

Южно-Уральский государственный университет
Кафедра оптоинформатики

ЩЕГЛОВА Александра Олеговна

**ПУЧКИ СО СПИРАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ИНТЕНСИВНОСТИ В НАПРАВЛЕНИИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРО
СТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:
Доцент кафедры ОИ,
к.ф.-м.н.,
М.В. Большаков

Челябинск 2019

Оглавление

Введение	2
1 Метаматериалы, их свойства, способы создания и применение	5
1.1 Метаматериалы из спиралей	13
1.2 Спиралевидные пучки света	19
2 Генерация спиралевидного пучка	24
2.1 Моделирование спиралевидного пучка	24
2.2 Расчет маски для генерации спирального пучка голографическим методом	26
2.3 Расчет маски для генерации спирального пучка двухфазным методом	28
2.4 Генерация пучка	31
2.5 Обсуждение результатов	34
Заключение	36
Литература	37

Введение

Метаматериалы [1] состоят из инженерных субволновых строительных блоков и могут иметь адаптированные электромагнитные свойства, которые недоступны в природе [2, 3], поэтому их разработка — широкое и активно развивающееся направление науки. Значительная часть метаматериалов состоит из массива плоских металлических элементов, расположенных между диэлектрическими слоями [4]. Другие обладают периодически распределенным показателем преломления и называются фотонными кристаллами [5].

Поляризация обеспечивает дополнительную степень свободы для управления светом. Циркулярно поляризованный свет имеет свой вектор мгновенного электрического поля, направленный вдоль спиральной траектории и, следовательно, обладает по своей природе хиральными свойствами. В результате поляризованный свет противоположной направленности взаимодействует по-разному с хиральными структурами, которые не могут накладываться на их собственное зеркальное отражение. Эта особенность в органическом мире встречается в молекулах, сахарах, аминокислотах, белках, нуклеиновых кислотах и вирусах [6, 7]. Следовательно, анализ хирального ответа является мощным инструментом и широко используется в структурной характеристике [8] и спектроскопии химических и биомолекулярных веществ [9]. Важные оптические явления, связанные с хиральностью, включают циркулярный дихроизм и оптическую активность. Однако эти эффекты в природных материалах, как правило, очень слабы и обнаруживаются только в том случае, когда материал имеет макроскопическую длину пути.

Люди научились преодолевать ограничение естественных сред и используют искусственно структурированные материалы для получения чрезвычайно сильных хиральных ответов. Интерес сосредоточился на хираль-

ных метаматериалах с искусственным круговым дихроизмом и вращательной способностью поляризации [10]. Циркулярно поляризованные волны характеризуются скручиванием их векторов электромагнитного поля при движении; поэтому ярко выраженный хиральный ответ требует структурных изменений вдоль направления распространения [11]. Экспериментально продемонстрированы материалы с различными формами составных элементов, например двухслойные скрученные розетки [12], кресты [13], скрещенные кольца [14], решетки, L-формы [15], связанные наночастицы, и массивы скрученных наностержней [16].

Хиральные метаматериалы на основе металлических спиралей обеспечивают дихроизм с беспрецедентной полосой пропускания [17], что делает их пригодными для использования в качестве масштабируемых круговых поляризаторов [18]. Конические спирали введены для дальнейшего увеличения коэффициента экстинкции и пропускной способности [19]. Другие приложения для спиральных метаматериалов – это хиральные датчики ближнего поля [20] или эффективные циркулярно-поляризационные преобразователи [21].

Оптически активные метаматериалы находят применение в волоконной оптике, могут быть использованы при создании компактных широкополосных круговых поляризаторов [22] и способны стать составной частью полностью оптических процессоров и 3-D экранов нового типа [23, 24].

Если хиральность достаточно сильная, отрицательные показатели преломления могут быть реализованы, хотя ни диэлектрическая, ни магнитная проницаемости не являются отрицательными в хиральных метаматериалах. Также ведутся исследования, согласно которым суперхиральные электромагнитные поля в хиральных плазмонных наноструктурах существенно улучшат взаимодействие между легкими и хиральными молекулами на несколько порядков, что может открыть новый путь для хирооптического обнаружения с беспрецедентной чувствительностью [25].

Получение хиральных структур и изучение их свойств позволит решать не только фундаментальные вопросы строения вещества, но и найдет широкое применение в оптике и фотонике.

