

Сравнительное исследование распространения пучков Гаусса-Лагерра и круговых пучков Эйри в параболическом волокне

Е.О. Монин¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В данной работе выполнено сравнительное исследование свойств двух типов пучков - Гаусса-Лагерра и круговых пучков Эйри. Известно, что пучки Гаусса-Лагерра являются модами в оптического волокна с параболическим изменением показателя преломления, а в свободном пространстве они сохраняют свою структуру, меняя масштаб. С другой стороны, круговые пучки Эйри, напоминающие по структуре пучки Гаусса-Лагерра, облают свойствами автофокусировки. Рассмотрено распространение двух типов пучков в параболическом оптическом волокне с использованием дробного преобразования Фурье.

1. Введение

В настоящее время пучки гауссовского семейства продолжают привлекать внимание исследователей в связи с удобством экспериментальной реализации таких пучков [1-5]. Кроме того, гауссовы пучки часто позволяют получить аналитическое представление исследуемых характеристик поля [6-11]. Особое внимание уделяется вихревым пучкам Гаусса-Лагерра (ГЛ), обладающим орбитальным угловым моментом (ОАМ) [12-18]. Это свойство используется во многих приложениях, включая оптическое манипулирование частицами [19-30], уплотнение каналов связи при передаче информации [31-37], взаимодействие излучения с веществом [38-43].

Другим интересным типом лазерных пучков являются пучки, обладающие свойством автофокусировки [44-50], среди которых круговые пучки Эйри [44, 45, 51-53]. Свойство резкой автофокусировки также востребовано во многих приложениях, включая оптическое манипулирование, многофотонную полимеризацию, используется при нелинейных эффектах и для поляризационных преобразований [54-56].

В отличие от других типов вихревых пучков [57-59], моды ГЛ обладают инвариантностью с точностью до масштаба при распространении в свободном пространстве, а также при прохождении через линзовые системы и в оптических волокнах с параболическим изменением показателя преломления [32].

Учитывая сходство пучков ГЛ и круговых пучков Эйри, имеет смысл провести сравнительное исследование свойств этих двух типов пучков при распространении в параболических средах. Такое исследование расширит спектр оптических сигналов, используемых для телекоммуникации. Для моделирования распространения лазерных пучков в параболических волокнах используется дробное преобразование Фурье [60-65].

2. Круговые пучки Эйри и Гаусса-Лагерра

В данной работе рассматриваются круговые пучки Эйри, полученные путем «раскручивания» по окружности функции Эйри [66-69] со смещением и масштабированием [44, 45, 51-53]:

$$CAi(r) = Ai(ar - r_0), \quad (1)$$

где

$$Ai(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[i \left(\frac{t^3}{3} - xt \right) \right] dt, \quad (2)$$

Классическим фокусирующим элементом является линза, имеющая квадратичную зависимость фазы от радиуса. Дифракционный вариант параболической линзы имеет радиальные линии, сгущающиеся к краю оптического элемента как линейный чирп [48, 49]. Круговые пучки ГЭр характеризуются сублинейным чирпом [44, 45], поэтому для достижения свойств автофокусировки их нужно смещать из центра. На рисунке 1 показана картина интенсивности и фазовое распределение кругового пучка Эйри, описываемого формулой (1).

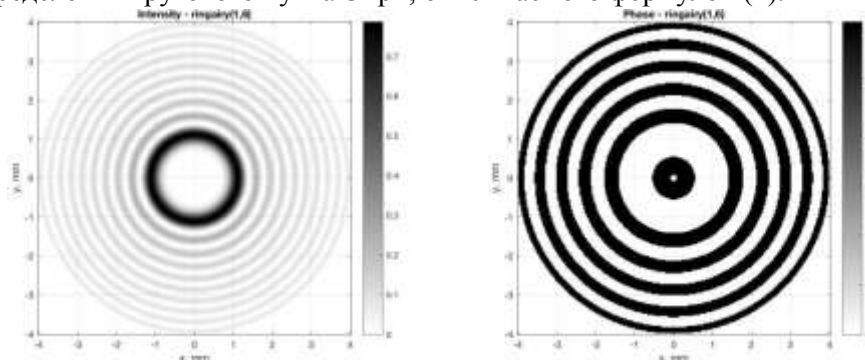


Рисунок 1. Круговой пучок Эйри (1).

