

Южно-Уральский государственный университет

Кафедра оптоинформатики

Габидуллин Тимур Ринатович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ САГИТТАЛЬНЫХ
ЛУЧЕЙ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель

д.ф.-м.н. Н.Д. Кундикова

Челябинск 2018

Оглавление

Введение	3
1 Спин-орбитальное взаимодействие света. Обзор литературы	5
1.1 Спин-орбитальное взаимодействие света в различных оптических системах	5
1.2 Оптический эффект Магнуса в прямолинейном цилиндрическом волокне	8
1.3 Оптический эффект Магнуса в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль	10
2 Моделирование распространения сагиттальных лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне	13
2.1 Программная реализация распространения световых лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне	13
2.2 Моделирование распространения сагиттальных лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне	15
2.3 Выводы к главе 2	25
3 Моделирование распространения сагиттальных лучей в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль	26
3.1 Программная реализация распространения световых лучей в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль	26
3.2 Моделирование распространения сагиттальных лучей в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль	27
3.3 Выводы к главе 3	29
Заключение	30
Литература	31

Введение

Термин спин-орбитальное взаимодействие света впервые был введен в 1991 году в работе [1]. В работе [2] была предложена классификация спин-орбитальных взаимодействий, согласно которой можно выделить шесть типов различных взаимодействий. Явления, возникающие вследствие спин-орбитального взаимодействия, относятся к субволновым явлениям. Данные явления очень чувствительны к изменению физического состояния систем и перспективны для применения в высокоточной метрологии. Примерами таких явлений являются эффект Федорова, орбитальный эффект Холла для света, пучки Эйри и оптический эффект Магнуса.

Оптический эффект Магнуса является результатом взаимодействия спинового углового момента и внешнего орбитального углового момента [1]. Данный эффект заключается в повороте спекл-картины циркулярно поляризованного света, прошедшего через оптическое волокно, при смене знака циркулярной поляризации. Исследования, проводимые в работах [3-5] показали, что периферийные области спекл-картины по сравнению с центральными областями должны смещаться на больший угол. При этом краевая область спекл-картины соответствует лучам, распространяющимся под предельно большим углом к оси волновода, в то время как центральная область спекл-картины соответствует световым лучам, распространяющимся вблизи оси волновода. Данное явление, которое называется неоднородностью оптического эффекта Магнуса, неоднократно наблюдалось в различных экспериментах [4, 5], однако численно не рассчитывалось.

Помимо спин-орбитальных взаимодействий, в которых участвуют только два типа угловых моментов, в работе [2], были рассмотрены новые спин-орбитальные взаимодействия, а именно совместное влияние двух типов угловых моментов на какой-нибудь третий тип. В рамках данной теории предсказывается существование новых эффектов. Одним из них является

оптический эффект Магнуса в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль. В той же работе [2] была экспериментально получена зависимость угла поворота спекл-картины от шага спирали, однако моделирование распространения сагиттальных лучей в оптическом волокне, скрученном в спираль, не проводилось.

Целью данной работы является моделирование распространения сагиттальных лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне и в цилиндрическом волокне, скрученном в спираль.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Расчет зависимости угла поворота спекл-картины от угла падения сагиттального луча в прямолинейном цилиндрическом волокне;
- Расчет зависимости угла поворота спекл-картины от длины прямолинейного цилиндрического волокна;
- Расчет зависимости угла поворота спекл-картины от телесного угла, вырезаемого касательной к траектории волокна, скрученного в спираль, на единичной сфере.

Заключение

Смоделировано распространение сагиттальных лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне.

Показано:

1. зависимость угла поворота спекл-картины от номера мод в прямолинейном цилиндрическом волокне имеет нелинейный характер;
2. зависимость угла поворота спекл-картины от длины прямолинейного цилиндрического волокна имеет линейный характер;
3. зависимость угла поворота спекл-картины от угла падения сагиттального луча цилиндрического волокна имеет линейный характер.

