

# Генерация состояний Белла с оповещением на интегрально-оптическом чипе из стекла

*Н. Н. Скрябин<sup>1</sup>, И. В. Кондратьев<sup>1</sup>, М. А. Дрязгов<sup>1</sup>, Ю. А. Бирюков<sup>1</sup>, С. А. Журавицкий<sup>1</sup>,  
С. А. Флджян<sup>1,2</sup>, И. В. Дьяконов<sup>1,2</sup>, М. Ю. Сайгин<sup>1</sup>, К. В. Тараторин<sup>1</sup>, А. А. Корнеев<sup>1</sup>,  
С. П. Кулик<sup>1</sup>, С. С. Страупе<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Центр квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский квантовый центр, Москва, Россия

В нашей работе мы экспериментально генерируем двухкубитные фотонные состояния Белла с помощью одиночных фотонов и интегрально-оптического чипа. Чип был изготовлен с использованием технологии фемтосекундной лазерной записи в образце кварцевого стекла и классически охарактеризован с использованием непрерывного диодного лазера. Четыре одиночных фотона генерировались демультимплексированием источника на базе квантовой точки и заводились в 8-модовую волноводную схему чипа. Выходные фотоны регистрировались с помощью однофотонных детекторов на сверхпроводящих нанопроволоках. Качество сгенерированного двухкубитного состояния Белла было охарактеризовано с помощью стандартной процедуры томографии квантового состояния и реконструкции матрицы плотности.

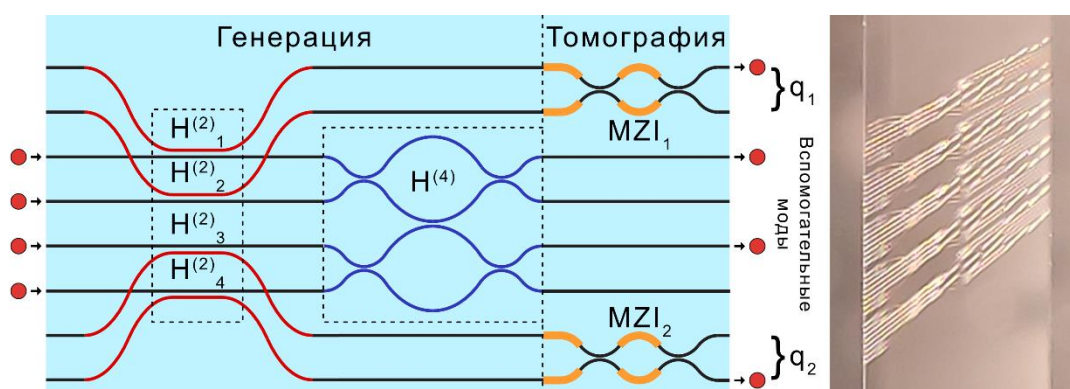
**Ключевые слова:** Одиночные фотоны, Интегрально-оптический чип, Фемтосекундная лазерная запись, Состояние Белла.

*Цитирование:* Скрябин, Н. Н. Генерация состояний Белла с оповещением на интегрально-оптическом чипе из стекла / Н. Н. Скрябин, И. В. Кондратьев, М. А. Дрязгов, Ю. А. Бирюков, С. А. Журавицкий, С. А. Флджян, И. В. Дьяконов, М. Ю. Сайгин, К. В. Тараторин, А. А. Корнеев, С. П. Кулик и С. С. Страупе // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 307–310.

Для задач квантовой обработки информации необходимо использовать запутанные состояния кубитов. Простейшим состоянием такого типа являются состояния Белла. В линейной оптике с использованием двухрельсовой кодировки невозможно детерминированное приготовление таких состояний из одиночных фотонов: возможно лишь приготовление суперпозиции состояний Белла и факторизованных состояний [1]. По этой причине необходимо использование схем с оповещением [2] или постселекцией [3]. В схемах с постселекцией часть регистрируемых событий игнорируется, однако такой подход плохо работает при усложнении схемы, когда генератор состояний находится внутри большой схемы. Схемы с оповещением используют сигнальные и вспомогательные фотоны и моды. Регистрация определённых конфигураций фотоотсчётов во вспомогательных каналах позволяет детерминировано утверждать, что оставшиеся фотоны находятся в требуемом состоянии, и использовать эти состояния в дальнейшем. Так как оповещение производится путём детектирования части фотонов, то использования двух фотонов для приготовления белловских состояний недостаточно. Было показано, что это невозможно и с использованием трёх фотонов, а наличие четырёх одиночных фотонов является оптимальным для данной

задачи [1]. В этой работе для генерации состояний Белла в двухрельсовой кодировке используется восьмиканальная схема с четырьмя одиночными фотонами на входе [4].

