

ческая эффективность обычной линзы ϵ'_0 , подсчитанная по картине Эйри [6].

Доля энергии $1 - \epsilon_0$, составляющая примерно одну десятую всей энергии излучения, идет мимо кольца, образуя, во-первых, центральное пятно (ϵ_0) и, во-вторых, фоновую засветку (ϵ_Φ).

Используя результаты исследования картины Эйри [6], с учетом (21) получим, что величина ϵ_0 может оцениваться по формуле

$$\epsilon_0 = \frac{4}{k^2 a^2} \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 [1 - J_0^2(\xi_0) - J_1^2(\xi_0)] \cong \frac{1}{k^2 a^2} \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 \xi_0^2 \left(1 - \frac{\xi_0^2}{8} \right). \quad (46)$$

Из (46) видно, что $\epsilon_0 \sim 10^{-3} - 10^{-5}$ при реальных значениях λ , a , R_0 , r_0 , т. е. основная рассеиваемая энергия идет в фоновую засветку. Следует отметить, что введение квантования фазовой функции оптического элемента и рассеяние света будут приводить к перераспределению энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб М. А., Карнеев С. В., Прохоров А. М. и др. Фокусировка излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм // Письма в ЖТФ.— 1981.— Т. 7, вып. 10.
2. Данилов В. А., Попов В. В., Прохоров А. М. и др. Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы // Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8, вып. 13.
3. Гончарский А. В., Данилов В. А., Попов В. В. и др. Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую // ДАН СССР.— 1983.— Т. 273, № 3.
4. McLeod I. H. The axicon: A new type of optical element // JOSA.— 1954.— V. 44, N 8.— P. 592—597.
5. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия.— 1985.— № 1.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
7. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции.— М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 8 мая 1985 г.

УДК 681.723 : 535.421

В. П. КОРОНКЕВИЧ, В. Н. НАГОРНЫЙ, И. Г. ПАЛЬЧИКОВА,
А. Г. ПОЛЕЩУК, И. В. СТЕПАНОВ

(Новосибирск)

БИФОКАЛЬНЫЙ МИКРОСКОП С КИНОФОРМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Введение. Степень интеграции, быстродействие и другие характеристики микроэлектронных приборов определяются процессом формирования на поверхности полупроводниковой пластины топологического рисунка. В настоящее время наиболее широко применяется теневой метод [1], основанный на экспонировании полупроводниковой пластины через предварительно изготовленный фотошаблон. Первой технологической операцией, выполняемой в этом случае, является взаимное совмещение и контроль топологических рисунков (с характерными размерами ~ 1 мкм) на фотошаблоне и пластине. Данная операция выполняется при заданном зазоре между ними, необходимом для исключения появления дефектов и повреждения фотошаблона. Величина зазора лежит в пределах 5—20 мкм для контактной фотолитографии и 10—

100 мкм для рентгенолитографии, в частности, с использованием синхронного излучения.

Известно несколько способов оптического контроля взаимного положения микроизображений, расположенных в двух различных плоскостях. Это использование:

а) обычных микроскопов [1] (допустимая величина зазора δ определяется глубиной резкости микроскопа; разрешающую способность 2 мкм и $\delta \sim 10-15$ мкм обеспечивает объектив с апертурой 0,2);

б) сканирования микрообъектива микроскопа вдоль оптической оси с частотой 25 Гц и амплитудой, равной величине зазора [2];

в) микроскопов с разделением пучка света после микрообъектива на два канала различной длины и последующим сведением [3];

г) объективов с двоякопреломляющими элементами — линзами или пластинами из кристаллического кварца или кальцита — в оптической схеме микроскопа [4].

Практическое применение в рентгенолитографических установках получили первый [1] и последний [5] способы. Трудно достигнуть высокой точности контроля совмещения на обычных микроскопах, поскольку параметры микроскопа взаимосвязаны: с увеличением апертуры объектива возрастает разрешающая способность, но уменьшается глубина резкости. Существенные недостатки имеет и последний способ — невозможность изменения расстояния между наблюдаемыми плоскостями в процессе работы и сложность реализации.

