

Преобразование краевой дислокации высокого порядка в набор оптических вихрей (винтовых дислокаций)

В.В. Котляр^{1,2}, А.А. Ковалёв^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Теоретически показано, что астигматическое преобразование краевой дислокации (прямой линии нулевой интенсивности) n -го порядка формирует на двойном фокусном расстоянии от цилиндрической линзы n оптических эллиптических вихрей (винтовых дислокаций) с единичным топологическим зарядом, расположенных на прямой линии, перпендикулярной краевой дислокации, в точках, координаты которых являются корнями многочлена Эрмита n -го порядка. Орбитальный угловой момент краевой дислокации с астигматической фазой пропорционален n .

Ключевые слова: астигматическое преобразование, краевая дислокация, винтовая дислокация, оптический вихрь.

Цитирование: Котляр, В.В. Преобразование краевой дислокации высокого порядка в набор оптических вихрей (винтовых дислокаций) / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 319-323. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-855.

Citation: Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Transformation of a high-order edge dislocation to optical vortices (spiral dislocations). Computer Optics 2021; 45(3): 319-323. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-855.

Введение

Астигматические преобразования лазерных пучков в оптике хорошо известны. Первой работой по астигматическому конвертору была работа Абрамочкина и Волостникова [1], в которой показано, как с помощью астигматического конвертора безвихревой пучок Эрмита–Гаусса (ЭГ) преобразуется в вихревой пучок Лагерра–Гаусса (ЛГ). В этой работе пучок Эрмита–Гаусса (n, m) преобразуется в моду Лагерра–Гаусса $(n, m - n)$ всего с помощью одной цилиндрической линзы. Позже во многих работах изучалось преобразование различных лазерных пучков с помощью астигматических преобразований. Так, в [2, 3] изучалось прохождение пучка Эрмита–Гаусса через 4×4 оптическую систему, в том числе с астигматизмом. В [4] рассмотрено прохождение пучков Эрмита–Лагерра–Гаусса через астигматический модовый конвертор. В [5, 6] исследовалась фокусировка астигматической линзой оптического вихря высокого порядка. Преобразования астигматического \sin -Гауссова пучка в нелинейной среде рассматриваются в [7]. В [8, 9] исследуется астигматическое модовое преобразование внутри лазерного резонатора. Оптические эллиптические Гауссовы вихри с астигматической фазой рассматривались ранее в [10, 11]. В [10] рассматривалось преобразование пучка Эрмита–Гаусса порядка $(0, n)$ с помощью повернутой цилиндрической линзы. В [11] рассмотрен модовый пучок, у которого канонический оптический вихрь с ТЗ, равным n , внедренный в эллиптический астигматический Гаус-

сов пучок, сохраняется при распространении и не расщепляется на простые оптические вихри. В [12] рассмотрено распространение эллиптических оптических вихрей. Измерять топологический заряд оптического вихря с помощью астигматического преобразования предложено в [13]. В [14] рассмотрен астигматический вихревой пучок Эрмита–Гаусса.

С другой стороны, известны работы, в которых исследуется поведение винтовых [15] и краевых дислокаций в оптических системах. Так, в [16] изучалась эволюция при распространении смеси краевой (осевой) и винтовой дислокаций. В этой работе показано, что комбинированный оптический вихрь имеет дробный топологический заряд. В [17–20] исследуется взаимодействие оптического вихря (винтовой дислокации) и краевой поперечной дислокации (линии нулевой интенсивности), внедренных в Гауссов пучок. В этих работах показано, что это взаимодействие приводит к расщеплению краевой дислокации и формированию дополнительных оптических вихрей.

Из рассмотренного краткого обзора работ следует, что астигматического преобразования краевой дислокации не рассматривалось. В данной работе мы теоретически и численно показали, что вертикальная краевая дислокация n -го порядка, внедренная в перетяжку Гауссова пучка, после цилиндрической линзы, расположенной в перетяжке и повернутой на 45 градусов к осям, «распадется» на n изолированных нулей интенсивности (винтовых дислокаций), вокруг которых сформируются n эллиптических оптических вихрей с топологическим зарядом -1 , лежащих на пря-

мой, перпендикулярной краевой дислокации, и расположенных в точках, координаты которых являются корнями многочлена Эрмита n -го порядка.

