

Генерация внеосевых дифракционных порядков при квантовании фазы смещенной вихревой линзы

О.А. Дюкарева

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
dukarevaola@gmail.com

Аннотация — Исследуется действие фазовой вихревой смещенной линзы, квантованной по заданному уровню и позволяющей получить варьируемое количество локальных максимумов интенсивности вне оптической оси. Показана возможность детектирования вихревых пучков вне фокальной плоскости и вне оптической оси.

Ключевые слова — вихревая линза, квантование фазы, локальные фокусы, детектирование вихревых пучков

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных факторов уплотнения каналов передачи оптической информации является мультиплексирование сигнала с использованием наибольшего количества степеней свободы – структуре, поляризации, длине волны, положению [1, 2]. Причем структура пучков, особенно ортогональных и модовых распределений, обеспечивает не только широкий спектр возможностей при кодировании сигнала [3, 4], но и легко осуществляется с использованием средств дифракционной оптики [5, 6].

Хорошо известно мультиплексирование пучков на основе дифракционных решеток [5, 7] и добавления отклоняющего волнового фронта [6]. Другим способом является формирование множества локальных фокусов вдоль оптической оси с использованием бинарной дифракционной линзы [8]. В отличие от классических линз, квантованные дифракционные линзы, обладают простотой изготовления и позволяют формировать заданные локальные фокусы на оптической оси, в том числе, с вихревой фазовой составляющей [6].

Смещение области регистрации сигнала за счет добавления отклоняющего волнового фронта позволяет не только избежать шумов, локализованных на оптической оси, что улучшает регистрацию полезного сигнала, но и добавляет больше степеней свободы для задач, связанных с кодированием информации.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Будем рассматривать линзы с функцией пропускания вида

$$f(r) = e^{-i\frac{k}{2f}r^2} \quad (1)$$

с радиусом $R = 3$ мм, фокусным расстоянием $f = 1000$ мм, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм.

Распределение амплитуды пучков в параксиальной области может быть вычислено с помощью преобразования Френеля:

А.В. Устинов

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография
и фотоника» РАН
Самара, Россия
andr@ipsiras.ru

$$F(u, v, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \times$$

$$\iint_{-R}^R f(x, y) \exp\left(\frac{ik}{2z}((x-u)^2 + (y-v)^2)\right) dx dy, \quad (2)$$

$$\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} \ll z.$$

Численный расчет интегралов (2) производился непосредственно по квадратурным формулам (формула левых прямоугольников). Для сокращения времени вычислений значения в каждой точке (u, v, z) вычислялись параллельно на графическом процессоре.

Классическая линза дает один максимум интенсивности в плоскости $z = f$, ее фаза и продольное распределение пучка показаны на рис. 1.

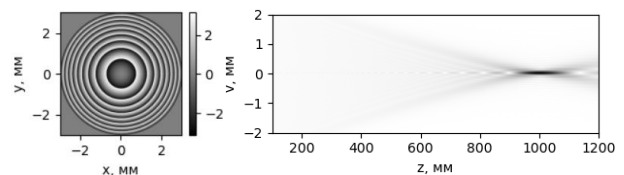


Рис. 1. Фаза линзы и продольная интенсивность поля после линзы

Рассмотрим функцию:

$$f(r) = e^{-ik\left(\frac{r^2}{2f} - \alpha y\right) + im\varphi}. \quad (3)$$

Для смещения фокуса линзы с оптической оси воспользуемся оптическим клином вида $\exp(ik\alpha y)$. При положительном параметре α фокус пучка смещается в положительном направлении оси y . Учитывая, что выходная функция преобразования Френеля зависит от u и v , смещение на соответствующих продольных изображениях интенсивности происходит в положительном направлении оси v . Поскольку $k = 2\pi/\lambda - const$, варьирование положения фокуса зависит только от параметра α .

Дополнение вихревым элементом $\exp(im\varphi)$ приводит к появлению изолированных точек с нулевой интенсивностью на оси распространения (находящейся под углом к оптической оси), в которых фаза не определена, как это показано на рис. 2.

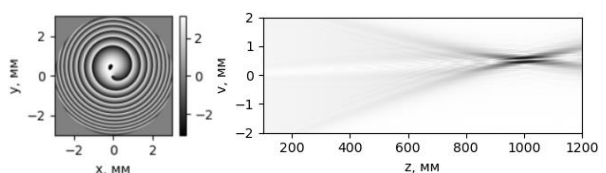


Рис. 2. Распространение смещенного вихревого пучка (3), $m = 1$

Под частным случаем квантования фазового оптического элемента, бинаризацией, подразумевается представление фазы только с помощью двух значений, например, ψ_1 и ψ_2 . При этом всегда возможно сместить диапазон таким образом, чтобы нижняя граница была 0.

Сохранение ненулевых значений ψ_1 не имеет практического смысла, поскольку добавление константы к нижней и верхней границам значений фазы не влияет на результат благодаря периодичности. Кроме того, подобное представление является приоритетным, поскольку это дает возможность изготовить фазовый элемент за одну итерацию травления.

Для двухуровневого квантования оптимальной разницей уровней является π , поскольку в этом случае обеспечивается максимальное сохранение энергии.