Смоделировано распространение сагиттальных лучей в прямолинейном цилиндрическом волокне, скрученном в спираль.

Показано:

1. зависимость угла поворота спекл-картины от телесного угла, вырезаемого касательной к траектории волокна, скрученного в спираль, на единичной сфере имеет линейный характер;
2. результаты моделирования качественно соответствуют экспериментальным результатам, полученным в работе [2].

Список литературы

1. Dooghin, Kundikova, Liberman, & Zel'dovich. (1992). Optical Magnus effect. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 45(11), 8204–8208.
2. Liberman, V. S., & Zel'dovich, B. Y. (1993). Spin-orbit polarization effects in isotropic multimode fibres. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 2(4), 367–382.
3. Зельдович, Б. Я., Катаевская, И. В., & Кундикова, Н. Д. (1996). Неоднородность оптического эффекта Магнуса. *Квантовая Электроника*, 89–90.
4. Ассельборн, С. А., Большаков, М. В., Кундикова, Н. Д., & Наумова, И. И. (2003). Новый метод исследования оптического эффекта Магнуса. *Известия Челябинского Научного Центра*, 3(20), 3–7.
5. Abdulkareem, S., & Kundikova, N. (2016). Joint effect of polarization and the propagation path of a light beam on its intrinsic structure. *Optics Express*, 24(17), 19157.
6. Mathur, H. (1991). Thomas precession, spin-orbit interaction, and Berry's phase. *Physical Review Letters*, 67(24), 3325–3327.
7. Bolte, J., & Keppeler, S. (1999). A Semiclassical Approach to the Dirac Equation. *Annals of Physics*, 274(1), 125–162.
8. Bliokh, K. Y., & Bliokh, Y. P. (2004). Topological spin transport of photons: the optical Magnus effect and Berry phase. *Physics Letters A*, 333(3–4), 181–186.
9. Bérard, A., & Mohrbach, H. (2006). Spin Hall effect and Berry phase of spinning particles. *Physics Letters A*, 352(3), 190–195.
10. Bliokh, K. Y. (2006). Geometrical Optics of Beams with Vortices: Berry Phase and Orbital Angular Momentum Hall Effect. *Physical Review Letters*, 97(4), 043901.

11. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. S., & Woerdman, J. P. (1992). OAM Transformation Laguerre-Gaussian Laser Modes. *The American Physical Society*, 45(11), 8185–8188.
12. Allen, L., Padgett, M. J., & Babiker, M. (1999). The orbital angular momentum of light. *Progress in Optics*, 291–372.
13. Duval, C., & Horváthy, P. A. (2015). Chiral fermions as classical massless spinning particles. *Physical Review D*, 91(4), 045013.
14. Ménard, J.-M., Mattacchione, A. E., Betz, M., & van Driel, H. M. (2009). Imaging the spin Hall effect of light inside semiconductors via absorption. *Optics Letters*, 34(15), 2312–2314.
15. Zhou, X., Xiao, Z., Luo, H., & Wen, S. (2012). Experimental observation of the spin Hall effect of light on a nanometal film via weak measurements. *Physical Review A*, 85(4), 043809.
16. Zhou, X., Ling, X., Luo, H., & Wen, S. (2012). Identifying graphene layers via spin Hall effect of light. *Applied Physics Letters*, 101(25), 251602.
17. Zhou, X., Zhang, J., Ling, X., Chen, S., Luo, H., & Wen, S. (2013). Photonic spin Hall effect in topological insulators. *Physical Review A*, 88(5), 053840.
18. Slussarenko, S., D'Ambrosio, V., Piccirillo, B., Marrucci, L., & Santamato, E. (2010). The Polarizing Sagnac Interferometer: a tool for light orbital angular momentum sorting and spin-orbit photon processing. *Optics Express*, 18(26), 27205.
19. Jin, Y., Wang, Z., Lv, Y., Liu, H., Liu, R., Zhang, P., ... Li, F. (2012). Variation of polarization distribution of reflected beam caused by spin separation. *Optics Express*, 20(3), 1975.
20. Xu, Q., Chen, L., Wood, M. G., Sun, P., & Reano, R. M. (2014). Electrically tunable optical polarization rotation on a silicon chip using Berry's phase. *Nature Communications*, 5(1), 5337.

21. Bliokh, K. Y., & Aiello, A. (2013). Goos–Hänchen and Imbert–Fedorov beam shifts: an overview. *Journal of Optics*, *15*(1), 014001.
22. Duval, C., Horváth, Z., & Horváthy, P. A. (2007). Geometrical spinoptics and the optical Hall effect. *Journal of Geometry and Physics*, *57*(3), 925–941.
23. Andrzejewski, K., Kijanka-Dec, A., Kosiński, P., & Maślanka, P. (2015). Chiral fermions, massless particles and Poincare covariance. *Physics Letters B*, *746*, 417–423.
24. Kundikova, N. D., Zel'dovich, B. Y., Zhirgalova, I. V., & Goloveshkin, V. A. (1994). The effects of spin-orbit interaction of a photon and their analogues in mechanics. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, *3*(5), 815–819.
25. Franke-Arnold, S., Allen, L., & Padgett, M. (2008). Advances in optical angular momentum. *Laser and Photonics Reviews*.
26. Haefner, D., Sukhov, S., & Dogariu, A. (2009). Spin hall effect of light in spherical geometry. *Physical Review Letters*, *102*(12), 123903.
27. Darsht, M. Y., Zel'dovich, B. Y., Kataevskaya, I. V., & Kundikova, N. D. (1995). Formation of an isolated wavefront dislocation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, *80*(5), 817–821.
28. Volyar, A. V., Fadeeva, T. A., & Groshenko, N. A. (1997). Angular momentum of the fields of a few-mode waveguide: conversion of the angular momentum. *Technical Physics Letters*, 883–886.
29. Volyar, A. V., & Shvedov, V. G. (1998). Spin–orbit interaction in the field of an optical vortex of a few-mode fiber. *Technical Physics Letters*, *24*(10), 826–828.
30. Leary, C. C., Raymer, M. G., & van Enk, S. J. (2009). Spin and orbital rotation of electrons and photons via spin-orbit interaction. *Physical Review A*, *80*(6), 061804.
31. Onoda, M., Murakami, S., & Nagaosa, N. (2004). Hall Effect of Light. *Physical Review Letters*, *93*(8), 083901.

32. Bliokh, K. Y., & Bliokh, Y. P. (2006). Conservation of Angular Momentum, Transverse Shift, and Spin Hall Effect in Reflection and Refraction of an Electromagnetic Wave Packet. *Physical Review Letters*, *96*(7), 073903.
33. Hosten, O., & Kwiat, P. (2008). Observation of the spin hall effect of light via weak measurements. *Science (New York, N.Y.)*, *319*(5864), 787–790.
34. Bliokh, K. Y., Niv, A., Kleiner, V., & Hasman, E. (2008). Geometrodynamics of spinning light. *Nature Photonics*, *2*(12), 748–753.
35. Aiello, A., Lindlein, N., Marquardt, C., & Leuchs, G. (2009). Transverse angular momentum and geometric spin Hall effect of light. *Physical Review Letters*, *103*(10), 100401.
36. Baranova, N., Savchenko, A., & Zel'Dovich, B. (1994). Transverse shift of a focal spot due to switching of the sign of circular polarization. *JETP Lett.*, *59*(4), 232–234.
37. Zel'dovich, B. Y., Kundikova, N. D., & Rogacheva, L. F. (1994). Observed transverse shift of a focal spot upon a change in the sign of circular polarization. *JETP Lett.*, *59*(4), 766–769. Retrieved from http://195.178.214.34/ps/1317/article_19910.shtml
38. Bliokh, K. Y., Gorodetski, Y., Kleiner, V., & Hasman, E. (2008). Coriolis effect in optics: unified geometric phase and spin-Hall effect. *Physical Review Letters*, *101*(3), 030404.
39. Fedoseyev, V. G. (2001). Spin-independent transverse shift of the centre of gravity of a reflected and of a refracted light beam. *Optics Communications*, *193*(1–6), 9–18.
40. Fedoseyev, V. G. (2001). Spin-independent transverse shift of the centre of gravity of a reflected and of a refracted light beam. *Optics Communications*, *193*(1–6), 9–18.

