

# Сингулярные пучки прошедшие гироанизотропные кристаллы

Я.А. Волокитин  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
baka3301@yandex.ru

Ю.А. Егоров  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
yuriyegorov@cfuv.ru

М.В. Брецко  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
mihailbretcko4@gmail.com

Я.Е. Акимова  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
yana\_akimova\_1994@mail.ru

А.Ф. Рыбась  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
rubass@cfuv.ru

А.В. Воляр  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
volyar@cfuv.ru

**Аннотация** — В данной работе проведены исследования в области сингулярных пучков, прошедших гиранизотропные среды. Экспериментально показано, что при прохождении через систему двух гиранизотропных кристаллов с противоположными значениями коэффициента гиранции формируются сингулярные пучки со спиралевидным распределением интенсивности. С помощью компьютерного моделирования процесса распространения света через два гиранизотропных кристалла было показано, что такая система способна генерировать в одной из компонент циркулярной поляризации оптические вихри с двойным топологическим зарядом.

**Ключевые слова** — сингулярная оптика, топологический заряд, гиранизотропный кристалл

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Последние достижения в решении параксиального волнового уравнения [1] открывают новые перспективы в теоретическом анализе различных типов сингулярных пучков, стимулируя, в свою очередь, большой цикл экспериментальных исследований [2,3]. В частности, в работе [4] предлагается использовать чистые фазовые маски для создания структурно устойчивого геликоидально-конического сингулярного пучка со спиралевидным распределением интенсивности. С другой стороны, искусственные фазовые маски требуют большой точности изготовления, связанной с большими производственными затратами. В связи с этим большой интерес представляет использование природных объектов для генерации сингулярностей в пучках. Такие объекты представляют собой анизотропные кристаллы.

Как известно, одноосные и двуосные кристаллы служат базовыми элементами для генерации оптических вихрей, вложенных в различные типы сингулярных пучков [5]. Наиболее удивительной особенностью кристалла является способность создавать устойчивые полихроматические вихри с высокой энергетической эффективностью. В отличие от метода компьютерных голограмм [6,7] кристалл формирует как монохроматический [8-11], так и полихроматический вихревой пучок без каких-либо дополнительных приспособлений [12].

Целью настоящей статьи является рассмотрение еще одного способа, позволяющего генерировать сингулярные пучки, несущие спиральные краевые дислокации и оптические вихри, с помощью двух гиранизотропных кристаллов.

## 2. СПИРАЛЬНЫЕ ПУЧКИ

Вопрос состоит в том, чтобы извлечь пучок с чистой спиральной краевой дислокацией из комбинированного пучка после кристалла. Самый простой способ, позволяющий достичь желаемого – запустить линейно поляризованный пучок в кристалл (рис. 1).

Вообще говоря, изображения, представленные на рис.1, известны уже на протяжении довольно долгого времени в кристаллографии как спирали Эйри, и используются для распознавания правосторонних и левосторонних кристаллов.

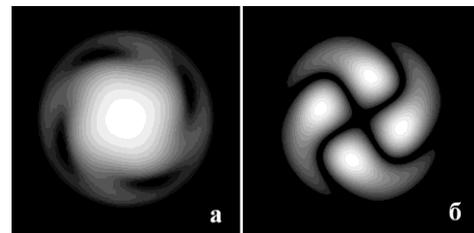


Рис. 1. Распределение интенсивности в спиральном пучке в (а)  $E_x$ , (б)  $E_y$  компоненты

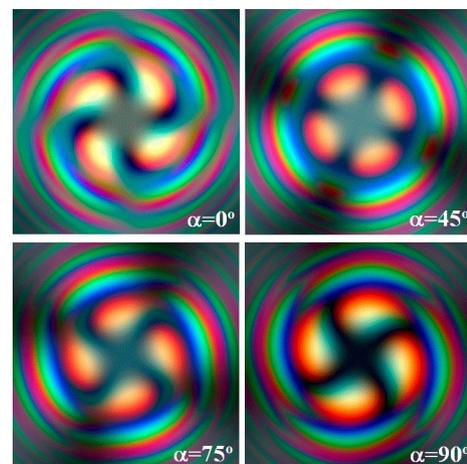


Рис. 2. Полихроматический спиральный пучок полученный под различными углами  $\alpha$  относительно осей поляризатора

При условии, что перетяжка пучка на входной грани кристалла равна  $r_0 = \rho$ , вклад потока энергии в кольцевую дислокацию пренебрежимо мал. Стоит

отметить так же, что это дает нам техническую возможность генерировать полихроматические спиральные пучки. Для этого надо всего лишь сфокусировать полихроматический свет в кристалл.

Изображения, приведенные на рис.2 являются результатом компьютерного моделирования процесса. Было обращено внимание на то, чтобы источник света был подобен абсолютно черному телу – для того, чтобы все лучи имели только лучевой радиус для всех длин волн. Это означает, что лучи у нас пространственно когерентны.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящее время наше внимание больше всего привлекают полихроматические сингулярные пучки. Вследствие этого мы сфокусировали наши усилия на генерации спиральных краевых дислокаций, встроенных в полихроматические пучки.

Схема экспериментальной установки показана на рис.3. Ключевым элементом установки является источник белого света, в качестве которого выступает галогеновая лампа, снабженная сферическим зеркалом. Угловая расходимость пучка после прохождения через пространственный линзовый фильтр становится меньше  $4^\circ$ . Затем луч проходит через поляризатор, чтобы стать линейно поляризованным. После этого пучок фокусируется линзой с фокусным расстоянием 3 см в кристалл LiNbO<sub>3</sub>. Далее снова фокусируем пучок, но уже в кристалл SiO<sub>2</sub>. Оптические оси кристаллов направлены вдоль осей пучка. Изображение пучка проецируется на экран CCD камеры и обрабатывается компьютером.

