

# ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА АЛМАЗНОГО ДОО НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ЛОКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В.С. Павельев, Д.Л. Головашкин, В.В. Кононенко<sup>1</sup>, С.М. Пименов<sup>1</sup>

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>1</sup>Центр естественно-научных исследований Института общей физики РАН

## Аннотация

Работа посвящена анализу систематических технологических погрешностей, возникающих при изготовлении алмазных ДОО с помощью прямой лазерной абляции. Целью предлагаемой статьи является численный анализ (в рамках электромагнитной теории дифракционных решеток) влияния погрешностей формируемого рельефа на стыках элементарных областей структурирования. В работе делаются заключения о характере влияния технологических погрешностей на работу ДОО и сформированы рекомендации по минимизации потерь энергии, связанных с наличием погрешностей.

## Введение

В [1-3] рассмотрено изготовление дифракционных оптических элементов (ДОО) для среднего ИК диапазона методом прямой лазерной абляции поверхности алмазной пленки ( $n=2,4$ ) излучением эксимерного УФ-лазера. В силу импульсного характера облучения алмазной поверхности микрорельеф ДОО носил ступенчатый (квантованный) характер. Квантованная по  $N$  уровням фазовая функция ДОО  $\varphi(x, y) \in \{2\pi/N, \dots, 2\pi\}$  преобразовывалась в функцию высоты рельефа:

$$\tilde{h}(x, y) = \frac{\lambda \varphi(x, y)}{2\pi(n-1)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны ДОО,  $n$  – показатель преломления подложки. Соответственно, реализация высоты рельефа  $\tilde{h}(x, y)$  требует микроструктурирования на глубину

$$\Delta(x, y) = \frac{\lambda}{(n-1)} - \tilde{h}(x, y). \quad (2)$$

Под  $j$ -м уровнем квантования будем понимать совокупность элементарных областей микроструктурирования с одинаковой высотой микрорельефа.

$$\tilde{h}_j = \frac{\lambda(N-j+1)}{N(n-1)} \quad (3)$$

При прямом лазерном травлении поверхности алмаза, в той или иной степени наблюдаются систематические локальные искажения микрорельефа на границах элементарных областей структурирования в виде «бортиков» (рис. 1а, 2а,б) или «каналов» (рис. 1б). Проведенные экспериментальные исследования синтезированных алмазных элементов (линз Френеля [1, 2] и различных фокусаторов лазерного пучка [3]) продемонстрировали, что описанные погрешности рельефа практически не влияют на заданное распределение интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости ДОО, однако существенно понижают дифракционную эффективность элемента [2, 3].

Существует два различных подхода к уменьшению потерь энергии, связанных с наличием погрешностей. Первый заключается в уменьшении искажений путем гомогенизации лазерного пучка и

понижения степени когерентности излучения для уменьшения дифракционных эффектов на краю пятна облучения. Авторы работают в данном направлении и планируют опубликовать полученные результаты. Другой подход к решению данной проблемы заключается в исследовании возмущений, вносимых погрешностями в работу ДОО, и выработке рекомендаций для выбора параметров расчета микрорельефа (количество уровней квантования фазовой функции  $N$ , размер минимальной области микроструктурирования  $s$ ) с целью минимизации потерь энергии освещающего пучка, что и является предметом данной статьи.

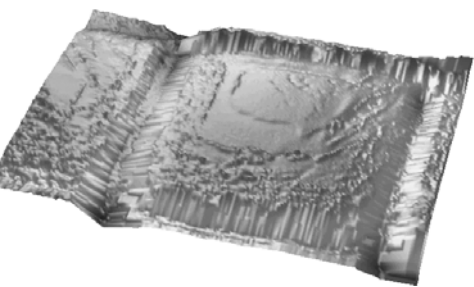
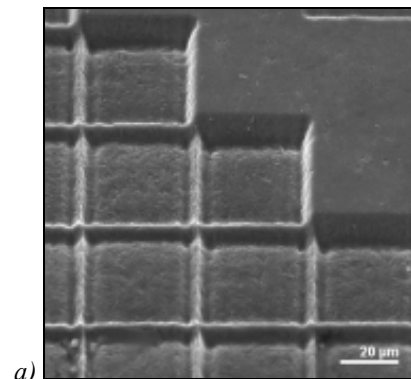


Рис. 1. Типичные фрагменты микрорельефа алмазного ДОО, реализованного прямой лазерной абляцией а) «бортики» б) «каналы»

Поскольку субволновый характер погрешностей не позволяет использовать скалярное приближение для анализа их влияния, авторами была использована электромагнитная теория света. Результаты вычислительных и натуральных экспериментов приведены для случая  $N=8$ .

