

# Микроволновая квантовая память на контролируемой частотной гребенке

К.В.Петровнин, Н.С.Перминов, О.Н.Шерстюков, С.А.Моисеев

*Рассмотрен протокол широкополосной квантовой памяти на контролируемой частотной гребенке из спектральных линий кольцевых микроволновых резонаторов, соединенных с общим полосковым волноводом. Изготовлен прототип такой памяти, на котором при комнатной температуре продемонстрировано сохранение микроволновых импульсов с эффективностью ~3%. Полученное экспериментально значение эффективности может быть улучшено до уровня выше 90% при использовании современных микроволновых технологий и проведении экспериментов при гелиевых температурах, что открывает новый путь для создания интегрированной микроволновой квантовой памяти.*

**Ключевые слова:** квантовая информатика, микроволновая квантовая память, квантовая эффективность, контролируемая частотная гребенка, кольцевой резонатор.

## 1. Введение

Разработка высокоэффективной квантовой памяти (КП) и квантового интерфейса имеет большое значение для развития квантовых информационных технологий [1–3]. В последнее десятилетие на этом пути в оптическом диапазоне достигнуты впечатляющие экспериментальные результаты [4–7]; это стимулировало активные исследования по микроволновой КП на электронных спинах в резонаторе, которая рассматривается как один из ключевых элементов в создании универсального сверхпроводящего квантового компьютера [8–10]. Практически значимая КП должна сохранять достаточно много коротких импульсов с высокой эффективностью [11], а также удовлетворять жестким требованиям квантовой обработки многокубитовых состояний и процедуры исправления ошибок [12]. Для реализации долгоживущей многокубитовой КП рассматриваются схемы обратимого сильного взаимодействия однофотонных полей в резонаторе с различными носителями информации [13], например с системой центров азот–вакансия (АВ-центров) в алмазе [14] или редкоземельными ионами в неорганических кристаллах [15]. Однако экспериментальная реализация достаточно высокой квантовой эффективности, наряду с большой информационной емкостью и временем хранения КП, пока остается одной из основных проблем.

Вместе с тем, в последнее время значительные успехи также достигнуты на пути создания высокоэффективных

композиционных схем [13, 16, 17] для управления световыми полями в системе взаимосвязанных резонаторов [18]. Многорезонаторные (МР) системы такого типа успешно используются в качестве оптических линий задержки [19–21], интегрированных в оптоволоконные схемы. Появление высокодобротных резонаторов [22–24] и возможность их интеграция в МР структуры [25] делают подобные системы интересными для реализации широкополосной оптической и микроволновой КП [26–28], поскольку в них при наличии резонаторов с разными частотами формируется широкий рабочий спектральный диапазон. МР схемы позволяют существенно увеличить время хранения сигнала [26–28] и квантовую эффективность КП в спектральном диапазоне [29], значительно превышающем ширину линии моды отдельных резонаторов, а их высокая добротность обеспечивает возможность значительно усиления постоянной связи с резонансными атомными системами [30]. Последние свойства делают МР схемы перспективными для разработки КП и основных элементов [2, 31, 32] универсального квантового компьютера.

Цель настоящей работы – исследование предложенной в [26] схемы КП на контролируемой частотной гребенке из спектральных линий кольцевых резонаторов, соединенных с общим волноводом, которое основано на использовании подходов к КП, применяемых в технике фотонного эха [33–35]. Кольцевые резонаторы интересны своей однонаправленной связью с внешним волноводом, которая удобна для интеграции с внешними устройствами и управления распространением световых полей. Нами изготовлен экспериментальный прототип из пяти кольцевых микроволновых резонаторов, соединенных последовательно с полосковым резонатором, и при комнатной температуре продемонстрировано сохранение широкополосных микроволновых импульсов. На основе полученных результатов обсуждены возможности увеличения эффективности реализованной КП при использовании современных технологий.