1. Комплексная амплитуда поля с краевой дислокацией на двойном фокусном расстоянии

Рассмотрим краевую дислокацию, внедренную в перетяжку Гауссова пучка с астигматической фазой. То есть в плоскости перетяжки Гауссова пучка с краевой дислокацией n -го порядка, которая проходит через центр и совпадает с вертикальной осью, расположена идеальная тонкая цилиндрическая линза, образующая которой повернута в плоскости перетяжки на 45 градусов к осям координат. Комплексная амплитуда такого светового поля в начальной плоскости имеет вид:

$$E(x, y, z = 0) = \frac{x^n}{w^n} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2} - \frac{ik}{4f}(x + y)^2\right), \quad (1)$$

где k – волновое число света, w – радиус перетяжки Гауссова пучка, (x, y) – поперечные декартовы координаты и z – продольная координата вдоль оптической оси, f – фокусное расстояние цилиндрической линзы. Второе слагаемое в показателе экспоненты в (1) описывает распределение фазы цилиндрической линзы с параболическим профилем, расположенной под углом 45 градусов к осям x и y .

Наша цель – показать, что на горизонтальной оси x на двойном фокусном расстоянии от цилиндрической линзы сформируется n оптических вихрей с ТЗ –1.

Амплитуда светового поля (1) на расстоянии $z = 2f$, полученная с помощью преобразования Френеля, будет иметь вид:

$$E(\xi, \eta, z = 2f) = \left(\frac{(-i)^{n+1}\gamma}{2^n(1+\gamma^2)^{(n+1)/2}}\right) \times \exp\left(-\frac{\gamma^2(\xi^2 + \eta^2)}{w^2(1+\gamma^2)} + \frac{i\gamma}{w^2}(\xi^2 + \eta^2) + \frac{2i\gamma^3\xi\eta}{w^2(1+\gamma^2)}\right) \times H_n\left[\frac{\gamma(\xi - i\eta)}{w\sqrt{1+\gamma^2}}\right], \quad (2)$$

где $\gamma = z_0/(2f)$, $z_0 = kw^2/2$. В (2) z_0 – длина Рэлея, $H_n(x)$ – многочлен Эрмита. Из (2) следует, что у Гауссова пучка на двойном фокусном расстоянии изменился радиус перетяжки $w(z = 2f) = \bar{w} = w\gamma^{-1}\sqrt{1+\gamma^2}$ и появилась астигматическая фаза. Из (2) также следует, что при $\eta = 0$ аргумент многочлена Эрмита становится действительной величиной. Приравнивая этот аргумент значениям корней многочлена $H_n(\sigma_n) = 0$, получим координаты центров эллиптических оптических вихрей (винтовых дислокаций), лежащих на горизонтальной оси ξ :

$$\xi_n = -w\sqrt{1+\gamma^2}(\gamma)^{-1}\sigma_n. \quad (3)$$

Из общей формулы (3) следуют частные случаи. Пусть краевая дислокация имеет второй порядок и совпадает с осью η , тогда в выходной плоскости будет только два нуля на горизонтальной оси на расстоянии от центра, равном $\xi_{1,2} = \pm w(1+\gamma^2)^{1/2}(\sqrt{2}\gamma)^{-1}$. Это следует из того, что у многочлена Эрмита 2-го порядка всего два корня $\sigma_{1,2} = \pm 1/\sqrt{2}$. Краевая дислокация 3-го порядка даст на выходе 3 оптических вихря: один на оптической оси, а два других в точках с координатами: $\xi_{1,2} = \pm w(1+\gamma^2)^{1/2}(\gamma\sqrt{2}/3)^{-1}$. Так как у многочлена Эрмита 3-го порядка три корня: $\sigma_0 = 0$, $\sigma_{1,2} = \pm\sqrt{3}/2$. И так далее.

