

# Моделирование формирования вихревых пучков при дифракции на тонкой спиральной апертуре

В.И. Логачев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
walle.log@yandex.ru

**Аннотация**—В данной работе рассматривается формирование вихревого пучка при дифракции на тонкой апертуре в виде спирали Архимеда. Численно показано, что сформированный пучок соответствует вихревому пучку Бесселя, топологический заряд которого меняется при распространении в свободном пространстве.

**Ключевые слова**— преобразование Френеля, оптические вихревые пучки Бесселя, спираль Архимеда, топологический заряд.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия внимание исследователей, работающих в области лазерной физики и когерентной оптики, привлекли световые поля с кольцевой формой распределения интенсивности, получившие название “оптические вихри”. Под данным названием эти световые поля впервые были рассмотрены в 1989 году [1]. Оптические вихри являются основным объектом изучения сингулярной оптики [2].

Одним из самых важных свойств оптических вихрей является наличие орбитального углового момента (ОУМ), существование которого у полей данного типа впервые было показано в [3]. Данное свойство оптических вихрей находит применение в таких областях, как манипуляция микро- и нанообъектами с помощью оптических пинцетов и пучков типа “гаечный ключ” (optical spanner) [4–7], лазерная обработка материалов [8], оптические коммуникации [9–12], а также является ключевым для развития таких перспективных направлений, как квантовые вычисления и квантовые коммуникации [12].

Пучки Бесселя, одни из наиболее распространенных вихревых пучков, привлекают все больший интерес благодаря своим бездифракционным и самовосстанавливающимся свойствам. Если для их формирования использовать кольцевую щель, то образуется пучок Бесселя нулевого порядка, однако в данной работе используется щель в виде спирали Архимеда, что позволяет формировать вихревой пучок Бесселя, обладающий особым свойством: его топологический заряд непрерывно убывает вдоль оси распространения [13].

В данной работе рассматривается формирование вихревого пучка при дифракции на тонкой апертуре в виде спирали Архимеда. Численно показано, что сформированный пучок соответствует вихревому пучку Бесселя, топологический заряд которого меняется при распространении в свободном пространстве.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Оптический вихрь обладает винтовой фазой, описываемой в поперечном сечении уравнением  $e^{im\varphi}$ , где

$i$  – мнимая единица,  $m$  – топологический заряд,  $\varphi$  – азимутальный угол.

Спираль Архимеда в полярных координатах в предположении, что  $m\lambda \ll r_0$ , может быть приближенно выражена согласно (1):

$$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{lz\lambda}{\pi}} \varphi, \quad (1)$$

где  $r_0$  – начальный радиус спирали,  $l$  – топологический заряд,  $\lambda$  – длина волны,  $\varphi$  – азимутальный угол.

Согласно скалярной теории дифракции в приближении Френеля комплексная амплитуда на расстоянии  $z$  может быть выражена с помощью интеграла дифракции [13], записываемого в виде (2):

$$E(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{iz} \int \int_{-\infty}^{+\infty} T(x', y') e^{\frac{ik[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{2z}} dx' dy', \quad (2)$$

где  $T(x, y)$  – апертура спиралевидной щели.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования распространения пучка Бесселя используется быстрое преобразование Френеля.

На рис. 1 представлен вид спиралевидной щели при параметрах  $r_0 = 8$  мм,  $d = 0,1$  мм,  $z = 1000$  мм,  $\lambda = 635$  нм,  $l = 4$ , где  $d$  – толщина спирали.

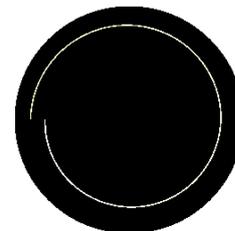


Рис. 1. Поперечное сечение щели в виде спирали Архимеда ( $r_0 = 8$  мм,  $d = 0,1$  мм,  $z = 1000$  мм,  $\lambda = 635$  нм,  $l = 4$ )

На рис. 2 представлены интенсивность, фаза и распределение плотности ОУМ вихревых пучков Бесселя, образованных спиралью, представленной на рис. 1, при варьировании расстояния от 1 до 4 метров.

Из результатов, представленных на рис. 2 видно, что на различных расстояниях формируются пучки Бесселя с различными топологическими порядками, причем величина его уменьшается с ростом расстояния. Такое свойство может быть востребовано оптическом захвате и манипулировании, так как обеспечивается простой способ варьирования свойств формируемого пучка только за счет смещения на определенное расстояние от входной плоскости.

