

Южно-Уральский государственный университет

Кафедра оптоинформатики

Черемохова Анастасия Алексеевна

**ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И УГЛА
ВХОЖДЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРОШЕДШЕГО ЦИРКУЛЯРНО
ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель

д. ф.-м. н. Н. Д. Кундикова

Челябинск 2019

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Оптический эффект Магнуса. Обзор литературы.....	7
1.1. Взаимодействие спинового и орбитальных угловых моментов.....	7
1.2. Оптический эффект Магнуса в прямолинейном оптическом волокне	11
Глава 2. Моделирование спекл-картин циркулярно поляризованного света на выходе из прямого оптического волокна	15
2.1. Основные принципы описания распространения света в прямолинейном оптическом волокне	15
2.2. Результаты моделирования распространения циркулярно поляризованного света в многомодовом оптическом волокне	17
2.3. Выводы к главе 2	28
Заключение.....	29
Список литературы	30

Введение

Световой пучок представляет собой совокупность электромагнитных волн, которые характеризуются следующими параметрами: направление распространения, поляризация, распределение интенсивности и фазы в поперечном сечении светового пучка. Значения этих параметров зависят от свойств среды, и в последнее время уделяется большое внимание распространению света в оптических волокнах в связи с расширением использования их в средствах связи, в датчиках, измеряющих, например, температуру, давление, напряжение и другие физические величины. Датчики на основе оптических волокон могут использоваться для гидролокации, навигации, в нефтедобывающей промышленности, а также в медицине [1], [2]. Параметры светового пучка могут быть описаны как угловые моменты, а именно, спиновый угловой момент, определяющий поляризацию светового пучка, внешний орбитальный угловой момент, определяющий его траекторию и внутренний орбитальный угловой момент, который описывает распределение интенсивности и фазы в поперечном сечении светового пучка. Взаимодействие перечисленных выше моментов друг с другом называется спин-орбитальным взаимодействием света, и в последнее время повышается интерес к изучению данного взаимодействия в связи с распространением применения оптических волокон.

Спин-орбитальное взаимодействие света было введено впервые в 1991 году [3]. В этом году впервые экспериментально наблюдался поворот спекл-картины циркулярно поляризованного светового пучка, прошедшего через оптическое волокно, который возникает при распространении света в одномодовом оптическом волокне, свернутом в спираль, при смене знака циркулярной поляризации. Этот эффект является обратным к рытовскому эффекту Рытова–Владимирского–Берри–Чао–Ву–Томита поворота плоскости поляризации [4].

Все эффекты спин-орбитального взаимодействия света можно разделить на шесть типов эффектов, которые связаны с попарным взаимодействием угловых моментов [5], также можно классифицировать возможные типы эффектов, вследствие чего могут быть выделены всего шесть типов различных взаимодействий спинового и орбитальных угловых моментов фотона между собой. При взаимодействии пары угловых моментов между собой могут наблюдаться такие эффекты как сдвиг Федорова–Имбера, эффект Холла, смещение центра тяжести вихревого светового пучка при отражении и преломлении, пучки Эйри, а также оптический эффект Магнуса [5], [6], [7], [8]. Также можно сказать о влиянии двух угловых моментов на третий [5], и такие взаимодействия требуют основательных исследований, чтобы была возможность обнаружить новые эффекты данных взаимодействий. Одно из таких взаимодействий было обнаружено экспериментально, а именно, что оптический эффект Магнуса проявляется в результате взаимодействия внешнего орбитального углового момента и спинового углового момента на внутренний орбитальный угловой момент.

Оптический эффект Магнуса впервые был предсказан для оптического волокна с бесконечным параболическим профилем показателя преломления. Аналитическое выражение для угла поворота спекл-картины циркулярно поляризованного излучения, прошедшего через оптическое волокно при смене знака циркулярной поляризации, было получено для оптического волокна с бесконечным параболическим профилем показателя преломления. Было показано, что угол поворота линейно возрастает с увеличением длины оптического волокна [5]. Из теории распространения поляризованного излучения в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления следует, что получить аналитическое выражение для угла поворота спекл-картины при смене знака циркулярной поляризации невозможно.