Рассмотрим далее, какие оптические вихри формируются на двойном фокусном расстоянии для начального пучка (1). Из (2) следует, что вокруг корней многочлена Эрмита на горизонтальной оси сформируются эллиптические вихри с топологическими зарядами –1 и с эллиптической амплитудой вблизи нуля интенсивности:

$$\xi - i\eta = \rho \exp(-i\theta). \quad (4)$$

Правая часть в (4) получена в полярных эллиптических координатах:

$$\begin{cases} \xi = \rho \cos \theta, \\ \eta = \gamma^{-1}\rho \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Эллиптический вихрь становится каноническим оптическим вихрем при условии $\gamma = 1$ ($z_0 = 2f$):

$$\xi - i\eta = \rho \exp(-i\theta), \quad (6)$$

а амплитуда светового поля (2) будет иметь вид ($\gamma = 1$):

$$E(\xi, \eta, z = z_0 = 2f) = \left(\frac{i^{n-1}}{2^{(3n+1)/2}}\right) \times \exp\left(-\frac{(\xi^2 + \eta^2)}{2w^2} + \frac{ik}{4f}(\xi^2 + \eta^2 + \xi\eta)\right) \times H_n\left[\frac{(\xi - i\eta)}{w\sqrt{2}}\right]. \quad (7)$$

Чтобы пучок (7) сохранял далее свою структуру (то есть стал модовым пучком) при дальнейшем распространении, надо на двойном фокусном расстоянии расположить еще одну цилиндрическую линзу, повернутую на 45 градусов к осям, с пропусканием $\exp[-ik(\xi + \eta)^2/(8f)]$. Эта линза скомпенсирует астигматическую фазу, которая присутствует в (7). Причем фокусное расстояние у этой цилиндрической линзы должно быть в 2 раза больше, чем у цилиндрической линзы в (1). Сразу после второй цилиндрической линзы вместо (7) получим:

$$E(\xi, \eta, z = z_0 = 2f) = \left(\frac{i^{n-1}}{2^{(3n+1)/2}} \right) \times \exp \left(-\frac{(\xi^2 + \eta^2)}{2w^2} + \frac{ik}{8f} (\xi^2 + \eta^2) \right) \times H_n \left[\frac{(\xi - i\eta)}{w\sqrt{2}} \right]. \quad (8)$$

Пучок (8) является частным примером семейства структурно-стабильных пучков [4], которые распространяются, изменяя только масштаб и вращаясь. Пучок (8) с точностью до обозначений совпадает с вихревым пучком Эрмита, рассмотренным в [14].

Из теории структурно-стабильных Гауссовых лазерных пучков [4] следует, что пучок с начальной амплитудой вида

$$E(\xi, \eta, z = 0) = H_n [\alpha(\xi \pm i\eta)] \exp(-\beta(\xi^2 + \eta^2)), \quad (9)$$

где α и β – комплексные постоянные и $\text{Re}\beta > 0$, будет при распространении сохранять свою структуру, а изменяться только масштабно и вращаться. Это общее доказательство того, что пучок (8) тоже будет сохранять структуру при распространении.

2. Орбитальный угловой момент

В этом параграфе мы получим выражение для нормированного орбитального углового момента пучка (1). ОУМ параксиального пучка находится по известным формулам [1]:

$$J_z = \text{Im} \int \int_{-\infty-\infty}^{\infty-\infty} \bar{E}(x, y) \left(x \frac{\partial E(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial E(x, y)}{\partial x} \right) dx dy, \quad (10)$$

$$W = \int \int_{-\infty-\infty}^{\infty-\infty} \bar{E}(x, y) E(x, y) dx dy,$$

где Im – мнимая часть числа, J_z – ОУМ пучка, W – мощность пучка, \bar{E} – комплексно сопряженная функция к функции E . Так как ОУМ пучка сохраняется, рассчитаем его в начальной плоскости. Подставим функцию (1) в (10) и получим простое выражение для нормированного на мощность ОУМ:

