

Узкополосный источник запутанных фотонных пар телекоммуникационного диапазона длин волн для оптической квантовой памяти и квантового повторителя

К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, А. Ф. Хайруллин, С. А. Моисеев

Казанский квантовый центр Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

Разработан яркий источник поляризационно-запутанных фотонных пар с длиной волны $\sim 1,5$ мкм и спектральной шириной ~ 5 МГц. Источник работает на основе спонтанного параметрического рассеяния в периодически поляризованном кристалле КТР, помещенного в высокодобротный кольцевой оптический резонатор. Длина волны и ширина спектра запутанных фотонов адаптированы для сохранения в оптической квантовой памяти на основе кристалла $Y_2SiO_5:^{167}Er^{3+}$.

Ключевые слова: Поляризационно-запутанные фотонные пары, Квантовая память, Квантовый репитер, Преобразование света, Оптические резонаторы, Узкополосные одночастотные лазеры.

Цитирование: Герасимов, К. И. Узкополосный источник запутанных фотонных пар телекоммуникационного диапазона длин волн для оптической квантовой памяти и квантового повторителя / К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, А. Ф. Хайруллин, С. А. Моисеев // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 293–298.

Введение

Источники фотонных пар являются фундаментальным компонентом различных приложений квантовой информатики, включая оптические квантовые вычисления, квантовые повторители, квантовую телепортацию и квантовую связь [1]. На сегодняшний день основными методами генерации фотонных пар являются спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) в нелинейных кристаллах [2,3] и четырехволновое смешение (ЧВС) [4] в фотонно-кристаллических волокнах. Оба метода демонстрируют высокую яркость источника двухфотонного излучения с высокой степенью запутанности и неразличимости. Двухфотонные состояния, генерируемые на основе СПР, имеют, как правило, ширину линии от сотен гигагерц до терагерц [5], что на несколько порядков больше, чем ширина линии типичных атомных переходов, используемых в квантовой памяти и составляющих несколько единиц или десятков мегагерц [6]. Однако, было продемонстрировано, что источники СПР в резонаторе могут генерировать яркое узкополосное бифотонное излучение, что позволяет использовать их для сохранения фотонных кубитов в квантовой памяти и квантовых повторителях [7]. В данной работе представлена реализация источника поляризационно-запутанных фотонных пар, используя СПР II типа в узкополосном резонаторе. Генерируемые состояния адаптированы для сохранения в оптической квантовой памяти на основе кристалла $Y_2SiO_5:^{167}Er^{3+}$ с использованием протокола на атомной частотной гребенке.

Экспериментальная реализация

Упрощенная схема источника коррелированных фотонных пар представлена на рис. 1. Лазерное излучение (Л TiS 769,15 нм) с длиной волны 769,15 нм и максимальной мощностью 400 мВт, стабилизируется по частоте при помощи второй гармоники на кристалле ррLN (не отображен на рис. 1.) сечением 1x2 мм и длиной 40 мм, возбуждаемой лазерным излучением на 1538,3 нм (Tortica, не отображен на рис. 1.), которое в свою очередь стабилизируется по частоте при помощи резонатора с высокой резкостью по методу Паунда-Древера-Холла [8, 9]. Далее излучение на 769,15 нм модулируется по амплитуде при помощи акустооптического модулятора (АОМ) и по частоте при помощи электрооптического модулятора (ЭОМ). Последняя модуляция необходима для стабилизации резонатора, в котором осуществляется генерация фотонных пар за счет эффекта СПР II типа. Генерация осуществляется в кристалле ррКТР, второй кристалл КТР используется для усиления кластерного эффекта [10, 11, 12, 13], использование которого позволяет снизить число продольных мод резонатора на которых осуществляется генерация фотонных пар в условиях тройного резонанса. Резонатор автоматически настроен на частоту TiS за счет стабилизации резонатора по излучению TiS. Настройка резонанса для сигнального и холостого фотонов СПР осуществляется выбором температуры кристаллов ррКТР и КТР. Дальнейшая спектральная фильтрация продольных мод осуществлялась внешним эталоном с большим свободным спектральным диапазоном (48,5 ГГц) и спектральной шириной моды эталона ~1 ГГц.