В настоящей работе приводятся результаты исследования нового способа одновременного наблюдения двух различных плоскостей, основанного на применении в оптической схеме микроскопа киноформных оптических элементов (КОЭ), и рассмотрены варианты оптической схемы бифокального микроскопа. Представлены экспериментальные результаты по их исследованию.

I. Киноформные многофокусные оптические элементы. Киноформная линза (КЛ) работает одновременно как комбинация n собирающих и рассеивающих линз с фокусными расстояниями [6]

$$f_n = \frac{f}{n}, \quad n = 2m + 1, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние $+1$ -го дифракционного порядка для основной длины волны λ_0 . Дифракционная эффективность каждого порядка определяется количеством ступеней фазового рельефа. Радиусы киноформных зон задаются уравнением

$$r_k = \sqrt{2k\lambda_0 f + k^2 \lambda_0^2}, \quad k = 1, 2, \dots, q_x \quad (2)$$

а фокусное расстояние $|f| = r_1^2 / 2\lambda_0$, где r_1 — радиус первой зоны. Отсюда большое значение хроматической аберрации [6]

$$\delta S' = -\frac{S_1^2 \Delta \lambda}{f \lambda_0}, \quad (3)$$

где S_1 — расстояние от линзы до изображения объекта.

Распределение интенсивности в фокальных плоскостях ± 1 -го порядка то же, что и для обычной линзы, если число интерферирующих зон $q \geq 10$ [6].

Перечисленные свойства позволяют использовать одиночные киноформные линзы либо их набор, выполненный на одной подложке, в качестве многофокусных элементов оптических систем.

Рассмотрим несколько вариантов построения бифокальных оптических систем, включающих КОЭ.

1. Из выражения (3) следует, что при освещении КЛ световым потоком с длинами волн λ_1 и λ_2 образуются, по крайней мере, две

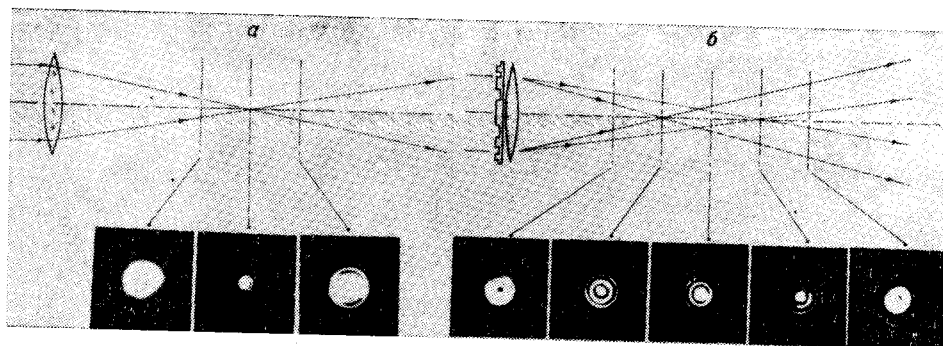


Рис. 1. Фокусировка излучения и сравнительные результаты фоторегистрации дифракционных кружков в плоскостях, расстояние между которыми 240 мкм: а — микрообъективом 16 \times ; б — бифокальной системой, состоящей из линзы Френеля и микрообъектива 16 \times

фокальные плоскости, расстояние между которыми

$$\delta = f \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_0}. \quad (4)$$

Максимально возможная величина δ для видимого спектрального диапазона $C - F$ (486—656 нм) составляет $\frac{1}{3} \frac{S_1^2}{f}$. При этом снижение дифракционной эффективности линзы на краях данного диапазона равно 8% ($\Delta\lambda/\lambda_0 = 0,15$). Если необходимо иметь относительно небольшое значение δ ($\delta/f \sim 10^{-2} - 10^{-3}$), то надо использовать гибридную оптическую систему — установленные последовательно обычный короткофокусный объектив и длиннофокусную КЛ.

