

Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра оптоинформатики

СОЛОМОНОВ Александр Иванович

**ВЫБОР МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА БЕССЕЛЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
ПЛЕНКА - ПОДЛОЖКА**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

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

Челябинск 2018

# Введение

Героям фильма "экзамен" необходимо было дать ответ на единственный вопрос. Но прежде им было необходимо найти сам вопрос. В поисках заветного вопроса претенденты решают, что, возможно, вопрос написан на их листах, но его не видно в обычном электрическом свете, они ищут ультрафиолетовое, а затем и инфракрасное излучение, разбивая лампы, различными способами пытаются намочить бумагу [1]. В каком то смысле они пытаются изучить "пленку" на "подложке." И наиболее известен и распространен эллипсометрический метод — анализ поляризации волны, прошедшей или отраженной от поверхности.

Но при детальном изучении законов преломления и отражения лазерных пучков на границе двух сред показывает отклонение от хорошо известных законов преломления и отражения [2]. Существует продольный сдвиг Гуса-Ханхена — продольный сдвиг линейно поляризованного света при полном внутреннем отражении [3, 4]. Существует поперечный сдвиг Имберта-Федорова — поперечный сдвиг центра тяжести пучка при полном внутреннем отражении [5, 6]. Но кроме пространственных могут присутствовать и угловые сдвиги Гуса-Ханхена [7] и Имберта-Федорова [8], возникающие при отражении от границы раздела двух сред.

Величиной всех четырех сдвигов можно управлять: усложнять среду, усложнять структуру светового пучка, падающего на границу раздела двух сред. И если для исследования структур типа пленка-подложка нельзя менять материал пленки, то остается усложнять структуру облучающего светового пучка. Например можно исследовать влияние поляризации на отражение пучка Гаусса от тонкой пленки на подложке [9]. Другой метод заключается в исследовании пленки световым пучком с внутренним орбитальным моментом (или пучком Бесселя) [10]. Было предсказано поперечное смещение пучка с орбитальным угловым моментом, отраженного от диэлектрической пленки при изменении знака орбитального момента импульса. Но до сих пор не было получено экспериментального подтверждения. Значит существует проблема в ге-

нерации пучка Бесселя с необходимыми параметрами для исследования структуры типа пленка-подложка.

Сам пучок Бесселя является одним из точным решений волнового уравнения класса недифрагирующих полей. К сожалению, в идеальном случае не могут быть получены (для их создания требуется бесконечная энергия [11]), так что для экспериментальной реализации было придумано ограничение по апертуре [12, 13]. Эти Бессель-Гауссовы пучки обладают свойством сохранять свою форму на некотором протяжении и самовостанавливаться после препятствия [14–17].

Нарастающий интерес к Бесселевым пучкам (не только нулевых, но и высших порядком) требовал простых и надежных устройств методов генерации из обычных лазерных лучей, как например из Гауссовых пучков. Самый простой подход влияния на фазу и амплитуду — спиральная фазовая пластинка [18–21]. Небольшое отличие составляет и сегментирование зеркала — набор зеркальных сегментов, управляемых пьезоэлектрическими приводами [22, 23].

Огромный пласт в современной генерации пучков относится к пространственным модуляторам света — объектами, которыми накладывается некоторая форма пространственно изменяющейся модуляции на луч света. Простота в использовании (и в модуляции), возможность фазовой и/или амплитудной модуляции находит применение во многих аспектах адаптивной оптики [24–28].

Для генерации пучка Бесселя достаточно одного фазового модулятора. Для этого необходимо закодировать информацию об амплитудном распределении в фазовое распределение. И уже полученное двумерное распределение использовать в качестве маски для текущего модулятора.

Соответственно целью данной выпускной квалификационной работы является выбор метода формирования пучка Бесселя первого порядка методом с помощью фазового пространственного модулятора света. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- Изучить возможные методики кодирования амплитуды для генерации первого порядка пучка Бесселя;
- Воссоздать в лабораторных условиях пучки Бесселя;
- Проанализировать полученные результаты и сравнить эффективность выбранных методик.

# Заключение

Таким образом, в результате выполненной работы получены следующие результаты:

1. Изучены возможные методы генерации пучков Бесселя.

