

# ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОСТИЖЕНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А.В. Волков, Р.В. Скиданов

Институт систем обработки изображений РАН  
Самарский государственный аэрокосмический университет

## Аннотация

Анализируется возможность формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с использованием микроэлектронной технологии. Оцениваются предельно допустимые отклонения параметров микрорельефа ДОЭ исходя из технологических погрешностей, определяющих минимальные размеры пассивных элементов в микроэлектронике. Приводятся результаты численного эксперимента по оценке влияния технологических ошибок формирования микрорельефа на параметры ДОЭ.

## Введение

Дифракционный оптический элемент (ДОЭ) представляет собой зонную пластинку с дифракционным микрорельефом, отображающим фазовую функцию [1]. С точки зрения практической реализации ДОЭ наибольшее распространение получили два типа фазового микрорельефа (рис. 1): ступенчатый (бинарный и многоуровневый) и кусочно-непрерывный.

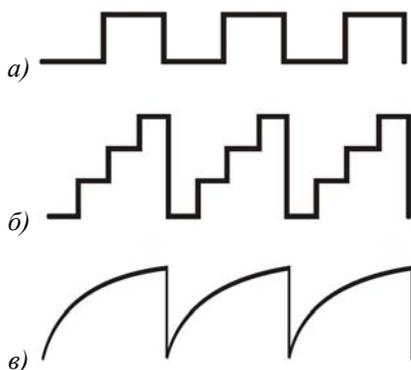


Рис. 1. Профили микрорельефов ДОЭ:

(а) — бинарный; (б) — многоуровневый;  
(в) — кусочно-непрерывный

Особое внимание специалистов в области дифракционной оптики привлекают технологии формирования микрорельефа, основанные на достижениях и оборудовании микроэлектроники [1], в частности, использование фотолитографических методов.

Перенос рисунка микрорельефа ДОЭ в поверхностный слой подложки с использованием метода фотолитографии [2, 3] происходит в четыре стадии (рис. 2): 1) экспонирование слоя фоторезиста через шаблон и образование скрытого изображения; 2) проявление и задубливание рисунка, т.е. формирование защитной маски; 3) травление поверхностного слоя подложки на незащищенных участках; 4) очистка поверхности подложки от остатков фоторезиста [4].

На каждой из стадий процесса действуют факторы, искажающие исходный рисунок шаблона. При экспонировании имеют место явления дифракции, преломления и отражения света, приводящие к изменению размеров элементов рисунка и размытости их краев. Искажения размеров на втором этапе (проявления и задубливания) обусловлены набуханием

слоя фоторезиста и усадкой фотомаски при тепловой обработке. При травлении негативным фактором является боковое подтравливание под маску. Условия, в которых происходит обработка на разных стадиях, изменяются как от пластины к пластине, так и в пределах одной пластины. Это приводит к разбросу геометрических параметров микрорельефа и, соответственно, характеристик оптического элемента, что следует учитывать при обработке технологии изготовления ДОЭ.

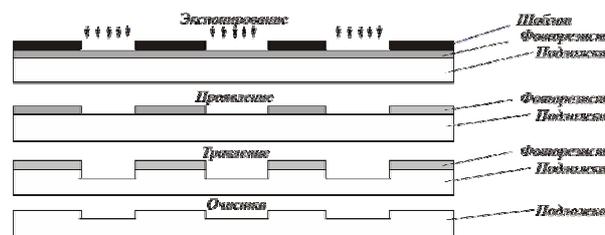


Рис. 2. Процесс формирования микрорельефа в подложке

С конструктивной точки зрения ДОЭ следует рассматривать в качестве сложного изделия, состоящего из чрезвычайно большого количества конструктивных микроэлементов субмикронных размеров. Как правило, для получения высокой дифракционной эффективности ДОЭ с многоуровневым микрорельефом рассчитанный профиль зон микрорельефа аппроксимируют не менее чем восьмью градациями, что приводит к необходимости совмещения как минимум трех шаблонов. Требования к точности изготовления каждой части изображения аппроксимированной зоны при этом возрастают на порядок по сравнению с требованиями к точности целиком изображенной зоны, что резко повышает требования к технологическому оборудованию.

## Оценка приемственности использования микро-технологий при создании ДОЭ

Для оценки возможности использования технологического оборудования микроэлектроники проанализируем взаимосвязь конструктивных размеров микрорельефа с параметрами, которым должен удовлетворять ДОЭ как оптический элемент.

Трудности практической реализации ДОЭ обусловлены необходимостью создания поверхностного микрорельефа [1], максимальная высота которо-

го, исходя из длины волны  $\lambda$  и коэффициента преломления среды  $n$ , определяется:

$$h_{\max} = \lambda / (n - 1). \quad (1)$$

Менее важной, но существенной, является величина ширины зоны:

$$\Delta_j = r_j - r_{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2)$$

где  $j$  – порядковый номер зоны;  $r_j$  – радиусы Френеля дифракционной линзы, определяемые приблизительно как:

$$r_j = (2\lambda f j)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $f$  – фокусное расстояние элемента.

