

**УДК 535**

**АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСЛЕ  
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА-ГАУССА В  
МАЛОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ**

*Ильсова А. А.\*, Халилов С. И., Рыбась А. Ф.*

*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени  
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия*

*\*E-mail: [arife-ilyasova@mail.ru](mailto:arife-ilyasova@mail.ru)*

В работе экспериментально показана возможность мультиплексирования сложного сигнала, несущего оптические вихри, в оптическом маломодовом волокне с  $V = 3.8$  и создаваемого пучками Лагерра-Гаусса с топологическим зарядом  $l = + - 1$  и циркулярной поляризацией  $s = + - 1$ . Тем самым удалось увеличить количество каналов для передачи информации в волокне, что обеспечит дополнительную степень свободы для мультиплексирования данных в волоконно-оптических линиях связи.

**Ключевые слова:** пучки Лагерра-Гаусса, мультиплексирование, топологический заряд, поляризация.

**PACS:** 42.81.Uv

**ВВЕДЕНИЕ**

Объем трафика данных через интернет достигает ограничений, налагаемых волоконно-оптическими нелинейными эффектами [1]. Типичным способом увеличения пропускной способности в оптических системах связи является мультиплексирование множества независимых каналов данных. Например, несколько независимых каналов данных могут быть расположены на различных длинах волн, с различными поляризациями, соответствующими мультиплексированию с разделением по длине волны, и мультиплексированию с разделением по поляризации [1].

Ранее в данных методах использовались стандартные Гауссовы пучки [1]. В своей работе мы использовали пучки Лагерра-Гаусса, известные как оптические вихри [2], которые при распространении в оптическом волокне благодаря спин-орбитальному взаимодействию имеют разные постоянные распространения, что позволит увеличить количество каналов для передачи информации в волокне. Передача информации в волокне с помощью оптических вихрей является одной из наиболее перспективных технологий увеличения скорости передачи данных. Хорошо известно [3–5], что поле излучения маломодового оптического волокна обычно содержит точки сингулярности, положение которых зависит от условий возбуждения, внешних возмущений и ориентации поляризатора, размещенного на выходе излучения из волокна. Единственным способом анализа процессов в волокне является сканирование тонкой структуры поля излучения этого волокна.

В работе экспериментально исследуется процесс мультиплексирования сложного сигнала, передаваемого пучками с различными типами поляризации и различными топологическими зарядами.

## 1. МОДЕЛЬ

Впервые о полях с фазовыми сингулярностями упоминается в статье Дж. Наем и М. Берри [3], где авторы дают подробный анализ особых состояний поля с геликоидальным волновым фронтом и различными его модификациями. Такие особенности поля авторы назвали дислокациями волнового фронта. Особое внимание было уделено чисто винтовой дислокации, которая была названа оптическим вихрем. И в настоящее время оптические вихри привлекают к себе внимание благодаря своим уникальным свойствам, имеющим значительное практическое значение.

Под дислокацией волнового фронта скалярного поля понимается требование одновременного обращения в нуль действительной и мнимой части поля. В частности, под дислокацией электромагнитного поля понимается требование равенства нулю действительной и мнимой частей однородно поляризованного в поперечном сечении электромагнитного поля. Математически это условие можно записать, учитывая то, что одновременно действительная и мнимая часть волновой функции обращается в нуль

$$\begin{cases} \operatorname{Re} \Psi(x, y, z) = 0, \\ \operatorname{Im} \Psi(x, y, z) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Решая эту систему уравнений, получаем особую линию, на которой действительная и мнимая части напряженности электрического и магнитного полей обращаются в нуль, а фаза поля является неопределенной. Эта линия и будет траекторией дислокации волнового фронта.

Свойства сингулярностей скалярных оптических полей наиболее ярко проявляются в пучках Лагерра-Гаусса  $LG_{l1}$  (оптические вихри). Волновой фронт пучков Лагерра-Гаусса  $LG_{l1}$  из-за неопределенности фазы в точке дислокации имеет вид прямого геликоида, а направление закрутки спирали геликоида определяет знак топологического заряда  $l$ . Расстояние между двумя «плоскостями» на одном листе геликоида равно длине волны. Оптический вихрь параксиального пучка может быть описан простым выражением