Оказалось, что оптический эффект Магнуса является неоднородным. В 1996 году было проведено исследование явления неоднородности оптического эффекта Магнуса и получены экспериментальные результаты

этого исследования [9]. Также было получено аналитическое выражение зависимости угла поворота спекл-картины циркулярно поляризованного излучения от угла вхождения при прохождении оптического волокна в рамках геометрической оптики [10], в то время как в исследовании оптических волокон положения геометрической оптики не могут быть применимы. По полученным результатам очевидно, что явление неоднородности наблюдается при повороте спекл-картины в зависимости от угла между осью оптического волокна и направлением распространения падающего на торец оптического волокна луча света, или, другими словами, от угла вхождения пучка света в оптическое волокно. Результаты экспериментального исследования [9] подтверждают аналитические расчеты, описывающие явления, но в упомянутых исследованиях не проводилось моделирование распространения циркулярно поляризованного излучения с целью исследования влияния длины оптического волокна и угла вхождения пучка света на поведение прошедшего циркулярно поляризованного излучения. Из вышесказанного можно сделать вывод, что исследуемая тема является актуальной на сегодняшний день.

В то же время есть экспериментальные результаты [11], описывающие зависимости угла поворота спекл-картины от длины оптического волокна и угла поворота спекл-картины при фиксированной длине волокна от угла вхождения пучка света в волокно. Первая из этих зависимостей представляет собой прямую, вторая квадратичную зависимость.

Таким образом, выявляется глобальная проблема исследования, заключающаяся в возможном развитии теории о свойствах частиц и открытии новых явлений спин-орбитального взаимодействия света.

Чтобы лучше понять суть явления спин-орбитального взаимодействия, нужно провести моделирование взаимного влияния пар орбитальных моментов друг на друга, и в данной работе представлен анализ одного из таких влияний, а именно – спинового орбитального момента на внешний орбитальный угловой момент.

Целью данной работы является моделирование распространения циркулярно поляризованного излучения в прямолинейном оптическом волокне различной длины и при различных углах вхождения излучения в волокно.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. моделирование зависимости угла поворота спекл-картины от длины оптического волокна в прямом оптическом волокне;
2. моделирование зависимости угла поворота спекл-картины от угла вхождения пучка света в оптическое волокно.

Заключение

В результате проведенной работы получены следующие результаты.

1. Получены зависимости угла поворота спекл-картин от длины.
Показано, что угол поворота линейно зависит от длины волокна.
Обнаружено, что результаты моделирования совпадают с экспериментальными результатами.
2. Получены зависимости угла поворота спекл-картины от угла вхождения светового пучка в оптическое волокно. Показано, что угол поворота спекл-картины зависит квадратично от угла вхождения луча света в волокно. Обнаружено, что результаты моделирования в пределах ошибки совпадают с экспериментальными результатами.

Список литературы

- [1] H.-N. Li, D.-S. Li, and G.-B. Song, “Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering,” *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 1647–1657, Sep. 2004.
- [2] D. Tosi, E. Schena, C. Molardi, and S. Korganbayev, “Fiber optic sensors for sub-centimeter spatially resolved measurements: Review and biomedical applications,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 43, no. January, pp. 6–19, Jul. 2018.
- [3] А. В. Дугин, Б. Я. Зельдович, Н. Д. Кундикова, and В. С. Либерман, “Влияние циркулярности поляризации на распространение света в оптическом волокне,” *Письма в ЖТФ*, vol. 53, no. 4, pp. 186–188, 1991.
- [4] С. М. Рытов, “Труды ФИАН,” *ДАН СССР*, vol. 18, no. 2, 1938.
- [5] S. Abdulkareem and N. D. Kundikova, “Joint effect of polarization and the propagation path of a light beam on its intrinsic structure,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 17, p. 19157, Aug. 2016.
- [6] K. Y. Bliokh and A. Aiello, “Goos–Hänchen and Imbert–Fedorov beam shifts: an overview,” *J. Opt.*, vol. 15, no. 1, p. 014001, Jan. 2013.
- [7] M. Onoda, S. Murakami, and N. Nagaosa, “Hall effect of light,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, no. 8, p. 083901, Aug. 2004.
- [8] S. Liu, M. Wang, P. Li, P. Zhang, and J. Zhao, “Abrupt polarization transition of vector autofocusing Airy beams,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 14, p. 2416, Jul. 2013.
- [9] Б. Я. Зельдович, И. В. Катаевская, and Н. Д. Кундикова, “Неоднородность оптического эффекта Магнуса,” *Квантовая электроника*, vol. 23, no. 1, pp. 89–90, 1996.
- [10] V. S. Liberman and B. Y. Zel’dovich, “Spin-orbit polarization effects in isotropic multimode fibres,” *Pure Appl. Opt. J. Eur. Opt. Soc. Part A*, vol. 2, no. 4, pp. 367–382, Jul. 1993.
- [11] S. Abdulkareem, S. Asselborn, N. Kundikova, and K. Mikhalyuk, “Splitting of a photon flux according photon’s spin,” *Proceeding 23rd Congr. Int. Comm. Opt. Santiago Compost. 26th–29th August 2014*, no. August, pp. 1–2, 2014.
- [12] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, “Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes,” *Phys. Rev. A*, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189, Jun. 1992.
- [13] S. Franke-Arnold, L. Allen, and M. Padgett, “Advances in optical angular momentum,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 2, no. 4, pp. 299–313, Aug. 2008.
- [14] A. Bekshaev, K. Y. Bliokh, and M. Soskin, “Internal flows and energy circulation in light beams,” *J. Opt.*, vol. 13, no. 5, pp. 1–32, May 2011.
- [15] K. Y. Bliokh, “Geometrical optics of beams with vortices: Berry phase and orbital angular momentum hall effect,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 4, pp. 1–4, 2006.
- [16] A. E. Willner *et al.*, “Optical communications using orbital angular

