

ДОЭ для формирования вихревого пучка с ультравысоким топологическим зарядом

С. В. Ганчевская¹, Р. В. Скиданов², В. В. Котляр^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Проведен расчет дифракционного оптического элемента для формирования вихревого пучка с ультравысоким топологическим зарядом ($n = 2000$). Значение топологического заряда выбрано из технологических соображений как предельное, которое возможно получить при использовании прямой лазерной записи по тонким металлическим пленкам. Элемент диаметром 20 мм изготовлен на кварцевой подложке. Проведен эксперимент, в котором сформированный вихревой пучок зарегистрирован методом съемки с экрана. Измерен топологический заряд вихревой пучка с использованием цилиндрической линзы, и посчитано число полос в фокальной плоскости на малом участке с последующей экстраполяцией. Эта методика дала значение топологического заряда 2018, что совпадает с расчетными данными в рамках ошибки измерения.

Ключевые слова: вихревой пучок, топологический заряд, дифракционный оптический элемент.

Цитирование: Ганчевская, С. В. ДОЭ для формирования вихревого пучка с ультравысоким топологическим зарядом / С. В. Ганчевская, Р. В. Скиданов, В. В. Котляр // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 153–158.

Введение

Вихревые световые пучки используются во многих областях науки, таких как оптическая микроманипуляция, оптическая связь, микроскопия [1–3]. Например, в оптической связи или в оптической микроманипуляции предпочтительно использование вихревых пучков с высоким топологическим зарядом. Вихревые пучки с высоким топологическим зарядом формируются с использованием нескольких подходов. В работе [3] сформирован вихревой пучок с топологическим зарядом $n = 100$ с помощью метаповерхностного ОАМ-лазера. В [4] получен вихревой пучок с топологическим зарядом $n = 200$ путем преобразования мод Гаусса — Эрмита высокого порядка в моды Гаусса — Лагерра. В [5] сформирован пучок с топологическим зарядом около 10000, используя спиральную фазовую пластину. В [6] вихревой пучок с топологическим зарядом около $n = 600$ получили с использованием пространственного модулятора света. Однако в работе [5], в которой получено наибольшее значение топологического заряда, для формирования пучка используется довольно сложный технологический элемент — отражающая спиральная фазовая пластина, которую сложно изготовить. В настоящей статье рассматривается формирование вихревого светового пучка с высоким топологическим зарядом с использованием спирального бинарного аксикона, изготовленного по технологии фотолитографии. Топологический заряд оценен по методу, представленному в [7].

