

## СПЕКТРОСКОПИЯ КАСКАДНОЙ МНОГОРЕЗОНАТОРНОЙ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ

Н.С. Перминов<sup>1,2</sup>, К.В. Петровнин<sup>1,3</sup>, К.И. Герасимов<sup>1</sup>, Р.С. Кириллов<sup>3</sup>,  
Р.Р. Латыпов<sup>3</sup>, О.Н. Шерстюков<sup>3</sup>, С.А. Моисеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Казанский квантовый центр, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия,

<sup>2</sup> Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань, Россия,

<sup>3</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия

## Аннотация

Изучаются спектральные свойства каскадной многорезонаторной микроволновой квантовой памяти, интегрированной в волноводно-резонаторную систему. На основе моделирования экспериментальных данных восстанавливаются базовые спектроскопические параметры изучаемой схемы квантовой памяти, приводятся оценки её квантовой эффективности и показывается возможность достижения оптимальных условий реализации.

**Ключевые слова:** квантовая информатика, каскадная многорезонаторная квантовая память, микроволновая память, резонатор.

**Цитирование:** Перминов, Н.С. Спектроскопия каскадной многорезонаторной квантовой памяти / Н.С. Перминов, К.В. Петровнин, К.И. Герасимов, Р.С. Кириллов, Р.Р. Латыпов, О.Н. Шерстюков, С.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 614-619. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-614-619.

## Введение

Когерентный контроль и высокоточные манипуляции параметрами электромагнитных и световых полей играют определяющую роль в разрабатываемых квантовых технологиях, включая методы обработки квантовой информации [1–6]. В данной работе проведено спектроскопическое исследование многорезонаторной (МР) схемы квантовой памяти (КП) [7, 8], в которой минирезонаторы, помещённые в единый широкополосный волноводный резонатор, играют роль носителей запоминаемой информации. Исходная идея МР-схемы опирается на подход к КП, основанный на фотонном эхе [9] и его варианте, использующем атомные системы с периодической спектральной структурой неоднородного уширения резонансного перехода [10], который известен как AFC-протокол. В отличие от [10], в рассматриваемой нами МР-схеме [8] вместо атомной системы мы используем систему из  $N$  минирезонаторов, которые расположены в общем резонаторе периодически вдоль его оси с расстоянием  $\lambda/2$  между соседними минирезонаторами и образуют периодическую дискретную частотную структуру узких резонансных линий.

Для описания рассматриваемой МР КП и её спектральных характеристик мы используем теоретическую модель [11], развитую в рамках общего подхода к описанию света при его взаимодействии с одномодовым резонатором [12]. Экспериментальные данные о спектре поглощения МР-схемы получены нами для случая 6 минирезонаторов. Используя эти данные, мы восстановили спектральные параметры МР-схемы (минирезонаторов и общего волновода) на основе использованной теоретической модели. Для полученных параметров мы даём оценку квантовой эффективности МР КП и показываем возможность достижения оптимальных условий в её экспериментальной реализации.

## 1. Физическая модель

Теоретическая модель рассматриваемой памяти соответствует схеме КП на фотонном эхе в резонато-

ре [11], которая получила дальнейшее распространение на системы минирезонаторов [7, 8]. Используя известный подход [12] к описанию света в открытом одномодовом резонаторе для рассматриваемой нами МР-схемы, мы находим уравнение для моды поля общего широкополосного резонатора  $a(t)$ :

$$[\partial_t + \kappa/2 + \gamma_r + i\omega_r]a(t) + \sum_{n=1}^N |g_n^0|^2 \int_{-\infty}^t d\tau e^{i(\Delta_n + \gamma_n)(\tau-t)} a(\tau) = \sqrt{\kappa} a_{in}(t), \quad (1)$$