## 2. Физическая модель

Исходная идея многорезонаторной схемы КП опирается на подход к КП, основанный на применении фотонного эха [33, 34, 36], и его варианте, использующем атом-

**К.В.Петровнин.** Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ, Россия, 420111 Казань, ул. К.Маркса, 10; Казанский федеральный университет, Россия, 420008 Казань, ул. Кремлевская, 18  
**Н.С.Перминов, С.А.Моисеев.** Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ, Россия, 420111 Казань, ул. К.Маркса, 10; Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр РАН», Россия, 420029 Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7; e-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org

**О.Н.Шерстюков.** Казанский федеральный университет, Россия, 420008 Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 11 июня 2018 г., после доработки – 20 июля 2018 г.

ные системы с периодической спектральной структурой неоднородного уширения резонансного перехода, который известен как AFC-протокол [35]. В отличие от работы [35], в изучаемых нами МР схемах [26, 27] вместо атомной системы используется система кольцевых минирезонаторов, соединенных последовательно с общим волноводом [26–28]. Используя известный формализм квантовой оптики [26, 37] для описания взаимодействия входных ( $a_{in,n}$ ) и выходных ( $a_{out,n}$ ) полей мод в волноводе с полями мод кольцевых резонаторов  $b_n$ , получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} [\partial_t + i(\omega_0 + \Delta_n) + \gamma_n + k_n/2]b_n(t) &= \sqrt{k_n} a_{in,n}(t) \\ + \sqrt{2\gamma_n} f_n(t), \quad a_{in,n}(t) - a_{out,n}(t) &= \sqrt{k_n} b_n(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta_n = \Delta[n - (N + 1)/2]$  – отстройки частот резонаторов от центральной частоты  $\omega_0$ ;  $n \in \{1, \dots, N\}$ ;  $k_n = k$  – константы связи между резонаторами и волноводом;  $\gamma_n = \gamma$  – декремент затухания поля в резонаторах;  $\sqrt{2\gamma_n} f_n(t)$  – дельта-коррелированные силы Ланжевена [28, 37] ( $\langle f_n^+(t) \rangle = \langle f_n^-(t) \rangle = 0$ ,  $\langle f_n^+(t) f_n^-(t') \rangle = \delta(t - t')$ ), вкладом которых в дальнейшем пренебрегаем, концентрируясь лишь на исследовании квантовой эффективности.

Из уравнения (1), используя соотношение для поля в волноводе  $\tilde{a}_{in,n+1}(\omega) = \tilde{a}_{out,n}(\omega) \exp[i(\omega_0 + \omega)(z_{n+1} - z_n)/c]$ , в соответствии с подходом [37] находим выходное поле через передаточную функцию (ПФ)  $S(\nu) = \tilde{a}_{out,N}(\omega)/\tilde{a}_{in,1}(\omega)$ , определяемую как

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \exp[i(\omega_0 + \omega)(z_N - z_1)/c] \\ &\times \prod_{n=1}^N \frac{-k_n/2 + \gamma_n + i(\Delta_n - \omega)}{k_n/2 + \gamma_n + i(\Delta_n - \omega)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega$  – частотная отстройка, отсчитываемая от центральной частоты  $\omega_0$ ;

$$a_{\{in,out\}n}(t) = (2\pi)^{-1/2} \int d\omega \exp[i(\omega_0 + \omega)t] \tilde{a}_{\{in,out\}n}(\omega);$$

$z_n$  – координаты пространственного расположения резонаторов вдоль волновода;  $c$  – скорость распространения микроволнового излучения вдоль полосковой линии. Для рассматриваемого случая  $N = 5$  (и для большего числа резонаторов) рабочей полосой КП является область частот  $\omega \in [-(N - 1)\Delta/2; (N - 1)\Delta/2]$ , где оценка спектральной эффективности  $\eta(\omega) = |S(\omega)|^2$  дается выражением  $\eta \approx \exp(-4\pi\gamma/\Delta)$  для оптимизированной КП [26–30] с выбором параметра связи  $k = \Delta/2$  (при  $\gamma_n = \gamma$  и  $\Delta_n = \Delta[n - (N + 1)/2]$ ) и временем хранения  $T_{\text{echo}} \approx 2\pi/\Delta$ . Появление условия согласования  $k = \Delta/2$  отличает данный тип КП от AFC-протокола на атомах, непрерывно распределенных в пространстве [35], в котором максимально высокая квантовая эффективность реализуется только в пределе бесконечного увеличения постоянной взаимодействия атомов с полем, т. е. при  $k \rightarrow \infty$ .

