

05

## Формирование оптических вихрей с помощью голограмм с асимметричным профилем штриха

© В.П. Аксенов<sup>1</sup>, В.Ю. Венедиктов<sup>2,3,¶</sup>, А.А. Севрюгин<sup>2</sup>, И.М. Турсунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, 198504 Петергоф, Санкт-Петербург, Россия

¶ e-mail: vlad.venediktov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.2017 г.

Представлены результаты экспериментального исследования возможности применения тонких голограмм с увеличенной за счет применения треугольного профиля штриха дифракционной эффективностью для формирования световых пучков с ненулевым орбитальным моментом (оптических вихрей). Показано, что в этом случае можно существенно (в теории — до 100%) повысить эффективность преобразования без какого-либо искажения структуры формируемого пучка.

DOI: 10.21883/OS.2018.02.45535.185-17

### Введение

Световые пучки с оптическими вихрями (ОВ) [1–3] привлекают пристальное внимание исследователей и инженеров из-за их уникальных физических особенностей и многочисленных научно-технологических применений в таких, например, разных областях, как манипуляция микрообъектами, астрономия, оптическая связь. Оптический вихрь представляет собой волновую структуру с сингулярностью в поперечном распределении фазы (так называемой винтовой дислокацией волнового фронта) и нулевой амплитудой в центре ОВ. Он проявляет себя как изолированный минимум в поперечном распределении интенсивности светового пучка. Каждому такому минимуму может быть сопоставлен топологический заряд, равный  $2\pi t$  рад, где  $t$  — целое число (положительное или отрицательное). Эта величина возникает как результат суммирования градиента фазы вдоль замкнутого контура, окружающего область с минимальной интенсивностью. Вектор Умова–Пойнтинга имеет в области оптического вихря циркулярную составляющую, приводящую к вихреподобному движению световой энергии. Следствием существования такой вихревой составляющей является наличие у лазерного пучка орбитального углового момента. Иногда сам волновой пучок, в структуру которого включен оптический вихрь, называют оптическим вихрем или вихревым пучком.

Оптические вихри возникают спонтанно: они сопровождают формирование спеклов при рассеянии лазерных пучков на шероховатой поверхности при распространении когерентного света в турбулентной атмосфере [4] или возникают во время лазерной генерации [5,6]. Их генерируют преднамеренно [7], получая вихревые пучки на выходе из лазерного резонатора, конвертируя

фундаментальный гауссов пучок в вихревой пучок вне лазерного резонатора или применяя когерентную комбинацию пучков [8,9]. Во многих случаях конвертором служит фазовая голограмма [10–13].

В настоящей работе для генерации оптических вихрей также применяется голографический способ. Когерентный пучок линейно поляризованного монохроматического излучения He–Ne-лазера ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ) пропускается через маску-голограмму [12], которая синтезирована на компьютере. В соответствии с [12] в результате дифракции на ней в  $\pm 1, 2, 3, \dots$  порядках восстановятся оптические вихри с разным значением параметра  $m$ . Такие пучки по своей структуре близки к так называемым модам Лагерра–Гаусса с ненулевым орбитальным моментом [14], которые представляют немалый интерес для многих приложений. При этом сам профиль маски-голограммы, использованной авторами работы [12], является синусоидальным, и, как следствие, дифракционная эффективность такой голограммы невысока — не превосходит 30–40% в лучшем случае [15]. Чтобы повысить дифракционную эффективность голограммы, нами была синтезирована маска-голограмма с треугольным профилем, которая позволяет повысить энергетические значения  $\pm 1, 2, 3, \dots$  и т.д. порядков дифракции по сравнению с дифракцией на голограмме с синусоидальным профилем. Удобный алгоритм синтеза голограммы с треугольным профилем представлен в работах [15,16], где предложен способ асимметризации профиля голографической решетки на основе сугубо локальной информации. Результаты исследования оптических вихрей, полученных голографическими методами на маске-голограмме с синусоидальным и треугольным профилями, представлены в настоящей работе.