$$\Psi = (x \pm iy)^l \quad (2)$$

Известно, что в дальнем поле дифракции фундаментального гауссова пучка на краю диэлектрического клина формируется цепочка оптических вихрей. Механизм формирования оптического вихря при дифракции гауссова пучка на клине довольно прост [4]. Необходимо, чтобы гауссов пучок падал на поверхность прозрачного диэлектрического клина таким образом, что одна часть проходила по свободному пространству, а другая через клин.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментального исследования процесса мультиплексирования сигнала в маломодовом волокне была собрана экспериментальная установка (рис. 1). Принцип исследования пучка заключается в том, что после разделения линейно поляризованного пучка на два пучка, имеющих различное состояние поляризации (рис. 2) и различные знаки топологического заряда, мультиплексировать сигнал. При этом на выходе волокна, проанализировав суперпозицию пучков по модовому составу, мы можем различить входной сигнал. Отличие пучков по орбитальным угловым моментам возможно осуществить интерферометрическими методами, при измерении состояний поляризации с помощью поляризационных фильтров.

В волокне из-за спин-орбитального взаимодействия угловых моментов пучков, состояние топологических зарядов оптических вихрей и состояние поляризации пучков, смешиваются. Для выяснения основных поляризационных процессов, протекающих в волокне, мы использовали дифференциальный Стокс-поляриметр, позволяющий измерять распределение состояния поляризации излучения в каждом пикселе изображения и выводить соответствующую карту на дисплей компьютера.

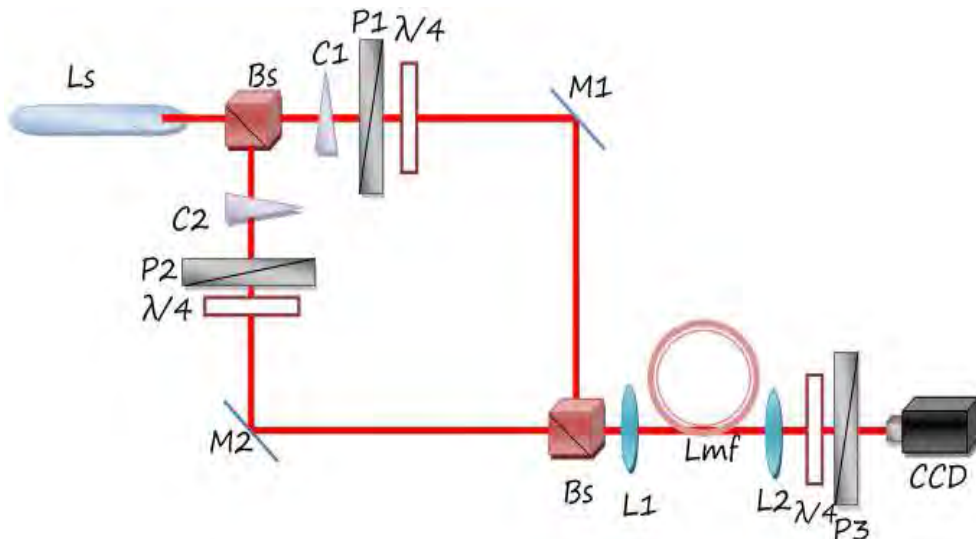


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (Ls) лазер, (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>) поляризаторы, ( $\lambda/4$ ) четвертьволновая пластинка, (Bs<sub>1</sub>, Bs<sub>2</sub>) делительные кубики, (L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>) линзы, (M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>) зеркала, (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>) диэлектрические клинья, (Fmf) маломодовое волокно ( $V = 3.4$ ), (CCD) камера

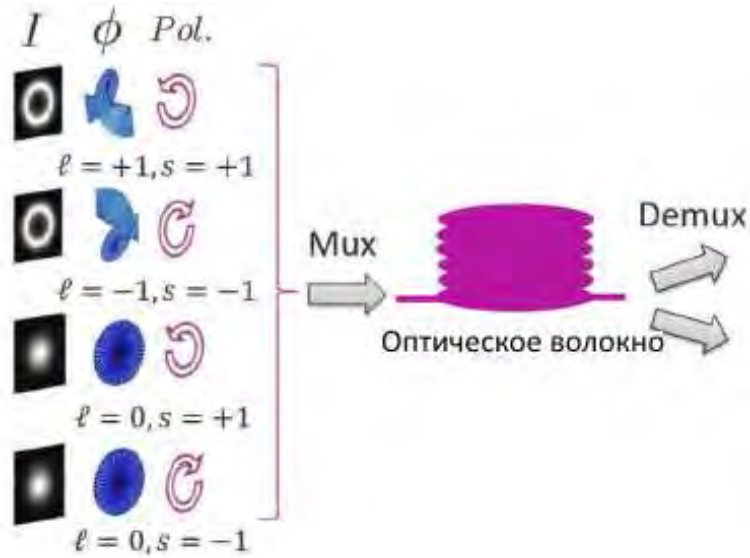


Рис. 2. Преобразование спина  $s = \pm 1$  реализуется с четвертьволновой пластиной