Интегрально-оптический чип был изготовлен с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи в образце кварцевого стекла длиной 5 см. Волноводная схема фотонного чипа показана на Рис. 1а. Четыре вспомогательных моды расположены в середине, по две сигнальные моды расположены по краям. Преобразования Адамара  $H^{(2)}$  реализованы в виде вертикальных направленных ответвителей 50:50. Преобразование Адамара  $H^{(4)}$  (показано синим цветом) реализовано с помощью четырёх направленных ответвителей 50:50 и одного 0:100. Однокубитные операции  $R_x$  выполнены в виде интерферометра Маха-Цандера, который состоит из двух сбалансированных направленных ответвителей и одного фазовращателя, а операция  $R_z$  - в виде одного фазовращателя. Фазовращатели реализованы в виде термо-оптических переключателей. Для генерации состояний Белла четыре одиночных фотона заводятся в сигнальные моды и регистрируются фотоны, выходящие из вспомогательных мод, в фоковском базисе. При регистрации состояний 0110, 1001, 1010, 0101 представленная схема обеспечивает генерацию двухкубитного состояния Белла с вероятностью успеха  $p = 1/8$ .

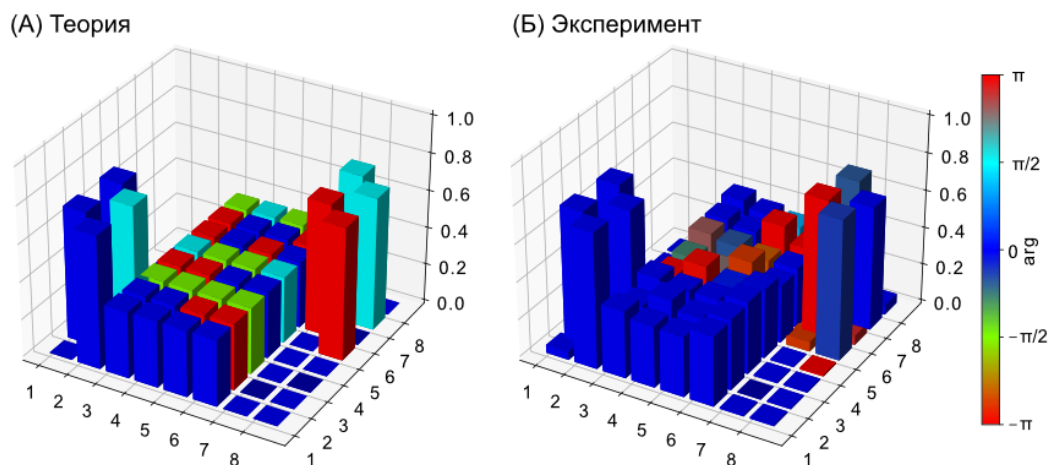


**Рис. 1.** Волноводная схема фотонного чипа для генерации запутанных состояний Белла. (б) Фотография образца с пятью записанными волноводными схемами (вид с торца под углом).

Для классической характеристики используется метод восстановления унитарной матрицы преобразования оптического чипа, предложенный в [5]. Полученная матрица преобразования вместе с теоретической приведена на рисунке 2. Фиделити между матрицами составляет  $F = 98\%$ . Полные потери во всех четырех внутренних оптических модах находятся в диапазоне  $< 6$  дБ.