### 3. Прототип КП на резонаторах

Для тестирования возможности реализации МР КП на системе кольцевых резонаторов нами изготовлен прототип такой памяти, основанный на использовании микроволновых резонаторов на модах шепчущей галереи (МШГ). На рис.1 изображена реализованная полосковая

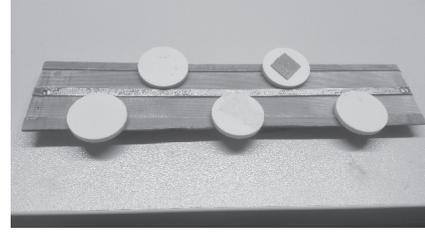


Рис.1. Прототип широкополосной микроволновой МР КП на МШГ-минирезонаторах (пять резонаторов с разными частотами расположены вблизи общего полоскового волновода; диаметр минирезонатора  $\sim 2.5$  см).

схема, содержащая общий волновод, соединенный с пятью МШГ-резонаторами. Диэлектрические резонаторы изготавливались из сегнетоэлектрического керамического материала путем спекания помолы с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  ( $\epsilon = 30-80$ , в данном случае использовался титанат бария  $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ , часто применяемый на практике [38–41]). Для получения материалов с различной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  при изготовлении в помол добавляли примеси стронция и других металлов. Изготовленные из таких материалов диэлектрические резонаторы обладают высокой добротностью (9000 на несущей частоте  $\sim 10$  ГГц фундаментальной моды  $\text{TE}_{011}$ ) и хорошими температурными свойствами. В данной конструкции в качестве волновода использовалась полосковая линия, рядом с которой располагались минирезонаторы. Каждый резонатор был изготовлен для работы на моде  $E_{14|1|0}$  (для расчета геометрических параметров использовался скрипт в программной среде MATLAB). Тонкая подстройка частоты осуществлялась фторопластовыми пластинками, что позволяло изменять частоту без существенного уменьшения добротности резонаторов.

Существенное отличие данной системы от МР системы с объемными композитными резонаторами [28] заключается в принципах работы резонаторов на МШГ-модах и в схеме соединения резонаторов с общим волноводом без связующего широкополосного буфера. Отметим также, что исследуемая система «сжата» по одной координате и обладает псевдо-планарностью, обеспечивающей компактность памяти. Возбуждение мод МШГ-резонаторов достигается за счет близкого расположения их к волноводу. Контроль параметра связи реализуется путем изменения расстояния между волноводом и резонатором. Данная технология связана также с перспективным направлением создания чувствительных сенсоров и узкополосных фильтров [38, 39, 42–44], где микроволновые МШГ-резонаторы являются базовым элементом [40, 41, 45, 46]. На этом пути мы видим дальнейшее развитие исследований микроволновой КП ввиду наличия открытой пространственной геометрии устройства и возможности ее использования в интеграции данной микроволновой технологии как с оптическими, так и с нанометровыми технологиями сверхпроводящего квантового компьютера [1, 17, 47].

### 4. Спектроскопия и эхо-эксперимент

На рис.2 изображен спектр прототипа памяти с пятью МШГ-резонаторами вблизи центральной частоты  $\nu_0 = 9.392$  ГГц. Предварительные эксперименты показали возможность создания качественной периодической гребенки частот минирезонаторов из относительно узких линий

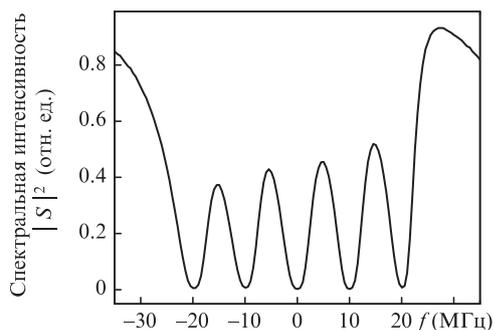


Рис.2. Частотный спектр прототипа памяти на пяти МШГ-минирезонаторах, соединенных с полосковым волноводом.