Хроматическая бифокальная система имеет два фокуса и строит два изображения различного цвета одного объекта, если для освещения используется источник света с двумя длинами волн λ_1 и λ_2 . Выделить достаточно узкие спектральные диапазоны можно, например, с помощью интерференционных фильтров. Величина δ изменяется при перестройке одной из используемых длин волн.

2. Значительно более простая бифокальная оптическая система (рис. 1, а) может быть создана с использованием фазовой зонной пластинки Френеля, которая 81% световой энергии распределяет поровну между фокусами ± 1 -го порядка. Для освещения необходимо использовать узкий спектральный диапазон, чтобы исключить хроматическую aberrацию. При установке обычного объектива последовательно с КЛ эквивалентные фокусные расстояния $f_{\Sigma n}$, положения эквивалентных фокусов и главных плоскостей системы вычисляются по обычным формулам параксиальной оптики

$$\frac{1}{f_{\Sigma n}} = \frac{1}{f_l} + \frac{1}{f_n} - l \frac{1}{f_l f_n}, \quad (5)$$

где f_l , f_n — фокусное расстояние объектива и кифоформной линзы для фокуса n -го порядка соответственно; l — расстояние между главными плоскостями. Поскольку f_n может быть положительным или отрицательным, фокусное расстояние системы $f_{\Sigma n}$ может быть больше или меньше, чем фокусное расстояние объектива f_l . Фокус n -го порядка КЛ переходит в действительный фокус системы, если $f_l < f_{-n}$. Такая бифокальная система не имеет плоскости симметрии, перпендикулярной оптической оси. Поэтому расстояние между передними δ_1 и задними δ_{11} фо-

кальными плоскостями различны и определяются выражениями

$$\delta_I = \frac{2f_n^2 f \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} f\right)^2 - (l + f_n)^2}, \quad (6)$$

$$\delta_{II} = \frac{2(l - f_n)^2 f \frac{\lambda_0}{\lambda}}{(l - f_n)^2 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} f\right)^2}, \quad (7)$$

где λ — используемая длина волны.

Из выражений (6) и (7) следует, что δ_I , δ_{II} можно легко изменить, варьируя расстояние между компонентами l либо путем перестройки длины световой волны. Так, при $f_n = 10$ мм, $f = 1000$ мм, $l = 0$ расстояние δ_I меняется от 150 до 200 мкм в спектральной области (656—486 нм). Для большинства случаев $f \gg f_n$, $f \gg l$, тогда

$$\delta_I \sim \frac{2f_n^2}{\frac{\lambda_0}{\lambda} f} \text{ и } \delta_{II} \approx \frac{2}{\frac{\lambda_0}{\lambda} f} (l - f_n)^2. \quad (8)$$

Отсюда следует, что δ_I не зависит от l , а δ_{II} как функция l имеет вид параболы, достигая минимума $\delta_{II} = 0$ в точке $l = f_n$.

Рассмотренная бифокальная система имеет ряд конструктивно-технологических ограничений, поскольку распределение интенсивности в фокусе, расстояние между фокальными плоскостями и фокусные расстояния компонентов взаимосвязаны. Ограничение минимально допустимого числа зон $q \geq 10$ обуславливает ограничение на максимально возможное фокусное расстояние КЛ при заданном диаметре выходного зрачка $2r_q: f \leq \frac{r_q^2}{10\lambda}$, что, в свою очередь, определяет минимальное расстояние между фокусами δ_I при заданном фокусном расстоянии объекта f_n :

$$\delta_I \geq \frac{20f_n^2 \lambda_0}{r_q^2}, \quad \lambda = \lambda_0, f \gg f_n, l = 0.$$

Минимально возможное фокусное расстояние определяется технологическими ограничениями. Установки проекционной фотолитографии позволяют получать фотошаблоны с минимальными размерами элементов топологии порядка длины волны — 0,6 мкм. Следовательно, минимально возможный период зон на краю киноформной линзы имеет порядок 2λ и углы дифракции α ограничены

$$\sin \alpha = \frac{r_q}{\sqrt{r_q^2 + f^2}} \leq \frac{1}{2},$$

откуда получаем $f \geq \sqrt{3}r_q$, $r_q/f \leq 0,58$. При $\lambda = \lambda_0$, $f \gg f_n$, $l = 0$ имеем $\delta_I < \frac{4f_n^2}{f} < \frac{4f_n^2}{\sqrt{3}r_q}$. Таким образом, расстояние между фокальными плоскостями ограничено снизу и сверху:

$$\frac{20f_n^2 \lambda_0}{r_q^2} \leq \delta_I \leq \frac{4f_n^2}{\sqrt{3}r_q}. \quad (9)$$

