

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра оптоинформатики

Шульгинов Александр Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ  
КОМПОНЕНТЫ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО  
АССИМЕТРИЧНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н. Кундикова Н.Д.

Челябинск 2019

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. Обзор литературы.....	6
1.1. Типы угловых моментов фотона.....	6
1.2. Способы получения пучков со спиральным волновым фронтом.....	9
1.2.1. Спиральные фазовые пластинки.....	9
1.2.2. Специальные дифракционные элементы.....	10
1.2.3. Применение цилиндрических линз.....	11
1.3. Взаимодействие различных типов моментов импульса света.....	11
1.3.1. Спин-орбитальное взаимодействие.....	11
1.3.2. Влияние внутреннего орбитального момента импульса.....	14
ГЛАВА 2. Исследование сдвига z-компоненты излучения в перетяжке асимметрично сходящегося гауссова пучка.....	18
2.1. Экспериментальная установка для определения сдвига перетяжки гауссова пучка.....	18
2.2. Экспериментальное исследование эффекта сдвига перетяжки асимметрично сходящегося гауссова пучка.....	22
2.3. Результаты измерений смещения гауссова пучка.....	24
ГЛАВА 3. Исследование сдвига z-компоненты излучения в перетяжке асимметрично сходящегося бесселева пучка.....	26
3.1. Экспериментальная установка для определения сдвига перетяжки бесселева пучка.....	26
3.2. Экспериментальное исследование эффекта сдвига перетяжки асимметрично сходящегося бесселева пучка.....	29
3.3. Результаты измерений смещения бесселева пучка.....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
БЛАГОДАРНОСТИ.....	39
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Спиновый и внешний орбитальный моменты фотона принято связывать с циркулярной поляризацией и траекторией распространения света соответственно. Кроме того, излучение может обладать внутренним орбитальным моментом, связанным с дислокацией волнового фронта. Известно, что в неоднородной или анизотропной среде эти моменты взаимозависимы. Это взаимодействие принято называть спин-орбитальным взаимодействием или оптическим спиновым эффектом Холла для света.

Однако подобный эффект наблюдается и в свободном пространстве, то есть вне зависимости от взаимодействия света с веществом. Этот эффект известен как геометрический спиновый эффект Холла. Впервые он был теоретически предсказан в работе [1], в которой показано, что при смене знака циркуляции поляризованного ассиметрично сходящегося гауссова пучка в плоскости перетяжки происходит сдвиг «центра тяжести» в направлении поперечном оси распространения света. Величина смещения мала и составляет значение порядка радиуса перетяжки пучка. Было показано, что наблюдение этого эффекта возможно в следующей схеме. Плоская циркулярно поляризованная волна распространяется в направлении  $Oz$  и падает на линзу. Если перекрыть половину сходящегося монохроматического циркулярно поляризованного пучка непрозрачной заслонкой ( $x < 0$ ), то у него появляется не скомпенсированная  $E_z$ -компонента, распределение интенсивности которой при смене знака циркулярной поляризации претерпевает поперечное смещение в направлении  $Ox$ .

Первые наглядные результаты экспериментального обнаружения сдвига перетяжки пучка были представлены в работе [2]. Для формирования сходящегося пучка использовался короткофокусный объектив. С помощью специального экрана пучок перекрывался наполовину. Для визуализации светового пучка в область перетяжки помещалась рассеивающая среда (синтетический опал). В направлении, перпендикулярном оси светового пучка, наблюдалось

рассеяние света, вызванное только  $z$ -компонентой светового поля. Оптическая система давала изображение фокальной перетяжки, которое записывалось на фотопластинку. Таким образом были получены фотографии пучка, сформированного вследствие рассеяния  $z$ -компоненты, для случая лево- и правоциркулярно поляризованного света, визуальное сравнение которых позволило судить о величине сдвига  $z$ -компоненты. С помощью визуального наблюдения удалось приблизительно оценить этот сдвиг.

Взаимодействие спинового и орбитального момента импульса света вызывает научный интерес во всём мире, поскольку это взаимодействие в веществе зависит от его свойств и позволяет получить новую информацию об объекте исследования. Изучение этого взаимодействия открывает новые возможности оптического манипулирования нанообъектами. В настоящее время в оптике оформилось новое направление – сингулярная оптика. Это направление связано с изучением световых полей с дислокациями волнового фронта (оптическими вихрями). Такие поля формируются и взаимодействуют с линейно и нелинейно оптическими средами. Поэтому актуальной задачей современной оптики является создание теоретических и экспериментальных подходов для решения проблемы взаимодействия полей, имеющих различные виды моментов импульса (спиновый, орбитальный) с веществами, а также их взаимодействие моментов импульса излучения между собой.