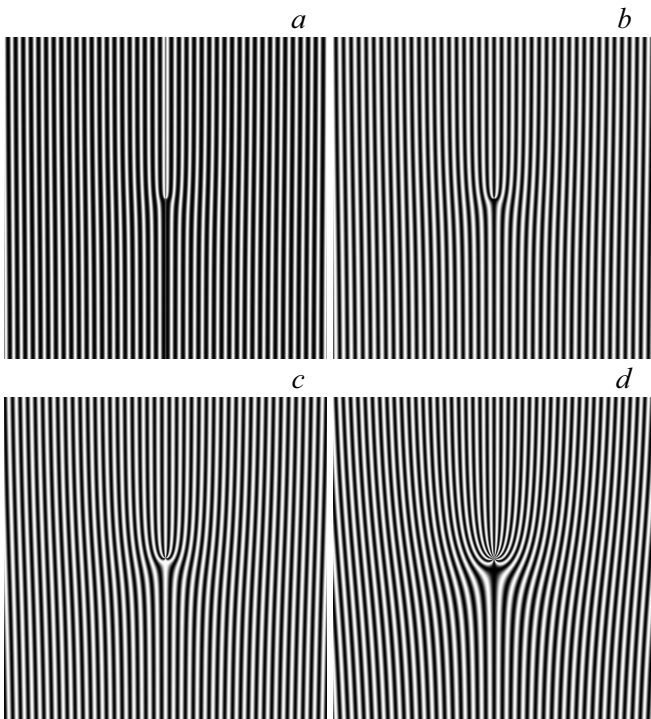


Рис. 1. Примеры масок-голограмм с различными значениями параметра  $m$ : 1 (a), 2 (b), 4 (c), 10 (d).

### Синтез маски-голограммы

Один из способов синтеза маски-голограммы цифровым методом состоит в построении интерференционной картины, интенсивность света в которой пропорциональна функции:

$$H = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |e^{ikx} + e^{im\theta}|^2 = 2(1 + \cos(kx - m\theta)), \quad (1)$$

где  $\psi_1 = e^{ikx}$ ,  $\psi_2 = e^{im\theta}$  — соответственно наклонная плоская волна и объектная волна;  $(x, y)$  — декартовы координаты на плоскости;  $\theta = \arctg(\frac{y}{x})$  — полярная координата. Примеры синтезированных по соотношению (1) голограмм представлены на рис. 1.

Детально алгоритм синтеза маски выглядит следующим образом.

- Задать размеры исходного изображения по горизонтали  $x_0$  и вертикали  $y_0$  для каждого значения  $i$  в пределах от 1 до  $x_0$  включительно.

- Для каждого значения  $j$  в пределах от 1 до  $y_0$  включительно вычислить значение матрицы  $H(x, y) = 2(1 + \cos(kx - m \cdot \arctg(\frac{y}{x})))$ .

- Найти максимальный элемент  $\max H = \max(H(x, y))$ .

- Нормировать матрицу  $H_1 = H / \max H$ .

- Получить матрицу по глубине цвета  $H_2 = 255H_1$ .

- Привести матрицу к целым числам  $H_3 = \text{int}(H_2)$ .

- Построить изображение по матрице  $H_3$ .

Авторами были синтезированы маски-голограммы на языке программирования Python 3 в среде IDLE, которая предоставляется бесплатно и доступна для загрузки из сети Интернет.

### Асимметризация профиля маски-голограммы

В работах [15,16] предложен следующий цифровой способ асимметризации профиля голограммы, т. е. представление итоговой интерференционной картины с треугольным профилем.

Алгоритм построен в предположении, что интерферируют две когерентные волны равной интенсивности  $I_1 = I_2 = I_0$ . Результат интерференции этих волн описывается, как известно, функцией:

$$I(x, y) = I_0 (1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]), \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi(x, y)$  — разность фаз двух волн в данной точке плоскости с декартовыми координатами  $x, y$ .