$$\frac{J_z}{W} = -\gamma n. \quad (11)$$

При $\gamma = 1$ ОУМ поля (1) совпадает с его ТЗ и равен $J_z/W = -n$. Таким образом, вихревой пучок с ТЗ и ОУМ, равным $-n$, можно сформировать с помощью краевой дислокации n -го порядка и двух цилиндрических линз.

3. Моделирование

На рис. 1 показаны распределения интенсивности и фазы в начальной плоскости, и на двойном фокус-

ном расстоянии цилиндрической линзы Гауссова пучка с линией нулевой интенсивности n -порядка (уравнения (1), (2)).

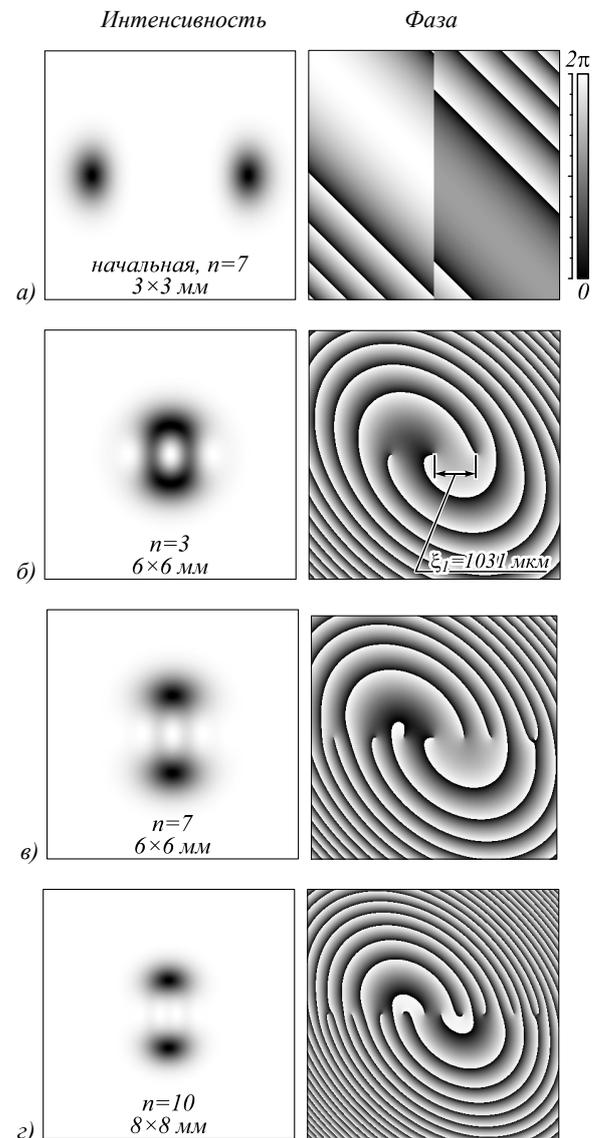


Рис. 1. Распределения интенсивности (первый столбец, негатив) и фазы (второй столбец) в начальной плоскости Гауссова пучка с краевой дислокацией при $n = 7$ (первая строка, а) и на двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы при порядке $n = 3$ (вторая строка, б), $n = 7$ (третья строка, в), $n = 10$ (четвёртая строка, г)

Распределения в начальной плоскости были получены по формуле (1), а на двойном фокусном расстоянии – по формуле (2). Параметры расчёта: длина волны $\lambda = 532$ нм, радиус перетяжки Гауссова пучка $w = 0,5$ мм, фокусное расстояние цилиндрической линзы $f = 1$ м, расчётная область во входной плоскости $|x|, |y| \leq 1,5$ мм, расчётная область в выходной плоскости $|\xi|, |\eta| \leq 3$ мм для $n = 3$ и 7, и $|\xi|, |\eta| \leq 4$ мм для $n = 10$.

