

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ОДНОФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ НА ОСНОВЕ СПОНТАННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

А. В. Шкаликов¹, Д. А. Турайханов¹, А. А. Калачев^{1,2}, Н. Н. Лосевский³,
Е. В. Разуева³, С. А. Самагин³, С. П. Котова³

Исследованы методы формирования пучка с ненулевым орбитальным угловым моментом посредством дифракционных оптических элементов для создания источника однофотонных состояний на основе спонтанного параметрического рассеяния в кристалле $LiNbO_3$ в резонаторе. Проведено моделирование вероятности совпадения числа фотоотсчётов при детектировании сигнального и холостого полей при накачке пучком с орбитальным угловым моментом.

Ключевые слова: управляемые однофотонные источники, орбитальный угловой момент.

Введение. Квантовая оптическая связь позволяет обеспечить абсолютную секретность передаваемой информации, закодированной в квантовых состояниях [1, 2]. Однофотонные состояния, в которых кодируется информация, выбираются из числа степеней свободы электромагнитного поля, таких, как поляризация, частота и др. Одной из таких степеней свободы является орбитальный угловой момент (ОУМ) [3]. Использование фотонов с ненулевым ОУМ позволяет увеличить информационную емкость канала связи и дальность передачи информации, ограниченную потерями в оптоволокне и открытом пространстве.

¹ Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, 420029 Россия, Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7.

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 18.

³ Самарский филиал ФИАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: kotova@fian.smr.ru.

В настоящее время для организации оптических линий связи преимущественно используют ослабленные лазерные импульсы. Но так как пуассоновская статистика лазерного излучения допускает наличие нескольких фотонов в импульсе, то даже значительное ослабление лазерных импульсов не дает абсолютной секретности. Поэтому разработка источников однофотонных состояний с ненулевым ОУМ является актуальной задачей.

Для генерации однофотонных состояний на длине волны 800 нм, соответствующей одному из окон прозрачности атмосферы, удобно использовать процесс спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света. Спектральные свойства получаемых таким образом фотонов хорошо изучены [4]. В этой статье мы представляем результаты предварительных исследований по разработке установки для получения однофотонных состояний с ненулевым ОУМ в процессе СПР пучков света с ОУМ, сформированных с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ).

Методы формирования световых пучков. В настоящее время известно несколько способов генерации оптических пучков с ОУМ (см., напр., обзоры и список литературы в [5]). Экспериментальные исследования показывают [6], что наибольшей энергетической эффективностью обладают методы формирования таких пучков с радиально-симметричным распределением интенсивности (оптических вихрей) с помощью ДОЭ, содержащих фазовые распределения вихревой линзы и вихревого аксикона [7]:

$$\Phi_L(r, \varphi) = -\frac{\pi r^2}{\lambda f} + m\varphi, \quad (1)$$

$$\Phi_{ax}(r, \varphi) = -\frac{\pi r^2}{\lambda f} + \frac{\pi r_0 r}{\lambda f} + m\varphi, \quad (2)$$

где m – топологический заряд, f – фокусное расстояние, λ – длина волны лазерного излучения.

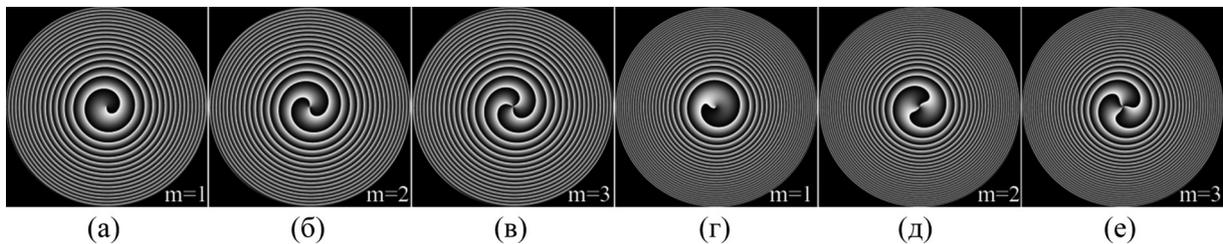


Рис. 1: Фазовые распределения вихревой линзы ((а), (б), (в)) и вихревого аксикона ((г), (д), (е)) с различными значениями топологического заряда.