В настоящем проекте была поставлена фундаментальная цель экспериментально исследовать взаимодействие трёх различных видов угловых моментов фотона: спинового, внутреннего орбитального и их совместное слияние на внешний орбитальный. До настоящего времени были исследованы парные взаимодействия этих угловых моментов в вакууме и в средах. Выдвинута гипотеза, что такое взаимодействие возможно в области фокальной перетяжки асимметрично сходящейся продольной компоненты светового пучка, имеющего спиновый и внутренний орбитальный угловой момент. Цель проекта заключается в экспериментальной проверке этой гипотезы.

Для реализации данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) создать экспериментальную установку для регистрации и измерения параметров ассиметрично сходящихся пучков с различными параметрами внутреннего орбитального и спинового моментов,
- 2) оценить параметры бесселева пучка, имеющего ненулевой внутренний момент импульса для определения его «центра тяжести»,
- 3) получить циркулярно поляризованный свет разных знаков для гауссова и бесселева пучка,
- 4) разработать программу для расчёта центра пучка света по изображению,
- 5) экспериментально исследовать поведение продольной компоненты гауссова и бесселева пучка в области фокальной перетяжки при смене знака циркулярной поляризации излучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования мы экспериментально подтвердили гипотезу о том, что воздействие спинового и внутреннего орбитального моментов импульса излучения на его внешний орбитальный момент возможно.

Для этой цели была создана экспериментальная установка, которая позволяла фиксировать продольную компоненту асимметрично сходящегося пучка с нулевым (гауссов луч) и ненулевым (бесселев луч) топологическим зарядом. Система регистрации позволила эти излучения зафиксировать и передать на цифровые носители для последующей компьютерной обработки. Чтобы выявить совместное влияние спинового и внутреннего орбитального момента импульса излучения на траекторию распространения луча, была решена задача построения алгоритма обработки изображения, т.к. смещение в области фокальной перетяжки, где это смещение, как было предсказано теоретически, должно происходить, составляло около 1 мкм. Именно благодаря точной обработке полученных данных и высокому разрешению системы регистрации, этот эффект удалось зарегистрировать. Он проявляется в смещении «центра тяжести» и повороте фокальной перетяжки при изменении поляризации и знака дислокации волнового фронта.

Таким образом, задачи, поставленные в данном исследовании выполнены полностью. Дальнейшие исследования в этой области приведут к более глубокому пониманию природы электромагнитного поля и возможностей его применения для современной науки и техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N.B. Baranova, A.Ya. Savchenko, B.Ya. Zel'dovich, "Transverse shift of a focal spot due to switching of the sign of circular polarization," *JETP Lett.*, vol. 59, no. 4, pp. 232-234, 1994.
2. Б.Я. Зельдович, Н.Д. Кундикова, Л.Ф. Рогачёва, "Наблюдение поперечного сдвига фокальной перетяжки при смене знака циркулярной поляризации," *Письма в ЖЭТФ*, т. 59, № 11, с. 737-740, 1994.
3. R.A. Beth, "Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light," *Phys. Rev.*, vol. 50, pp. 115-125, 1936.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, "Теоретическая физика: Учебное пособие: Для вузов. В 10 т. Т. IV / В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика," 4-е изд., испр., М: ФИЗМАТЛИТ, 2002, с. 32.
5. 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.
6. L. Allen, M. Padgett, M. Babiker, "The orbital angular momentum of light," *Prog. Opt.*, vol. 39, pp. 291-372, 1999.
7. A. M. Yao and M. J. Padgett, "Orbital angular momentum: origins, behavior and applications," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 3, no. 2, p. 161-195, Jun. 2011.
8. S. Barnett, L. Allen, "Orbital angular momentum and non paraxial light beams," *Opt. Commun.*, vol. 110, no. 5-6, pp. 670-678, Sept. 1994.
9. 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, p. 073901, Aug. 2007.
10. T.A. Nieminen, A.B. Stilgoe, N.R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop, "Angular momentum of a strongly focused Gaussian beam," *J. Opt. A. Pure Appl. Opt.*, vol. 10, no. 11, p. 115005, 2008.

