

Генерация оптических вихрей с заданными параметрами

Д.А. Иконников¹, С.А. Мысливец^{1,2}, В.Г. Архипкин^{1,2}, А.М. Вьюнышев^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, 660041, Россия

ikonnikov@iph.krasn.ru

В настоящее время большое внимание уделяется структурированному свету, т.е. свету со сложным, нетривиальным распределением амплитуды и/или фазы. Одним из примеров структурированного света являются оптические вихри (ОВ). ОВ имеют азимутальный фазовый член $\exp(-il\phi)$ и возникают вокруг фазовых сингулярностей, где фаза не определена, а интенсивность равна нулю [1]. Параметр l представляет собой топологический заряд (ТЗ) ОВ и показывает число изменений фазы при обходе вокруг сингулярности на 2π радиан. Существуют различные способы получения ОВ, среди них – использование спиральных и «вилочковых» фазовых пластин [2]. ОВ нашли множество применений и часто используются в оптических пинцетах [3], микроскопии сверхвысокого разрешения [4], визуализации [5] и метрологии, обработке материалов [6] и так далее. В последнее время они также используются в оптических коммуникациях для увеличения информационной емкости [7]. Существует множество видов оптических вихрей, таких как: канонические ОВ, в которых геликоидальная фаза изменяется равномерно с азимутальным углом; ОВ с квадратичной зависимостью фазы от азимутального угла [8]; ОВ с дробным топологическим зарядом [9] и т.д. В последнее время для создания ОВ рассматривались обобщенные спирально-фазовые пластины [10]. Неканонические вихри с высоким значением ТЗ или с нелинейной азимутальной зависимостью фазы имеют распределение интенсивности в виде разорванного кольца (световой спирали) с зазором, размер, которого можно регулировать, подбирая значения ТЗ. Экспериментально показано, что указанную особенность можно использовать для захвата и направления микрочастиц в поперечной плоскости пучков [11].

В настоящей работе предложен простой метод создания бинарных фазовых голограмм (БФГ) на основе «вилочковых» голограмм для генерации ОВ с заданными характеристиками [12]. Фазовая модуляция задается следующим образом

$$\Phi(\mathbf{r}, \varphi) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sgn}(\sum a_n \cos[G_n \mathbf{r} + l_n \varphi]), \quad (1)$$

где Φ_0 – начальное значение фазы (в нашем случае $\pi/2$), $\Delta\Phi$ – максимальное отклонение фазы (в нашем случае $\pi/2$), $\text{sgn}(\psi) = |\psi|/\psi$ – функция знака, a_n – весовые коэффициенты, G_n – вектора обратной решетки. Было экспериментально показано, что созданные с использованием данного метода БФГ позволяют, в том числе, генерировать массивы ОВ, как одномерные, так и двумерные, регулярные и случайные (рис. 1 (а,б)). В том случае, если несколько компонент в (1) имеют одинаковые значения векторов обратной решетки G_n , но различаются значениями ТЗ l_n , возможно получение ОВ с суперпозицией нескольких ТЗ (рис. 1 (в,г)) [13]. Эта ситуация подобна случаю сложения двух независимо распространяющихся вихрей с различающимися зарядами. При этом пространственная конфигурация ОВ представляет собой два концентрических кольца; возникает явление конкуренции топологических зарядов [14].

Экспериментально получены и исследованы ОВ с квадратичной азимутальной зависимостью фазы. Для этого уравнение (1) модифицировалось следующим образом

$$\Phi(x_0, y_0) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sgn} \left(\cos \left[G_n x_0 + \left(1 + \frac{\beta\varphi}{2\pi} \right) l\varphi \right] \right). \quad (2)$$

При больших значениях квадратичной компоненты, кольцообразное распределение интенсивности трансформируется в один виток спирали. В таком случае значение l определяет характерные размеры кольца- или спиралеобразного распределения интенсивности. Произведение βl определяет каким образом распределение интенсивности будет модифицировано относительно случая канонического кольцообразного распределения, в то время как сумма $(1+\beta)l$ определяет значение полного топологического заряда системы ОВ. Для случая с квадратичной фазовой зависимостью были рассмотрены ситуации как с целочисленными так и с дробными значениями квадратичной компоненты (рис.1 д,е и ж,з, соответственно). Исследованы распределения интенсивности и фазы, в том числе количество и положение фазовых сингулярностей.

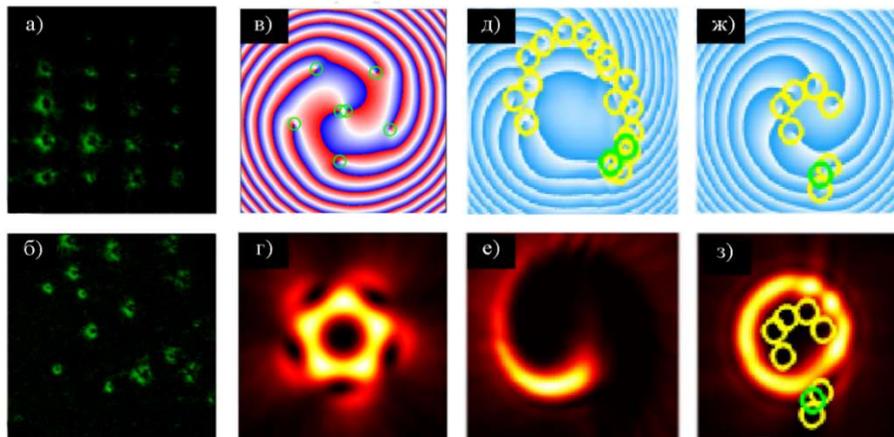


Рис. 1. Оптические вихри с заданными параметрами: а,б) экспериментальные распределения интенсивности; расчетные распределения фазы (в,д,ж) и распределения интенсивности (г,е,з).

Особый интерес представляет исследование дифракции Френеля Гауссова пучка на периодической решетке с дислокацией (вилочковая решетка). Для этого случая было выявлено наличие определенной пространственной периодичности в структуре распределения интенсивности, иными словами обнаружен аналог эффекта Тальбота.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.S. Soskin et al. // Phys. Rev. A 1997. V. 56. No 5. P. 4064.
2. X. Wang et al. // Nanophotonics 2018. V. 7. No 9. P. 1533.
3. K.T. Gahagan et al. // Opt. Lett. 1996. V. 21. No 11. P. 827.
4. K.I. Willig et al. // Nature 2006. V. 440. No 7086. P. 935.
5. M. Pascucci et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 093904.
6. J. Hamazaki et al. // Opt. Express 2010. V. 18. No 3. P. 2144.
7. M. Mirhosseini et al. // New Journal of Physics 2015. V. 17. No 3. P. 033033.
8. G. Molina-Terriza et al. // Opt. Lett. 2001. V. 26. No 3. P. 163.
9. I.V. Basistiy et al. // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 2004. V. 6. No 5. P. S166.
10. A.V. Ustinov et al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2021. V. 38. No 2. P. 420.
11. K. Yang et al. // Annalen der Physik 2022. V. 534. No 1. P. 2100404.
12. D.A. Ikonnikov, A. M. Vyunishev // Opt. Lett. 2020. V. 45. No 14. P. 3909.
13. D.A. Ikonnikov et al. // Annalen der Physik 2022 (принята в печать)
14. V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, A. V. Volyar // Opt. Express 2020. V. 28. No 6. P. 8266.