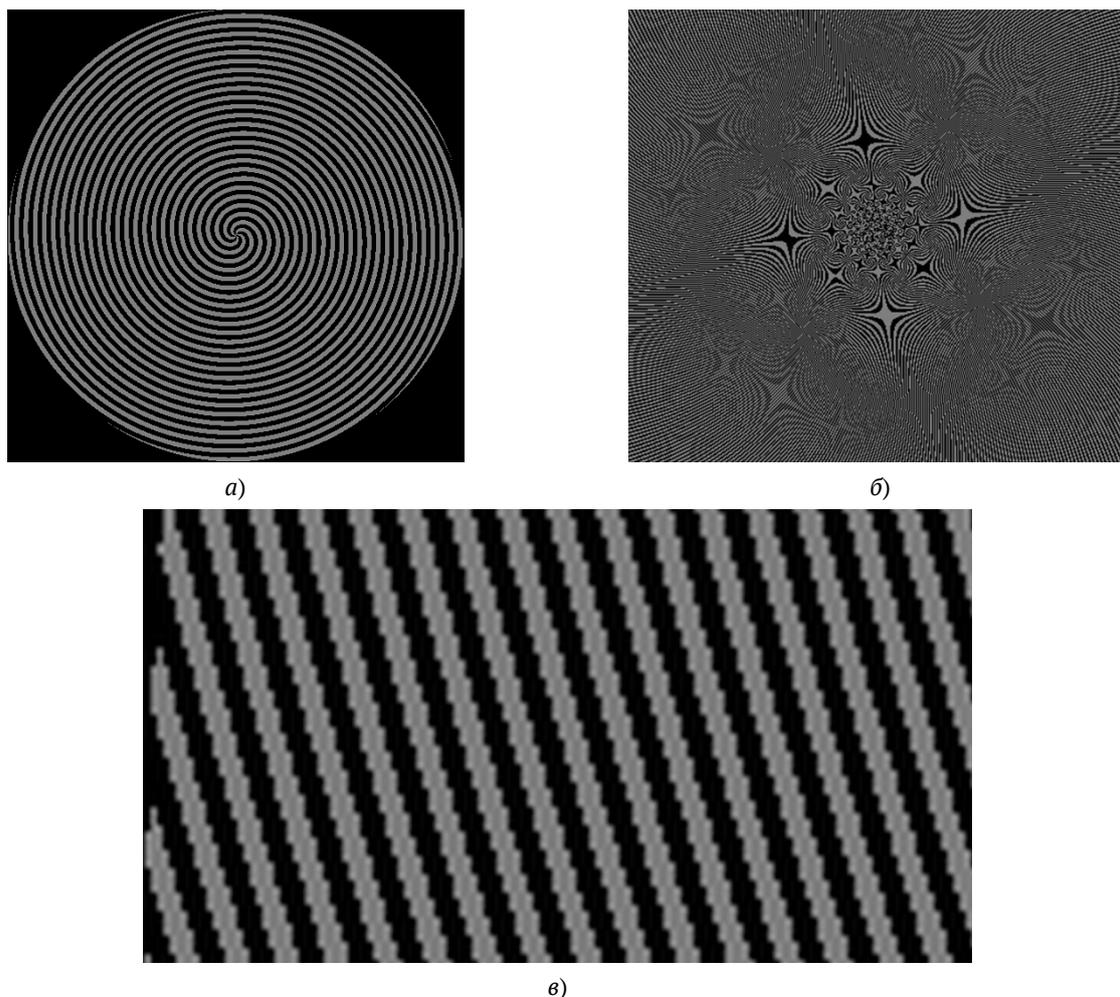


Рис. 1. Фазовая функция спирального аксикона для формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 5$ (а), центральный участок фазовой функции спирального аксикона (общий диаметр 4,1 мм) размером 0,5 мм для формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 2000$ (б), краевой участок фазовой функции спирального аксикона шириной 0,1 мм для формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 2000$

1. Моделирование спирального бинарного аксикона и его изготовление методом фотолитографии

Для формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 2000$ использовался спиральный аксикон. На рис. 1а для примера показана фазовая функция бинарного аксикона для формирования пучка с топологическим зарядом $n = 5$. Для аксикона, формирующего вихревой пучок с топологическим зарядом $n = 2000$, нет смысла приводить изображение фазовой функции всего аксикона, поскольку из-за малости периода она будет выглядеть как серый круг. На рис. 1б приведен центральный участок фазовой функции аксикона размером 0,5 мм, а на рис. 1в — краевой участок шириной 100 мкм.

Из рис. 1в видно, что на краю спирального аксикона линии довольно хорошо прописались (период 6 мкм). Фазовая функция рассчитывалась с разрешением 1 мкм на 1 пиксель, который обеспечивает технология фотолитографии.