ДОЭ, содержащие фазовые распределения (1), (2) (рис. 1), были изготовлены на слоях бихромированной желатины методом контактного копирования с полутонных фотошаблонов. Максимальная дифракционная эффективность полученных ДОЭ в начальный момент составляла величину порядка 50%, с течением времени она спадает до 20% за счёт процессов релаксации в слоях бихромированной желатины, обусловленных наличием влаги в окружающей атмосфере.

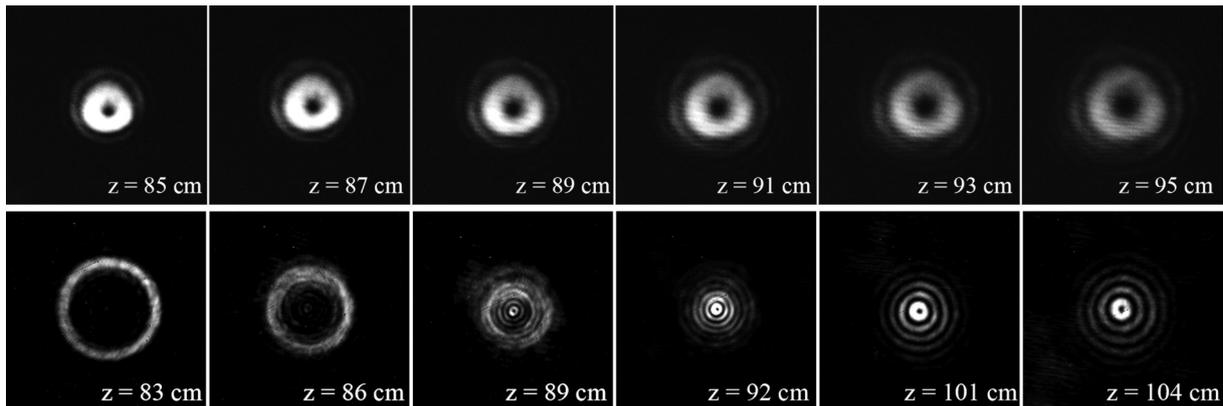


Рис. 2: Экспериментальное исследование эволюции поперечного распределения интенсивности светового пучка, сформированного с помощью вихревой линзы (верхний ряд, $f = 850$ мм) и вихревого аксикона (нижний ряд, $f = 800$ мм), z – расстояние от ДОЭ. Топологический заряд $m = 1$.

Результаты экспериментов по исследованию эволюции пучка при перемещении вдоль оси пучка вблизи фокуса, приведённые на рис. 2, показывают, что оптический вихрь на оси сформированного пучка является устойчивым (z – расстояние от ДОЭ).

Экспериментальное определение ОУМ. Изготовленные ДОЭ могут быть использованы для определения знака и величины топологического заряда вихревого светового поля, который определяет его ОУМ, компенсационным способом. Для экспериментальной проверки этого способа была собрана оптическая схема, содержащая два фазовых транспаранта. С помощью первого фазового элемента формировался оптический вихрь. В качестве второго транспаранта выбирались распределения соответствующего типа с различными знаками и величинами топологического заряда.