- momentum beams,” *Adv. Opt. Photonics*, vol. 7, no. 1, pp. 66–106, 2015.
- [17] A. T. O’Neil, I. MacVicar, L. Allen, and M. J. Padgett, “Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, no. 5, pp. 053601-1-053601-4, Jan. 2002.
- [18] H. H. Arnaut and G. A. Barbosa, “Orbital and intrinsic angular momentum of single photons and entangled pairs of photons generated by parametric down-conversion,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 2, pp. 286–289, 2000.
- [19] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, “Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 16, pp. 163905-1-163905-4, 2006.
- [20] J. Sinova, D. Culcer, Q. Niu, N. A. Sinitsyn, T. Jungwirth, and A. H. MacDonald, “Universal intrinsic spin Hall effect,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, no. 12, pp. 126603-1-126603-4, 2004.
- [21] A. Bérard and H. Mohrbach, “Spin Hall effect and Berry phase of spinning particles,” *Phys. Lett. A*, vol. 352, no. 3, pp. 190–195, Mar. 2006.
- [22] K. Y. Bliokh and Y. P. Bliokh, “Spin gauge fields: from Berry phase to topological spin transport and Hall effects,” *Ann. Phys. (N. Y.)*, vol. 319, no. 1, pp. 13–47, 2005.
- [23] R. Y. Chiao and Y.-S. Wu, “Manifestations of Berry’s topological phase for the photon,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 8, pp. 933–936, Aug. 1986.
- [24] M. V. Berry, “Interpreting the anholonomy of coiled light,” *Nature*, vol. 326, no. 6110, pp. 277–278, 1987.
- [25] A. Tomita and Y. Chiao, “Observation of Berry’s topological phase by use of an optical fiber,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 8, pp. 937–940, Oct. 1986.
- [26] Б. Я. Зельдович and Н. Д. Кундикова, “Внутриволоконный поворот плоскости поляризации,” *Квантовая электроника*, vol. 22, no. 2, pp. 184–186, 1995.
- [27] V. S. Liberman and B. Y. Zel’dovich, “Spin-orbit interaction of a photon in an inhomogeneous medium,” *Phys. Rev. A*, vol. 46, no. 8, pp. 5199–5207, Oct. 1992.
- [28] K. Y. Bliokh and Y. P. Bliokh, “Conservation of angular momentum, transverse shift, and spin Hall effect in reflection and refraction of an electromagnetic wave packet,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 7, p. 073903, Feb. 2006.
- [29] K. Y. Bliokh and Y. P. Bliokh, “Modified geometrical optics of a smoothly inhomogeneous isotropic medium: the anisotropy, Berry phase, and the optical Magnus effect,” *Phys. Rev. E*, vol. 70, no. 2, p. 9, 2004.
- [30] K. Y. Bliokh and V. D. Freilikher, “Topological spin transport of photons: Magnetic monopole gauge field in Maxwell’s equations and polarization splitting of rays in periodically inhomogeneous media,” *Phys. Rev. B*, vol. 72, no. 3, pp. 1–10, 2005.
- [31] A. V. Dooghin, N. D. Kundikova, V. S. Liberman, and B. Y. Zel’dovich, “Optical Magnus effect,” *Phys. Rev. A*, vol. 45, no. 11, pp. 8204–8208, Jun. 1992.