Из рис. 1 следует, что действительно вертикально расположенная краевая дислокация порядка $n = 3, 7, 10$, на которой происходит «сбой» фазы, преобразует-

ся на двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы в эллиптические оптические вихри (изолированные нули интенсивности) минус первого порядка, расположенные на горизонтальной оси, разделенные расстоянием (3), и их число соответственно равно $n = 3, 7, 10$. Для $n = 3$ координаты дислокаций ξ можно так же определить по формуле $\xi_{1,2} = \pm w(1 + \gamma^2)^{1/2}(\gamma\sqrt{2/3})^{-1}$, результат которой совпадает с их нахождением на рис. 1б: $\xi_{1,2} = \pm 1031$ мкм.

Заключение

Теоретически показано, что астигматическое преобразование краевой дислокации (прямой линии нулевой интенсивности) n -го порядка формирует на двойном фокусном расстоянии от цилиндрической линзы n оптических эллиптических вихрей (винтовых дислокаций) с топологическим зарядом -1 , расположенных на прямой линии, перпендикулярной краевой дислокации, в точках, координаты которых являются корнями многочлена Эрмита n -го порядка. Орбитальный угловой момент краевой дислокации с астигматической фазой пропорционален n .

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003, параграф «Комплексная амплитуда поля с краевой дислокацией на двойном фокусном расстоянии»), Российского научного фонда (грант 18-19-00595, параграф «Орбитальный угловой момент»), а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (параграф «Моделирование»).

Литература

1. **Abramochkin, E.** Beam transformation and nontransformed beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1991. – Vol. 83, Issues 1-2. – P. 123-135. – DOI: 10.1016/0030-4018(91)90534-K.
2. **Lu, B.** Analytical propagation equation of astigmatic Hermite-Gaussian beams through a 4x4 paraxial optical systems and their symmetrizing transformation / B. Lu, P. Wu // *Optics and Laser Technology*. – 2003. – Vol. 35. – P. 497-504.
3. **Chen, Y.F.** Characterizing the propagation evolution of wave patterns and vortex structures in astigmatic transformations of Hermite-Gaussian beams / Y.F. Chen, C.C. Chay, C.Y. Lee, J.C. Tung, H.C. Liang, K.T. Huang // *Laser Physics*. – 2017. – Vol. 28. – 015002.
4. **Abramochkin, E.G.** Hermite-Laguerre-Gaussian beams in astigmatic optical systems / E.G. Abramochkin, E.U. Razueva, V.G. Volostnikov // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – Vol. 7009. – 70090M. – DOI: 10.1117/12.793382.
5. **Bekshaev, A.Ya.** Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by an astigmatic lens / A.Ya. Bekshaev, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Optics Communications*. – 2004. – Vol. 241. – P. 237-247.
6. **Bekshaev, A.Ya.** Astigmatic telescopic transformation of a high-order optical vortex / A.Ya. Bekshaev, A.I. Karamoch // *Optics Communications*. – 2008. – Vol. 281. – P. 5687-5696.
7. **Zhu, K.** Propagation properties of an astigmatic sin-Gaussian beam in a strongly nonlocal nonlinear media / K. Zhu, J. Zhu, Q. Su, H. Tang // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9, Issue 1. – 71.
8. **Huang, T.D.** Large astigmatic laser cavity modes and astigmatic compensation / T.D. Huang, T.H. Lu // *Applied Physics B*. – 2018. – Vol. 124. – 72.
9. **Pan, J.** Index-tunable structured-light beams from a laser with a intracavity astigmatic mode converter / J. Pan, Y. Shen, Z. Wan, X. Fu, H. Zhang, Q. Liu // *Physical Review Applied*. – 2020. – Vol. 14. – 044048.
10. **Kotlyar, V.V.** Three different types of astigmatic Hermite-Gaussian beams with orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev, E.S. Kozlova // *Journal of Optics*. – 2019. – Vol. 21, Issue 11. – 115601. – DOI: 10.1088/2040-8986/ab42b5.
11. **Kotlyar, V.V.** Vortex astigmatic Fourier-invariant Gaussian beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 657-666. – DOI: 10.1364/OE.27.000657.
12. **Kotlyar, V.V.** Elliptic Gaussian optical vortices / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 95, Issue 5. – 053805. – DOI: 10.1103/PhysRevA.95.053805.
13. **Kotlyar, V.V.** Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, Issue 14. – P. 4095-4104. – DOI: 10.1364/AO.56.004095.
14. **Kotlyar, V.V.** Vortex Hermite-Gaussian laser beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 5. – P. 701-704. – DOI: 10.1364/OL.40.000701.
15. **Bazhenov, V.Yu.** Screw dislocations in light wavefronts / V.Yu. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39, Issue 5. – P. 985-990.
16. **Basistiy, I.V.** Optical wavefront dislocations and their properties / I.V. Basistiy, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Optics Communications*. – 1995. – Vol. 119, Issues 5-6. – P. 604-612.
17. **Petrov, D.V.** Vortex-edge dislocation interaction in a linear medium / D.V. Petrov // *Optics Communications*. – 2001. – Vol. 188. – P. 307-312.
18. **Petrov, D.V.** Splitting of an edge dislocation by an optical vortex / D.V. Petrov // *Optical and Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 34. – P. 759-773.
19. **He, D.** Interaction of the vortex and edge dislocation embedded in a cosh-Gaussian beam / D. He, H. Yan, B. Lu // *Optics Communications*. – 2009. – Vol. 282. – P. 4035-4044.
20. **Chen, H.** Splitting of an edge dislocation by a vortex emergent from a nonparaxial beam / H. Chen, W. Wang, Z. Gao, W. Li // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Vol. 36. – P. 2804-2809.