Линейно поляризованное излучение He-Ne (Ls1) лазера с длиной волны  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , проходя через делительный кубик ( $BS_1$ ), являющейся частью равноплечного интерферометра Маха-Цендера, разделяется на два пучка. Каждый из пучков Гаусса проходит через диэлектрический клин ( $C_1$  и  $C_2$ ) и дифрагирует, рождая оптические вихри. Данным метод генерации оптического вихря был использован в связи с простотой реализации и большой энергетической эффективностью, что является важным для возбуждения оптического волокна. Далее, для получения неоднородно поляризованного излучения, оба пучка проходили через поляризаторы ( $P_1$  и  $P_2$ ) и составную фазовую пластинку, настроенную так, чтобы при прохождении пластинки излучение лазера приобретало циркулярную поляризацию разных знаков (рис. 2). Затем два пучка сводились на делительном кубике поляризационного фильтра ( $BS_2$ ), тем самым пучки мультиплексировались. Маломодовое волокно, возбуждалось светом, прошедшим через микрообъектив ( $L_1$ ).

В работе использовалось навитое волокно [5] (рис. 3).

Было показано, что в зависимости от количества витков и шага  $H$  между витками можно добиться таких условий, при которых происходит высветка высших мод. Таким образом, вдоль оптической оси оптического волокна распространяется вихревая мода. Интерференционные картины пучков с разными топологическими зарядами после сведения на делительном кубике поляризационного фильтра ( $BS_2$ ) можно увидеть на рис. 4.