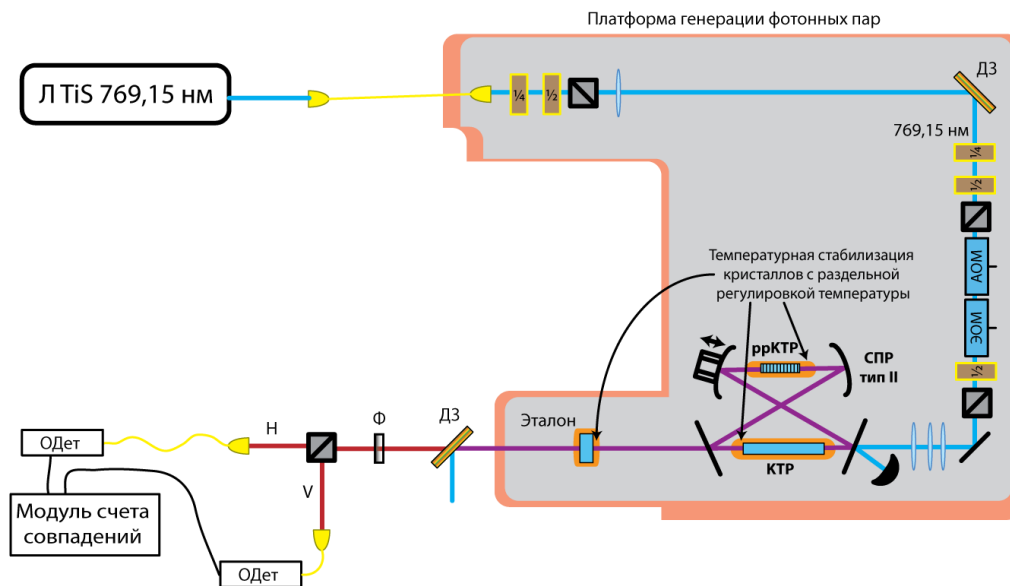


Рис. 1. Схема источника коррелированных фотонных пар

Параметры резонатора представлены на рис. 2.

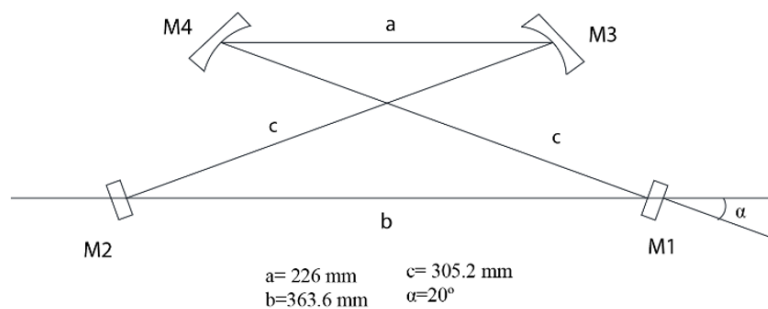


Рис. 2. Схема и параметры кольцевого резонатора для генерации фотонных пар

Далее были проведены эксперименты по измерению кросскорреляционной, автокорреляционной функций и параметра кросскорреляционной функции с оповещением $g^{(2)}(t)$ при $t=0$. Кросскорреляционная функция фотонов в случае использования эталона представлена на рис. 3.