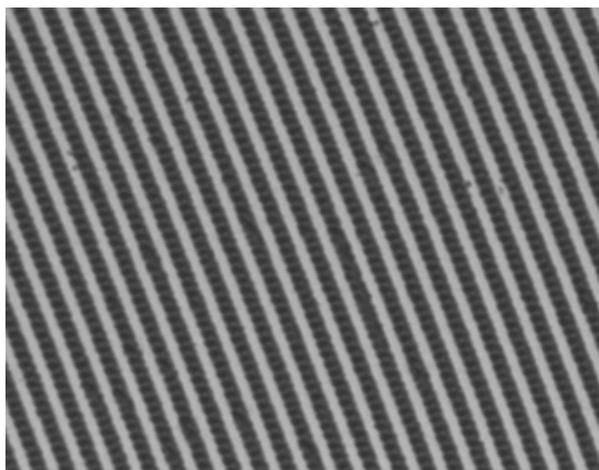


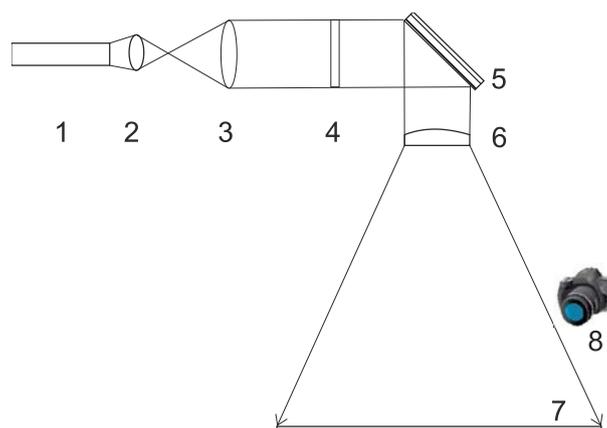
Рис. 2. Вид краевого участка аксикона, изготовленного прямой лазерной записью по хрому

2. Эксперимент по формированию вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 2000$ спиральным бинарным аксиконом

Амплитудный спиральный аксикон изготавливался методом прямой лазерной записи по тонкой пленке хрома. На рис. 2 представлены участки аксикона, снятый оптическим микроскопом с числовой апертурой микрообъектива 0,2 (различимы детали размером около 1 мкм), который примерно соответствует участку фазовой функции на рис. 1в. Как видно из рис. 2а в центре аксикона наблюдается стохастическая картина. На рис. 2б на краевом участке полосы аксикона четко прописаны, более того, за счет аппаратного сглаживания даже несколько лучше, чем в фазовой функции (исчезли «пилообразные» края). Диаметр центральной части, в которой полосы аксикона не прописаны, составляет примерно 6 мм. Таким образом, площадь не прописанного участка составляет около 10% от площади аксикона, следовательно, этот участок не должен оказывать существенное влияние на формирование вихревого пучка.

Для проведения эксперимента собрана оптическая схема, представленная на рис. 3. Топологический заряд сформированного пучка определялся по методу, описанному в [7]. Ввиду большого топологического заряда и, соответственно, большого количества полос в картине (2000), формируемой цилиндрической линзой, для их успешной регистрации экран был отодвинут на 5 м от основной оптической схемы.

Распределение интенсивности на экране регистрировалось цифровым фотоаппаратом Sony A58 с разрешением матрицы 5456×3632 . Даже с учетом этого разрешения одновременно зарегистрировать все 2000 полос четко не получилось. Регистрировались отдельные участки, в которых полосы хорошо различимы, а затем результат экстраполировался на общую длину распределения интенсивности.



1 — лазер, 2 и 3 — линзы коллиматора, 4 — спиральный аксикон, 5 — поворотное зеркало, 6 — цилиндрическая линза, 7 — экран, 8 — цифровой фотоаппарат

Рис. 3. Оптическая схема эксперимента

На рис. 4а представлено изображение вихревого пучка, снятое на экране без цилиндрической линзы, на рис. 4б — изображение распределения, формируемого с цилиндрической линзой. На рис. 4в показан увеличенный участок, снятый вблизи точки 1, где хорошо видны темные и светлые полосы с масштабом в виде линейки. На рис. 4г представлен участок большей площади, на котором видно, что полосы становятся более узкими. На рис. 4д полосы показаны крупным планом.

К сожалению, из-за наличия нулевого порядка (яркая линия на рис. 4б) напрямую подсчитать полосы не представляется возможным, поэтому оценивалось их количество на основании измеренной ширины полос.

