

# ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ПРЯМОЙ ЗАПИСИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДОЭ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОФИЛЕМ

*Р. В. Шиманский, А. Г. Полецук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин, А. А. Харисов*  
Институт автоматизи и электрометрии СО РАН, Новосибирск, e-mail: [poleshchuk.a.g@iae.nsk.su](mailto:poleshchuk.a.g@iae.nsk.su)

## *Аннотация*

Разработан новый метод представления данных описывающих топологию дифракционных оптических элементов для сканирующих устройств записи изображения. Предлагаемый векторно-градиентный формат данных основан на кусочно-линейной аппроксимации профиля дифракционной зоны. Разработан программируемый векторно-градиентный генератор, поддерживающий этот формат. Изготовлены экспериментальные образцы дифракционных оптических элементов.

## *1. Введение*

В настоящее время одним из перспективных способов изготовления высокоэффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является прямая запись по фоторезисту [1] и фотолитография с применением фотошаблонов с полутонным пропуском. Как правило, полутонные фотошаблоны также изготавливаются прямой записью по материалу с изменяемым коэффициентом пропускания [2,3]. Для расчета данных ДОЭ обычно используется метод квантования непрерывного рельефа (КНР) дифракционной зоны на фазовые уровни (многоуровневый метод). Этот метод основывается на разбиении дифракционных зон элемента на горизонтальные фазовые уровни. Полученные данные обычно представляются полутонным растром, где каждая точка соответствует определенной величине фазы (или экспозиции для генераторов изображений) в соответствующей точке микроструктуры. Этот метод используется в системах записи оперирующих как в X-Y, так и полярной системах координат.

Одной из проблем, связанных с разработкой методов прямой записи непрерывных полутонных или фазовых дифракционных микроструктур является значительное (по сравнению с бинарными элементами) увеличение времени расчета и объема данных, которые описывают ДОЭ в входном формате устройства записи. Объем данных для описания ДОЭ с большим световым полем или высоким пространственным разрешением значительно возрастает, что влечет за собой большие трудности при их изготовлении.

В настоящей работе представлен новый векторно-градиентный формат данных для прямой записи ДОЭ с непрерывным профилем и полутонных фотошаблонов, позволяющий значительно уменьшить объем подготовленных данных. Предложен метод кусочно-линейной аппроксимации, предназначенный для преобразования фазового профиля микроструктуры в векторно-градиентный формат. Рассмотрена проблема расчета ДОЭ с выводом данных в этом формате. Описано специальное устройство, поддерживающее векторно-градиентный формат. Приведены результаты экспериментального исследования записи ДОЭ с использованием этого

устройства в составе круговой лазерной записывающей системы.

## *2. Кусочно-линейная аппроксимация*

Для сокращения объема данных при описании ДОЭ с непрерывным профилем предлагается векторно-градиентный формат данных. В этом формате вектор  $V(P, \alpha, L)$  включает в себя начальный фазовый уровень  $P$ , градиент фазы  $\alpha$  и длину вектора  $L$ . Непрерывная кривая фазового профиля микроструктуры вдоль движения записывающего пучка аппроксимируется последовательностью векторов. При этом сохраняется возможность использования метода разбиения микроструктуры методом КНР, если задавать градиент равный 0.

На рис. 1 показан пример использования обеих методов аппроксимации непрерывного исходного фазового профиля (а). На рис. 1б показана векторная аппроксимация кривой при помощи метода КНР, а на рис. 1в показан метод использующий вектора с градиентом. Каждый линейный сегмент задается одним вектором в векторно-градиентном формате. Вектор  $V(P, \alpha, L)$  состоит из трех значений: начальный уровень ( $P_1=0$  или  $P_2, P_3, P_4$ ), градиент ( $\alpha_1$  или  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ), и длина вектора ( $L_1$  или  $L_2, L_3, L_4$ ). Точность приближения к кривой растет с увеличением количества векторов. Как правило, требуется значительно меньшее количество векторов для аппроксимации фазового профиля этим методом в сравнении с методом КНР. Меньшее количество данных позволяет уменьшить общий объем рассчитанных данных для микроструктуры и увеличить скорость записи за счет уменьшения потока данных передаваемых от расчетной программы к системе записи.

## *3. Методы расчета*

При использовании метода кусочно-линейной аппроксимации требуется искать вдоль траектории движения записывающего пучка участки дифракционной зоны, которые описываются отрезками прямой. Наиболее просто данная задача решается для дифракционных элементов задаваемых гладкими функциями в виде полиномов.

Однако существует возможность достаточно простой модификации известного алгоритма КНР для получения данных для кусочно-линейной аппроксимации.

