

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛМАЗНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

*В.В. Кононенко¹, В.И. Конов¹, С.М. Пименов¹, А.М. Прохоров¹,
Н.Л. Казанский², В.С. Павельев², В.А. Соيفер²*

¹⁾ *Центр естественно - научных исследований ИОФ РАН, Москва*

²⁾ *Институт систем обработки изображений РАН, Самара*

Аннотация

В [1] предложен и реализован метод лазерного формирования фазового микрорельефа алмазных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для дальнего ИК-диапазона спектра. С использованием данного метода для излучения CO₂ лазера ($\lambda=10,6$ мкм) создан одномерный ДОЭ - цилиндрическая линза с апертурой $4*4$ мм² и фокусным расстоянием $f=25$ мм [1]. Данная работа посвящена исследованию созданного алмазного ДОЭ методом натурального и вычислительного эксперимента. В ходе натурального эксперимента измерены распределение интенсивности поля в фокальной области линзы, глубина фокуса и дифракционная эффективность ДОЭ. Отмечена высокая степень корреляции между экспериментальными характеристиками элемента и результатами компьютерного моделирования.

Введение

Широкое использование мощных CO₂ лазеров сформировало насущную потребность в рефракционной оптике, надежно функционирующей при высоких интенсивностях излучения. Последние достижения в области газофазного синтеза позволяют получать поликристаллические алмазные пленки (АП) с оптическими и теплофизическими свойствами, близкими к свойствам монокристаллов алмаза (теплопроводность $\approx 18-20$ Вт/см·К [2] и коэффициент поглощения $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹, показатель преломления $n=2,38-2,42$ для $\lambda=10,6$ мкм). Значительный интерес к использованию подобных алмазных пластин толщиной до 1-2 мм и площадью до 100 см² в качестве выходных окон для CO₂ лазеров мощностью 10-20 кВт [3] обусловлен их более высокими порогом тепловой стабильности и разрушения, чем у традиционных материалов ИК оптики (ZnSe, KCl и др.). Однако задача создания более сложных оптических устройств оставалась нерешенной по двум основным причинам. Во-первых, механическая обработка АП с целью получения требуемого профиля затруднена из-за высокой твердости алмаза. Во-вторых, относительно малая толщина алмазных пластин не позволяет получать традиционным способом оптические элементы с достаточной апертурой. В качестве альтернативы, мы предлагаем использовать АП в качестве подложек дифракционных оптических элементов [4], фазовый рельеф которых формируется методом селективного лазерного травления. Эффективность данного подхода была недавно продемонстрирована на примере создания антиотражающих периодических микроструктур на поверхности алмазной пленки [5,6]. Следует отметить, что технологии расчета и получения ДОЭ для излучения ИК диапазона спектра успешно реализо-

ваны для традиционных материалов [7-9]. В работе [1] на примере многоуровневой цилиндрической линзы для $\lambda=10,6$ мкм с фокусным расстоянием $f=25$ мм и апертурой $S=4*4$ мм², исследована возможность лазерного формирования микрорельефа алмазных ДОЭ, работающих в дальней ИК области спектра. Данная работа посвящена сравнению оптических характеристик полученного элемента и результатов компьютерного моделирования.

2. Расчет и изготовление цилиндрической линзы

Описанный в [1] элемент был рассчитан с помощью программного обеспечения по расчету и моделированию дифракционных оптических элементов, разработанного в ИСОИ РАН [10]. Уравнение фазовой функции цилиндрической линзы (рис. 1) в параксиальном приближении имеет вид [4]:

$$\varphi(u) = -k \frac{u^2}{2f}, \quad (1)$$

при $|u| \leq \frac{D}{2}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; f - фокусное расстояние; D - апертура линзы. Если материал линзы имеет коэффициент преломления n , то максимальная высота микрорельефа ДОЭ составляет

$$h_{\max} = \frac{\lambda}{n-1} \quad (2)$$

и имеет порядок длины волны [4]. В нашем случае ($n=2,38$) $h_{\max}=7,68$ мкм. Высота микрорельефа в точке апертуры u определяется по формуле

$$h(u) = \frac{\lambda}{n-1} \frac{1}{2\pi} \text{mod}_{2\pi} \varphi(u). \quad (3)$$