Основной задачей при создании структурированных материалов является разработка специальных методов создания включений. Один из пер-

спективных методов для создания хиральных структур — фотолитография. Известные методы позволяют создавать только структуры с некоторым заданным распределением хиральных узлов — интерференционная литография. Для создания структур с произвольным расположением хиральных узлов необходимо использовать локализованный в пространстве пучок со спиральным распределением интенсивности в направлении распространения и управляемыми параметрами. Следующим шагом будет создание двухмерной хиральной структуры в фоторезисте и исследование ее свойств.

В работе [26] описано получение светового луча со спиральным распределением интенсивности в направлении распространения.

Пучок в перетяжке вращается вокруг направления распространения и меняет направление закрученности по разные стороны от нее. Также спираль имеет разное количество витков на разных расстояниях от перетяжки, что согласуется с результатами компьютерного моделирования.

Этот способ генерации спирального пучка является весьма трудоемким. Чтобы он хорошо получился, экспериментальную установку с множеством элементов нужно тщательно отъюстировать, для создания пучка с другими параметрами нужно заново изменять параметры установки и заново ее настраивать. Прежде чем использовать пучок этого типа для создания метаматериала, необходимо упростить способ его получения.

Таким образом целью моей научно - исследовательской работы является генерация пучка света со спиральным распределением интенсивности в направлении распространения, который можно использовать для создания микро структурированного материала.

Передо мной были поставлены следующие задачи:

1. расчет динамической маски для генерации пучка со спиральным распределением интенсивности в направлении распространения;
2. создание экспериментальной установки для генерация спиралевидного пучка;
3. генерация спиралевидного пучка.

Заключение

В результате проделанной работы был экспериментально получен пучок света со спиральным распределением интенсивности в направлении распространения. Для этого был изучен и применен на практике двухфазный метод создания масок для генерации пучков со сложной пространственной структурой.

Была собрана и отъюстирована экспериментальная установка для генерации спиралевидного пучка.

Пучок с спиральным распределением интенсивности в направлении распространения имеет диаметр примерно 70 мкм и не делает полного оборота на расстоянии сопоставимом с толщиной фоторезиста, в который может быть записан. Для того, чтобы записалась именно спираль, а не прямой луч, чтобы записанный элемент был способен вступить в резонансное взаимодействие с падающей на него волной в оптическом диапазоне, нужно еще изменить параметры кодируемого пучка при расчете маски, перед тем, как записывать спиралевидный пучок в фоторезист для получения микроструктурированного материала.

Литература

- [1] From Flexible and Stretchable Meta-Atom to Metamaterial: A Wearable Microwave Meta-Skin with Tunable Frequency Selective and Cloaking Effects / Siming Yang, Peng Liu, Mingda Yang et al. // Scientific Reports. — 2016. — apr. — Vol. 6, no. 1. — P. 21921.
- [2] Cai Wenshan, Shalaev Vladimir. Optical Metamaterials. — New York, NY : Springer New York, 2010. — ISBN: 978-1-4419-1150-6.
- [3] The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials / Boris Luk'yanchuk, Nikolay I. Zheludev, Stefan A. Maier et al. // Nature Materials. — 2010. — sep. — Vol. 9, no. 9. — P. 707–715.
- [4] El-Jallal Said, Torrent Daniel. Flat bands in metamaterials based on angularly layered metal–dielectric scatterers // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — mar. — Vol. 50, no. 12. — P. 125103.
- [5] Wu Long-Hua, Hu Xiao. Scheme for Achieving a Topological Photonic Crystal by Using Dielectric Material // Physical Review Letters. — 2015. — jun. — Vol. 114, no. 22. — P. 223901.
- [6] Matsuura Teruo, Koshima Hideko. Introduction to chiral crystallization of achiral organic compounds: Spontaneous generation of chirality // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. — 2005. — apr. — Vol. 6, no. 1. — P. 7–24.
- [7] Visible-light circular dichroism of colourless chiral organic compounds enabled by interfacial charge-transfer transitions / Jun-ichi Fujisawa, Naohito Kaneko, Takumi Eda, Minoru Hanaya // Chemical Communications. — 2018. — jul. — Vol. 54, no. 61. — P. 8490–8493.