При $f_n = 10$ мм, $r_q = 4$ мм, $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ мм и $l = 0$ для расстояния δ получаем $0,0688$ мм $\leq \delta_I \leq 20$ мм.

Для исключения хроматических aberrаций необходимо ограничивать ширину спектра источника света величиной [4]

$$|\Delta\lambda| \leq \left(\frac{\lambda}{2r_q}\right)^2 f. \quad (10)$$

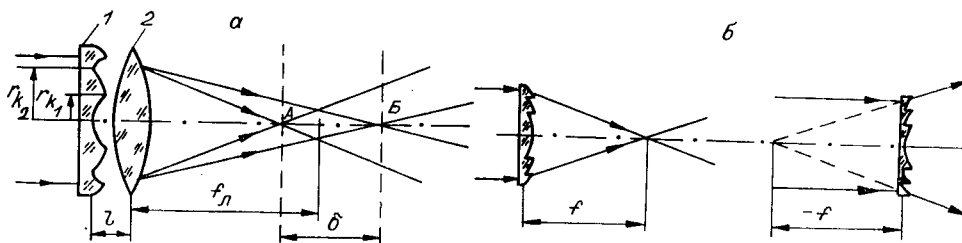


Рис. 2. Бифокальная система, состоящая из специальной фазовой пластинки и линзы (а); собирающая и рассеивающая киноформные линзы (б)

Из формулы (10) следует, что при $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ мм, $r_q = 4$ мм, $f = 1000$ мм допустим значительный спектральный диапазон $|\Delta\lambda| \approx 5$ нм, что позволяет применять обычные источники света с интерференционными светофильтрами.

3. Недостатком рассмотренной ранее бифокальной системы является наличие рассеянного света (около 20%), возникающего из-за наличия дифракционных порядков выше 1-го. Использование специальной фазовой пластинки в бифокальной системе (рис. 2, а) позволяет устранить указанный недостаток. Фазовая пластинка выполнена в виде круговой зонной пластинки с радиусами зон

$$r_{k_1} = \sqrt{2k\lambda_0 f} \text{ и } r_{k_2} = \sqrt{(2k-1)\lambda_0 f}, \quad (11)$$

где $k = 1, 2, \dots, q$.

Фазовый рельеф внутри каждого кольца имеет переменную толщину и на отрезках от r_{k_1} до r_{k_2} соответствует рельефу собирающей киноформной линзы, а на отрезках от r_{k_2} до r_{k_1+1} — рельефу рассеивающей линзы (рис. 2, б), изменяясь по квадратичному закону от 0 до 2λ . При такой форме рельефа падающий на линзу световой поток делится поровну между фокальными плоскостями системы. Фокусные расстояния бифокальной системы и расстояние между фокусами определяются выражениями (5) — (7).

По сравнению с однофокусными любые бифокальные системы обладают следующими особенностями. Во-первых, контраст изображения снижается, так как каждый объект дает два изображения, расположенные в различных плоскостях. В бифокальном микроскопе объектов наблюдения два, и каждый из них дает два изображения. Оптическая схема микроскопа конструируется таким образом, что две плоскости изображения совмещаются. Если в оптической схеме микроскопа используется первый вариант бифокальной системы, то изображение менее контрастно, чем при использовании второго и третьего вариантов. Это связано с наложением различных цветов и особенностями цветового зрения и подтверждается проведенными нами экспериментами. Во-вторых, каждое изображение имеет свое линейное увеличение, что обусловлено различием апертурных углов в пространстве предметов.

