15

Возбуждение оптических вихрей в волноводе со спиральной оболочкой пониженного показателя преломления

© В.В. Лихов[1], П.И. Садовский[2], А.Г. Охримчук[1]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия
[2] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино, Московская область, Россия

e-mail: vladislavlikhov@gmail.com

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.
В окончательной редакции 03.02.2025 г.
Принята к публикации 28.02.2025 г.

В объёме фосфатного стекла пучком фемтосекундного лазера записаны спирали с шагом порядка длины волны света в ИК диапазоне, в которых показатель преломления понижен по сравнению с неэкспонированным стеклом. Записанные спирали представляют собой оболочку маломодового волновода со встроенной брэгговской решёткой. Исследован спектр отражения полученных брэгговских структур. Показано, что отражённый от брэгговских решёток пучок обладает геликоидальным волновым фронтом и несёт орбитальный угловой момент.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, брэгговская решётка, волновод, оптический вихрь.

DOI: 10.61011/OS.2025.03.60247.10-25

Введение

Вихревые пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в последнее десятилетие становятся объектом усиленного внимания. Такие пучки характеризуются волновым фронтом геликоидальной формы, при этом интенсивность света в центре пучка (фазовой сингулярности) равна нулю. Благодаря своим уникальным свойствам ОУМ-пучки находят применение в различных областях, наиболее значимые среди которых — оптическая связь и манипулирование микроскопическими частицами [1].

В экспериментальных линиях оптической связи вихревые пучки света используются для мультиплексирования — передачи данных с помощью нескольких каналов, каждый из которых кодируется с использованием различного ОУМ [2,3]. Это позволяет значительно увеличить объем передаваемой информации и повысить эффективность использования спектра. Такие системы уже разрабатываются для передачи данных на большие расстояния с высокой пропускной способностью [4–6].

Возможность преобразования гауссова пучка в волноводные вихревые моды с помощью брэгговских спиральных структур, записанных пучком фемтосекундного лазера, впервые была показана в кристалле Nd:YAG [7]. Такой подход позволяет получать оптические вихри непосредственно в волоконных световодах, исключая необходимость применения объемной оптики, обычно применяемой для получения вихревых пучков [8]. Ещё более привлекательно возбуждение вихревых мод в волноводном лазере, в котором брэгговские спиральные структуры служат в качестве зеркал резонатора. Стоит отметить, что запись подобных структур проводилась и ранее, например в работе [9], но спиральная геометрия в данном случае использовалась не для получения структурированого света, а была применена для увеличения коэффициента отражения решётки путём увеличения интеграла перекрытия, т. е. доли мощности, распространяющейся по модифицированной части световода.

Фосфатные стёкла, активированые ионами Er^{3+}, являются лазерными средами, позволяющими создавать эффективные лазеры в телекоммуникационном диапазоне длин волн. На заре развития прямой лазерной записи на основе такой среды был создан волноводный лазер с положительным изменением показателя преломления в сердцевине волновода [10]. Дальнейшие исследования показали, что изменение показателя преломления в фосфатных стеклах может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от состава стекла и параметров лазерной записи [11]. Впоследствии были записаны и исследованы и волноводы с депрессированной оболочкой [12,13], в том числе активные [14]. Для создания волноводного лазера, генерирующего ОУМ-моды, необходим волновод, поддерживающий несколько мод, что предполагает значительное изменение показателя преломления (не менее 10^{-3}).

Целью настоящей работы является исследование лазерной записи спиральных волноведущих брэгговских решёток в фосфатном стекле, активированном ионами Er^{3+}, для поиска оптимального режима записи для создания маломодовых волноводов, поддерживающих ОУМ-

моды, которые в дальнейшем могут служить компонентами волноводного вихревого лазера.

