

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
Кафедра оптики и биофотоники

Вихревые лазерные пучки

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА

студента 4 курса 435 группы
направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
Физического факультета
Соляника Вадима Александровича

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент



И.В. Федосов

дата, подпись

Зав. кафедрой
зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор



В.В. Тучин

Саратов 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

Структура света является активно исследуемой темой в различных областях классической и квантовой оптики. В экспериментальной оптике, характеристики света, такие как поляризация, длина волны и пространственная мода играют важную роль для характеристики рассеяния света в среде. В результате рассеяния падает резкость изображения и теряется поляризация световых пучков.

Общая постановка задачи о рассеянии электромагнитной волны на шаре была исследована в работах Ми [1] и Дебая [2]. Эти работы легли в основу оптики коллоидных сред и капельного аэрозоля. Кроме того, в биологии, медицине, радиофизике, ближнепольной микроскопии и других областях науки и техники широко развиты приложения теории Ми, связанные с применением металлических наночастиц и диэлектрических частиц микронных размеров.

Крупные частицы рассеивают в основном в направлении, сонаправленном с начальным пучком, в отличие от частиц с размерами $d \leq \lambda$, у которых матрица рассеяния более изотропна, как функция длины волны.

Сравнительно недавно, чуть более 20 лет назад, было показано в опыте [3], что узконаправленные когерентные световые лазерные пучки могут нести дополнительную степень свободы - орбитальный угловой момент (ОУМ). Для исторического и тематического обзора были рассмотрены источники [4,5].

С начала 2000-х годов интерес к пучкам с ОУМ неуклонно растет, поскольку, ОУМ является квантованной наблюдаемой, с соответствующим квантовым числом L , а известно, что такими пучками являются пучки с азимутальной симметрией, например, Лаггер-Гаусс, Бессель-Гаусс и моды Мэтью, которые называются вихревыми или закрученными. Таким образом, полное число степеней свободы лазерного пучка включает в себя частоту, поляризацию и орбитальный угловой момент.

Первоочередной задачей предложенной работы является изучение взаимодействия пространственно-структурированных пучков фотонов с живыми тканями, которые с точки зрения биофотоники являются сильно рассеивающими средами. В нашем случае, длина волны играет ключевую роль для биологических сред. Рассеяние меньше в ближней (690-900нм) и в дальней (1000-2500нм) инфракрасной областях. В статье [6] обсуждалось окно в дальней ИК области, в котором возможна более глубокая визуализация тканей мозга (золотое окно) 1600-1850. Так же на глубину проникновения лучей влияет их состояние поляризации. Например, известно, что свет с круговой поляризацией имеет большую глубину проникновения, чем линейно поляризованный свет. Биологические ткани являются более прозрачными для пучков с более высокой закрученностью - L, согласно теоретическим [7] и экспериментальным [8] данным.

Подобные эффекты являются следствием того, что структура поперечного сечения пучка является топологически устойчивой. Это делает ОУМ-лазерные лучи популярным объектом исследования в качестве оптического зонда в микробиологии и биофизике.

Экспериментальная часть моей работы состояла в получении вихревого пучка без использования SLM – модулятора. Схема экспериментальной установки будет представлена ниже.

В связи с тем, что опыты были заморожены режимом самоизоляции, в настоящей выпускной квалификационной работе был рассмотрен случай рассеяния плоской волны в ансамбле сферических молекул, с использованием приложений теории Ми. Данная часть работы позволит в будущем мне более детально изучать теорию и грамотно продолжить экспериментальную деятельность.

Основными задачами выпускной квалификационной работы являются:

- Изучение теории рассеяния плоской электромагнитной волны на ансамбле сферических молекул с применением положений теории Ми.

- Изучить методику получения вихревых пучков с помощью амплитудной модуляции электромагнитной волны.
- Собрать экспериментальную установку по данной методике и проверить основные характеристики, полученного пучка.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Исследование возможности распространения теории рассеяния плоской электромагнитной волны, ансамблем сферических частиц на пучки с ненулевым осевым моментом.
- Получение программного продукта для случая плоской электромагнитной волны на ансамбле сферических частиц.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- исследования подтвердили возможность распространения теории рассеяния плоской электромагнитной волны, ансамблем сферических частиц на пучки с ненулевым осевым моментом;
- получен программный продукт, написанный на языке программирования Си до пункта 3 псевдокода.

Перспективы развития данной темы заключаются:

- в дальнейшей разработке и тестировании программы;
- расчет параметров вилкообразной дифракционной решетки;
- усовершенствование экспериментальной установки.