по сравнению с общей спектральной шириной гребенки частот. Для мод резонаторов было получено характерное значение декремента затухания  $\gamma = \gamma/2\pi = 2.5$  МГц при частотном интервале между ближайшими частотами  $\Delta = \Delta/2\pi = 10$  МГц. Из полученных экспериментальных данных мы вычли относительно постоянный уровень потерь сигналов (~ 50% по интенсивности), обусловленный потерями в диэлектрической подложке линии, а также влиянием дефектов, связанных с изготовлением полосковой линии. Эти дефекты, однако, могут быть почти полностью устранены при заводском изготовлении полосковой линии или при использовании диэлектрического волновода. Теоретическое моделирование изучаемой схемы (как для оптического, так и для микроволнового диапазона) показывает возможность создания высокоэффективной памяти при выполнении оптимального условия связи резонаторов с волноводом ( $k = \Delta/2$ ), упрощающего реализацию схемы [26, 28, 29], что достигается за счет изменения параметра связи  $k$ .

В экспериментах по наблюдению эха нами была достигнута эффективность около 3% для сохранения микроволнового импульса длительностью  $\delta t_{\text{pulse}} = 21$  нс при  $\Delta = 10$  МГц, что согласуется с оценкой эффективности на основе использования решения (2). На рис.3 изображена зависимость нормированной интенсивности  $I(t)/I_0$  от времени  $t$ , на которой видна холостая часть сигнала, прошедшего по волноводу через систему резонаторов без задержки вблизи  $t = 0$ , а также эхо-сигнал, излучаемый с эффективностью  $\eta \sim 3\%$  спустя время задержки  $T_{\text{echo}} = 1/\Delta \approx 100$  нс после холостого сигнала. При этом отсутствие в эксперименте полного согласования констант связи и частотных отстроек, приводящее к появлению холостого сигнала, может быть устранено путем более тонкой настрой-

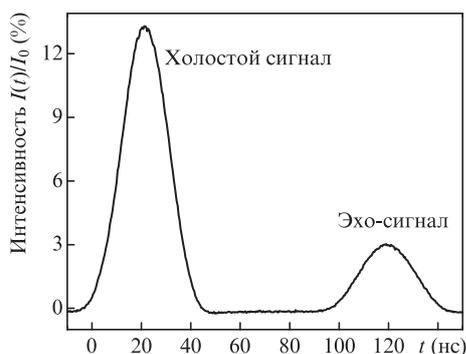


Рис.3. Нормированная интенсивность холостого (первого) сигнала и сигнала эха для широкополосного входного сигнала длительностью 21 нс в зависимости от времени.

ки спектроскопических параметров исследуемой схемы и использования дополнительных резонаторов при необходимости значительного увеличения постоянной связи.

Аналогичные эксперименты нами были поставлены и для других значений частотного интервала  $\Delta$ , при которых сигнал эха наблюдался с близким значением квантовой эффективности, а время его излучения также подчинялось условию  $T_{\text{echo}} = 1/\Delta$  (рис.4).

При использовании планарных сверхпроводниковых технологий [38, 39, 44] и проведении эксперимента в условиях низких температур ( $T \sim 10^{-2}$  К для квантового режима работы) при добротности  $Q \sim 10^6$  ( $\gamma \leq 10^{-3} - 10^{-4}$  МГц) значение эффективности  $\eta \approx \exp(-4\pi\gamma/\Delta)$  может достигать 90% и более. При этом существенное увеличение времени хранения в единицах длительности сигнальных импульсов возможно путем увеличения числа резонаторов в данной МР схеме. Создание такого устройства потребует также разработки экспериментальных методов точной настройки параметров МР системы и связи резонаторов с общим волноводом, что должно осуществляться технически при работе в условиях низких температур.