где  $a_{in}(t) = (2\pi)^{-1/2} \int dv e^{-ivt} f_v$  – входной импульс,  $f_v$  – спектральный профиль входного импульса, для которого выполняется условие нормировки при использовании однофотонного поля  $\int dv |f_v|^2 = 1$ ,  $v$  – круговая частота, отсчитанная от центральной частоты излучения  $\omega_0$ ,  $\Delta_n$  – частотные отстройки минирезонаторов,  $n \in \{1, N\}$ ,  $\gamma_n$  – декремент затухания  $n$ -го минирезонатора,  $\{\gamma_r, \omega_r\}$  – декремент затухания и сдвиг частоты широкополосного резонатора,  $\kappa$  – коэффициент связи внешнего волновода с широкополосным резонатором,  $g_n^0$  – константа связи мод общего резонатора и  $n$ -го минирезонатора.

Решая уравнения (1), находим также выражение и для выходного поля  $a_{out}(t) = \sqrt{\kappa} a(t) - a_{in}(t)$  в соответствии с [12] через передаточную функцию (ПФ)  $S(v) = \tilde{a}_{out}(v) / \tilde{a}_{in}(v)$ , имеющее в нашем случае форму

$$S(v) = (1 - F(v)) / (1 + F(v)), \\ F(v) = -2iv / \kappa + 2(\gamma_r + \omega_r) / \kappa + \sum_{n=1}^N 2|g_n^0|^2 / \kappa(\gamma_n + \Delta_n - iv), \quad (2)$$

где  $a_{in,out}(t) = (2\pi)^{-1/2} \int dv e^{-ivt} \tilde{a}_{in,out}(v)$ .

В общем случае ПФ (2) обладает очень сложным спектральным поведением из-за близкого расположения частот минирезонаторов и их сильного взаимодействия через поле общего резонатора. Однако мы показываем, что при определённых условиях ПФ ре-

альной системы может приобретать оптимальные спектральные свойства, соответствующие эффективной КП, при этом квантовая эффективность с высокой точностью описывается простым соотношением.

## 2. Идентификация параметров по наблюдаемому спектру

Передачная функция  $S(\nu)$  определяет все свойства электромагнитного поля, переизлучаемого системой минирезонаторов во входной канал, и задается полностью параметрами внутренних минирезонаторов и общего широкополосного резонатора. Для экспериментального измерения  $S(\nu)$  при отражении от 6-резонаторной системы мы использовали векторный анализатор с высоким частотным разрешением. В условиях эксперимента мы могли менять расстояние между ближайшими частотами минирезонаторов  $\Delta$  в пределах от 3 до 15 [2 $\pi$ ·МГц], а также варьировать параметр связи к общего резонатора с внешним волноводом в пределах от 40 до 400 [2 $\pi$ ·МГц]. Отметим, что в силу обнаруженной очень высокой спектральной чувствительности МР-системы к внешним изменениям не все доступные режимы работы системы могли быть достоверно измерены. Последнее представляет собой отдельную техническую проблему, решение которой потребует разработки узкоспециализированных измерительных устройств. Поэтому мы ограничились лишь рассмотрением режима работы с параметрами  $\Delta=9$  [2 $\pi$ ·МГц],  $\kappa=250$  [2 $\pi$ ·МГц], для которого погрешность измерений, связанная с внешними изменениями, была меньше 0,1 %.

В результате обработки спектральных данных (рис. 1) удалось с довольно высокой точностью определить параметры схемы из 6 минирезонаторов:

$$\begin{aligned} \kappa &= 250; \quad \gamma_r = 68; \quad \omega_r = 16,3; \\ \gamma_n &= \{1,1; 1,2; 0,99; 0,93; 0,99; 0,97\}; \\ g_n &= \{6,51; 7,06; 5,66; 5,38; 6,75; 4,39\}; \\ \Delta_n &= \{-21,9; -13; -4,36; 4,21; 13,8; 21,8\}; \\ \gamma &= \langle \gamma_n \rangle = 1,03; \quad g = \langle g_n \rangle = 5,96; \\ \Delta &= \langle \Delta_{n+1} - \Delta_n \rangle = 8,74, \end{aligned} \quad (3)$$

где все величины, как и далее в тексте, даны в единицах [2 $\pi$ ·МГц].