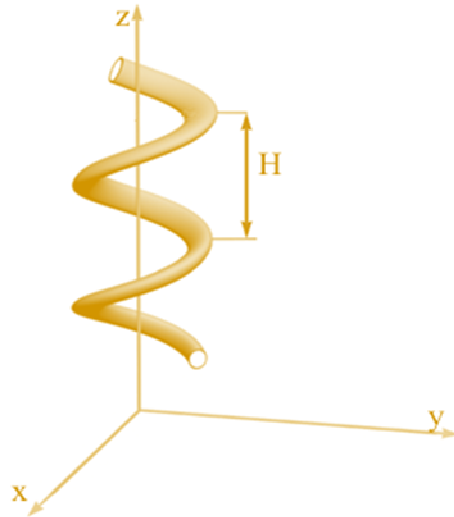


Рис. 3. Модель навитого малоимодового волокна

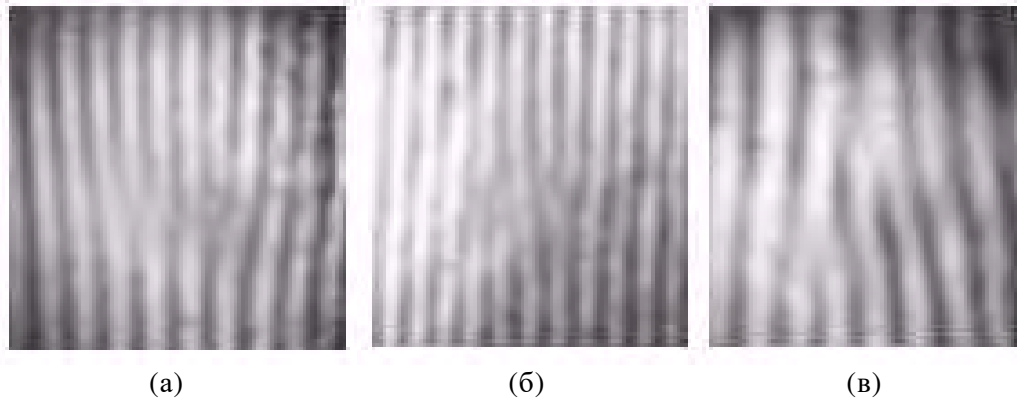


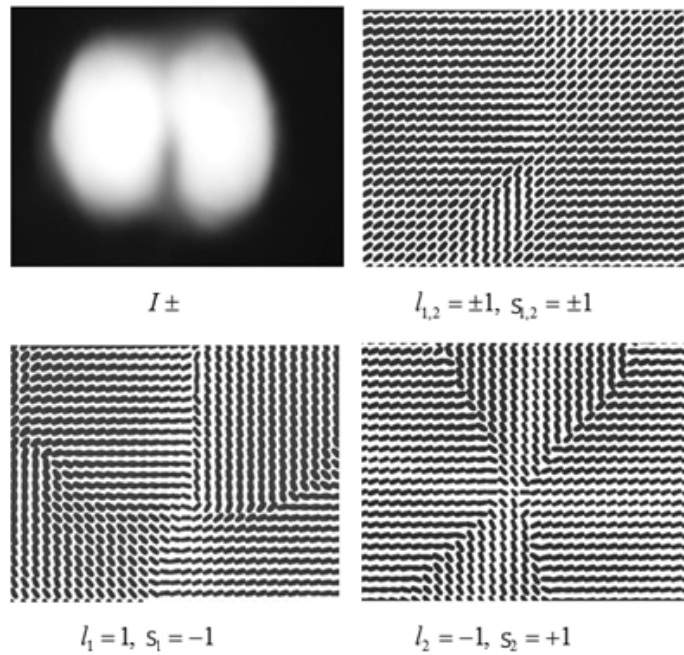
Рис. 4. Интерферограмма двух пучков с зарядами: а)  $l_1 = +1, l_2 = +1$ ; б)  $l_1 = +1, l_2 = -1$ ; в)  $l_1 = -1, l_2 = -1$

Для того что бы определить какие поляризационные процессы протекают в волокне мы воспользовались Стокс – поляриметром, с помощью которого можно измерить распределение поляризации, соответствующее каждому пикселю изображения и вывести поляризационную карту на экран монитора. Параметры Стокса рассчитывались по формулам

$$\begin{aligned}
 S_0 &= I_r + I_l & S_1 &= 2I_x - S_0 \\
 S_2 &= 2I_{\frac{\pi}{4}} - S_0 & S_3 &= I_r - I_l,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

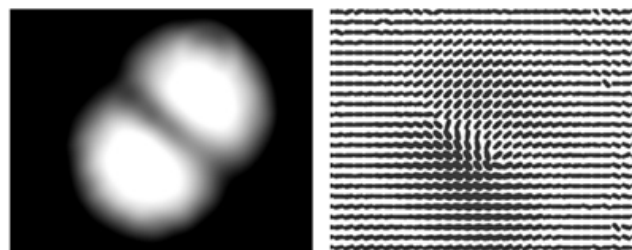
где  $I_r, I_l$  являются интенсивностями правоциркулярной и левоциркулярной компонент светового потока, соответствующие ориентации  $\lambda/4$  – пластины вдоль  $y$ -оси, а оси пропускания поляризатора под углами  $\alpha = 3\pi/4$  и  $\alpha = \pi/4$  к  $y$ -оси, в то время, как  $I_x, I_y$  – соответствуют  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \pi/4$  при том же положении оси четверть волновой пластины. Все полученные изображения фиксировались и обрабатывались с помощью программы Дифференциальный Поляриметр [6].

В ходе эксперимента были получены картины распределение интенсивности и распределения состояний поляризации сложного сигнала на выходе маломодового волокна (рис. 5 а, б, в).



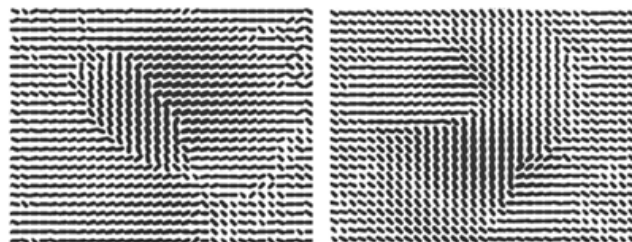
(а)

Рис. 5. а) Распределение интенсивности и карта распределения состояний поляризации сложного сигнала на выходе маломодового волокна: топологический заряд пучков  $l_1 = +1, l_2 = -1$  и поляризацией  $s_1 = -1, s_2 = +1$



$I \pm$

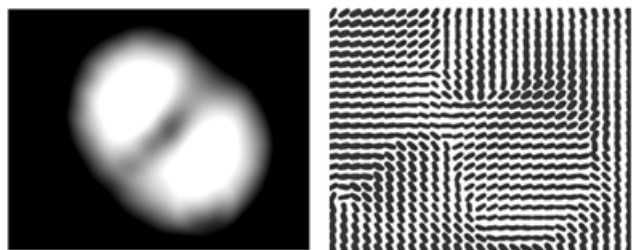
$l_{1,2} = +1, s_{1,2} = -1$



$l_1 = +1, s_1 = -1$

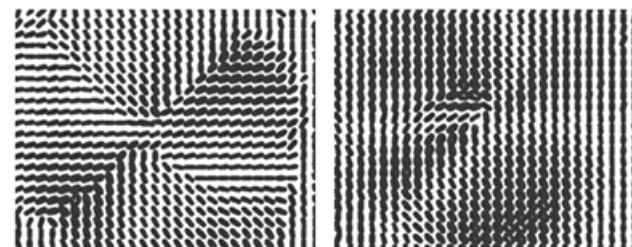
$l_2 = +1, s_2 = -1$

(б)



$I \pm$

$l_{1,2} = \pm 1, s_{1,2} = +1$



$l_1 = -1, s_1 = +1$

$l_2 = +1, s_2 = +1$

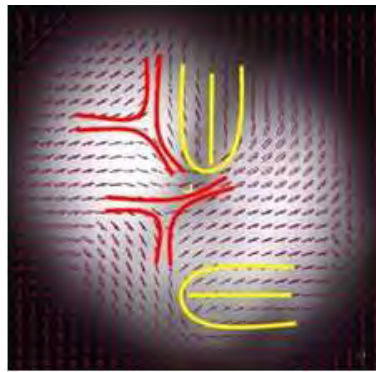
(в)

Продолжение Рис. 5. Распределение интенсивности и карта распределения состояний поляризации сложного сигнала на выходе малоимодового волокна: б) топологический заряд пучков  $l_1 = l_2 = +1$  и поляризацией  $s_{1,2} = -1$ ; в)  $l_1 = -1$  и

$l_2 = +1, s_{1,2} = +1$

Распределение интенсивности и поляризации, представленное на рисунке 5а, для пучков с длиной волны  $\lambda = 0,63 \mu m$ , топологическими зарядами  $l_1 = +1$  и  $l_2 = -1$  соответствует ортогональным  $s_1 = -1, s_2 = +1$  циркулярным поляризациям. Распределение интенсивности и поляризации (рис. 5б) соответствует пучкам с одинаковым топологическим зарядом  $l_1 = l_2 = +1$  и левоциркулярной  $s_{1,2} = -1$  поляризацией. Распределение интенсивности и поляризации (рис. 5 в) соответствует пучкам с топологическими зарядами  $l_1 = -1$  и  $l_2 = +1$  и правоциркулярными  $s_{1,2} = +1$  поляризациями.

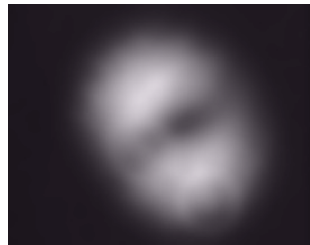
Множество поляризационных портретов пучков, содержат небольшое число поляризационных сингулярностей, в частности, по терминологии Дж.Ная их называют «звезда», «лимон» и «монстр» [7]. Типичное распределение состояния поляризации пучков с ортогональной поляризацией выполненное на фоне распределения интенсивности светового потока демонстрирует рис. 6 (а).



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 6. а) Суммарная поляризационная картина пучков имеющих ортогональную поляризацию с выделенными омбиликами.

Распределение интенсивности пучков: б) пучок с топологическим зарядом  $l = +1$ ;

в) пучок с топологическим зарядом  $l = -1$ , г) суммарная интенсивность пучков



Показаны интенсивности первого и второго пучка отдельно, а также суммарная интенсивность двух ортогональных пучков (рис. 6 б, в). В соответствии с классификацией Ная в нашем случае они соответствуют сингулярностям типа «звезда» и «лимон». Зная поляризационную картину после волокна, мы можем анализировать модовый состав поля излучения и состав сигнала на входе в волокно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был предложен метод, который позволяет повысить пропускную способность оптических волокон и повысить защищенность существующих каналов оптоволоконной связи. Экспериментально исследован процесс мультиплексирования сложного сигнала, несущего оптические вихри в оптическом маломодовом волокне, создаваемого пучками с различным топологическим зарядом и с различной поляризацией. Тем самым показано, что возможно мультиплексировать сложный сигнал, состоящий из двух или более пучков в оптическом волокне, тем самым увеличить количество каналов в волокне.