По изображениям отдельных участков подсчитывалось количество полос и определялась средняя ширина полосы, затем было посчитано сколько полос уложится на отрезок от точки 1 до точки 2. Длина отрезка от точки 1 до точки 2 составляет 1370 мм. Период полос на начальном участке составлял около 1 мм, а на расстоянии 120 мм от точки 1 ширина полос составила 0,65 мм и на дальнейшем удалении почти не изменялась. Таким образом, на отрезке длиной 1130 мм (на участке 100 мм от точки 1 до 120 мм от точки 2) укладывается 1740 полос. Полосы на участках длиной 120 мм возле точек 1 и 2 посчитаны напрямую и составляют 137 и 141 полосу соответственно. Оценка количества полос от точки 1 до точки 2 равна 2018, что хорошо согласуется с топологическим зарядом пучка ($n = 2000$). Некоторое превышение над 2000 наблюдается, очевидно, из-за того, что ширина полос к центру распределения еще немного сужается.

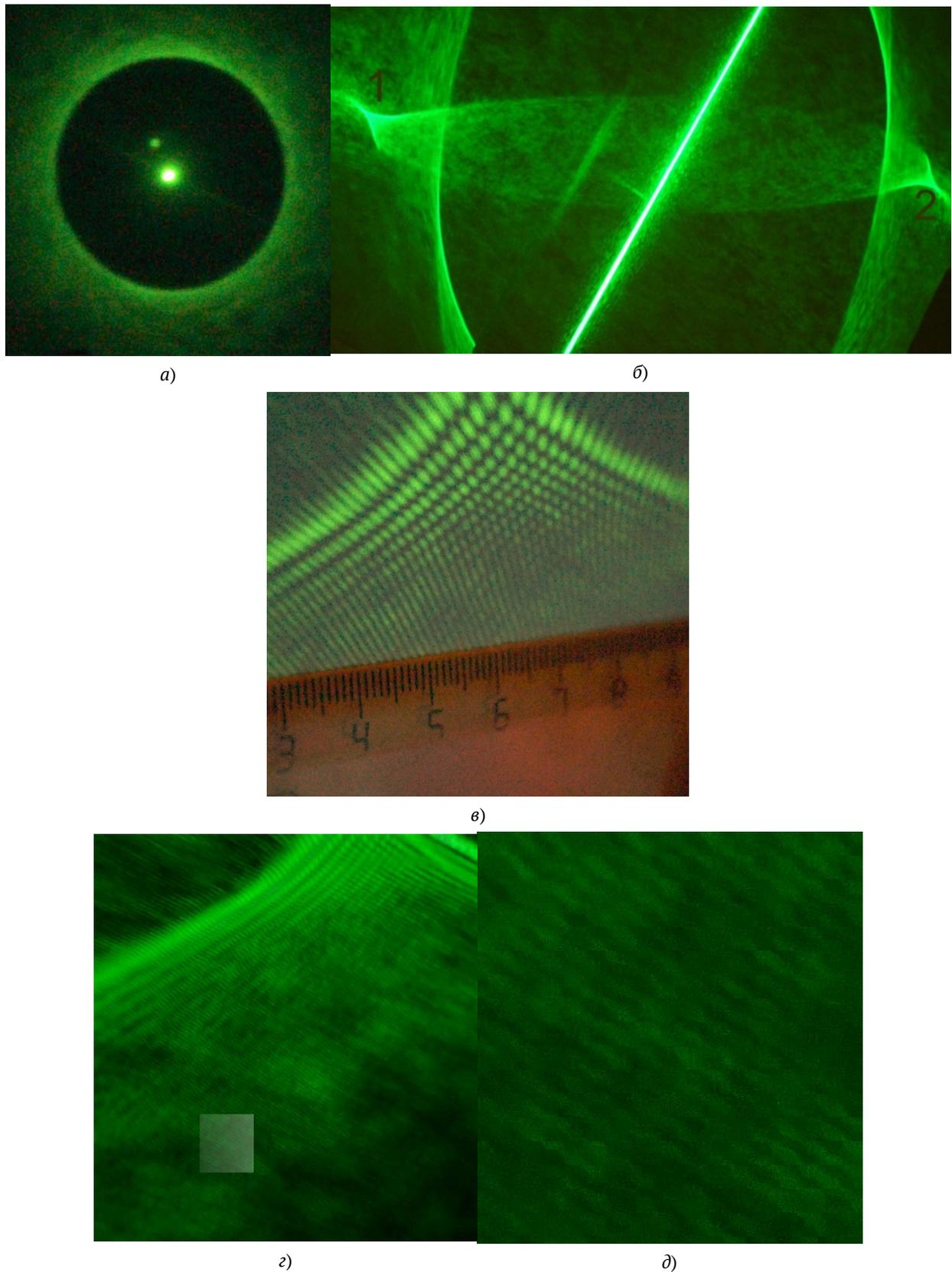


Рис. 4. Изображение вихревого пучка, снятое на экране без цилиндрической линзы (а), изображение распределения, формируемого с цилиндрической линзой (б), увеличенный участок, снятый вблизи точки 1 (в), участок большего размера возле точки 1 (г), крупный план полос на расстоянии 120 мм от точки 1 (место отмечено светлым квадратом в г) (д)

Следует заметить, что возможности бинарной технологии позволяют сформировать вихрь с более высоким топологическим зарядом. Сформированный и описанный в статье аксикон имеет диаметр 20 мкм, следовательно, на краю аксикона период полос составляет около 6 мкм. Ближе к центру период полос становится менее 2 мкм, и появляется хаотичная картина, представленная на рис. 1б. Для увеличения генерируемого топологического заряда необходимо увеличивать диаметр спирального аксикона. Так, удвоение диаметра даст возможность формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 4000$ и т. д.

Заключение

