

## Квантовые блуждания и генерация фотонных пар в закрученных массивах волноводов

Д. Н. Вавулин<sup>1,\*</sup> А. А. Сухоруков<sup>2†</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, факультет фотоники и оптоинформатики, кафедра фотоники и оптоинформатики Россия 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49<sup>2</sup>Австралийский национальный университет, центр нелинейной физики, научно-исследовательская школа физики и техники, Австралия, Канберра, АСТ 2601

Исследуются квантовые блуждания и генерацию фотонных пар в закрученных массивах волноводов. Показано, что корреляционные свойства фотонных пар в данном случае можно регулировать, изменяя угол закручивания волноводов и профиль амплитуды накачки на входе в массив.

PACS: 42.50.Tx, 42.50.Ex, 42.65.Lm УДК: 535

Ключевые слова: квантовая запутанность, спонтанное четырёхволновое смешение, закрученные массивы волноводов.

Квантовые блуждания, в которых участвуют несколько частиц, могут быть использованы для реализации квантовых алгоритмов, которые могут работать быстрее, чем их классические аналоги [1]. Особый интерес представляют квантовые блуждания, в которых взаимодействие нескольких частиц может быть использовано для реализации различных типов моделирования, включая поиск по базе данных [2]. Квантовые блуждания фотонов могут быть реализованы в массивах связанных волноводов. В частности, когерентные квантовые явления потенциально могут быть смоделированы в массивах волноводов с замкнутыми граничными условиями [3]. Недавно, в фотонно-кристаллическом волокне был продемонстрирован новый тип связанных волноводов с закрученной геометрией [4]. В данной работе мы исследуем влияние закручивания на квантовые блуждания фотонов.

Мы рассматриваем массив близко расположенных оптических волноводов, которые закручены вокруг центральной оси вдоль направления распространения. Подобная структура, состоящая из трех волноводов, схематически изображена на рис. 1а). Мы выводим уравнение типа уравнения Шрёдингера для двухфотонной волновой функции, учитывая волноводный изгиб через появление дополнительной фазы в коэффициентах связи [5]:

$$i \frac{d\Psi_{n_s, n_i}}{dz} = -C (\exp [i\Delta\phi] \Psi_{n_s-1, n_i} + \exp [i\Delta\phi] \Psi_{n_s, n_i-1} + \exp [-i\Delta\phi] \Psi_{n_s+1, n_i} + \exp [-i\Delta\phi] \Psi_{n_s, n_i+1}), \quad (1)$$

где  $n_s, n_i$  — номера волноводов для сигнальной и холостой волн,  $z$  — ось распространения вдоль массива волноводов,  $C$  — коэффициент связи,  $\Delta\phi = \omega d\chi/dz$  — дополнительная фаза,  $\omega$  — частота,  $d\chi/dz$  — угол наклона волновода.

Мы приводим пример эволюции квантового двухфотонного состояния на рис. 1б–1г. Мы рассматриваем условия на входе в виде перепутанного состояния Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР), в котором два фотона присутствуют вместе с равной вероятностью в любом из волноводов, но фотоны не могут находиться в различных волноводах, как показано на графике корреляции на рис. 1б. По мере того, как состояние эволюционирует, корреляционные свойства могут быть обращены, и фотоны наиболее вероятно появятся в различных волноводах после определенной дистанции распространения, что показано на рис. 1в. Интересно, что при дальнейшем распространении начальное состояние может быть почти точно восстановлено, рис. 1г. Эти особенности можно контролировать, изменяя угол закручивания волноводов.

Мы также анализируем интегрированную генерацию фотонов и квантовые блуждания [6], реализованную через спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС) в оптических волокнах. Такая система может быть дополнительно адаптирована для получения запутанных состояний с оптическим угловым моментом, которые имеют приложения для квантовых коммуникаций и визуализации.

В данном случае, эволюция амплитуды накачки описывается уравнением:

$$i \frac{dE_n}{dz} + C(\omega)(\exp [-i\Delta\phi] E_{n+1} + \exp [i\Delta\phi] E_{n-1}) = 0, \quad (2)$$

а уравнение для двухфотонной волновой функции принимает вид:

$$i \frac{d\Psi_{n_s, n_i}}{dz} = -C (\exp [i\Delta\phi] \Psi_{n_s-1, n_i} + \exp [i\Delta\phi] \Psi_{n_s, n_i-1} + \exp [-i\Delta\phi] \Psi_{n_s+1, n_i} + i\gamma E_{n_s}^{(p)}(z) E_{n_s}^{(p)}(z) \delta_{n_s, n_i} \exp [i\Delta\beta^{(0)} z]), \quad (3)$$

где  $\Delta\beta$  — фазовое рассогласование,  $\gamma$  — коэффициент нелинейности,  $\delta$  — Символ Кронекера.

