

## **Дифрактометрический контроль и коррекция структуры компьютерно-синтезированных разветвляющих решеток Даммана на этапе их изготовления**

*В. П. Корольков<sup>1</sup>, А. Г. Седухин<sup>1\*</sup>, Р. И. Куц<sup>1</sup>, А. Р. Саметов<sup>1</sup>,  
А. И. Малышев<sup>1</sup>, В. В. Черкашин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

**Аннотация.** Теоретически и экспериментально исследована методика оперативного определения оптимального времени жидкостного травления амплитудных масок двумерных решеток Даммана, структура которых синтезируется с помощью прямой лазерной записи в полярной системе координат. В качестве регистрирующего материала для лазерной записи применены тонкие пленки хрома, окисляемые в процессе лазерной записи и формирующие амплитудную маску при их жидкостном травлении (при использовании термохимической технологии их обработки). Изменение времени травления влияет здесь на подтравливание и смещение краев экспонированных зон. Оптимальное время травления хромовых пленок предложено осуществлять с помощью дифрактометрического метода измерения спектров амплитудных решеток, путем оперативного измерения и анализа распределения интенсивностей высших дифракционных порядков, а также минимизации среднеквадратического отклонения интенсивностей названных порядков. Показано, что высшие дифракционные порядки в спектрах бинарно-амплитудных структур хорошо коррелируют с соответствующими порядками бинарно-фазовых структур, что может быть эффективно использовано для определения момента достижения оптимального размера зон в процессе жидкостного травления.

**Ключевые слова:** прямая лазерная запись, полярная система координат, пленки хрома, дифрактометрия

## **Spectral analysis and correction of the structure of computer-generated fan-out Dammann gratings at their fabrication**

*V. P. Korolkov<sup>1</sup>, A. G. Sedukhin<sup>1\*</sup>, R. I. Kuts<sup>1</sup>, A. R. Sametov<sup>1</sup>, A. I. Malyshev<sup>1</sup>, V. V. Cherkashin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

**Abstract.** A technique for quickly finding the optimal time of liquid etching the amplitude masks of two-dimensional Dammann gratings, the structure of which is synthesized by direct laser writing in a polar coordinate system, is studied theoretically and experimentally. Thin chromium films are used as the recording material for laser writing, which are oxidized during laser writing and form an amplitude mask during their liquid etching (when using the thermochemical technology for their processing). The change in the etching time here occurs in the form of etching and displacement of the edges of the exposed zones. To find the optimal etching time for chromium films, it is proposed to use a procedure of measuring the spectra of amplitude gratings, by quick operational measurement and analysis of the intensity distribution of high diffraction orders, and by minimization of the root-mean-square deviation of these intensities. It is shown that higher diffraction orders in the spectra of binary-amplitude structures correlate well with the same orders of binary-phase structures. This

conclusion can be effectively used to determine the moment when the optimum zone size is reached during liquid etching.

**Keywords:** direct laser writing, polar coordinate system, chromium films, spectral analysis

### *Введение*

При построении оптических систем, работающих с лазерными источниками и расщепляющих лазерные пучки на одномерные и двумерные массивы дифракционных порядков, в настоящее время широко используются бинарно-фазовые решетки Даммана [1, 2]. Технологические процессы синтеза топологической структуры таких разветвляющих дифракционных элементов, как правило, основаны на использовании сканирующих литографических систем, таких как лазерные и электронно-лучевые. Вместе с тем, несмотря на достаточное совершенство современных литографических систем, изготовление решеток Даммана высокого качества продолжает оставаться сложной задачей. Это связано с тем, что для требуемой во многих приложениях высокой световой отдачи и высокой равномерности светоделения полезных лазерных пучков, технологические допуски на воспроизведение структуры элементов являются очень жесткими. То есть, согласно расчетам, при работе в оптическом и ближнем ИК диапазонах длин волн (400 – 1000 нм) отклонения в пространственном положении границ отдельных зон элементов и глубина их фазового профиля не должны превышать 100 – 200 нм. Это может вызывать сложности реализации на площадях элементов с линейными апертурными размерами более 10 мм. Основная цель настоящей работы состояла в оптимизации процесса прямой лазерной записи двумерных бинарно-фазовых решеток Даммана, которые имеют коэффициент разветвления  $7 \times 7$  и синтезируются с помощью лазерной литографической системы с круговым сканированием CLWS-300IAE [3,4].