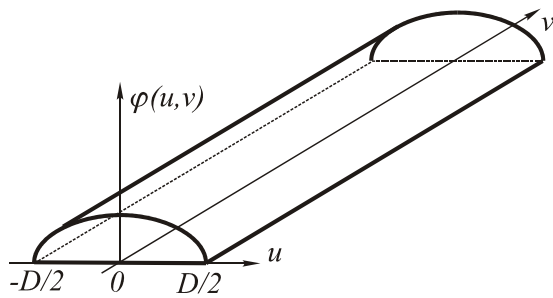


Рис. 1. Фазовая функция цилиндрической линзы

Значения ширины зон Френеля линзы можно найти из соотношения

$$\varphi(u_j) = -2\pi j, \quad (4)$$

откуда следует

$$u_j = \sqrt{2\lambda f j}. \quad (5)$$

Число полных зон j_0 на линзе определяется из условия $u_{j_0} \leq \frac{D}{2}$ и удовлетворяет соотношению

$$j_0 = \left\lceil \frac{D^2}{8\lambda f} \right\rceil, \quad (6)$$

где $\lceil \cdot \rceil$ - означают целую часть числа с округлением в меньшую сторону. Ширина зон плоской цилиндрической линзы

$$\Delta_j = u_j - u_{j-1}, j = \overline{1, j_0}, \quad (7)$$

является переменной и уменьшается к периферии линзы. Характерным параметром является ширина Δ самой узкой в данном случае - последней периферийной зоны, определяющей требования к технологическому оборудованию. В нашем случае значение ширины минимальной зоны составляло порядка $\Delta=140$ мкм. Полученные значения фазовой функции линзы (4), приведенные к диапазону $[0, 2\pi)$, были проквантованы по 4 уровням, как показано на рис. 2.

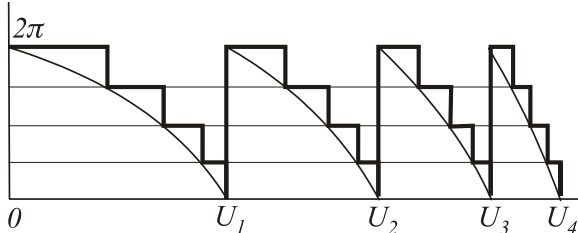


Рис. 2. Квантование цилиндрической линзы по четырем уровням

Рассчитанный дифракционный микрорельеф четырехуровневой линзы (рис.3) воспроизводился на поверхности алмазной пластины. Технология изготовления алмазных пластин, описанная в [11], включала стадии: 1) газофазного осаждения АП на кремниевых подложках в плазменном СВЧ реакторе, 2) отделения пленки от подложки путем травления кремния в смеси кислот, 3) лазерной резки и 4) механической полировки ростовой поверхности АП. Полученные пластины имели размер $0,5-1 \text{ см}^2$ и толщину 300-400 мкм. Для микрообработки поверхности алмаза в качестве источника излучения при-

менялся эксимерный КгF лазер (модель 1701, длина волны $\lambda=248$ нм, энергия в импульсе $\cong 150$ мДж).

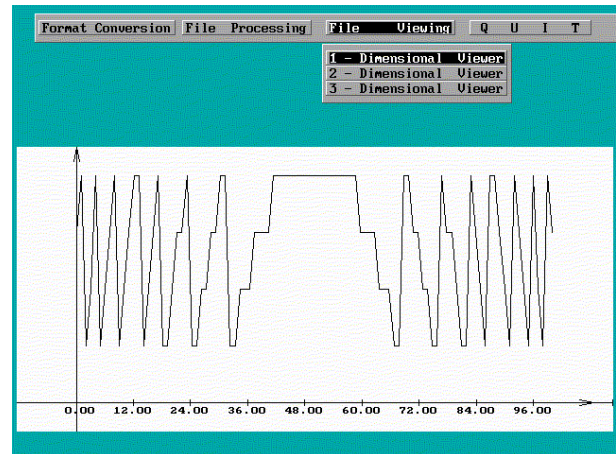


Рис. 3. Экран программного обеспечения в момент визуализации рассчитанного четырехуровневого микрорельефа цилиндрической линзы (один отсчет по оси абсцисс соответствует 40 мкм)

Сформированный на одной из поверхностей пластины рельеф ДОО представлял собой набор параллельных каналов шириной 40 мкм и с различными глубинами. Отметим, что ширина канала выбиралась как из значения минимальной зоны линзы, так и из технологических соображений.

Глубина травления контролировалась энергией и количеством импульсов облучения на точку поверхности. Выбор параметров лазерного микроструктурирования поверхности алмазной пленки осуществлялся путем постановки тестовых экспериментов по реализации заданных глубин травления при максимально возможной крутизне края зоны ДОО.

Некоторые результаты таких экспериментов приведены на рис. 4.