Моды ГЛ описываются следующей формулой:

$$GL_{n,m}(r, \varphi) = \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \left(\frac{r}{\sigma} \right)^{|m|} L_n^{|m|} \left(\frac{r^2}{\sigma^2} \right) \exp(im\varphi), \quad (3)$$

где σ - радиус гауссова пучка $L_n^m(x)$ - обобщенные полиномы Лагерра, m – порядок вихревой фазовой сингулярности.

Так как круговые пучки Эйри в данной работе рассматриваются без внесения фазовой вихревой сингулярности, то моды ГЛ также рассматриваются при $m=0$. Пример моды ГЛ можно увидеть на рисунке 2.

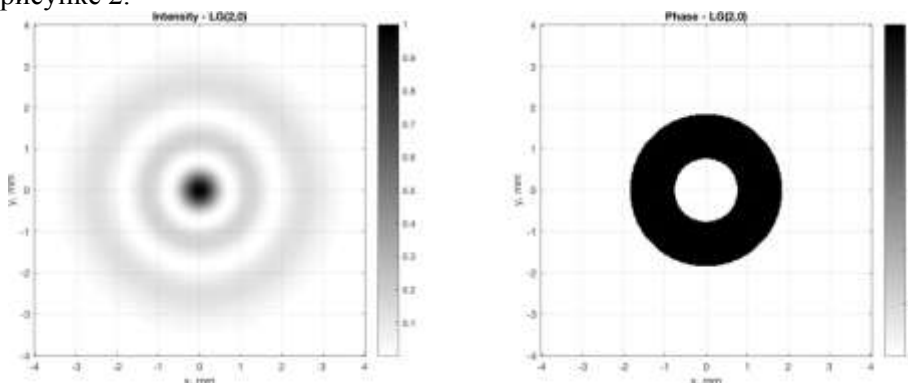


Рисунок 2. Мода ГЛ $(n,m)=(2,0)$. Результаты моделирования.

3. Результаты моделирования

Распространение пучков в оптическом волокне с параболическим изменением показателя преломления моделировалось с помощью дробного преобразования Фурье [60-65]:

$$F(u, v, z) = -\frac{ik}{2\pi f \sin \tau} \exp\left\{\frac{ik \cos \tau (u^2 + v^2)}{2f \sin \tau}\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp\left\{\frac{ik \cos \tau (x^2 + y^2)}{2f \sin \tau} - \frac{ik(xu + yv)}{f \sin \tau}\right\} dx dy, \quad (4)$$

где пройденное расстояние $z = f \sin \tau$.

Расчет проводился с периодом равным $4f=4000$ мм, в диапазоне от 500 до 1500 мм, так как в зонах при z равных нулю и двойному фокусу появляется неопределённость, вследствие деления на ноль, и требует увеличения числа отсчетов рассчитываемого пучка и вычислительных мощностей [63-65].

Энергии входных сигналов была нормализованы и приведена к единому значению – единице. С учетом сохранения энергии при распространении, можно сравнить свойства автофокусировки двух типов пучков, выделяя участки максимальной концентрации энергии. На рисунке 3 можно наблюдать как ведет себя круговой пучок Эйри в оптоволокне в плоть до четверти периода.

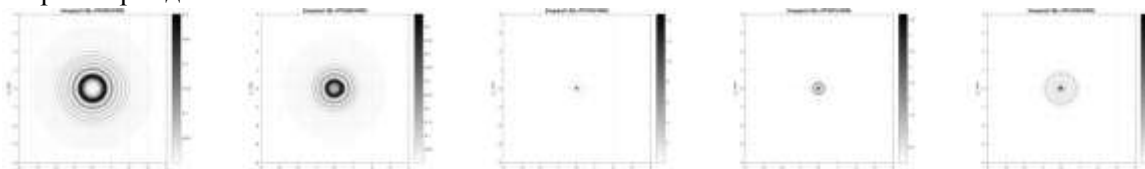


Рисунок 3. Распространение кругового пучка Эйри (500 - 1000 мм с шагом 125 мм).