При конструировании микроскопа необходимо учитывать и аберрации, вносимые бифокальными элементами. Они складываются из аберраций киноформного элемента и подложки (плоскопараллельной пластинки). Для конкретной оптической схемы микроскопа легко рассчитать и изготовить бифокальный элемент, не вносящий аберраций, поскольку киноформная линза может быть и асферической. Цель настоящей работы состояла в том, чтобы, не меняя кардинально оптику микроскопа, придать ему свойство двухфокусности. Мы рассматривали и использовали обычные киноформные линзы.

Для минимизации волновых аберраций [7], вносимых КЛ, необходимо использовать киноформы с максимально возможным фокусным расстоянием и располагать наблюдаемые объекты в фокальных плоскостях бифокальной системы. В этом случае для второго и третьего ва-

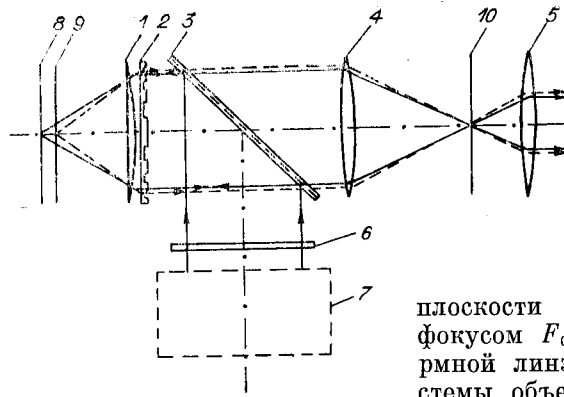


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема бифокального микроскопа отражения

вариантов бифокальной системы совмещенные изображения объектов формируются в фокальной плоскости дополнительного объектива с фокусом F_0 , расположенного за киноформной линзой. Линейное увеличение системы объектив — киноформная линза —

$$V_1 = \frac{F_0}{F_{\Sigma-1}}; \quad V_2 = \frac{F_0}{F_{\Sigma+1}}$$

объектив определяется обычным образом для каждой предметной плоскости:

$$v = \frac{V_1}{V_2} \approx 1 + \frac{\delta}{F_{\Sigma-1}} \quad (12)$$

Величина v может быть достаточно близка к единице в случае $f \gg f_n$, $f \gg l$. При этом $v \approx 1 + \frac{\delta}{f_n}$.

II. Оптическая схема бифокального микроскопа. Рассмотренные бифокальные системы легко включить в оптическую схему микроскопа. Киноформную линзу можно использовать в оптической схеме микроскопа в качестве насадки на микрообъектив, тубусного оптического элемента, насадки на окуляр.

На рис. 3 представлен один из вариантов принципиальной оптической схемы бифокального микроскопа отражения. Осветитель микроскопа 7 выполнен по схеме Келера и обеспечивает телецентрический ход лучей через микрообъектив 1 с киноформной насадкой 2. КОЭ располагается в выходном зрачке микрообъектива, образуя с ним бифокальную систему. Такое расположение позволяет обеспечить оптимальное освещение обеих предметных плоскостей. Однако элементы топологии фотошаблона в плоскости 9 затевают подложку, расположенную в плоскости 8, и, наоборот, свет, отраженный от подложки, затеняется фотошаблоном. Интерференционный светофильтр 6 служит для выделения узкой спектральной полосы. Перестройка полосы пропускания осуществляется путем наклона светофильтра по отношению к оптической оси. Лучи света, отразившись от подложки и фотошаблона, снова проходят бифокальную систему, светоделительную пластинку 3, попадают на тубусный объектив 4, который совмещает изображения подложки и фотошаблона в одной фокальной плоскости окуляра 5.

Полевая диафрагма, помещенная в плоскости 10, позволяет несколько повысить контраст изображения, уменьшая апертурные углы (световой поток) для паразитных изображений. Значительное увеличение контраста может быть достигнуто за счет электронной обработки видеосигнала с ТВ-камеры, устанавливаемой в плоскости 10.

В данной схеме можно использовать второй или третий вариант бифокальной системы.