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр. 318 этого номера.

Ковалёв Алексей Андреевич, 1979 года рождения, в 2002 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2012 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. В списке научных работ более 150 статей. Область научных интересов: математическая теория дифракции, фотонно-кристаллические устройства. E-mail: alanko@ipsiras.ru.

Налимов Антон Геннадьевич, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 140 работ и 3 патентов. E-mail: anton@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г. Окончательный вариант – 13 января 2021 г.

Transformation of a high-order edge dislocation to optical vortices (spiral dislocations)

V.V. Kotlyar^{1,2}, A.A. Kovalev^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

²Samara National Research University,
443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

We theoretically show that an astigmatic transformation of an n th-order edge dislocation (a zero-intensity straight line) produces n optical elliptical vortices (spiral dislocations) with unit topological charge at the double focal distance from the cylindrical lens, located on a straight line perpendicular to the edge dislocation, at points whose coordinates are the roots of an n th-order Hermite polynomial. The orbital angular momentum of the edge dislocation is proportional to the order n .

Keywords: astigmatic transformation, edge dislocation, spiral dislocation, optical vortex.

Citation: Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Transformation of a high-order edge dislocation to optical vortices (spiral dislocations). *Computer Optics* 2021; 45(3): 319-323. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-855.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Russian Foundation for Basic Research under grant # 18-29-20003 (Section “Complex amplitude of field with edge dislocation on double focal distance”), the Russian Science Foundation under grant # 18-19-00595 (Section “Orbital angular momentum”), and by the RF Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the “Crystallography and Photonics” Research Center of the RAS (Section “Numerical simulation”).