По динамике распространения пучка видно, что ему присуще свойство резкой автофокусировки на расстоянии 750 мм, при котором соотношение пика интенсивности энергии и полной энергии составляет 0,0145. Данное свойство отсутствует при распространении мод ГЛ, как можно пронаблюдать на рисунке 4. Поведение моды предсказуемо, она концентрируется в фокусе (четверть периода дробного преобразования Фурье), и соотношение пика интенсивности и полной энергии составляет 0,0482.

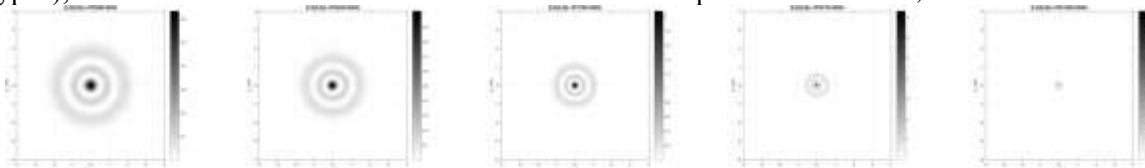
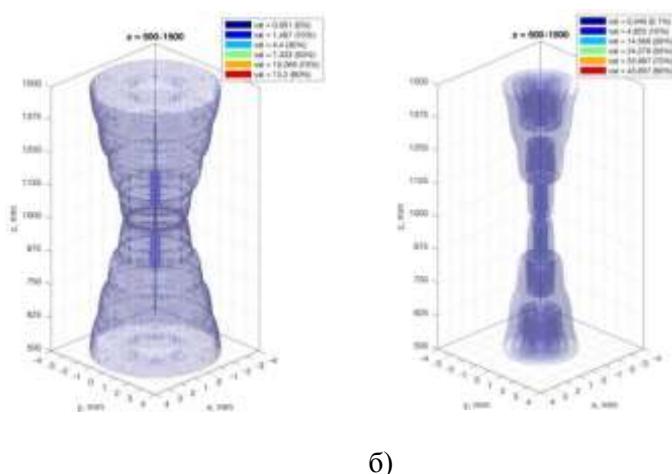


Рисунок 4. Распространение пучка Гаусса-Лагерра (500 - 1000 мм с шагом 125 мм).



а)

б)

Рисунок 5. Трехмерные модели распространения круговых пучков Эйри (а) и мод ГЛ (б) в параболическом волокне.

Для наглядного представления динамики прохождения по оптоволокну лазерных пучков на рисунке 5 представлены трехмерные модели поверхностей различных уровней интенсивности

при распространении. Можно заметить, что структуры поверхности с низкой интенсивностью примерно соответствуют друг другу: приближаясь к фокусному расстоянию пучок сужается в узкое горлышко, однако распределение концентрации энергий у пучков различное. У круговых пучков Эйри из-за дополнительной автофокусировки концентрация энергий происходит четыре раза, когда у пучка ГЛ только дважды происходит фокусировка за полный период прохождения в параболическом волокне. Именно поэтому у мод ГЛ достигается более высокое значение интенсивности в фокальной плоскости.

4. Заключение

В ходе работы были получены и представлены результаты сравнительного моделирования распространения круговых пучков Эйри и мод Гаусса-Лагерра в параболическом оптоволокне. Исследование трехмерного распределения, мест концентрации энергии и уровня интенсивности показало следующие результаты. За полный период прохождения в параболическом волокне у круговых пучков Эйри из-за дополнительной автофокусировки концентрация энергий происходит четыре раза, в то время как у пучка ГЛ только дважды. Именно поэтому у мод ГЛ достигается более высокое значение интенсивности в фокальной плоскости.

5. Благодарности

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-37-00056-мол_а) и ведущей научной школы НШ-6307.2018.8.