Фокусные расстояния микроскопа F_1 и F_2 определяются по формулам

$$F_1 = \frac{250f_n}{F_0 \Gamma_{\text{ок}} (1 + f_n/f)}, \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{250f_n}{F_0 \Gamma_{\text{ок}} (1 - f_n/f)}$$

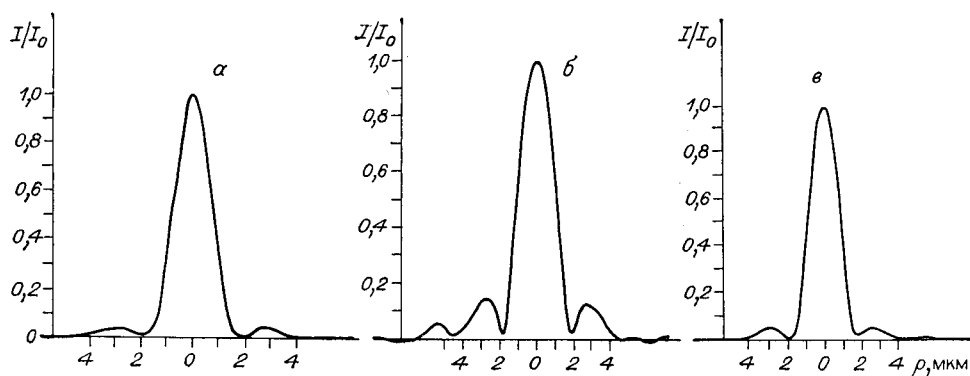


Рис. 4. Экспериментальные графики функции рассеяния точки

где F_0 — фокусное расстояние тубусной линзы; $\Gamma_{ок}$ — увеличение окуляра. Расстояние между фокусами описывается выражением (6). В рассмотренной конструкции оптической схемы используются КЛ с большим фокусным расстоянием, что обеспечивает достаточное безаберрационное линейное поле зрения и уравнивание увеличений для предметных плоскостей.

III. Экспериментальные результаты. Линза Френеля с прямоугольным фазовым профилем зон, фокусным расстоянием $f = 1000$ мм для $\lambda_0 = 0,55$ мкм, диаметром 8 мм, изготовленная по технологии фотолитографии с использованием реактивного ионного травления, устанавливалась в выходном зрачке микрообъектива. На рис. 4, а представлены фотографии фокальных точек обычного микрообъектива $16\times/0,2$ при освещении его коллимированным излучением He — Ne-лазера ($\lambda = 0,63$ мкм); на рис. 4, б — фотографии фокальных точек бифокальной системы. Экспертный метод оценки структуры дифракционного пятна позволил сделать вывод о возрастании сферической aberrации микрообъектива с киноформной насадкой. Функция рассеяния точки (ФРТ) определялась фотоэлектрическим методом, описанным в [8]. Микрообъектив освещался коллимированным лазерным пучком ($\lambda = 0,63$ мкм), и увеличенное оптическое изображение пятна рассеяния сканировалось световодом, диаметр которого в 100 раз меньше исследуемого поля. Для микрообъектива с киноформной насадкой трехмерное распределение света вблизи каждого из фокусов имеет вид, характерный для малой первичной сферической aberrации. Дифракционный фокус расположен посередине между парааксиальным и краевым фокусами. На рис. 4, а приведен график ФРТ для микрообъектива, на рис. 4, б, в — для первого и второго краевых фокусов бифокальной системы соответственно. Радиус первого темного кольца дифракционного пятна составил для микрообъектива 1,9 мкм, для бифокальной системы первый дифракционный фокус — 1,85, второй — 1,87 мкм. Форма кривой ФРТ дифракционных фокусов бифокальной системы совпадает с ФРТ микрообъектива. Было проведено моделирование процесса искажения трехмерного распределения света вблизи фокуса при наличии сферической

