

## Полностью волоконный вентиль SWAP-CNOT для оптических вихрей

Е.В. Баршак<sup>1</sup>, Б.П. Лапин<sup>1</sup>, Д.В. Викулин<sup>1</sup>, С.С. Алиева<sup>1</sup>, К.Н. Алексеев<sup>1</sup>, М.А. Яворский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,  
295007, Россия, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

### Аннотация

В данной работе исследовано распространение оптических вихрей в системе оптических волокон, состоящей из последовательно расположенных мультигеликоидального и скрученного анизотропного волокон. Показано, что в определенных резонансных режимах оптических волокон такая система позволяет осуществлять контролируемое изменение знака топологического заряда и циркулярной поляризации входного оптического вихря. Кроме того, установлены параметры мультигеликоидального и анизотропного волокон, при которых исследуемая система реализует логическую операцию, которая соответствует последовательному применению базовых двухкубитовых вентиля SWAP и CNOT над состояниями циркулярно поляризованных оптических вихрей.

**Ключевые слова:** оптические вихри, орбитальный угловой момент, логические элементы, анизотропные оптические волокна, двулучепреломление, волоконная оптика.

**Цитирование:** Баршак, Е. В. Полностью волоконный вентиль SWAP-CNOT для оптических вихрей / Е.В. Баршак, Б.П. Лапин, Д.В. Викулин, С.С. Алиева, К.Н. Алексеев, М.А. Яворский // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 853-859. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-938.

**Citation:** Barshak EV, Lapin BP, Vikulin DV, Alieva SS, Alexeyev CN, Yavorsky MA. All-fiber SWAP-CNOT gate for optical vortices. Computer Optics 2021; 45(6): 853-859. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-938.

### Введение

Многосторонние теоретические и экспериментальные исследования показали, что использование оптических вихрей (ОВ) [1] открывает новые практические возможности в различных областях: от геномной инженерии [2, 3] и микроскопии [4] до оптики атмосферы и астрофизики [5–7]. Следует выделить высокий потенциал применения ОВ в инфокоммуникационной сфере [8–10], базирующийся на возможности кодировать информацию в значениях орбитального углового момента (ОУМ) ОВ [1, 11–13]. Технологии, основанные на использовании орбитальных степеней свободы оптического излучения, имеют существенные преимущества в передаче данных над традиционными способами кодирования информации. Техника ОУМ-мультиплексирования, в которой реализуется передача информации на ортогональных состояниях ОВ с разными значениями ОУМ, позволяет значительно увеличить пропускную способность канала связи [8, 14–17]. Кроме того, передача информации в значениях ОУМ ОВ обеспечивает принципиально новый уровень защиты данных [18].

Практические возможности переносящих ОУМ ОВ проявляются также в области построения квантовых систем, оперирующих с квантовыми элементарными ячейками – кубитами. Классические состояния фотонов с ОУМ находят применение в моделировании квантовых алгоритмов для квантовых компьютеров. Такой подход позволяет проверить и отладить работу алгоритмов квантовых вычислений, избежав дорогостоящих экспериментов над квантовыми си-

стемами. Одной из основных задач данного направления исследований является проблема реализации логических вентилях (гейтов), выполняющих базовые логические операции над состояниями ОВ с разными значениями ОУМ. Ранее было установлено, что успешное решение подобных задач может осуществляться с помощью определенных типов оптических волокон, позволяющих передавать ОВ на расстояние, осуществлять контроль и управление их параметрами [19–27]. Так, на основе акустически-управляемых [19, 20] и мультигеликоидальных оптических волокон (МВ) [21] предложены способы реализации двухкубитного гейта CNOT (управляемое НЕ), в котором линейная поляризация оптического пучка является управляющим кубитом, а топологический заряд – управляемым. Недавние исследования [22] позволили установить возможность функционирования МВ как трехкубитного логического вентиля Тоффли, в котором управляющими кубитами служат радиальное число и состояние поляризации, а управляемым – топологический заряд входящего ОВ. Также было показано, что гейт Тоффли реализуется в скрученном анизотропном волокне (САВ), при этом циркулярная поляризация ОВ становится управляемым, а топологический заряд – управляющим кубитом. Отметим, что оптоволоконный подход к реализации логических элементов обладает рядом практических преимуществ, заключающихся в удобстве сопряжения чисто волоконных элементов друг с другом, включающем уменьшение потери мощности излучения и вносимых шумовых помех, а также в увеличении эффективности преобразования оптического пучка в волокне.

Упомянутые исследования обнаруживают перспективы практического применения ОВ, передаваемых в определенных типах оптических волокон, в области квантовых вычислений. Очевидно, что соблюдение принципов минимизации при построении логических устройств требует расширения набора операций над состояниями фотонов и оптимизации логических схем в оптических волокнах. В данной работе предлагается способ реализации волоконной схемы, состоящей из МВ и САВ (М-А), которая осуществляет сразу две двухкубитные операции SWAP и CNOT над оптическими вихрями.

**1. Резонансные модовые режимы в системе волокон М-А**

Модель САВ (рис. 1а) описывается следующим тензором диэлектрической проницаемости [23]:

$$\hat{\epsilon}_A(r, \varphi, z) = \tilde{\epsilon}(r)\hat{1} + \hat{\epsilon}_{An}(r, \varphi, z) + \hat{\epsilon}_{KMН}(r, \varphi). \quad (1)$$

Первое слагаемое в выражении (1)  $\tilde{\epsilon}(r) = \epsilon_c(1 - 2\Delta f(r))$  описывает диэлектрическую проницаемость идеального волокна (ИВ),  $\Delta = (\epsilon_c - \epsilon_{об})/2\epsilon_c$  – высота профиля диэлектрической проницаемости,  $\epsilon_c$  и  $\epsilon_{об}$  – значения диэлектрической проницаемости в сердцевине и оболочке волокна соответственно. В данной работе рассматриваются слаборасправляющие оптические волокна, для которых  $\Delta \ll 1$ , что обуславливает параксиальный характер распространения оптических мод. Функция  $f(r)$  определяет распределение показателя преломления среды и для рассматриваемых оптических волокон со ступенчатым профилем показателя преломления имеет вид  $f(r) = \Theta(R - 1)$ , где  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $R = r/r_0$ ,  $r_0$  – радиус сердцевины волокна. Используется цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$ , ось  $z$  которой совпадает с осью волокна.