6. Литература

- [1] Kogelnik, H. Laser beams and resonators / H. Kogelnik, T. Li // *Appl. Opt.* – 1966. – Vol. 5(10). – P.1550-1567.
- [2] Siegman, A.E. *Lasers – USA: University Science Books*, 1986. – 682 p.
- [3] Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и гауссовы пучки – М.: Наука, 1990. – 264 с.
- [4] Хонина, С.Н. Дифракционные оптические элементы, согласованные с модами Гаусса-Лагерра / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Оптика и спектроскопия.* – 1998. – Т. 85, № 4. – С. 695-703.
- [5] Khonina, S.N. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics.* – 1999. – Vol. 46(2). – P. 227-238.
- [6] Абрамочкин, Е.Г. Функции Эрмита-Лагерра-Гаусса // *Вестник Самарского гос. университета. Естественнонаучная серия.* – 2001. – № 4. – С. 19-41.
- [7] Abramochkin, E. Generalized Gaussian beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Journal of Optics A: Pure and Appl. Optics.* – 2004. – Vol. 6(5). – P. S157-S161.
- [8] Kotlyar, V.V. Generalized Hermite beams in free space / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Optik.* – 1998. – Vol. 108(1). – P. 20-26.
- [9] Хонина, С.Н. Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 62-69.
- [10] Abramochkin, E.G. Solutions of Paraxial Equations and Families of Gaussian Beams / E.G. Abramochkin, T. Alieva, J.A. Rodrigo // *Mathematical Optics: Classical, Quantum, and Computational Methods.* – 2013. – P. 143-192.
- [11] Хонина, С.Н. Особенности непараксиального распространения гауссовых и бесселевых мод вдоль оси кристалла / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика.* – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 297-306.
- [12] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Phys. Rev. A.* – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
- [13] Khonina, S.N. Measuring the light field orbital angular momentum using DOE / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, P. Paakkonen, J. Turunen // *Optical Memory and Neural Networks (Allerton Press).* – 2001. – Vol. 10(4). – P. 241-255.

- [14] O'Neli, A.T. Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam / A.T. O'Neli, I. MacVicar, L. Allen, M.J. Padgett // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 88. – P. 053601.
- [15] Котляр, В.В. Измерение орбитального углового момента светового поля с помощью дифракционного оптического элемента / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Соيفер, Я. Ванг // *Автоматика*. – 2002. – Т. 38, № 3. – P. 33-44.
- [16] Padgett, M. Light's orbital angular momentum / M. Padgett, J. Courtial, L. Allen // *Phys. Today*. – 2004. – Vol. 57(5). – P. 35-40.
- [17] Yao, A.M. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / A.M. Yao, M.J. Padgett // *Adv. Opt. Photon.* – 2011. – Vol. 3. – P. 161-204.
- [18] Schulze, C. Measurement of the orbital angular momentum density of Bessel beams by projection into a Laguerre-Gaussian basis / C. Schulze, A. Dudley, R. Brünig, M. Dupare, A. Forbes // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53(26). – P. 5924-5933.
- [19] Харитонов, С.И. Вычисление момента импульса электромагнитного поля внутри волновода с абсолютно проводящими стенками / С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 588-605. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-588-605.
- [20] He, H. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity / H. He, M.E. Friese, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – Vol. 75(5). – P. 826-829.
- [21] Grier, D.G. A revolution in optical manipulation // *Nature*. – 2003. – Vol. 424(6950). – P. 810-816.
- [22] Khonina, S.N. DOE for optical micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, A.A. Almazov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, A.V. Volkov // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – V 1. 5447. – P. 304-311.
- [23] Neuman, K.C. Optical trapping / K.C. Neuman, S.M. Block // *Review of Scientific Instruments*. – 2004. – Vol. 75. – P. 2787-2809.
- [24] Khonina, S.N. DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Turunen // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
- [25] Khonina, S.N. Optical micromanipulation using DOEs matched with optical vortices / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6187. – P. 61871F.
- [26] Bhattacharya, M. Using a Laguerre-Gaussian beam to trap and cool the rotational motion of a mirror / M. Bhattacharya, P. Meystre // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99. – P. 153603.
- [27] Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // *J. Nanophot.* – 2008. – Vol. 2(1). – P. 021875.
- [28] Скиданов, Р.В. Оптическая микроманипуляция с использованием бинарного динамического модулятора света / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 361-365.
- [29] Simpson, S.H. Rotation of absorbing spheres in Laguerre-Gaussian beams / S.H. Simpson, S. Hanna // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2009. – Vol. 26. – P.173-183.
- [30] Padgett, M. Tweezers with a twist / M. Padgett, R. Bowman // *Nat. Photonics*. – 2011. – Vol. 5(6). – P. 343-348.
- [31] Gibson, G. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. Barnett, S. Franke-Arnold // *Opt. Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 5448-5456.
- [32] Khonina, S.N. Propagation of laser vortex beams in a parabolic optical fiber / S.N. Khonina, A.S. Striletz, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar // *Proceedings SPIE*. – 2020. – Vol. 7523. – P. 75230B-1-12.
- [33] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue,