Запись спиральных структур

Эксперименты по прямой лазерной записи проводились в образце иттербий-эрбиевого фосфатного стекла, синтезированном в ИРЭ РАН, с концентрацией ионов эрбия $8.5 \cdot 10^{19}\,\mathrm{cm}^{-3}$ [15] и примерным составом (мол.%) 16% Na_2O, 6% K_2O, 8% Al_2O_3, 8% Yb_2O_3, 60.8% P_2O_5, 1% Nb_2O_5. Показатель преломления стекла $n = 1.515$ на длине волны 1550 nm.

Для записи волноводов использовался объектив 20× с числовой апертурой 0.45. Для достижения равномерной по азимуту толщины оболочки волновода перед объективом была расположена спектроскопическая щель с просветом 400 μm, ориентированным вдоль оси волновода. Это изменяло форму перетяжки записывающего пучка, преобразуя сигарообразную перетяжку в линзообразную [16].

Для определения оптимального режима записи была проведена пробная запись спиральных структур с энергией импульса в диапазоне от 1.2 до 3 μJ, при частоте следования импульсов 167 Hz и скорости записи один виток в секунду, что соответствует тангенциальной скорости 0.2 mm/s и обеспечивало перекрытие импульсов — примерно 9 импульсов на точку. Длительность импульса составляла 180 fs, длина волны — 1030 nm. Поляризация записывающего пучка параллельна оси волновода. Установлено, что энергия 1.8 μJ обеспечивала наилучшее качество созданных структур. В стекле данного состава при такой энергии импульса изменение знака показателя преломления отрицательное, и спиральная структура образовывала оболочку пониженного показателя преломления.

Таким образом, в объёме прямоугольной пластинки из этого стекла пучком фемтосекундного лазера были записаны две волноведущие спиральные брэгговские решётки с шагом спирали 1.53 и 1.02 μm, что соответствует брэгговскому порядку 3 и 2 на длине волны 1550 nm, которые представляли оболочки волноводов (далее „волноводы“ или WG1 и WG2 соответственно).

Длина каждого из волноводов составила 4.8 mm, средний диаметр — 60 μm, запись производилась на глубине 200 μm. Микроснимки одного из волноводов представлены на рис. 1.

Исследование записанных структур

Для характеризации волноводов использовался полупроводниковый одночастотный лазер с перестраиваемой длиной волны. Схема установки для характеризации волноводов приведена на рис. 2.

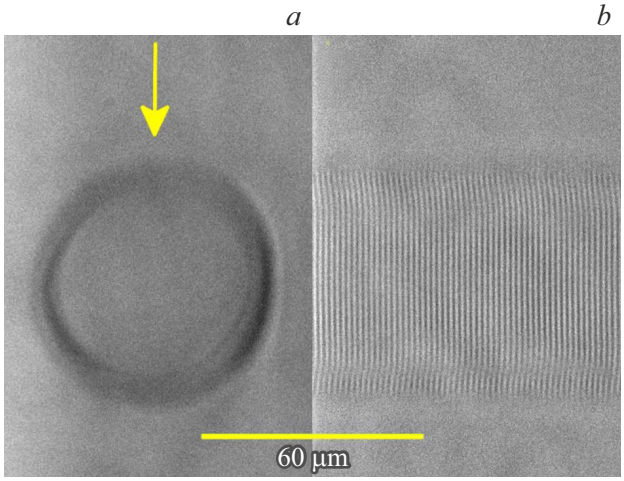


Рис. 1. (*a*) Микроснимок WG1 с торца. Направление пучка фемтосекундного лазера обозначено стрелкой; (*b*) вид WG1 вдоль направления записывающего пучка. Масштабная линия относится к обоим видам, подсветка снизу.

