

## АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОДНОУРОВНЕВЫЕ ФРАГМЕНТЫ ДОО С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ

Д.Л. Головашкин, В.С. Павельев, М. Дюпарре<sup>1</sup>, В.В. Кононенко<sup>2</sup>  
Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>1</sup> - Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (г. Йена, Германия)

<sup>2</sup> - Центр естественно-научных исследований Института общей физики РАН

### Аннотация

Работа посвящена анализу систематических технологических погрешностей, возникающих при изготовлении алмазных ДОО с помощью лазерной абляции. Целью предлагаемой статьи является численный анализ влияния погрешностей изготовления в виде «бортиков» на стыках элементарных областей структурирования с одинаковой расчетной высотой микрорельефа. В работе делаются заключения о допустимой высоте «бортиков» и характере влияния технологических погрешностей различной формы на работу ДОО.

### Постановка задачи

В [1] дан краткий анализ систематических погрешностей, возникающих при изготовлении ДОО для CO<sub>2</sub>-лазеров с помощью технологии лазерной абляции алмазной подложки, предложенной в [2]. В частности, кратко описано возникновение «бортиков» высотой от 1-4 мкм на стыках элементарных областей структурирования. Целью предлагаемой статьи является численный анализ влияния «бортиков» на стыках элементарных областей структурирования с одинаковой расчетной глубиной структурирования на работу ДОО.

Результаты микроинтерферометрических измерений показывают, что изменение высоты «бортиков»  $h$  с глубиной структурирования  $l$  алмазной подложки при использовании технологии лазерной абляции может быть аппроксимировано линейной зависимостью. Для максимальной исследуемой глубины ( $l=6,63$  мкм) примем  $h=4$  мкм, для минимальной ( $l=0,94$  мкм) -  $h=1$  мкм, что согласуется с результатами натурных измерений. Ширину «бортика» у основания положим равной  $5h$ , что в среднем также соответствует результатам измерений, как минимум для небольших значений высоты  $h$ . Профиль технологической погрешности в большинстве случаев можно аппроксимировать равнобедренным треугольником (рис. 1), что и было сделано в данной работе.

Для сравнения авторы также провели численный анализ влияния «бортиков» прямоугольной и синусоидальной форм. При постановке вычислительных экспериментов высота треугольника, амплитуда синусоиды и меньшая сторона прямоугольника выбирались соответствующими замеренной высоте технологической погрешности, а основание треугольника, половина периода синусоиды и большая сторона прямоугольника - ширине технологической погрешности у основания. Вне «бортиков» поверхность области структурирования полагалась плоской. Линейный размер элементарной области [1] выбирался равным шагу дискретизации лазерного структурирования, выбранному в [2] - 40 мкм, что составляет приблизительно

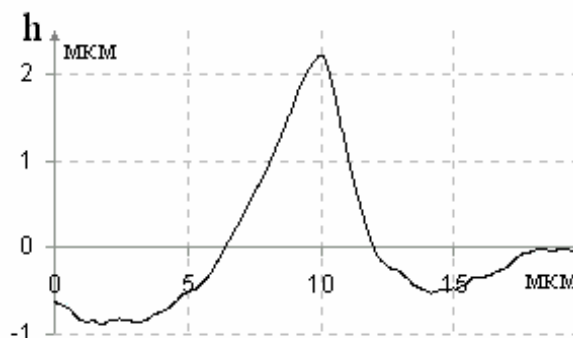


Рис. 1. Вид локального искажения микрорельефа на стыке двух элементарных областей структурирования (по результатам измерений)

четыре длины волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda_0=10,6$  мкм). В рамках данной работы предполагалось, что на плоскую границу раздела воздух/алмаз ( $\varepsilon=5,76$ ) нормально падает Н-волна.

В случае отсутствия «бортиков» вся энергия волны, падающей на плоскую границу раздела, переходит в нулевой отраженный и нулевой прошедший порядки, причем интенсивность нулевого прошедшего порядка, отнесенная к интенсивности падающей волны есть величина  $I=0,8305$ .