На рис. 5 представлен участок профиля изготовленной алмазной цилиндрической линзы. Величина среднеквадратичного отклонения глубины сформированного рельефа от требуемого составила порядка $\delta \cong 10\%$. Поглощающий слой графита на поверхности алмаза, который образуется в процессе лазерной абляции [12], удалялся путем отжига в плазме дугового разряда в атмосфере водорода.

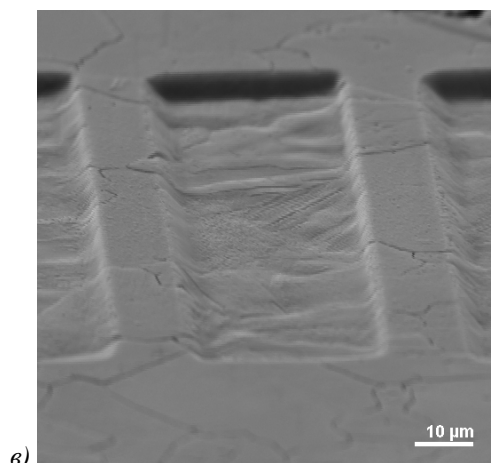
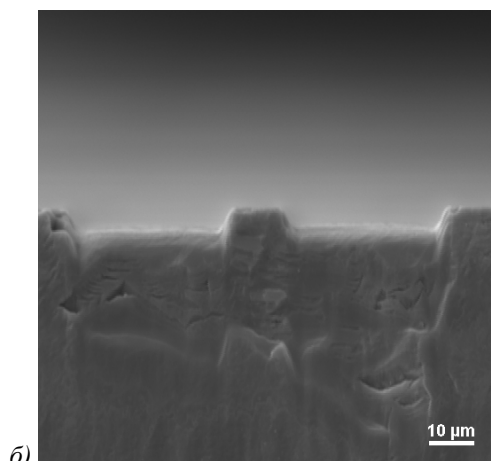
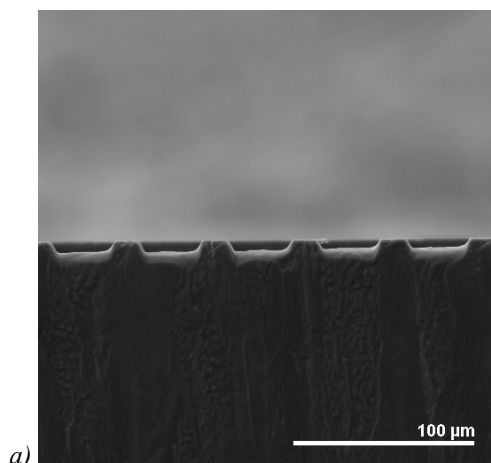


Рис. 4. Некоторые результаты экспериментов по выбору параметров микроструктурирования поверхности алмазной пленки

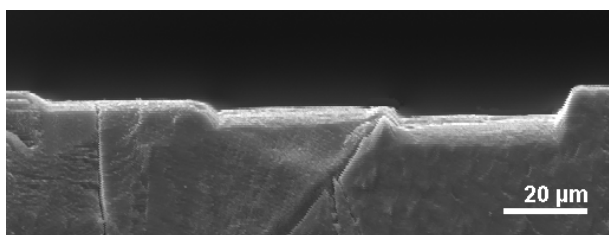


Рис. 5. Участок профиля изготовленной алмазной цилиндрической линзы

3. Исследование линзы методом натурального и вычислительного экспериментов

Подробный численный анализ дифракционной цилиндрической линзы приведен в работах [13, 14]. На рис. 6 представлены распределения нормированной интенсивности в фокальной плоскости дифракционной цилиндрической линзы с полушириной апертуры $\alpha=D/2$ и различными значениями числа уровней квантования M ($M=2,4,16$) для плоского равномерного освещающего пучка [14]. Оценка дифракционной эффективности четырехуровневой цилиндрической линзы, определенной в [14], как отношение $I_4(0,0)/I_R(0,0)$, где $I_4(0,0)$ - значение интенсивности в фокусе четырехуровневой дифракционной цилиндрической линзы, а $I_R(0,0)$ - в фокусе рефракционной цилиндрической линзы, составляет 81%.

