Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 10, с. 640 – 643 © 2025 г. 25 ноября

# Запись и воспроизведение однофотонных состояний, генерируемых в режиме спонтанного параметрического рассеяния, в квантовой памяти на основе кристалла Eu:YSO

*Р. А. Ахмеджанов*[+1)], *Л. А. Гущин*[+], *И. В. Зеленский*[+], *А. А. Калачев*[*], *И. З. Латыпов*[*], *В. А. Низов*[+], *Н. А. Низов*[+], *Д. А. Собгайда*[+], *Д. А. Турайханов*[*], *Н. М. Шафеев*[*], *А. В. Шкаликов*[*]

[+]*Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, 603950 Н. Новгород, Россия*

[*]*Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, 420029 Казань, Россия*

Поступила в редакцию 10 октября 2025 г.
После переработки 10 октября 2025 г.
Принята к публикации 23 октября 2025 г.

В данной работе продемонстрировано хранение одиночных фотонов, генерируемых в режиме невырожденного спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе с кристаллом PPKTP, в квантовой памяти на основе атомной частотной гребенки в кристалле Eu:YSO. Отработана методика приготовления спектральных профилей в линии поглощения примесного кристалла, согласованных со спектром однофотонного излучения. Для времен хранения 250 и 166 нс были получены эффективности квантовой памяти 3 и 7 % при соотношениях сигнал/шум 1/4 и 1/2 соответственно.

DOI: 10.31857/S0370274X25110163

**Введение.** Разработка систем дальнодействующих квантовых коммуникаций, позволяющих не только распределять ключи на большие расстояния, но и связывать в единую сеть удаленные квантовые компьютеры и сенсоры, является одной из актуальных задач квантовых оптических технологий [1–4]. В наиболее общем виде решение этой задачи предполагает создание запутанного состояния между двумя удаленными системами, а затем использование распределенной запутанности как ресурса для реализации различных протоколов квантовой связи. Перспективным подходом к реализации первого этапа (распределение запутанности) считается использование квантовых повторителей [4–9]. В этом случае протяженная линия связи делится на короткие сегменты и содержит промежуточные узлы, содержащие устройства квантовой памяти, которые позволяют записывать и воспроизводить однофотонные состояния света, являющиеся компонентами запутанных двухфотонных состояний, распределяемых только между соседними узлами. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка и реализация методов записи и воспроизведения однофотонных состояний света в устройствах квантовой памяти.

В работе мы рассматриваем протокол квантовой памяти на основе атомной частотной гребенки [10] в кристалле $^{153}$Eu:$Y_2SiO_5$ (Eu:YSO). Этот кристалл примечателен прежде всего своими большими временами когерентности на спиновых переходах [11, 12], что делает его перспективным кандидатом для реализации долговременной памяти. Данная среда уже использовалась нами для записи как ярких, так и ослабленных до однофотонного уровня лазерных импульсов, в том числе произвольной поляризации [13, 14]. Тем не менее, сохранение одиночного фотона из перепутанной пары, что потребуется для создания квантового повторителя, является нетривиальной задачей. Параметры памяти должны быть согласованы со спектральными характеристиками источника, а вероятностный характер излучения фотонных пар ухудшает соотношение сигнал/шум и затрудняет наблюдение эха. К настоящему моменту поставлен целый ряд экспериментов по записи однофотонных состояний, генерируемых в режиме спонтанного параметрического рассеяния, в кристаллах, активированных редкоземельными ионами [15], в частности, в кристалле Eu:YSO [16]. В настоящей работе поставлен подобный эксперимент с использованием источника коррелированных пар фотонов на основе сильно невырожденного спонтанного параметрического рассеяния (СПР) в резонаторе.