Сама функция треугольного профиля может быть получена как

$$F(x, y) = \frac{\text{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right)}{1 + \left|\text{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right)\right|}. \quad (3)$$

Функцию тангенса можно представить как

$$\text{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right) = \frac{\sin[\Delta\varphi(x, y)]}{1 - \cos[\Delta\varphi(x, y)]}. \quad (4)$$

График функции  $F(x) = \frac{\text{tg}(x)}{1 + |\text{tg}(x)|}$  представлен ниже на рис. 2.

Как видно из графика, эта функция отлично моделирует треугольный профиль, при этом дифракционная эффективность такого профиля при глубине фазовой модуляции  $2\pi$  будет близка к 100%. Чтобы построить эту функцию, нужно обладать информацией о  $\cos[\Delta\varphi(x, y)]$  и  $\sin[\Delta\varphi(x, y)]$  в данной точке  $(x, y)$ . Картина с  $\sin[\Delta\varphi(x, y)]$  может быть получена из  $\cos[\Delta\varphi(x, y)]$  путем сдвига фазы на  $\pi/2$ . Таким образом, достаточно обладать двумя голограммами, каждая из которых описывается функцией (2), фаза одной из которых смещена

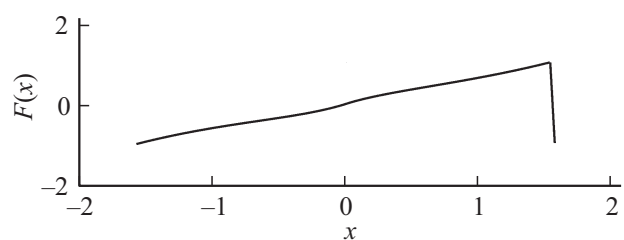
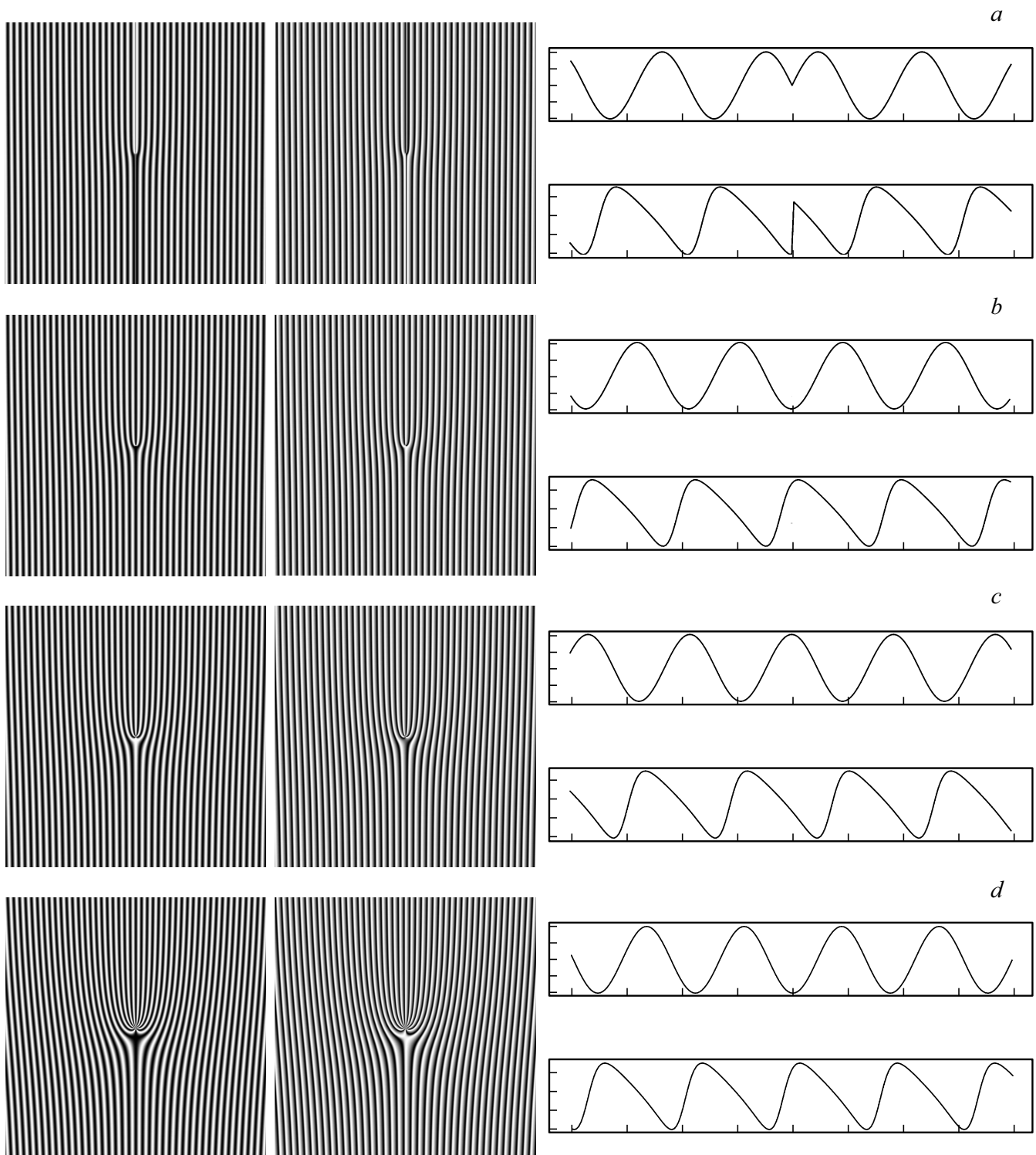