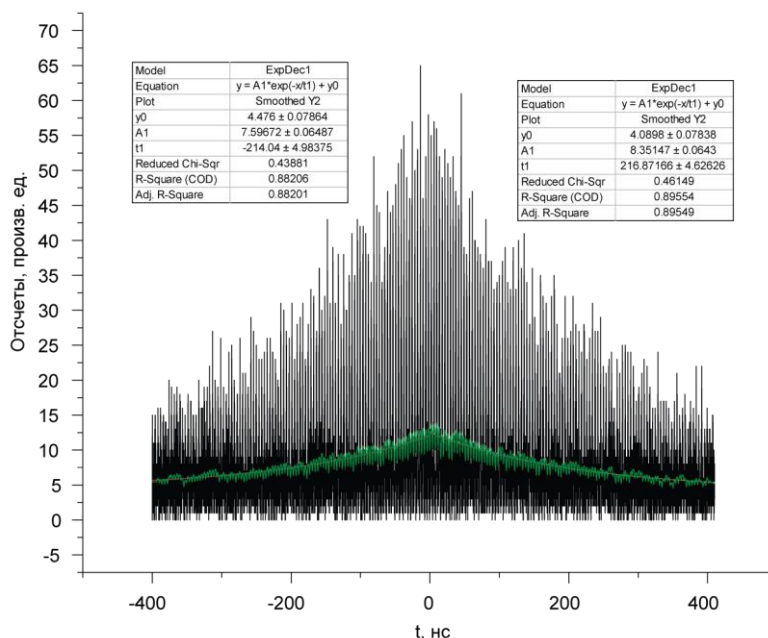


Рис. 3. Кросскорреляционная функция фотонов в случае использования эталона для дополнительной спектральной фильтрации

На рис. 3 кривой зеленого цвета представлена сглаженная кросскорреляционная функция, которая хорошо описывается экспоненциальным нарастанием/спадом с характерным временем ~ 215 нс. Это дает спектральную ширину одной моды излучения $\sim 1/2 \cdot \pi \cdot 215$ нс ≈ 740 кГц. Измеренная автокорреляционная функция дает значений числа продольных мод источника ~ 4 , что находится в хорошем согласии со спектром пар, полученным путем Фурье преобразования кросскорреляционной функции. Следующим важным параметром, характеризующим неклассичность света, является значение кросскорреляционной функции с оповещением $g^{(2)}(0)$. Измеряются скорости единичных отсчетов оповещения (heralding photons) S_H , скорости двойных совпадений SS_{HA} , SS_{HB} и

тройных совпадений $CCC_{\text{НАВ}}$ для разных мощностей накачки. Далее вычисляется $g^{(2)}(0)$ следующим образом [14]:

$$g^{(2)}(0) = \frac{2C_{\text{H}} CCC_{\text{НАВ}}}{(CC_{\text{НА}} + CC_{\text{НВ}})^2}. \quad (1)$$

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значение $g^{(2)}(0)$ для различных мощностей накачки

Мощность накачки, мВт	$CC_{\text{НА}}$, Гц	$CC_{\text{НВ}}$, Гц	$CCC_{\text{НАВ}}$, Гц	$g^{(2)}(0)$
30	147	180	1,5	0,44
20	59	72	0,4	0,41
10	14	17	0,032	0,25
5	5,6	7,2	0,0083	0,19

Видно, что для мощностей накачки 5 и 10 мВт $g^{(2)}(0) \ll 0.5$, что характеризует неклассический характер излучения с небольшим вкладом состояний с порядком выше чем 2 [15]. $CC_{\text{НА}} + CC_{\text{НВ}}$ представляет из себя величину равную средней частоте следования коррелированных фотонных пар. С учетом потерь на ввод излучения в оптоволокно (50%) и эффективность однофотонных детекторов (70%), для накачки в 5 мВт средняя частота следования коррелированных фотонных пар составляет 105 Гц. Это в свою очередь дает спектральную яркость источника коррелированных фотонных пар $\approx 13 \text{ Гц} \cdot \text{мВт}^{-1} \cdot \text{МГц}^{-1}$.

Заключение

Разработанный источник обеспечивает эффективную генерацию ярких поляризационно-запутанных фотонных пар в спектральном диапазоне переходов ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле Y_2SiO_5 на телекоммуникационной длине волны, что является важным шагом к созданию квантового репитера с памятью для дальнодействующих оптоволоконных квантовых коммуникаций.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

Список источников

- [1] **Bouwmeester, D.** The Physics of Quantum Information / D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger. — Heidelberg: Springer Berlin, 2000. — 315 p.
- [2] **Hong, C.** Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference / C. Hong, Z. Ou, L. Mandel // Physical Review Letters. — 1987. — Vol. 59. — №18. — P. 2044–2046. — DOI:10.1103/PhysRevLett.59.2044.
- [3] **Kwiat, P.** New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs / P. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. Sergienko, Y. Shin // Physical Review Letters. — 1995. — Vol. 75. — №24. — P. 4337–4341. — DOI:10.1103/PhysRevLett.75.4337.