Из выражений (2) и (3) следует, что ширина зон является переменной и уменьшается к периферии линзы. Присутствие в выражениях (1) и (3) параметра  $\lambda$  свидетельствует о том, что основополагающие параметры микрорельефа  $h_{\max}$  и  $\Delta_{\min}$  могут достигать весьма малых значений (см. таб. 1 при  $n=1,5$ ).

Таблица 1.

Зависимость параметров микрорельефа от длины волны для различных фокусных расстояний оптического элемента

Фокусное расстояние, мм	$\lambda$ , мкм	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_{50}$ , мм	$h_{\max}$ , мкм
500	1,0	1,0	0,07	2,0
	0,5	0,71	0,05	1,0
	0,1	0,32	0,02	0,2
100	1,0	0,46	0,03	2,0
	0,5	0,32	0,02	1,0
	0,1	0,14	0,01	0,2

Значимость размерных факторов микрорельефа ДОО еще более возрастает, если принять во внимание необходимость обеспечения точностных параметров последних. Предельно допустимые отклонения характеристических параметров микрорельефа ДОО в зависимости от принимаемого допуска  $\eta$  при его изготовлении с учетом фокусного расстояния приведены в таблице 2.

При реализации фазовой функции ступенчатой аппроксимацией сложный профиль поверхности ДОО заменяется совокупностью микроступов рав-

ной толщины  $h_{\max}/m$ , где  $m$  – число уровней квантования фазовой функции. В рамках настоящей работы квантование предполагает построение ступенчатого профиля фазовой функции ДОО с помощью набора элементарных кубиков. Для оценки объема подобного кубика примем размер его ребра равным:

$$L = h_{\max} / m. \quad (5)$$

В этом случае количество элементарных кубов, образующих ДОО, составит:

$$N = \pi D^2 m^3 / 8 h_{\max}^2. \quad (6)$$

В частности, для ДОО оптического диапазона ( $\lambda=0,5$  мкм;  $D=10$  мм;  $m=4$ ;  $n=1,5$ ) значение параметра  $N=2,5 \cdot 10^9$ .

Согласно основополагающим представлениям статистической физики все термодинамические параметры макроскопических объектов испытывают флуктуации от своих средних значений. Актуальность учета флуктуационных процессов в рассматриваемом случае обусловлена:

- а) малым количеством атомов рабочей среды, содержащихся в пределах элементарного куба, - порядка  $10^8$ ;
- б) большим количеством элементарных кубов (около  $10^9$ ).

Учитывая широкое разнообразие термодинамических параметров рабочих сред и элементарных физико-химических процессов, составляющих основу технологии создания ДОО, можно принять, что флуктуационные процессы являются гауссовыми. В этом случае, абстрагируясь от эффектов корреляции индивидуальных термодинамических параметров, для частот отказов в реализации элементарных кубов по линейному размеру имеем [5]:

$$S = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{\gamma}^{\infty} \exp(-\gamma^2 / 2) d\gamma, \quad (7)$$

где  $\gamma = \eta \lambda / \sqrt{ma}$ ;  $\eta$  – допуск на линейный размер элементарного куба;  $a$  – математическое ожидание размытия края топологического элемента. В выражении (7) параметр  $a$  выступает в качестве фактора, определяющего разрешающую способность технологического процесса (в случае использования микротехнологий  $a = 0,01 \div 0,1$  мкм [2]).

Таблица 2.

Зависимость допустимых отклонений параметров микрорельефа от длины волны для различных фокусных расстояний оптического элемента

Фокусное расстояние, мм	$\lambda$ , мкм	$\Delta_j$ (мкм)		$\Delta_{50}$ (мкм)		$h_{\max}$ (Å)	
		$\eta$	$\eta$	$\eta$	$\eta$	$\eta$	$\eta$
		0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
500	1,0	10,0	100	0,7	7	200	$2 \times 10^3$
	0,5	7,1	71	0,5	5	100	$10^3$
	0,1	3,2	32	0,2	2	20	200
100	1,0	4,5	45	0,3	3	200	$2 \times 10^3$
	0,5	3,2	32	0,2	2	100	$10^3$
	0,1	1,4	14	0,1	1	20	200

Таблица 3.