Рис. 2. График функции  $F(x) = \frac{\text{tg}(x)}{1 + |\text{tg}(x)|}$ .



**Рис. 3.** Слева направо: маски-голограммы с синусоидальным и треугольным профилями и соответствующие им сечения плотности почернения (т.е. фазовой модуляции) вдоль оси  $x$  при  $y = 0$  (для центральной области голограммы — 400 пикселей вдоль  $x$ ). На рисунке представлены соответственно случаи  $m = 1$  (a), 2 (b), 4 (c), 10 (d).

относительно другой на  $\pi/2$ , чтобы построить голограмму с треугольным профилем. Достоинством метода является то, что для синтеза нужна лишь информация о текущей точке.

Итоговая интерференционная картина голограммы будет пропорциональна функции  $F(x, y)$ , а алгоритм построения маски-голограммы будет полностью аналогичен предыдущему алгоритму для случая синусоидаль-

ного профиля, нужно лишь заменить в нем функцию  $H(x, y)$  (1) на  $F(x, y)$  (3) после подстановки в нее (4).

Примеры синтезированных голограмм с треугольным профилем и их сравнение с синусоидальным профилем вместе с графиками изменения интенсивности вдоль оси  $x$  представлены на рис. 3.

## Эксперименты с оптическими вихрями

Для проверки изложенных соображений оптимальным вариантом было использование матричного пространственного модулятора света. В нашем распоряжении был модулятор компании Holoeye, модель LC-2002, на основе которого была создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 4.