- [32] T. Tang, C. Li, and L. Luo, “Enhanced spin Hall effect of tunneling light in hyperbolic metamaterial waveguide,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. April, pp. 1–8, 2016.
- [33] X. Chen and C. F. Li, “Lateral shift of the transmitted light beam through a left-handed slab,” *Phys. Rev. E*, vol. 69, no. 6, pp. 1–6, 2004.
- [34] V. G. Fedoseyev, “Spin-independent transverse shift of the centre of gravity of a reflected and of a refracted light beam,” *Opt. Commun.*, vol. 193, no. 1–6, pp. 9–18, 2001.
- [35] M. Merano, N. Hermosa, J. P. Woerdman, and A. Aiello, “How orbital angular momentum affects beam shifts in optical reflection,” *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 82, no. 2, pp. 1–5, 2010.
- [36] M. R. Dennis and J. B. Götte, “Topological aberration of optical vortex beams: determining dielectric interfaces by optical singularity shifts,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 18, p. 183903, Oct. 2012.
- [37] I. V. Kataevskaya and N. D. Kundikova, “Influence of the helical shape of a fibre waveguide on the propagation of light,” *Quantum Electron.*, vol. 25, no. 9, pp. 927–928, Sep. 1995.
- [38] M. V. Bolshakov, A. V. Guseva, N. D. Kundikova, and E. S. Samkova, “Polarized light propagation along a helical trajectory,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 8011, p. 80114Q–1–80114Q–6.
- [39] B. Piccirillo, V. D’Ambrosio, S. Slussarenko, L. Marrucci, and E. Santamato, “Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 24, pp. 4085–4090, 2010.
- [40] Y. Vasyukiv, I. Skab, and R. Vlokh, “Efficiency of spin-to-orbit conversion in crystals subjected to torsion stresses,” *Ukr. J. Phys. Opt.*, vol. 14, no. 1, pp. 50–56, 2013.
- [41] M. Y. Darshat, B. Y. Zel’dovich, I. V. Kataevskaya, and N. D. Kundikova, “Formation of an isolated wavefront dislocation,” *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. 80, no. 5, pp. 817–821, 1995.
- [42] Y. Zhao, J. S. Edgar, G. D. M. Jeffries, D. McGloin, and D. T. Chiu, “Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, no. 7, pp. 15–18, 2007.
- [43] K. Y. Bliokh, E. A. Ostrovskaya, M. A. Alonso, O. G. Rodríguez-Herrera, D. Lara, and C. Dainty, “Spin-to-orbital angular momentum conversion in focusing, scattering, and imaging systems,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 27, p. 26132, Dec. 2011.
- [44] L. T. Vuong, A. J. L. Adam, J. M. Brok, P. C. M. Planken, and H. P. Urbach, “Electromagnetic spin-orbit interactions via scattering of subwavelength apertures,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, no. 8, pp. 1–4, 2010.
- [45] H. Kobayashi, K. Nonaka, and M. Kitano, “Helical mode conversion using conical reflector,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 13, pp. 14064–14074, 2012.
- [46] G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, and D. N. Christodoulides, “Observation of accelerating Airy beam ballistics,” *Conf. Quantum Electron.*