- [8] Nanophotonic Platforms for Enhanced Chiral Sensing / E. Mohammadi, K. L. Tsakmakidis, A. N. Askarpour et al. // ACS Photonics. — 2018. — jul. — Vol. 5, no. 7. — P. 2669–2675.
- [9] Berova Nina. Comprehensive chiroptical spectroscopy. Volume 2, Applications in stereochemical analysis of synthetic compounds natural products, and biomolecules. — John Wiley & Sons, 2012. — P. 853. — ISBN: 9781118012925.
- [10] Modulating optically active signals in a chiral metamaterial with varied input intensities / Sean P. Rodrigues, Shoufeng Lan, Lei Kang et al. // 2017 IEEE Photonics Conference (IPC). — IEEE, 2017. — oct. — P. 505–506.
- [11] Plasmonic Chiral Nanostructures: Chiroptical Effects and Applications / Yang Luo, Cheng Chi, Meiling Jiang et al. // Advanced Optical Materials. — 2017. — aug. — Vol. 5, no. 16. — P. 1700040.
- [12] Giant optical gyrotropy due to electromagnetic coupling / E. Plum, V. A. Fedotov, A. S. Schwanecke et al. // Applied Physics Letters. — 2007. — may. — Vol. 90, no. 22. — P. 223113.
- [13] Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials / M. Decker, M. Ruther, C. E. Kriegler et al. // Optics Letters. — 2009. — aug. — Vol. 34, no. 16. — P. 2501.
- [14] Stereometamaterials / Na Liu, Hui Liu, Shining Zhu, Harald Giessen // Nature Photonics. — 2009. — mar. — Vol. 3, no. 3. — P. 157–162.
- [15] Chiral Metamaterial Composed of Three-Dimensional Plasmonic Nanostructures / Christian Helgert, Ekaterina Pshenay-Severin, Matthias Falkner et al. // Nano Letters. — 2011. — oct. — Vol. 11, no. 10. — P. 4400–4404.
- [16] Zhao Y., Belkin M.A., Alu A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers // Nature Communications. — 2012. — may. — Vol. 3. — P. 870.

- [17] Giant Circular Dichroism at Visible Frequencies Enabled by Plasmonic Ramp-Shaped Nanostructures / Mohsen Rajaei, Jinwei Zeng, Mohammad Albooyeh et al. // ACS Photonics. — 2019. — apr. — Vol. 6, no. 4. — P. 924–931.
- [18] Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer. / Justyna K Gansel, Michael Thiel, Michael S Rill et al. // Science (New York, N.Y.). — 2009. — sep. — Vol. 325, no. 5947. — P. 1513–5.
- [19] Tapered gold-helix metamaterials as improved circular polarizers / Justyna K. Gansel, Michael Latzel, Andreas Frölich et al. // Applied Physics Letters. — 2012. — mar. — Vol. 100, no. 10. — P. 101109.
- [20] Helical Plasmonic Nanostructures as Prototypical Chiral Near-Field Sources / Martin Schäferling, Xinghui Yin, Nader Engheta, Harald Giessen // ACS Photonics. — 2014. — jun. — Vol. 1, no. 6. — P. 530–537.
- [21] Ultra-compact multi-band chiral metamaterial circular polarizer based on triple twisted split-ring resonator / Yongzhi Cheng, Chenjun Wu, Zheng Ze Cheng, Rong Zhou Gong // Progress In Electromagnetics Research. — 2016. — Vol. 155. — P. 105–113.
- [22] A Helical Metamaterial for Broadband Circular Polarization Conversion / Johannes Kaschke, Leonard Blume, Lin Wu et al. // Advanced Optical Materials. — 2015. — oct. — Vol. 3, no. 10. — P. 1411–1417.
- [23] An Active Metamaterial Platform for Chiral Responsive Optoelectronics / Lei Kang, Shoufeng Lan, Yonghao Cui et al. // Advanced Materials. — 2015. — aug. — Vol. 27, no. 29. — P. 4377–4383.
- [24] Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications // Nature Photonics. — 2017. — aug. — Vol. 11, no. 8. — P. 465–476.
- [25] Plasmonic Chirality and Circular Dichroism in Bioassembled and Nonbiological Systems: Theoretical Background and Recent Progress / Xiang-

Tian Kong, Lucas V. Besteiro, Zhiming Wang, Alexander O. Govorov // *Advanced Materials*. — 2018. — sep. — P. 1801790.

