

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОШИБОК И УШИРЕНИЯ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2004 г. Р. В. Скиданов, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Хонина, доктор физ.-мат. наук

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара
E-mail: romans@smr.ru

Дана оценка предельно допустимым отклонениям параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ) исходя из технологических погрешностей. Приведены результаты моделирования и численного эксперимента по оценке влияния технологических ошибок формирования микрорельефа на параметры ДОЭ. Предпринимается попытка ввести единый параметр для характеристики качества ДОЭ. Исследованы влияние спектральной ширины линии лазерного излучения на качество работы ДОЭ, а также работа ДОЭ на нерасчетных длинах волн.

Коды OCIS: 050.1950.

Поступила в редакцию 15.12.2003.

Параметры ДОЭ определяются конструктивными параметрами микрорельефа, трудности формирования которого обусловлены не только предельными возможностями технологического оборудования, но и технологическими ошибками, возникающими непосредственно при изготовлении ДОЭ. Наиболее значимыми являются ошибки, возникающие при травлении подложки на определенную глубину. В работах [1, 2] путем аналитического решения оценена взаимосвязь дифракционной эффективности дифракционных линз (ДЛ) с относительным отклонением глубины микрорельефа в пределах $\pm 30\%$. В работе [3] предложен метод оценки влияния технологических ошибок при формировании микрорельефа ДЛ на световое поле в дальней зоне дифракции. В предлагаемой работе проведено исследование влияния технологических ошибок, возникающих при изготовлении формирующего моды Гаусса–Эрмита 16-уровневого ДОЭ на интенсивность распределения света в дифракционной картине на различных расстояниях.

Для этого моделировался процесс дифракции на идеальном ДОЭ. В процессе моделирования определялось распределение интенсивности на точно заданном расстоянии от ДОЭ, затем в фазовую функцию ДОЭ вносились искажения, соответствующие технологическим ошибкам в процессе изготовления, и вновь моделировался процесс дифракции (рис. 1).

Затем определялась ошибка формирования интенсивности по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (I_{i,j}^{\sigma} - I_{i,j})^2}{\sum_{i,j} (I_{i,j})^2}}, \quad (1)$$

где $I_{i,j}$ – распределение интенсивности для идеального ДОЭ, $I_{i,j}^{\sigma}$ – распределение интенсивности для искаженного ДОЭ.

На рис. 2 приведен график зависимости ошибки формирования интенсивности от расстояния при различных значениях технологической ошибки изготовления δ_{11} для 11-го уровня элемента. Как видно из рисунка 2, ошибка формирования интенсивности с увеличением расстояния стабилизируется на некотором уровне, значение которого прямо пропорционально технологической ошибке. Аналогичные эксперименты были проведены для всех 16 уров-

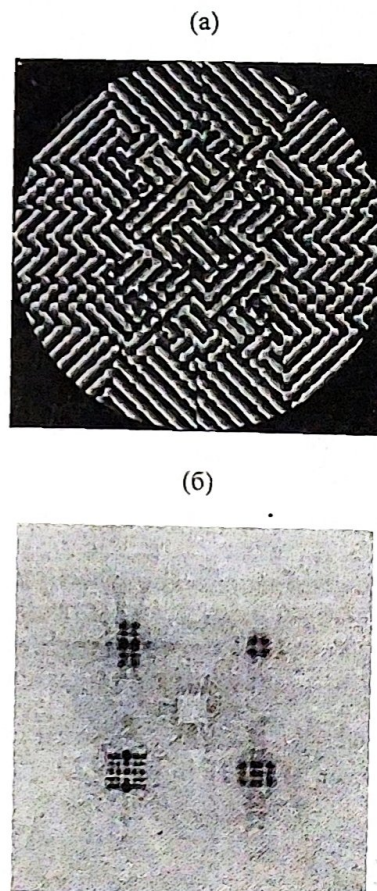


Рис. 1. Исследуемый ДОЭ (а), картина дифракции в дальней зоне (б).

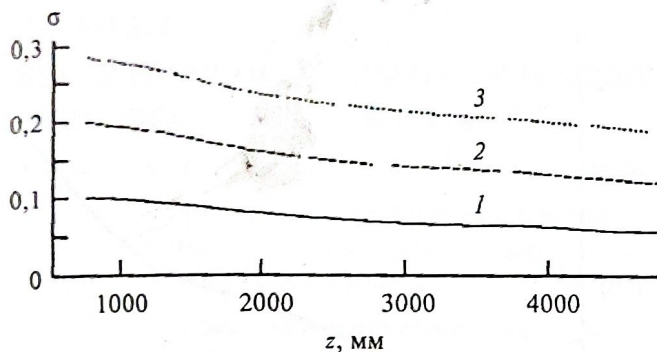


Рис. 2. Зависимость ошибки формирования интенсивности от расстояния до ДОЭ. $\delta_{11} = 0,1$ (1), 0,2 (2), 0,3 (3).