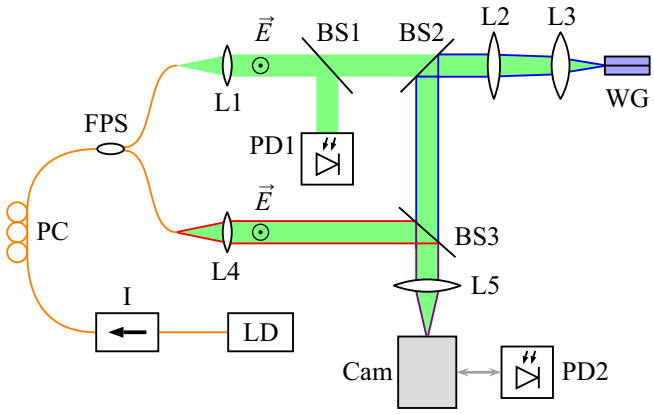


Рис. 2. Оптическая схема для характеризации волноводов. LD — полупроводниковый лазер с изменяемой длиной волны; I — волоконно-оптический изолятор; PC — контроллер поляризации; FPS — волоконно-оптический делитель; L1, 2, 3, 4, 5 — линзы с фокусными расстояниями 10, 500, 50, 20, 400 mm соответственно; BS1, 2, 3 — делители пучка; Cam — InGaAs-камера; PD1, 2 — фотодиоды; WG — образец фосфатного стекла с исследуемыми волноводами.

Для нормировки спектров на мощность пучка, заводимую в волновод, показания сигнального фотодиода PD2 делились на показания референсного фотодиода PD1. Линза L2 использовалась для регулировки диаметра пучка на входе в волновод. Путь отражённого от волновода пучка обозначен синей каймой. Для получения референсного пучка (обозначен красной каймой) использовался волоконно-оптический делитель. Поляризация пучка — линейная вертикальная.

Спектры отражения волноводов 1 и 2 приведены на рис. 3. Спектры нормировались на величину френелев-

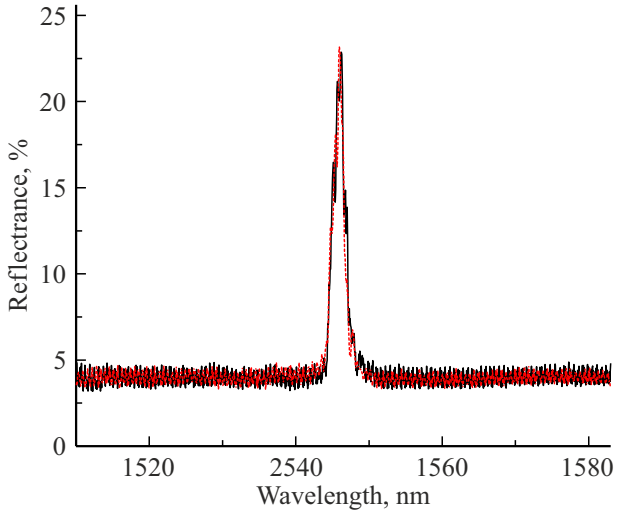


Рис. 3. Спектры отражения волноводов. WG1 — чёрная сплошная линия, WG2 — красная пунктирная линия.

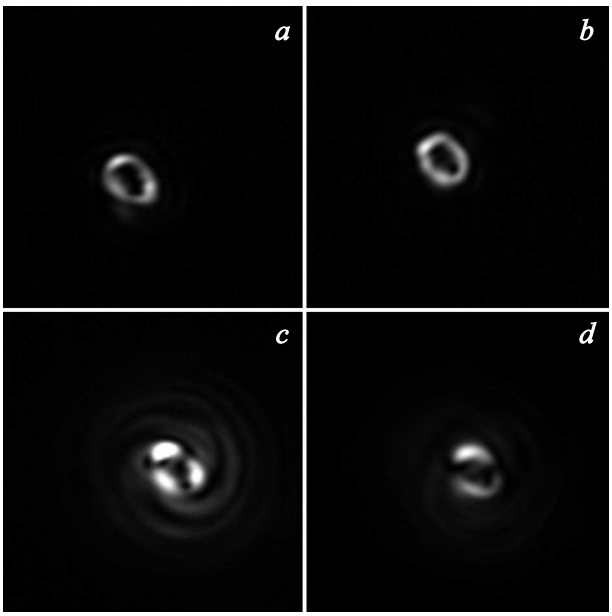


Рис. 4. Профили отражённого от WG1 (*a*) и WG2 (*b*) пучка в ближнем поле на длине волны резонанса; *c, d* — то же с наложением референсного пучка.