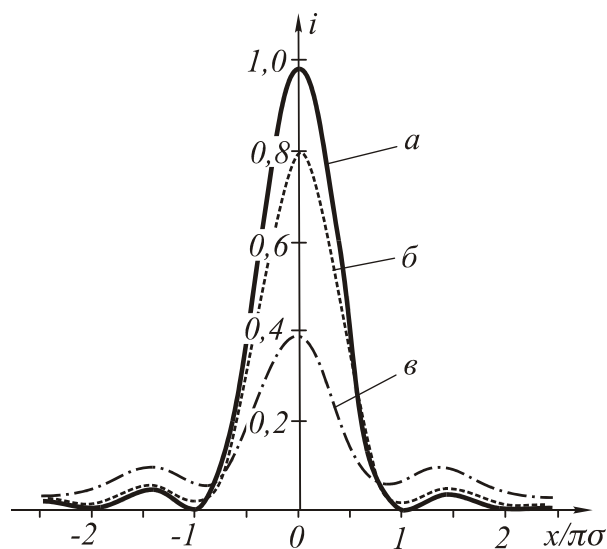


Рис. 6. Распределение нормированной интенсивности в фокальной плоскости дифракционной цилиндрической линзы для различного числа уровней квантования M : а - $M=16$, б - $M=4$, в - $M=2$

В данной работе в качестве значения дифракционной эффективности ДОО понималась доля прошедшей энергии, сосредоточенной в основном максимуме [14].

Компьютерный расчет интенсивности в разных плоскостях фокальной области линзы был выполнен с помощью численных методов, описанных в [14], для основной моды ТЕМ₀₀ пучка, освещающего оптический элемент. Реализация численного моделирования выполнялась с помощью программного обеспечения по расчету и моделированию дифракционных оптических элементов, разработанного в ИСОИ РАН [10].

Результаты вычислительного эксперимента по оценке дифракционной эффективности элемента согласуются с данными, приведенными в [13, 14]. При тестировании изготовленного ДОО использовался непрерывный СО₂ лазер мощностью 20 Вт. Модулированное обтюратором излучение фиксировалось пироприемником. Распределение плотности энергии

в поперечном сечении лазерного пучка было гауссовым с радиусом $w_0=1,55$ мм. На рис. 7 (справа) представлен результат взаимодействия пучка CO_2 -лазера с бумагой в фокусе изготовленной линзы.

В фокальной области ДОЭ распределение интенсивности $I(x)$ сохраняет квазигауссов вид (рис. 8а).

Ширина преобразованного пучка w_x определялась, как половина расстояния по оси X между двумя точками, в которых интенсивность излучения уменьшается в e^2 раз по сравнению с максимальным значением.

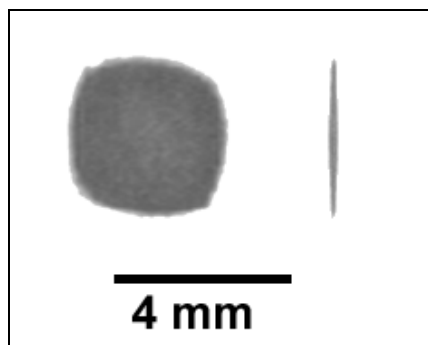


Рис. 7. Результат взаимодействия пучка CO_2 -лазера, сфокусированного цилиндрической линзой, с бумагой. Слева - результат взаимодействия несфокусированного исходного гауссова пучка, ограниченного квадратной апертурой, справа - в фокусе созданной линзы

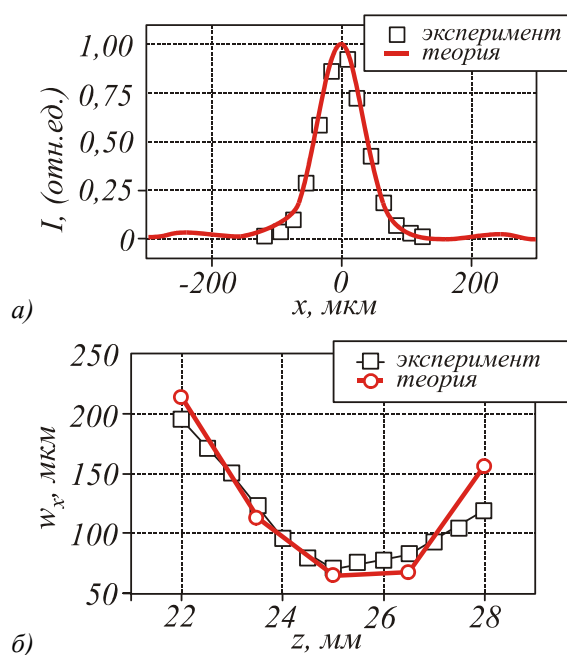


Рис. 8. Экспериментальные характеристики изготовленного ДОЭ и соответствующие результаты компьютерного моделирования: а) распределение интенсивности $I(x)$ излучения CO_2 лазера в фокальной плоскости линзы (ось X - перпендикулярна оси симметрии цилиндрической линзы), б) зависимость ширины пучка w_x от расстояния z до плоскости элемента. Фокусное расстояние $f=25$ мм