Частота отказов  $S$  в зависимости от предполагаемого допуска  $\eta$  и безразмерного параметра  $\lambda/ma$

$\eta$	$\lambda/ma$				
	5	10	50	100	500
0,01	0,9602	0,9204	0,6170	0,3174	$6 \times 10^{-8}$
0,02	0,9204	0,8414	0,3174	0,0456	$< 10^{-8}$
0,05	0,8026	0,6170	0,0124	$6 \times 10^{-8}$	$< 10^{-8}$
0,10	0,6176	0,3174	$6 \times 10^{-8}$	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$
0,20	0,3174	0,4560	$< 10^{-8}$	$10^{-8}$	$< 10^{-8}$

В таб. 3 представлены численные значения частоты отказа в зависимости от предполагаемого допуска  $\eta$  и безразмерного параметра  $\lambda/ma$

Данные таб. 3 свидетельствуют о том, что получение микрорельефа ДОО с высоким разрешением и малой частотой отказов ( $\eta \approx 0,01$ ; количество дефектных элементарных кубиков менее 10) весьма проблематично. В то же время снижение требования к качеству микрорельефа в целом (до уровня 70–90% бездефектных кубиков от общего числа) может обеспечить приемлемость использования современных микротехнологий. В последнем случае (при  $\lambda=0,5$  мкм;  $m=4$ ;  $N=10^9$ ) значения технологического фактора  $a$  должны удовлетворять условию:

$$a = \begin{cases} 2,5 \times 10^{-3} \text{ мкм, при } \eta = 0,01; \\ 5,0 \times 10^{-3} \text{ мкм, при } \eta = 0,05; \\ 2,5 \times 10^{-2} \text{ мкм, при } \eta = 0,10. \end{cases} \quad (8)$$

Приведенные данные подтверждают, что технологические трудности создания микрорельефа существенно уменьшаются при увеличении рабочей длины волны ДОО. Это обусловлено как уменьшением значения параметра ( $N=10^6$ ), так и увеличением характеристического параметра  $\lambda/ma$ . В частности, для ДОО ИК-диапазона обеспечивается необходимое качество микрорельефа (при  $\lambda=10$  мкм) на уровне 99,9%.

#### Влияние технологических ошибок на качество работы ДОО

Параметры ДОО определяются конструктивными параметрами микрорельефа, трудности формирования которого обусловлены не только предельными возможностями технологического оборудования, но и технологическими ошибками, возникающими непосредственно при изготовлении ДОО. Наиболее значимыми являются ошибки, возникающие при травлении подложки на определенную глубину и при совмещении очередного шаблона с ранее сформированной структурой. Впервые оценка допустимого рассовмещения рассмотрена в работах [6, 7], где предложена методика оценки, состоящая в вычислении фактора Штреля на основе расчета функции зрачка реальной дифракционной линзы (ДЛ). Влияние ошибок, возникающих при травлении микрорельефа на определенную глубину, рассматривалось в работах [8, 9]. В данных работах путем аналитического решения оценена взаимосвязь дифракционной эффективности ДЛ с относительным отклонением глубины микрорельефа в пре-

делах  $\pm 30\%$ . В работе [10] предложен метод оценки влияния технологических ошибок при формировании микрорельефа ДЛ на световое поле в дальней зоне дифракции, продолжением которой является данная работа. В настоящей статье на примере аксикона моделируется взаимосвязь интенсивности в рабочей зоне элемента и числа уровней квантования, а также анализируется влияние перетрава на среднее квадратичное отклонение распределения интенсивности от идеального на примере четырехуровневой структуры ДОО.

#### Влияние квантования

Влияние квантования фазовой функции на качество работы фокусирующих ДОО подробно рассмотрено в главе 5 монографии [1]. В качестве характеристик, используемых для оценки качества работы фокусирующих ДОО, в [1] используется дифракционная эффективность фокусировки и среднее квадратичное отклонение полученного распределения интенсивности от требуемого. Для других типов дифракционных оптических элементов в работе [10] предложено использовать среднее квадратичное отклонение распределений интенсивности, полученных для идеального и исследуемого оптических элементов. Для таких оценок использовалось рассчитанное световое поле в рабочей области ДОО. Результаты моделирования, демонстрирующие влияние числа уровней квантования на параметры дифракционных элементов на примере аксикона, представлены на рис. 3-5. Все рисунки относятся к аксикону нулевого порядка диаметром 0,5 мм и с периодом линий 0,05 мм, работающего как дополнение к линзе.

Анализ рис. 3 (б, в) показывает, что кроме главного центрального кольца в дифракционной картине также присутствует набор дополнительных колец, сопоставимых по энергии с главным. Если сравнивать данную картину дифракции с картиной дифракции от идеального аксикона с бесконечным числом уровней квантования, то мы получим среднее квадратичное отклонение (с.к.о.)  $\sigma$  распределений интенсивности около 0,65. Здесь [10]

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i,j} \frac{(I_{i,j}^m - I_{i,j})^2}{(I_{i,j})^2}} \quad (9)$$

где  $I_{i,j}$  - распределение интенсивности в фокальной плоскости идеального аксикона,  $I_{i,j}^m$  - распределение интенсивности в фокальной плоскости квантованного аксикона с числом уровней квантования  $m$ .

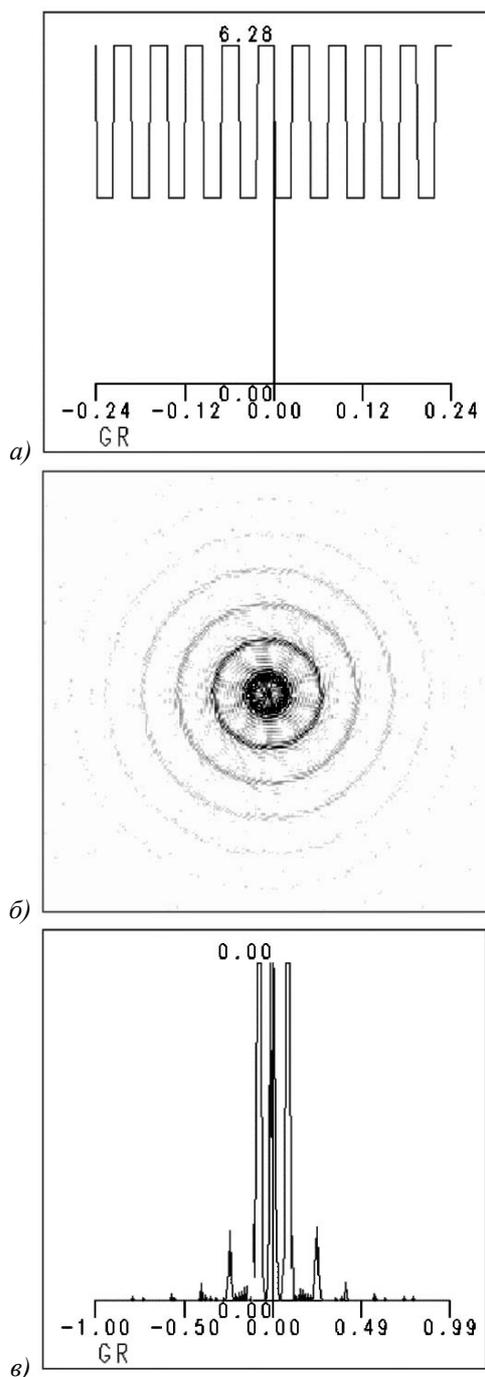


Рис. 3. Параметры бинарной структуры:  
 (а) - профиль микрорельефа, (б) – дифракционная картина в фокальной плоскости,  
 (в) – распределение интенсивности в радиальном сечении фокальной плоскости

На рис.4 (б, в) также кроме главного центрального кольца в дифракционной картине присутствует набор дополнительных колец. Если сравнивать данную картину дифракции с картиной дифракции от идеального аксикона с бесконечным числом уровней квантования, то мы получим с.к.о.  $\sigma$  около 0,25.

Картина дифракции, представленная на рис. 5 (б), более близка к картине дифракции от идеального аксикона, значение с.к.о.  $\sigma$  составляет всего 0,07.

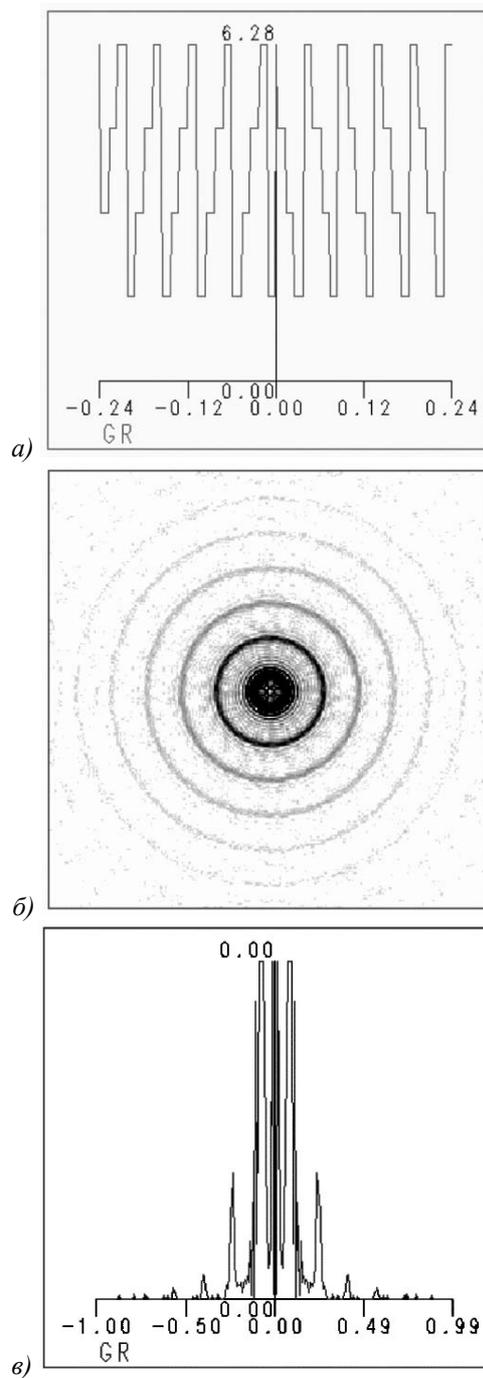


Рис. 4. Параметры четырехуровневой структуры:  
 (а) - профиль микрорельефа, (б) – дифракционная картина в фокальной плоскости, (в) – распределение интенсивности в радиальном сечении фокальной плоскости

Представленные на рис. 3-5 результаты моделирования, позволяют наглядно продемонстрировать влияние числа уровней квантования на параметры элемента. Однако особенно интересным представляется изменение дифракционной картины в фокальной плоскости при отклонении параметров многоуровневого микрорельефа от расчетных значений, в частности, зависимость качества работы ДООЭ от ошибок в глубине ступенчатого травления на каждом этапе.

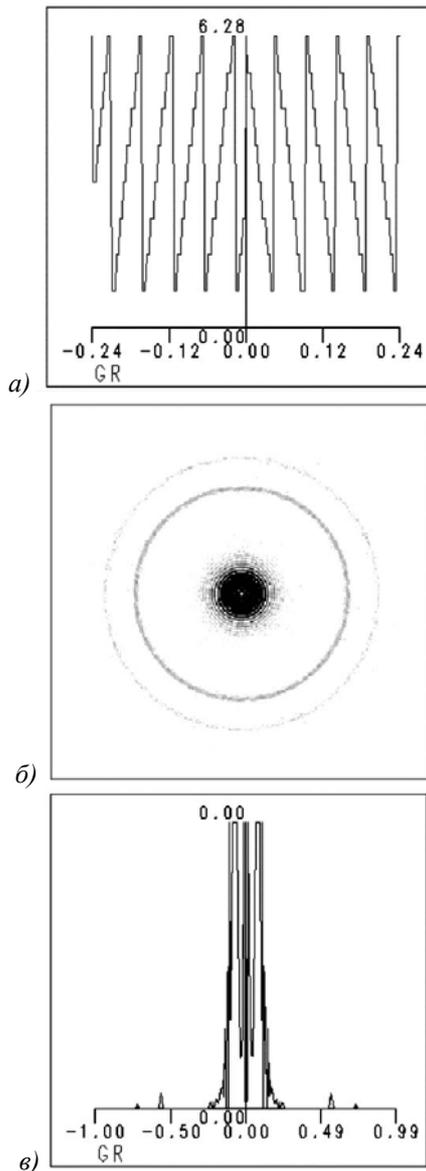


Рис. 5. Параметры восьмиуровневой структуры:  
(а) - профиль микрорельефа, (б) – дифракционная картина в фокальной плоскости,  
(в) – распределение интенсивности в радиальном сечении фокальной плоскости

Влияние ошибок глубины травления

Влияние технологической ошибки, связанной с глубиной травления, на параметры интенсивности в фокальной плоскости аксикона можно проследить на рис. 6.

При моделировании ошибок глубины травления микрорельефа предполагается, что на  $l$ -той стадии изготовления допущена ошибка размером  $\delta_l \cdot h_l$ , где  $h_l = h_{max} \cdot 2^l$  – глубина травления на  $l$ -том этапе ступенчатого формирования многоуровневого микрорельефа,  $h_{max}$  – максимальная высота непрерывного микрорельефа ДОЭ,  $l$  – этап травления (достигаемое на нем число уровней квантования фазовой функции  $m=2^l$ ). На рис. 6 (а) представлен профиль рельефа ДОЭ, в котором на второй стадии изготовления (для рис. 6 -  $l=2$ ) была допущена ошибка размером  $0,6 \cdot \lambda [4(n-1)]$ , где  $\delta_2=0,6$ ;  $h_{max}=\lambda/(n-1)$ ;  $l=2$ ;  $m=4$ . Вследствие этого

$\delta_2=0,6$ ;  $h_{max}=\lambda/(n-1)$ ;  $l=2$ ;  $m=4$ . Вследствие этого картина дифракции, представленная на Рис.6б, заметно отличается от картины дифракции идеального аксикона, значение с.к.о.  $\sigma$  составляет 0,43.

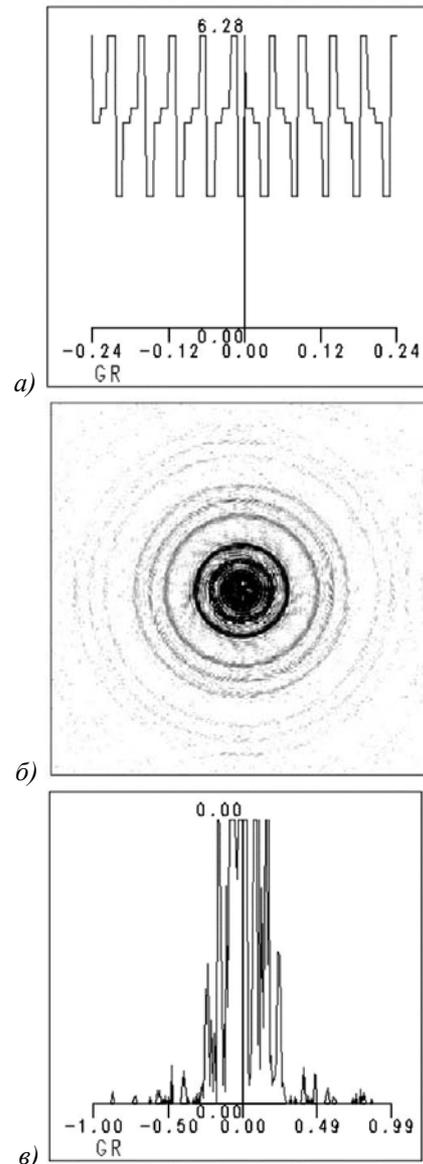


Рис. 6. Четырехуровневая структура, моделирование влияния ошибок травления при выполнении второй технологической операции:

(а) - профиль микрорельефа - перетрав,  
(б) – дифракционная картина в фокальной плоскости,  
(в) – распределение интенсивности в радиальном сечении фокальной плоскости)

Дальнейшее исследование проведем на примере изменения распределения интенсивности в дальней зоне дифракционной линзы. В качестве критерия оценки, характеризующего качество работы ДОЭ, используется среднеквадратичная ошибка формирования интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера, рассчитываемая по формуле (9), где  $I_{i,j}$  - интенсивность, регистрируемая для линзы с гладкой фазой,  $I_{i,j}^m$  - интенсивность, регистрируемая для линзы с квантованной или искаженной фазой.

Пользуясь той же методологией можно привести результаты оценки влияния ошибок травления на среднеквадратичную ошибку формирования интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера при несоблюдении технологических режимов (рис. 7).

Для 4-х уровневой линзы  $\sigma$  зависит от ошибки  $\delta_1$  более существенно, чем от ошибки  $\delta_2$ , а при изготовлении 8-ми уровневой структуры  $\delta_3$  вносит наименьшую погрешность. В таб. 4 и 5 для сравнения приведены некоторые сочетания ошибок и их влияние на среднеквадратичную ошибку формирования интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера.

Интенсивность, используемая в расчетах, определялась не по всему растру изображения, который был получен после преобразования Фурье, а в квадратной области, размер которой определялся исходя из положения первого минимума интенсивности в фокальной плоскости неискаженной линзы.

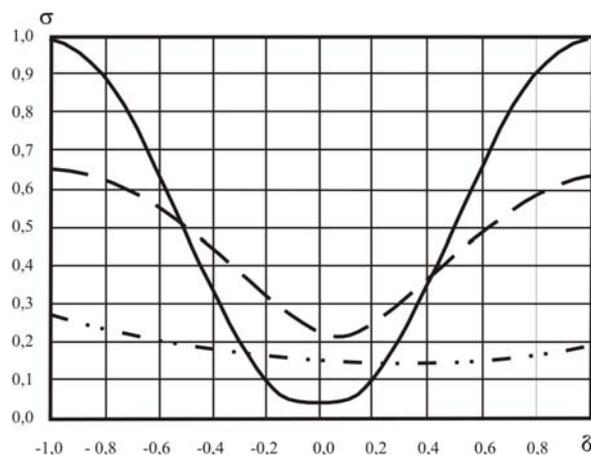


Рис. 7. Графики зависимости ошибки формирования светового поля в дальней зоне дифракции от технологических ошибок, возникающих при травлении: непрерывная линия (—) - первый шаблон ( $\delta_1$ ), пунктирная линия (- -) - второй шаблон ( $\delta_2$ ), штрих-пунктирная (- · -) - третий шаблон ( $\delta_3$ )

Таблица 4  
Зависимость среднеквадратичной ошибки формирования интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера  $\sigma$  для сферической линзы при некоторых сочетаниях ошибок  $\delta_1$  и  $\delta_2$

$\delta_1 \backslash \delta_2$	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,00	0,651	0,644	0,623	0,589	0,543	0,487	0,424	0,357	0,294	0,245	0,226	0,245	0,294	0,357	0,424	0,487	0,543	0,589	0,623	0,643
0,10	0,641	0,632	0,611	0,579	0,536	0,483	0,424	0,363	0,305	0,262	0,247	0,268	0,316	0,380	0,449	0,516	0,578	0,631	0,674	0,705
0,20	0,617	0,608	0,591	0,563	0,525	0,479	0,433	0,398	0,389	0,420	0,489	0,588	0,706	0,833	0,962	1,088	1,206	1,314	1,408	1,485
-0,10	0,641	0,637	0,623	0,599	0,568	0,533	0,497	0,465	0,444	0,437	0,448	0,473	0,511	0,555	0,600	0,643	0,679	0,707	0,725	0,731
-0,20	0,617	0,620	0,622	0,631	0,652	0,691	0,748	0,824	0,914	1,012	1,115	1,217	1,314	1,401	1,476	1,535	1,577	1,599	1,601	1,583