Будем характеризовать влияние субволновой погрешности изготовления величиной  $\delta=(I-I_0)/I$ , которая показывает долю энергии, ушедшей из нулевого порядка при прохождении границы раздела сред ( $I_0$  - интенсивность нулевого прошедшего порядка). Очевидно, что чем больше энергии ушло в другие порядки, тем хуже будет работать оптический элемент.

### Результаты численного анализа

Как отмечалось выше, в принятой линейной модели высота «бортика» характеризует расчетную глубину структурирования (уровень) и ширину технологической погрешности у основания. Следовательно, зависимость  $\delta(h)$  вполне отражает влияние «бортиков», расположенных на одном уровне, на распространение излучения.

Рассмотрим прохождение Н - волны через дифракционную решетку с периодом, равным линейному размеру элементарной области структурирования и областью модуляции, эквивалентной профилю исследуемого участка ДОЭ. Традиционно, для анализа дифракции света на двумерной диэлектрической решетке используется "Differential method" [3], наиболее удачная численная реализация которого предложена в [4]. 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. Для прямоугольного профиля решетки такое решение ищется аналитически, в остальных случаях область модуляции разбивается на слои, в каждом из которых решение также записывается аналитически, а профиль решетки аппроксимируются ступенчатой функцией. При проведении численных экспериментов с треугольными и синусоидальными «бортиками» авторы разбивали область модуляции на 100 слоев.

Точность решения, полученного посредством "Differential method", 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 закон сохранения энергии выполнялся. Кроме того, устремив  $h$  к нулю, для любого профиля технологической погрешности, величина  $I_0$  должна стремиться к 0,8305, что имеет место (рис. 2). Следовательно, можно говорить о хорошей точности используемого метода.

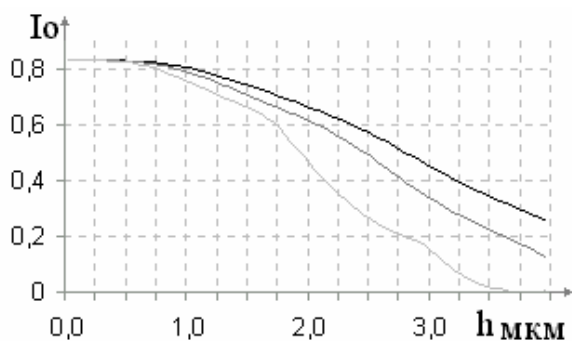


Рис. 2. Зависимость интенсивности нулевого прошедшего порядка от высоты технологической погрешности. Черная кривая соответствует треугольной форме «бортика», серая - синусоидальной и бледно-серая - прямоугольной

Изучая зависимость параметра  $\delta$  от высоты технологической погрешности (рис. 3), можно прийти к следующим выводам:

1. Технологические погрешности, какую бы форму они не имели, практически не оказывают

влияния на распространение излучения, если их высота не превышает 0,5 мкм.

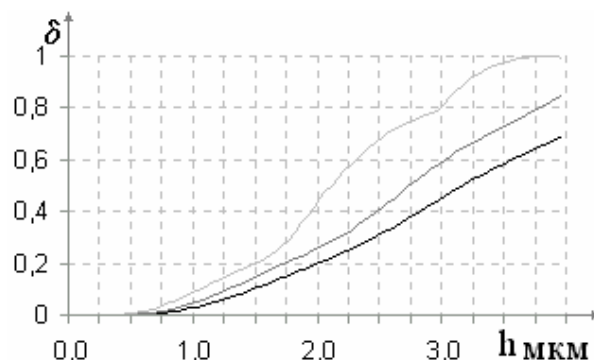


Рис. 3. Зависимость параметра  $\delta$  от высоты технологической погрешности. Черная кривая соответствует треугольной погрешности, серая синусоидальной и бледно-серая - прямоугольной