По картинам распределения поляризации при помощи сингулярностей осуществлен анализ сигнала. Обнаружено, что топологический индекс С-точек [7], соответствует заряду исходных пучков. Зная поляризационную картину после волокна, возможно анализировать модовый состав поля излучения и состав сигнала на входе в волокно. Проанализировав суперпозицию пучков по модовому составу, можно различить входной сигнал, проведя его окончательное демультиплексирование.

### Список литературы

1. Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, et al. // *Science*. 2013. Vol. 340. P. 1545–1548.
2. Singularities in waves and rays / M. Berry // *Physics of defects*. Les Houches Session XXXV. Amsterdam: North-Holland, 1980. P. 453–543.
3. Dislocations in wave trains / J. F. Nye, M. V. Berry // *Proceedings of Royal Society of London A*. 1974. Vol. 336. P. 165–190.
4. Формирование оптических вихрей в процессе дифракции цвета на диэлектрическом клине / В. Г. Шведов, Я. В. Издебская, А. Н. Алексеев, А. В. Воляр // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28, Вып. 6. С. 51–58.
5. Higher order modes and topological phase in the coiled elliptical weakly guiding optical fibres / С. N. Alexeyev, В. P. Lapin, М. А. Yavorsky // *Ukrainian journal of physical optics*. 2008. Vol. 9, № 1. P. 34–50.
6. Патент на полезную модель 168752 РФ, МПК G01J 4/04. Устройство для определения и исследования распределения поляризации / А. Ф. Рыбась, А. О. Погребная; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. 01.08.2016; опубл. 17.02.2017 Бюл. № 5.
7. Natural Focusing and Fine Structure of Light: Caustics and Wave Dislocations / J. F. Nye // Bristol: Institute of Physics Publishing. 1999. P. 328.
8. Оптика сингулярностей поля маломодового волокна. I. Циркулярные дислокации / А. В. Воляр, Т. А. Фадеева // *Оптика и спектроскопия*. 1998. Т. 85. №. 2. С. 287–294.

**ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF RADIATION FIELD AFTER  
MULTIPLEXING THE LAGUER-GAUSS BEAMS INTO A LOW-MODE  
OPTICAL FIBER**

*Ilyasova A. A.\*, Halilov S. I., Rubass A. F.*

*Institute of Physics and Technology, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol  
295007, Russia*

*\*E-mail: [arife-ilyasova@mail.ru](mailto:arife-ilyasova@mail.ru)*

The possibility of multiplexing of the complex signal which are carried out by optical vortex in an optical low-mode fiber with  $V = 3.8$  and created by Lagguere-Gaussian beams with a topological charge  $l = + - 1$  and circular polarization  $s = + - 1$ , are experimentally shown. Thus, it was possible to increase the number of channels for transmitting information at the optical fiber, which would provide an additional degree of freedom for multiplexing data in fiber-optical communication lines.

**Keywords:** Lagger-Gauss beams, multiplexing, topological charge, polarization.

**References**

1. N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, S. Ramachandran, *Science* **340**, 1545–1548 (2013).
2. M. Berry, Physics of defects. Les Houches Session XXXV. Amsterdam: North- Holiand, 453–543 (1980).
3. J. F. Nye, M. V. Berry, Proceedings of Royal Society of London A. **336**, 165–190 (1974).
4. V. G. Shvedov, Y. V. Izdebsky, A. N. Alekseev, A. V. Volyar, *Pis'ma Zh. Tech. Fiz.*, Issue 6, 51–58 (2002) [in Russian].
5. Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A., *Ukrainian journal of physical optics* **9**, № 34–50 (2008).
6. A. F. Rubass, A. P. Pogrebnaya, RF Patent 168752 Byull., No. 5 (2017).
7. J. F. Nye, Bristol: Institute of Physics Publishing, 328 (1999).
8. A. V. Volyar, T. A. Fadeyeva, *Optics and spectroscopy* **85**, No. 2, 287–294 (1998).

*Поступила в редакцию 29.06.2017 г. Принята к публикации 26.11.2017 г.  
Received June 29, 2017. Accepted for publication November 26, 2017*