

СЛОЖЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ГИПЕРГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПУЧКАХ

С. В. Ганчевская^{1,2}, Р. В. Скиданов^{1,2}

Предложен новый способ формирования гипергеометрических пучков, основанный на сложении топологических зарядов структуры аксиконов с логарифмическим расположением зон и топологических зарядов самих зон. Представлены результаты натурального эксперимента, подтверждающие эффект сложения топологических зарядов.

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

За последние десятилетия опубликовано огромное количество работ, посвященных формированию различных световых пучков с вихревой составляющей [1–5].

Формировать гипергеометрический пучок (ГГ) можно с помощью бинарного логарифмического аксикона [6, 7]. В работе [8] был предложен метод формирования световых полей, представляющих собой суперпозицию нескольких вихревых световых пучков, которые формируются вихревыми аксиконами.

Если анализировать все многообразие работ по формированию вихревых пучков дифракционными оптическими элементами (ДОЭ), то выясняется, что фактически есть два основных способа формирования закрученного светового поля в нулевом порядке дифракции: использование фазовой пластины (рис. 1(а)), либо использование бинарной структуры в виде спирали (спиральный аксикон (рис. 1(б)), спиральная линза (рис. 1(в))).

Основные элементы (спиральный аксикон и спиральная фазовая пластинка) были изготовлены по технологии фотолитографии и экспериментально исследованы еще в 1992 году [9, 10].

В настоящей работе предлагается объединить эти два подхода и рассмотреть новый тип элементов, в которых спиралевидная структура аксикона с логарифмическим

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001 Россия, Самара, Молодогвардейская, 151; e-mail: soft@smr.ru.

² Самарский национальный исследовательский университет, 443086 Россия, Самара, Московское ш., 34.

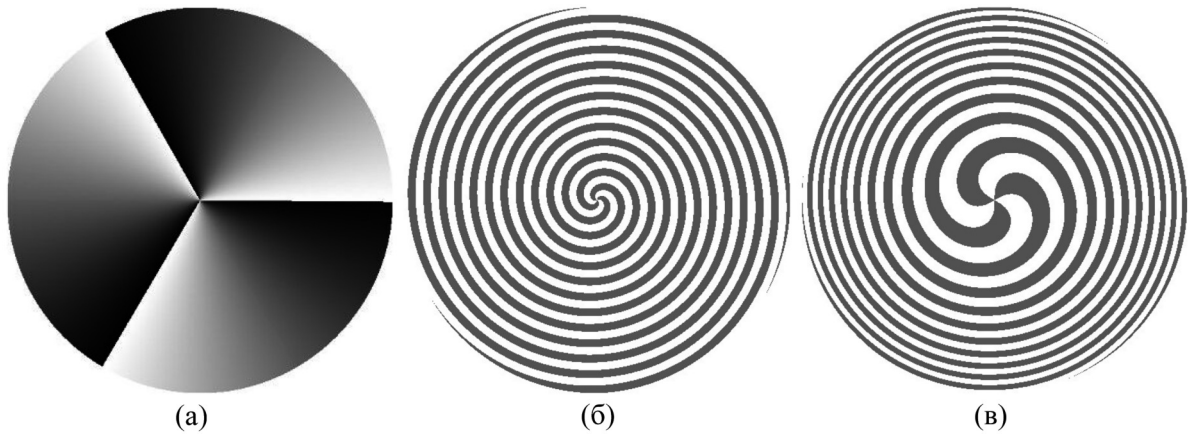


Рис. 1: Фазовая пластина для формирования оптического вихря (а), спиральный аксикон (б), спиральная линза (в).

расположением зон соединяется с зависимостью фазы от полярного угла фазовой пластины внутри каждой зоны. При этом топологический заряд пучка складывается из топологических зарядов структуры и зон.

Моделирование дифракции осуществлялось с помощью преобразования Френеля. На рис. 2 представлен ряд изображений ГГ пучков с разными сочетаниями топологических зарядов структуры и зон и распределений интенсивностей, сформированных на расстоянии 0.8 м. Все представленные элементы формируют ГГ пучок 1-го порядка.

Как видно из рис. 2, совершенно разные по фазовой функции ДОЭ формируют одинаковые вихревые световые пучки с единичным топологическим зарядом. Следует отметить, что на рис. 2 показаны два вырожденных случая ГГ пучков. При нулевом заряде зон (рис. 2(а)) формируется бинарный фазовый аксикон, а при нулевом заряде структуры (рис. 2(в)) – аксикон нулевого порядка, в каждую зону которого добавлен топологический заряд.