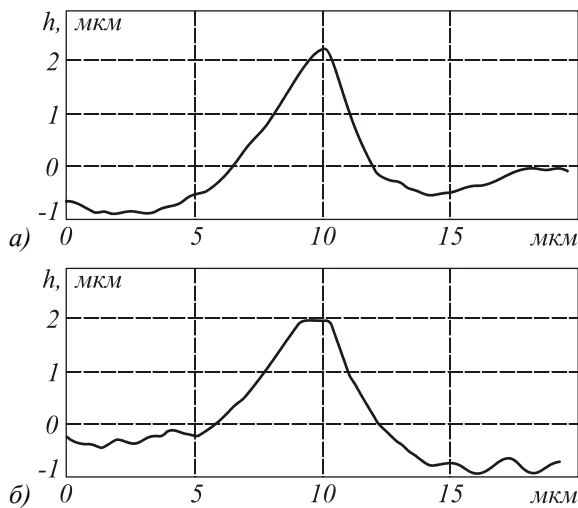


Рис. 2. Профиль сформированного микрорельефа на стыке двух элементарных областей структурирования (по результатам микроинтерферометрии):

- а) с одинаковыми глубинами структурирования;  
 б) с разными глубинами структурирования

### 1. Постановка задачи

Трехмерное моделирование в рамках электромагнитной теории света элемента с субволновыми погрешностями изготовления потребует слишком больших вычислительных ресурсов. Ограничимся рассмотрением двумерной модели, что позволит дать качественную оценку зависимости энергетических потерь от физического размера погрешности изготовления. Рассмотрим случай возникновения на границах областей микроструктурирования погрешностей рельефа в виде «бортиков» (рис. 1а).

При исследовании влияния погрешностей рельефа профиль «бортиков» аппроксимировался равнобедренными треугольниками с высотой  $h$  и базисом  $l$  (рис. 3). Приведенная в таблице 1 зависимость параметров технологических погрешностей от уровня квантования была получена с помощью измерений рельефа линзы Френеля интерференционным профилометром «NewView 5000» (ZygoLOT).

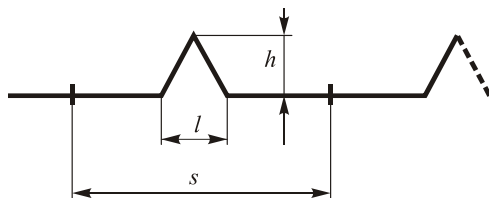


Рис. 3 Параметры технологической погрешности

Технологические погрешности отсутствуют на первой ступеньке фазовой функции, так как при формировании этой области микроструктурирование не применяется. С возрастанием номера уровня квантования увеличивается глубина структурирования, и, следовательно, возрастают высота и базис треугольника, аппроксимировавшего технологические погрешности.

В расчетах поверхность области структурирования вне «бортиков» полагалась плоской, а линейный размер стороны квадратной элементарной области полагался равным шагу дискретизации лазерного структурирования в [2] - 40 мкм, что составляет приблизительно 4 длины волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda_0=10,6$  мкм). Предполагалось, что на границу раздела воздух/алмаз ( $\epsilon=5,76$ ) нормально падает Н - волна и рассматривалось ее прохождение через одномерную дифракционную решетку с периодом, равным линейному размеру элементарной области структурирования, и областью модуляции, эквивалентной погрешности профиля.

Таблица 1. Зависимость технологических погрешностей изготовления от уровня квантования

Уровни квантования фазовой функции $j$	Высота $h$ , мкм	Базис $l$ , мкм
1	0	0
2	1	5
3	1,5	5
4	2	6
5	3	7,5
6	3,5	8
8	4,5	10
3	1,5	5
4	2	6
5	3	7,5
6	3,5	8
8	4,5	10

В случае отсутствия «бортиков» решетка вырождается в плоскую алмазную поверхность, и вся энергия волны, падающей на границу раздела, переходит в нулевой отраженный и нулевой прошедший порядки. Причем, интенсивность нулевого прошедшего порядка, отнесенная к интенсивности падающей волны, есть величина  $I=0,83$ . В качестве критерия влияния субволновой погрешности изготовления уместно выбрать нормированную долю энергии, ушедшей из нулевого порядка при прохождении границы раздела сред  $\delta=(I-I_0)/I$ , где  $I_0$  - интенсивность нулевого прошедшего порядка, отнесенная к интенсивности падающей волны.