Для генерации первого порядка пучка Бесселя был выбран фазовый модулятор света из-за возможности быстрой и легкой смены маски. Для задания фазовой маски были написаны на языке Python программы кодирования распределения амплитуды в виде распределения фазы (Листинг А.1 – А.3).

2. Воссозданы пучки Бесселя первого порядка.

Для этого собран интерферометр Майкельсона (рис. 2.2), где вместо одного из глухих зеркал установлен фазовый пространственный модулятор света.

3. Получены распределения интенсивности и коэффициенты преобразования из Гауссового пучка в пучок Бесселя первого порядка для представленных методик кодирования.

В ходе анализа выявлено, что наиболее удачным из удачных из методов для генерации пучков Бесселя с топологическим зарядом  $+1$  — метод мультиплексирования двух фазовых масок. Несмотря на средний, по отношению к другим методам, коэффициент преобразования, только данный метод позволяет уменьшить влияние шумов и вредных эффектов для генерируемого пучка Бесселя.

Полученные результаты можно использовать для экспериментальной подтверждения поперечного смещения пучка с орбитальным угловым моментом, отраженного от диэлектрической пленки.

# Литература

- [1] реж. Стюарт Хейзелдинг. Экзамен (фильм, 2009) — Википедия.
- [2] Picht, J. Beitrag zur Theorie der Totalreflexion. *Annalen der Physik* **395**, 433–496 (1929).
- [3] Goos, F. & Hänchen, H. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion. *Annalen der Physik* **436**, 333–346 (1947).
- [4] Goos, F. & Lindberg-Hänchen, H. Neumessung des Strahlversetzungseffektes bei Totalreflexion. *Annalen der Physik* **440**, 251–252 (1949).
- [5] Федоров, Ф. И. К теории полного отражения. In *ДАН СССР*, vol. 105, 465–468 (1955).
- [6] Kristofel, N. Total internal reflection and the effects connected to it. *Proc. Tartu Univ* **42**, 94 (1956).
- [7] Merano, M., Aiello, A., Van Exter, M. P. & Woerdman, J. P. Observing angular deviations in the specular reflection of a light beam. *Nature Photonics* **3**, 337–340 (2009).
- [8] Bliokh, K. Y. & Nori, F. Transverse and longitudinal angular momenta of light. *Physics Reports* **592**, 1–38 (2015). 1504.03113.
- [9] Попков, И. И., Большаков, М. В. & Кундикова, Н. Д. Оптический метод исследования параметров тонкой пленки. In *XIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике*, 228–233 (2015).
- [10] Kundikova, N. D. & Zaitsev, K. A. Transverse shift of a beam with orbital angular momentum under reflection from a dielectric film. *Arxiv* 1–4 (2013). 1310.6559.

- [11] Durnin, J. Exact solutions for nondiffracting beams I The scalar theory. *Journal of the Optical Society of America A* **4**, 651 (1987).
- [12] Durnin, J., Miceli, J. & Eberly, J. H. Diffraction-free beams. *Physical Review Letters* **58**, 1499–1501 (1987).
- [13] Gori, F., Guattari, G. & Padovani, C. Bessel-Gauss beams. *Optics Communications* **64**, 491–495 (1987).
- [14] Garcés-Chávez, V., McGloin, D., Melville, H., Sibbett, W. & Dholakia, K. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam. *Nature* **419**, 145–147 (2002).
- [15] Wu, G., Wang, F. & Cai, Y. Generation and self-healing of a radially polarized Bessel-Gauss beam. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* **89** (2014).
- [16] Arrizon, V., Mellado-Villaseñor, G., Aguirre-Olivas, D. & Moya-Cessa, H. M. Mathematical and diffractive modeling of self-healing. *Opt. Express* **26**, 12219–12229 (2018). [arXiv:1503.03125](https://arxiv.org/abs/1503.03125).
- [17] Otte, E. *et al.* Recovery of local entanglement in self-healing vector vortex Bessel beams. *arXiv preprint arXiv:1203.4756* (2018). 1805.08179.
- [18] Beijersbergen, M. W., Coerwinkel, R. P., Kristensen, M. & Woerdman, J. P. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate. *Optics Communications* **112**, 321–327 (1994).
- [19] Ruffato, G., Massari, M. & Romanato, F. Generation of high-order Laguerre–Gaussian modes by means of spiral phase plates. *Optics Letters* **39**, 5094 (2014).
- [20] Knyazev, B. A., Choporova, Y. Y., Mitkov, M. S., Pavelyev, V. S. & Volodkin, B. O. Generation of Terahertz Surface Plasmon Polaritons Using Nondiffractive Bessel Beams with Orbital Angular Momentum. *Physical Review Letters* **115** (2015).
- [21] Mittleman, D. M. *Frontiers in terahertz sources and plasmonics* (2013).
- [22] Yu, X., Todi, A. & Tang, H. Bessel beam generation using a segmented deformable mirror. *Applied Optics* **57**, 1–6 (2018).