Практическая значимость работы:

Результаты работы могут быть использованы для более глубокого зондирования биологической ткани с помощью пучков с ОУМ.

Положения, выносимые на защиту:

- рассмотрели теорию рассеяния плоской электромагнитной волны на ансамбле сферических молекул с применением положений теории Ми;
- изучили методику получения вихревых пучков с помощью амплитудной модуляции электромагнитной волны;
- собрали экспериментальную установку по данной методике для проверки основных характеристик вихревого пучка.

Личный вклад дипломника:

Результаты, представленные в ВКР, получены лично студентом или в соавторстве при его определяющем участии.

Структура и объем выпускной квалификационной работы:

ВКР состоит из введения, 2 глав, заключения, результатов, заключения, списка используемых источников. Общий объем работы составляет 36 страниц, 10 рисунков, 1 приложения. Библиография содержит 25 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении содержится описание области научных исследований, к которой относится данная работа. Кратко изложено содержание представленных в литературе работ по данному направлению и обоснована актуальность темы исследований. Изложены цели выпускной квалификационной работы и ее наиболее важные результаты вместе с описанием их новизны и практической значимости.

Первая глава является рассмотрением задачи рассеяния ОУМ пучков в крупнодисперсных средах. Глава разбита на три части, ниже приведены названия параграфов для отражения его содержания.

- 1.1 Рассеяние Ми, обзор.

Данная часть является обзором научных источников. В связи с широтой проблемы и из-за большого количества публикаций было признано целесообразным ограничиться задачей о рассеянии на сфере в рамках классической электродинамики, которая сводится к решению волнового уравнения электромагнитного излучения на границе раздела сред [11]. Некоторые вопросы, вошедшие в данный обзор, еще не нашли достаточного освещения в современной научной литературе.

- 1.2 Топологические состояния световых пучков

Закрученные состояния направленных когерентных пучков света, лазерных пучков, породили новый поворот в науке и, теперь уже, инженерии. Известно, что пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) нашли свое применение в системах связи [12], микроскопии [13], астрофизике [14], и других областях. Все это благодаря нетривиальной структуре и топологической устойчивости волнового фронта. Особенности в профиле ОУМ-пучков позволяют использовать его для повышения четкости изображения [15], увеличения объема передаваемой информации [16] и т. д.

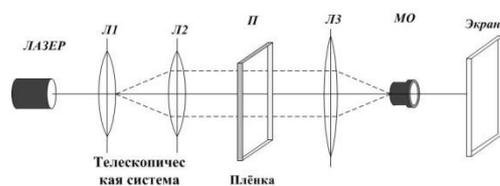
Вооруженные полученными знаниями, мы можем применить теорию рассеяния Ми, приведенную в предыдущей части, к вопросу рассеяния пучков с ОУМ в дисперсных средах.

1.3 Распространение закрученных пучков в дисперсных средах

В третьей части представлен подход, который был применен в программе, написанной в Си до пункта 3 псевдокода.

Во второй главе мы рассмотрели метод формирования вихревых пучков для решения задачи расчета вилкообразной дислокации, которое было приведено в статье [24] – первая часть главы посвящена теоретическому рассмотрению задачи.

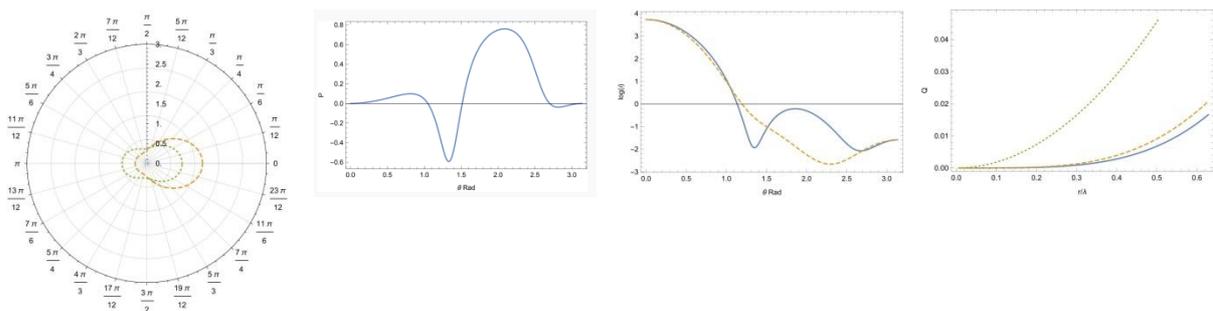
Во второй части приведена схема экспериментальной установки.