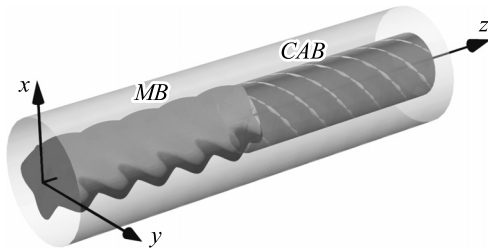


Рис. 1. Модель системы оптических волокон М-А: МВ с параметром симметрии  $\tau = 4$  и САВ

Второе слагаемое в выражении (1) описывает влияние линейной анизотропии материала волокна:

$$\hat{\epsilon}_{An}(z) = \delta\epsilon_{An} \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\delta\epsilon_{An} = (1/2)(\epsilon_x - \epsilon_y)$ ,  $\theta = qz \equiv (2\pi/H)z$  – угол поворота оси анизотропии,  $H$  – шаг скрутки волокна.

Третье слагаемое в (1) характеризует влияние крутильных механических напряжений (КМН):

$$\hat{\epsilon}_{KMН}(r, \varphi) = \delta\epsilon_{KMН} R \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 0 & -\cos \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\delta\epsilon_{KMН} = qp_{44}\epsilon_c^2 r_0$ ,  $p_{44}$  – элемент тензора фотоупругости в стандартных обозначениях.

Модели МВ (рис. 1б) соответствует тензор диэлектрической проницаемости следующего вида [21, 23]:

$$\hat{\epsilon}_M(r, \varphi, z) = \tilde{\epsilon}(r)\hat{1} + \epsilon_\Phi(r, \varphi, z)\hat{1} + \hat{\epsilon}_{KMН}(r, \varphi). \quad (4)$$

Здесь второе слагаемое описывает влияние анизотропии формы волокна на диэлектрическую проницаемость:

$$\epsilon_\Phi(r, \varphi, z) = -2\delta\epsilon_\Phi r f'_r(r) \cos \tau(\varphi - qz), \quad (5)$$

где  $\tau = 2, 4, \dots$  – параметр симметрии поперечного сечения,  $\delta\epsilon_\Phi = \epsilon_c \delta\Delta$ ,  $\delta \ll 1$  – параметр деформации поперечного сечения, штрих означает производную по  $r$ .

В предыдущих исследованиях [21, 24] было установлено, что модами высшего порядка САВ и МВ при условии  $\delta\epsilon_{An}, \delta\epsilon_\Phi \ll 2k^{-1} |3q - |\ell| \Delta / kr_0^2|$  оказываются циркулярно-поляризованные ОВ с  $|\ell| \geq 2$ :

$$|1, |\ell\rangle, |1, -|\ell\rangle, |1, -|\ell\rangle, |-1, -|\ell\rangle, \quad (6)$$

где

$$|\sigma, \ell\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\ell\varphi} F_{|\ell|}(r) \begin{pmatrix} 1, i\sigma, \frac{i}{\beta_{\ell r}} [rF'_{|\ell|} - \sigma\ell F_{|\ell|}(r)] e^{i\sigma\varphi} \end{pmatrix}^T,$$

$\ell = \pm 2, \pm 3, \dots$  – топологический заряд ОВ,  $\sigma = \pm 1$  описывает знак циркулярной поляризации,  $T$  означает транспонирование. Радиальная функция  $F_{|\ell|}(r)$  выражается через функции Бесселя  $J_{|\ell|}(r)$  и  $K_{|\ell|}(r)$  в сердцевине и оболочке волокна соответственно [28]. Радиальное число здесь опущено для упрощения записи.

Отметим, что высшими модами с  $|\ell| = 1$  рассматриваемых волокон оказываются не четыре циркулярно-поляризованных вихря, как в выражении (6), а два ОВ  $|1, 1\rangle, |-1, -1\rangle$ , а также ТЕ- и ТМ-мода [23]. Поскольку в данной работе исследуется возможность осуществления логических операций над ОВ, мы ограничиваемся случаем  $|\ell| \geq 2$ , в котором представлены четыре независимых ОВ.

Постоянные распространения мод (6) имеют вид:

$$\beta_{\sigma, \ell} = \tilde{\beta}_{|\ell|} + \delta\beta_{\sigma, \ell}^{CO} + (\sigma + \ell)aq, \quad (7)$$

где  $\tilde{\beta}_{|\ell|}$  – известная скалярная постоянная распространения [28], второе слагаемое

$$\delta\beta_{\sigma, \ell}^{CO} = \Delta(F'(1) - \sigma\ell) / 2\tilde{\beta}_{|\ell|} r_0^2(R) Q_{|\ell|}, \quad (8)$$

где

$$Q_{|\ell|} = \int_0^\infty R F_{|\ell|}^2(R) dR,$$

обусловлено оптическим спин-орбитальным взаимодействием (СОВ), а третье – влиянием скрутки, включая КМН, где  $a = 1 - \varepsilon_c |p_{44}|/2$ .

Принципиально отметить, что зависимость постоянных распространения (7) от параметра скрутки  $q$  определяет степень влияния анизотропии (материала в случае САВ или формы в случае МВ) на структуру мод волокна. Так, поля (6) остаются модами САВ и МВ, пока спектр (7) является невырожденным. Однако при определенных резонансных значениях шага скрутки имеет место двукратное вырождение постоянных распространения (7) (рис. 2).

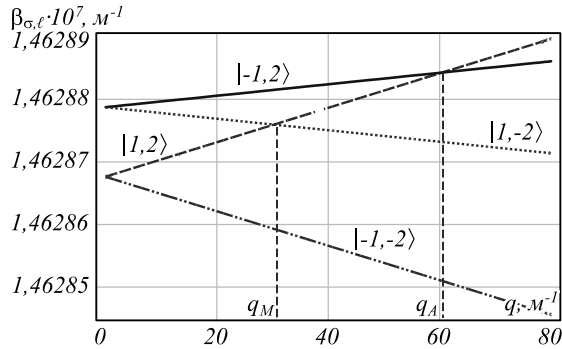


Рис. 2. Постоянные распространения (7)  $|\ell| = 2$  мод (6) как функция параметра скрутки  $q$ . Точки пересечения кривых – резонансные точки, вблизи которых влияние анизотропии материала (в точке  $q_A$ ) или формы (в точке  $q_M$ ) волокна приводит к новой структуре мод. Параметры волокна: волноводный параметр  $V = 6,58$ ,  $\Delta = 0,01$ ,  $r_0 = 5\lambda_{He-Ne}$ ,  $p_{44} = 0,075$

В таких точках резонанса степень влияния анизотропии материала или формы волокна резко возрастает и приводит к формированию новой структуры мод. Так, в САВ моды в резонансной точке  $q_A = \Delta |\ell| r_0^2 (2a\tilde{\beta}_{|\ell|} Q_{|\ell|})^{-1}$  имеют вид [22]:

$$\begin{aligned} |\Psi_1^{(A)}\rangle &= \cos \alpha |1, |\ell|\rangle + \sin \alpha |-1, |\ell|\rangle, \\ |\Psi_2^{(A)}\rangle &= \sin \alpha |1, |\ell|\rangle - \cos \alpha |-1, |\ell|\rangle, \\ |\Psi_3^{(A)}\rangle &= |1, -|\ell|\rangle, \quad |\Psi_4^{(A)}\rangle = |-1, -|\ell|\rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\cos(2\alpha) = a\varepsilon_A / \Gamma_A$ ,  $\varepsilon_A = q - q_A$ ,  $\Gamma_A = \sqrt{(a\varepsilon_A)^2 + \Omega_A^2}$ ,  $\Omega_A = k^2 \delta\varepsilon_{An} / 2\tilde{\beta}_{|\ell|}$ ,  $k$  – волновое число.

Постоянные распространения мод (9):

$$\begin{aligned} \beta_{1,2}^{(A)} &= \beta_{1,|\ell|}(q_A) - a\varepsilon_A \pm \Gamma_A, \\ \beta_{3,4}^{(A)} &= \tilde{\beta}_{|\ell|} + \delta\beta_{-1, \pm|\ell|}^{CO} + (\pm 1 - |\ell|)aq. \end{aligned} \quad (10)$$

Моды МВ и их постоянные распространения вблизи резонансного значения параметра скрутки  $q_M = \Delta r_0^2 (2a\tilde{\beta}_{|\ell|} Q_{|\ell|})^{-1}$  представлены следующими выражениями [21]:

$$\begin{aligned} |\Psi_1^{(M)}\rangle &= \cos \mu |1, |\ell|\rangle + \sin \mu |1, -|\ell|\rangle, \\ |\Psi_2^{(M)}\rangle &= \sin \mu |1, |\ell|\rangle - \cos \mu |1, -|\ell|\rangle, \\ |\Psi_3^{(M)}\rangle &= |-1, |\ell|\rangle, \quad |\Psi_4^{(M)}\rangle = |-1, -|\ell|\rangle, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \beta_{1,2}^{(M)} &= \beta_{1,|\ell|}(q_M) - a\varepsilon_M \pm \Gamma_M, \\ \beta_{3,4}^{(M)} &= \tilde{\beta}_{|\ell|} + \delta\beta_{-1, \pm|\ell|}^{CO} + (-1 \pm |\ell|)aq, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\cos(2\mu) = a |\ell| \varepsilon_M / \Gamma_M$ ,  $\varepsilon_M = q - q_M$ ,

$$\Gamma_M = \sqrt{(a|\ell|\varepsilon_M)^2 + \Omega_M^2},$$

$$\Omega_M = -k^2 \varepsilon_c \Delta \delta / 2\tilde{\beta}_{|\ell|} r_0^2 (R) \int_0^\infty RF_{|\ell|}^2(R) dR.$$

Выражения для мод (9) и (12) справедливы при условии  $\delta\varepsilon_{An}$ ,  $\delta\varepsilon \ll 4 |\ell| \Delta (kr_0)^{-2}$ , когда влияние анизотропии (материала или формы) приводит к гибридизации только тех ОВ, чьи уровни пересекаются в резонансной точке.

Используя приведенные выражения (9)–(12), рассмотрим распространение циркулярно поляризованных ОВ  $|\sigma, \ell\rangle$  в системе оптических волокон, состоящей из последовательно соединенного МВ и САВ, находящихся в резонансных режимах.

## 2. Трансформация оптических вихрей в системе оптических волокон М-А

Пусть на входе первого в системе МВ вблизи резонансной точки  $q_M$  возбуждается ОВ:

$$|\Psi(z=0)\rangle = |\sigma, \ell\rangle. \quad (13)$$

Это приводит к возникновению в МВ поля, представленного суперпозицией собственных мод МВ (11):

$$|\Psi^{(M)}(z)\rangle = \sum_i b_i |\Psi_i^{(M)}\rangle \exp(i\beta_i^{(M)}z). \quad (14)$$

Коэффициенты разложения в (14) легко найти из граничных условий к уравнениям Максвелла, которые в параксиальном приближении сводятся к непрерывности полей на входном торце волокна:

$$|\sigma, \ell\rangle = \sum_i b_i |\Psi_i^{(M)}\rangle. \quad (15)$$

В табл. 1 приведены коэффициенты  $b_i$  для случаев возбуждения на входе МВ право- и левоциркулярно поляризованных ОВ с топологическими зарядами  $\pm |\ell|$ .

Табл. 1. Коэффициенты разложения (14) ОВ для МВ

ОВ на входе МВ	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
$ 1,  \ell \rangle$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0
$ -1,  \ell \rangle$	0	0	1	0
$ 1, - \ell \rangle$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0
$ -1, - \ell \rangle$	0	0	0	1

В следующем волокне рассматриваемой системы – САВ – поле записывается в виде суперпозиции мод (9):

$$|\Psi^{(A)}(z)\rangle = \sum_i c_i |\Psi_i^{(A)}\rangle \exp(i\beta_i^{(A)}z). \quad (16)$$

Чтобы найти связь коэффициентов разложения (16)  $c_i$  и (14)  $b_i$ , используем условие непрерывности поля на границе МВ и САВ при  $z = z_M$  ( $z_M$  – длина МВ):

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos \alpha \exp(-i\beta_1^{(A)} z_M) \left[ b_1 \cos \mu \exp(i\beta_1^{(M)} z_M) + b_2 \sin \mu \exp(i\beta_2^{(M)} z_M) + b_3 \operatorname{tg} \alpha \exp(i\beta_3^{(M)} z_M) \right], \\ c_2 &= \sin \alpha \exp(-i\beta_2^{(A)} z_M) \left[ b_1 \cos \mu \exp(i\beta_1^{(M)} z_M) + b_2 \sin \mu \exp(i\beta_2^{(M)} z_M) - b_3 \operatorname{ctg} \alpha \exp(i\beta_3^{(M)} z_M) \right], \\ c_3 &= \exp(-i\beta_3^{(A)} z_M) \left[ b_1 \sin \mu \exp(i\beta_1^{(M)} z_M) - b_2 \cos \mu \exp(i\beta_2^{(M)} z_M) \right], \quad c_4 = b_4 \exp(i(\beta_4^{(M)} - \beta_4^{(A)}) z_M). \end{aligned} \quad (18)$$

