых пучках превышает амплитуду волны центрального пучка в меру множителя g , равного в данном случае 2,2. Анализ этого распределения удачно иллюстрирует как достоинства, так и недостатки рассматриваемого способа литографии. Несомненным его достоинством является заметное уменьшение минимального, устойчиво реализуемого размера: 122 вместо 182 нм. Недостатков можно насчитать несколько. Прежде всего это побочные интерференционные максимумы интенсивности в затененных областях. Их наличие не позволяет располагать другие элементы рисунка вблизи формируемой узкой полосы. Кроме того, при погрешностях экспонирования (передозировке, превышающей 42 %) будут проявляться повторные контуры, порождаемые побочными максимумами интенсивности. Мы убеждаемся, что и в данном случае за уменьшение воспроизводимого размера приходится "расплачиваться" потерей "похожести" изображения на оригинал.

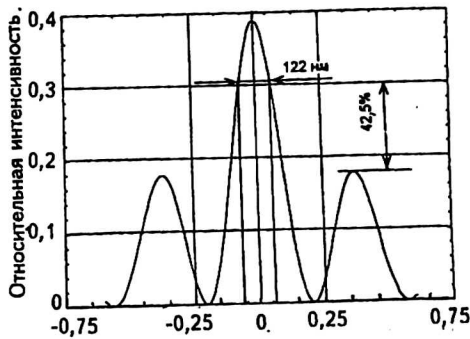


Рис. 4. Структура изображения той же полоски, что и на рис. 3, сформированного в установке внеосевым освещением (минимальная ширина воспроизводимой полоски 122 нм)

Понятно, что во всех подобных случаях минимальный реализуемый фрагмент изображения уже не может быть принят в качестве однозначного критерия разрешающей способности оптической системы.

Заметим, что как и предполагалось выше, распределение интенсивности, совпадающее с рис. 4, можно реализовать и без внеосевого освещения, если использовать "оптимальный" шаблон с функцией пропускания, соответствующей выражению:

$$\varepsilon_1(x) = 1 + 2g \cos(\omega \varphi_0),$$

и освещать его единственным (осевым) пучком света. Здесь g и φ_0 — константы, значения которых приведены выше.

Подстановка такой функции объекта в (4) и последующие элементарные преобразования приводят к формулам, совпадающим с (8)—(10), т. е. теми соотношениями, которые использованы для расчетов структуры изображения при внеосевом освещении. Это обстоятельство является прямым доказательством того, что рассмотренные выше два пути реализации малых элементов рисунка являются, в сущности, принципиально идентичными и различаются лишь техническими деталями, а их возможности лимитируются одними и теми же факторами. В обоих случаях уменьшение размеров реализуемых элементов сопровождается значительными искажениями структуры рисунка и может быть использовано лишь применительно к объектам специальной природы и формы. При этом разрешение оптической системы в классической трактовке изменений не претерпевает.

Л и т е р а т у р а

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. / Под ред. Г. П. Мотулевич. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
2. Валиев К. А. Физика субмикронной литографии. — М.: Наука, 1990. — 528 с.
3. Levenson D. M. Extending optical lithography to the gigabit era // Solid State Technology, Feb. 1995. P. 57—66.
4. The National Technology Roadmap for Semiconductor. SIA, p. 81.
5. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. IV., М., ГИТЛ, 1953. — 804 с.
6. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику: Пер. с англ. / Под ред. Г. И. Косоурова. — М.: Мир, 1970. — 364 с.

7. Березин Г. Н., Никитин А. В., Сури С. Р. А. Оптические основы контактной фотолитографии. — М.: Радио и связь, 1982. — 104 с.

8. Золуцкий С. Н., Мартынов В. В., Никитин А. В., Уманцева Е. В. Фотолитография на пути к разрешению в 100 нанометров// Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992. Вып. 1. С. 15–20.

RESOLUTION OF THE OPTICAL SYSTEMS AND PROBLEM OF RENDERING OF THE MINIMAL FEATURES

A. V. Nikitin

The Lookin's State Scientific Research Institute of Physical Problem, Moscow, Russia

In the paper the relationship between resolution of the projection optical systems and the sizes of the minimal features in the image formed by this system is analysed in details. The two discussed in modern publications research and development ways for creating the features with sizes less than the system resolution limit are examined. These ways are: a — the creating the photolithographic masks with optimal amplitude-phase distributions; b — using the off-axis illumination of the objects. It is show that these ways are identical in essence, but differ only in details of their technical realization. It is estimated that in both cases it is possible to realize the features of the special shapes with sizes less than the system resolution limit (the supersmall features) by the controlled interference of the light waves in the image plane. In this case, however, the image as a whole will distorted, but the optical system resolution will not be changed. The examples of the practical arrangement conditions of experiments for the obtaining of the super-small features both on the optimal mask way, and the using of the off-axis illumination way are given.