## 3. Оценка эффективности и оптимальные условия

Для оценки эффективности сохранения сигнального электромагнитного импульса со спектральной шириной порядка  $\sim N\Delta$  мы будем использовать систему с усреднёнными параметрами (3), то есть считая, что  $\gamma_n = \gamma$ ,  $g_n = g$ ,  $\Delta_{n+1} - \Delta_n = \Delta$ , а также  $\gamma_r = \omega_r = 0$ . Аналогично вычислениям [8,11] из уравнения (1) находим следующую оценку квантовой эффективности  $\eta(\Delta)$  восстановления сигнального импульса как функцию  $\Delta$  вблизи центральной частоты  $\nu=0$ :

$$\eta(\Delta) = e^{-4\pi\gamma/\Delta} \times [8\pi g^2 / (\kappa\Delta)]^2 / [1 + 2\pi g^2 / (\kappa\Delta)]^4. \quad (4)$$

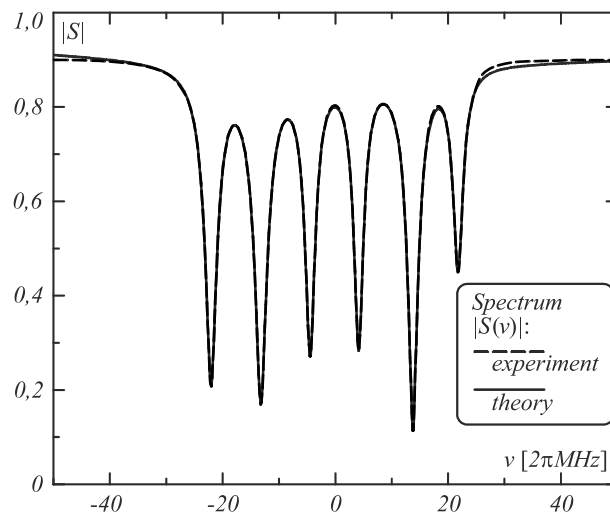


Рис. 1. Спектр модуля ПФ  $|S(\nu)|$  МР КП: сплошная линия – эксперимент, пунктирная линия – теория

Как видно из (4), квантовая эффективность  $\eta(\Delta)=1$  для достаточно высокой добротности минирезонаторов и  $4\pi/\Delta \ll \gamma^{-1}$  при выполнении условия согласования  $2\pi g^2 / (\kappa\Delta) = 1$ . Численные расчёты для уравнения (1) показывают, что формула (4) обладает хорошей точностью и для малого числа минирезонаторов  $N$  (ошибка составляет лишь несколько процентов уже для  $N\Delta$ ). При конечной добротности минирезонаторов оптимальное значение частотной отстройки  $\Delta = \Delta_{cr}$ , при которой достигается максимальная квантовая эффективность, определяется как решение уравнения  $\partial_{\Delta}\eta(\Delta) = 0$ , откуда для параметров из (3) получим  $\Delta_{cr} = 0,808$  и эффективность  $\eta = 0,026$ . Однако при уменьшении постоянной связи до  $\kappa=40$  возможно значительное улучшение характеристик:  $\Delta_{cr} = 14,5$  и  $\eta = 0,263$ , которые достижимы в условиях реального эксперимента. На рис. 2 показана зависимость  $\eta(\Delta)$  при  $\kappa=40$  для  $\gamma=1,03$  и  $\gamma=0,1$ , определяющая область частотных отстроек и спектральной ширины  $N\Delta$  сохранения сигналов соответственно, для которых эффективность достаточно высока и близка к эффективности в критической точке для оптимального значения  $\Delta = \Delta_{cr}$ .