**Эксперимент.** Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Нижняя часть схемы отвечает источнику перепутанных пар фотонов. Для

1)e-mail: rinat@ipfran.ru

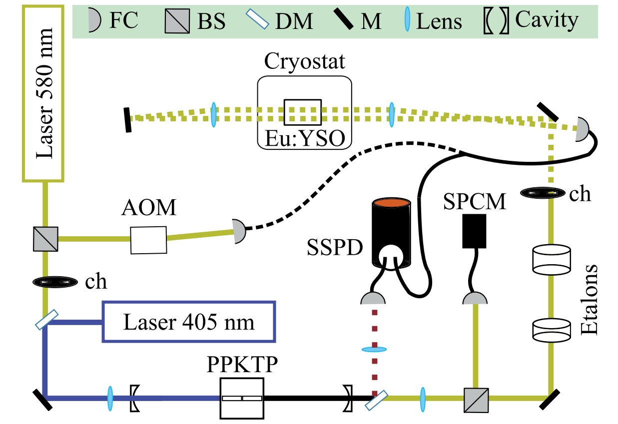


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки. AOM – акустооптический модулятор; PPKTP – периодически поляризованный кристалл титанил-фосфата калия; SSPD – сверхпроводящий детектор одиночных фотонов; SPCM – модуль счета одиночных фотонов (PerkinElmer); ch – оптический механический модулятор; FC – система заведения в волокно (волоконный каплер); BS – делитель пучка, DM – дихроическое зеркало

генерации однофотонных состояний для записи в память использовался источник на основе спонтанного параметрического рассеяния [17, 18]. Фотон непрерывного волоконного лазера накачки с длиной волны 405 нм распадался в периодически поляризованном кристалле титанил-фосфата калия на фотон с длиной волны 580 нм (отвечает переходу между энергетическими уровнями $^7F_0$ и $^5D_0$ для ионов Eu в кристалле YSO) и инфракрасный фотон с длиной волны около 1342 нм, использовавшийся как оповещающий. Для реализации внутрирезонаторного режима спонтанного параметрического рассеяния [19] нелинейный кристалл был помещен в оптический резонатор из двух зеркал, имеющих высокий коэффициент отражения на длине волны 580 и 1342 нм, что позволило сузить спектр генерируемых фотонов, увеличить яркость и сконцентрировать их в нужном месте спектра за счет эффекта кластеризации мод [20]. Также для фильтрации спектра видимых фотонов использовались два оптических эталона, выполнявших функцию узкополосного полосового фильтра. Более детально характеристики источника и системы фильтрации описаны в отдельной статье.

Используемый в работе кристалл Eu:YSO обладал концентрацией допанта 0.1 ат. %. Размеры кристалла составляли $5 \times 5 \times 10$ мм, причем кристаллографическая ось b кристалла была направлена вдоль более длинных граней. Кристалл был помещен в криостат замкнутого цикла и охлаждался до температуры около 4 K. Излучение видимого канала источника дважды пропускалось через кристалл и при помощи системы заведения (волоконного каплера) заводилось в волокно, которое шло на сверхпроводящий детектор одиночных фотонов. При настройке заведения в каплер оптимизировался как наблюдаемый счет фотонов, так и вид корреляционной функции. Поляризация этих фотонов отвечала кристаллографической оси $D_1$, вдоль которой наблюдается наибольшее поглощение.

Для стабилизации частоты видимых фотонов источника малая часть излучения непрерывного волоконного лазера на длине волны 580 нм отводилась и совмещалась с синим лазером накачки источника. Часть прошедшего лазерного излучения попадала на фотодетектор, по сигналу с которого, с помощью пьезомеханического транслятора на оптическом резонаторе, пропускание резонатора для лазера для длины волны 580 нм поддерживалось на максимальном уровне. При помощи пары синхронизованных механических модуляторов (чопперов) был реализован режим, когда 10 % времени сквозь источник шел яркий лазер стабилизации при перекрытом видимом канале, в оставшееся же время лазер был перекрыт, а одиночные фотоны видимого канала проходили через кристалл Eu:YSO. Для нахождения длины волны накачки, при которой пропускание резонатора одновременно максимально для видимого и инфракрасного фотонов, проводился предварительный эксперимент с генерацией вынужденных фотонов.