References

- [1] Abramochkin EG, Volostnikov VG. Beam transformation and nontransformed beams. *Opt Commun* 1991; 83(1-2): 123-135. DOI: 10.1016/0030-4018(91)90534-K.
 - [2] Lu B, Wu P. Analytical propagation equation of astigmatic Hermite-Gaussian beams through a 4x4 paraxial optical systems and their symmetrizing transformation. *Opt Laser Technol* 2003; 35: 497-504.
 - [3] Chen YF, Chay CC, Lee CY, Tung JC, Liang HC, Huang KT. Characterizing the propagation evolution of wave patterns and vortex structures in astigmatic transformations of Hermite-Gaussian beams. *Laser Phys* 2017; 28: 015002.
 - [4] Abramochkin EG, Razuvaeva EU, Volostnikov VG. Hermite-Laguerre-Gaussian beams in astigmatic optical systems. *Proc SPIE* 2008; 7009: 70090M. DOI: 10.1117/12.793382.
 - [5] Bekshaev AY, Soskin MS, Vasnetsov MV. Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by an astigmatic lens. *Opt Commun* 2004; 241: 237-247.
 - [6] Bekshaev AY, Karamoch AI. Astigmatic telescopic transformation of a high-order optical vortex. *Opt Commun* 2008; 281: 5687-5696.
 - [7] Zhu K, Zhu J, Su Q, Tang H. Propagation properties of an astigmatic sin-Gaussian beam in a strongly nonlocal nonlinear media. *Appl Sci* 2019; 9(1): 71.
 - [8] Huang TD, Lu TH. Large astigmatic laser cavity modes and astigmatic compensation. *Appl Phys B* 2018; 124: 72.
 - [9] Pan J, Shen Y, Wan Z, Fu X, Zhang H, Liu Q. Index-tunable structured-light beams from a laser with an intracavity astigmatic mode converter. *Phys Rev Appl* 2020; 14: 044048.
 - [10] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP, Kozlova ES. Three different types of astigmatic Hermite-Gaussian beams with orbital angular momentum. *J Opt* 2019; 21(11): 115601. DOI: 10.1088/2040-8986/ab42b5.
 - [11] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Vortex astigmatic Fourier-invariant Gaussian beams. *Opt Express* 2019; 27(2): 657-666. DOI: 10.1364/OE.27.000657.
 - [12] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Elliptic Gaussian optical vortices. *Phys Rev A* 2017; 95(5): 053805. DOI: 10.1103/PhysRevA.95.053805.
 - [13] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge. *Appl Opt* 2017; 56(14): 4095-4104. DOI: 10.1364/AO.56.004095.
 - [14] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Vortex Hermite-Gaussian laser beams. *Opt Lett* 2015; 40(5): 701-704. DOI: 10.1364/OL.40.000701.
 - [15] Bazhenov VY, Soskin MS, Vasnetsov MV. Screw dislocations in light wavefronts. *J Mod Opt* 1992; 39(5): 985-990.
 - [16] Basistiy IV, Soskin MS, Vasnetsov MV. Optical wavefront dislocations and their properties. *Opt Commun* 1995; 119(5-6): 604-612.
 - [17] Petrov DV. Vortex-edge dislocation interaction in a linear medium. *Opt Commun* 2001; 188: 307-312.
 - [18] Petrov DV. Splitting of an edge dislocation by an optical vortex. *Opt Quantum Electron* 2002; 34: 759-773.
 - [19] He D, Yan H, Lu B. Interaction of the vortex and edge dislocation embedded in a cosh-Gaussian beam. *Opt Commun* 2009; 282: 4035-4044.
 - [20] Chen H, Wang W, Gao Z, Li W. Splitting of an edge dislocation by a vortex emergent from a nonparaxial beam. *J Opt Soc Am B* 2019; 36: 2804-2809.
-

Authors' information

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: kotlyar@ipsiras.ru.

Alexey Andreevich Kovalev (b. 1979), graduated (2002) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths degree in 2012. He is a senior researcher of Laser Measurements laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. He is a co-author of more than 150 scientific papers. His current research interests are mathematical diffraction theory and photonic crystal devices. E-mail: alanko@ipsiras.ru.

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical Modeling and Program Complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 100 papers and 3 inventions. E-mail: anton@ipsiras.ru.

Received December 25, 2020. The final version – January 13, 2021.