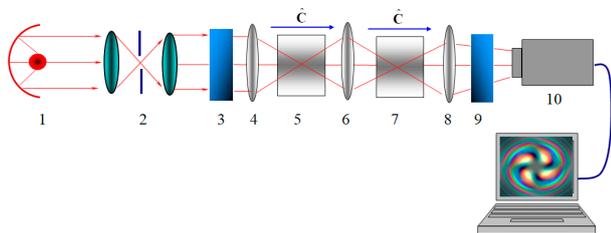


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1- галогеновая лампа, 2 – пространственный линзовый фильтр, 3,9 – поляризаторы, 4,6,8 – линзы, 5 – кристалл LiNbO<sub>3</sub>, 7- кристалл SiO<sub>2</sub>, 10- CCD камера,  $\hat{c}$  - единичный вектор оптических осей

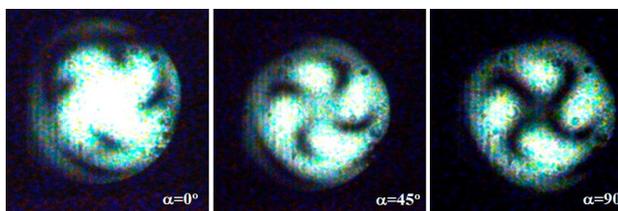


Рис. 4. Экспериментально полученные спиральные пучки под различными направлениями  $\alpha$  осей поляризатора

Мы рассматривали распределение интенсивности сингулярного пучка как функцию направления осей поляризатора  $\alpha$ . рис.4. демонстрирует типичные изображения сингулярного пучка. Когда угол равен

$\alpha = 90^\circ$ , чистая спиральная дислокация встраивается в пучок. Важно заметить, что дислокации не замыты в полихроматическом свете, а видны в виде четких спиральных линий с четырьмя ветвями.

### Выводы

Теоретически и экспериментально изучен новый тип монохроматических и полихроматических сингулярных пучков, несущих спиральные краевые дислокации и оптические вихри. Такие пучки могут быть созданы с помощью природных объектов – гироанізотропных кристаллов. Линейно поляризованный монохроматический или полихроматический пучок света прошедший через два гиротропных кристалла с противоположными знаками коэффициента гирации и поляризации, создает спиральные краевые дислокации – так же называемые кольца Эйри. Записаны выражения составляющие основу описываемого явления. Эти выражения дают нам возможность проанализировать различные случаи распространения сингулярных пучков. В качестве экспериментальных объектов была использована система из двух кристаллов: LiNbO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>, оптические оси которых направлены вдоль осей пучка. Пучок света, создаваемый галогеновой лампой, трансформируется данной системой таким образом, что полихроматическая фазовая сингулярность с четко выраженной центральной спиральной линией встраивается в него.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kiselev, A.P. New structures in paraxial Gaussian beams / A.P. Kiselev // Optics and Spectroscopy. – 2004. - Vol. 96. – P. 479-481.
- [2] Rodriguez-Morales, G. Exact nonparaxial beams of scalar Helmholtz equation / G. Rodriguez-Morales, S. Chaves-Cerda // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29. – P. 430-432.
- [3] Gutierrez-Vega, J.G. Helmholtz-Gauss waves / J.G. Gutierrez-Vega, M.A. Baudres / J. Opt. Soc. Am. – 2005. - Vol. 22. – P. 289-298.
- [4] Kotlyar, V.V. Vortex Laser Beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev - Boca Raton: CRC Press, 2018. – 404p.
- [5] Volyar, A.V. Vector singularities of Gaussian beams in uniaxial crystals: Optical vortex generation / A.V. Volyar, T.A Fadeeva, Y.A. Egorov // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28(11). – P. 958–961.
- [6] Soifer, V. A. Laser beam mode selection by computer-generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub - Boca Raton: CRC Press, – 1994. – 224 p.
- [7] Leach, J. Observation of chromatic effects near a white-light vortex / J. Leach and M.J. Padgett // New Journal of Physics – 2003. – Vol. 5. – P. 154.1-154.7.
- [8] Zhang, R.-Y. Electromagnetic energy–momentum tensors in general dispersive bianisotropic media / R.-Y. Zhang, Z. Xiong, N. Wang, Y. Chen, C. T. Chan // J. Opt. Soc. Am. B. – 2021. – Vol. 38. – P. 3135-3149.
- [9] Karimi, P. Spin-polarized unidirectional cylindrical waveguide in bianisotropic media / P. Karimi, B. Rejaei, A. Khavasi // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28. – P. 24022-24036.
- [10] Arteaga, O. Mueller matrix polarimetry of bianisotropic materials / O. Arteaga, B. Kahr // J. Opt. Soc. Am. B. – 2019. – Vol. 36. – P. F72-F83.
- [11] Liu, Y. Finite element analysis of electromagnetic waves in two-dimensional transformed bianisotropic media / Y. Liu, B. Gralak, S. Guenneau // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24. – P. 26479-26493.
- [12] Volyar, A.V. Fine structure of white optical vortices in crystals / A.V. Volyar, Y.A. Egorov, A. Rubass, T.A. Fadeeva // Technical Physics Letters. – 2004. - Vol. 30(8). – P. 701–704.