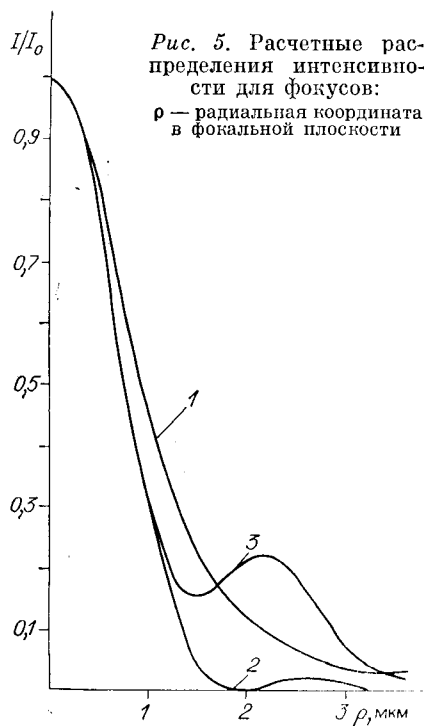


Рис. 5. Расчетные распределения интенсивности для фокусов:
 ρ — радиальная координата в фокальной плоскости

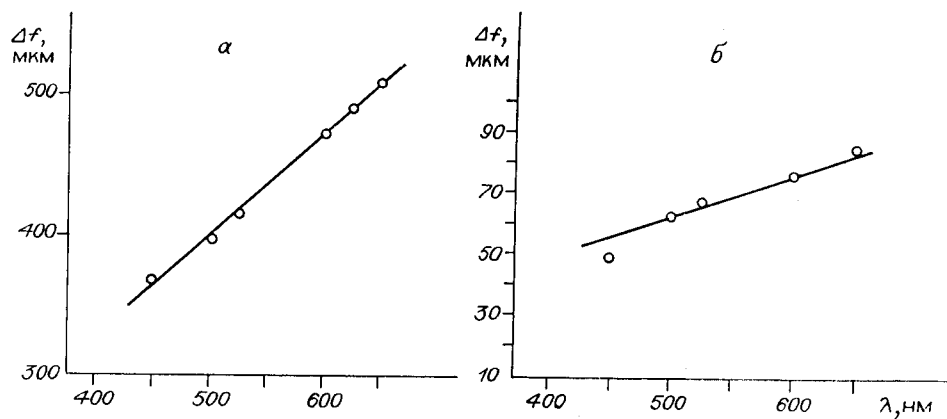


Рис. 6. Зависимость расстояния между фокусами бифокальной системы Δf от длины волны используемого излучения λ для различных микрообъективов: а — $16\times$, б — $40\times$. Расчетная прямая изображена сплошной линией, экспериментальные данные — кружками

абберации на ЭВМ СМ-4. Специальная программа позволила в диалоговом режиме задавать величину волновой aberrации и положение плоскости наблюдения относительно фокальной, выполнять быстрое преобразование Ханкеля функции пропускания и выводить результаты в виде графика на дисплей, а распечатки — на АЦПУ. Характер искажений полностью определяется величиной волновой aberrации. Сравнение расчетных кривых с экспериментальными позволило определить порядок величины сферической aberrации бифокальной системы. Она составила $0,9 \lambda_0$ для каждого из фокусов. На рис. 5 показаны расчетные распределения интенсивности для параксиального (кривая 1), дифракционного (кривая 2) и краевого (кривая 3) фокусов.

Разделение световой энергии i_n между фокусами бифокальной системы характеризуется отношением $i_n = I_n 100 / I_0$, где I_n , I_0 — максимум интенсивности в фокусе бифокальной системы и микрообъектива соответственно. Для первого фокуса i_n составило $43,1\%$, для второго — $49,3\%$.

На рис. 6, а, б представлены экспериментальные и расчетные графики зависимости расстояния между фокусами бифокальной системы микроскопа от длины волны для микрообъектива $16\times$ и микрообъектива $f_n = 6,3; 0,65$ соответственно. Измерения проводились следующим образом. Объект-микрометр на специальном оптическом столике с микрометрическим винтом, соединенном с индикатором 1ИГ (цена деления 1 мкм), перемещался от первой до второй предметной плоскости бифокального микроскопа. Отсчет снимался по шкале индикатора. Освещение осуществлялось через интерференционный светофильтр. Использо-