Таким образом, для рассмотренной МР-системы из 6 минирезонаторов продемонстрирована возможность достижения оптимальных условий реализации КП за счёт выбора параметров частотных отстроек и связи внешнего волновода с общим резонатором. Более того, при использовании существующих более высокочастотных минирезонаторов с постоянной затухания  $\gamma=0,1$  (для собственной добротности  $Q=1,57 \cdot 10^5$  минирезонатора с частотой 5 ГГц) мы находим квантовую эффективность  $\eta=0,81$  для частотной отстройки  $\Delta_{cr}=6,76$ , что соответствует резкости частотной гребёнки минирезонаторов  $\Delta_{cr}/\gamma=67,6$ . Такая величина квантовой эффективности превышает порог [2], что необходимо для проявления квантовых свойств памяти при сохранении произвольных световых полей, и указывает на большие возможности ис-

пользования принципиальной схемы МР КП для высокоэффективной манипуляции микроволновыми сигналами при использовании достаточно высокодобротных микроволновых минирезонаторов.

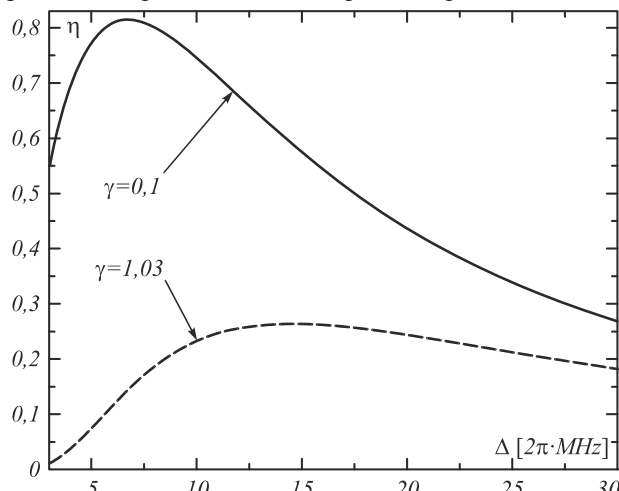


Рис. 2. Квантовая эффективность в зависимости от частотной отстройки  $\Delta$ . Максимуму эффективности соответствует критическое значение  $\Delta = \Delta_{cr}$

### Заключение

Детально исследована схема широкополосной МР КП на системе минирезонаторов, интегрированных в волноводно-резонаторную систему. Получена оценка оптимальных параметров для данной схемы памяти, и изучена зависимость её эффективности от частотного интервала  $\Delta$  между линиями минирезонаторов. По измеренным экспериментальным спектроскопическим данным идентифицированы внутренние параметры изученной схемы, содержащей 6 минирезонаторов. Для найденных параметров получена оценка квантовой эффективности схемы и показана возможность достижения оптимальных условий её реализации. Продемонстрирована уникальная возможность точного экспериментального задания параметров всех шести минирезонаторов, позволяющая менять спектральные характеристики схемы записи и считывания квантовой информации при сохранении высокой эффективности.

Предложенная МР-схема теоретически позволяет добиться эффективности  $\sim 99,9\%$  при использовании существующих сверхпроводящих микроволновых технологий [1, 8] за счёт высокой добротности резонаторов ( $Q \sim 10^7$ ) и увеличить время памяти с помощью быстрого контроля связи минирезонаторов с общим резонатором [13]. В оптическом диапазоне может быть достигнута эффективность  $\sim 95\%$  при использовании кольцевых микрорезонаторов с добротностью  $Q \sim 10^8$ , как это показано в [7]. Для значительного увеличения времени памяти внутри минирезонаторов можно поместить спиновые системы [14] и использовать эффективные протоколы хранения памяти на них [15]. В этом случае МР-система выступает в роли квантового интерфейса и общая эффективность может быть значительно улучшена [14]. При

этом за счёт увеличения количества минирезонаторов и оптимального выбора всех параметров связей и частот можно увеличить не только эффективность, но и спектральную ширину памяти [14]. Последнее открывает перспективы создания универсальной КП для сверхпроводящего квантового компьютера на базе существующих микроволновых технологий [1].

