

Формирование пространственно-временных оптических вихрей с использованием геометрии Кречмана

А.И. Кашапов

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;

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

Е.А. Безус

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;

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

Д.А. Быков

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;

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

Л.Л. Досколович

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
leonid@ipsiras.ru

Аннотация—В работе рассмотрена структура в геометрии Кречмана с дополнительным диэлектрическим слоем. Показано, что исследуемая структура может формировать в отражении пространственно-временной оптический импульс, содержащий фазовую сингулярность. Представленные результаты численного моделирования демонстрируют возможность формирования с помощью исследуемой структуры пространственно-временных оптических вихрей с высоким качеством. Полученные результаты могут найти применение при создании систем аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

Ключевые слова—оптические вычисления, оптический вихрь, геометрия Кречмана

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается большой интерес к разработке компактных структур нанофотоники для оптических вычислений, в частности для дифференцирования оптических сигналов, а также для реализации более сложных дифференциальных операторов. Указанные дифференцирующие структуры являются перспективными в задачах обработки информации в режиме реального времени, так как

обеспечивают высокую производительность и низкое энергопотребление по сравнению с аналогичными цифровыми методами [1, 2].

Оптическими дифференциаторами часто называют дифракционные структуры, дифференцирующие либо огибающую оптического импульса во времени, либо профиль монохроматического пучка по пространственной переменной. Однако существует несколько работ, посвященных исследованию «пространственно-временных» оптических дифференциаторов, реализующих операцию дифференцирования и во времени, и по пространственной переменной [3, 4]. Важным результатом работы [4] является применение субволновой дифракционной решетки для формирования оптического импульса, содержащего оптический вихрь в пространственно-временной области. В настоящее время оптические импульсы, имеющие «пространственно-временной» оптический вихрь, являются предметом интенсивных исследований [5, 6]. При этом формирование таких импульсов с помощью простых и компактных структур нанофотоники представляет большой интерес [4].

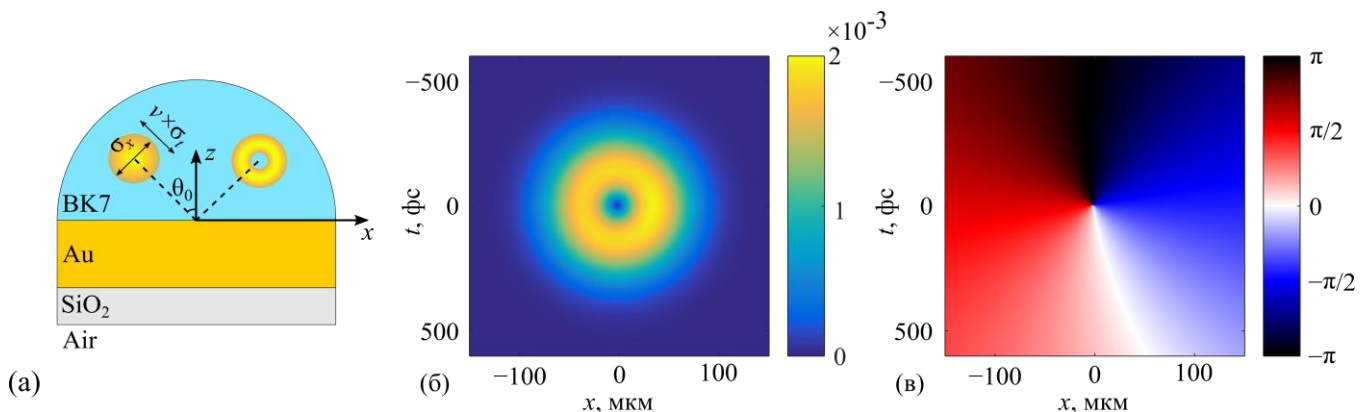


Рис. 1. (а) Геометрия структуры и схематичное изображение формирования пространственно-временного оптического вихря; амплитуда (б) и фаза (в) численно рассчитанного профиля огибающей отраженного импульса

В настоящей работе показано, что структура, соответствующая геометрии Кречмана с дополнительным диэлектрическим слоем, позволяет формировать пространственно-временные оптические вихри с высоким качеством.

2. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследуемая в работе структура состоит из призмы (материал – стекло BK7), металлического слоя из золота (Au) и диэлектрического покрытия из диоксида кремния (SiO₂). Структура находится в вакууме с единичным показателем преломления (см. рис. 1а). Параметры структуры (толщины металлического и диэлектрического слоёв) были рассчитаны для обеспечения работы дифференциатора при падающем ТМ-поляризованном гауссовом пучке с пространственной шириной $\sigma_x = 100$ мкм и длительностью $\sigma_t = 400$ фс под углом $\theta_0 = 68,66^\circ$ при центральной длине волны $\lambda_0 = 500$ нм. Толщины металлического и диэлектрического слоёв равны 27,2 нм и 41,7 нм соответственно.

На рис. 1б и 1в показаны амплитуда и фаза профиля огибающей отраженного импульса, рассчитанного численно методом строгого решения задачи дифракции на слоистых структурах [7]. Следует отметить, что формирование пространственно-временного оптического вихря выполняется с высоким качеством. Среднеквадратичное отклонение амплитуды численно рассчитанного профиля огибающей от «аналитической» амплитуды, нормированное на максимум амплитуды отраженного импульса, составляет лишь 0,9%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность эффективного формирования пространственно-временных оптических импульсов, имеющих фазовую сингулярность (пространственно-временных оптических вихрей) с помощью дифракционной структуры, соответствующей схеме Кречмана с дополнительным диэлектрическим слоем. Приведенные результаты численного моделирования в рамках строгой электромагнитной

теории дифракции демонстрируют возможность формирования в отражении пространственно-временного оптического вихря с высоким качеством (нормированная среднеквадратическая ошибка не превышает 1%). Полученные результаты могут найти применение при создании систем аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00514) в части исследования структур в геометрии Кречмана и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН) в части реализации моделирующего программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Silva, A. Performing Mathematical Operations with Metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science* – 2014. – Vol. 343(6167). – P. 160–163.
- [2] Zhou, Y. Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I.I. Kravchenko, J. Valentine // *Nat. Photonics* – 2020. – Vol. 14. – P. 316–323.
- [3] Zhang, J. Time response of plasmonic spatial differentiators / J. Zhang, Q. Ying, and Z. Ruan // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44. – P. 4511–4514.
- [4] Huang, J. Spatiotemporal Differentiators Generating Optical Vortices with Transverse Orbital Angular Momentum and Detecting Sharp Change of Pulse Envelope / J. Huang, J. Zhang, T. Zhu, Z. Ruan // *Laser Phot. Rev.* – 2022. – Vol. 16(5). – Art. No. 2100357.
- [5] Chong, A. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum / A. Chong, C. Wan, J. Chen and Q. Zhan // *Nat. Photonics* – 2020. – Vol. 14. – P. 350–354.
- [6] Bliokh, K.Y. Spatiotemporal Vortex Pulses: Angular Momenta and Spin-Orbit Interaction / K.Y. Bliokh // *Phys. Rev. Lett.* – 2021. – Vol. 126. – P. 243601.
- [7] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, T.K. Gaylord // *J. Opt. Soc. Am. A* – 1995. – Vol. 12. – P. 1077–1086.