- [23] Tyson, R. K., Scipioni, M. & Viegas, J. Generation of an optical vortex with a segmented deformable mirror. *Applied Optics* **47**, 6300 (2008).
- [24] Kupchak, C., Erskine, J., England, D. G. & Sussman, B. J. THz-bandwidth all-optical switching of heralded single photons. *arXiv preprint arXiv:1806.01245* (2018). 1806.01245.
- [25] Shen, T. Z., Hong, S. H. & Song, J. K. Electro-optical switching of graphene oxide liquid crystals with an extremely large Kerr coefficient. *Nature Materials* **13**, 394–399 (2014).
- [26] Shcherbakov, M. R. *et al.* Ultrafast All-Optical Switching with Magnetic Resonances in Nonlinear Dielectric Nanostructures. *Nano Letters* **15**, 6985–6990 (2015).
- [27] Smarra, M., Strube, A. & Dickmann, K. Micro drilling using deformable mirror for beam shaping of ultra-short laser pulses. In Klotzbach, U., Washio, K. & Arnold, C. B. (eds.) *Laser-based Micro-and Nanoprocessing X*, vol. 9736, 97360S (International Society for Optics and Photonics, 2016).
- [28] Jedrkiewicz, O. *et al.* Pulsed Bessel beam-induced microchannels on a diamond surface for versatile microfluidic and sensing applications. *Optical Materials Express* **7**, 1962 (2017).
- [29] Imbert, C. Calculation and experimental proof of the transverse shift induced by total internal reflection of a circularly polarized light beam. *Physical Review D* **5**, 787–796 (1972).
- [30] De Beauregard, O. C. & Imbert, C. Quantized longitudinal and transverse shifts associated with total internal reflection. *Physical Review Letters* **28**, 1211–1213 (1972).
- [31] Merano, M. *et al.* Observation of Goos-Hänchen shifts in metallic reflection. *Optics Express* **15**, 15928 (2007). 0709.2278.
- [32] Hermosa, N., Merano, M., Aiello, A. & Woerdman, J. P. Orbital angular momentum induced beam shifts. *Proc. of SPIE* **7950**, 79500F–79500F–7 (2011). 1101.1674.
- [33] Zhou, X., Xiao, Z., Luo, H. & Wen, S. Experimental observation of the spin Hall effect of light on a nanometal film via weak measurements.

- Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* **85**, 043809 (2012). 1112.4560.
- [34] Наседкина, Ю. Ф. & Семенцов, Д. И. Трансформация и сдвиг гауссова пучка при отражении от тонкой пленки. *Опт. и спектр* **102**, 846–853 (2007).
- [35] Mishra, S. A vector wave analysis of a Bessel beam. *Optics Communications* **85**, 159–161 (1991).
- [36] Cheng, W. *Optical vortex beams: generation, propagation and applications*. Ph.D. thesis, University of Dayton (2013).
- [37] Poynting, J. H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **82**, 560–567 (1909).
- [38] Beth, R. A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light. *Physical Review* **50**, 115–125 (1936).
- [39] Bliokh, K. Y., Rodríguez-Fortuño, F. J., Nori, F. & Zayats, A. V. *The angular momentum of light* (Cambridge University Press, 2012).
- [40] Bliokh, K. Y., Rodríguez-Fortuño, F. J., Nori, F. & Zayats, A. V. Spin-orbit interactions of light. *Nature Photonics* **9**, 796–808 (2015). 1505.02864.
- [41] Allen, L., Beijersbergen, M. W., Speeruw, R. & Woerdman, J. P. OAM transformation Laguerre-Gaussian laser modes (1992).
- [42] Abdulkareem, S. & Kundikova, N. Joint effect of polarization and the propagation path of a light beam on its intrinsic structure. *Optics Express* **24**, 19157 (2016). 1604.03371.
- [43] Barnett, S. M. *et al.* On the natures of the spin and orbital parts of optical angular momentum. *Journal of Optics* **18**, 064004 (2016).
- [44] Nye, J. F. & Berry, M. V. Dislocations in Wave Trains. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **336**, 165–190 (1974).