Далее проводились эксперименты со специально подготовленными профилями поглощения в части неоднородно уширенной линии поглощения кристалла, отвечающей частоте генерируемых фотонов. Первым шагом был эксперимент, в котором в профиле поглощения выжигался долгоживущий спектральный провал шириной около 15 МГц. Для этого использовался тот же лазер на длине волны 580 нм, пропущенный через акусто-оптический модулятор (AOM) в двухпроходовой схеме для создания необходимых частотных профилей. Частота лазера после AOMа была равна частоте, использовавшейся для стабилизации источника. Для пространственного совмещения области с провалом в кристалле с видимым каналом источника выжигающий импульс направлялся в обратную сторону через каплер, использовавшийся для регистрации сигнала с источника после кристалла. На рисунке 2 приведены корреляционные функции при наличии провала и без него, нормированные на время измерений. Видно, что при наличии провала количество совпадений заметно выше (скорость совпадений возрастает примерно в 2 раза).

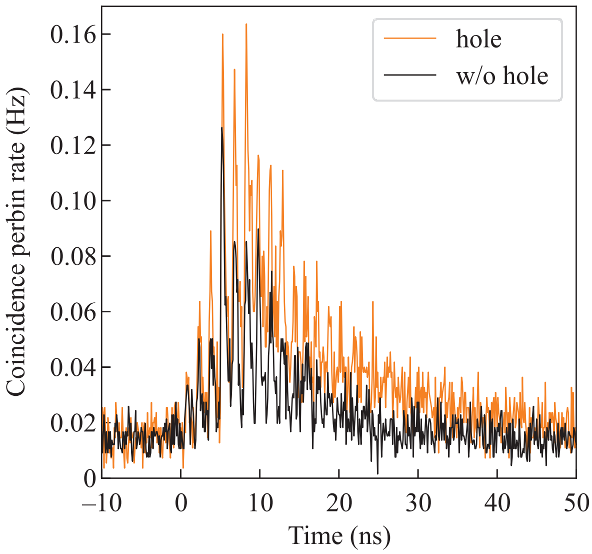


Рис. 2. (Цветной онлайн) Корреляционная функция при наличии в кристалле спектрального провала (оранжевый) и без него (черный)

Также стоит отметить, что наличие провала меняло форму функции, растягивая ее, что может говорить о том, что ширина одиночных фотонов больше ширины спектрального провала. Основным же результатом является то, что разработанная методика настройки действительно позволяла выжечь провал в нужном месте линии.

Для реализации квантовой памяти использовался протокол, основанный на использовании так называемой атомной частотной гребенки. При использовании данного протокола в неоднородно уширенной линии поглощения подготавливается спектральный профиль, представляющий собой набор эквидистантных пиков, отстоящих друг от друга на период гребенки. При направлении на такой профиль импульса со спектром, покрывающим несколько пиков гребенки, но меньше полной ширины гребенки, он будет сохранен и затем переизлучен через время, обратно пропорциональное периоду гребенки. Для создания гребенки снова использовался лазер на 580 нм, проведенный через АОМ. Подготавливалась последовательность импульсов, частоты и длительности которых подобраны так, что они откачивали часть населенности на другие подуровни, а оставшиеся ионы образовывали гребенку. Эксперименты с записью ярких импульсов для конфигурации, используемой в эксперименте (2 прохода через кристалл), показали эффективность памяти порядка 15 %.

Далее по методике, описанной выше, гребенка подготавливалась в месте спектра, отвечавшем сигналу видимого канала источника. Аналогично эксперименту с долгоживущим спектральным провалом, выжигающая гребенку последовательность направлялась в обратную сторону из каплера, в который заводится излучение источника. После подготовки гребенки благодаря хорошим когерентным свойствам кристалла Eu:YSO эффективность памяти сохраняется на хорошем уровне в течение часа после выжигания. Далее после приготовления решетки к выходному каплеру снова прикручивалось волокно, идущее на детектор одиночных фотонов, и производились измерения корреляционной функции. В первом эксперименте использовалась гребенка с периодом 4 МГц и, соответственно, временем хранения 250 нс. Результаты измерения приведены на рис. 3. Видно,