В качестве регистрирующего материала для записи использовались тонкие пленки хрома, обрабатываемые по термохимической технологии [6–8] с окислением хрома на экспонированных участках топологии. Структура решеток Даммана описывалась фазовой функцией с двумя переменными, разделяющимися в декартовой системе координат. Требовалось провести теоретические и экспериментальные исследования по определению допусков на критические параметры структуры решеток при их изготовлении, с целью получения световой эффективности, максимально близкой к теоретически достижимой, и среднеквадратического отклонения распределения интенсивности полезных порядков не хуже 10%. На основе данных исследований требовалось выработать рекомендации по оптимизации и оперативному контролю технологического процесса изготовления решеток.

Для контроля распределения дифракционной эффективности по порядкам дифракции могут быть использованы различные варианты оптических дифрактометров, подходящих по углам дифракции, например, [9].

## Метод контроля и коррекции структуры решеток Даммана

Для оценки расчетных параметров компьютерно-синтезируемых решеток Даммана, близких к реальным параметрам, прежде всего, было проведено приближенное математическое описание структуры решеток, как для амплитудных, так и для фазовых их вариантов. Для расчета спектрального отклика решеток использовалось скалярное параксиальное приближение теории дифракции. При малости отклонения реальных локальных профилей амплитудных масок решеток от локальных расчетных (идеальных) профилей, в первом приближении, было принято условие, по которому, как и для неискаженных профилей, фазовые профили по  $x$  и  $y$  координатам могут описываться независимо, а спектральный отклик решеток может быть представлен в виде произведения откликов в ортогональных плоскостях  $xoz$  и  $yozy$ , где  $z$  – оптическая ось, перпендикулярная осям  $x$  и  $y$ , а  $o$  – начало системы координат  $(x,y,z)$ . Сначала были проанализированы спектральные отклики амплитудных масок. Для пояснения, на рис. 1 показан вид и учитываемые в расчете параметры коэффициента пропускания амплитудных масок решетки Даммана по интенсивности, по одной из поперечных координат ( $x$  или  $y$ ), для идеального и реального случаев.