### Благодарности

Работа частично выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров (изготовление прототипа и подготовка эксперимента – К.В.П., Р.С.К., Р.Р.Л., О.Н.Ш.), частично поддержана грантом РФФИ № 15-42-02462 (основная идея и проведение эксперимента – С.А.М., К.И.Г., К.В.П.), а также частично поддержана в рамках бюджетной темы лаборатории квантовой оптики и информатики КФТИ ОСП ФИЦ КазНЦ РАН (моделирование спектра и анализ данных – Н.С.П.).

### Литература

1. Gu, X. Microwave photonics with superconducting quantum circuits / X. Gu, A.F. Kockum, A. Miranowicz, Y. Liu, F. Nori // *Physics Reports*. – 2017. – Vol. 718-719. – P. 1-102. – DOI: 10.1016/j.physrep.2017.10.002.
2. Hammerer, K. Quantum interface between light and atomic ensembles / K. Hammerer, A.S. Sørensen, E.S. Polzik // *Reviews of Modern Physics*. – 2010. – Vol. 82, Issue 2. – 1041. – DOI: 10.1103/RevModPhys.82.1041.
3. Казанский, Н.Л. Использование фотонно-кристаллических резонаторов для дифференцирования оптических импульсов по времени / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 4. – С. 474-478.
4. Казанский, Н.Л. Использование массива фотонно-кристаллических резонаторов для интегрирования оптических сигналов во времени / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 181-187.
5. Серафимович, П.Г. Оптический модулятор на основе связанных фотонно-кристаллических резонаторов / П.Г. Серафимович // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 147-151. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-147-151.
6. Гаврилов, А.В. Перспективы создания оптических аналоговых вычислительных машин / А.В. Гаврилов, В.А. Соيفер // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 140-150.
7. Moiseev, E.S. All-optical photon echo on a chip / E.S. Moiseev, S.A. Moiseev // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 14, Issue 1. – 015202. – DOI: 10.1088/1612-202X/aa4fc2.
8. Moiseev, S.A. Multiresonator quantum memory / S.A. Moiseev, F.F. Gubaidullin, R.S. Kirillov, R.R. Latypov, N.S. Perminov, K.V. Petrovnikov, O.N. Sherstyukov // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 95, Issue 1. – 012338. – DOI: 10.1103/PhysRevA.95.012338.
9. Moiseev, S.A. Photon-echo-based quantum memory of arbitrary light field states / S.A. Moiseev // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. – 2007. –

- Vol. 40, Issue 19. – 3877. – DOI: 10.1088/0953-4075/40/19/008.
10. **De Riedmatten, H.** A solid-state light–matter interface at the single-photon level / H. de Riedmatten, M. Afzelius, M.U. Staudt, C. Simon, N. Gisin // *Nature*. – 2008. – Vol. 456(7223). – P. 773-777. – DOI: 10.1038/nature07607.
  11. **Moiseev, S.A.** Efficient multimode quantum memory based on photon echo in an optimal QED cavity / S.A. Moiseev, S.N. Andrianov, F.F. Gubaidullin // *Physical Review A*. – 2010. – Vol. 82, Issue 2. – 022311. – DOI: 10.1103/PhysRevA.82.022311.
  12. **Walls, D.F.** *Quantum optics* / D.F. Walls, G.J. Milburn, eds. – Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012. – 351 p. – ISBN: 978-3-540-58831-3.
  13. **Sandberg, M.**, Tuning the field in a microwave resonator faster than the photon lifetime / M. Sandberg, C.M. Wilson, F. Persson, T. Bauch, G. Johansson, V. Shumeiko, T. Duty, P. Delsing // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, Issue 20. – 203501. – DOI: 10.1063/1.2929367.
  14. **Perminov, N.S.** Superefficient long-lived multiresonator quantum memory / N.S. Perminov, D.Yu. Tarankova, S.A. Moiseev // preprint Arxiv. – 2017. – arXiv:1711.07014.
  15. **Gerasimov, K.I.** Microwave spin frequency comb memory protocol controlled by gradient magnetic pulses / K.I. Gerasimov, S.A. Moiseev, R.B. Zaripov // *Applied Magnetic Resonance*. – 2017. – Vol. 48, Issue 8. – P. 795-804. – DOI: 10.1007/s00723-017-0892-y.