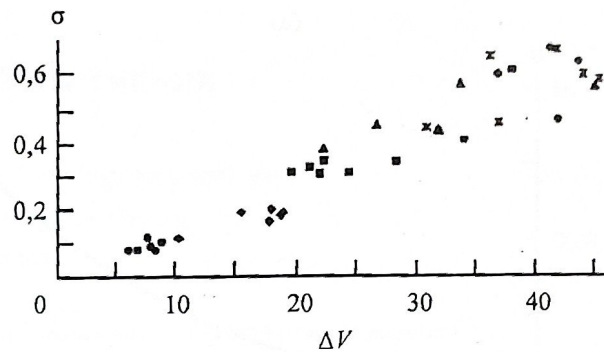


Рис. 3. Зависимость ошибки формирования интенсивности от параметра ΔV .

ней и были получены похожие результаты. Сочетания ошибок сразу на нескольких уровнях квантования дают гораздо более сложные закономерности. Рассмотреть все возможные сочетания для 16-уровневого элемента очень сложно. Для оценки качества изготовления ДОЭ в целом предлагается использовать параметр ΔV , который показывает изменение объема ДОЭ на каждом уровне квантования из-за технологических ошибок, допущенных в результате технологии производства:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^N \delta_i (\Delta S)^2 \frac{\lambda}{n-1}, \quad (2)$$

где δ_i – технологическая ошибка на i -м уровне, N – общее количество уровней квантования, ΔS – размер дискретизации элемента, n – показатель преломления, λ – длина волны. ΔV является изменением общего объема рельефа ДОЭ относительно объема рельефа “идеального” ДОЭ. Как видно из рис. 3, между параметром ΔV и ошибкой формирования интенсивности просматривается связь, т. е. параметр ΔV позволяет оценивать значение ошибки формирования интенсивности.

В настоящее время в связи с развитием волоконно-оптической техники появилась потребность ис-

пользовать ДОЭ совместно с полупроводниковыми лазерами. Но эти лазеры имеют существенно худшие параметры по сравнению с газовыми или твердотельными лазерами. Можно выделить две основные причины, которые могут оказать негативное влияние на качество работы ДОЭ:

1. Длина волны излучения полупроводниковых лазеров, как правило, для каждого конкретного лазера может довольно сильно отличаться от паспортных данных. Диапазон изменения длины волны может составлять 10–20 нм.

2. Спектральная ширина линии излучения полупроводниковых лазеров существенно больше аналогичного параметра газовых лазеров и составляет обычно 2–3 нм.

Для выяснения степени влияния этих параметров на качество работы ДОЭ был проведен ряд вычислительных экспериментов. Первоначально рассчитывалась картина дифракции с измененной длиной волны, а затем она сравнивалась с эталоном (только в области, помеченной квадратом). В качестве эталона выступала картина дифракции от ДОЭ на расчетной длине волны. На рис. 4а представлена картина дифракции от ДОЭ при увеличении длины волны в 1,3 раза. Для сравнения на рис. 4б приведена эталонная картина дифракции.

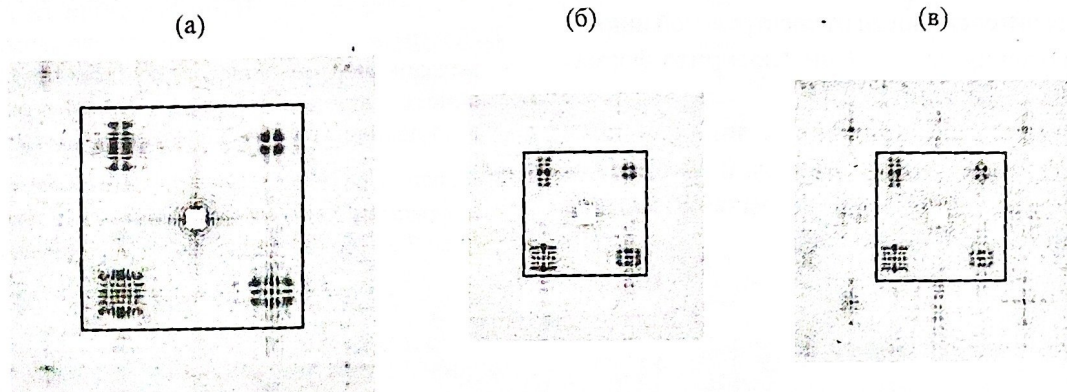


Рис. 4. Искаженная (а, в) и эталонная (б) картины дифракции на ДОЭ, формирующем моды Гаусса–Эрмита (пояснения в тексте).