- [4] **Fulconis, J.** Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source / J. Fulconis, O. Alibart, J. O'Brien, W. Wadsworth, J. Rarity // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 99. — P. 120501. — DOI:10.1103/PhysRevLett.99.120501.
- [5] **Migdall, A.** *Single-Photon Generation and Detection: Physics and Applications. Experimental Methods in the Physical Sciences* / A. Migdall, S. V. Polyakov, J. Fan, J. C. Bienfang. — Academic Press, 2013. — 616 p.
- [6] **Simon, C.** Quantum memories :A review based on the European integrated project"Qubit Applications (QAP)" / C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, A. Boyer De La Giroday, S. Dewhurst, N. Gisin, C. Hu, F. Jelezko, S. Kroll, J. Muller, J. Nunn, E. Polzik, J. Rarity, H. De Riedmatten, W. Rossenfeld, A. Shields, N. Skold, R. Stevenson, R. Thew, I. Walmsley, M. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, R. Young // *European Physical Journal D*. — 2010. — Vol. 58. — P. 1-22. — DOI:10.1140/epjd/e2010-00103-y.
- [7] **Slattery, O.** Background and review of cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion / O. Slattery, L. Ma, K. Zong, X. Tang // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. — 2019. — Vol. 124. — P. 124019. — DOI:10.6028/jres.124.019.
- [8] **Drever, R.** Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R. Drever, J. Hall, F. Kowalski, J. Hough, G. Ford, A. Munley, H. Ward // *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*. — 1983. — Vol. 31. — №2. — P. 97-105. — DOI:10.1007/BF00702605.
- [9] **Black, E.** An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization / E. Black // *American Journal of Physics*. — 2001. — Vol. 69. — №1. — P. 79-87. — DOI:10.1119/1.1286663.
- [10] **Monteiro, F.** Narrowband photon pair source for quantum networks / F. Monteiro, A. Martin, B. Sanguinetti, H. Zbinden, R. Thew // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22. — №4. — P. 4371-4378. — DOI:10.1364/oe.22.004371.
- [11] **Pomarico, E.** Waveguide-based OPO source of entangled photon pairs / E. Pomarico, B. Sanguinetti, N. Gisin, R. Thew, H. Zbinden, G. Schreiber, A. Thomas, W. Sohler // *New Journal of Physics*. — 2009. — Vol. 11. — P. 113042. — DOI:10.1088/1367-2630/11/11/113042.
- [12] **Ahlich, A.** Bright source of indistinguishable photons based on cavity-enhanced parametric down-conversion utilizing the cluster effect / A. Ahlich, O. Benson // *Applied Physics Letters*. — 2016. — Vol. 108. — P. 021111. — DOI:10.1063/1.4939925.
- [13] **Moqanaki, A.** Novel single-mode narrow-band photon source of high brightness tuned to cesium D2 line / A. Moqanaki, F. Massa, P. Walther // *APL Photonics*. — 2019. — Vol. 4. — P. 090804. — DOI:10.1063/1.5095616.
- [14] **Wolfgramm, F.** Atomic quantum metrology with narrowband entangled and squeezed states of light / F. Wolfgramm. — Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. — 2012. — 156 p.
- [15] **Rambach, M.** Sub-megahertz linewidth single photon source / M. Rambach, A. Nikolova, T. Weinhold, A. White // *APL Photonics*. — 2017. — Vol. 2. — P. 119901. — DOI:10.1063/1.4966915.

Narrowband source of entangled photon pairs in the telecommunications wavelength range for optical quantum memory and quantum repeater

K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, A. F. Khayrullin, S. A. Moiseev

Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

A bright source of polarization-entangled photon pairs with a wavelength of $\sim 1.5 \mu\text{m}$ and a spectral width of $\sim 5 \text{ MHz}$ has been developed. The source operates on the basis of spontaneous parametric conversion in a periodically polarized KTP crystal placed in a high-Q optical ring cavity. The wavelength and spectral width of entangled photons are adapted to be stored in an optical quantum memory based on a $\text{Y}_2\text{SiO}_5:^{167}\text{Er}^{3+}$ crystal and an atomic frequency comb protocol.

Keywords: Polarization-entangled photon pairs, Quantum memory, Quantum repeater, Light conversion, Optical cavities, Narrow-band single-frequency lasers.