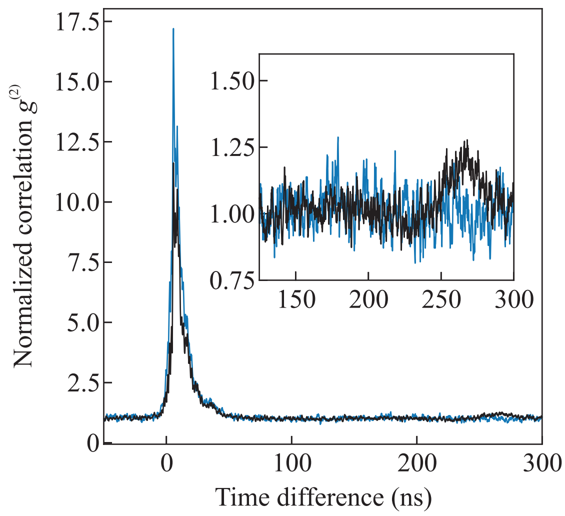


Рис. 3. (Цветной онлайн) Корреляционная функция при наблюдении эха (черный) для гребенки с периодом 4 МГц (время хранения 250 нс) и в отсутствие поглощения (синий). На вставке более детально показана область эха

что в районе 250 нс после записываемого импульса наблюдается импульс эха, более детально изображенный на вставке на рис. 3. Соотношение сигнал/шум для импульса эха составило порядка 1/4. Затем аналогичный эксперимент был проведен для гребенки с периодом 6 МГц (время хранения 166 нс) – результаты приведены на рис. 4. Здесь соотношение сигнал/шум составило уже 1/2. Важно также оценить эффективность памяти. Для этого мы согласованно перестроили источник и систему фильтрации примерно на 7 ГГц от центра линии поглощения ионов Eu в кристалле YSO (ширина линии примерно 2 ГГц). Измерение корреляционной функции в таком режиме позволило оценить, какой сигнал наблюдался бы в отсутствие линии поглощения. Поделив суммарное число отсчетов в эхо-импульсе на суммарное число отсчетов в импульсе вне линии поглощения,

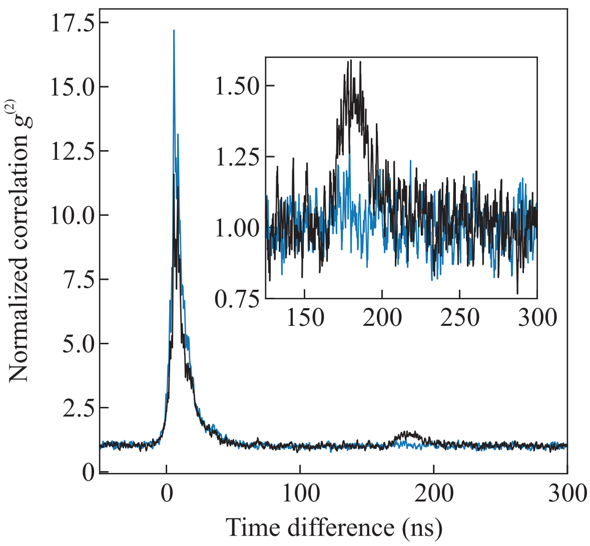


Рис. 4. (Цветной онлайн) Корреляционная функция при наблюдении эха (черный) для гребенки с периодом 6 МГц (время хранения 166 нс) и в отсутствие поглощения (синий). На вставке более детально показана область эха

мы получили оценку для эффективности памяти на уровне примерно 3 % для гребенки с периодом 4 МГц и около 7 % для гребенки с периодом 6 МГц.