- [45] Абрамочкин, Е. Г. & Волостников, В. Г. Спиральные пучки света. *Успехи физических наук* **174**, 1273–1300 (2004).
- [46] Rubinsztein-Dunlop, H. *et al.* Roadmap on structured light. *Journal of Optics (United Kingdom)* **19** (2017). 1612.06474.
- [47] Dennis, M. R., O’Holleran, K. & Padgett, M. J. Singular Optics: Optical vortices and polarization singularities. In *Progress in Optics*, vol. 53, 293–363 (Elsevier, 2009).
- [48] Chen, R. *et al.* Detecting the topological charge of optical vortex beams using a sectorial screen. *Applied Optics* **56**, 4868 (2017).
- [49] Котляр, В. В., Ковалёв, А. А. & Порфирьев, А. П. Определение топологического заряда оптического вихря с помощью астигматического преобразования. *Компьютерная оптика* **40** (2016).
- [50] Liang, Y. *et al.* Generation of cylindrical vector beams based on common-path interferometer with a vortex phase plate. *Optical Engineering* **55**, 046117 (2016).
- [51] Vaity, P., Brunet, C., Messaddeq, Y., LaRochelle, S. & Rusch, L. A. Exciting OAM modes in annular-core fibers via perfect OAM beams. In *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1–3 (IEEE, 2014).
- [52] Vaity, P. & Rusch, L. A. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam. *Optics Letters* **40**, 597 (2015).
- [53] Gregg, P. *et al.* Stable Transmission of 12 OAM States in Air-Core Fiber. *Cleo: 2013* **1**, CTu2K.2 (2013).
- [54] Davis, J. A., Cottrell, D. M., Campos, J., Yzuel, M. J. & Moreno, I. Encoding amplitude information onto phase-only filters. *Applied Optics* **38**, 5004–5013 (1999).
- [55] Goorden, S. A., Bertolotti, J. & Mosk, A. P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device. *Optics Express* **22**, 17999 (2014). 1405.3893.
- [56] Lv, R., Qiu, L., Hu, H., Meng, L. & Zhang, Y. The phase interrogation method for optical fiber sensor by analyzing the fork interference pattern. *Applied Physics B: Lasers and Optics* **124** (2018).

- [57] Bazhenov, V. Y., Vasnetsov, M. V. & Soskin, M. S. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts. *JETP Letters* **52**, 429–431 (1990).
- [58] Turpin, A. *et al.* Tunable orbital angular momentum beams in the extreme ultraviolet/soft x-ray regimes. In Klisnick, A. & Menoni, C. S. (eds.) *X-ray Lasers and Coherent X-ray Sources: Development and Applications*, vol. 10243, 102430V (International Society for Optics and Photonics, 2017).
- [59] Zverev, D., Barannikov, A., Snigireva, I. & Snigirev, A. X-ray refractive parabolic axicon lens. *Optics Express* **25**, 28469 (2017).
- [60] Yin, J. Y., Ren, J., Zhang, L., Li, H. & Cui, T. J. Microwave vortex-beam emitter based on spoof surface plasmon polaritons. *Laser and Photonics Reviews* **4**, 204–209 (2017). 1703.07487.
- [61] Busch, S. F., Town, G. E., Scheller, M. & Koch, M. Focus free terahertz reflection imaging and tomography with Bessel beams. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, 318–326 (2015).
- [62] Kulya, M. S., Semenova, V. A., Bepalov, V. G. & Petrov, N. V. On terahertz pulsed broadband Gauss-Bessel beam free-space propagation. *Scientific Reports* **8**, 1390 (2018).
- [63] Tamburini, F. *et al.* Encoding many channels in the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *Seminar Technology, Bachelor O F Engineering, Communication* **14**, 033001 (2011). 1107.2348.
- [64] Bu, X. *et al.* Implementation of vortex electromagnetic waves high-resolution synthetic aperture radar imaging. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **17**, 764–767 (2018).
- [65] Leão-Neto, J. P., Lopes, J. H. & Silva, G. T. Scattering of a longitudinal Bessel beam by a sphere embedded in an isotropic elastic solid. *Journal of the Acoustical Society of America* **142**, 2881–2889 (2017).
- [66] Jiménez, N. *et al.* High-order acoustic Bessel beam generation by spiral gratings. In *Physics Procedia*, vol. 70, 245–248 (Elsevier, 2015).
- [67] Shukla, C. & Das, A. Ion vortex beam. *arXiv preprint arXiv:1711.02896* (2017). 1711.02896.