Методом прямой лазерной записи успешно изготовлен амплитудный бинарный спиральный аксикон для формирования вихревого пучка с топологическим зарядом $n = 2000$. Проведенный эксперимент с бинарным спиральным аксиконом показал, что несмотря на участок в центре (около 10% от общей площади аксикона), где фазовая функция не прописана из-за недостатка разрешения, вихревой пучок с высоким топологическим зарядом успешно формируется. Оценка показала 2018 полос, что хорошо согласуется с топологическим зарядом пучка ($n = 2000$). Поскольку технология формирования бинарных элементов относительно проста, такой метод формирования вихревых пучков имеет перспективы для практического использования.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-69-47110.

Список источников

- [1] **Lin, D.** [High-power, electronically controlled source of user-defined vortex and vector light beams based on a few-mode fiber amplifier](#) / D. Lin, J. Carpenter, Y. Feng, Y. Jung, S.-U. Alam, D. J. Richardson // *Photonics Research*. — 2021. — Vol. 9. — № 5. — P. 856–864.
- [2] **Kotova, S. P.** [Manipulation of microparticles using combined optical traps](#) / S. P. Kotova, A. V. Korobtsov, N. N. Losevsky, A. M. Mayorova, S. A. Samagin // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2021. — Vol. 268. — P. 107641.
- [3] **Sroor, H.** [High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser](#) / H. Sroor, Y.-W. Huang, B. Sephton, D. Naidoo, A. Vallés, V. Ginis, C.-W. Qiu, A. Ambrosio, F. Capasso, A. Forbes // *Nature Photonics*. — 2020. — Vol. 14. — № 8. — P. 498–503.
- [4] **Wang, C.** [Generation and measurement of high-order optical vortices by using the cross phase](#) / C. Wang, Yu. Ren, T. Liu, Ch. Luo, S. Qiu, Zh. Li, H. Wu // *Applied Optics*. — 2020. — Vol. 59. — P. 4040–4047.
- [5] **Fickler, R.** [Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010](#) / R. Fickler, G. Campbell, B. Buchler, P. K. Lam, A. Zeilinger // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2016. — Vol. 113. — № 48. — P. 13642–13647.
- [6] **Pinnell, J.** [Probing the limits of orbital angular momentum generation and detection with spatial light modulators](#) / J. Pinnell, V. Rodríguez-Fajardo, A. Forbes // *Journal of Optics (United Kingdom)*. — 2021. — Vol. 23. — № 1. — P. 015602.
- [7] **Котляр, В. В.** Определение топологического заряда оптического вихря с помощью астигматического преобразования / В. В. Котляр, А. А. Ковалёв, А. П. Порфирьев // *Компьютерная оптика*. — 2016. — Том 40. — № 6. — С. 781–792.