

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ.

Кафедра оптоинформатики

ЧЕРЕДИНОВ Михаил Васильевич

**Моделирование взаимодействия  
структурированного пучка с системой  
пленка-подложка**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н. М.В. Большаков

Челябинск 2019

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Взаимодействие лазерного излучения с системой пленка-подложка.</b>	<b>4</b>
<b>Обзор литературы.</b>	<b>4</b>
1.1 Угловые моменты света. . . . .	4
1.2 Эффекты спин-орбитального взаимодействия. . . . .	6
1.3 Эффекты спин-орбитального взаимодействия в пленках. . . . .	8
1.4 Методы получения пленок. . . . .	10
1.5 Пучек с гауссовым распределением амплитуды, обладающий внутренней структурой. . . . .	11
<b>2 Моделирование взаимодействия светового пучка с системой пленка-подложка.</b>	<b>13</b>
2.1 Математическая модель отражения пучка от системы пленка- подложка. . . . .	13
2.2 Результаты моделирования отражения пучка, обладающего внут- ренним орбитальным угловым моментом, от системы пленка- подложка. Поперечное сечение пучка на пленке после отражения.	15
<b>Заключение</b>	<b>31</b>
<b>Литература</b>	<b>36</b>

# Введение

Как известно, электромагнитное излучение можно рассматривать с точки зрения квантовой механики. В таком случае можно говорить об угловых моментах света [1]. К ним относится угловой спиновый момент, возникающий из-за круговой поляризации. Кроме того, луч света может обладать внутренним орбитальным угловым моментом из-за его пространственного распределения фазы. Наравне с энергией и импульсом, внутренний орбитальный угловой момент является одной из наиболее важных динамических характеристик света [2, 3]. Внешний орбитальный угловой момент связан с движением "центра тяжести" пучка в пространстве [4]. Луч со спиральным фазовым фронтом, имеющим симметричное расположение относительно оси распространения, всегда имеет нулевой поперечный импульс. Выражая в комплексной форме,  $E(r, \phi) = E_0(r) \exp(il\phi)$ , где  $r, \phi$  — полярные координаты (радиус и угол соответственно) в плоскости  $xy$ ,  $l$  — квантовое число орбитального углового момента или топологический заряд. Для данного поля, называемого «спиральной модой» было показано, что каждый фотон обладает собственным орбитальным угловым моментом импульса, равным  $l\hbar$  на фотон, независимо от выбранной оси расчета [5–7]. Такие поля обладают топологической особенностью фазы на оси распространения пучка [8]. Величина оптического углового момента пучка оказывает влияние на свойства порождаемых пучком оптических вихрей. Угловые моменты света могут влиять друг на друга, что по своей сути является спин-орбитальным взаимодействием [9–11]. Кроме попарных спин-орбитальных взаимодействий существуют также и двойные — единовременное влияние двух угловых моментов на третий [12]. В результате этого наблюдается повышенный интерес к изучению спин-орбитального взаимодействия в различных условиях [13–26]. При отражении света от системы пленка-подложка наблюдается эффект множественного отражения [27], что способствует усилению эффектов, проявляющихся при отражении и преломлении на границе двух сред.

Целью данной работы является определение параметров пленки, подложки, светового пучка с дислокацией волнового фронта, при которых возможно наблюдение совместного влияния спинового и внутреннего орбитальных моментов на внешний орбитальный угловой момент светового пучка, при наименьшей толщине пленки.

Задачи необходимые для достижения данной цели:

1. Создание программы для расчета отражения светового пучка от системы пленка-подложка
2. Расчет смещения центра масс пучка от следующих параметров:
  - а) Толщина пленки
  - б) Угол падения луча
  - в) Топологический заряд
  - г) Состояние поляризации падающего луча (левая и правая циркулярные поляризации, линейные р и s поляризации)
3. Нахождение наилучших параметров для наблюдения данного эффекта

# Заключение

Таким образом, исходя из результатов вышеизложенной работы можно заключить следующее:

1. Обнаружена зависимость внешнего орбитального углового момента от состояния поляризации и топологического заряда падающего пучка
2. Получены оптимальные параметры системы:
  - а) толщина пленки  $h = 0,071$  мкм;
  - б) углы исследования 30–55 градусов.

Полученные результаты будут использованы при напылении пленок для дальнейшего экспериментального исследования поперечного смещения “центра тяжести” пучка, обладающего орбитальным моментом, при отражении от тонкой пленки.