- [26] Investigation the Possibility of Obtaining Spiral Light Beams with Adjustable Parameters / N. Kundikova, Yu. Miklyaev, I. Popkov, A. Popkova // *PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6-9*. — 2015. — Vol. 6. — P. 2656–2659.
- [27] Электромагнитные кристаллы, их особенности и применение / А.С. Авдюшин, М.Ю. Власов, Ю.Г. Пастернак, А.П. Ярыгин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2015. — Т. 11, № 1.
- [28] Макаров Г.Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной наноитографии // *Успехи физических наук*. — 2013. — Т. 183, № 7. — С. 673–718.
- [29] Авдюшин А. С., Власов М. Ю., Пастернак Ю. Г. Применение метаматериалов в антенной технике // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2013. — Т. 9, № 3-1.
- [30] Неотражающие оптические решетки на новых плазмонных материалах / А.М. Лерер, Е.В. Головачева, Е.И. Грибникова и др. // *Инженерный вестник Дона*. — 2016. — Т. 41, № 2 (41). — С. 3608.
- [31] Nearly ideal electronic properties of sulfide coated GaAs surfaces / E. Yablonovitch, C. J. Sandroff, R. Bhat, T. Gmitter // *Applied Physics Letters*. — 1987. — aug. — Vol. 51, no. 6. — P. 439–441.
- [32] Спектральные и пространственные характеристики мод электромагнитного поля в перестраиваемой оптической микрорезонаторной ячейке для исследования гибридных состояний “свет-вещество” / Довженко Д. С., Васкан И. С., Мочалов К. Е. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. — 2019. — Т. 109, № 1. — С. 12–18.
- [33] Photonic Crystal Fiber-Based Surface Plasmon Resonance Sensor with Selective Analyte Channels and Graphene-Silver Deposited Core / Ah-

- mmed Rifat, G. Mahdiraji, Desmond Chow et al. // *Sensors*. — 2015. — may. — Vol. 15, no. 5. — P. 11499–11510.
- [34] Analysis of Optical Properties for Square, Circular and Hexagonal Photonic Crystal Fiber / Md Bellal Hossain, Abdullah Al-Mamun Bulbul, Md Abdul Mukit, Etu Podder // *Optics and Photonics Journal*. — 2017. — Vol. 7. — P. 235–243.
- [35] Russell Philip St.J. Photonic-Crystal Fibers // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, Issue 12, pp. 4729–4749. — 2006. — dec. — Vol. 24, no. 12. — P. 4729–4749.
- [36] Negative Refractive Index and Higher-Order Harmonics in Layered Metallodielectric Optical metamaterials / Ruben Maas, Ewold Verhagen, James Parsons, Albert Polman // *ACS Photonics*. — 2014. — aug. — Vol. 1, no. 8. — P. 670–676.
- [37] Metamaterial Superlenses Operating at Visible Wavelength for Imaging Applications / S Haxha, F Abdelmalek, F Ouerghi et al. // *Scientific reports*. — 2018. — Vol. 8, no. 16119. — P. 1–15.
- [38] High-resolution and large-area nanoparticle arrays using EUV interference lithography / Waiz Karim, Simon Andreas Tschupp, Mehtap Oezslan et al. // *Nanoscale*. — 2015. — Vol. 7, no. 16. — P. 7386–7393.
- [39] Busch K., Sajeev J. Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum // *Physical Review Letters*. — 1999. — aug. — Vol. 83, no. 5. — P. 967–970.
- [40] Optofluidic Microlenses: All-Glass 3D Optofluidic Microchip with Built-in Tunable Microlens Fabricated by Femtosecond Laser-Assisted Etching (Advanced Optical Materials 9/2018) / Yanlei Hu, Shenglong Rao, Sizhu Wu et al. // *Advanced Optical Materials*. — 2018. — may. — Vol. 6, no. 9. — P. 1870035.
- [41] Alignment and Stacking of Semiconductor Photonic Bandgaps by Wafer-Fusion / Hideaki Kobayashi, Makoto Okano, Masahiro Imada et al. //

Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, Issue 11, pp. 1948-. — 1999. — nov. — Vol. 17, no. 11. — P. 1948.