Эксперимент в квантовом режиме был проведен с использованием источника фотонов демультиплексированной квантовой точки [6] и коммерчески доступными детекторами одиночных фотонов на сверхпроводящих нанопроволоках (Scotel). Измеренная яркость квантовой точки составила 6 МГц на центральной длине волны 918,9 нм с  $g^{(2)}(0) = 0,018$ . 4-фотонная яркость при этом составляла 100 Гц. Средняя попарная неразличимость фотонов, измеренная с помощью квантовой интерференции (ХОМ провал) на волоконном делителе,

составила 0,91. Качество сгенерированного двухкубитного состояния Белла было охарактеризовано с помощью стандартной процедуры томографии квантового состояния и реконструкции матрицы плотности.



**Рис. 2.** (А) Теоретическая матрица преобразования  $U$  оптического чипа с действительными первой строкой и первым столбцом. (Б) Экспериментально полученная матрица  $U$  преобразования оптического чипа. Значения фаз в матрице изображены цветом.

### Благодарность

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор No. 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и No. P2154 от 24.11.2021). Работа также выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (РНФ) грант No. 22-12-00353.

### Список источников

- [1] **Stanisic, S.** Generating entanglement with linear optics / N. Linden, A. Montanaro, P. S. Turner // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 96. – №. 4. – P. 043861.
- [2] **Fldzhyan, S. A.** Compact linear optical scheme for Bell state generation / S. A. Fldzhyan, M. Y. Saygin, S. P. Kulik // *Physical Review Research*. – 2021. – Vol. 3. – №. 4. – P. 043031.
- [3] **Ralph, T. C.** Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis / T. C. Ralph, N. K. Langford, T. B. Bell, A. G. White // *Physical Review A*. – 2002. – Vol. 65. – №. 6. – P. 062324.
- [4] **Zhang, Q.** Demonstration of a scheme for the generation of “event-ready” entangled photon pairs from a single-photon source / Q. Zhang, X.H. Bao, C.Y. Lu, X-Q Zhou, T. Yang, T. Rudolph, and J.-W. Pan // *Physical Review A*. – 2008. – Vol. 77. – №. 6. – P. 043861.
- [5] **Heilmann, R.** A novel integrated quantum circuit for high-order W-state generation and its highly precise characterization / R. Heilmann, M. Gräfe, S. Nolte, A. Szameit // *Science bulletin*. – 2015. – Vol. 60. – №. 1. – P. 96-100.
- [6] **Rakhlin, M. V.** Demultiplexed single-photon source with a quantum dot coupled to microresonator / M. V. Rakhlin, A. I. Galimov, I. V. Dyakonov, N. N. Skryabin, G. V. Klimko, M. M. Kulagina, Yu. M. Zadiranov, S. V. Sorokin, I. V. Sedova, Yu. A. Guseva, D. S. Berezina, Yu. M. Serov, N. A. Maleev, A. G. Kuzmenkov, S. I. Troshkov, K. V. Taratorin, A. K. Skalkin, S. S. Straupe, S. P. Kulik, T. V. Shubina, A. A. Toropov // *Journal of Luminescence*. – 2023. – Vol. 253. – P. 119496.

# Heralded Bell-state generation in a photonic integrated glass chip

*N. N. Skryabin<sup>1</sup>, I. V. Kondratyev<sup>1</sup>, M. A. Dryazgov<sup>1</sup>, Yu. A. Biriukov<sup>1</sup>, S. A. Zhuravitskiy<sup>1</sup>,  
S. A. Fldzhyan<sup>1</sup>, I. V. Dyakonov<sup>1</sup>, M. Yu. Saygin<sup>1</sup>, K. V. Taratorin<sup>1</sup>, A. A. Korneev<sup>1</sup>, S. P. Kulik<sup>1</sup>,  
S. S. Straupe<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Technology Centre, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian Quantum Center, Moscow, Russia

In our work we experimentally generate photonic two-qubit Bell-states by means of single photons and an integrated glass chip. The photonic chip was fabricated via the femtosecond laser writing technology in fused silica glass sample and characterized classically using a CW diode laser. Four single photons were generated by the demultiplexed quantum dot source and injected into the 8-mode waveguide scheme of the chip. Output photons from the chip were registered using superconducting nanowire single-photon detectors. The quality of the generated two-qubit Bell-state was and characterized via a standard quantum state tomography routine and reconstructing the density matrix.

*Keywords:* Single photons, Photonic integrated chip, Femtosecond laser writing, Bell-state.