Экспериментальная установка состоит из источника плоской монохроматической волны, образованного лазером 1 и коллиматором 2. Свет от источника разделялся светоделительным кубом 3 на две волны — опорную, которая направлялась на зеркало 4, и объектную. Объектная волна падала на модулятор 5, на который с компьютера 6 подавалась маска-голограмма в виде видеосигнала, передаваемого по VGA-кабелю. Частота полос на маске-голограмме подбиралась исходя из достаточного расстояния между порядками дифракции при сохранении формы полос. Телескопическая система, образованная линзами 7 и 9 с фокусным расстоянием 1000 мм и диафрагмой в виде щели 8, выделяла один из первых порядков дифракции, который и содержал необходимый оптический вихрь. Для обнаружения этого вихря использовался опорный пучок, который направлялся плоскими зеркалами 4, 10 и кубом 11 под небольшим углом к объектному на матрицу цифровой камеры 12, где записывалась картина, образованная интерференцией между оптическим вихрем и опорным пучком с плоским фазовым фронтом. Для съемки дифракционных картин и оценки эффективности голографических масок камера 12 устанавливалась вместо диафрагмы 8 в фокальной плоскости линзы 7. Полученные результаты показаны на рис. 5.

Несмотря на сравнительно низкое разрешение модулятора, на полученных изображениях видно, что картина интерференции вихря и плоской волны не меняется в случае асимметризации маски-голограммы, в то время как дифракционная эффективность возрастает приблизительно на 20%. Полученное значение прироста является

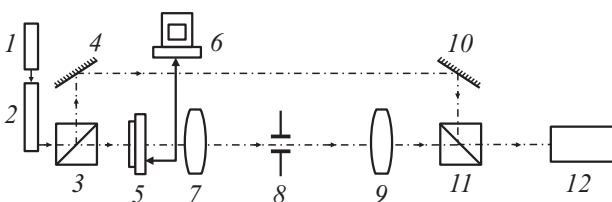


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

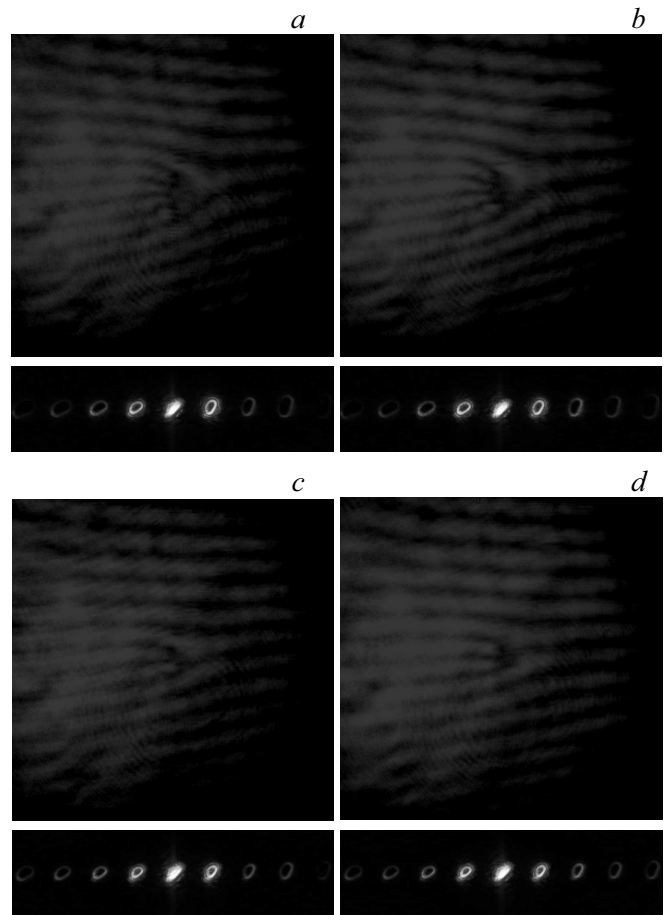


Рис. 5. Полученные результаты: верхняя часть — картина интерференции оптического вихря и плоского волнового фронта, нижняя часть — картина дифракции в фокальной плоскости линзы. (a)  $m = 4$ , пилообразная решетка, (b)  $m = 4$ , синусоидальная решетка, (c)  $m = 2$ , пилообразная решетка, (d)  $m = 2$ , синусоидальная решетка.