Наличие «зон молчания» между загрузкой входного сигнала в МР систему и появлением эхо-сигнала говорит о том, что энергия входного сигнала полностью сосредоточена в МШГ-минирезонаторах до момента излучения сигнала эха  $t \sim T_{\text{echo}}$ . Последнее означает наличие принципиальной возможности использования «зон молчания» для реализации переноса запасенной энергии и информации о параметрах сохраненного широкополосного излучения из резонаторов в квантовые системы, например в системы электронно-ядерных спинов, обладающие большим временем когерентности, что позволит значи-

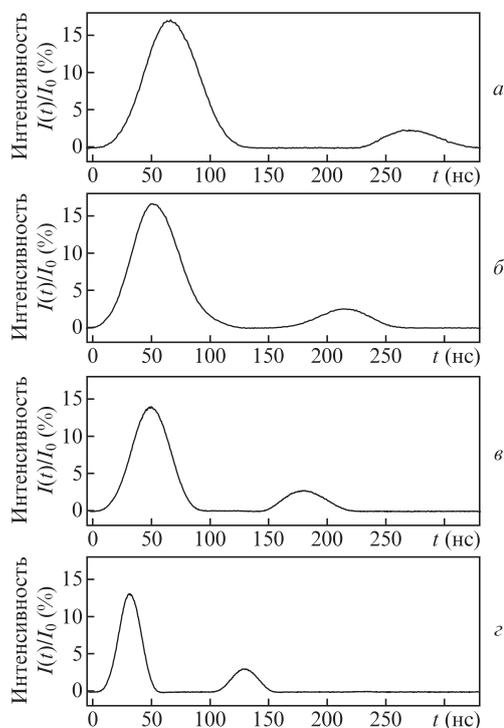


Рис.4. Интенсивность холостого сигнала и сигнала эха для широкополосного входного сигнала в зависимости от времени при разных значениях частотной отстройки  $\Delta$ , длительности микроволнового импульса  $\delta t_{\text{pulse}}$  и центральной частоты  $\nu_0$ :  $\Delta = 5$  МГц,  $\delta t_{\text{pulse}} = 52$  нс,  $\nu_0 = 9.392$  ГГц (а), 6 МГц, 42 нс, 9.397 ГГц (б), 7.5 МГц, 36 нс, 9.402 ГГц (в) и 10 МГц, 21 нс, 9.404 ГГц (г) (интенсивность сигнала нормирована на интенсивность входного сигнала).

тельно увеличить время хранения КП в такой МР системе. В этой ситуации исходная схема многорезонаторной КП будет играть роль широкополосного квантового интерфейса. Отметим, что открытая геометрия реализованной схемы дает возможность использования различных методов контроля параметров минирезонаторов и способов их связи с волноводом для реализации удобного соединения фотонных кубитов с ансамблями долгоживущих электронных спинов и контроля их динамики.

## 5. Заключение

Изготовленный экспериментальный прототип КП на кольцевых МШГ-минирезонаторах показал возможность сохранения широкополосных сигналов с эффективностью 3%. Наличие «зоны молчания» между загрузкой входного излучения и эхо-сигналом указывает на возможность использования многорезонаторной КП как широкополосного квантового интерфейса для обратимого переноса квантового состояния входного сигнала в электронно-ядерные спиновые системы в целях создания долгоживущей композитной КП. При этом открытая геометрия реализованной схемы позволяет применять различные методы контроля параметров минирезонаторов и их связи с волноводом. Продемонстрированное в настоящей работе значение квантовой эффективности может быть улучшено до уровня выше 90% при охлаждении МР системы до гелиевых температур, что позволяет увеличить добротность резонаторов на несколько порядков. Это открывает новый путь для создания интегрированной микроволновой квантовой памяти на базе существующих сверхпроводниковых технологий. Особый интерес вызывает также реализация продемонстрированной волноводной МР схемы в оптическом диапазоне частот, в которой уже можно будет непосредственно сохранять однофотонные поля при комнатной температуре, что является темой последующих экспериментальных исследований.