На рис. 3 и 4 приведены результаты экспериментов по определению топологического заряда светового поля, сформированного для вихревой линзы и вихревого аксикона на первом транспаранте. Видно, что только в том случае, когда заряды транспарантов равны по величине и противоположны по знаку, происходит компенсация “закрутки”

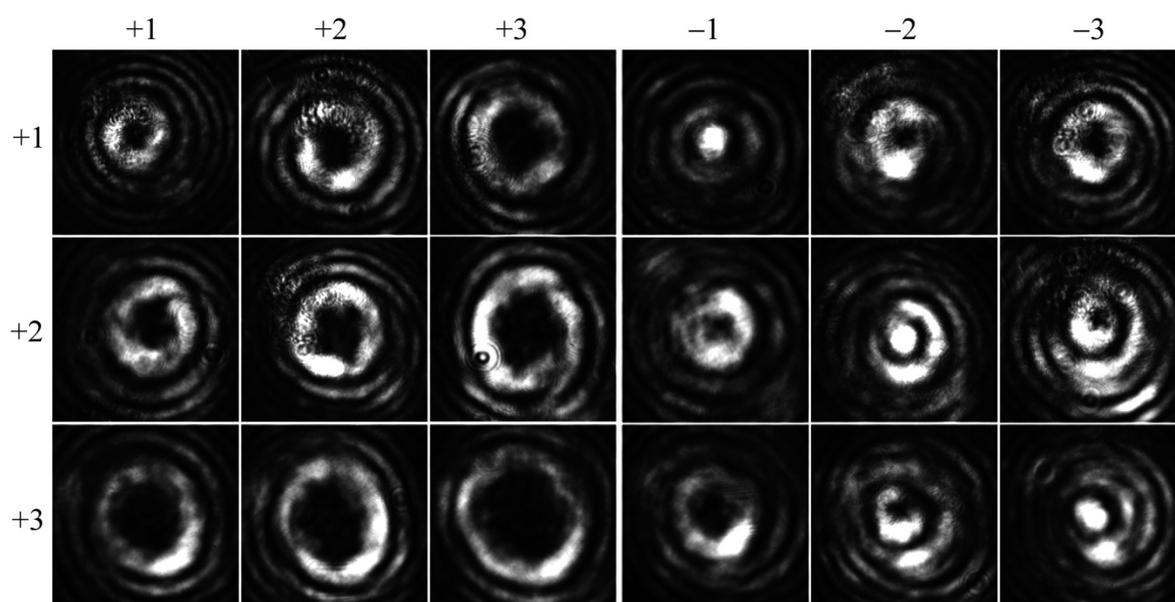


Рис. 3: Экспериментальное определение углового момента для пучка, сформированного с использованием вихревой линзы. По вертикали указан топологический заряд первого ДОЭ, по горизонтали – второго.