- S. Dolinar, M. Tur, A.E. Willner // *Nat. Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – P. 488-496.
- [34] Kirilenko, M.S. Information Transmission Using Optical Vortices / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2013. – Vol. 22(2). – P. 81-89. DOI: 10.3103/S1060992X13020069.
- [35] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran // *Science*. – 2013. – Vol. 340. – P. 1545-1548.
- [36] Porfirev, A.P. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(11). – P. E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [37] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paranin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [38] Zambrini, R. Local transfer of angular momentum to matter / R. Zambrini, S.M. Barnett // *J. Mod. Opt.* – 2005. – Vol. 52. – P. 1045-1052.
- [39] Toyoda, K. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12(7). – P. 3645-3649.
- [40] Ambrosio, A. Light-induced spiral mass transport in azo-polymer films under vortex-beam illumination / A. Ambrosio, L. Marrucci, F. Borbone, A. Roviello, P. Maddalena // *Nat. Commun.* – 2012. – Vol. 3. – P. 989.
- [41] Nivas, J.J. Laser ablation of silicon induced by a femtosecond optical vortex beam / J.J. Nivas, H. Shutong, K.K. Anoop, A. Rubano, R. Fittipaldi, A. Vecchione, D. Paparo, L. Marrucci, R. Bruzzese, S. Amoroso // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40(20). – P. 4611-4614.
- [42] Syubaev, S. Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams / S. Syubaev, A. Zhizhchenko, A. Kuchmizhak, A. Porfirev, E. Pustovalov, O. Vitrik, Yu. Kulchin, S. Khonina, S. Kudryashov // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25(9). – P. 10214-10223. DOI: 10.1364/OE.25.010214.
- [43] Хонина, С.Н. Анализ характеристик параксиальных векторных Гауссовых пучков, влияющих на формирование микроструктур в азополимере / С.Н. Хонина, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 780-788. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-780-788.
- [44] Efremidis, N.K. Abruptly autofocusing waves / N.K. Efremidis, D.N. Christodoulides // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35(23). – P. 4045-4047.
- [45] Davis, J.A. Abruptly autofocusing vortex beams / J.A. Davis, D.M. Cottrell, D. Sand // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20(12). – P. 13302-13310.
- [46] Ring, J. Auto-focusing and self-healing of Pearcey beams / J. Ring, J. Lindberg, A. Mourka, M. Mazilu, K. Dholakia, M. Dennis // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 18955-18966.
- [47] Efremidis, N.K. Accelerating and abruptly autofocusing matter waves / N.K. Efremidis, V. Paltoglou, W. von Klitzing // *Phys. Rev. A*. – 2013. – Vol. 87(4). – P. 043637.
- [48] Khonina, S.N. Sudden autofocusing of superlinear chirp beams / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, A.V. Ustinov // *Journal of Optics*. – 2018. – Vol. 20(2). – P. 025605. DOI: 10.1088/2040-8986/aaa075.
- [49] Degtyarev, S.A. Sublinearly chirped metalenses for forming abruptly autofocusing cylindrically polarized beams / S.A. Degtyarev, S.G. Volotovskiy, S.N. Khonina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2018. – Vol. 35(8). – P. 1963-1969. DOI: 10.1364/JOSAB.35.001963.
- [50] Khonina, S.N. Aberration laser beams with autofocusing properties / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.P. Porfirev // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57(6). – P. 1410-1416. DOI: 10.1364/AO.57.001410.
- [51] Vallee, O. Airy functions and applications in physics / O. Vallee, M. Soares – London: Imperial College Press, 2004. – 194 p.