Дифракционная решетка

Прибор сконструирован для того, чтобы определить наличие орбитального момента пучка в первом максимуме дифракции. Данная установка ориентирована на проверку возможности получения вихревых пучков подобным методом.

Далее изложены результаты работы программы в виде зависимостей распределения интенсивности по углу рассеяния, логарифм параллельной (синяя сплошная линия) и перпендикулярной (желтая пунктирная линия) освещенность излучения, коэффициенты рассеяния и индикатрисы рассеяния.



В заключении сформулированы основные результаты и выводы квалификационной работы:

- рассмотрена теория рассеяния плоской электромагнитной волны на ансамбле сферических молекул с применением положений теории Ми;
- изучили методику получения вихревых пучков с помощью амплитудной модуляции электромагнитной волны;
- собрали экспериментальную установку по данной методике для проверки основных характеристик вихревого пучка.
- сравнили полученные результаты с расчетами с помощью «Mie Scattering Calculator» [26]

Также отмечена научная новизна работы и перспективы развития данной темы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mie G. Beitrage zur optik truber medien // Ann. Phys. (Leipzig). 1908. Vol. 25. P. 377–445.
2. Debye P. Der lichtdruck auf kugeln von beliebigen material // Ann. Phys. (Leipzig). 1909. Vol. 30. P. 57–136.
3. Allen, L., Beijersbergen, M., Spreeuw, R., and Woerdman, J. (1992). Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. Phys. Rev. A, A45:8185–8189
4. M. R. Dennis, Y. S. Kivshar, M. S. Soskin, and G. A. Swartzlande, Jr., “Singular optics: more ado about nothing,” J. Opt. A 11, 090201(2009).
5. A. M. Yao and M. J. Padgett, “Orbital angular momentum: origins, behavior and applications,” Adv. Opt. Photon. 3, 161–204 (2011).
6. L. Shi, L. A. Sordillo, A. Rodríguez-Contreras, R. Alfano, J. Biophotonics 2016, 9, 38.
7. C. Sun, Z. Chen, J. Pu, Acta Opt. Sin. 2014, 34, 0601002.
8. How to cite this article: Mamani S, Shi L, Ahmed T, et al. Transmission of classically entangled beams through mouse brain tissue. J. Biophotonics. 2018;11:e201800096. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800096>
9. Angelsky, O., C. Zenkova, and Wenjun Yan. "Structured light: peculiar properties and applications." Fourteenth International Conference on Correlation Optics. Vol. 11369. International Society for Optics and Photonics, 2020.
10. Mie, G., Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 25, 1908, No. 3, p 377-445.
11. Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, 2008.

12. Ramesh, K., and Vidya Pol. "The Study on Twisted Light Communication Using Orbital Angular Momentum." Proceedings of International Conference on Wireless Communication. Springer, Singapore, 2020.
13. McMorran, B., Agrawal, A., Anderson, I., Herzing, A., Lezec, H., McClelland, J., and Unguris, J. (2011). Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum. *Science*, 331(6014):192–195.
14. Harwit, M. (2003). Photon orbital angular momentum in astrophysics. *Astrophys. J*, 597(2):1266.
15. Yu, Zhixian. *Topics in Three-dimensional Imaging, Source Localization and Super-resolution*. Diss. The University of New Mexico, 2019.
16. J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, et al., Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing, *Nat. Photon.* 6, p. 488-496, 2012
17. Landau, L., and R. Peierls. "Quantum electrodynamics in configuration space." *Phys* 62 (1930): 188.
18. Durnin, J. (1987). Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4:651–654.
19. Durnin, J., Miceli, J., and Eberly, J. (1987). Diffraction-free beams. *Phys. Rev. Lett.*, 58:1499–1501.
20. Xu, Min. "Electric field Monte Carlo simulation of polarized light propagation in turbid media." *Optics express* 12.26 (2004): 6530-6539.
21. Hayakawa, Carole K., Eric O. Potma, and Vasan Venugopalan. "Electric field Monte Carlo simulations of focal field distributions produced by tightly focused laser beams in tissues." *Biomedical optics express* 2.2 (2011): 278-290.
22. Maitland A., and Dunn M. H., 1969, *laser Physics* (Amsterdam: North-Holland)
23. William H., et al. "Numerical recipes in C." (1988)

24. Y.Yu. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov (1992): Screw Dislocations in light Wavefronts, Journal of Modern Optics
25. C. Zhang, C. Min, X.-C. Yuan (2016): Shaping perfect optical vortex with amplitude modulated using a digital micro-mirror device, Optic Communications.
26. S. Prahl, Mie Scattering Calculator, [URL: https://omlc.org/calc/mie_calc.html] 15.06.2020