Работа частично выполнена за счет средств, выделенных 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., О.Н.Ш.), частично поддержана Российским научным фондом (грант №14-12-01333-П; основная идея и проведение эксперимента – С.А.М., К.В.П.), а также частично поддержана в рамках бюджетной темы лаборатории Квантовой оптики и информатики КФТИ ОСП ФИЦ КазНЦ РАН (анализ данных – С.А.М., Н.С.П.). Н.С.П. выражает благодарность К.И.Герасимову за ценные обсуждения вопросов спектроскопии микроволновых кольцевых резонаторов.

1. Devoret M.H., Schoelkopf R.J. *Science*, **339**, 1169 (2013).
2. Kurizki G., Bertet P., Kubo Y., Molmer K., Petrosyan D., Rabl P., Schmiedmayer J. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **112**, 3866 (2015).
3. Hammerer K., Sorensen A.S., Polzik E.S. *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 1041 (2010).
4. Hedges M.P., Longdell J.J., Li Y., Sellars M.J. *Nature*, **465**, 1052 (2010).
5. Hosseini M., Campbell G., Sparkes B.M., Lam P.K., Buchler B.C. *Nature Phys.*, **7**, 794 (2011).
6. Cho Y.-W., Campbell G.T., Everett J.L., Bernu J., Higginbottom D.B., Cao M.T., Geng J., Robins N.P., Lam P.K., Buchler B.C. *Optica*, **3**, 100 (2016).
7. Hsiao Y.-F., Tsai P.-J., Chen H.-S., Lin S.-X., Hung C.-C., Lee C.-H., Chen Y.-H., Chen Y.-F., Yu I. A., Chen Y.-C. *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 183602 (2018).