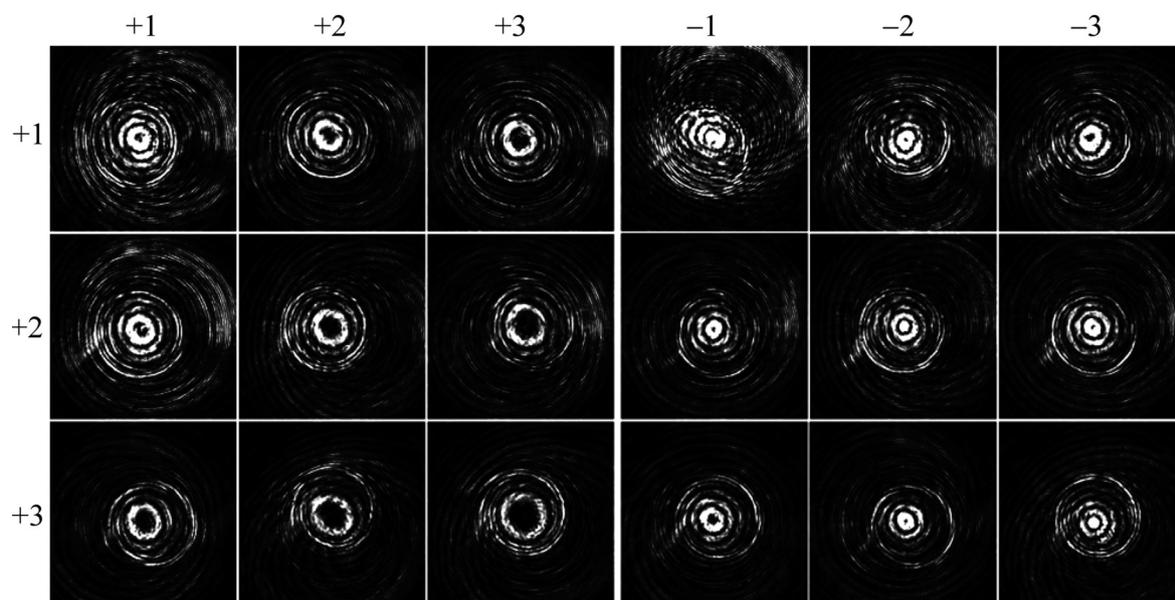


Рис. 4: Экспериментальное определение углового момента для пучка, сформированного с использованием вихревого аксикона. По вертикали указан топологический заряд первого ДОЭ, по горизонтали – второго.

светового пучка. Осевой вихрь исчезает, и интенсивность светового поля на оптической оси принимает максимальное значение.

Таким образом, изготовленные ДОЭ позволяют не только формировать оптические вихри, но и определять их ОУМ. При этом использование вихревого аксикона является более предпочтительным, так как не требует точной юстировки системы.

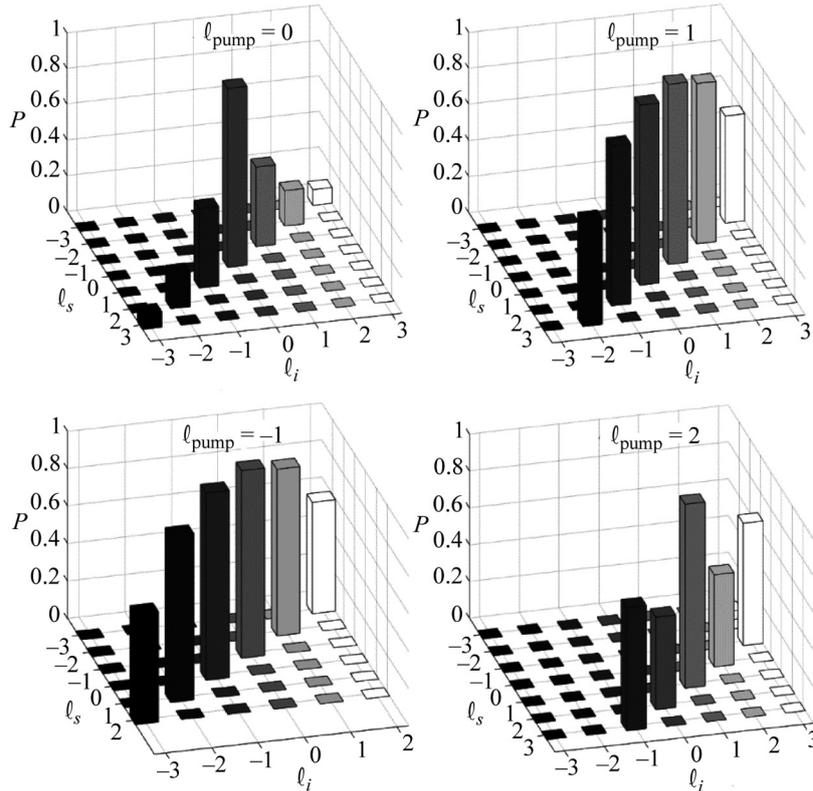


Рис. 5: Результаты моделирования вероятности P совпадения числа фотоотсчётов при детектировании сигнального и холостого полей с ОУМ пучка накачки $\ell_p = 0, 1, -1, 2$. Совпадения наблюдаются во всех случаях, когда сумма ОУМ сигнального и холостого фотонов была равна ОУМ пучка накачки.