- [42] Горелик В.С., Лобойко А.А. Спектроскопия стоп-зон в пористых фотонных кристаллах // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. — 2016. — jun. — № 66.
- [43] Фрицлер К.Б., Принц В.Я. Методы трехмерной печати микро- и наноструктур // Успехи физических наук. — 2019. — jan. — Т. 189, № 01. — С. 55–71.
- [44] Photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography / D.N. Sharp, M. Campbell, E.R. Dedman et al. // Optical and Quantum Electronics. — 2002. — Vol. 34, no. 1/3. — P. 3–12.
- [45] Three-dimensional face-centered-cubic photonic crystal templates by laser holography: Fabrication, optical characterization, and band-structure calculations / Yu. V. Miklyaev, D. C. Meisel, A. Blanco et al. // Applied Physics Letters. — 2003. — Vol. 82, no. 8. — P. 1284–1286.
- [46] Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography / M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison et al. // Nature. — 2000. — mar. — Vol. 404, no. 6773. — P. 53–56.
- [47] Behera Saraswati, Joseph Joby. Metamaterial structures of variable and gradient basis orientations embedded with periodic linear defects: phase engineered design, single step optical realization, and applications // Applied Optics. — 2019. — jan. — Vol. 58, no. 1. — P. 50.
- [48] Chiral metamaterials: from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission / Zhaofeng Li, Mehmet Mutlu, Ekmel Ozbay et al. // Journal of Optics. — 2013. — feb. — Vol. 15, no. 2. — P. 023001.
- [49] Theoretical investigation of subwavelength structure fabrication based on multi-exposure surface plasmon interference lithography / Xiangxian Wang, Zhiyuan Pang, Huan Tong et al. // Results in Physics. — 2019. — mar. — Vol. 12. — P. 732–737.

- [50] Tong Xingcun Colin. Chiral Metamaterials and Metadevices // Functional Metamaterials and Metadevices. — Springer, Cham, 2018. — P. 107–128. — Access mode: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-66044-8_{_}6.
- [51] Optical chiral metamaterials: a review of the fundamentals, fabrication methods and applications / Z. Wang, F. Cheng, T. Winsor, Y. Liu // Nanotechnology. — 2016. — oct. — Vol. 27, no. 41. — P. 412001.
- [52] Illusion optics: The optical transformation of an object into another object / Yun Lai, Jack Ng, HuanYang Chen et al. // Physical Review Letters. — 2009. — jun. — Vol. 102, no. 25. — P. 253902.
- [53] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index. // Science (New York, N.Y.). — 2004. — aug. — Vol. 305, no. 5685. — P. 788–92.
- [54] Chiral Inorganic Nanostructures / Wei Ma, Liguang Xu, André F. de Moura et al. // Chemical Reviews. — 2017. — apr. — Vol. 2. — P. acs.chemrev.6b00755.
- [55] Li Minhua, Song Jian, Wu Fei. Ultra-compact chiral metamaterial with negative refractive index based on miniaturized structure // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — mar. — Vol. 426. — P. 150–154.
- [56] Chadha Arvinder Singh, Zhao Deyin, Zhou Weidong. Comparative study of metallic and dielectric helix photonic metamaterial // Optical Materials Express. — 2014. — dec. — Vol. 4, no. 12. — P. 2460.
- [57] Oh Sang Soon, Hess Ortwin. Chiral metamaterials: enhancement and control of optical activity and circular dichroism // Nano Convergence. — 2015. — dec. — Vol. 2, no. 1. — P. 24.
- [58] Optical Activity of Semiconductor Gammadions beyond Planar Chirality / Nikita V. Tepliakov, Ilia A. Vovk, Anvar S. Baimuratov et al. // The Journal of Physical Chemistry Letters. — 2018. — jun. — Vol. 9, no. 11. — P. 2941–2945.

