

Реализация протокола оптической квантовой памяти на телекоммуникационной длине волны

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

Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Экспериментально реализован протокол оптической квантовой памяти на основе восстановления сигнала подавленного эха (ROSE) в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$. Достигнута эффективность восстановления $17\pm 1\%$ для ортогональных компонент поляризации сигнального импульса на телекоммуникационной длине волны при времени хранения 60 мкс. Входной импульс содержал в среднем ~ 38 фотонов, а восстановленный эхо-сигнал ~ 6 фотонов при отношении сигнал-шум ~ 1.3 .

Ключевые слова: Оптическая квантовая память, Редкоземельные ионы, Фотонное эхо, Квантовый репитер.

Цитирование: Герасимов, К. И. Реализация протокола оптической квантовой памяти на телекоммуникационной длине волны / К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, С. А. Моисеев // NOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 299–301.

Разработка эффективной многокубитной оптической квантовой памяти (КП) на телекоммуникационной длине волны ($\lambda \sim 1,5$ мкм) является одной из ключевых задач оптических квантовых технологий, что вызывается большим интересом к созданию на ее основе квантового повторителя, используемого в оптических квантовых коммуникациях на дальние расстояния [1]. За последние два десятилетия были предложены различные протоколы эффективной КП [2,3]. Схема КП, основанная на использовании высокоэффективного обращенного фотонного эха в оптически плотной среде [4], нашла активное применение при разработке многочисленных протоколов ее реализации в кристаллах, активированных редкоземельными ионами [2]. Один из таких протоколов основан на восстановлении сигнала подавленного эха – протокол ROSE [5,6]. Протокол ROSE близок к классической схеме двухимпульсного (первичного) фотонного эха, где к последовательности возбуждающих импульсов добавляется второй рефазирующий импульс, который обеспечивает восстановление первичного сигнала эха в неинвертированной системе атомов, обеспечивая значительное подавление оптических шумов в восстановленном сигнальном импульсе по сравнению с протоколом первичного эха.

В данной работе мы экспериментально реализовали оптическую схему КП на основе протокола ROSE на телекоммуникационной длине волны для сигнальных световых полей с малым числом фотонов. Для этого была инициализирована долгоживущая (>1 с) искусственная линия поглощения и выбрана ортогональная геометрия распространения сигнального и рефазирующих полей. Такая геометрия является наиболее удобной при использовании резонатора для сигнального пучка [7], поскольку обеспечивает лучшую

пространственную изоляцию от рассеянных фотонов, возникающих в кристалле при воздействии рефразирующих лазерных импульсов. Линия искусственного поглощения инициализировалась на оптическом переходе ${}^4I_{15/2}(0)$ - ${}^4I_{13/2}(0)$ в кристалле ${}^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$, который находился в криостате замкнутого цикла при температуре 1,3К во внешнем магнитном поле 3,3 Тл, направленном вдоль оси D1 кристалла. В таких условиях, электронные спины ионов эрбия сильно выморожены, что приводит к большому времени жизни сверхтонких подуровней и времени когерентности. В этом случае, для снижения уровня шума, вызванного несовершенной реализацией рефразирующих импульсов, можно инициализировать долгоживущую искусственную линию поглощения на оптическом переходе [6], необходимую для реализации рассматриваемого протокола КП.

Эффективность восстановления реализованного протокола для ортогональных компонент поляризации сигнального импульса составила $17\pm 1\%$ при времени хранения 60 мкс. Входной импульс содержал в среднем ~ 38 фотонов, а эхо-сигнал ~ 6 фотонов при отношении сигнал/шум 1,3. Предлагаются и обсуждаются методы увеличения отношения сигнал/шум с целью реализации эффективной квантовой памяти для однофотонных световых полей на телекоммуникационной длине волны.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-00115).

Список источников

- [1] **Heshami, K.** Quantum memories: emerging applications and recent advances / K. Heshami, D. England, P. Humphreys, P. Bustard, V. Acosta, J. Nunn, and B. Sussman // *Journal of Modern Optics*. — 2016. — Vol 63. — № 20. — P. 2005–2028.
- [2] **Tittel, W.** Photon-echo quantum memory in solid state systems / W. Tittel, M. Afzelius, T. Chanelière, R. Cone, S. Kröll, S. Moiseev, and M. Sellars // *Laser & Photonics Reviews*. — 2009. — Vol 4. — № 2. — P. 244–267.
- [3] **Chanelière, T.** Quantum optical memory protocols in atomic ensembles / T. Chanelière, G. Hétet, and N. Sangouard // *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2018. — Vol 67. — P. 77–150.
- [4] **Moiseev, S.** Complete reconstruction of the quantum state of a single-photon wave packet absorbed by a doppler-broadened transition / S. Moiseev and S. Kröll // *Physical Review Letters*. — 2001. — Vol 87. — № 17. — P. 137601.
- [5] **Damon, V.** Revival of silenced echo and quantum memory for light / V. Damon, M. Bonarota, A. Louchet-Chauvet, T. Chanelière, and J.-L. Le Gouët // *New Journal of Physics*. — 2011. — Vol 13. — № 9. — P. 093031.
- [6] **Minnegaliev, M.** Implementation of an optical quantum memory protocol in the ${}^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal / M. Minnegaliev, K. Gerasimov, T. Sabirov, R. Urmancheev, and S. Moiseev // *JETP Letters*. — 2022. — Vol. 115. — № 12. — P. 720–727.
- [7] **Minnegaliev, M.** Linear Stark effect in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}$ crystal and its application in the addressable quantum memory protocol / M. Minnegaliev, K. Gerasimov, R. Urmancheev, A. Zheltikov, and S. Moiseev // *Physical Review B*. — 2021. — Vol 103. — № 17. — P. 174110.

Implementation of the optical quantum memory protocol at the telecommunication wavelength

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

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

An optical quantum memory protocol based on the revival of a silenced echo (ROSE) signal in a $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal has been experimentally implemented. A recovery efficiency of $17 \pm 1\%$ was achieved for the orthogonal polarization components of a signal pulse at a telecommunication wavelength with a storage time of 60 μs . The input pulse contained, on average ~ 38 photons, and the reconstructed echo signal contained ~ 6 photons at a signal-to-noise ratio of ~ 1.3 .

Keywords: Optical quantum memory, Rare-earth ions, Photon echo, Quantum repeater.