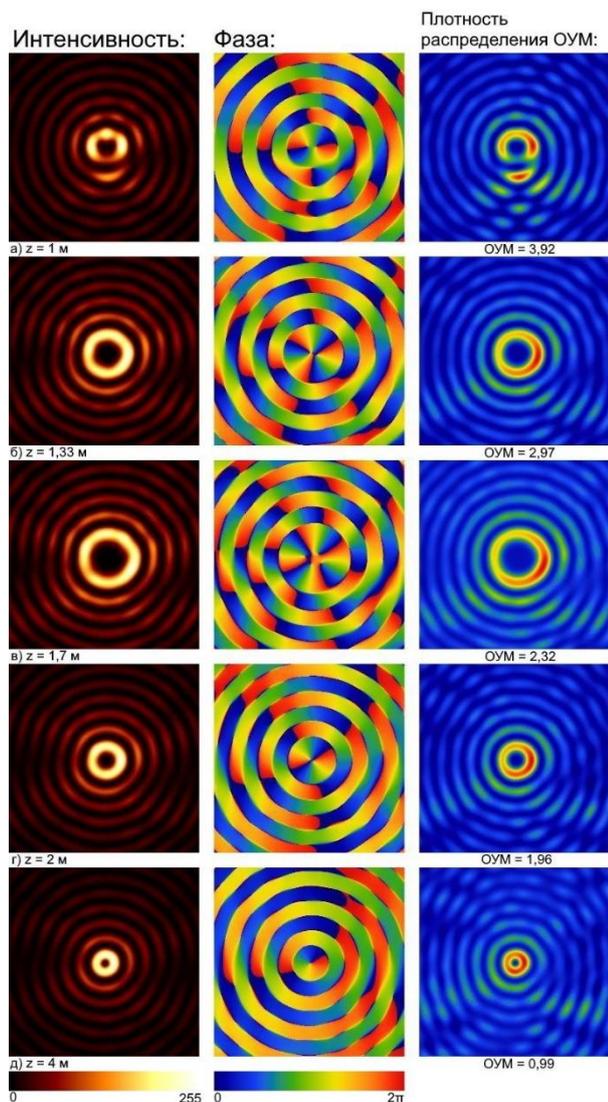


Рис. 2. Распределение интенсивности, фазы и ОУМ пучка Бесселя (размер картин 10 мм × 10 мм) на расстояниях от 1 до 4 метров при параметрах спиралевидной щели  $r_0 = 8$  мм,  $d = 0,1$  мм,  $z = 1000$  мм,  $\lambda = 635$  нм,  $l = 4$

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе численно показано, что топологический заряд вихревого пучка Бесселя, образованного спиралевидной щелью, обратно пропорционален пройденному пучком расстоянию.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Couillet, P. Optical vortices / P. Couillet, L. Gil, F. Rocca // *Optics Communications*. – 1989. – Vol. 73(5). – P. 403-408.
- [2] Soskin, M. Singular optics / M. Soskin, M. Vasnietsov // *Progress in Optics*. – 2001. – Vol. 42. – P. 219-276.
- [3] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45(11). – P. 8185-8189.
- [4] He, H. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity / H. He, M.E.J. Friese, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop // *Physical Review Letters*. – 1995. – Vol. 75(5). – P. 826-829.
- [5] Simpson, N.B. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner / N.B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M.J. Padgett // *Optical Letters*. – 1997. – Vol. 22(1). – P. 52-54.
- [6] Padgett, M.J. The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift / M.J. Padgett, L. Allen // *Optical and Quantum Electronics*. – 1999. – Vol. 31(1). – P. 1-12.
- [7] Padgett, M.J. Optical tweezers and spanners / M.J. Padgett, L. Allen. // *Physics World*. – September 1999. – Vol. 10(9). – P. 35-40.
- [8] Toyoda, K. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12(7). – P. 3645-3649.
- [9] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M.P.J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A.F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106.
- [10] Trichili, A. Optical communication beyond orbital angular momentum / A. Trichili, C. Rosales-Guzmán, A. Dudley, B. Ndagano, A. Ben Salem, M. Zghal, A. Forbes // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6(1). – P. 6.
- [11] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I.M.N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, M. Tur, A.E. Willner // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6(7). – P. 488-496.
- [12] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry, M.R. Dennis, D.L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N.M. Litchinitser, N.P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J.P. Torres, T.W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A.B. Stilgoe, J. Romero, A.G. White, R. Fickler, A.E. Willner, G. Xie, B. McMorran, A.M. Weiner // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 19(1). – P. 51.
- [13] Yang, Y. Anomalous Bessel vortex beam: Modulating orbital angular momentum with propagation / Y. Yang, X. Zhu, J. Zeng, X. Lu, C. Zhao, Y. Cai // *Nanophotonics*. – 2018. – Vol. 7(3). – P. 677-682.