2. Треугольная погрешность меньше остальных погрешностей искажает волновой фронт. При  $h=1$  мкм (наименьшая глубина структурирования) ее влияние составляет 3%, что весьма немного, однако уже при  $h=2,5$  мкм (средняя глубина структурирования) влияние погрешности возрастает до 30%, а при  $h=4$  мкм (наибольшая глубина структурирования) влияние достигает 70%, серьезно искажая волновой фронт (правда, необходимо учитывать, что в рамках принятой модели основание «бортика» в данном случае будет составлять 20 мкм – половина размера элементарной области микроструктурирования!).

3. Синусоидальная погрешность, возникающая только при больших глубинах структурирования, оказывает существенное влияние на работу оптического элемента (от 40% на средних глубинах до 85% на наибольших).

4. Прямоугольная погрешность, которая, к счастью, на практике не встречается, способна совершенно нарушить работу элемента при больших глубинах. Через такие участки излучение не будет распространяться в желаемом направлении.

Отметим, что в задачах синтеза ДОЭ для мощных лазеров особый интерес представляет доля энергии, прошедшей через оптический элемент. Из рис. 4 очевидно, что погрешности изготовления не оказывают серьезного влияния на этот параметр.

Только в случае прямоугольных «бортиков» на некоторых глубинах травления, проходит на 2% энергии больше, чем без технологических погрешностей, для реальных погрешностей эта величина не превышает 0,57%.

### Заключение

Технологические погрешности, какую бы форму они не имели, практически не оказывают влияния на распространение излучения, если их высота не превышает 0,5 мкм.

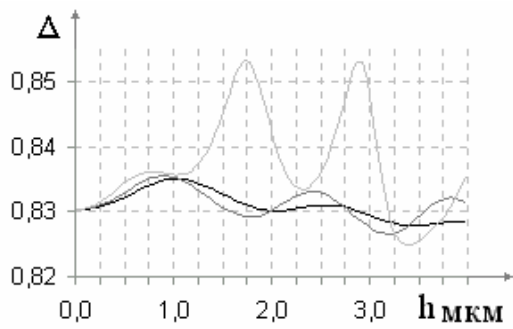


Рис. 4. Зависимость отношения суммы интенсивностей прошедших распространяющихся порядков к интенсивности падающей волны ( $\Delta$ ) от высоты технологической погрешности.

Черная кривая соответствует треугольной погрешности, серая синусоидальной и бледно-серая прямоугольной

При больших высотах (1-2,5 мкм) погрешности оказывают заметное влияние на распространение излучения, а при высоте «бортиков»  $h=4$  мкм формируемый волновой фронт может быть серьезно искажен.

Таким образом, на основании данного исследования можно сформулировать конкретные рекомендации по применимости технологии лазерной абляции для синтеза конкретного ДОЭ. Отметим, однако, что при анализе влияния «бортиков», рас-

положенных на стыке двух разных уровней квантования рельефа ДОЭ энергия будет распределяться между порядками и при отсутствии технологических погрешностей, следовательно, предлагаемый в данной работе подход окажется неприемлем.

#### Литература

1. Головашкин Д.Л., Дюпарре М, Павельев В.С., Сойфер В.А. Моделирование прохождения ИК-излучения через алмазную дифракционную линзу с субволновыми технологическими погрешностями микрорельефа // *Компьютерная оптика*, 2001. №21. С.131-133.
2. Кононенко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Сойфер В.А. Алмазная дифракционная оптика для мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров // *Квантовая электроника*, 1999, Том 26, № 1. С. 9-10.
3. *Electromagnetic Theory on Gratings: Topics in current physics* (22, Ed. By R. Petit, N.Y.: Springer-Verlag, 1980)
4. Досколович Л.Л. Дифракция на пропускающих диэлектрических решетках // *Методы компьютерной оптики*/ под ред. В.А. Сойфера, М. «Физматлит», 2000. С. 158-175.