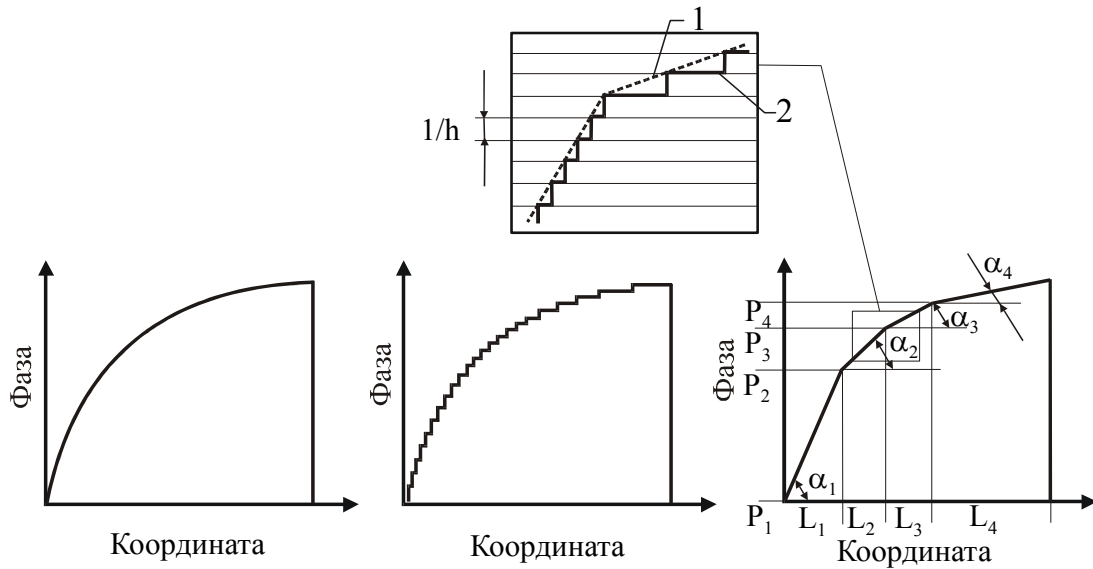


Рис. 1. Представление непрерывного фазового профиля (а) ДООЭ методом КНР (б) и кусочно-линейным методом (в). 1- вектора с градиентами  $\alpha_i$ , 2 - реальный фазовый профиль записываемый с дискретностью  $1/h$ , где  $h$  – разрядность программируемого генератора

Сначала определяется количество  $N$  векторов в зоне для обеспечения требуемой дифракционной эффективности. Затем дифракционные зоны разбиваются на число уровней  $N+1$ . Точки пересечения заданных уровней с функцией описывающей фазовый профиль элемента используются как концы отрезков кусочно-линейной аппроксимации при расчете градиентов фазы и длин векторов.

Первые  $N$  точек являются компонентами начального уровня векторов. Суть этого алгоритма показана на рис.2, где приведен пример исходного фазового профиля дифракционной линзы (а) и два профиля полученные соответственно КНР (б) и векторно-градиентным методом аппроксимации (в).

Для сравнения эффективности этих двух методов вводится параметр аппроксимации, определяемый количеством аппроксимирующих векторов (КАВ). Этот параметр определяет количество векторов используемых при аппроксимации одной зоны фазового профиля ДООЭ. На рис.2б,в цифрами отмечены вектора, полученные обеими методами аппроксимации с параметром КАВ равным четырем. Введения параметра КАВ позволило сравнить эффективность методов аппроксимации в зависимости от количества данных используемых при аппроксимации. Результаты исследования, полученные численным моделированием [4], приведены на рис. 2г.