Также очень похожие друг на друга по фазовой функции ДОЭ могут формировать вихревые световые пучки с кардинально отличающимися топологическими зарядами (рис. 3).

Как видно из рис. 4, происходит сложение топологического заряда структуры вихревого аксикона и топологического заряда зон этого аксикона.

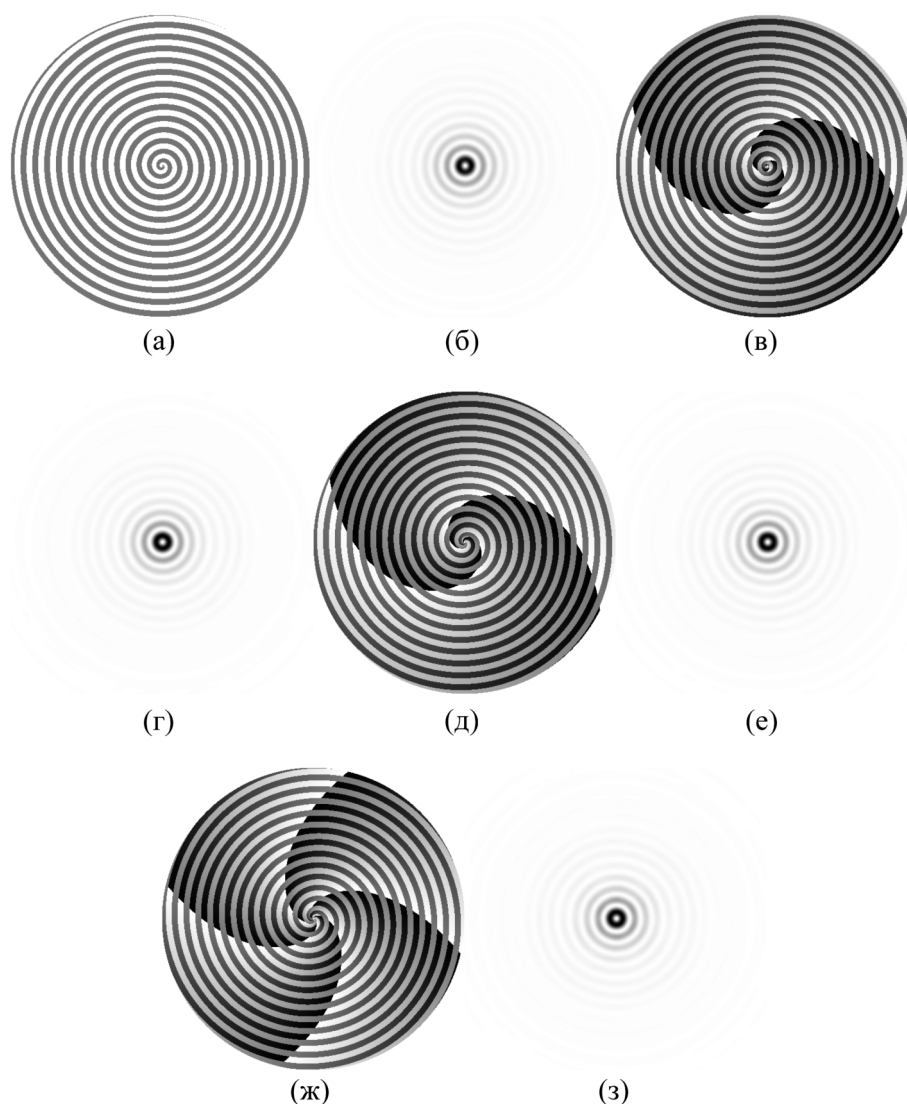


Рис. 2: Фазовые функции ГГ пучков с топологическими зарядами структуры и зон (n, m) соответственно $(1, 0)$ (а), $(0, 1)$ (в), $(2, -1)$ (д), $(3, -2)$ (ж), а также распределения интенсивности, формируемые ДОЭ с этими фазовыми функциями на расстоянии 0.8 м ((б), (г), (е), (з)).

Для натуральных экспериментов были изготовлены 4 фазовых элемента. На кварцевую подложку наносился слой хрома толщиной 45 нм. Запись элементов производилась на станции круговой лазерной записи CLWS-2014, работающей в полярной системе координат. Затем подложка проявлялась в растворе красной кровяной соли до получения маски и методом плазмохимического травления травилась на глубину 578 нм.