Моделирование вероятности совпадения числа фотоотсчётов при детектировании сигнального и холостого полей в условиях накачки с ненулевым ОУМ. Рассмотрим наиболее простой способ генерации одиночных фотонов – процесс спонтанного параметрического рассеяния света, в ходе которого фотоны пучка накачки, падающего на нелинейный кристалл, уничтожаются с рождением двух фотонов, называемых холостым и сигнальным. Этот процесс удовлетворяет условиям фазового синхронизма:

$\omega_p = \omega_i + \omega_s$ и $\vec{k}_p = \vec{k}_i + \vec{k}_s$, где ω и \vec{k} – частота и волновой вектор сигнального фотона (s), холостого фотона (i) и фотона накачки (p). Кроме того, для коллинеарного режима СПР справедливо следующее условие:

$$\ell_{\text{pump}} = \ell_s + \ell_i, \quad (3)$$

где ℓ_{pump} – значение ОУМ фотона накачки, ℓ_s и ℓ_i – значения ОУМ фотона сигнального и холостого, соответственно. Сумма ОУМ рождённых фотонов равна ОУМ накачки. Это подтверждается измерениями совпадений при детектировании фотонов сигнального и холостого полей СПР, когда кристалл накачивается пучками с различными ОУМ [8]. Вероятность совпадения вычисляется по формуле $P_{p_s, p_i}^{\ell_s, \ell_i} = |C_{p_s, p_i}^{\ell_s, \ell_i}|^2$, где амплитуда вероятности $C_{p_s, p_i}^{\ell_s, \ell_i}$ задаётся интегралом:

$$C_{p_s, p_i}^{\ell_s, \ell_i} \sim \int dr_{\perp} \Phi(r_{\perp}) [LG_{p_s}^{\ell_s}(r_{\perp})]^* [LG_{p_i}^{\ell_i}(r_{\perp})]^*, \quad (4)$$

где r_{\perp} – радиальная координата в поперечной плоскости, $\Phi(r_{\perp})$ – функции Лагерра–Гаусса распределения амплитуды поля накачки, $LG_{p_s}^{\ell_s}(r_{\perp})$ и $LG_{p_i}^{\ell_i}(r_{\perp})$ – функции Лагерра–Гаусса распределения амплитуды сигнального и холостого полей. На рис. 5 представлены результаты теоретического моделирования вероятности совпадений. Моделирование проводилось для пучка накачки, имеющего орбитальный момент $-1, 0, +1$ и $+2$. Показаны режимы совпадения для сигнального и холостого фотонов в 49 возможных комбинациях ортогональных состояний. Совпадения наблюдались во всех случаях, когда сумма орбитальных угловых моментов генерированных фотонов была равна орбитальному моменту пучка накачки.

Заключение. В статье представлены результаты предварительных исследований, направленных на получение однофотонных состояний с ненулевым ОУМ с помощью оптических вихрей. Проанализирован метод формирования и определения ОУМ таких пучков с помощью нескольких вариантов ДОЭ и оценена вероятность детектирования ОУМ у однофотонных состояний, полученных в процессе спонтанного параметрического рассеяния света.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-02-01055 а).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. Gisin, Front. Phys. **10**(6), 100307 (2015).

- [2] H. Takesue et al., *Optica* **2**, 832 (2015).
- [3] M. W. Allen et al., *Phys. Rev. A* **45**, 8185 (1992).
- [4] D. Akatiev et al., *EPJ Web of Conferences* **161**, 02026 (2017).
- [5] M. Padgett et al., *Nat. Photonics* **5**(6), 343 (2011).
- [6] С. Н. Хонина, *Комп. опт.* **33**(1), 70 (2009).
- [7] E. Abramochkin et al., *Optics Comm.* **102**, 336 (1993).
- [8] A. Mair et al., *Nature* **412**, 313 (2001).

По материалам XV Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике.

Поступила в редакцию 29 января 2018 г.