ского отражения от торца образца. Брэгговский резонанс расположен на длине волны 1546 nm.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Профили отражённого от волноводов пучка в ближнем поле приведены на рис. 4.

Отражённая мода имеет кольцеобразную форму в отличие от проходящей моды, обладающей гауссовым профилем. При наложении референсного пучка интерферометра кольцо модулируется по азимуту с количеством максимумов, соответствующим брэгговскому порядку волноводов (три максимума для WG1 и два — для WG2).

Классическое условие брэгговского резонанса:

$$\beta_q + \beta_l = \frac{2\pi}{\Lambda} p,$$

где β_q и β_l — константы распространения обратной и прямой мод соответственно, Λ — период структуры, p — порядок брэгговского резонанса.

В то же время для спиральных структур необходимо также учитывать условие азимутального фазового синхронизма. В случае отсутствия модуляции показателя преломления спиральной структуры по азимуту [16,17]

$$q - l = \alpha p, \qquad (1)$$

где q и l — топологические заряды (или ОУМ) отражённого и падающего пучков света соответственно, α — хиральность ОУМ-пучка ($+1$ или -1), p — порядок брэгговского резонанса. Поскольку в волновод заводился гауссов пучок, топологический заряд падающего пучка l равен нулю.

Записанные волноводы обладали структурой правозакрученной спирали. При увеличении длины оптического пути референсного пучка (т.е. при увеличении расстояния между торцом волоконного световода, линзой L5 и делителем пучка BS3 на рис. 2) вращение интерференционной картины (рис. 4, *c, d*) происходило по часовой стрелке (т.е. $\alpha = 1$), что подтверждает совпадение хиральности волнового фронта отражённого пучка с хиральностью волноводов.

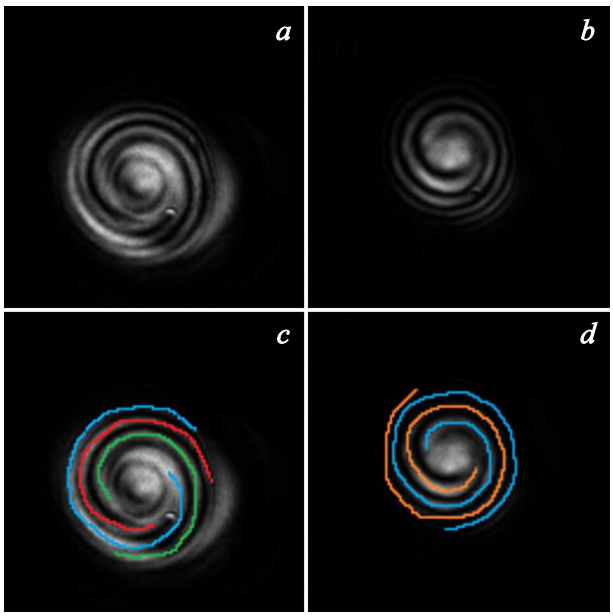


Рис. 5. Профили отражённого от WG1 (*a*) и WG2 (*b*) пучка в дальнем поле. То же с наложением схемы рукавов спирали: 3 рукава для WG1 (*c*), 2 рукава для WG2 (*d*).

Профиль отражённого от волноводов пучка в дальнем поле с наложенным референсным пучком приведён на рис. 5. Количество рукавов спирали соответствует топологическому заряду пучка и брэгговскому порядку волноводов в соответствии с уравнением (1).