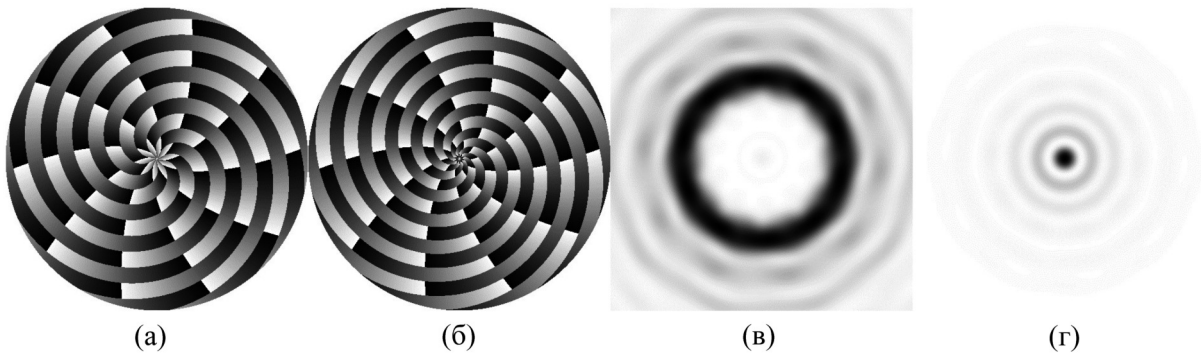


Рис. 3: Фазовые функции ГГ пучков с топологическими зарядами структуры и зон соответственно $(-5, -5)$ (а), $(5, -5)$ (б), а также распределения интенсивности, формируемые ДОЭ с представленными фазовыми функциями на расстоянии 0.8 м ((в), (г)).

На рис. 5 показана оптическая схема для формирования распределений интенсивности в ГГ пучках. Луч лазера с длиной волны 532 нм расширялся при помощи коллиматором и обрезался диафрагмой до диаметра элемента. Изображение формировалось на расстоянии 0.15 м и регистрировалось ПЗС-камерой.

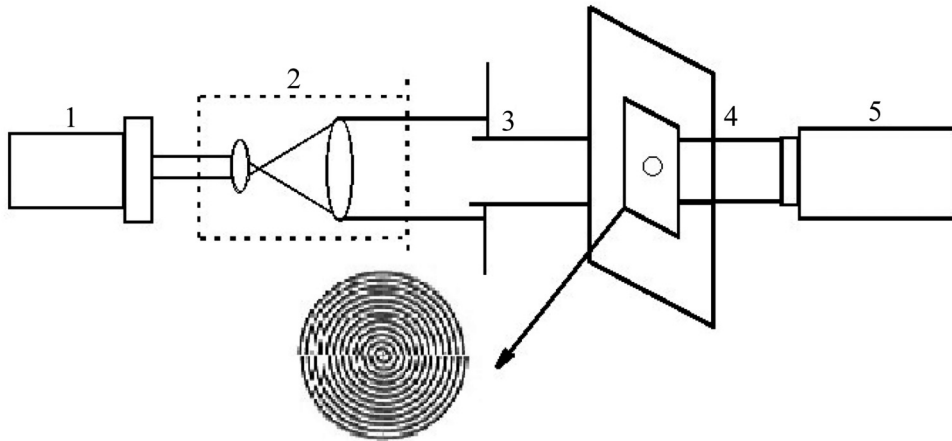


Рис. 4: Оптическая схема эксперимента по формированию ГГ пучков: 1 – твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 2 Вт, 2 – коллиматор, 3 – диафрагма, 4 – ДОЭ, 5 – ПЗС-камера.

На рис. 5 представлены распределения интенсивности в ГГ пучке 1-го порядка, сформированном вихревым аксиконом с логарифмическим расположением зон с топологическими зарядами $n = 1, m = 0$ ((а), (д)), с $n = 2, m = -1$ ((б), (е)), а также ГГ

пучка 5-го порядка, сформированного вихревым аксиконом с $n = 5$, $m = 0$ ((в), (ж)), $n = 3$, $m = 2$ ((г), (з)).