41. Bliokh, K. Y., Shadrivov, I. V., & Kivshar, Y. S. (2009). Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts of polarized vortex beams. *Optics Letters*, 34(3), 389–391.
42. Bekshaev, A. Y. (2009). Oblique section of a paraxial light beam: criteria for azimuthal energy flow and orbital angular momentum. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11(9), 094003.
43. Garbin, V., Volpe, G., Ferrari, E., Versluis, M., Cojoc, D., & Petrov, D. (2009). Mie scattering distinguishes the topological charge of an optical vortex: a homage to Gustav Mie. *New Journal of Physics*, 11(1), 013046.
44. Merano, M., Hermosa, N., Woerdman, J. P., & Aiello, A. (2010). How orbital angular momentum affects beam shifts in optical reflection. *Physical Review A*, 82(2), 023817.
45. Bomzon, Z., Gu, M., & Shamir, J. (2006). Angular momentum and geometrical phases in tight-focused circularly polarized plane waves. *Applied Physics Letters*, 89(24), 241104.
46. Zhao, Y., Edgar, J. S., Jeffries, G. D. M., McGloin, D., & Chiu, D. T. (2007). Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam. *Physical Review Letters*, 99(7), 073901.
47. Nagali, E., Sciarrino, F. (2012) Manipulation of Photonic Orbital Angular Momentum for Quantum Information Processing// *Advanced Photonic Sciences*, 4(1). 75–103.
48. Зельдович, Б. Я., & Либерман, В. С. (1990). Поворот плоскости меридионального луча в градиентном световоде за счет циркулярности поляризации. *Квантовая Электроника*, 493–494.
49. Stuart, H. R. (2000). Dispersive Multiplexing in Multimode Optical Fiber. *Science*, 289(5477), 281–283.
50. Saffman, M., & Anderson, D. Z. (1991). Mode multiplexing and holographic demultiplexing communication channels on a multimode fiber. *Optics Letters*, 16(5), 300–302.

51. Rodríguez-Herrera, O. G., Lara, D., Bliokh, K. Y., Ostrovskaya, E. A., & Dainty, C. (2010). Optical Nanoprobing via Spin-Orbit Interaction of Light. *Physical Review Letters*, *104*(25), 253601.
52. O'Neil, A. T., MacVicar, I., Allen, L., & Padgett, M. J. (2002). Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam. *Physical Review Letters*, *88*(5), 053601.
53. Bliokh, K. Y., Alonso, M. A., Ostrovskaya, E. A., & Aiello, A. (2010). Angular momenta and spin-orbit interaction of nonparaxial light in free space. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, *82*(6), 1–8.
54. Bekshaev, A., Bliokh, K. Y., & Soskin, M. (2010). Internal flows and energy circulation in light beams. *Journal of Optics*, 1–50.
55. Proscia, N. V., Moocarme, M., Chang, R., Kretzschmar, I., Menon, V. M., & Vuong, L. T. (2016). Control of photo-induced voltages in plasmonic crystals via spin-orbit interactions. *Optics Express*, *24*(10), 10402.
56. Vasylykiv, Y., Skab, I., & Vlokh, R. (2013). Efficiency of spin-to-orbit conversion in crystals subjected to torsion stresses. *Ukrainian Journal of Physical Optics*, *14*(1), 50–56.
57. Bliokh, K. Y., Ostrovskaya, E. A., Alonso, M. A., Rodríguez-Herrera, O. G., Lara, D., & Dainty, C. (2011). Spin-to-orbital angular momentum conversion in focusing, scattering, and imaging systems. *Optics Express*, *19*(27), 26132–26149.
58. Fedorov, F. I. (2013). To the theory of total reflection. *Journal of Optics*, *15*(1), 014002.
59. Imbert, C. (1970). Experimental proof of the photon's translational inertial spin effect. *Physics Letters A*, *31*(6), 337–338.
60. Гончаренко А. М.; Карпенко В.А. (2004). *Основы теории оптических волноводов*.