Таблица 5  
Значения среднеквадратичной ошибки формирования интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера  $\sigma$  для сферической линзы при некоторых сочетаниях ошибок  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$

$\delta_3 \backslash \delta_1 \delta_2$	0 0	0,1 0	-0,1 0	0 0,1	0 -0,1	0,1 0,1	0,1 -0,1	-0,1 0,1	-0,1 -0,1
-1,0	0,286	0,312	0,519	0,284	0,315	0,306	0,343	0,478	0,573
-0,9	0,265	0,295	0,506	0,262	0,297	0,288	0,329	0,463	0,563
-0,8	0,246	0,281	0,493	0,241	0,282	0,272	0,317	0,448	0,552
-0,7	0,228	0,269	0,481	0,222	0,268	0,259	0,307	0,434	0,542
-0,6	0,213	0,259	0,469	0,205	0,256	0,247	0,299	0,421	0,531
-0,5	0,199	0,251	0,457	0,190	0,245	0,238	0,292	0,408	0,520
-0,4	0,188	0,244	0,445	0,176	0,235	0,230	0,287	0,395	0,509
-0,3	0,178	0,240	0,433	0,164	0,227	0,224	0,282	0,382	0,497
-0,2	0,170	0,236	0,421	0,154	0,220	0,220	0,278	0,369	0,485
-0,1	0,163	0,234	0,408	0,146	0,214	0,217	0,275	0,357	0,472
0,0	0,158	0,232	0,396	0,139	0,208	0,215	0,273	0,345	0,459
0,1	0,154	0,231	0,383	0,134	0,204	0,214	0,270	0,333	0,445
0,2	0,152	0,231	0,371	0,132	0,200	0,213	0,269	0,322	0,431
0,3	0,152	0,232	0,360	0,132	0,198	0,214	0,267	0,312	0,418
0,4	0,154	0,233	0,349	0,135	0,197	0,216	0,267	0,303	0,405
0,5	0,159	0,236	0,339	0,140	0,198	0,220	0,268	0,296	0,392
0,6	0,166	0,240	0,331	0,149	0,202	0,225	0,269	0,291	0,381
0,7	0,176	0,246	0,325	0,161	0,208	0,231	0,273	0,288	0,372
0,8	0,189	0,254	0,322	0,176	0,217	0,240	0,278	0,289	0,365
0,9	0,205	0,264	0,322	0,194	0,229	0,251	0,286	0,293	0,361

Ввиду этого в вычислительном эксперименте могут быть получены значения  $\sigma$  больше 1 (при большом отклонении глубины полученного микрорельефа от расчетного).

Следует обратить внимание, что в таб. 5 имеются одинаковые значения среднеквадратичной ошибки формирования интенсивности соответствующие различным значениям технологических погрешностей: например,  $\sigma=0,286$  при ( $\delta_1=\delta_2=0$ ;  $\delta_3=-1$ ) и при ( $\delta_1=0,1$ ;  $\delta_2=-0,1$ ;  $\delta_3=0,9$ ) и др., что позволяет предусматривать и осуществлять корректировку некоторых параметров ДОЭ.

#### Моделирование смещения шаблонов

При формировании многоуровневого микрорельефа ДОЭ имеет место появление таких ошибок, как смещение и поворот относительно продольной оси для цилиндрической линзы и осевое смещение для сферической линзы, возникающих при наложении очередного шаблона на ранее изготовленный микрорельеф.

В ходе вычислительного эксперимента осуществлялись одно- и разнонаправленные сдвиги 2-ой и 3-ей виртуальных масок относительно друг друга и первой маски, а затем анализировалось световое поле в зоне дифракции Фраунгофера. Сдвиг осуществлялся не относительно реальных размеров масок, а по отсчетам дискретизации - для удобства проведения вычислительного эксперимента. В качестве примера на рис.8 приведены результаты вычислительного эксперимента для дифракционной сферической линзы, у которой вторая маска сдвигалась относительно «протравленного микрорельефа» до 5-ти отсчетов, а третья маска относительно второй - до 20-и отсчетов. Диаметр линзы - 1 мм, фокусное расстояние - 1000 мм, размер отсчета технологической маски - 2 мкм.