- [59] Iqbal N., Baqir M. A., Choudhury P. K. Waves in microstructured conducting sheath helix embedded optical guides with chiral nihility and chiral materials // *Journal of Nanomaterials*. — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–7.
- [60] Asymmetric electromagnetic wave transmission of linear polarization via polarization conversion through chiral metamaterial structures / Ci Huang, Yijun Feng, Junming Zhao et al. // *Physical Review B*. — 2012. — may. — Vol. 85, no. 19. — P. 195131.
- [61] Super-resolution Imaging with Metamaterials for Cardiovascular Disease / Naomi Waterman, Iain B. Styles, Steven G. Thomas, Shuang Zhang // *Optics in the Life Sciences*. — 2015. — P. JT3A.10.
- [62] Landy Nathan, Smith David R. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves // *Nature Materials*. — 2012. — Vol. 12, no. 1. — P. 25–28.
- [63] Optical and acoustic metamaterials: superlens, negative refractive index and invisibility cloak / Zi Jing Wong, Yuan Wang, Kevin O’Brien et al. // *Journal of Optics*. — 2017. — aug. — Vol. 19, no. 8. — P. 084007.
- [64] Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index / R. Zhao, L. Zhang, J. Zhou et al. // *Physical Review B*. — 2011. — jan. — Vol. 83, no. 3. — P. 035105.
- [65] Tunable resonance enhancement of multi-layer terahertz metamaterials fabricated by parallel laser micro-lens array lithography on flexible substrates / Z. C. Chen, N. R. Han, Z. Y. Pan et al. // *Optical Materials Express*. — 2011. — jun. — Vol. 1, no. 2. — P. 151.
- [66] Broadband chiral metamaterials with large optical activity / K. Hannam, D.A. Powell, I.V. Shadrivov, Y.S. Kivshar // *Physical Review B*. — 2014. — mar. — Vol. 89, no. 12. — P. 125105.
- [67] Photonic crystals: emerging biosensors and their promise for point-of-care applications / Hakan Inan, Muhammet Poyraz, Fatih Inci et al. // *Chem. Soc. Rev.* — 2017. — Vol. 46, no. 2. — P. 366–388.

- [68] Optical activities of large-area SU8 microspirals fabricated by multi-beam holographic lithography / Xia Wang, Wensheng Gao, Jenny Hung, Wing Yim Tam // *Applied Optics*. — 2014. — apr. — Vol. 53, no. 11. — P. 2425.
- [69] Design and fabrication of three-dimensional chiral nanostructures based on stepwise glancing angle deposition technology / Yidong Hou, Shuhong Li, Yarong Su et al. // *Langmuir*. — 2013. — jan. — Vol. 29, no. 3. — P. 867–872.
- [70] Realization of an all-dielectric zero-index optical metamaterial / Parikshit Moitra, Yuanmu Yang, Zachary Anderson et al. // *Nature Photonics*. — 2013. — jul. — Vol. 7, no. 10. — P. 791–795.
- [71] Chiral visible light metasurface patterned in monocrystalline silicon by focused ion beam / Maxim V. Gorkunov, Oleg Y. Rogov, Alexey V. Kondratov et al. // *Scientific Reports*. — 2018. — dec. — Vol. 8, no. 1. — P. 11623.
- [72] All-Optical Chirality-Sensitive Sorting via Reversible Lateral Forces in Interference Fields / Tianhang Zhang, Mahdy Rahman Chowdhury Mahdy, Yongmin Liu et al. // *ACS Nano*. — 2017. — apr. — Vol. 11, no. 4. — P. 4292–4300.
- [73] Gori F., Santarsiero M. Twisted Gaussian Schell-model beams as series of partially coherent modified Bessel–Gauss beams // *Optics Letters*. — 2015. — apr. — Vol. 40, no. 7. — P. 1587–1590.
- [74] Guddala Sriram, Kumar Raghwendra, Ramakrishna S. Anantha. Thermally induced nonlinear optical absorption in metamaterial perfect absorbers // *Applied Physics Letters*. — 2015. — mar. — Vol. 106, no. 11. — P. 111901.
- [75] Hossain Md Muntasir, Gu Min. Fabrication methods of 3D periodic metallic nano/microstructures for photonics applications. — 2014. — mar. — Access mode: <http://doi.wiley.com/10.1002/lpor.201300052>.