61. Большаков, М. В. (2007). *Особенности распространения когерентного поляризованного света в оптических волокнах*. Диссертация.
62. Снайдер А, Лав Дж. (1987). *Теория оптических волноводов*, Москва, «Радио и связь».
63. Chiao, R. Y., & Wu, Y.-S. (1986). Manifestations of Berry's Topological Phase for the Photon. *Physical Review Letters*, 57(8), 933–936
64. Berry, M. V. (1987). Interpreting the anholonomy of coiled light. *Nature*, 326(6110), 277–278.
65. Tomita, A., & Chiao, R. Y. (1986). Observation of Berry's Topological Phase by Use of an Optical Fiber. *Physical Review Letters*, 57(8), 937–940.
66. Zel'dovich, B. Y., & Kundikova, N. D. (1995). Intrafibre rotation of the plane of polarisation. *Quantum Electronics*, 25(2), 172–174.
67. Dennis, M. R., & Götte, J. B. (2012). Topological aberration of optical vortex beams and singularimetry of dielectric interfaces. *Physical Review Letters*, 109(18), 1–5.
68. Alekseyev, K. N., & Yavorsky, M. A. (2007). Propagation of optical vortices in coiled weakly guiding optical fibers. *Optics and Spectroscopy*, 102(5), 754–759.
69. Kataevskaya, I. V, & Kundikova, N. D. (1995). Influence of the helical shape of a fibre waveguide on the propagation of light. *Quantum Electronics*, 25(9), 927–928.
70. Bolshakov, M. V., Guseva, A. V., Kundikova, N. D., & Samkova, E. S. (2011). Polarized light propagation along a helical trajectory. In R. Rodríguez-Vera & R. Díaz-Urbe (Eds.), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (Vol. 8011, p. 80114Q).
71. Liu, S., Wang, M., Li, P., Zhang, P., & Zhao, J. (2013). Abrupt polarization transition of vector autofocusing Airy beams. *Optics Letters*, 38(14), 2416.

72. Bliokh, K. Y., & Bliokh, Y. P. (2004). Modified geometrical optics of a smoothly inhomogeneous isotropic medium: the anisotropy, Berry phase, and the optical Magnus effect. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 70(2 Pt 2), 026605.
73. Zel'dovich, B. Y., Kataevskaya, I. V., & Kundikova, N. D. (1996). Inhomogeneity of the optical Magnus effect. *Quantum Electronics*, 26(1), 87–88.
74. Bolshakov, M. V., Kundikova, N. D., & Vlazneva, M. A. (2016). Modal power decomposition of light propagating through multimode optical fiber. *Optics Communications*, 365, 1–6.
75. Dogariu, A., & Schwartz, C. (2006). Conservation of angular momentum of light in single scattering. *Optics Express*, 14(18), 8425.
76. He, Friese, Heckenberg, & Rubinsztein-Dunlop. (1995). Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity. *Physical Review Letters*, 75(5), 826–829.
77. Goos, F., & Hanchen, H. (1972). A new and fundamental experiment on total reflection. *Annalen Der Physik*, 346(January), 333–346.
78. Alexeyev, C. N., & Yavorsky, M. A. (2007). Berry's phase for optical vortices in coiled optical fibres. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 9(1), 6–14.