### Сведения об авторах

**Перминов Николай Сергеевич**, 1985 года рождения, в 2008 году окончил физический факультет Казанского федерального университета по направлению «Физика», работает младшим научным сотрудником в Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: оптимальное управление, квантовая информатика. E-mail: [qm.kzn@ya.ru](mailto:qm.kzn@ya.ru).

**Петровнин Кирилл Викторович**, 1991 года рождения, в 2013 году с отличием окончил магистратуру Института физики Казанского федерального университета по направлению «Физика», работает инженером в Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: нелинейная оптика, когерентная оптика, квантовые коммуникации, оптоэлектроника, фотоника. E-mail: [petrovnikirill@gmail.com](mailto:petrovnikirill@gmail.com).

**Герасимов Константин Игоревич**, 1973 года рождения, в 1995 году окончил физический факультет Казанского государственного университета по направлению «Радиофизика». Кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ. Лауреат государственной премии Республики Татарстан в области науки и техники 2012 г. Область научных интересов: оптическая и ЭПР спектроскопия редкоземельных ионов в кристаллах, когерентная и квантовая оптика, квантовая информатика, квантовая память, квантовые коммуникации. E-mail: [kigerasimov@mail.ru](mailto:kigerasimov@mail.ru).

**Кириллов Роман Сергеевич**, 1990 года рождения, в 2013 году окончил физический факультет Казанского федерального университета по направлению «Радиофизика», работает младшим научным сотрудником в лаборатории СВЧ проектирования и радиотелекоммуникации Института физики КФУ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, автоматизация измерений. E-mail: [tarolrr@gmail.com](mailto:tarolrr@gmail.com).

**Латыпов Руслан Рустемович**, 1981 года рождения, в 2003 с отличием окончил физический факультет Казанского государственного университета по направлению «Радиофизика». Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики Казанского федерального университета. Область научных интересов: распространение радиоволн, автоматизация научного эксперимента, ионосфера, СВЧ. E-mail: [rlatmail@gmail.com](mailto:rlatmail@gmail.com).

**Шерстюков Олег Николаевич**, 1959 года рождения, в 1981 году окончил физический факультет Казанского государственного университета по направлению «Радиофизика и электроника». Доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой радиофизики Казанского федерального университета. Область научных интересов: электромагнитные волны в средах, радиотелекоммуникации, цифровая обработка сигналов. E-mail: [Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru](mailto:Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru).

**Моисеев Сергей Андреевич**, 1957 года рождения, в 1979 году с отличием окончил физический факультет Казанского государственного университета по направлению «Радиофизика». Доктор физ.-мат. наук, проф. кафедры радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ, директор Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ. Заслуженный деятель науки Республики Татарстан. Область научных интересов: оптика и спектроскопия, когерентная нелинейная и квантовая оптика, квантовая информатика, квантовая память, квантовые коммуникации. E-mail: [s.a.moiseev@kazanqc.org](mailto:s.a.moiseev@kazanqc.org).

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г. Окончательный вариант – 5 апреля 2018 г.