- [68] McMorran, B. J. *et al.* Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum. *Science* **331**, 192–195 (2011).
- [69] Lei, M., Liang, Y. & Yao, B. Simultaneous optical trapping and imaging in axial plane. In Omatsu, T. (ed.) *Optical Manipulation Conference*, vol. 10712, 5 (SPIE, 2018).
- [70] Hadad, B. *et al.* Particle trapping and conveying using an optical Archimedes' screw. *Optica* **5**, 551–556 (2017). 1706.10122.
- [71] Gahagan, K. T. & Swartzlander, G. A. Optical vortex trapping of particles. *Optics Letters* **21**, 827 (1996). 1011.1669v3.
- [72] Grier, D. G. A revolution in optical manipulation. *Nature* **424**, 810–816 (2003). 0803973233.
- [73] Ruffner, D. B. & Grier, D. G. Optical conveyors: A class of active tractor beams. *Physical Review Letters* **109**, 163903 (2012).
- [74] Sakamoto, M. *et al.* Three-dimensional vector recording in polarization sensitive liquid crystal composites by using axisymmetrically polarized beam. *Optics Letters* **41**, 642 (2016).
- [75] Radwell, N., Hawley, R. D., Götte, J. B. & Franke-Arnold, S. Achromatic vector vortex beams from a glass cone. *Nature Communications* **7**, 10564 (2016).
- [76] Heckenberg, N. R., McDuff, R., Smith, C. P. & White, A. G. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms. *Optics Letters* **17**, 221 (1992).
- [77] Котляр, В. В., Ковалёв, А. А. & Порфирьев, А. П. Формирование лазерных половинных пучков пирси с помощью пространственного модулятора света. *Компьютерная Оптика* **38** (2014).
- [78] Ronzitti, E. *et al.* LCoS nematic SLM characterization and modeling for diffraction efficiency optimization, zero and ghost orders suppression "Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive. *Commun. Opt. Express* **160**, 4–6 (1999).

- [79] Zhu, L. & Wang, J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators. *Scientific Reports* **4**, 7441 (2014).
- [80] Волков, А. В. *et al.* *Методы компьютерной оптики* (Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма "Физико-математическая литература 2003).
- [81] Davis, J. A. & Cottrell, D. M. Random mask encoding of multiplexed phase-only and binary phase-only filters. *Optics letters* **19**, 496 (1994).
- [82] Luis Martínez Fuentes, J. & Moreno, I. Random technique to encode complex valued holograms with on axis reconstruction onto phase-only displays. *Optics Express* **26**, 5875 (2018).
- [83] Gerchberg, R. W. & Saxton, W. O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik* **35**, 237–246 (1972).
- [84] Fienup, J. R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms. *Optical Engineering* **19** (1980).
- [85] Wyrowski, F. & Bryngdahl, O. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography. *Journal of the Optical Society of America A* **5**, 1058 (1988).
- [86] Ilovitsh, T., Ilovitsh, A., Foiret, J., Fite, B. Z. & Ferrara, K. W. Acoustical structured illumination for super-resolution ultrasound imaging. *Communications Biology* **1**, 3 (2018).
- [87] Liu, Z., Chen, H., Blondel, W., Shen, Z. & Liu, S. Image security based on iterative random phase encoding in expanded fractional Fourier transform domains. *Optics and Lasers in Engineering* **105**, 1–5 (2017).
- [88] Pradhan, P., Sharma, M. & Ung, B. Generation of perfect cylindrical vector beams with complete control over the ring width and ring diameter. *IEEE Photonics Journal* **10**, 1–10 (2018).