

Квантовая память в резонаторных схемах: новые подходы и эксперименты

С. А. Моисеев

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

Изучаются возможности реализации квантовой памяти в резонаторных схемах, позволяющие с высокой эффективностью сохранять широкополосные световые и микроволновые импульсы. Рассматриваются способы увеличения эффективности и спектрального диапазона квантовой памяти, времени хранения сигнального излучения, способы достижения высокой эффективности и интеграции атомов в резонаторы. Обсуждаются последние эксперименты в реализации многорезонаторных схем квантовой памяти и возможности улучшения ее базовых параметров до практически значимых значений.

Ключевые слова: Оптическая и микроволновая квантовая память, Резонатор.

Цитирование: Моисеев, С. А. Квантовая память в резонаторных схемах: новые подходы и эксперименты / С. А. Моисеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 289–292.

Среди разрабатываемых подходов к реализации оптической и микроволновой квантовой памяти, отметим протоколы, использующие варианты обратимого фотонного эха [1,2,3], которые дают возможность запоминать большое число световых импульсов произвольной временной формы. Данные возможности сохраняются и при реализации *квантовой памяти на фотонном эхо в резонаторе* (ФЭКПР). Базовая схема ФЭКПР включает неоднородно уширенный ансамбль резонансных атомов, который помещается в одномодовый резонатор. При этом высокая эффективность памяти обеспечивается внутри спектральной ширины $\delta\omega_{qm} < \kappa/3$ [4] при согласовании импедансов $\kappa = \kappa$, где $\kappa = \omega_0/(2Q)$ - постоянная взаимодействия моды резонаторы с модами внешнего волновода, ω_0 и Q - частота и добротность нагруженного резонатора, κ - коэффициент резонансного поглощения атомов на частоте резонатора, пропорциональный числу атомов. Подобные свойства ФЭКПР имеют место и для Λ -схемы нерезонансного рамановского взаимодействия с атомами в присутствии дополнительного контролирующего лазерного поля на смежном квантовом переходе [5,6], что представляется перспективным для реализации такой памяти на ансамбле редкоземельных ионов, обладающих достаточно узким неоднородным уширением оптического перехода. Использование резонаторов, обладающих большой добротностью, позволяет уменьшить пространственные размеры ячейки памяти и максимально облегчить удовлетворение условия согласования импедансов для Λ -схемы ФЭКПР, но уменьшает рабочий спектральный диапазон квантовой памяти. Ниже мы обсуждаем новые возможные схемы реализации широкополосной ФЭКПР.

Уменьшение спектральной ширины ФЭКПР обусловлено влиянием спектральной дисперсии атомного отклика в одномодовом резонаторе. Для подавления спектральной дисперсии в работе [7] предлагается дополнительно включить дисперсионное взаимодействие атомов с сигнальным излучением, вовлекая еще одну Λ -схему атомных переходов вместе с контролирующим лазерным полем. Дисперсионное взаимодействие, обеспечиваемое достаточно большим отклонением частоты контролирующего поля от частоты атомного перехода, не вызывает дополнительного нежелательного усиления или поглощения сигнального излучения, что обеспечивает уширение спектрального диапазона при выборе оптимальных параметров добавляемого взаимодействия. Ниже мы обращаем внимание на возможность использования альтернативных схем, в которых вместо двух Λ -схем атомных переходов используются: а) двухуровневая схема на основном переходе, где сохраняется сигнальное излучение и Λ -схема для дисперсионного контроля взаимодействия; б) используются две двухуровневые схемы для реализации обоих взаимодействий. Использование Λ -схемы удобно для дисперсионного взаимодействия наличием большого времени жизни низколежащих атомных уровней, хотя требует дополнительного контролирующего лазерного излучения заданной частоты. Использование двухуровневой схемы для дисперсионного взаимодействия требует согласования частот резонансных переходов и задания подходящей оптической плотности. Теоретический анализ рассматриваемых схем, содержащих контролируемые параметры дисперсионного взаимодействия, позволяет на порядок увеличить спектральную ширину ФЭКПР. Дальнейшее увеличение спектральной ширины также возможно, но за счет увеличения спектрального диапазона для вводимого дисперсионного взаимодействия атомов в резонаторе, например, за счет добавления новых лазерных полей.

Другой способ подавления спектральной дисперсии за пределами спектральной ширины отдельного резонатора состоит в использовании серии резонаторов, частоты которых покрывают спектральный диапазон, значительно превосходящий ширину линии отдельного резонатора. Частоты резонаторов образуют периодическую гребенку, и связаны с внешним волноводом заданной постоянной взаимодействия [8,9]. Работоспособность этих схем квантовой памяти была затем подтверждена в последующих экспериментах [10,11]. Было показано, что возможны различные способы объединения резонаторов в общую схему квантовой памяти. Многообещающие свойства обнаружены для схем, где несколько резонаторов связаны с волноводом через общий резонатор [12], и было продемонстрировано, что в такой системе резонаторов можно без труда обеспечивать согласование импедансов, поскольку постоянная их взаимодействия с волноводом и с другими резонаторами может без ограничений варьироваться в широком пределе. На такой схеме квантовой памяти недавно была продемонстрирована экспериментально рекордная эффективность в сохранении микроволновых фотонов на системе сверхпроводящих резонаторов [13] и было показано, что она может сохранять сигнальные импульсы на произвольно долгое время при использовании переключателя, соединяющего общий резонатор с внешним волноводом [14].