## SPECTROSCOPY OF CASCADE MULTIRESONATOR QUANTUM MEMORY

N.S. Perminov<sup>1,2</sup>, K.V. Petrovnik<sup>1,3</sup>, K.I. Gerasimov<sup>1,2</sup>, R.S. Kirillov<sup>3</sup>,  
R.R. Latypov<sup>3</sup>, O.N. Sherstyukov<sup>3</sup>, S.A. Moiseev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan Quantum Center, KNRTU-KAI, Kazan, Russia,

<sup>2</sup>Zavoisky Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia,

<sup>3</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

## Abstract

We study spectral properties of a cascaded multiresonator microwave quantum memory integrated into a waveguide-resonator system. On the basis of experimental data, we reconstruct the internal parameters of the circuit under study, give estimates of quantum efficiency, and show the possibility of achieving optimal conditions for its realization.

**Keywords:** quantum informatics, cascade multiresonator quantum memory, microwave quantum memory, resonator.

**Citation:** Perminov NS, Petrovnik KV, Gerasimov KI, Kirillov RS, Latypov RR, Sherstyukov ON, Moiseev SA. Spectroscopy of cascade multiresonator quantum memory. *Computer Optics* 2018; 42(4): 614-619. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-614-619.

**Acknowledgements:** The research was partially supported by the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University (fabrication a prototype and preparing the experiment – KVP, RSK, RRL, ONS), the Russian Foundation for Basic Research through under grant No. 15-42-02462 (basic idea and conducting of the experiment – SAM, KIG, KVP), and under a budgetary project of the Laboratory of Quantum Optics and Informatics KPTI SSS FRC KazSC RAS (modeling of spectrum and data analysis – NSP).

## References

- [1] Gu X, Kockum AF, Miranowicz A, Liu Y, Nori F. Microwave photonics with superconducting quantum circuits. *Physics Reports* 2017; 718-719: 1-102. DOI: 10.1016/j.physrep.2017.10.002.
- [2] Hammerer K, Sørensen AS, Polzik ES. Quantum interface between light and atomic ensembles. *Rev Mod Phys* 2010; 82(2): 1041. DOI: 10.1103/RevModPhys.82.1041.
- [3] Kazanskiy NL, Serafimovich PG, Khonina SN. Use of photonic crystal resonators for the differentiation of optical impulses in time. *Computer Optics* 2012; 36(4): 474-478.
- [4] Kazanskiy NL, Serafimovich PG. Using photonic crystal nanobeam cavities for integration of optical signal. *Computer Optics* 2014; 38(2): 181-187.
- [5] Serafimovich PG. Optical modulator based on coupled photonic crystal cavities. *Computer Optics* 2015; 39(2): 147-151. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-147-151.
- [6] Gavrilov AV, Soifer VA. Prospects of optical analog computer development. *Computer Optics* 2012; 36(2): 140-150.
- [7] Moiseev ES, Moiseev SA. All-optical photon echo on a chip. *Laser Phys Lett* 2016; 14(1): 015202. DOI: 10.1088/1612-202X/aa4fc2.
- [8] Moiseev SA, Gubaidullin FF, Kirillov RS, Latypov RR, Perminov NS, Petrovnik KV, Sherstyukov ON. Multiresonator quantum memory. *Phys Rev A* 2017; 95(1): 012338. DOI: 10.1103/PhysRevA.95.012338.
- [9] Moiseev SA. Photon-echo-based quantum memory of arbitrary light field states. *J Phys B: At Mol Opt Phys* 2007; 40(19): 3877. DOI: 10.1088/0953-4075/40/19/008.
- [10] De Riedmatten H, Afzelius M, Staudt MU, Simon C, Gisin N. A solid-state light-matter interface at the single-photon level. *Nature* 2008; 456(7223): 773-777. DOI: 10.1038/nature07607.
- [11] Moiseev SA, Andrianov SN, Gubaidullin FF. Efficient multimode quantum memory based on photon echo in an optimal QED cavity. *Phys Rev A* 2010; 82(2): 022311. DOI: 10.1103/PhysRevA.82.022311.
- [12] Walls DF, Milburn DJ, eds. *Quantum Optics*. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2012. ISBN: 978-3-540-58831-3.
- [13] Sandberg M, Wilson CM, Persson F, Bauch T, Johansson G, Shumeiko V, Duty T, Delsing P. Tuning the field in a microwave resonator faster than the photon lifetime. *Appl Phys Lett* 2008; 92(20): 203501. DOI: 10.1063/1.2929367.
- [14] Perminov NS, Tarankova DY, Moiseev SA. Superefficient long-lived multiresonator quantum memory. Preprint Arxiv 2017; arXiv:1711.07014.
- [15] Gerasimov KI, Moiseev SA, Zaripov RB. Microwave spin frequency comb memory protocol controlled by gradient magnetic pulses. *Applied Magnetic Resonance* 2017; 48(8): 795-804. DOI: 10.1007/s00723-017-0892-y.