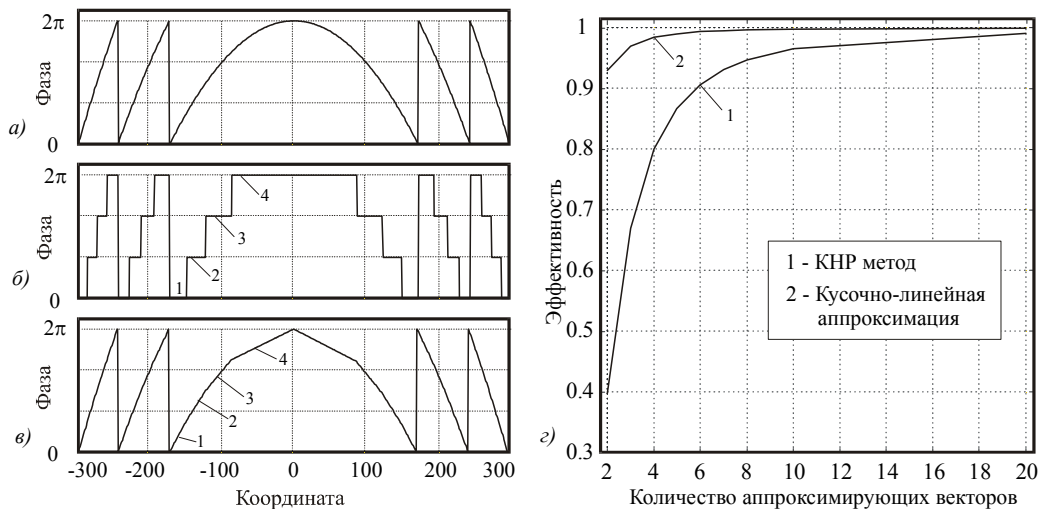


Рис. 2. Пример аппроксимации исходной кривой (а) двумя методами: (б) –КНР, (в) – кусочно-линейный. Зависимость (г) дифракционной эффективности от количества векторов используемых при аппроксимации

Расчеты производились без учета влияния характеристик среды записи, ошибок позиционирования, аббераций. Как видно из графиков, использование кусочно-линейной аппроксимации дает существенный выигрыш по отношению к количеству векторов. Так, например, использование кусочно-линейной аппроксимации, с параметром  $KAB=4$  позволяет получить дифракционную эффективность 0.984. При использовании метода КНР такая же эффективность может быть получена только для  $KAB=18$ .

#### 4. Программируемый генератор сигнала произвольной формы

Для преобразования данных из векторно-градиентного формата в сигнал управления лазерным пучком в записывающем устройстве, используется специальный программируемый генератор сигнала произвольной формы (ПГ). ПГ выполняет процедуру преобразования данных и ряд других функций, которые являются специфичными для систем записи ДОО. ПГ разработан для PCI шины персонального компьютера. Управление устройством производится посредством программного обеспечения, которое оптимальным образом организует передачу данных устройству с минимумом промежуточных операций. В устройстве заложена возможность считывания данных в режиме Прямого Доступа к Памяти (ПДП), что позволяет освободить процессорное время. Программное обеспечение использует это процессорное время для расчета данных микроструктуры в режиме Реального Времени и непосредственного размещения этих данных в память, которая доступна для устройства. Расчет данных в реальном времени позволяет избежать промежуточного хранения большого объема. Синхронизация устройства с записывающей системой осуществляется с помощью двух сигналов. Первый сигнал задает частоту строк записи. В X-Y системе записи – это начало записи очередной строки, в системе записи с полярными координатами - это начало очередного оборота. Второй высокочастотный сигнал определяется частотой синхроимпульсов. Количество синхроимпульсов определяет максимальное количество единичных векторов в строке. В устройстве введен блок памяти Таблица Преобразования (ТП) для преобразования фазовых уровней в сигнал управления экспозицией. Загружаемая в ТП информация рассчитывается по отклику светочувствительной среды на предварительно записанных тестовых дифракционных структурах и периодически корректируется с учетом дрейфа характеристик модулятора. Это позволяет, не изменяя рассчитанных данных производить запись ДОО на материалах с разными характеристиками или на одном материале, но с разной глубиной рельефа.

#### 5. Экспериментальное исследование

Метод представления данных топологии ДОО и устройство для их преобразования были экспериментально апробированы на усовершенствованной круговой лазерной записывающей системе (КЗЛС), разработанной в ИАиЭ СО РАН [5], представленной на рис. 3. Для расширения динамического диапазона управления мощностью пучка при прямой записи по фоторезисту в канал записи был введен второй акустооптический модулятор (см. Рис. 3). Первый модулятор определял максимально возможную мощность записывающего пучка на текущем радиусе записи, а второй модулятор, управляемый описанным выше устройством, осуществлял модуляцию в соответствии с топологией дифракционного элемента. В качестве примера, на рис. 4 показана интерферограмма участка ДОО записанного в фоторезисте SC1827, с использованием разработанного метода записи. Глубина рельефа составила 1.45  $\mu\text{m}$ . Дифракционная эффективность изготовленного ДОО превысила 95%.

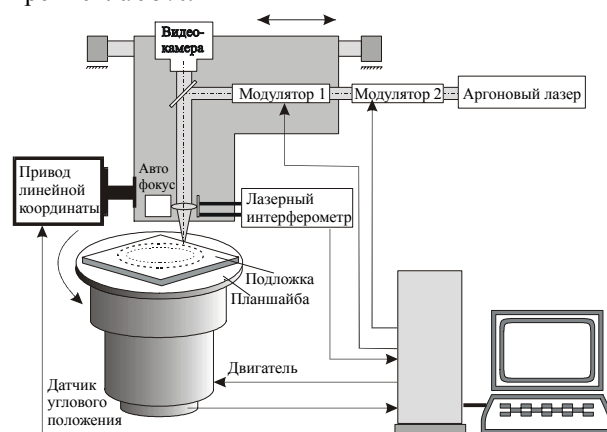


Рис. 3. Круговая лазерная записывающая система для изготовления произвольных ДОО с непрерывным профилем.