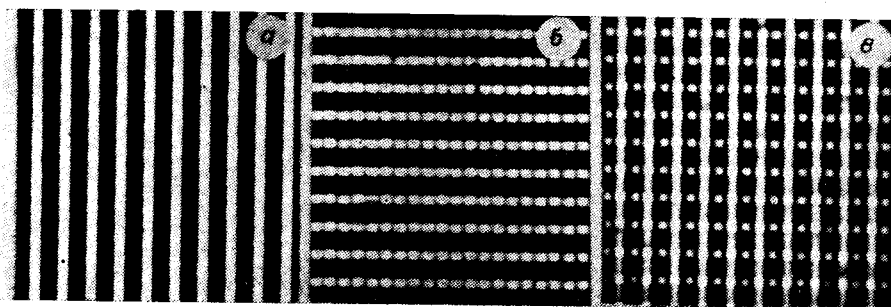


Рис. 7. Дифракционные решетки с периодом 10 мкм (а, б), помещенные в предметных плоскостях бифокального микроскопа, и их совмещенные изображения (в)

вался аттестованный набор светофильтров с полосой пропускания 1 нм.

На рис. 7 показаны дифракционные решетки с периодом 10 мкм (*a*, *b*), помещенные в предметных плоскостях бифокального микроскопа, и их совмещенные изображения (*в*). Использовался микрообъектив $16\times/0,2$, увеличение микроскопа $200\times$, отношение увеличений для предметных плоскостей $\nu = 1,05$, расстояние между предметными плоскостями 450 мкм. Линейное поле зрения составило 400 мкм.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследована бифокальная оптическая система на основе киноформной линзы. Результаты согласуются с теоретическим рассмотрением. На основе бифокальной системы экспериментально апробирован бифокальный микроскоп отражения, характеристики которого соответствуют требованиям к микроскопу совмещения установок рентгенолитографии: увеличение — до $600\times$; линейное поле зрения — 300 мкм; расстояние между предметными плоскостями изменяется от 40 до 80 мкм в спектральном диапазоне 450—625 нм.

Полученные результаты и проведенные экспертные оценки позволяют сделать вывод о возможности использования микрообъективов с киноформной насадкой в стандартных микроскопах совмещения для придания им свойств двухфокусности.

Выражаем благодарность Ю. И. Юрлову за помощь и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котлецов Б. М. Микроизображения: оптические методы получения и контроля.— Л.: Машиностроение, 1985.
2. Заявка № 30347525 (ФРГ). Verfahren zur vergrößerung der Abbildungstiefe bei Lichtmikroskopen/G. Stumer.— Оубл. 29.04.82.
3. Заявка № 2531237 (Франция). Optique bifocale et son utilisation dans un appareil détecteur d'images vidéofréquence/Y.-A. Emmanuelli.— Оубл. 03.02.84.
4. White A. D. Simple bifocus element for microscope objective // Appl. Opt.— 1977.— V. 16, N 3.— P. 549.
5. Fuls E. N. X-ray lithography applied to the fabrication of one micrometer n-channel metal oxide semiconductor circuits // Opt. Eng.— 1983.— V. 22, N 2.— P. 199—202.
6. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1975.
7. Young M. Zone plates and their aberrations // JOSA.— 1972.— V. 62, N 8.— P. 972—976.
8. Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем.— М.: Машиностроение, 1978.

Поступила в редакцию 5 января 1987 г.

УДК 535.31 : 681.777.2

В. Н. АНОХОВСКИЙ, В. И. МОСКАЛЕНКО

(Новосибирск)

ВНЕОСЕВОЙ ИК-КОЛЛИМАТОР

Для контроля качества оптических узлов и деталей, работающих в ИК-диапазоне, необходим коллиматор с неплоскостностью волнового фронта порядка $\lambda/8$. В настоящее время разработаны и подготовлены зеркальные коллиматоры с экранированием центра выходного зрачка, удовлетворяющие данным требованиям. При использовании таких коллиматоров для контроля оптических деталей, имеющих значительно меньший световой диаметр, чем выходной зрачок коллиматора, происходит существенное увеличение вторичных колец дифракционного кружка