# Литература

- [1] Оптический аналог эффекта Магнуса / А.В. Дугин, Б.Я. Зельдович, Н.Д. Кундиков [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1991. Т. 73, № 5. С. 816–820.
- [2] Franke-Arnold S., Allen L., Padgett M. Advances in Optical Angular Momentum // Laser & Photonics Review. 2008. aug. Т. 2, № 4. С. 299–313.
- [3] Allen L, Barnett Stephen M, Padgett Miles J. Optical Angular Momentum. IOP Publishing Ltd, 2003. mar. С. 625–38. URL: <http://stacks.iop.org/0750309016>.
- [4] Bliokh Konstantin Yu. Geometrical Optics of Beams with Vortices: Berry Phase and Orbital Angular Momentum Hall Effect // Physical Review Letters. 2006. jul. Т. 97, № 4. С. 043901.
- [5] Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam / A. T. O’Neil, I. MacVicar, L. Allen [и др.] // Physical Review Letters. 2002. jan. Т. 88, № 5. С. 053601.
- [6] Orbital Angular Momentum of Light and the Transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes. / L. Allen, M.V. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw [и др.] // Physical review. A, Atomic, molecular, and optical physics. 1992. jun. Т. 45, № 11. С. 8185–8189.
- [7] Allen L., Padgett M. J., Babiker M. The Orbital Angular Momentum of Light // Progress in Optics. 1999. jan. Т. 39, № C. С. 291–372.
- [8] Aksenov V P, Pogutsa Ch E. Fluctuations of the Orbital Angular Momentum of a Laser Beam, Carrying an Optical Vortex, in the Turbulent Atmosphere // Quantum Electronics. 2008. apr. Т. 38, № 4. С. 343–348.
- [9] Spin-orbit interactions of light / K. Y. Bliokh, F. J. Rodríguez-Fortuño, F. Nori [и др.] // Nature Photonics. 2015. dec. Т. 9, № 12. С. 796–808. URL: <http://www.nature.com/articles/nphoton.2015.201>.
- [10] Cardano Filippo, Marrucci Lorenzo. Spin-orbit photonics // Nature Photonics. 2015. dec. Т. 9, № 12. С. 776–778. URL: <http://www.nature.com/articles/nphoton.2015.232>.

- [11] Observation of Interaction of Spin and Intrinsic Orbital Angular Momentum of Light / Dashiell L. P. Vitullo, Cody C. Leary, Patrick Gregg [и др.] // *Physical Review Letters*. 2017. feb. Т. 118, № 8. С. 083601. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.083601>.
- [12] Abdulkareem Sarkew, Kundikova Nataliya. Joint Effect of Polarization and the Propagation Path of a Light Beam on its Intrinsic Structure // *Optics Express*. 2016. aug. Т. 24, № 17. С. 19157. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-24-17-19157>.
- [13] Transformation of the Orbital Angular Momentum of a Beam with Optical Vortex in an Astigmatic Optical System / A. Ya. Bekshaev, M. V. Vasnetsov, V. G. Denisenko [и др.] // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2002. feb. Т. 75, № 3. С. 127–130.
- [14] Abramochkin E. G., Volostnikov V. G. Generalized Gaussian Beams // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2004. may. Т. 6, № 5. С. S157–S161.
- [15] Marrucci L., Manzo C., Paparo D. Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media // *Physical Review Letters*. 2006. apr. Т. 96, № 16. С. 163905.
- [16] Bliokh Konstantin, Smirnova Daria, Nori Franco. Quantum Spin Hall Effect of Light. // *Science*. 2015. jun. Т. 348, № 6242. С. 1448–51.
- [17] Paterson C. Atmospheric Turbulence and Orbital Angular Momentum of Single Photons for Optical Communication // *Physical Review Letters*. 2005. apr. Т. 94, № 15. С. 153901.
- [18] Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in a Strongly Focused Optical Beam / Yiqiong Zhao, J. Scott Edgar, Gavin D.M. Jeffries [и др.] // *Physical Review Letters*. 2007. aug. Т. 99, № 7. С. 073901.
- [19] Orbital Angular Momentum Induced Beam Shifts / N. Hermosa, M. Merano, A. Aiello [и др.] // *SPIE Conference Proceedings*. 2011. feb. Т. 7950. С. 79500F.
- [20] Алвассити Н., Бибикова У.А. Геометрический спиновый эффект Холла для пучков гауса // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2016. Т. 8, № 2. С. 67–70.
- [21] Dorrah Ahmed H., Zamboni-Rached Michel, Mojahedi Mo. Experimental Demonstration of Tunable Refractometer Based on Orbital Angular momentum of longitudinally structured light //