11. S. M. Barnett, "Optical angular-momentum flux," *J. Opt. B Quantum Semiclassical Opt.*, vol. 4, no. 2, pp. S7-S16, Apr. 2002.
12. G.A. Turnbull, D.A. Roberson, G.M. Smith, L. Allen, and M.J. Padgett, "Generation of free-space Laguerre–Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate," *Opt. Commun.*, vol. 127, pp. 183-188, 1996.
13. B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T.D. Carozzi, Y.N. Istomin, N.H. Ibragimov, and R. Khamitova, "Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, no. 8, p. 087701, 2007.
14. S. Sasaki and I. McNulty, "Proposal for generating brilliant x-ray beams carrying orbital angular momentum," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 12, p. 124801, 2008.
15. M. Uchida and A. Tonomura, "Generation of electron beams carrying orbital angular momentum," *Nature*, vol. 464, pp. 737-739, 2010.
16. K. Volke-Sepulveda, A.O. Santillan, and R.R. Boulosa, "Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 2, p. 024302, 2008.
17. K.D. Skeldon, C. Wilson, M. Edgar, and M.J. Padgett, "An acoustic spanner and its associated rotational doppler shift," *New J. Phys.*, vol. 10, pp. 013018, Jan. 2008.
18. K.Y. Bliokh, F. Nori, "Transverse spin and surface waves in acoustic metamaterials," *Phys. Rev. B*, vol. 99, no. 2, p. 020301, Jan. 2019.
19. M.W. Beijersbergen, R. Coerwinkel, M. Kristensen, and J.P. Woerdman, "Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate," *Opt. Commun.*, vol. 112, pp. 321-327, 1994.
20. S. Oemrawsingh, J. van Houwelingen, E. Eliel, J.P. Woerdman, E. Verstegen, J. Kloosterboer, and G. Hooft, "Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths," *Appl. Optics*, vol. 43, pp. 688-694, 2004.



21. K. Sueda, G. Miyaji, N. Miyanaga, and M. Nakatsuka, "Laguerre–Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 3548-3553, 2004.
22. V. Bazhenov, M.V. Vasnetsov, and M.S. Soskin, "Laser-beams with screw dislocations in their wave-fronts," *JETP. Lett.*, vol. 52, pp. 429-431, 1990.
23. V. Bazhenov, M.S. Soskin, and M.V. Vasnetsov, "Screw dislocations in light wavefronts," *J. Mod. Opt.*, vol. 39, pp. 985-990, 1992.
24. N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, H. Rubinsztein-Dunlop, and M. Wegener, "Laser beams with phase singularities," *Opt. Quantum. Electron.*, vol. 24, pp. S951-S962, 1992.
25. N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, and A. White, "Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms," *Opt. Lett.*, vol. 17, pp. 221-223, 1992.
26. J. Arlt, K. Dholakia, L. Allen, and M.J. Padgett, "Parametric downconversion for light beams possessing orbital angular momentum," *Phys. Rev. A*, vol. 59, pp. 3950-3952, 1999.
27. A.E. Willner et al., "Optical communications using orbital angular momentum beams," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 7, no. 1, p. 66, Mar. 2015.
28. W. Harm, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, I. Harder, and N. Lindlein, "Adjustable diffractive spiral phase plates," *Opt. Express*, vol. 23, no. 1, p. 413, Jan. 2015.
29. L. Marrucci, E. Karimi, S. Slussarenko, B. Piccirillo, E. Santamato, E. Nagali, F. Sciarrino, "Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications," *J. Opt.* v. 13, p.064001, 2011.
30. M.W. Beijersbergen, L. Allen, H. van der Veen, and J.P. Woerdman, "Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum," *Opt. Commun.*, vol. 96, pp. 123-132, 1993.
31. M. Onoda, S. Murakami, N. Nagaosa, "Hall effect of light," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, p. 083901, 2004.