Заключение

В объёме иттербий-эрбиевого фосфатного стекла пучком фемтосекундного лазера записаны волноводы со спиральными оболочками пониженного показателя преломления, образующими брэгговские решётки второго и третьего порядков. Показано, что прямая лазерная запись на длине волны 1030 nm позволяет записывать брэгговские структуры в фосфатном стекле с шагом $1\,\mu$m или более. Продемонстрировано, что пучок, резонансно отражённый от брэгговской оболочки, обладает орбитальным угловым моментом, причём его величина соответствует брэгговскому порядку решётки на длине волны резонанса. Исследованная волноведущая структура может быть использована для создания компактного вихревого лазера.

Финансирование работы

Работа проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 22-29-01187).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan. Light Sci. Appl., **8** (1), 90 (2019). DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2
[2] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran. Science, **340** (6140), 1545 (2013). DOI: 10.1126/science.1237861
[3] J. Wang, S. Chen, J. Liu. APL Photonics, **6** (6), 060804 (2021). DOI: 10.1063/5.0049022
[4] Q. Lu, J. Li, J. Tu, S. Gao, L. Shen, L. Zhang, J. Luo, W. Liu, Z. Li. J. Lightwave Technol., **42** (2), 828 (2024). DOI: 10.1109/JLT.2023.3316837
[5] J. Zhang, J. Liu, L. Shen, L. Zhang, J. Luo, J. Liu, S. Yu. Photon. Res., **8** (7), 1236 (2020). DOI: 10.1364/PRJ.394864
[6] A.M. Shukla, S. Gupta. IEEE Photonics J., **15** (3), 1 (2023). DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3272737
[7] A.G. Okhrimchuk, V.V. Likhov, S.A. Vasiliev, A.D. Pryamikov. J. Lightwave Technol., **40** (8), 2481 (2022). DOI: 10.1109/JLT.2021.3137055
[8] Y. Lian, X. Qi, Y. Wang, Z. Bai, Y. Wang, Z. Lu. Optics and Lasers in Engineering, **151**, 106923 (2022). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106923
[9] Q. Guo, S. Liu, X. Pan, B. Wang, Z. Tian, C. Chen, Q. Chen, Y. Yu, H. Sun. Opt. Lett., **46** (19), 4836 (2021). DOI: 10.1364/OL.439373
[10] S. Taccheo, G. Della Valle, R. Osellame, G. Cerullo, N. Chiodo, P. Laporta, O. Svelto, A. Killi, U. Morgner, M. Lederer, D. Kopf. Opt. Lett., **29** (22), 2626 (2004). DOI: 10.1364/OL.29.002626
[11] X. Liu, J. Bai, W. Zhao, G. Cheng. JLMN, **11** (3), 321 (2016). DOI: 10.2961/jlmn.2016.03.0007
[12] M.-M. Dong, C.-W. Wang, Z.-X. Wu, Y. Zhang, H.-H. Pan, Q.-Z. Zhao. Opt. Express, OE, **21** (13), 15522 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.015522
[13] J. Lv, G. Zhang, J. Wang, K. Wang, G. Cheng. Optics & Laser Technology, **169**, 110167 (2024). DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110167
[14] X. Long, J. Bai. Optik, **249**, 168308 (2022). DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.168308
[15] Л.О. Бышевская-Конопко, И.Л. Воробьев, А.А. Изынеев, П.И. Садовский. Квант. электрон., **34** (9), 809 (2004). [L.O. Byshevskaya-Konopko, I.L. Vorob'ev, A.A. Izyneev, P.I. Sadovskii. Quantum Electron., **34** (9), 809 (2004). DOI: 10.1070/QE2004v034n09ABEH002797].
[16] В.В. Лихов, С.А. Васильев, Г.К. Алагашев, С.Л. Семенов, А.Г. Охримчук. Квант. электрон., **52** (11), 1001 (2022). [V.V. Likhov, S.A. Vasil'ev, G.K. Alagashev, S.L. Semenov, A.G. Okhrimchuk. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **50** (Suppl 3), S314 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623150101].
[17] V. Likhov, S. Vasiliev, G. Alagashev, A. Okhrimchuk. Opt. Lett., **49** (5), 1217 (2024). DOI: 10.1364/OL.515710