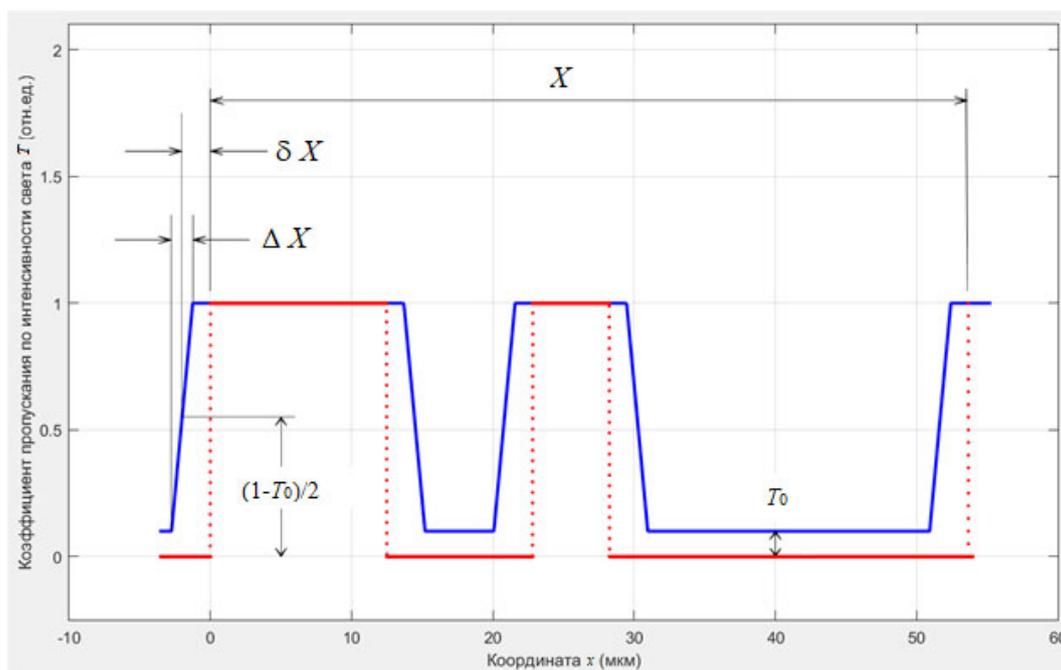


Рис. 1. Функция пропускания амплитудной маски решетки Даммана, для идеального (прямоугольная красная кривая) и реального (трапецеидальная синяя кривая) случаев

Здесь  $X$  – период решетки,  $T_0$  – коэффициент пропускания необлученных зон хромовой пленки по интенсивности на пробной длине волны 633 нм,  $\Delta X$  – протяженность переходной зоны с изменением пропускания от  $T_0$  до 1,  $\delta X$  – смещение границ реальных профилей по уровню пропускания  $(1-T_0)/2$ , с уширением либо сужением экспонированных хромовых зон, симметрично относительно центров неэкспонированных хромовых зон (показан случай сужения хромовых зон)

В расчетах было приняты следующие параметры:  $X = 53$  мкм.  $T_0 = 0,01$  (это соответствует оптической плотности  $2D$ ),  $\Delta X = 0$  мкм и  $-0,4$  мкм  $< \delta X < 0,4$  мкм. Конкретно, для дискретной оценки откликов, значения  $\delta X$  задавались от  $-0,4$  до  $0,4$  мкм с шагом  $0,05$  мкм. При данных параметрах находились и анализировались карты распределения интенсивности в полезных порядках амплитудных масок решеток, а также оценивались суммарная световая эффективность в полезных порядках и среднеквадратическое отклонение в распределении в 49 полезных порядках. Аналогично находились и оценивались карты распределения интенсивности в полезных порядках соответствующих бинарно-фазовых решеток, а также оценивались суммарная световая эффективность в полезных порядках и среднеквадратическое отклонение в распределении в 49 полезных порядках. Установлено, что при ненулевых значениях параметра  $\Delta X$  спектральные распределения амплитудной маски и соответствующей ей бинарно-фазовой структуры теряют симметрию (при трапецеидальных профилях функции пропускания амплитудной маски и фазовой функции бинарно-фазовой структуры), но при  $|\Delta X| < 0,3$  мкм (что, приближенно соблюдается на практике) нарушения симметрии не превышают 1%, и поэтому, в первом приближении, их можно не учитывать. Считалось, что, приближенно, процесс ионно-плазменного травления также не вносит искажений в процессе переноса амплитудных масок в бинарно-фазовые. Здесь учитывалось, что вышеуказанные расчетные максимальные отклонения  $\delta X$  были взяты приближенно с двукратным максимальным запасом, и реальные отклонения будут меньшими.

Далее, в результате сличения указанных карт спектрального отклика для амплитудных масок и бинарно-фазовых структур было установлено важное, с технологической точки зрения, заключение, по которому спектральные распределения интенсивностей высших полезных дифракционных порядков амплитудных масок ( $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, n = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ) хорошо коррелируют с соответствующими спектральными распределениями интенсивностей высших полезных дифракционных порядков бинарно-фазовых структур. Причем, для амплитудной маски с показанным на рис. 1 изменением коэффициента пропускания положительные величины  $\delta X$  соответствуют распределениям интенсивности в полезных высших дифракционных порядках с монотонным уменьшением интенсивности при увеличении номера порядка (его модуля). Отрицательные же величины  $\delta X$  соответствуют распределениям интенсивности в полезных высших дифракционных порядках с монотонным увеличением интенсивности при увеличении номера порядка (его модуля). Это означает, что по рассматриваемым спектрам можно косвенно определить усредненные размеры зон и факт того, недотравлена или перетравлена пленка хрома. В качестве примеров проведенного расчета в табл. 1 – 4 представлены карты распределений интенсивности в полезных порядках дифракции  $N_{mn}$  для амплитудных масок синтезируемых двумерных решеток Даммана и для соответствующих бинарно-фазовых структур. Здесь  $n$  и  $m$  – индексы порядков по координатам  $x$  и  $y$ . Из-за модуляции интенсивности порядков, вызванной высоким значением нулевого порядка дифракции  $N_{00}$ ,