32. K. Bliokh, Y. 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, p. 073903, 2006.
33. F.I. Fedorov, “On the theory of total internal reflection,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol. 105, no. 5, pp. 465-469, 1955.
34. C. Imbert, “Experimental proof of the photon’s translational inertial spin effect,” *Phys. Lett. A*, vol. 31, pp.337-338, 1970.
35. K. Bliokh, A. Aiello, “Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov beam shifts: an overview,” *J. Opt.*, vol. 15, p. 014001, 2013.
36. K.Y. Bliokh, C.T. Samlan, C. Prajapati, G. Puentes, N.K. Viswanathan, and F. Nori, “Spin-Hall effect and circular birefringence of a uniaxial crystal plate,” *Optica*, vol. 3, no. 10, p. 1039, 2016.
37. A.V. Dooghin, N.D. Kundikova, V.S. Liberman, B.Ya. Zeldovich, “Optical Magnus effect,” *Phys. Rev. A*, vol.45, pp. 8204-8208, 1992.
38. A. Bekshaev, K.Y. Bliokh, M.S. Soskin, “Internal flows and energy circulation in light beams,” *J. Opt.*, vol. 13, p. 53001, 2011.
39. A. Aiello, N. Lindlein, C. Marquardt, G. Leuchs, “Transverse angular momentum and geometric spin hall effect of light,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, p. 100401, 2009.
40. J. Korger, A. Aiello, C. Gabriel, P. Banzer, T. Kolb, C. Marquardt, G. Leuchs, “Geometric Spin Hall Effect of Light at polarizing interfaces,” *Appl. Phys. B.*, vol. 102, p. 427, 2011.
41. J. Korger, A. Aiello, V. Chille, P. Banzer, C. Wittmann, N. Lindlein, C. Marquardt, G. Leuchs, “Observation of the Geometric Spin Hall Effect of Light,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, p. 113902, 2014.
42. M. Neugebauer, P. Banzer, T. Bauer, S. Orlov, N. Lindlein, A. Aiello, G. Leuchs, “Geometric spin Hall effect of light in tightly focused polarization tailored light beams,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, p. 013840, 2014.

43. Y. Zhao, J.S. Edgar, G.D.M. Jeffries, D. McGloin, D.T. Chiu, “Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, p. 073901, 2007.
44. Э.А. Бибилова, Н.Д. Кундикова, Л.Ф. Рогачева, “Влияние траектории света на его состояние поляризации в оптически однородной среде,” *Известия Челябинского научного центра УрО РАН*, № 3, с. 91-95, 2006.
45. X. Zhao, X. Pang, J. Zhang, and G. Wan, “Transverse Focal Shift in Vortex Beams,” *IEEE Photonics J.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, Feb. 2018.
46. K.Y. Bliokh, M.A. Alonso, E.A. Ostrovskaya, and A. Aiello, “Angular momenta and spin-orbit interaction of nonparaxial light in free space,” *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 82, no. 6, pp. 4–10, 2010.
47. K.Y. Bliokh, F. Nori, “Transverse and longitudinal angular momenta of light,” *Phys. Rep.*, vol. 592, pp. 1–38, Aug. 2015.
48. S. Abdulkareem and N. 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.
49. S. Nechayev, J. S. Eismann, G. Leuchs, and P. Banzer, “Orbital-to-spin angular momentum conversion employing local helicity,” *Phys. Rev. B*, vol. 99, no. 7, p. 075155, Feb. 2019.
50. M. Neugebauer, S. Nechayev, M. Vorndran, G. Leuchs, and P. Banzer, “Weak Measurement Enhanced Spin Hall Effect of Light for Particle Displacement Sensing,” *Nano Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 422–425, Jan. 2019.
51. D. L. P. Vitullo *et al.*, “Observation of Interaction of Spin and Intrinsic Orbital Angular Momentum of Light,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, no. 8, p. 083601, Feb. 2017.
52. J. Li, J. Zhang, and J. Li, “Optical twists and transverse focal shift in a strongly focused, circularly polarized vortex field,” *Opt. Commun.*, vol. 439, no. February, pp. 284–289, May 2019.

53. H. Magallanes and E. Brasselet, “Macroscopic direct observation of optical spin-dependent lateral forces and left-handed torques,” *Nat. Photonics*, vol. 12, no. 8, pp. 461–464, Aug. 2018.
54. E.A. Bibikova, N.D. Kundikova, “Properties of an adjustable quarter-wave system under conditions of multiple beam interference,” *Applied Optics*, vol. 52, pp. 1851-1856, 2013.
55. E. Bibikova, N. Kundikova, L. Rogacheva, “Method for determining polarization parameters of thin phase plates,” *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 70, pp. 1469-1472, 2006.
56. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин, “Физическая оптика,” – 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 656 с., 2004.
57. V.V. Kotlyar, A.A. Almazov, S.N. Khonina, V.A. Soifer, “Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate,” *J. Opt. Soc. Am. A.*, vol. 22, no. 5, pp. 849-861, 2005.
58. S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J.Laukkanen, J. Turunen, “Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams,” *J. Opt.*, vol. 15, no. 8, p. 085704, 2013.
59. M.R. Dennis, K. O'Holleran, M.J. Padgett, “Singular optics: optical vortices and polarization singularities,” *Prog. Opt.*, vol. 53, pp. 293-363, 2009.
60. A. Popiolek-Masajada, W. Frączyk, “Evaluation of phase shifting method for vortex localization in optical vortex interferometry,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 43, pp. 1219-1224, 2011.