Увеличение размера пучка $w_x^{\text{эксп}}=70,8$ мкм по сравнению с результатом расчета $w_x^{\text{теор}}=65,8$ мкм обусловлено несколькими причинами. Во-первых, отклонениями профиля линзы от расчетного и рассеянием излучения на поликристаллической структуре пленки. Во-вторых, наличием в лазерном пучке мод высших порядков с более высокой угловой расходимостью, чем у основной моды. Дифракционная эффективность ДОЭ, замеренная в ходе натурального эксперимента составила 78%, и близка к оценке 79-80%, полученной в ходе вычислительного эксперимента. На рис. 8б представлены зависимости $w_x^{\text{эксп}}$ и $w_x^{\text{теор}}$ от расстояния до плоскости элемента. Глубина фокуса определялась как расстояние между точками на оптической оси, в которых интенсивность излучения падает в 2 раза по сравнению с максимальной величиной, и составляла $\Delta f=5$ мм.

Заключение

Таким образом, впервые созданный в [1] на базе синтетической алмазной пластины дифракционный оптический элемент (линза) исследован в данной работе методами натурального и численного эксперимента, продемонстрирована его высокая эффективность. Корреляция полученных характеристик с результатами компьютерного моделирования дает основания утверждать, что лазерная обработка обеспечивает необходимую точность формирования фазового микрорельефа для создания многоуровневых ($M \geq 4$) алмазных дифракционных элементов.

В следующих работах авторы планируют опубликовать результаты исследований ДОЭ с более сложным микрорельефом, выполненных на алмазных пластинах, а также результаты исследований взаимодействия алмазных ДОЭ с излучением мощных CO_2 -лазеров.

Благодарность

Авторы благодарны С.В. Лаврищеву за электрон-носкопические исследования структурированной поверхности образцов.

Литература

1. В.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, А.М. Прохоров, В.С. Павельев, В.А. Сойфер, *Квантовая электроника*, **26**(1), 9-10, (1999)
2. V. Ralchenko, A. Vlasov, I. Vlasov, B. Zubov, A. Nikitin, A. Khomich, *SPIE Proc.* **3484**, Int. Conf., Tashkent, Uzbekistan, 1998
3. Sussmann R.S., Brandon J.R., Coe S.E., Pickles C.S.J., Sweeney C.G., Wasenczuk A., Wort C.J.H., Dodge C.N., *Finer Points*, **10**(2), 6, (1998).
4. Сойфер В.А., *Введение в дифракционную микрооптику*, (Самара, 1996).
5. Kononenko T.V., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Garnov S.V., Tischenko A.V., Prokhorov A.M., Khomich A.V., *Applied Physics A*, **68**(1), 99-102, (1999).
6. В.В. Кононенко, Т.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, С.В. Гарнов, А.В. Тищенко,

- А.М. Прохоров, А.В. Хомич, *Квантовая электроника*, **26**(2), 158-162, (1999)
7. Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.Н., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., *Письма в ЖТФ*, **8**(13), 449-451, (1982)
 8. Golub M.A., Rybakov O.E., Usplenjev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G., *Optics and Laser Technology*, **27**(4), 215-218, (1995).
 9. Duparre M., Golub M.A., Ludge B., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Uspleniev G.V., Volotovskii S.G., *Applied Optics*, **34**(14), 2489 (1995)
 10. Doskolovich L. L., Golub M. A., Kazanskiy N. L., Khramov A. G., Pavelyev V. S., Seraphimovich P. G., Soifer V. A., Volotovskiy S. G., *Proceedings SPIE* **2363** (1995), 278-284.
 11. Ralchenko V.G., Smolin A.A., Konov V.I., Sergeichev K.F., Sychov I.A., Vlasov I.I., Migulin V.V., Voronina S.V., Khomich A.V., *Diamond and Related Materials*, **6**, 417 (1997).
 12. M. Rothschild, C. Arnone, D.J. Ehrlich, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B4**, 310-314, (1986).
 13. Мещеряков Н.А., Томилина Е.А., *Рук. деп. В ВИНТИ*, 4784-87, Томск, 8с, (1987)
 14. Казанский Н.Л., "Анализ характеристик дифракционных оптических элементов, фокусирующих лазерное излучение", дисс. На соиск. д.ф.м.н., Самара, (1996).