8. Grezes C., Julsgaard B., Kubo Y., Stern M., Umeda T., Isoya J., Sumiya H., Abe H., Onoda S., Ohshima T., Jacques V., Esteve J., Vion D., Esteve D., Molmer K., Bertet P. *Phys. Rev. X*, **4**, 021049 (2014).
9. Gerasimov K.I., Moiseev S.A., Morosov V.I., Zaripov R.B. *Phys. Rev. A*, **90**, 042306 (2014).
10. Flurin E., Roch N., Pillet J.D., Mallet F., Huard B. *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 090503 (2015).
11. Gambetta J.M., Chow J.M., Steffen M. *NPJ Quantum Inform.*, **3**, 2 (2017).
12. Taminiau T.H., Cramer J., van der Sar T., Dobrovitski V.V., Hanson R. *Nature Nanotechnology*, **9**, 171 (2014).
13. Roy D., Wilson C.M., Firstenberg O. *Rev. Mod. Phys.*, **89**, 021001 (2017).
14. Jiang L., Hodges J.S., Maze J.R., Maurer P., Taylor J.M., Cory D.G., Hemmer P.R., Walsworth R.L., Yacoby A., Zibrov A.S., Lukin M.D. *Science*, **326**, 267 (2009).
15. Zhong M., Hedges M.P., Ahlefeldt R.L., Bartholomew J.G., Beavan S.E., Wittig S.M., Longdell J.J., Sellars M.J. *Nature*, **517**, 177 (2015).
16. Hartmann M., Brando F., Plenio M. *Laser & Photon. Rev.*, **2**, 527 (2008).
17. Gu X., Kockum A.F., Miranowicz A., Liu Y.-x., Nori F. *Phys. Rep.*, **718-719**, 1 (2017).
18. Li Y., Abolmaali F., Allen K.W., Limberopoulos N.I., Urbas A., Rakovich Y., Maslov A.V., Astratov V.N. *Laser & Photon. Rev.*, **11**, 1600278 (2017).
19. Heebner J.E., Boyd R.W. *J. Mod. Opt.*, **49**, 2629 (2002).
20. Xia F., Sekaric L., Vlasov Y. *Nature Photon.*, **1**, 65 EP (2006).
21. Yariv A., Xu Y., Lee R.K., Scherer A. *Opt. Lett.*, **24**, 711 (1999).
22. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 147154 (1999).
23. Megrant A., Neill C., Barends R., Chiaro B., Chen Y., Feigl L., Kelly J., Lucero E., Mariani M. O'Malley P.J.J., Sank D., Vainsencher A., Wenner J., White T.C., Yin Y., Zhao J., Palmstrom C.J., Martinis J.M., Cleland A.N. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 113510 (2012).
24. Kobe O.B., Chuma J., Jamisola R.Jr., Chose M. *Eng. Sci. Technology*, **20**, 460 (2017).
25. Armani D.K., Kippenberg T.J., Spillane S.M., Vahala K.J. *Nature*, **421**, 925 EP (2003).
26. Moiseev E.S., Moiseev S.A. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 015202 (2017).
27. Moiseev S.A., Gubaidullin F.F., Kirillov R.S., Latypov R.R., Perminov N.S., Petrovkin K.V., Sherstyukov O.N. *Phys. Rev. A*, **95**, 012338 (2017).
28. Moiseev S.A., Gerasimov K.I., Latypov R.R., Perminov N.S., Petrovkin K.V., Sherstyukov O.N. *Sci. Rep.*, **8**, 3982 (2018).
29. arXiv preprint arXiv:1706.00592 (2017).
30. arXiv preprint arXiv:1711.07014 (2017).
31. Моисеев С.А., Андрианов С.Н. *Оптика и спектроскопия*, **121**, 954 (2016).
32. Kockum A.F., Johansson G., Nori F. *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 140404 (2018).
33. Moiseev S.A., Kroll S. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 173601 (2001).
34. Moiseev S.A. *J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Phys.*, **40**, 3877 (2007).
35. de Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M.U., Simon C., Gisin N. *Nature*, **456**, 773 (2008).
36. Tittel W., Afzelius M., Chaneliere T., Cone R., Kroll S., Moiseev S., Sellars M. *Laser & Photon. Rev.*, **4**, 244 (2009).
37. Walls D., Milburn G. *Quantum Optics* (Berlin, Heidelberg: Springer, 2008).
38. Chiou Y.-C., Yang P.-S., Kuo J.-T., Wu C.-Y. *Progress Electromagnetics Research*, **108**, 23 (2010).
39. Lin Z., Chu Q.-X. *Progress Electromagnetics Research*, **103**, 271 (2010).
40. Laemmle B., Schmalz K., Scheytt J.C., Weigel R., Kissinger D. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **61**, 2185 (2013).
41. Sebastian M., Jantunen H., Ubic R. *Microwave Materials and Applications* (New York: Wiley, 2017).
42. Marpaung D., Roeloffzen C., Heideman R., Leinse A., Sales S., Capmany J. *Laser & Photon. Rev.*, **7**, 506 (2013).
43. Bijumon P., Mohanan P., Sebastian M. *Mat. Lett.*, **57**, 1380 (2003).
44. Nenashva E., Kartenko N. *J. Europ. Ceramic Soc.*, **21**, 2697 (2001).
45. Volyanskiy K., Salzenstein P., Tavernier H., Pogurmirskiy M., Chembo Y.K., Larger L. *Opt. Express*, **18**, 22358 (2010).
46. Marpaung D., Morrison B., Pagani M., Pant R., Choi D.-Y., Luther-Davies B., Madden S.J., Eggleton B.J. *Optica*, **2**, 76 (2015).
47. Brecht T., Pfaff W., Wang C., Chu Y., Frunzio L., Devoret M.H., Schoelkopf R.J. *NPJ Quantum Inform.*, **2**, 16002 EP (2016).