Было показано, что многорезонаторная схема памяти позволяет сохранять сигнальные импульсы с произвольной формой спектра и может достигать предельной высокой эффективности [15], необходимой для использования в квантовом компьютере, когда эффективность ограничивается лишь добротностью отдельного резонатора. Вместе с тем, сохранение широкополосных входных сигнальных полей на большие времена требует использования долгоживущих носителей квантовой информации в системе резонаторов и разработки эффективных способов управления квантовой когерентности этих носителей. Такой контроль может быть реализован при соединении рассматриваемой системы резонаторов с дополнительными волноводами и/или резонаторами, используемыми для распространения управляющих интенсивных классических световых (электромагнитных) импульсов. В частности, представляет интерес двухслойная планарная волноводно-резонаторная схема. Один слой волноводов и резонаторов используется для транспорта сигнальных квантовых состояний света, а второй слой – для контролируемых классических лазерных импульсов. Волноводы слоев должны быть расположены далеко друг от друга, а частоты резонаторов в соседних слоях не быть резонансными друг другу. Между близко расположенными слоями резонаторов помещаются резонансные атомы, которые находятся в эванесцентной области сигнальных и контролируемых полей, совместное действие которых позволит обеспечить резонансное возбуждение атомов на долгоживущие состояния в Λ -схеме квантовых переходов. Разработка и создание подобных и более сложных волноводно-резонаторных систем возможно существующими технологиями интегральной оптики и микроволновой сверхпроводящей техники.

Благодарность

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

Список источников

- [1] **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 // *Phys. Rev. Let.* — 2001. — Vol 87. — № 17. — P. 137601.
- [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. A.** Efficient multi-mode quantum memory based on photon echo in optimal QED cavity / S. A. Moiseev, S. N. Andrianov, F. F. Gubaidullin // *Phys. Rev. A* – 2010. – Vol 82. – P. 022311.
- [5] **Moiseev, S. A.** Off-resonant Raman-echo quantum memory for inhomogeneously broadened atoms in a cavity / Moiseev S. A. // *Phys. Rev. A* – 2013. – Vol. 88. – P. 012304.
- [6] **Kalachev, A.** Raman quantum memory based on an ensemble of silicon- vacancy centers in diamond / A. Kalachev, A. Berezhnoi, P. Hemmer and O. Kocharovskaya // *Laser Physics.* – 2019. – Vol 29. - № 10. – P. 104001.

- [7] **Moiseev, E. S.** Broadband quantum memory in a cavity via zero spectral dispersion / E. S. Moiseev, A. Tashchilina, S. A. Moiseev, B. C. Sanders // *New Journal of Physics*. – 2021. - Vol 23. – P. 063071.
- [8] **Moiseev, E. S.** All-optical photon echo on a chip / E. S. Moiseev and S. A. Moiseev // *Laser Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 14. – P. 015202.
- [9] **Moiseev, S. A.** Multiresonator Quantum Memory / S. A. Moiseev, F. F. Gubaidullin, R. S. Kirillov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, O. N. Sherstyukov // *Phys.Rev.A*. – 2017. – Vol. 95. – P. 012338
- [10] **Petrovnin, K. V.** Quantum memory in the scheme of revival of silenced echo in an optical resonator / K. V. Petrovnin, N. S. Perminov, O. N. Sherstyukov, S. A. Moiseev // *Quantum Electronics* – 2018. – Vol. 48 - № 10. – P. 894 –897.
- [11] **Bao, Z.** On-Demand Storage and Retrieval of Microwave Photons Using a Superconducting Multiresonator Quantum Memory / Z. Bao, Z. Wang, Y. Wu, Y. Li, C. Ma, Y. Song, H. Zhang, L. Duan // *Phys. Rev. Lett.* – 2021. - Vol. 127. – P. 010503.
- [12] **Moiseev, S. A.** Broadband multiresonator quantum memory-interface / S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, and O. N. Sherstyukov // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. - P 3982.
- [13] **Matanin, A. R.** Towards highly efficient broadband superconducting quantum memory. / A. R. Matanin, K. I. Gerasimov, E. S. Moiseev, N. S. Smirnov, A. I. Ivanov, E. I. Malevannaya, V. I. Polozov, E. V. Zikiy, A. A. Samoilov, I. A. Rodionov, and S. A. Moiseev // *Phys. Rev. Applied* – 2023. Vol. 19. - № 3. – P. 034011.
- [14] **Perminov, N. S.** Integrated multiresonator quantum memory / N. S. Perminov and S. A. Moiseev // *Entropy* – 2023. – Vol. 25. - № 4. – P. 623.
- [15] **Perminov, N. S.** Spectral-Topological Superefficient Quantum Memory // N. S. Perminov and S. A. Moiseev // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1568.

Quantum memory in resonator circuits: new approaches and experiments

S. A. Moiseev

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

The possibilities of implementing quantum memory in resonator circuits are being studied, which make it possible to store broadband light and microwave pulses with high efficiency. The methods of increasing the efficiency and spectral range of quantum memory, the storage time of signal pulses, ways to achieve high efficiency and integration of atoms into resonators are considered. Recent experiments in the implementation of the multi-resonator quantum memory schemes and the possibility of improving its basic parameters to practically significant values are discussed.

Keywords: Optical and microwave quantum memory, Resonator.