- [76] Holographic fabrication of 3D photonic crystals through interference of multi-beams with $4 + 1$, $5 + 1$ and $6 + 1$ configurations / D. George, J. Lutkenhaus, D. Lowell et al. // *Optics Express*. — 2014. — sep. — Vol. 22, no. 19. — P. 22421.
- [77] Holographic formation of large area split-ring arrays for magnetic metamaterials / G.Q. Liang, W.D. Mao, H. Zou et al. // *Journal of Modern Optics*. — 2008. — may. — Vol. 55, no. 9. — P. 1463–1472.
- [78] Yuan Liang, Ng Mi Li, Herman Peter R. Femtosecond laser writing of phase-tuned volume gratings for symmetry control in 3D photonic crystal holographic lithography // *Optical Materials Express*. — 2015. — mar. — Vol. 5, no. 3. — P. 515.
- [79] Spatial light modulator based holographic fabrication of 3D spatially varying photonic crystal templates / Jeffrey Lutkenhaus, David George, Usha Philipose et al. // *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII* / Ed. by Georg von Freymann, Winston V. Schoenfeld, Raymond C. Rumpf, Henry Helvajian. — Vol. 9374. — International Society for Optics and Photonics, 2015. — mar. — P. 93740V.
- [80] Yang Yi, Li Qiuze, Wang Guo Ping. Design and fabrication of diverse metamaterial structures by holographic lithography // *Optics Express*. — 2008. — jul. — Vol. 16, no. 15. — P. 11275.
- [81] Isakov D. S., Kundikova N. D., Miklyaev Y. V. Interference lithography for the synthesis of three-dimensional lattices in SU-8: Interrelation between porosity, an exposure dose and a grating period // *Optical Materials*. — 2015. — Vol. 47. — P. 473–477.
- [82] Holland B. T., Blanford C. F., Stein A. Synthesis of Macroporous Minerals with Highly Ordered Three-Dimensional Arrays of Spheroidal Voids // *Science*. — 1998. — jul. — Vol. 281, no. 5376. — P. 538–540.
- [83] Yamamoto Noritsugu, Noda Susumu, Sasaki Akio. New Realization Method for Three-Dimensional Photonic Crystal in the Optical Wavelength Region: Experimental Consideration // *Japanese Journal of Ap-*

plied Physics. — 1997. — mar. — Vol. 36, no. Part 1, No. 3B. — P. 1907–1911.

- [84] A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths / S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington et al. // Nature. — 1998. — jul. — Vol. 394, no. 6690. — P. 251–253.
- [85] Chutinan Alongkarn, Noda Susumu. Spiral three-dimensional photonic-band-gap structure // Physical Review B. — 1998. — jan. — Vol. 57, no. 4. — P. R2006–R2008.
- [86] Toader O, John S. Proposed square spiral microfabrication architecture for large three-dimensional photonic band gap crystals. // Science (New York, N.Y.). — 2001. — may. — Vol. 292, no. 5519. — P. 1133–5.
- [87] Robbie K., Sit J. C., Brett M. J. Advanced techniques for glancing angle deposition // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. — 1998. — may. — Vol. 16, no. 3. — P. 1115.
- [88] Chan Timothy Y. M., Toader Ovidiu, John Sajeev. Photonic band gap templating using optical interference lithography // Physical Review E. — 2005. — apr. — Vol. 71, no. 4. — P. 046605.
- [89] Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography / Yee Kwong Pang, Jeffrey Chi Wai Lee, Hung Fai Lee et al. // Optics Express. — 2005. — Vol. 13, no. 19. — P. 7615–7620.
- [90] Polarization Stop Bands in Chiral Polymeric Three-Dimensional Photonic Crystals / M. Thiel, M. Decker, M. Deubel et al. // Advanced Materials. — 2007. — jan. — Vol. 19, no. 2. — P. 207–210.
- [91] Quasiguidded modes and optical properties of photonic crystal slabs / S. G. Tikhodeev, A. L. Yablonskii, E. A. Muljarov et al. // Physical Review B. — 2002. — jul. — Vol. 66, no. 4. — P. 045102.
- [92] Lee Jeffrey Chi Wai, Chan C. T. Polarization gaps in spiral photonic crystals // Optics Express. — 2005. — oct. — Vol. 13, no. 20. — P. 8083.

- [93] Repetitive Hole-Mask Colloidal Lithography for the Fabrication of Large-Area Low-Cost Plasmonic Multishape Single-Layer Metasurfaces / Jun Zhao, Sarah Jaber, Paul Mulvaney et al. // *Advanced Optical Materials*. — 2015. — may. — Vol. 3, no. 5. — P. 680–686.
- [94] Marrucci L., Manzo C., Paparo D. Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media // *Physical Review Letters*. — 2006. — apr. — Vol. 96, no. 16. — P. 163905.
- [95] Баженов В.Ю., Васнецов М.В., Соскин М.С. Лазерные пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта // *Письма в ЖЭТФ*. — 1990. — Т. 52, № 8. — С. 1037–1039.
- [96] *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* / Soifer V.A., Kotlyar V.V., Kazanskiy N.L. et al. — Soifer V.A. edition. — New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001. — ISBN: 0471095338.
- [97] В.В. Котляр, А.А. Ковалев, А.П. Порфирьев. Формирование лазерных половинных пучков Пирси с помощью пространственного модулятора света // *Компьютерная оптика*. — 2014. — Т. 38, № 4. — С. 658–662.