

# ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

## СИНТЕЗ ДОЭ, ФОРМИРУЮЩЕГО КОЛЬЦЕВУЮ LP-МОДУ, С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОЙ АБЛЯЦИИ КВАРЦЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗЛУЧЕНИЕМ УФ-ЛАЗЕРА

В.С. Павельев, В.А. Сойфер, Б.Н. Чичков<sup>1</sup>, Т. Темме<sup>1</sup>, Л. Бюттнер<sup>1</sup>, М. Дюпарре<sup>2</sup>, Б. Людге<sup>2</sup>

Самарский государственный аэрокосмический университет

Институт систем обработки изображений РАН

<sup>1</sup> Ганноверский лазерный центр LZH (г. Ганновер, Германия)

<sup>2</sup> Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университет (г. Йена, Германия)

### Аннотация

Рассмотрены результаты исследования ДОЭ видимого диапазона (длина волны 632,8 нм), изготовленного прямой абляцией кварцевой пластины излучением УФ лазера (длина волны 157 нм) в атмосфере азота. Проведен сравнительный анализ результатов натурных экспериментов с результатами численного моделирования ДОЭ.

### Введение

К настоящему времени подробно исследовано создание дифракционных оптических элементов (ДОЭ) видимого и ближнего ИК-диапазонов с помощью технологий прямой электронной записи на резисте [1,2], степенного и пошагового литографического травления подложек [1] и рельефообразования на жидких фотополимеризующихся композициях [1]. Каждая из указанных технологий обладает собственными достоинствами и недостатками, в частности, при прямой электронной записи трехмерного рельефа возникает известный *proximity*-эффект, степенное и пошаговое травление связано с проблемой совмещения фотошаблонов, а рельефообразование представляет из себя сложный и трудноконтролируемый физико-химический процесс.

В работах [1, 3, 4] показана целесообразность формирования микрорельефа алмазных ДОЭ для дальнего ИК-диапазона с помощью прямой абляции алмазной поверхности излучением эксимерного УФ-лазера.

Технология прямой лазерной абляции подложки обладает неоспоримыми преимуществами:

- быстрота и относительная дешевизна изготовления элемента;
- возможность получения многоуровневого рельефа без применения фотошаблонов;
- отсутствие *proximity*-эффекта.

Вместе с тем, качество микрорельефа, получаемого с помощью технологии прямой абляции, в целом ниже, чем качество микрорельефа, которое может быть получено, например, с помощью технологии литографического травления. Значительная шероховатость получаемой поверхности, а также наличие “бортиков” между элементарными областями микроструктурирования приводят к существенным потерям энергии на рассеяние [1].

Алмазные ДОЭ, рассмотренные в [1, 3, 4], предназначались для фокусировки пучков CO<sub>2</sub> лазера (длина волны 10,6 мкм), что определяло меньшие требования к качеству микрорельефа, чем в случае изготовления ДОЭ видимого и ближнего ИК-диапазонов.

Авторы работы [5] считают принципиально нецелесообразным применение прямой абляции для изготовления ДОЭ видимого и ближнего ИК-диапазонов из-за указанных выше проблем.

Отметим, однако, что рассеяние на погрешностях изготовления микрорельефа приводит в основном к снижению энергетической эффективности, а далеко не каждое применение фазовых ДОЭ требует непременно высокой эффективности. В качестве примера можно привести задачу формирования мод оптических волноводов для экспериментов по селективному возбуждению мод в волноводе [6]. В данной задаче важно, чтобы заданная мода формировалась в осевом порядке дифракции (что принципиально невозможно в случае амплитудного ДОЭ) и в то же время вполне допустима энергетическая эффективность в 10-20%.

В данной работе технология прямой лазерной абляции использовалась для изготовления ДОЭ, формирующего из гауссова освещающего пучка кольцевую LP<sub>11</sub>-моду ступенчатого радиально-симметричного волокна [7], имеющую в сердечнике волокна распределение комплексной амплитуды вида

$$LP_{11}(r, \alpha) = AJ_1(ur/a) \exp(i\alpha), \quad (1)$$

где  $a$  – радиус сердцевинки ступенчатого волокна,  $(r, \alpha)$  – цилиндрические координаты, функция  $J_1(x)$  – функция Бесселя первого порядка первого рода,  $u$  – параметр, выбираемый из граничных условий таким образом, чтобы в радиальном сечении мода имела единственную пучность [7].

### 1. Описание технологии формирования микрорельефа ДОЭ

Микрорельеф ДОЭ формировался на подложке из плавного кварца (Heraeus, Suprasil 1, Fused silica), показатель преломления:  $n=1,45637$ , путем прямой абляции поверхности импульсным излучением эксимерного УФ-лазера Laser Lambda Physik LPF 220 в азотовой атмосфере. Длина волны лазера 157 нм, длительность импульса - 25 нс, заданная энергия импульса - 25 мДж/имп, что при использовании аттенюатора с пропусканием 50% позволяло получить плотность энергии 3 Дж/см<sup>2</sup>. Размер элементарной области микроструктурирования, соот-

ветствующей одному отсчету фазовой функции элемента, составлял 20 мкм x 20 мкм. На рис. 1 приведена оптическая схема абляционного процесса, а на рис. 2 - внешний вид технологической установки, использовавшейся для формирования микрорельефа на кварцевой пластине.

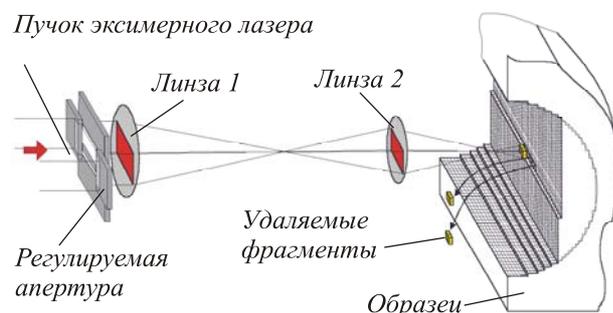


Рис. 1. Оптическая схема абляционного процесса

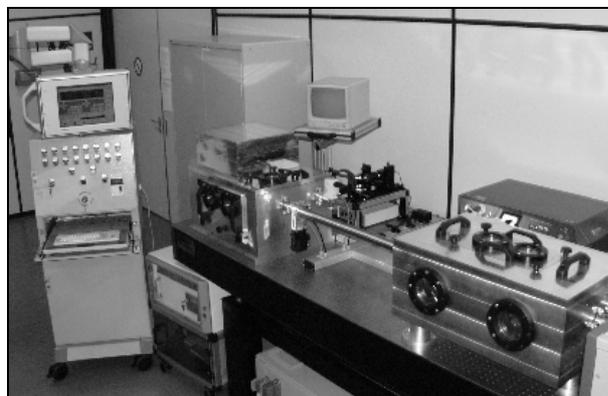


Рис. 2 Внешний вид технологической установки, использовавшейся для формирования микрорельефа на кварцевой пластине

## 2. Изготовление и исследование ДОЭ

ДОЭ, предназначенный для формирования кольцевой  $LP_{11}$ - моды из гауссова освещающего пучка, рассчитывался для следующих параметров: длина волны освещающего пучка  $\lambda=0,6328$  мкм, шаг дискретизации по апертуре (т.е. размер элементарной области микроструктурирования)  $s=20$  мкм, радиус апертуры  $R=1,28$  мм, радиус освещающего гауссова пучка  $\sigma=0,525$  мм. Комплекснозначная функция пропускания кодировалась в фазовую с помощью обобщенного метода Кирка-Джонса [8] с периодом прямоугольно-импульсной несущей 80 мкм. Элемент рассчитывался как добавка к линзе. Рассчитанная фазовая маска элемента приведена на рис. 3.

Результаты численного моделирования работы элемента представлены на рис. 4 и рис. 5.

На рис.6 приведен результат электронного микрофотографирования центральной части изготовленного ДОЭ.

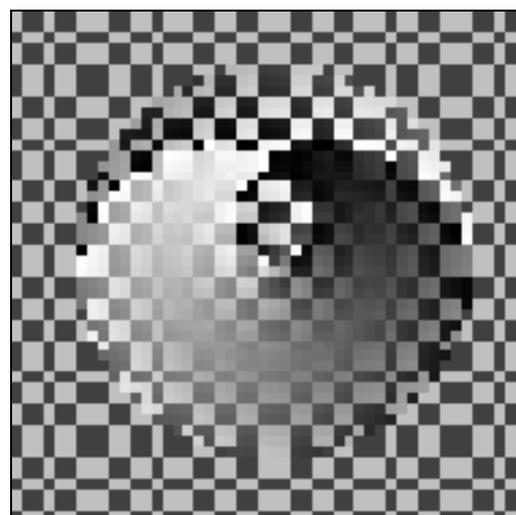


Рис. 3. Центральный фрагмент фазовой маски дифракционного элемента

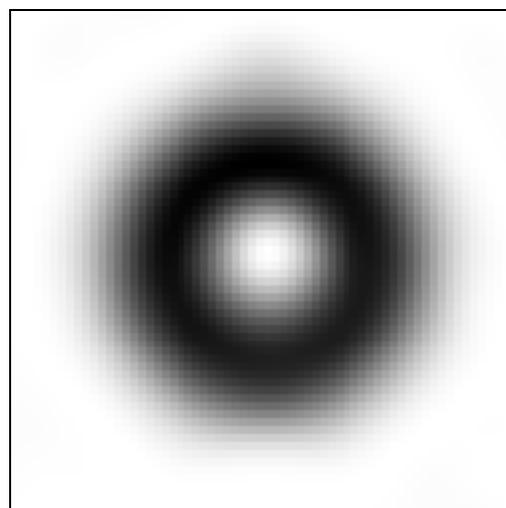


Рис. 4. Распределение интенсивности в выходной плоскости элемента (результат численного моделирования)

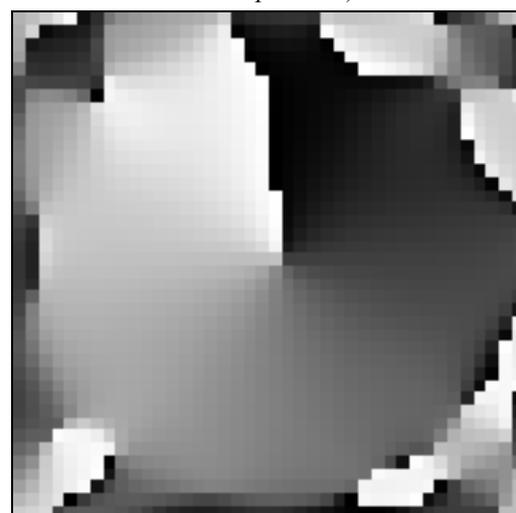


Рис. 5. Распределение фазы в фокальной плоскости элемента (результат численного моделирования)

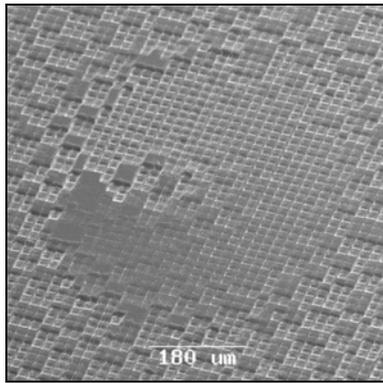


Рис. 6. Результат SEM-микроскопирования центральной части изготовленного элемента

Способность изготовленного элемента формировать модовое распределение интенсивности исследовалась в ходе натурного эксперимента, оптическая схема которого представлена на рис. 7.

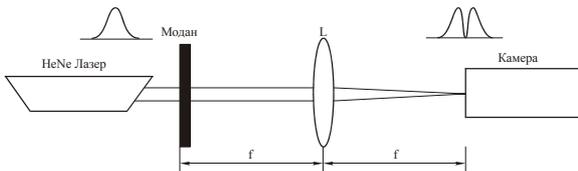


Рис. 7. Схема оптического эксперимента по измерению распределения интенсивности в фокальной плоскости элемента ( $f=450$  мм)

Расчетное распределение интенсивности освещающего пучка приведено на рис. 8.

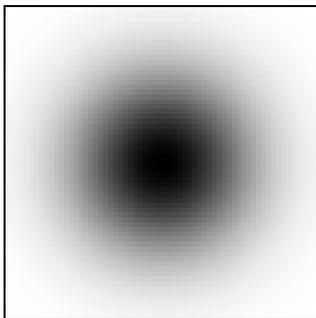


Рис.8. Распределение интенсивности освещающего пучка в плоскости установки ДОЭ

Результат измерений в фокальной плоскости приведен на рис. 9.

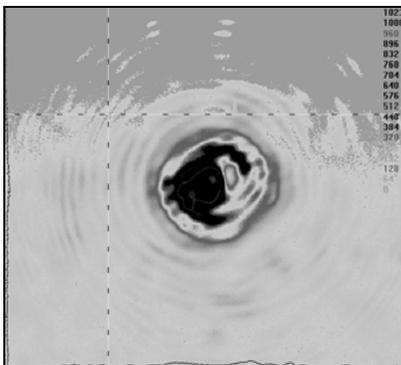


Рис. 9. Распределение интенсивности в фокальной плоскости ДОЭ (выходная плоскость линзы L на рис. 7)

Для измерения энергетической эффективности (доли энергии освещающего пучка, идущей на формирование полезного изображения) изготовленного элемента использовалась установка, подобная приведенной на рис. 7, где CCD-камера заменялась на измеритель мощности. Измеренное значение энергетической эффективности составило 13,9%.

Напомним, что в рамках скалярного приближения мода лазерного излучения – пучок, в сечении которого амплитудно-фазовое распределение описывается собственной функцией оператора распространения света [9]. Другими словами, сформировать модовый пучок – значит, сформировать в некоторой плоскости заданное (модовое) распределение не только интенсивности, но и фазы.

Отметим, что экспериментальное измерение фазы сформированного пучка – довольно сложная задача, особенно, учитывая сложный характер распределения, представленного на рис. 5. Поэтому в нашем случае в качестве критерия качества формирования заданного амплитудно-фазового распределения можно выбрать способность сформированного модового пучка к самовоспроизведению в соответствующей среде.

В работах [2, 9] для исследования модовых свойств сформированных ДОЭ гауссовых мод, являющихся собственными функциями оператора распространения света в линзоподобных средах, используется анализ распределений интенсивности на входе и выходе линзового каскада. Разлагая выражение для кольцевой моды Гаусса-Лагерра  $\psi_{0m}(r)$  по функциям Бесселя [10]:

$$\begin{aligned} & \Gamma(m+1)(0.5(m+1)r^2)^{\frac{m}{2}} L_0^m(r^2) e^{-r^2/2} e^{im\alpha} = \\ & = e^{im\alpha} \sum_{j=0}^{\infty} \left( A_j (0.5r^2)^{j/2} (m+1)^{-j/2} \times \right. \\ & \left. \times J_{m+j}(r\sqrt{2(m+1)}) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_0 = 1, A_1 = 0, A_2 = 0.5(m+1),$

$$(j+1)A_{j+1} = (j+m)A_{j-1} - (m+1)A_{j-2},$$

$(r, \alpha)$ - цилиндрические координаты точки в сечении волновода,  $L_m^n(x)$  - обобщенный полином Лагерра,  $J_m(x)$  - Бессель-мода первого рода порядка  $m$ , легко видеть, что нулевой член сходящегося ряда (2) совпадает с выражением для LP<sub>mm</sub>-моды в сердечнике ступенчатого радиально-симметричного волокна (1), где сосредоточена большая часть энергии каналируемых LP-мод [7]. Таким образом, LP-моды (как минимум низких порядков) хорошо аппроксимируются соответствующими гауссовыми модами, что экспериментально было исследовано, например, в [6], а, следовательно, их поперечная структура не претерпевает сильных изменений в ходе распространения в свободном пространстве.

Поскольку радиальные LP-моды низких порядков хорошо аппроксимируются соответствующими модами Гаусса-Лагерра, можно также исполь-

зывать анализ распределений интенсивности на входе и выходе линзового каскада (Рис.10,11.) для анализа модовых свойств сформированного пучка, как это было проделано в [2, 9]. Сравнение Рис. 9 и Рис. 12 демонстрирует хорошую способность к самовоспроизведению сформированного пучка.

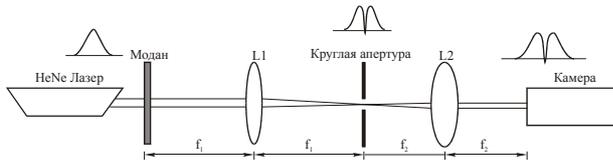


Рис. 10. Схема оптического эксперимента по измерению распределения интенсивности в сечении пучка, сформированного ДОО, после прохождения Фурье-каскада ( $f_1=450$  мм,  $f_2=450$  мм)

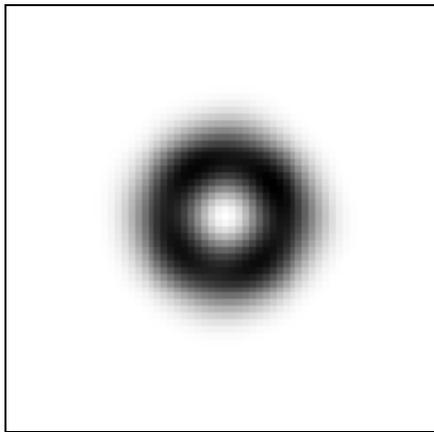


Рис. 11. Распределение интенсивности в сечении сформированного ДОО пучка после прохождения Фурье-каскада (результат численного моделирования)

Сравнение результатов численного моделирования и натуральных экспериментов (рис. 4 и 9 и рис. 11, 12) позволяет сделать вывод о возможности применения рассматриваемой технологии для изготовления ДОО, предназначенных для формирования заданного одно-модового амплитудно-фазового распределения.

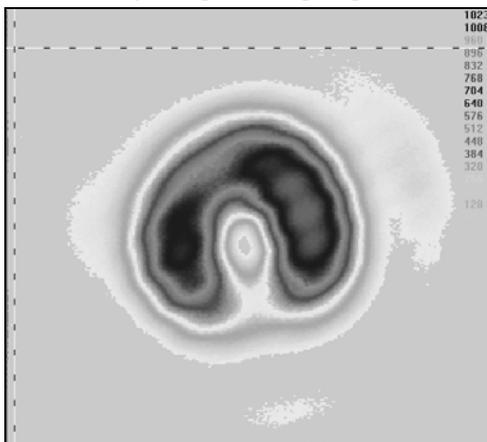


Рис. 12. Распределение интенсивности сформированного пучка после прохождения Фурье-каскада (выходная плоскость линзы  $L_2$  на рис. 10)

## Заключение

ДОО, формирующий из гауссова освещающего пучка кольцевую моду ступенчатого радиально-симметричного волновода, впервые изготовлен технологией прямой лазерной абляции кварцевой подложки и исследован методами численного и натурального экспериментов. Сравнительный анализ результатов численного и натурального экспериментов позволяет сделать принципиальный вывод о перспективности применения указанной технологии для изготовления ДОО видимого диапазона, предназначенных для формирования заданных одномодовых распределений.

## Литература

1. Golovashkin G.L., Kazanskiy N.L., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Solovyev V.S., Usplenyev G.V., Volkov A.V. Technology of DOE fabrication / Chapter 4. // "Method For Computer Design Of Diffractive Optical Elements" edited by Victor A. Soifer. A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
2. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Duparre' M., Kowarschik R., Luedge B., Kley B. Iterative calculation, manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distribution // *Optics and Lasers in Engineering*, **29** 269-279 (1998).
3. 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.
4. 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. P. 97-107, (2000) (Japan).
5. Flury M., Benatmane A., Gerard P., Montgomery P.C., Fontaine J., Engel T., Schunck J.P. Rapid prototyping of diffractive optical elements for high-power lasers using laser ablation lithography fabrication and coherence probe microscopy analysis // *Optical Engineering*, 41 (10). P. 2407-2418.
6. Карпеев С.В., Павельев В.С., Дюпарре' М., Людге Б., Рокштул К., Шротер З. Анализ и формирование поперечно-модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОО // *Компьютерная оптика*, 2002. № 23. С. 4-9.
7. Ярив А. *Квантовая электроника* // М.: Сов. Радио, 1980.
8. Kirk J.P., Jones A.L. Phase-only complex-valued spatial filter // *Journ. Opt. Soc. Amer.*, 1971. V. 61. N. 8. P. 1023-1028.
9. Павельев В.С., Соифер В.А. Селекция мод лазерного излучения // Глава 6 в книге "Методы компьютерной оптики" под ред. В.А. Соифера. М. "Физматлит", 2000.
10. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям // М.: Наука, 1979.