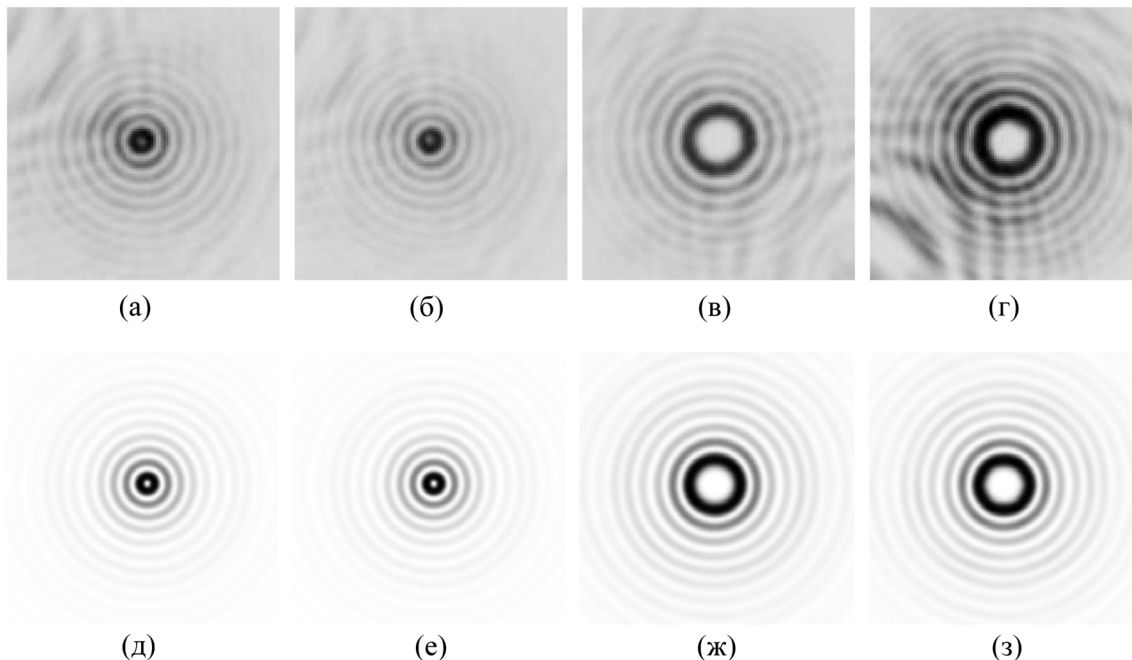


Рис. 5: Распределения интенсивности в ГГ пучке 1-го порядка ((а), (б), (д), (е)), сформированном вихревым аксиконом с топологическими зарядами $n = 1$, $m = 0$ ((а), (д)), и с $n = 2$, $m = -1$ ((б), (е)), ГГ пучок 5-го ((в), (г), (ж), (з)) порядка, сформированный вихревым аксиконом с $n = 5$, $m = 0$ ((в), (ж)), $n = 3$, $m = 2$ ((г), (з)) на расстоянии 0.15 м; (а)–(г) – эксперимент, (д)–(з) – результаты моделирования.

Как видно из рис. 5, наблюдается качественное соответствие сформированных пучков с пучками, полученными в результате моделирования. Это подтверждает возможность формирования ГГ пучков вихревыми аксиконами с логарифмическим расположением зон с разными топологическими зарядами, порядок которых определяется суммой топологических зарядов структуры вихревого аксикона и топологического заряда зон этого аксикона.

Заключение. Рассмотрен процесс распространения света при дифракции на вихревых аксиконах с логарифмическим расположением зон в ходе формирования ГГ пучков. Экспериментально показано, что различные вихревые аксиконы с логарифмическим расположением зон за счет сложения топологических зарядов структуры и зон формируют одинаковые ГГ пучки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6, а также поддержке ведущей научной школы НШ-6307.2018.8.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, R. V. Skidanov, et al., Journal of Optical Technology **74**, 10 (2007).
- [2] А. Я. Бекшаев, S. V. Sviridova, А. Ю. Попов, А. V. Tyurin, Optics Communications **285**, 20 (2012).
- [3] V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, S. S. Stafeev, A. G. Nalimov, Journal of Optics **15**, 2 (2013).
- [4] A. Calatayud, V. Ferrando, L. Remon, et al., Optics Express **21**, 8 (2013).
- [5] S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, V. A. Soifer, et al., Journal of Modern Optics **48**, 10 (2001).
- [6] V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, R. V. Skidanov, et al., Appl. Opt. **47**, 32 (2008).
- [7] V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, R. V. Skidanov, et al., J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **11**, 6 (2009).
- [8] Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, Компьютерная оптика **38**, 1 (2014).
- [9] S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, V. A. Soifer, et al., Opt. Commun. **91**, 3-4 (1992).
- [10] S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, M. V. Shinkaryev, et al., J. Mod. Opt. **39**, 5 (1992).

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

После доработки 19 марта 2019 г.

Принята к публикации 19 марта 2019 г.

Публикуется по результатам XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара).