

# Логическая операция контролируемой инверсии и обмена над оптическими вихрями в системе анизотропных оптических волокон

Е.В. Баршак  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
lena.barshak@gmail.com

К.Н. Алексеев  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
c.alexeyev@yandex.ua

Б.П. Лапин  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
lapinboris@gmail.com

М.А. Яворский  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
maxyavorsky@yahoo.com

Д.В. Викулин  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
vikulindmitriy@mail.ru

**Аннотация**—В данной работе рассматривается распространение оптических вихрей в системе скрученного анизотропного и мультигеликоидального оптического волокна. Установлено, что при определенных параметрах волокон в такой системе реализуется логическая операция, эквивалентная логике последовательно выполненных фундаментальных квантовых элементов CNOT (контролируемая инверсия) и SWAP (обмен) над состояниями циркулярно поляризованных оптических вихрей.

**Ключевые слова**— орбитальный угловой момент, оптические вихри, логические вентили, анизотропные оптические волокна.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические вихри (ОВ) как пучки, обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1], находят все более широкое применение, в особенности в инфокоммуникационной сфере [2-3]. Помимо использования для классического кодирования и передачи информации, операции с состояниями фотонов с ОУМ оказываются простыми и доступными инструментами для моделирования квантовых вычислений. Важной задачей в этой сфере является реализация логических вентилях и схем над кубитами, кодируемыми как спиновой, так и орбитальной степенями свободы фотона. Одним из решений представляются волоконные методы, основанные на оптических волокнах, поддерживающих структурно устойчивую передачу ОВ [4-5]. Следование цели минимизации и оптимизации логических схем акцентирует внимание на поиске возможностей расширения набора базовых гейтов над состояниями фотонов с ОУМ и упрощения реализации логических операций в оптических волокнах. В данной работе предлагается волоконный способ осуществления логической операции, соответствующей результату последовательного применения двух фундаментальных двухкубитных квантовых гейтов CNOT и SWAP к состояниям циркулярно поляризованных ОВ.

## 2. ЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ИНВЕРСИИ И ОБМЕНА В СИСТЕМЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В работе исследуется распространение ОВ в системе слабонаправляющих ступенчатых оптических волокон, состоящей из последовательно расположенных скрученного анизотропного и мультигеликоидального оптического волокна (система АМ) (рис. 1). Параметры оптических волокон выбраны так, что реализуются определенные резонансные режимы.

В таком режиме моды с азимутальным числом, равным 2, анизотропного волокна представлены суперпозицией циркулярно поляризованных ОВ с топологическим зарядом  $\ell=2$ :  $|1,2\rangle$  и  $|-1,2\rangle$ , а также право- и левоциркулярно поляризованными ОВ с топологическим зарядом  $\ell=-2$ :  $|\pm 1,-2\rangle$ . Здесь ОВ  $|\sigma, \ell\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\ell\varphi} F_{|\ell|}(r) \begin{pmatrix} 1 \\ i\sigma \end{pmatrix}$ , где  $\sigma=\pm 1$  определяет состояние поляризации,  $\ell=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  - топологический заряд,  $F_{|\ell|}(r)$  - радиальная функция, которая выражается через функции Бесселя  $J_{|\ell|}(r)$  и  $K_{|\ell|}(r)$  в сердцевине и оболочке волокна, соответственно [6]. Резонансными модами мультигеликоидального волокна оказываются два левоциркулярно поляризованных ОВ:  $|-1, \pm 2\rangle$ , а две другие моды представлены суперпозицией правоциркулярно поляризованных ОВ с различными знаками топологического заряда:  $|1, 2\rangle$  и  $|1, -2\rangle$ .

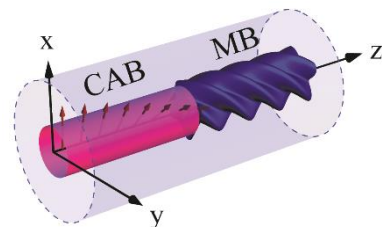


Рис. 1. Модель системы АМ: скрученного анизотропного (САВ) и мультигеликоидального (МВ) оптического волокна. Стрелками обозначено направление оси анизотропии материала. Параметр мультигеликоидальной деформации поперечного сечения  $\tau=4$

Основываясь на описанной структуре резонансных мод, можно показать, как преобразуется входной циркулярно поляризованный ОВ с топологическим

зарядом  $\ell=\pm 2$  при распространении в системе АМ. Установлены параметры оптических волокон системы, в частности, степень скрутки и оптимальная длина анизотропного и мультигеликоидального волокна (шаг скрутки 0,15 м и 0,29 м; длина 0,12 м и 0,15 м, соответственно), при которых имеет место полное преобразование энергии входного ОВ в энергию ОВ противоположного знака топологического заряда и/или циркулярной поляризации:

$$\begin{aligned} |-1,-2\rangle &\rightarrow |-1,-2\rangle, |-1,2\rangle \rightarrow |1,-2\rangle, \\ |1,-2\rangle &\rightarrow |1,2\rangle, |1,2\rangle \rightarrow |-1,2\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Преобразования ОВ (1) позволяют показать, что в системе АМ при определенных параметрах оптических волокон реализуется операция, результат которой эквивалентен последовательному выполнению фундаментальных квантовых логических вентилей управляемой инверсии (CNOT) и обмена (SWAP) над состояниями циркулярно поляризованных ОВ. Таблицы истинности и матрицы преобразования базовых CNOT и SWAP гейтов даны в таблице I. Оба вентиля имеют два входа и два выхода.

Таблица I. ТАБЛИЦЫ ИСТИННОСТИ И МАТРИЦЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БАЗОВЫХ ГЕЙТОВ

CNOT				SWAP			
Вход		Выход		Вход		Выход	
0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	0	1
1	1	1	0	1	1	1	1
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$			

Логическая операция комбинации CNOT и SWAP вентилей в указанном порядке представлена соответствующей таблицей истинности и матрицей преобразования в таблице II.

Таблица II. ТАБЛИЦА ИСТИННОСТИ И МАТРИЦА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ CNOT И SWAP ГЕЙТОВ

Вход		Выход	
A	B	A'	B'
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	0	1

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Пусть состояние поляризации ОВ в системе волокон АМ несет первый кубит (правоциркулярная поляризация соответствует логической «1», а левоциркулярная – «0»), а его топологический заряд рассматривается в качестве второго кубита (положительный топологический заряд соответствует логической «1», отрицательный – «0»). Так, например, входящий левоциркулярно поляризованный ОВ  $|-1,2\rangle$  определяет на входе  $A = 0, B = 1$ , или состояние

$|01\rangle$ . Проходя через систему АМ, такой ОВ, согласно (1), трансформируется в правоциркулярно поляризованный ОВ с противоположным знаком топологического заряда:  $|1,-2\rangle$ , что соответствует следующим значениям на выходе:  $A'=1, B'=0$ , или состоянию  $|10\rangle$ . Действуя так для каждого преобразования из (1), получим:

$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle, |01\rangle \rightarrow |10\rangle, \\ |10\rangle &\rightarrow |11\rangle, |11\rangle \rightarrow |01\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Преобразования (2) описывают логическую операцию комбинации двух вентилей CNOT и SWAP в указанном порядке (табл. II), осуществляемую над состояниями ОВ в системе оптических волокон АМ.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано преобразование энергии входящих циркулярно-поляризованных ОВ с целым на фотон ОУМ в системе скрученного анизотропного и мультигеликоидального оптических волокон. Установлено, что при определенных параметрах оптических волокон такая система позволяет реализовать двухкубитную логическую операцию контролируемой инверсии и обмена. Численно определены параметры волокон, в частности, шаг скрутки и оптимальная длина, для эффективной реализации описанной логической операции в системе АМ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Мегагрант проект N 075-15-2019-1934, Российского научного фонда, проект N 20-12-00291.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen., X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, and X. Yuan // Light: Science & Applications. – 2019. – Vol. 8. – P. 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [2] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular 234 momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M.P.J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A.F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // Adv. Opt. Photon. – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106.
- [3] Minzioni, P. Roadmap on all-optical processing / P. Minzioni, C. Lacava, T. Tanabe, J. Dong, X. Hu, G. Csaba, W. Porod, G. Singh, A. E. Willner, A. Almairan, V. Torres-Company, J. Schräuder, A.C. Peacock, M.J. Strain, F. Parmigiani, G. Contestabile, D. Marpaung, Z. Liu, J.E. Bowers, L. Chang, S. Fabbri, M.R. Vázquez, V. Bhadraraj, S.M. Eaton, P. Lodahl, X. Zhang, B.J. Eggleton, W.J. Munro, K. Nemoto, O. Morin, J. Laurat, J. Nunn // J. Opt. – 2019. – Vol. 21(8). – P. 063001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Snyder, A. Optical waveguide theory / A. Snyder, J.D. Love. – London: Chapman and Hall, 1983.