**Заключение.** В данной работе продемонстрировано хранение сигнала источника одиночных фотонов в памяти на основе атомной частотной гребенки в кристалле Eu:YSO. Для времен хранения 250 и 166 нс были получены эффективности 3 и 7 % и соотношения сигнал/шум 1/4 и 1/2 соответственно. В дальнейшем планируется установка дополнительной фильтрации в подтверждающий инфракрасный канал, что позволит увеличить соотношение сигнал/шум, а также обобщение квантовой памяти на случай хранения фотонов произвольной поляризации.

**Финансирование работы.** Данная работа была выполнена при поддержке открытого акционерного общества “Российские Железные Дороги”.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.


1. H. J. Kimble, Nature **453**, 1023 (2008).
2. S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson, Science **362**, 6412(2018).
3. K. Fang, J. Zhao, X. Li, Y. Li, and R. Duan, Sci. China Inf. Sci. **66**, 180509 (2023).
4. N. Sangouard, C. Simon, H. de Riedmatten, and N. Gisin, Rev. Mod. Phys. **83**, 33 (2011).
5. W. J. Munro, K. Azuma, K. Tamaki, and K. Nemoto, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **21**, 78 (2015).
6. S.-H. Wei, B. Jing, X.-Y. Zhang, J.-Y. Liao, C.-Z. Yuan, B.-Y. Fan, C. Lyu, D.-L. Zhou, Y. Wang, G.-W. Deng, H.-Z. Song, D. Oblak, G.-C. Guo, and Q. Zhou, Laser Photonics Rev. **16**, 2100219 (2022).
7. А. А. Калачев, Квантовая электроника **53**, 609 (2023).
8. W. Tittel, N. Afzelius, A. Kinos, L. Rippe, and A. Walther, Quantum Sci. Technol. **10**, 033002 (2025).
9. Р. А. Ахмеджанов, Ю. Ю. Балега, А. Д. Деев, А. А. Калачёв, УФН **195**, 909 (2025).
10. M. Afzelius, C. Simon, H. de Riedmatten, and N. Gisin, Phys. Rev. A **79**, 052329 (2009).
11. M. Zhong, M. P. Hedges, R. L. Ahlefeldt, J. G. Bartholomew, S. E. Beavan, S. M. Wittig, J. J. Longdell, and M. J. Sellars, Nature **517**, 177 (2015).
12. F. Wang, M. Ren, W. Sun, M. Guo, M. J. Sellars, R. L. Ahlefeldt, J. G. Bartholomew, J. Yao, S. Liu, and M. Zhong, PRX Quantum **6**, 010302 (2025).
13. R. A. Akhmedzhanov, L. A. Gushchin, A. A. Kalachev, N. A. Nizov, V. A. Nizov, D. A. Sobgayda, and I. V. Zelensky, Laser Phys. Lett. **20**, 015204 (2022).
14. Р. А. Ахмеджанов, Л. А. Гущин, И. В. Зеленский, А. А. Калачев, В. А. Низов, Н. А. Низов, Д. А, Собгайда, Изв. вузов. Радиофизика **67**, 121 (2024).
15. H. de Riedmatten, S. Grandi, M. Afzelius, and W. Tittel, D2.4 Comparison report on long distance quantum repeater links, Quantum Internet Alliacnce (2022); https://quantuminternetalliance.org/.
16. X. Liu, X.-M. Hu, T.-X. Zhu, C. Zhang, Y.-X. Xiao, J.-L. Miao, Z.-W. Ou, P.-Y. Li, B.-H. Liu, Z.-Q. Zhou, C.-F. Li, and G.-C. Guo, Nat. Commun. **15**, 8529 (2024).
17. P. G. Kwiat, E. Waks, A. G. White, I. Appelbaum, and P. H. Eberhard, Phys. Rev. A **60**, R773 (1999).
18. F. Konig, E. J. Mason, F. N. C. Wong, and M. A. Albota, Phys. Rev. A **71**, 033805 (2005).
19. O. T. Slattery, L. Ma, K. Zong, and X. Tang, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **124**, 124019 (2019).
20. A. Moqanaki, F. Massa, and P. Walther, APL Photonics **4**, 090804(2019).