## Author's information

**Nikolay Sergeevich Perminov** (b. 1985), in 2008 graduated from Physical faculty of Kazan Federal University in the direction "Physics". He is working as a junior researcher at the Kazan Quantum Center of the KNRTU-KAI. Research interests: optimal control, quantum informatics. E-mail: [qm.kzn@ya.ru](mailto:qm.kzn@ya.ru).

**Kirill Victorovich Petrovnik** (b. 1991), graduated with honors from the magistracy of the Institute of Physics of the Kazan Federal University in the direction "Physics", works as an engineer in the Kazan Quantum Center KNRTU-KAI. Research interests: nonlinear optics, coherent optics, quantum communications, optoelectronics, photonics. E-mail: [petrovnikirill@gmail.com](mailto:petrovnikirill@gmail.com).

**Konstantin Igorevich Gerasimov** (b. 1973), graduated from Physical faculty of Kazan Federal University in 1995 in the direction of Radiophysics. Candidate of Physical and Mathematical sciences. Sciences, Senior Researcher of the Kazan Quantum Center KNRTU-KAI. Laureate of the state award of RT in the field of science and technology 2012. Research interests: optical and EPR spectroscopy of rare-earth ions in crystals, coherent and quantum optics, quantum informatics, quantum memory, quantum communications. E-mail: [kigerasimov@mail.ru](mailto:kigerasimov@mail.ru).

**Roman Sergeevich Kirillov** (b. 1990), graduated from Physics faculty of Kazan Federal University in the direction “Radiophysics” in 2013, works as a junior researcher in Microwave Engineering and Radio Telecommunications laboratory of the Institute of Physics of KFU. Research interests: digital signal processing, measurement automation. E-mail: [tarolrr@gmail.com](mailto:tarolrr@gmail.com).

**Ruslan Rustemovich Latypov** (b. 1981), graduated in 2003 with honors from Physics faculty of Kazan State University in the direction of Radiophysics. Candidate of physical and mathematical sciences. Sci., Associate Professor of Radio Physics at Kazan Federal University. Area of scientific interests: propagation of radio waves, automation of scientific experiment, ionosphere, microwave. E-mail: [rlatmail@gmail.com](mailto:rlatmail@gmail.com).

**Oleg Nikolaevich Sherstyukov** (b. 1959), in 1981 graduated from Physical faculty of Kazan State University in the direction of Radiophysics and Electronics. Doctor of Phys.-Math. Sciences, head of Radiophysics chair, Kazan Federal University. Research interests: electro-magnetic waves in media, radio telecommunications, digital signal processing. E-mail: [Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru](mailto:Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru).

**Sergey Andreevich Moiseev** (b. 1957), in 1979 graduated with honors from Physical faculty of Kazan State University in the direction of Radiophysics. Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. of Radio-photonics and Microwave Technologies department, KNRTU-KAI, Director of the Kazan Quantum Center KNRTU-KAI. Research interests: optics and spectroscopy, quantum memory, quantum informatics, quantum communications, single-photon fields, nonlinear optics, soliton theory. E-mail: [s.a.moiseev@kazanqc.org](mailto:s.a.moiseev@kazanqc.org).

---

*Received March 14, 2018. The final version – April 5, 2018.*

---