На рис. 2 изображены двухфотонные корреляции ( $|\Psi_{n_s, n_i}|^2$ ) для такой же структуры, как и на рис. 1,

\*E-mail: dima-vavulin@mail.ru

†E-mail: ans124@gmail.com

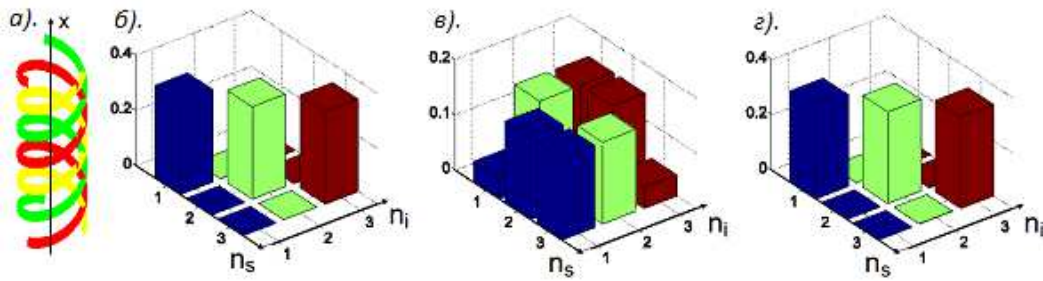


Рис. 1: а) Схема связанных закрученных волноводов. б)-г) Двухфотонные корреляции ( $|\Psi|^2$ ) между различными волноводами при б)  $z = 0$ , в)  $z = L/2$ , г)  $z = L$ .

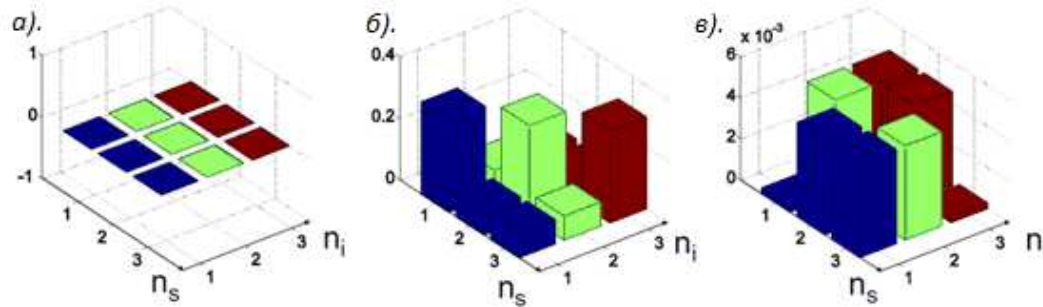


Рис. 2: (а-с) Двухфотонные корреляции ( $|\Psi|^2$ ) между различными волноводами при генерации фотонов через эффект СЧВС для а)  $z = 0$ , б)  $z = 0.375L$ , в)  $z = 0.604L$ .

но в случае генерации фотонов от СЧВС из-за накачки внутри массива: а)  $z = 0$ , б)  $z = 0.375L$ , в)  $z = 0.604L$ . При  $z = 0$  (а) в массиве нет фотонов. На некотором расстоянии (б) сгенерированные фотоны наиболее вероятно будут сгруппированы: появля-

ются в одних и тех же волноводах. На дистанции (в) фотоны анти-группированы: появляются в различных волноводах. Эти особенности можно контролировать с помощью угла закручивания волноводов и профиля амплитуды накачки на входе.

- [1] *Jonathan C. F. et al.* Nature **484**. P.47. (2012).  
 [2] *Hamilton C. S. et al.* Phys. Rev.Lett. **113**. P.83602. (2014).  
 [3] *Owens J. O. et al.* New J. Phys. **13**. P.075003. (2011).  
 [4] *Xi X. M. et al.* Optica. **1**. P.165. (2014).

- [5] *Garanovich I. L. et al.* Phys. Rep. **518**. P.1. (2012).  
 [6] *Markin D. M. et al.* Phys. Rev. A. **87**. P.063814. (2013).

## Quantum walks and generation of photon pairs in twisted waveguide arrays

D. N. Vavulin<sup>1,a</sup>, A. A. Sukhorukov<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>*Department of photonics and optical information technology, Faculty of Physics, ITMO University, 49 Kronverksky Ave., St.Petersburg, 197101, Russia*

<sup>2</sup>*Nonlinear Physics Centre, Research School of Physics and Engineering, Australian National University, Canberra, ACT 2601, Australia*

*E-mail: <sup>a</sup>dima-vavulin@mail.ru, <sup>b</sup>ans124@gmail.com*

We investigate the quantum walks and generation of photon pairs in twisted waveguide arrays. We show that the correlation properties of photon pairs in this case can be adjusted by changing the waveguide twist angle of the and the profile of the pump amplitude at the input to the array.

PACS: 42.50.Tx, 42.50.Ex, 42.65.Lm

Keywords: quantum entanglement, spontaneous four-wave mixing, twisted arrays of waveguides.

Received 27.07.2015.

**Сведения об авторах**

1. Вавулин Дмитрий Николаевич — инженер; тел.: +7 (950) 2281232, e-mail: dima-vavulin@mail.ru.
2. Сухоруков Андрей Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, профессор; e-mail: ans124@gmail.com.