Используя выражения для мод (9), запишем поле (16) в следующем виде:

$$\begin{aligned} |\Psi^{(A)}(z_A)\rangle &= d_{1,|q|} |1, |\ell\rangle + d_{-1,|q|} |-1, |\ell\rangle + \\ &+ d_{1,-|q|} |1, -|\ell\rangle + d_{-1,-|q|} |-1, -|\ell\rangle, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} d_{1,|q|} &= c_1 \cos \alpha \exp(i\beta_1^{(A)} z_A) + c_2 \sin \alpha \exp(i\beta_2^{(A)} z_A), \\ d_{-1,|q|} &= c_1 \sin \alpha \exp(i\beta_1^{(A)} z_A) - c_2 \cos \alpha \exp(i\beta_2^{(A)} z_A), \\ d_{1,-|q|} &= c_3 \exp(i\beta_3^{(A)} z_A), \quad d_{-1,-|q|} = c_4 \exp(i\beta_4^{(A)} z_A), \end{aligned}$$

$z_A$  – длина САВ. Коэффициенты  $d_{\sigma,\ell}$  позволяют определить энергию  $W_{\sigma,\ell}$ , сосредоточенную в соответствующем парциальном ОВ поля (19):

$$W_{\sigma,\ell} = |d_{\sigma,\ell}|^2. \quad (20)$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда  $|\ell| = 2$ . На рис. 3а,б продемонстрирована зависимость величины энергии парциальных ОВ  $W_{\sigma,\pm 2}$  на выходе системы М-А в зависимости от длины САВ. Параметры МВ и САВ в данном примере заданы в рамках диапазонов типичных значений оптических волокон. Величина скрутки такова, что оба волокна системы М-А находятся в резонансных режимах, в которых реализуется особая модовая структура: (9) в САВ и (11) в МВ при параметрах скрутки  $q_A = 60,5 \text{ м}^{-1}$  и  $q_M = 30,2 \text{ м}^{-1}$  [22] соответственно. Рис. 3а соответствует случаю, когда на входе системы М-А возбуждается правоциркулярно поляризованный ОВ с отрицательным знаком топологического заряда  $|1, -2\rangle$ . Длина МВ фиксирована и выбрана равной  $z_M = 0,25 \text{ м}$ , что обусловлено особенностью распределения энер-

$$\sum_i b_i |\Psi_i^{(M)}\rangle \exp(i\beta_i^{(M)} z_M) = \sum_i c_i |\Psi_i^{(A)}\rangle \exp(i\beta_i^{(A)} z_M). \quad (17)$$

Коэффициенты  $c_i$  получаем в виде:

гии в МВ на этой длине [22]. Действительно, оказывается, что благодаря связи правоциркулярно поляризованных ОВ с противоположным знаком топологического заряда в резонансных модах МВ (11) можно выбрать такие параметры волокна, что на некоторой длине МВ ( $z_M = 0,25 \text{ м}$  в рассматриваемом примере) энергия ОВ  $|1, -2\rangle$  полностью аккумулируется в ОВ  $|1, 2\rangle$ , и наоборот. Таким образом, если на вход системы М-А подается ОВ  $|1, -2\rangle$ , при указанной длине МВ на входе САВ оказывается ОВ  $|1, 2\rangle$  (см. рис 3а при  $z_A = 0$ ). Аналогично из структуры мод САВ (9) видно, что ОВ  $|1, 2\rangle$  в САВ может быть преобразован в ортогональный ОВ с тем же знаком топологического заряда  $|-1, 2\rangle$ . На рис. 3а показано, что на длине САВ  $z_A = 0,6 \text{ м}$  вся энергия сконцентрирована в ОВ  $|-1, 2\rangle$ . Таким образом, действие системы М-А сводится к преобразованию поля  $|1, -2\rangle$  в ОВ с противоположным знаком циркулярной поляризации и топологического заряда:

$$|1, -2\rangle \rightarrow |-1, 2\rangle. \quad (21)$$

Соответствующие величины ОУМ, спинового (СУМ) и полного углового момента (ПУМ) поля на выходе системы М-А представлены на рис. 4а. Отметим, что инверсия ОУМ входного ОВ в системе М-А происходит вне зависимости от длины САВ.

На рис. 3б и 4б показано распределение энергии и величины угловых моментов поля (19) при возбуждении системы ОВ  $|-1, 2\rangle$ . Такой ОВ является модой МВ, поэтому не преобразуется в первом волокне системы. При этом в САВ на длине  $z_A = 0,6 \text{ м}$  входной ОВ полностью трансформируется в ОВ с ортогональной поляризацией:

$$|-1, 2\rangle \rightarrow |1, 2\rangle. \quad (22)$$

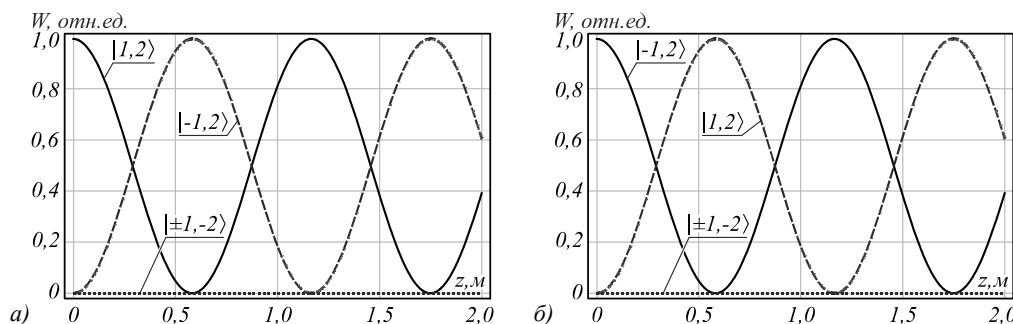


Рис. 3. Распределение энергии поля (19) по парциальным ОВ в системе М-А в зависимости от длины САВ, если на входе системы возбуждается ОВ:  $|1, -2\rangle$  (а),  $|-1, 2\rangle$  (б). Параметры волокон в системе М-А: волноводный параметр  $V = 6,58$ ,  $\Delta = 0,01$ ,  $r_0 = 5\lambda_{\text{He-Ne}}$ ,  $p_{44} = 0,075$ ,  $\delta = 10^{-4}$ ,  $q_M = 30,2 \text{ м}^{-1}$ ,  $z_M = 0,25 \text{ м}$ ,  $\delta\epsilon_{\text{Ah}} = 8 \cdot 10^{-7}$ ,  $q_A = 60,5 \text{ м}^{-1}$