- [52] Khonina, S.N. Specular and vortical Airy beams // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284. – P. 4263-4271.
- [53] Porfirev, A.P. Generation of the azimuthally modulated circular superlinear Airy beams / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34(12). – P. 2544-2549. DOI: 10.1364/JOSAB.34.002544.
- [54] Zhang, P. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams / P. Zhang, J. Prakash, Z. Zhang, M.S. Mills, N.K. Efremidis, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36(15). – P. 2883-2885.
- [55] Liu, S. Abrupt polarization transition of vector autofocusing Airy beams / S. Liu, M. Wang, P. Li, P. Zhang, J. Zhao // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 38(14). – P. 2416-2418.
- [56] Manousidaki, M. Abruptly autofocusing beams enable advanced multiscale photopolymerization / M. Manousidaki, D. G. Papazoglou, M. Farsari, S. Tzortzakis // *Optica*. – 2016. – Vol. 3(5). – P. 525-530.
- [57] Volke-Sepulveda, K. Orbital angular momentum of a high-order Bessel light beam / K. Volke-Sepulveda, V. Garcés-Chávez, S. Chávez-Cerda, J. Arlt, K. Dholakia // *J. Opt. B*. – 2002. – Vol. 4. – P. S82-S89.
- [58] Chavez Cerda, S. Holographic generation and orbital angular momentum of high-order Mathieu beams / S. Chavez Cerda, M.J. Padgett, I. Allison, G.H.C. New, J.C. Gutierrez Vega, A.T. O’Neil, I. MacVicar, J. Courtial // *J. Opt. B: Quantum Semiclassical Opt.* – 2002. Vol. 4. – P. S52-S57.
- [59] Khonina, S.N. Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal / S.N. Khonina, A.A. Morozov, S.V. Karpeev // *Laser Phys.* – 2014. – Vol. 24. – P. 056101. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
- [60] Namias, V. The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics // *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*. – 1980. – Vol. 25. – P. 241-265.
- [61] Ozaktas, H.M. Fourier transforms of fractional order and their optical interpretation / H.M. Ozaktas, D. Mendlovic // *Optics Communications*. – 1993. – Vol. 101. – P. 163-169.
- [62] Кириленко, М.С. Вычисление собственных функций ограниченного дробного преобразования Фурье / М.С. Кириленко, Р.О. Зубцов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 332-338. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-332-338.
- [63] Mossoulina, O.A. Simulation of vortex laser beams propagation in parabolic index media based on fractional Fourier transform / O.A. Mossoulina, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 741. – P. 012142. DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012142.
- [64] Monin, E.O. Modelling of distribution of circular beams of Airy in parabolic fiber / E.O. Monin, S.G. Volotovskiy // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012125.
- [65] Monin, E.O. Analysis of the Conservation of the Orbital Angular Momentum of Multimode Laguerre-Gaussian Beams Propagating in a Random Medium / E.O. Monin, D.A. Savelyev // *International Conference on Transparent Optical Networks*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-4.
- [66] Vallee, O. Airy functions and applications in physics / O. Vallee, M. Soares – Imperial College Press, London, 2004. – 194 p.
- [67] Banders, M.A. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems / M.A. Banders, J.C. Gutierrez-Vega // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15(25). – P. 16719-16728.
- [68] Хонина, С.Н. Ограниченные 1D пучки Эйри: лазерный веер / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 168-174.
- [69] Khonina, S.N. Fractional Airy beams / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2017. – Vol. 34(11). – P. 1991-1999. DOI: 10.1364/JOSAA.34.001991.

Comparative study of propagation of Gauss-Laguerre beams and circular Airy beams in a parabolic fiber

E.O. Monin¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this paper, a comparative study of the properties of two types of beams-Gauss-Laguerre and circular Airy beams. It is known that Gauss-Laguerre beams are modes in an optical fiber with a parabolic change in the refractive index, and in free space they retain their structure by changing the scale. On the other hand, circular airy beams, which resemble Gauss-Laguerre beams in structure, possess autofocus properties. The propagation of two types of beams in a parabolic optical fiber using fractional Fourier transform is considered.