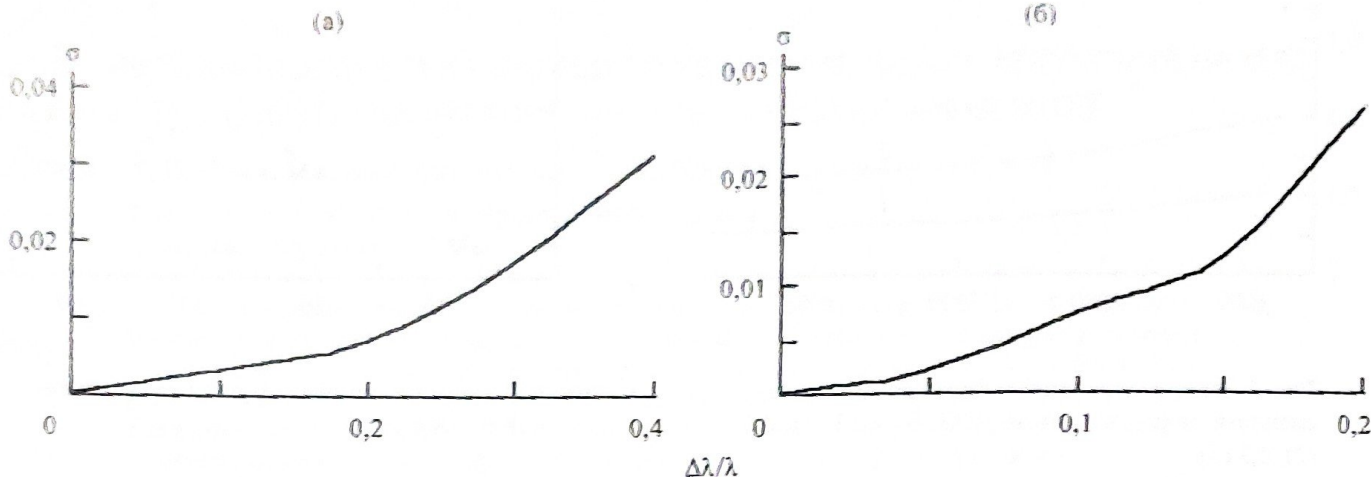


Рис. 5. Зависимости ошибки формирования интенсивности от величины смещения длины волны от расчетной (а) и спектральной ширины линии излучения полупроводникового лазера (б).

При сравнении с эталоном было получено значение относительной ошибки формирования интенсивности $\sigma = 0,29$, что довольно существенно. Но основной вклад в эту ошибку вносит изменение масштаба картины дифракции, форма самих мод Гаусса-Эрмита существенно не меняется. Чтобы проверить это, картина дифракции, полученная на нерасчетной длине волны, была искусственно приведена к масштабу эталона (рис. 4в). После сравнения этой картины дифракции с эталоном было получено существенно меньшее значение ошибки формирования интенсивности $\sigma = 0,011$. В дальнейшем при исследовании работы ДОЭ на нерасчетных длинах волн при определении ошибки всегда использовалась процедура масштабирования. На рис. 5а приведен график зависимости ошибки формирования интенсивности от величины смещения длины волны от расчетной.

Как видно из рис. 5а, при малых значениях отношения $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, которое стоит по оси абсцисс, значения ошибки формирования интенсивности становятся чрезвычайно малыми, в связи с чем можно утверждать, что влияние смещения длины волны полупроводникового лазера несущественно.

На рис. 5б приведен график зависимости ошибки формирования интенсивности от спектральной ширины линии излучения лазера. Считалось, что форма линии близка к гауссовой.

Как видно из рис. 5б, при ширине линии, типичной для полупроводниковых лазеров, 2 нм ошибка формирования интенсивности чрезвычайно мала и может не приниматься во внимание.

Для окончательной проверки был проведен натуральный эксперимент. Для простоты он проводился с ДОЭ, который формирует всего одну моду Гаусса-Эрмита. Было проведено сравнение результата работы ДОЭ с полупроводниковым лазером и с He-Ne-лазером. Ошибка формирования интенсивности после компенсации искажений составила 0,18, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Основной вывод, который можно сделать из проведенной серии экспериментов, – излучение полупроводниковых лазеров вполне пригодно для использования в системах с ДОЭ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ, администрации Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы “Фундаментальные исследования и высшее образование” (BRHE), а также гранта Президента РФ МД-209.2003.01.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hessler T., Rossi M., Kunz R.E., Gale M.T. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 1998. V. 3. P. 4069–4079.
2. Корольков В.П. Разработка и исследование оптических методов изготовления дифракционных элементов на основе материалов с управляемым коэффициентом поглощения // Автореф. канд. дис. Новосибирск, 2000.
3. Волков А.В., Скиданов Р.В. Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах // Вест. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2000. В. 9. С. 174–180.