приблизительным, рассчитанным на основании данных, полученных с КМОП матрицы камеры. Стоит отметить, что полученная нами дифракционная эффективность далека от идеальной ввиду невысокого разрешения матричного пространственного модулятора света, в результате чего профиль полос сильно квантован и заметно отличается от идеального.

## Заключение

Нами успешно были синтезированы маски-голограммы с синусоидальным и треугольным профилями, благодаря которым возможно голографическим методом получать оптические вихри.

Полученные в результате эксперимента изображения показывают, что асимметризация профиля решетки не оказывает заметного влияния на получаемые картины интерференции оптического вихря и пучка с плоским волновым фронтом. Рост дифракционной эффективности

в свою очередь составил около 20%, несмотря на сильную ступенчатость профиля решетки из-за низкого разрешения пространственного модулятора света. При использовании более совершенных модуляторов света или масок высокого разрешения возможно еще большее увеличение дифракционной эффективности подобных масок.

В.Ю. Венедиктов и И.М. Турсунов признательны Минобрнауки РФ за финансирование в рамках Государственного задания № 8.1039.2017. В.Ю. Венедиктов также признателен СПбГУ за финансирование из средств Мероприятия № 6 поездки в Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск. А.А. Севрюгин благодарит СПбГЭТУ „ЛЭТИ“ за поддержку в рамках проекта „Организация и проведение конкурса научно-исследовательских проектов студентов, аспирантов и молодых научно-педагогических работников“.

## Список литературы

- [1] *Allen L., Padgett M.J., Babiker M.* // *Prog. Opt.* 1999. V. 39. P. 291–372.
- [2] *Bekshaev A.Ya., Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* *Paraxial Light Beams with Angular Momentum.* N.Y.: Nova Science Publishers, 2008.
- [3] *Dennis M.R., O'Holleran K., Padgett M.J.* // *Prog. Opt.* 2009. V. 53 P. 293–363.
- [4] *Aksenov V.P., Tikhomirova O.V.* // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2001. V. 19. N 2. P. 345–355.
- [5] *Arecchi F.T., Giacomelli G., Ramazza P.L., Residori S.* // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. P. 3749–3752.
- [6] *Harris M., Hill C.A., Tapster P.R., Vaughan J.M.* // *Phys. Rev. A.* 1994. V. 49. P. 3119–3122.
- [7] *Yao A.M., Padgett M.J.* *Adv. // Opt. Photon.* 2011. V. 3. P. 161–204.
- [8] *Розанов Н.Н.* // *Опт. и спектр.* 1993. Т. 75. Вып. 4. С. 861–867.
- [9] *Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В.* // *Квант. электрон.* 2016. Т. 46. № 8. P. 726–732.
- [10] *Bazhenov V., Vasnetsov M.V., Soskin M.S.* // *JETP Lett.* 1990. V. 52. P. 429–431.
- [11] *Heckenberg N.R., McDuff R., Smith C.P., White A.* // *Opt. Lett.* 1992. V. 17. P. 221–223.
- [12] *Carpentier A.V., Michinel H., Salgueiro J.R.* // *Am. J. Phys.* 2008. V. 76. N 10. P. 916–921.
- [13] *Mirhosseini M., Magaña-Loaiza O.S., Chen C., Rodenburg B., Malik M., Boyd R.W.* // *Opt. Express.* 2013. V. 21. P. 30196–30203.
- [14] *Allen L., Barnett S.M., Padgett M.J.* *Optical angular momentum.* Bristol: Institute of Physics Publ., 2003.
- [15] *Венедиктов В.Ю., Фрейганг Н.Н.* // *Опт. и спектр.* 2008. Т. 104. № 2. С. 338–343.
- [16] *Венедиктов В.Ю., Ласкин В.А., Савинов В.А.* // *Опт. и спектр.* 2010. Т. 109. № 4. С. 675–677.