Квантование выполняется по некоторому уровню γ , как было предложено в работе [9]. Параметр γ определен на промежутке от 0 до 1. Это означает, что фаза входного пучка в диапазоне от 0 до 2π , делится на уровне $2\pi \times \gamma$. Значения, превосходящие $2\pi\gamma$, устанавливаются как π , другие – 0. Для фазовых функций, изначально определенных на промежутке от $-\pi$ до π результирующая фазовая функция может быть записана как:

$$F(r) = \exp\left(\frac{i\pi(1 + \text{sign}(\arg(f(r)) + \pi - 2\pi\gamma))}{2}\right). \quad (4)$$

На рис. 3 представлено продольное распределение интенсивности бинарной вихревой смещенной линзы. Квантование по уровню γ позволяет получить несколько дифракционных порядков параллельно оптической оси. Положение каждого максимума может быть вычислено как $z_n = f/n$, где n – номер порядка, f – положение фокуса.

Если представить γ в виде дроби, то номера отсутствующих порядков кратны знаменателю. Можно заметить, что для случая $\gamma = 0,5$ пропадает каждый второй порядок.

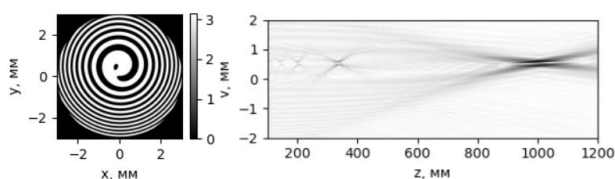


Рис. 3. Распространение бинарного (согласно (4)) смещенного вихревого пучка (3), $m = 1, \gamma = 0,5$

При освещении бинарной смещенной вихревой линзы отдельными вихревыми пучками возможно детектировать их наличие на оси распространения согласно:

$$f(r) = B \left[e^{-ik\left(\frac{r^2}{2f} - \alpha y\right) + im\varphi} \right] \sum_{p=0}^{\infty} c_p \exp(in_p\varphi), \quad (5)$$

где B – оператор квантования по заданному уровню.

На рис. 4 показана возможность детектирования дифракционного порядка с $n = -3$. Нужно отметить, что при квантовании линз m и n имеют противоположные знаки.

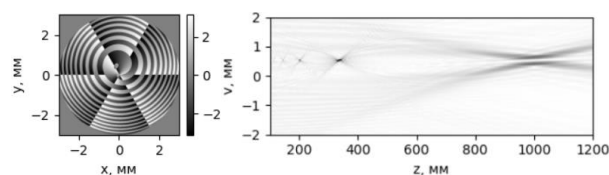


Рис. 4. Детектирование дифракционного порядка $n = -3$

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены свойства распространения оптических пучков при квантовании фазы смещенной вихревой линзы. Квантование по заданному уровню, в отличие от бинаризации методом комплексного сопряжения (что соответствует квантованию по среднему уровню), позволяет получать дифракционные максимумы любых заданных порядков.

Исследования влияния параметра квантования на распространение интенсивности показали возможность отбрасывания фиксированных дифракционных порядков, описываемых знаменателем дроби значения уровня бинаризации.

Смещенная квантованная вихревая линза может быть использована для детектирования как отдельных вихревых пучков, так и их суперпозиций вне оптической оси.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] He, C. Towards higher-dimensional structured light / C. He, Y. Shen, A. Forbes // *Light Sci. Appl.* – 2022. – Vol. 11. – P. 205.
- [2] Khonina, S.N. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, M.A. Butt, S.V. Karpeev // *Opto-Electronic Advances.* – 2022. – Vol. 5(8). – P. 210127.
- [3] Abderrahmen, T. Communicating using spatial mode multiplexing: potentials, challenges, and perspectives / T. Abderrahmen, K.H. Park, M. Zghal, B.S. Ooi, M.S. Alouini // *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* – 2019. – Vol. 21. – P. 3175-3203.
- [4] Su, Y.K. Perspective on mode-division multiplexing / Y.K. Su, Y. He, H.S. Chen, X.Y. Chen, G.F. Li // *Appl. Phys. Lett.* – 2021. – Vol. 118. – P. 200502.
- [5] Lei, T. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings / T. Lei, M. Zhang, Y. Li, P. Jia, G. N. Liu, X. Xu, Z. Li, C. Min, J. Lin, C. Yu, H. Niu // *Light Sci. Appl.* – 2015. – Vol. 4. – P. e257.
- [6] Kazanskiy, N.L. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // *Quantum Electronics.* – 2020. – Vol. 50. – P. 629-635.
- [7] Miller, J.M. Multi-level-grating array generators: Fabrication error analysis and experiments / J.M. Miller, M.R. Taghizadeh, J. Turunen, N. Ross // *Appl. Opt.* – 1993. – Vol. 32(14). – P. 2519-2525.
- [8] Khonina, S.N. Local foci of a parabolic binary diffraction lens / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, R.V. Skidanov, A.P. Porfirev // *Applied Optics.* – 2015. – Vol. 54(18). – P. 5680-5685.
- [9] Khonina, S. N. Binary multi-order diffraction optical elements with variable fill factor for the formation and detection of optical vortices of arbitrary order / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // *Applied Optics.* – 2019. – Vol. 58. – P. 8227-8236.