# Generation of DOE forming an annular LP mode using the technology of direct ablation of a quartz plate by an UV laser

V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, V.A. Soifer<sup>1,2</sup>, B.N. Chichkov<sup>3</sup>, T. Temme<sup>3</sup>, L. Buettner<sup>3</sup>, M. Duparré<sup>4</sup>, B. Luedge<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS

<sup>3</sup>Hanover Laser Center LZH (Hanover, Germany)

<sup>4</sup>Institute of Applied Optics, Friedrich Schiller University (Jena, Germany)

## Abstract

The article considers the results of a study of a visible-range DOE (wavelength - 632.8 nm) produced by direct ablation of a quartz plate by UV laser radiation (wavelength – 157 nm) in a nitrogen atmosphere. A comparative analysis of the results of natural experiments with the results of numerical simulation of DOE is performed.

**Keywords:** DOE, LP mode, UV laser, quartz plate, visible-range, wavelength, nitrogen atmosphere.

**Citation:** Pavelyev VS, Soifer VA, Chichkov BN, Temme T, Buettner L, Duparré M, Luedge B. Generation of DOE forming an annular LP mode using the technology of direct ablation of a quartz plate by an UV laser. *Computer Optics* 2002; 24: 66-69.

## References

- [1] Golovashkin GL, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Soifer VA, Solovyev VS, Usplenyev GV, Volkov AV. Technology of DOE fabrication. Chap 4. In Book: Soifer VA, ed. Method for computer design of diffractive optical elements. New York: John Wiley & Sons Inc; 2002.
- [2] Pavelyev VS, Soifer VA, Duparré M, Kowarschik R, Luedge B, Kley B. Iterative calculation, manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distribution. *Opt Lasers Eng* 1998; 29: 269-279.
- [3] Kononenko VV, Konov VI, Pavelyev VS, Pimenov SM, Prokhorov AM, Soifer VA. Diamond diffractive optics for high-power CO2 lasers [In Russian]. *Kvantovaya Elektronika* 1999; 26(1): 9-10.
- [4] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. CVD diamond transmissive diffractive optics for CO2 lasers. *New Diam Front C Tec* 2000; 10: 97-107.
- [5] Flury M, Benatmane A, Gerard P, Montgomery PC, Fontaine J, Engel T, Schunck JP. Rapid prototyping of diffractive optical elements for highpower lasers using laser ablation lithography fabrication and coherence probe microscopy analysis // *Opt Eng* 2002; 41(10): 2407-2418.
- [6] Karpeev SV, Pavelyev VS, Duparré M, Lüdge B, Rokstul K, Schröter Z. Analysis and formation of the transverse-mode composition of coherent radiation in a fiber optic waveguide with a stepped refractive index profile using DOE. *Computer Optics* 2002; 23: 4-9.
- [7] Yariv A. Quantum electronics. New York: John Wiley & Sons Inc; 1989.
- [8] Kirk JP, Jones AL. Phase-only complex-valued spatial filter. *J Opt Soc Am* 1971; 61(8): 1023-1028.
- [9] Pavelyev VS, Soifer VA. Selection of laser radiation modes [In Russian]. Chap 6. In Book: Soifer VA, ed. Methods of computer optics [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000: 395-469.
- [10] Abramowitz MA, Stegun IA. Handbook of special functions: With formulas, graphs, and mathematical tables. Dover Publications; 1965.