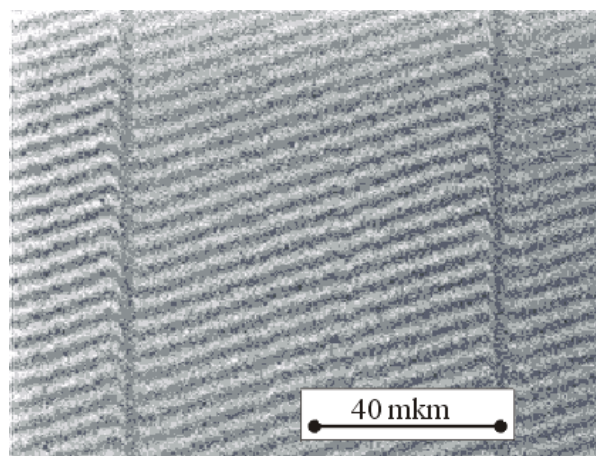


Рис. 4. Интерферограмма части ДОО изготовленного в фоторезисте SC1827. Глубина рельефа – 1.45  $\mu\text{m}$

### *Заключение*

В настоящей работе рассмотрена задача сокращения времени расчета и объема данных при изготовлении многоуровневых полутонных или фазовых дифракционных микроструктур методом прямой записи. Предложен векторно-градиентный формат данных, специализированный для компактного описания дифракционных структур. Модификация метода квантования на горизонтальные фазовые уровни позволяет реализовать простейший вариант представления 3-D топологии дифракционного элемента в векторно-градиентном формате. Описано специальное устройство, преобразующее данные в векторно-градиентном формате в аналоговый сигнал управления модулятором записывающего пучка. Приведены результаты экспериментального исследования записи ДОЭ с использованием этого устройства в составе круговой лазерной записывающей системы. Но описанный подход и устройство могут использоваться и для X-Y систем записи.

### *Литература*

1. M.T.Gale, M.Rossi, J.Pedersen, H.Schutz, "Fabrication of continuous relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist", *Opt. Eng.*, **33**, 3556-3566, (1994).
2. V.P.Korolkov, A.I.Malyshev, V.G.Nikitin, A.G. Poleshchuk, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, C. Wu, "Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs," *Proc. of SPIE*, **3633**, 129-138, (1999).
3. E.B. Kley, C. Wu, "Adapting existing e-beam writers to write HEBS-glass gray scale masks", in *Diffraction and Holographic Technologies, Systems, and Spatial Light Modulators VI*, ed. by S.H.Lee and R.L.Sutherland, *Proc. of SPIE*, **3633**, 35-45, (1999).
4. А.Г. Полещук. "Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным и многоуровневым профилем для дифракционной оптики," *Автометрия*, 1992, № 1, с.66-79.
5. A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, etc. , "Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure," *Appl. Opt.*, **38**, 1295-1301 (1999).

# Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements

*R.V. Shimansky, A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.V. Cherkashin, A.A. Kharisov*

*Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk)*

## *Abstract*

A new method was developed for the presentation of data describing the topology of diffractive optical elements for the scanning image recorders. The proposed vector-gradient data format is based on piecewise-linear approximation of the diffraction zone profile. A programmable vector-gradient generator supporting this format was developed. Experimental samples of diffractive optical elements were produced.

*Citation:* Shimansky RV, Poleshchuk AG, Korolkov VP, Cherkashin VV, Kharisov AA. Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements. *Computer Optics* 2000; 20: 80 - 83.

## *References*

- [1] M.T.Gale, M.Rossi, J.Pedersen, H.Schutz, "Fabrication of continuous relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist", *Opt. Eng.*, 33, 3556-3566, (1994).
- [2] V.P.Korolkov, A.I.Malyshv, V.G.Nikitin, A.G. Poleshchuk, A.A. Kharisov, V.V. Cherkashin, C. Wu, "Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs," *Proc. of SPIE*, 3633, 129-138, (1999).
- [3] E.B. Kley, C. Wu, "Adapting existing e-beam writers to write HEBS-glass gray scale masks", in *Diffractive and Holographic Technologies, Systems, and Spatial Light Modulators VI*, ed. by S.H.Lee and R.L.Sutherland, *Proc. of SPIE*, 3633, 35-45, (1999).
- [4] Poleshchuk AG. Fabrication of relief-phase structures with continuous and multilevel profiles for diffractive optics. *Avtometriya*; 1992; 1: 66-79.
- [5] A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, etc. , "Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure," *Appl. Opt.*, 38, 1295-1301 (1999).