- Light: Science & Applications. 2018. dec. Т. 7, № 1. С. 40. URL: <http://www.nature.com/articles/s41377-018-0034-9>.
- [22] Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков // Успехи физических наук. 2012. С. 442. URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/portal/books/o\\_26792](http://www.rfbr.ru/rffi/portal/books/o_26792)  
<http://ufn.ru/ru/articles/2012/4/f/>.
- [23] On-Chip Optimal Stokes Nanopolarimetry Based on Spin–Orbit Interaction of Light / Alba Espinosa-Soria, Francisco J. Rodríguez-Fortuño, Amadeu Griol [и др.] // Nano Letters. 2017. may. Т. 17, № 5. С. 3139–3144. URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.7b00564>.
- [24] Spin–orbit coupling of light in asymmetric microcavities / L. B. Ma, S. L. Li, V. M. Fomin [и др.] // Nature Communications. 2016. apr. Т. 7, № 1. С. 10983. URL: <http://www.nature.com/articles/ncomms10983>.
- [25] Strong Spin-Orbit Interaction of Light in Plasmonic Nanostructures and Nanocircuits / Deng Pan, Hong Wei, Long Gao [и др.] // Physical Review Letters. 2016. oct. Т. 117, № 16. С. 166803. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.166803>.
- [26] Dynamic consequences of optical spin–orbit interaction / Sergey Sukhov, Veerachart Kajorndejnkul, Roxana Rezvani Naraghi [и др.] // Nature Photonics. 2015. dec. Т. 9, № 12. С. 809–812. URL: <http://www.nature.com/articles/nphoton.2015.200>.
- [27] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Наука, 1973. С. 720.
- [28] Bliokh K Y, Aiello A. Goos–Hänchen and Imbert–Fedorov Beam Shifts: an Overview // Journal of Optics. 2013. jan. Т. 15, № 1. С. 014001.
- [29] Renard Rémi H. Total Reflection: A New Evaluation of the Goos–Hänchen Shift // Journal of the Optical Society of America. 1964. oct. Т. 54, № 10. С. 1190.
- [30] Swain Prasad Kumar, Goswami Nabamita, Saha Ardhendu. LRSP Resonance Enhanced Spatial and Angular Goos–Hanchen Shift and Imbert–Fedorov Shift for Gaussian Beam, Laguerre–Gaussian Beam and Bessel Beam // Optics Communications. 2017. jan. Т. 382. С. 1–6.
- [31] Блюх К. Ю., Блюх Ю. П. Оптический эффект Магнуса как следствие анизотропии фазы Берри // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2004. jun. Т. 79, № 11. С. 519–522.



- [32] Zel'dovich Boris Ya, Liberman V S. Rotation of the Plane of a Meridional Beam in a Graded-Index Waveguide due to the Circular Nature of the Polarization // Soviet Journal of Quantum Electronics. 1990. apr. T. 20, № 4. С. 427–428.
- [33] Zel'dovich Boris Ya, Kundikova N D. Intrafibre Rotation of the Plane of Polarisation // Quantum Electronics. 1995. feb. T. 25, № 2. С. 172–174.
- [34] Berry M. V. Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1984. mar. T. 392, № 1802. С. 45–57. URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1984.0023>.
- [35] Alexeyev Constantine N., Lapin Boris A., Yavorsky Maxim A. Optical Vortices and Topological Phase in Strongly Anisotropic Coiled Few-mode Optical Fibers // Journal of the Optical Society of America B. 2007. oct. T. 24, № 10. С. 2666. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josab-24-10-2666>.
- [36] Формирование единичной дислокации волнового фронта / М.Я. Даршт, Б. Я. Зельдович, И В Катаевская [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1995. Т. 107. С. 1464–1472. URL: [http://jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e\\_080\\_05\\_0817.pdf](http://jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_080_05_0817.pdf).
- [37] Vasylykiv Yu, Skab I., Vlokh R. Efficiency of Spin-to-Orbit Conversion in Crystals Subjected to Torsion Stresses // Ukrainian Journal of Physical Optics. 2013. Т. 14, № 1. С. 50. URL: [http://www.ifo.lviv.ua/journal/2013/2013\\_1\\_14\\_07.html](http://www.ifo.lviv.ua/journal/2013/2013_1_14_07.html).
- [38] Abrupt Polarization Transition of Vector Autofocusing Airy Beams / Sheng Liu, Meirong Wang, Peng Li [и др.] // Optics Letters. 2013. jul. T. 38, № 14. С. 2416. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ol-38-14-2416>.
- [39] Orbit-Orbit Interaction and Photonic Orbital Hall Effect in Reflection of a Light Beam / Jin Zhang, Xin Xing Zhou, Xiao Hui Ling [и др.] // Chinese Physics B. 2014. Т. 23, № 6.
- [40] Kundikova N. D., Zaitsev K. A. Transverse Shift of a Beam With Orbital Angular Momentum Under Reflection From a Dielectric Film // Arxiv. 2013. oct. URL: <http://arxiv.org/abs/1310.6559>.
- [41] Иванов А., Смирнов Б. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // Наноиндустрия. 2012. Т. 6, № 36. С. 28–34.

- [42] Seshan Krishna, Schepis Dominic. Handbook of Thin Film Deposition. Elsevier, 2018. URL: [https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=jScsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&film deposition&f=false](https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=jScsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&film%20deposition&f=false) <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20160032436>.
- [43] Laser Deposition of ZnO Films on Silicon and Sapphire Substrates / A N Zherikhin, A I Khudobenko, R T Williams [и др.] // Quantum Electronics. 2003. nov. Т. 33, № 11. С. 975–980. URL: <http://stacks.iop.org/1063-7818/33/i=11/a=A06?key=crossref.4a6def615845718c9d48b32f2503b624>.
- [44] Большаков М.В., Кундикова Н.Д., Попков И.И. Оптический метод исследования параметров тонкой пленки. // XIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. 2015. С. 228–233.
- [45] Зорич В. А. Математический анализ. Часть I. 6 изд. Издательство Московского Центра непрерывного математического образования, 1984. С. 710.
- [46] Котляр В В, Ковалёв А А, Порфирьев А П. Лазерные пучки Эрмита-Гаусса с орбитальным угловым моментом // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 1. С. 651–657.