оценку соотношения интенсивности высших максимальных и минимальных дифракционных порядков целесообразно проводить с усреднением положительных и отрицательных порядков дифракции при  $n = 0$  или  $m = 0$ , то есть сравнивать отношения  $(N_{-1,0} + N_{1,0} + N_{0,-1} + N_{0,1}) / (N_{-3,0} + N_{3,0} + N_{0,-3} + N_{0,3})$ . При выравнивании интенсивности высших полезных порядков в спектрах амплитудных масок автоматически выравниваются интенсивности всех полезных порядков синтезируемых бинарно-фазовых структур. Степень корреляции этих спектров можно видеть из сравнения табл. 1 – 4.

Таблица 1

Карта распределения интенсивности света в полезных дифракционных порядках бинарно-амплитудной маски решетки Даммана (в процентах от мощности входного пучка) при  $\delta X = 0,25$  мкм

$n/m$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	0,0747	0,0785	0,0792	0,3495	0,0792	0,0785	0,0747
-2	0,0785	0,0824	0,0831	0,3669	0,0831	0,0824	0,0785
-1	0,0792	0,0831	0,0839	0,3702	0,0839	0,0831	0,0792
0	0,3495	0,3669	0,3702	1,6342	0,3702	0,3669	0,3495
1	0,0792	0,0831	0,0839	0,3702	0,0839	0,0831	0,0792
2	0,0785	0,0824	0,0831	0,3669	0,0831	0,0824	0,0785
3	0,0747	0,0785	0,0792	0,3495	0,0792	0,0785	0,0747

Желтым цветом выделена интенсивность нулевого порядка. Дифракционная эффективность в полезных порядках  $\eta = 61,2\%$ , среднеквадратическое отклонение интенсивности полезных порядков  $RMS = 12,4\%$ , среднее значение интенсивности  $I_{cp} = 0,0125\%$ .

Таблица 2

Карта распределения интенсивности света в полезных дифракционных порядках бинарно-амплитудной маски решетки Даммана (в процентах от мощности входного пучка) при  $\delta X = -0,25$  мкм

$n/m$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	0,0745	0,0717	0,0713	0,2807	0,0713	0,0717	0,0745
-2	0,0717	0,0690	0,0686	0,2700	0,0686	0,0690	0,0717
-1	0,0713	0,0686	0,0683	0,2687	0,0683	0,0686	0,0713
0	0,2807	0,2700	0,2687	1,0571	0,2687	0,2700	0,2807
1	0,0713	0,0686	0,0683	0,2687	0,0683	0,0686	0,0713
2	0,0717	0,0690	0,0686	0,2700	0,0686	0,0690	0,0717
3	0,0745	0,0717	0,0713	0,2807	0,0713	0,0717	0,0745

Дифракционная эффективность в полезных порядках  $\eta = 62,3\%$ ,  $RMS = 13,6\%$ ,  $I_{cp} = 0,0127\%$ .

Таблица 3

Карта распределения интенсивности света в полезных дифракционных порядках бинарно-фазовой решетки Даммана (в процентах от мощности входного пучка) при  $\delta X = 0,25$  мкм

$n/m$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1,2449	1,3070	1,3186	0,9901	1,3186	1,3070	1,2449
-2	1,3070	1,3723	1,3844	1,0395	1,3844	1,3723	1,3070
-1	1,3186	1,3844	1,3967	1,0487	1,3967	1,3844	1,3186
0	0,9901	1,0395	1,0487	0,7875	1,0487	1,0395	0,9901
1	1,3186	1,3844	1,3967	1,0487	1,3967	1,3844	1,3186
2	1,3070	1,3723	1,3844	1,0395	1,3844	1,3723	1,3070
3	1,2449	1,3070	1,3186	0,9901	1,3186	1,3070	1,2449

Глубина травления решетки  $h = \lambda/[2(n-1)]$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $n$  – показатель преломления кварцевой подложки на длине волны  $\lambda$ . Дифракционная эффективность в полезных порядках  $\eta = 61,2\%$ ,  $RMS = 12,4\%$ ,  $I_{cp} = 0,0125\%$ .