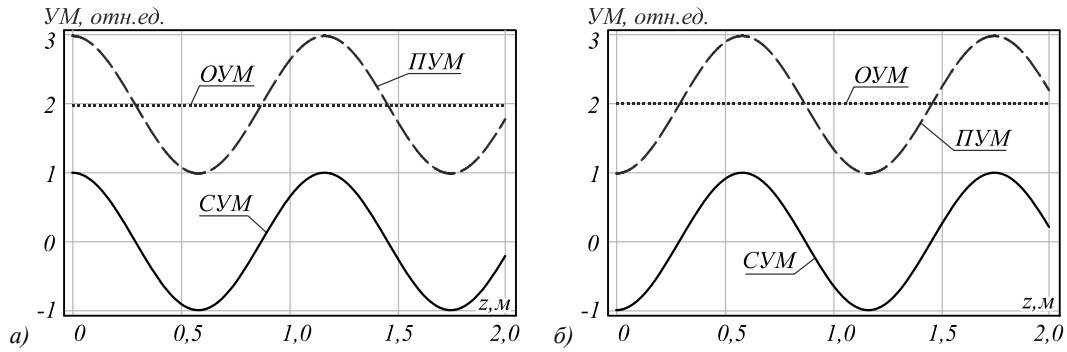


Рис. 4. OUM, CUM и PUM поля (19) в зависимости от длины САВ, если на входе системы М-А возбуждается ОВ:  $|1, -2\rangle$  (а),  $|-1, 2\rangle$  (б). Параметры волокон в системе М-А: волноводный параметр  $V=6,58$ ,  $\Delta=0,01$ ,  $r_0=5\lambda_{He-Ne}$ ,  $p_{44}=0,075$ ,  $\delta=10^{-4}$ ,  $q_M=30,2 \text{ м}^{-1}$ ,  $z_M=0,25 \text{ м}$ ,  $\delta\epsilon_{An}=8 \cdot 10^{-7}$ ,  $q_A=60,5 \text{ м}^{-1}$

Кроме того, установлено, что энергия входящего ОВ  $|1, 2\rangle$  в рассматриваемой системе волокон полностью переходит в энергию ОВ с противоположным знаком топологического заряда:

$$|1, 2\rangle \rightarrow |1, -2\rangle. \tag{23}$$

Такая трансформация ОВ происходит в МВ на длине  $z_M=0,25 \text{ м}$ , так что на входе САВ в этом случае оказывается его собственная мода – ОВ  $|1, -2\rangle$ , поэтому конверсия (23) не зависит от длины САВ.

Отметим, что при отклонении величины шага скрутки от резонансного значения энергетическая эффективность преобразований (21–23) снижается. В рассматриваемом примере в МВ энергетическая эффективность снижается на 5%, если шаг скрутки отклоняется на 5 мм, а в САВ – при отклонении шага скрутки на 1 мм. При этом отклонение от оптимальной длины МВ на 1 см снижает эффективность трансформации ОВ на 0,4%. Отклонение величины длины САВ от оптимальной в рамках 1 см не оказывает заметного влияния (см. рис. 3а,б) – эффективность преобразования снижается менее чем на 0,1%.

Наконец, ОВ  $|-1, -2\rangle$ , являясь собственной модой как МВ, так и САВ, не претерпевает изменений в системе, состоящей из данных оптических волокон:

$$|-1, -2\rangle \rightarrow |-1, -2\rangle. \tag{24}$$

### 3. Схема квантовых гейтов SWAP→CNOT

Используя установленные преобразования ОВ (21–24), покажем, что система волокон М-А может быть использована для реализации логической схемы для ОВ, эквивалентной последовательному выполнению двух фундаментальных квантовых логических вентилей SWAP и CNOT.

Логические элементы SWAP и CNOT имеют два входа и два выхода и могут быть описаны соответствующими таблицами истинности (табл. 2), где А, В обозначают сигнал на входе, А', В' – на выходе логического элемента.

Таблица истинности логической схемы, состоящей из вентилей SWAP и CNOT, записывается в форме, приведенной в табл. 3.

Табл. 2. Таблицы истинности SWAP и CNOT гейтов

SWAP				CNOT			
A	B	A'	B'	A	B	A'	B'
0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0

Табл. 3. Таблица истинности схемы последовательного выполнения SWAP и CNOT

A	B	A'	B'
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	1	0

В качестве входного кубита А будем рассматривать состояние поляризации ОВ на входе системы оптических волокон М-А, а в качестве кубита В – его топологический заряд. Пусть  $\sigma=-1$  соответствует  $A=0$ ,  $\sigma=1-A=1$ ,  $\ell=-2-B=0$ ,  $\ell=2-B=1$ . Подавая на вход системы М-А с установленными длинами МВ ( $z_M=0,25 \text{ м}$ ) и САВ ( $z_A=0,6 \text{ м}$ ) ОВ  $|-1, -2\rangle$ ,  $|-1, 2\rangle$ ,  $|1, 2\rangle$ , на выходе системы получим ОВ согласно выражениям (21–24). На рис. 5 показаны состояние поляризации и топологического заряда ОВ на входе и выходе М-А. Сравнивая полученный результат с табл. 3, можно заключить, что система М-А с установленными параметрами применима для реализации операции последовательного выполнения двух квантовых гейтов SWAP и CNOT. Анализ показывает (см. рис. 3), что точный подбор параметров оптических волокон в системе М-А позволяет добиться высокой энергетической эффективности преобразования ОВ (до 100%), требуемой для корректного выполнения предлагаемой логической схемы SWAP и CNOT гейтов.

Может показаться, что рассмотренная схема последовательного выполнения двух гейтов SWAP и CNOT сводится к реализации гейта SWAP в первом МВ системы, а гейта CNOT – во втором САВ. Однако это не является истиной. Более того, особенностью данной системы оказывается тот факт, что если придерживаться выбранного выше правила соответствия поляризации ОВ кубиту А, а его топологического заряда – кубиту В, то оказывается, что в МВ реализует-

ся гейт CNOT [21], а не SWAP, как можно было бы предположить. При этих условиях в САВ не очевидна возможность реализации какой-либо базовой логической операции.

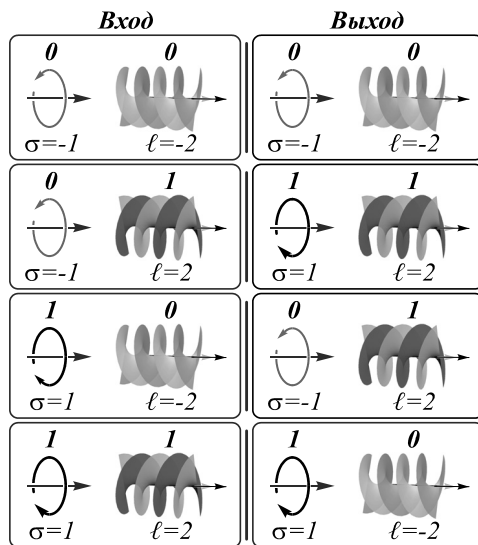


Рис. 5. ОВ на входе и выходе в системе М-А: реализация логической схемы двух квантовых гейтов SWAP и CNOT.

Параметры волокон в системе М-А:  $V=6,58$ ,  $\Delta=0,01$ ,  $r_0=5\lambda_{He-Ne}$ ,  $p_{44}=0,075$ ,  $\delta=10^{-4}$ ,  $q_M=30,2 \text{ м}^{-1}$ ,  $z_M=0,25 \text{ м}$ ,  $\delta\epsilon_{An}=8 \cdot 10^{-7}$ ,  $q_A=60,5 \text{ м}^{-1}$

### Заключение

В данной работе исследовано распространение ОВ, обладающих целым на фотон ОУМ, в системе последовательно соединенных оптических волокон: МВ и САВ. Показано, что при определенных резонансных режимах оптических волокон такая система позволяет осуществлять управление знаком топологического заряда и циркулярной поляризации выходного поля посредством изменения знака ОУМ и СУМ входного оптического вихря. На основе этого эффекта предложена полностью волоконная реализация логической схемы, состоящей из двух квантовых гейтов SWAP и CNOT. Численно установлены параметры МВ и САВ, позволяющие обеспечить эффективную реализацию логической схемы SWAP и CNOT гейта в системе М-А.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант № МК-329.2020.2 (исследование управления угловым моментом оптических вихрей), и РФФИ, проект № 20-47-910001 (численный подбор параметров волокон для реализации вентиля SWAP и CNOT).

### Литература

1. **Shen, Y.** Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, X. Zhenwei, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8. – 90. – DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.

2. **Friese, M.E.J.** Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles / M.E.J. Friese, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop // *Nature*. – 1998. – Vol. 394. – P. 348-350.

3. **Garces-Chavez, V.** Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle / V. Garces-Chavez, K. Volke-Sepulveda, S. Chavez-Cerda, W. Sibbett, K. Dholakia // *Physical Review A*. – 2002. – Vol. 66. – 063402.

4. **Spektor, B.** Singular beam microscopy / B. Spektor, A. Normatov, J. Shamir // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47. – P. A78-A87.

5. **Foo, G.** Optical vortex coronagraph / G. Foo, D.M. Palacios, G.A. Swartzlander, Jr. // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30. – P. 3308-3310.

6. **Swartzlander, G.A., Jr.** Peering into darkness with a vortex spatial filter / G.A. Swartzlander, Jr. // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26. – P. 497-499.

7. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.

8. **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. – 1545.

9. **Qiao, W.** Approach to multiplexing fiber communication with cylindrical vector beams / W. Qiao, T. Lei, Z. Wu, S. Gao, Z. Li, X. Yuan // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42. – P. 2579-2582.

10. **Карпеев, С.В.** Передача через атмосферу высокоскоростного сигнала формата 1000BASE-SX/LX вихревыми пучками ближнего ИК-диапазона при помощи модифицированных SFP-трансиверов DEM-310GT / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 578-581. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.

11. **Yao, M.** Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / M. Yao, M.J. Padgett // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – Vol. 3. – P. 161-204.

12. **Willner, E.** Optical communications using orbital angular momentum beams / E. Willner, H. Huang, Y. Yan [et al.] // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7. – P. 66-106.

13. **Padgett, M.J.** Orbital angular momentum 25 years on / M.J. Padgett // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 10. – P. 11265-11274. – DOI: 10.1364/OE.25.011265.

14. **Essiambre, R.** Capacity trends and limits of optical communication networks / R. Essiambre, R. Tkach // *Proceedings of the IEEE*. – 2012. – Vol. 100. – P. 1035-1055.

15. **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 // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – P. 488-496.

16. **Wang, F.-X.** Scalable orbital-angular-momentum sorting without destroying photon states / F.-X. Wang, W. Chen, Z.-Q. Yin, S. Wang, G.-C. Guo, Z.-F. Han // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 94. – 033847.

17. **Dudley, A.** All-digital wavefront sensing for structured light beams / A. Dudley, G. Milione, P.R. Alfano, A. Forbes // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22. – P. 14031-14040.

18. **Franke-Arnold, S.** Uncertainty principle for angular position and angular momentum / S. Franke-Arnold, S. Barnett,

- E. Yao, J. Leach, J. Courtial, M. Padgett // *New Journal of Physics*. – 2004. – Vol. 6. – 103.
19. **Yavorsky, M.A.** Polarization-dependent orbital angular momentum flipping in fibers with acousto-optic interaction / M.A. Yavorsky, D.V. Vikulin, E.V. Barshak, B.P. Lapin, C.N. Alexeyev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1368. – 022067. – DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022067.
  20. **Yavorsky, M.A.** All-fiber polarization-dependent optical-vortex-controlling via acousto-optic interaction / M.A. Yavorsky, D.V. Vikulin, E.V. Barshak, B.P. Lapin, C.N. Alexeyev // *Days on Diffraction (DD)*. – 2019. – P. 238-243. – DOI: 10.1109/DD46733.2019.9016567.
  21. **Yavorsky, M.A.** Spin-dependent OAM flipping in multihelical optical fibres / M.A. Yavorsky, E.V. Barshak, D.V. Vikulin, C.N. Alexeyev // *Journal of Optics*. – 2018. – Vol. 20, Issue 11. – 115601. – DOI: 10.1088/2040-8986/aae3ff.
  22. **Alexeyev, C.** Toffoli gate in twisted anisotropic and multihelical optical fibers / C. Alexeyev, E. Barshak, D.V. Vikulin, B. Lapin, M. Yavorsky // *Days on Diffraction (DD)*. – 2020. – P. 7-12. – DOI: 10.1109/DD49902.2020.9274577.
  23. **Barshak, E.V.** Twisted anisotropic fibers for robust orbital-angular-momentum-based information transmission / E.V. Barshak, C.N. Alexeyev, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Physical Review A*. – 2015. – Vol. 91. – 033833. – DOI: 10.1103/PhysRevA.91.033833.
  24. **Barshak, E.V.** Robust higher-order optical vortices for information transmission in twisted anisotropic optical fibers / E.V. Barshak, D.V. Vikulin, B.P. Lapin, S.S. Alieva, C.N. Alexeyev, M.A. Yavorsky // *Journal of Optics*. – 2021. – Vol. 23, Issue 3. – 035603. – DOI: 10.1088/2040-8986/abda85.
  25. **Alexeyev, C.N.** Transformation of optical vortices in elliptical and anisotropic optical fibres / C.N. Alexeyev, A.V. Volyar, M.A. Yavorsky // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2007. – Vol. 9, Issue 4. – 387. – DOI: 10.1088/1464-4258/9/4/013.
  26. **Alexeyev, C.N.** Multi-helix chiral fibre filters of higher-order optical vortices / C.N. Alexeyev, A.V. Volyar, M.A. Yavorsky // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2007. – Vol. 9, Issue 5. – 537. – DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/018.
  27. **Alexeyev, C.N.** Helical-core fiber analog of a quarter-wave plate for orbital angular momentum / C.N. Alexeyev, B.P. Lapin, A.V. Volyar, M.A. Yavorsky // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 13. – P. 2277-2279. – DOI: 10.1364/OL.38.002277.
  28. *Optical waveguide theory* / A. Snyder, J.D. Love. – London: Chapman and Hall, 1983.

### *Сведения об авторах*

**Баршак Елена Владимировна**, 1989 года рождения, в 2011 году окончила Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по специальности «Физика», кандидат физико-математических наук (2017). Занимает должность доцента кафедры физики конденсированных сред, физических методов и информационных технологий в медицине в Физико-техническом институте КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: волоконная оптика, сингулярная оптика. E-mail: [lena.barshak@gmail.com](mailto:lena.barshak@gmail.com).

**Ларин Борис Петрович**, 1986 года рождения, кандидат физико-математических наук; в 2009 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по специальности «Физика», работает в должности доцента на кафедре общей физики в Физико-техническом институте Крымского федерального университета. Область научных интересов: волоконная сингулярная оптика. E-mail: [lapinboris@gmail.com](mailto:lapinboris@gmail.com).

**Викунин Дмитрий Вячеславович**, 1996 года рождения, в 2017 году окончил Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского по специальности 03.03.02 «Физика», является младшим научным сотрудником Лаборатории функциональных материалов для квантовых устройств Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: волоконная оптика, волоконная акустооптика, сингулярная оптика. E-mail: [vikulindmitriy@mail.ru](mailto:vikulindmitriy@mail.ru).

**Алиева Селиме Сейрановна**, 1997 года рождения, является младшим научным сотрудником Лаборатории функциональных материалов для квантовых устройств Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: сингулярная оптика, оптические вихри, оптические волокна. E-mail: [selime\\_alieva@bk.ru](mailto:selime_alieva@bk.ru).

**Алексеев Константин Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, 1960 года рождения; в 1982 году окончил Симферопольский государственный университет по специальности «Физика», работает профессором на кафедре теоретической физики в Физико-техническом институте Крымского федерального университета. Область научных интересов: волоконная сингулярная оптика. E-mail: [c.alexeyev@yandex.ua](mailto:c.alexeyev@yandex.ua).

**Яворский Максим Александрович**, 1982 года рождения, в 2004 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по специальности «Физика», кандидат физико-математических наук (2008 год). Работает зам. директора по научной работе физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: волоконная оптика, акустооптика, сингулярная оптика. E-mail: [maxyavorsky@yahoo.com](mailto:maxyavorsky@yahoo.com).

ГРНТИ: 29.31.15

*Поступила в редакцию 12 июня 2021 г. Окончательный вариант – 2 сентября 2021 г.*

---

# All-fiber SWAP-CNOT gate for optical vortices

*E.V. Barshak<sup>1</sup>, B.P. Lapin<sup>1</sup>, D.V. Vikulin<sup>1</sup>, S.S. Alieva<sup>1</sup>, C.N. Alexeyev<sup>1</sup>, M.A. Yavorsky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*V. I. Vernadsky Crimean Federal University*

## Abstract

We study the propagation of optical vortices in a system which consists of a tandem of a multihelical and twisted anisotropic fiber. We show that at certain resonance regimes of the optical fibers such a system allows one to control sign flipping of the topological charge and the circular polarization of the input optical vortex. Moreover, parameters of the multihelical and the twisted anisotropic fibers are established for the implementation of a logical operation that corresponds to the sequential executing of two fundamental SWAP and CNOT gates over the states of circularly polarized optical vortices.

**Keywords:** optical vortices, orbital angular momentum, logic gates, anisotropic optical fibers, birefringence, fiber optics.

**Citation:** Barshak EV, Lapin BP, Vikulin DV, Alieva SS, Alexeyev CN, Yavorsky MA. All-fiber SWAP-CNOT gate for optical vortices. *Computer Optics* 2021; 45(6): 853-859. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-938.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 20-47-910001).

## References

- [1] Shen Y, Wang X, Zhenwei X, Min C, Fu X, Liu Q, Gong M, Yuan X. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities. *Light Sci Appl* 2019; 8: 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
  - [2] Friese MEJ, Nieminen TA, Heckenberg NR, Rubinsztein-Dunlop H. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles. *Nature* 1998; 394: 348-350.
  - [3] Garces-Chavez V, Volke-Sepulveda K, Chavez-Cerda S, Sibbett W, Dholakia K. Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle. *Phys Rev A* 2002; 66: 063402.
  - [4] Spektor B, Normatov A, Shamir J. Singular beam microscopy. *Appl Opt* 2008; 47: A78-A87.
  - [5] Foo G, Palacios DM, Shwartzlander GA Jr. Optical vortex coronagraph. *Opt Lett* 2005; 30: 3308-3310.
  - [6] Shwartzlander GA Jr. Peering into darkness with a vortex spatial filter. *Opt Lett* 2001; 26: 497-499.
  - [7] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: review. *Computer Optics* 2016; 40: 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
  - [8] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner AE, Ramachandran S. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science* 2013; 340: 1545.
  - [9] Qiao W, Lei T, Wu Z, Gao S, Li Z, Yuan X. Approach to multiplexing fiber communication with cylindrical vector beams. *Opt Lett* 2017; 42: 2579-2582.
  - [10] Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Khonina SN. High-speed format 1000BASESX/LX transmission through the atmosphere by vortex beams near IR range with help modified SFP-transmitters DEM-310GT. *Computer Optics* 2020; 44(4): 578-581. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.
  - [11] Yao M, Padgett MJ. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications. *Adv Opt Photonics* 2011; 3: 161-204.
  - [12] Willner E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv Opt Photonics* 2015; 7: 66-106.
  - [13] Padgett MJ. Orbital angular momentum 25 years on. *Opt Express* 2017; 25(10): 11265-11274. DOI: 10.1364/OE.25.011265.
  - [14] Essiambre R, Tkach R. Capacity trends and limits of optical communication networks. *Proc IEEE* 2012; 100: 1035-1055.
  - [15] Wang J, Yang J-Y, Fazal IM, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner AE. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photonics* 2012; 6: 488-496.
  - [16] Wang F-X, Chen W, Yin Z-Q, Wang S, Guo G-C, Han Z-F. Scalable orbital-angular-momentum sorting without destroying photon states. *Phys Rev A* 2016; 94: 033847.
  - [17] Dudley A, Milione G, Alfano PR, Forbes A. All-digital wavefront sensing for structured light beams. *Opt Express* 2014; 22: 14031-14040.
  - [18] Franke-Arnold S, Barnett S, Yao E, Leach J, Courtial J, Padgett M. Uncertainty principle for angular position and angular momentum. *New J Phys* 2004; 6: 103.
  - [19] Yavorsky MA, Vikulin DV, Barshak EV, Lapin BP, Alexeyev CN. Polarization-dependent orbital angular momentum flipping in fibers with acousto-optic interaction. *J Phys: Conf Ser* 2019; 1368: 022067. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022067.
  - [20] Yavorsky MA, Vikulin DV, Barshak EV, Lapin BP, Alexeyev CN. All-fiber polarization-dependent optical-vortex-controlling via acousto-optic interaction. *Days on Diffraction (DD)* 2019: 238-243. DOI: 10.1109/DD46733.2019.9016567.
  - [21] Yavorsky MA, Barshak EV, Vikulin DV, Alexeyev CN. Spin-dependent OAM flipping in multihelical optical fibers. *J Opt* 2018; 20(11): 115601. DOI: 10.1088/2040-8986/aae3ff.
  - [22] Alexeyev C, Barshak E, Vikulin DV, Lapin B, Yavorsky M. Toffoli gate in twisted anisotropic and multihelical optical fibers. *Days on Diffraction (DD)* 2020: 7-12. DOI: 10.1109/DD49902.2020.9274577.
  - [23] Barshak EV, Alexeyev CN, Lapin BP, Yavorsky MA. Twisted anisotropic fibers for robust orbital-angular-momentum-based information transmission. *Phys Rev A* 2015; 91: 033833. DOI: 10.1103/PhysRevA.91.033833.
-



- 
- [24] Barshak EV, Vikulin DV, Lapin BP, Alieva SS, Alexeyev CN, Yavorsky MA. Robust higher-order optical vortices for information transmission in twisted anisotropic optical fibers. *J Opt* 2021; 23(3): 035603. DOI: 10.1088/2040-8986/abda85.
- [25] Alexeyev CN, Volyar AV, Yavorsky MA. Transformation of optical vortices in elliptical and anisotropic optical fibers. *J Opt A–Pure Appl Opt* 2007; 9(4): 387. DOI: 10.1088/1464-4258/9/4/013.
- [26] Alexeyev CN, Volyar AV, Yavorsky MA. Multi-helix chiral fibre filters of higher-order optical vortices. *J Opt A–Pure Appl Opt* 2007; 9(5): 537. DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/018.
- [27] Alexeyev CN, Lapin BP, Volyar AV, Yavorsky MA. Helical-core fiber analog of a quarter-wave plate for orbital angular momentum. *Opt Lett* 2013; 38(13): 2277-2279. DOI: 10.1364/OL.38.002277.
- [28] Snyder A, Love JD. *Optical waveguide theory*. London: Chapman and Hall; 1983.
- 

#### *Authors' information*

**Elena Vladimirovna Barshak**, (b. 1989), graduated from V.I. Vernadsky Taurida National University in 2011, PhD (2017), currently an associate professor of Condensed Matter Physics, Physical Methods and Information Technologies in Medicine department at the Physical-Technical Institute of V.I Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are fiber optics, singular optics. E-mail: [lena.barshak@gmail.com](mailto:lena.barshak@gmail.com).

**Boris Petrovich Lapin** (born in 1986), candidate of Physical and Mathematical Sciences; graduated from the V.I. Vernadsky Taurida National University (specialty "Physics") in 2009, currently an associate professor at the Physical-Technical Institute of the Crimean Federal University. Research interests: singular fiber optics. E-mail: [lapinboris@gmail.com](mailto:lapinboris@gmail.com).

**Dmitriy Vyacheslavovich Vikulin**, (b. 1996) graduated from V.I. Vernadsky Crimean Federal University in 2017, majoring in Physics. Currently he is a junior researcher at the Laboratory of Functional Materials for Quantum Devices at the Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are fiber optics, fiber acousto-optics, singular optics. E-mail: [vikulindmitriy@mail.ru](mailto:vikulindmitriy@mail.ru).

**Selime Seyranovna Alieva**, (b. 1997), currently she is a junior researcher at the Laboratory of Functional Materials for Quantum Devices at the Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are singular optics, optical vortices, optical fibers. E-mail: [selime\\_alieva@bk.ru](mailto:selime_alieva@bk.ru).

**Constantine Nikolayevich Alexeyev**, (b. 1960) Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, graduated from Simferopol State University in 1982 with a degree in Physics, currently a professor at the Theoretical Physics and Solid-State Physics department at the Physical-Technical Institute of the Crimean Federal University. Research interests: singular fiber optics. E-mail: [c.alexeyev@yandex.ua](mailto:c.alexeyev@yandex.ua).

**Maxim Alexandrovich Yavorsky** (b. 1982) graduated from V.I Vernadsky Taurida National University in 2004, majoring in Physics, PhD (2008). Currently he works as the vice director in science at the Physical-Technical Institute of V.I Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are fiber optics, acousto-optics, singular optics. E-mail: [maxyavorsky@yahoo.com](mailto:maxyavorsky@yahoo.com).

---

*Received June 12, 2021. The final version – September 2, 2021.*

---