- Laser Sci. - Tech. Dig. Ser.*, vol. 213901, no. November, pp. 23–26, 2008.
- [47] С. А. Бростилов, С. И. Торгашин, and Н. К. Юрков, “Распространение света в искривленном многомодовом оптическом волноводе,” *Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника*, vol. 1, no. 21, pp. 141–150, 2012.
- [48] А. А. Эйхенвальд, *Избранные работы*. Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956.
- [49] А. Снайдер and Д. Лав, *Теория оптических волноводов*. Москва: Радио и связь, 1987.
- [50] А. М. Гончаренко, *Теория оптических волноводов*. Москва: Едиториал УРСС, 2004.
- [51] X. Zhou, J. Zhang, X. Ling, S. Chen, H. Luo, and S. Wen, “Photonic spin Hall effect in topological insulators,” *Phys. Rev. A*, vol. 88, no. 5, pp. 1–7, 2013.
- [52] S. Slussarenko, V. D’Ambrosio, B. Piccirillo, L. Marrucci, and E. Santamato, “The Polarizing Sagnac Interferometer: a tool for light orbital angular momentum sorting and spin-orbit photon processing,” *Opt. Express*, vol. 18, no. 26, pp. 27205–27216, 2010.
- [53] Q. Xu, L. Chen, M. G. Wood, P. Sun, and R. M. Reano, “Electrically tunable optical polarization rotation on a silicon chip using Berry’s phase,” *Nat. Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [54] R. Kopelman, W. Tan, and D. Birnbaum, “Subwavelength spectroscopy, exciton supertips and mesoscopic light-matter interactions,” *J. Lumin.*, vol. 58, no. 1–6, pp. 380–387, 1994.
- [55] Y. Gorodetski, A. Drezet, C. Genet, and T. W. Ebbesen, “Generating far-field orbital angular momenta from near-field optical chirality,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 20, pp. 1–5, 2013.
- [56] Y. Gorodetski, N. Shitrit, I. Bretner, V. Kleiner, and E. Hasman, “Observation of optical spin symmetry breaking in nanoapertures,” *Nano Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 3016–3019, 2009.
- [57] G. Rui, R. L. Nelson, and Q. Zhan, “Circularly polarized unidirectional emission via a coupled plasmonic spiral antenna,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 23, pp. 4533–4535, Dec. 2011.
- [58] P. Zilio, E. Mari, G. Parisi, F. Tamburini, and F. Romanato, “Angular momentum properties of electromagnetic field transmitted through holey plasmonic vortex lenses,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 15, pp. 3234–3236, 2012.
- [59] Б. Я. Зельдович and В. С. Либерман, “Поворот плоскости меридионального луча в градиентном световоде за счет циркулярности поляризации,” *Квантовая электроника*, vol. 17, no. 4, pp. 493–494, 1990.
- [60] K. Y. Bliokh, F. J. Rodríguez-Fortuño, F. Nori, and A. V. Zayats, “Spin-orbit interactions of light,” *Nat. Photonics*, vol. 9, no. 12, pp. 796–808, Dec. 2015.
- [61] C. Sayrin *et al.*, “Optical diode based on the chirality of guided photons,” *Phys. Rev. X*, vol. 5, no. 4, p. 041036, Dec. 2015.

- [62] M. Z. Hasan and C. L. Kane, “Topological insulators,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 82, no. 4, pp. 3045–3067, 2010.
- [63] C. N. Alexeyev, A. V. Volyar, and M. A. Yavorsky, “Effect of the spin-orbit coupling on the band-gap structure in anisotropic twisted fibers,” in *Seventh International Conference on Correlation Optics*, 2006, p. 62540K–62540K–9.
- [64] C. N. Alexeyev, A. N. Alexeyev, N. A. Boklag, and M. A. Yavorsky, “Effect of the spin–orbit interaction on polarization conversion in coupled waveguides,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 11, no. 12, pp. 1–7, Dec. 2009.
- [65] C. N. Alexeyev, A. V. Volyar, and M. A. Yavorsky, “Energy transfer, orbital angular momentum, and discrete current in a double-ring fiber array,” *Phys. Rev. A*, vol. 84, no. 6, pp. 063845-1-063845-11, Dec. 2011.
- [66] C. N. Alexeyev, H. G. Galamaga, and A. V. Volyar, “Filter of optical vortices: highly twisted high-birefringence optical fibers,” *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 1, p. 8, Jan. 2006.
- [67] C. N. Alexeyev, A. V. Volyar, and M. A. Yavorsky, “Intensely twisted elliptic optical fibres maintaining propagation of a single optical vortex,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 8, no. 11, pp. L5–L9, Nov. 2006.
- [68] C. N. Alexeyev and M. A. Yavorsky, “Optical vortices and the higher order modes of twisted strongly elliptical optical fibres,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 6, no. 9, pp. 824–832, Sep. 2004.
- [69] C. N. Alexeyev, B. A. Lapin, and M. A. Yavorsky, “Optical vortices and topological phase in strongly anisotropic coiled few-mode optical fibers,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 24, no. 10, pp. 2666–2675, Oct. 2007.
- [70] C. N. Alexeyev, T. A. Fadeyeva, Y. A. Fridman, and M. A. Yavorsky, “Optical vortices routing in coupled elliptical spun fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 10, p. C17–C21, Apr. 2012.
- [71] C. N. Alexeyev, “Spin angular momentum tunnelling in coupled anisotropic optical fibres,” *J. Opt.*, vol. 15, no. 4, pp. 1–10, Apr. 2013.
- [72] C. N. Alexeyev and M. A. Yavorsky, “Topological phase evolving from the orbital angular momentum of ‘coiled’ quantum vortices,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 8, no. 9, pp. 752–758, Sep. 2006.