Таблица 4

Карта распределения интенсивности света в полезных дифракционных порядках бинарно-фазовой решетки Даммана (в процентах от мощности входного пучка) при  $\delta X = -0,25$  мкм. Дифракционная эффективность  $\eta = 62,3\%$ ,  $RMS = 13,6\%$ ,  $I_{cp} = 0,0127\%$ .

$n/m$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1,2413	1,1941	1,1883	1,5453	1,1883	1,1941	1,2413
-2	1,1941	1,1487	1,1431	1,4866	1,1431	1,1487	1,1941
-1	1,1883	1,1431	1,1376	1,4794	1,1376	1,1431	1,1883
0	1,5453	1,4866	1,4794	1,9239	1,4794	1,4866	1,5453
1	1,1883	1,1431	1,1376	1,4794	1,1376	1,1431	1,1883
2	1,1941	1,1487	1,1431	1,4866	1,1431	1,1487	1,1941
3	1,2413	1,1941	1,1883	1,5453	1,1883	1,1941	1,2413

Как следует из анализа данных табл. 1, 2, чувствительность данной методики (при измерении относительного изменения интенсивности в процентах) составляет для исследованного случая порядка 23–25 %/мкм. Установленная закономерность может быть эффективно использована для определения оптимального времени жидкостного травления хромовой пленки и получения оптимального же размера зон в процессе травления. Для снижения влияния многих других не рассмотренных здесь искажений структуры решеток, можно рекомендовать

также проведение усреднения всех соответствующих высших дифракционных порядков с их суммированием.

Отметим, что в данной работе не учитывалось влияние ряда других дестабилизирующих факторов, например, искажений продольных профилей границ зон вследствие асимметрии термохимического следа сканируемого лазерного пучка, эффектов дискретизации при записи прямоугольников в полярной системе координат и других специфических искажений в округлении вершин прямоугольных элементов. Проведенные эксперименты по измерению и анализу распределений интенсивности высших порядков дифракции показали удовлетворительное соответствие с результатами теоретических расчетов: Расхождения в экспериментальных и теоретических расчетах, приближенно, не превышали 17%.

### *Заключение*

Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что дифрактометрический контроль распределения интенсивности высших дифракционных порядков в процессе синтеза структуры бинарно-фазовых решеток Даммана может быть эффективно использован для определения оптимального времени травления хромовой пленки на амплитудной маске.

### *Благодарности*

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 121041500060-2). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Dammann, K. Gortler. H. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Opt. Commun.* – 1971. – Vol. 3 – P. 312–315.
2. Damman H. Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures. *Opt. Acta* – 1977. – Vol. 24 – P. 505 – 515.
3. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P., Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Appl. Opt.* – 1999. – V.38. – №8. – Pp.1295–1301.
4. Денк Д. Э., Полещук А. Г. Исследование методов увеличения точности работы системы автоматической фокусировки кругового лазерного записывающего устройства. *Автометрия.* – 2010. – Т. 46, № 1.– С. 107–117.
6. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома. *Квантовая электроника.* –1985. – Т. 12, № 4. – С. 755–761.
7. Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г., Саметов А. Р., Шахно Е. А., Ярчук М. В. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи. *Квантовая Электроника.* – 2011. – Т. 41, № 7. – С. 631–636.

8. Кирьянов А.В., Никитин В.Г. Особенности применения технологии записи скрытых изображений в пленках хрома при синтезе прецизионных углоизмерительных структур. Автометрия. – 2009. – Т.45, № 1. – С. 109–117.

9. Korolkov V.P., Cherkashin V.V., Khomutov V.N., Belousov D.A. Multi-channel scanning measuring system for testing of diffractive structures and thin transparent films. Proc. SPIE: 2019. – Vol. – P. 11188. – Paper. 110301E.

© В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Р. И. Куц, А. Р. Саметов,  
А. И. Малышев, В. В. Черкашин, 2022