### 2. Численное моделирование влияния существующих технологических погрешностей

В [4] рассмотрен дифференциальный метод (Differential method) анализа дифракции света на диэлектрической решетке. Суть метода состоит в определении поля в зоне модуляции посредством решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с последующей «сшивкой» полученного решения с разложением Релея вне зоны модуляции. При проведении численных экспериментов область модуляции разбивалась на 100 слоев. Точность решения, полученного посредством

дифференциального метода, можно оценить с помощью закона сохранения энергии. При равенстве суммы интенсивностей всех прошедших и отраженных порядков (имеются в виду только распространяющиеся порядки) интенсивности падающей волны, говорят о выполнении закона сохранения энергии. Во всех поставленных авторами численных экспериментах (таблица 2, рис. 4) закон сохранения энергии выполнялся.

Таблица 2. Оценка влияния технологических погрешностей

Уровни квантования фазовой функции, $j$	$\delta \cdot 100\%$
2	3,9
3	10,4
4	16,6
5	32,5
6	40,4
7	52
8	56,4

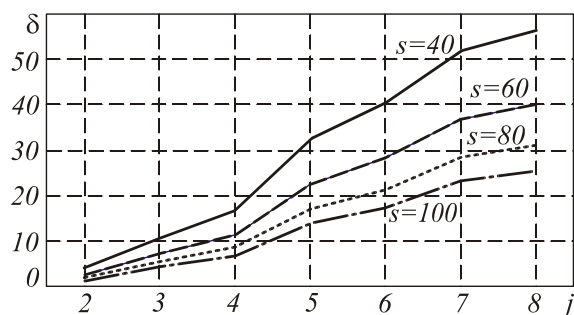


Рис. 4. Зависимость влияния субволновой погрешности изготовления от глубины структурирования

Изучая зависимость параметра  $\delta$  от уровня квантования (таблица 2), можно отметить, что для границы двух одноуровневых элементарных областей микроструктурирования наличие технологических погрешностей, начиная с уровня  $j=4$  квантования, существенно влияет на работу этого участка. Таким образом, величину потерь можно минимизировать с помощью оптимизации фазовой функции ДОЭ, минимизируя количество отсчетов фазовой функции со значениями функции рельефа  $\tilde{h}_4$ . Другой подход к ослаблению влияния технологических погрешностей состоит в увеличении линейного размера элементарной области микроструктурирования. На рис.4 представлены результаты численного анализа влияния бортиков для разных размеров об-

ластей микроструктурирования, сделанного в предположении, что абсолютные размеры искажений при увеличении размера области микроструктурирования не увеличиваются.

### Заключение

Технологические погрешности, возникающие при абляции алмазной пленки излучением УФ-лазера, оказывают существенное влияние на эффективность алмазного ДОЭ при увеличении глубины и уменьшении размера области структурирования (Рис. 3). На основании данного исследования можно сформулировать конкретные рекомендации по выбору параметров микрорельефа и построению численных процедур оптимизации микрорельефа алмазных ДОЭ:

- шаг дискретизации целесообразно выбирать, учитывая зависимость влияния субволновых погрешностей от размеров области структурирования;
- процедуру расчета рельефа ДОЭ целесообразно строить, организуя выбор значений высоты рельефа (и соответственно глубины структурирования) из множества значений, при которых не возникают недопустимо большие потери энергии.

В качестве процедур оптимизации микрорельефа с учетом технологических погрешностей целесообразно использовать процедуры [5], позволяющие производить поиск функции (1) в множестве технологически реализуемых функций.

### Литература

1. Кононенко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Соифер В.А. Алмазная дифракционная оптика для мощных CO<sub>2</sub>-лазеров // Квантовая электроника, 1999, Том 26, № 1. С. 9-10.
2. Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Prokhorov A.M., Pavelyev V.S., Soifer V.A. CVD diamond transmissive diffractive optics for CO<sub>2</sub> lasers // New Diamond and Frontier Carbon Technology 10, pp. 97-107, (2000) (Japan).
3. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Prokhorov A.M., Luedge B., Duparre' M. Diamond focusators for far IR lasers // Компьютерная оптика 20, 2000, с. 71-75
4. Electromagnetic // Theory on Gratings: Topics in current physics (22, Ed. By R. Petit, N.Y.: Springer-Verlag, 1980)
5. Павельев В.С. Стохастический подход к оптимизации квантованных дифракционных оптических элементов // Известия самарского научного центра РАН, 2002, Том 4, N 1, с. 61-67.