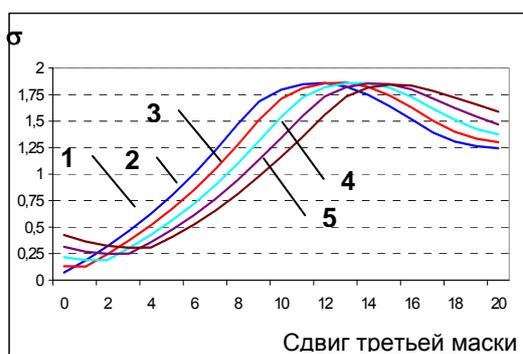


Рис. 8. Зависимость с.к.о. формирования интенсивности дифракционной сферической линзой в дальней зоне дифракции от сдвига третьей маски, при этом вторая маска сдвигается на 0 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5) отсчетов соответственно

Анализ результатов моделирования (рис. 8) также позволяет отметить возможность некоторой

корректировки технологических ошибок соответствующим смещением масок.

#### **Заключение**

Проанализированы технологические трудности формирования микрорельефа ДОЭ и оценены предельно допустимые отклонения характеристик микрорельефа в зависимости от технологических допусков. На примере аксикона и дифракционной линзы с помощью моделирования и численного эксперимента исследовано влияние технологических ошибок формирования микрорельефа на параметры ДОЭ. Результаты моделирования были апробированы при создании бинарного дифракционного элемента, описанного в [11], и могут быть использованы для предварительной оценки параметров изготавливаемых ДОЭ.

#### **Литература**

1. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. – 688с.
2. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии. // М.: Наука, 1990. – 528с.
3. Моро У. Микролитография // В 2-х частях. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. – 1240с.
4. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров // М.: Радио и связь, 1987. – 454с.
5. Микроэлектроника. Конструирование и производство // Пер. с англ. под ред. Н.П. Богородицкого. М.: Сов. Радио. 1966. – 455с.
6. Пальчикова И.Г., Рябчун А.Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия. – 1985. №6. С. 98-99.
7. Бобров С.Т. Влияние ошибок изготовления дифракционных линз на качество формируемого изображения // Автометрия. 1987. №5. С. 62-66.
8. T. Hessler, M. Rossi, R.E. Kunz, M.T. Gale Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt.-1998. v.3. P. 4069-4079.
9. Корольков В.П. Разработка и исследование оптических методов изготовления дифракционных элементов на основе материалов с управляемым коэффициентом поглощения // Канд. диссерт. Новосибирск. - 2000.
10. Волков А.В., Скиданов Р.В. Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах // Вестник СамГТУ, сер. Физико-математические науки. Самара. 2000. В. 9. С. 174-180.
11. Волков А.В., Котляр В.В., Моисеев О.Ю. и др. Бинарный дифракционный оптический элемент, фокусирующий гауссовый пучок в продольный отрезок // Оптика и спектроскопия. 2000. Том 89. №2. С. 343-348.

# The formation of DOE microrelief using the achievements in microelectronics

A.V. Volkov<sup>1,2</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

## Abstract

The work analyzes the possibility of forming the microrelief of diffractive optical elements (DOE) by microelectronic technology. It also evaluates the maximum permissible deviations of the DOE microrelief parameters based on the technological errors that determine the minimum dimensions of passive elements in microelectronics. The paper presents the results of a numerical experiment on evaluation of the effect of technological errors in microrelief formation on the DOE parameters.

**Keywords:** diffractive optical element, DOE, microelectronic technology, passive element.

**Citation:** Volkov AV, Skidanov RV. The formation of DOE microrelief using the achievements in microelectronics. *Computer Optics* 2001; 22: 65 - 71.

## References

- [1] Soifer VA, ed. *Methods of computer optics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000.
- [2] Valiev KA. *The physics of submicron lithography* [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1990.
- [3] Moreau WM. *Semiconductor lithography: Principles, practices, and materials*. New York: Plenum Press; 1988.
- [4] Chernyaev VN. *The technology of production of integrated microcircuits and microprocessors* [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1987.
- [5] Keonjian E, ed. *Microelectronics: Theory, design, and fabrication*. McGraw-Hill; 1963.
- [6] Palchikova IG, Ryabchun AG. Effect of fabrication errors of kinoforms on the function of the pupil [In Russian]. *Avtometriya* 1985; 6: 98-99.
- [7] Bobrov ST. Effect of manufacturing errors of diffractive lenses on the image quality [In Russian]. *Avtometriya* 1987; 5: 62-66.
- [8] Hessler T, Rossi M, Kunz RE, Gale MT. Analysis and optimization of fabrication of continuous relief diffractive optical elements. *Appl Opt* 1998; 3: 4069-4079.
- [9] Korolkov VP. Research and development of optical methods for the production of diffractive elements based on the materials with a controlled absorption coefficient [In Russian]. The thesis for the Candidate's degree in Technical Sciences. Novosibirsk; 2000.
- [10] Volkov AV, Skidanov RV. Diffraction of light by diffractive lenses: numerical investigation [In Russian]. *Herald of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science* 2000; 9: 174-180.
- [11] Volkov AV, Kotlyar VV, Moiseev OV, et al. Binary diffraction optical element focusing a Gaussian beam to a longitudinal segment [In Russian]. *Optika i Spektroskopiya* 2000; 89(2): 343-348.