

УДК 530.145.1

СЛИЯНИЕ И ОТТАЛКИВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ МОД В МНОГОРЕЗОНАТОРНОЙ ПАМЯТИ

© 2019 г. К. В. Петровни^{1,2}, Н. С. Перминов^{1,3}, О. Н. Шерстюков², С. А. Моисеев^{1,3, *}

¹Казанский квантовый центр, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ” (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Казанский (Приволжский) федеральный университет”, Казань, Россия

³Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

*E-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Изучено слияние и отталкивание собственных мод в многорезонаторной микроволновой памяти, интегрированной в волноводно-резонаторную систему. На основе теоретического моделирования и экспериментальных данных объяснена картина слияния собственных мод и показана возможность управления спектральными характеристиками памяти.

DOI: 10.1134/S0367676519030311

ВВЕДЕНИЕ

Богатая динамика многочастичных систем с большим количеством управляемых параметров дает широкие возможности для конструирования композитных квантовых схем с заранее определенными свойствами. В данной работе мы проводим спектроскопическое исследование многорезонаторной (МР) схемы квантовой памяти (КП) [1, 2], в которой перестраиваемые по частоте минирезонаторы, помещенные в единый широкополосный волноводный резонатор, играют роль носителей запоминаемой информации. Исходная идея схемы опирается на подход к КП, основанный на фотонном эхе [3], и его варианте, использующем атомные системы с периодической спектральной структурой неоднородного уширения резонансного перехода, который известен как AFC-протокол [4]. В отличие от AFC, в рассматриваемой нами МР-схеме [1] вместо атомной системы мы используем систему из N минирезонаторов, которые расположены в общем резонаторе периодически вдоль его оси с расстоянием в половину длины волны между соседними минирезонаторами и образуют периодическую дискретную частотную структуру узких резонансных линий.

Реализация эффективной квантовой памяти во многом связана с возможностью управления

спектральными характеристиками памяти и МР КП позволяет реализовать память с практически произвольными характеристиками за счет контроля параметров частот и связей. Среди наиболее значимых спектральных конфигураций можно выделить вариант с максимальной эффективностью, который реализуется в небольшой окрестности параметров, отвечающих слиянию наблюдаемых пиков линий в спектре КП, а также слиянию собственных мод. В данной работе мы экспериментально исследуем слияние и отталкивание собственных мод МР КП на примере 2-ух резонаторной системы, а также показываем механизм изменения внутренних спектрально-топологических характеристик КП в зависимости от параметров связи минирезонаторов с общим широкополосным резонатором.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Общая теоретическая модель рассматриваемой памяти соответствует КП на фотонном эхе в резонаторе [5], которая получила дальнейшее распространение на системы минирезонаторов [6]. Используя известный подход [7] к описанию света в открытом одномодовом резонаторе для рассматриваемой нами МР-схемы, мы находим

уравнение для моды поля общего широкополосного резонатора $a(t)$:

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

где $a_{in}(t) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int dv e^{-ivt} f_v$ – входной импульс, f_v – спектральный профиль входного импульса, для которого выполняется условие нормировки $\int dv |f_v|^2 = E_{tot}$ (полная энергия входного поля), v – круговая частота, отсчитанная от центральной частоты излучения $\omega_0 = 9770$, Δ_n – частотные отстройки минирезонаторов, $n \in \{1, \dots, N\}$ ($N = 2$), γ_n – декремент затухания n -ого минирезонатора, $\{\gamma_r, \omega_r\}$ – декремент затухания и сдвиг частоты широкополосного резонатора, k – коэффициент связи внешнего волновода с широкополосным резонатором, g_n^0 – константа связи мод общего резонатора и n -ого минирезонатора (все параметры даны в единицах $[c^{-1}] \equiv [2\pi \cdot \text{МГц}]$).

Из уравнения (1) находим выходное поле $a_{out}(t) = \sqrt{k}a(t) - a_{in}(t)$ в соответствии с подходом [7] через передаточную функцию (ПФ) $S(v) = \tilde{a}_{out}(v)/\tilde{a}_{in}(v)$, имеющую в нашем случае форму

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

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

В общем случае ПФ (2) обладает очень сложным спектральным поведением из-за дискретного расположения частот мод минирезонаторов и их сильного взаимодействия через поле общего резонатора. Однако ниже мы показываем, что при определенных условиях ПФ реальной системы может приобретать оптимальные для квантовых вычислений [8] спектрально-топологические свойства, соответствующие суперэффективной КП, которые реализуются в небольшой окрестности параметров [9, 10], отвечающих слиянию наблюдаемых пиков линий в спектре КП, а также слиянию собственных мод. Наиболее наглядно слияние и отталкивание собственных мод МР КП можно продемонстрировать на примере 2-ух резонаторной системы ($N = 2$).

СПЕКТРОСКОПИЯ МР КП

Передаточная функция $S(v)$ определяет все свойства электромагнитного поля, переизлучаемого системой минирезонаторов во входной канал, и задается полностью параметрами внутренних минирезонаторов и общего широкополосного резонатора. Для экспериментального определения $S(v)$ мы использовали векторный анализатор Agilent PNA-X с высоким частотным разрешением. В условиях эксперимента мы могли менять расстояние между частотными отстройками минирезонаторов Δ в пределах от 0 до 10 $[2\pi \cdot \text{МГц}]$, а также варьировать параметр связи k общего резонатора с внешним волноводом в пределах от 50 до 120 $[2\pi \cdot \text{МГц}]$. Отметим, что в силу обнаруженной необычайно высокой спектральной чувствительности системы к внешним изменениям, не все доступные режимы работы системы (например $k < 80$ и $\Delta < 5$) могли быть достоверно измерены векторным анализатором. Поэтому наблюдение последних стадий слияния линий в спектре КП, когда параметры связи k и отстройки Δ малы, осложнено. Последнее представляет собой отдельную техническую проблему, решение которой требует разработки узкоспециализированных измерительных устройств. Поэтому нами для регистрации полей в экспериментах по спектроскопии с малыми значениями k и Δ использовано самодельное устройство на основе диодного детектора и стандартного осциллографа, характеристики которого калибровали по высокоточному векторному анализатору Agilent PNA-X, а в качестве источника поля выступал векторный генератор сигналов Agilent E8267D. Эта схема дает достаточно надежные результаты (погрешность измерений в пределах 2%) и апробирована как в экспериментах по спектроскопии, так и в экспериментах с импульсными микроволновыми полями [1].

ОТТАЛКИВАНИЕ И СЛИЯНИЕ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ КП

При характерных значениях параметров $k = 50 - 120$, $\gamma_r = 23$, $\omega_r = 0 - 40$, $\gamma = \langle \gamma_n \rangle = 1$, $g = \langle g_n^0 \rangle = 6$, $\Delta = \langle \Delta_{n+1} - \Delta_n \rangle = 6$ мы экспериментально наблюдали эффекты отталкивания 2 линий минирезонаторов влево широкой линией общего резонатора (рис. 1а), движущейся справа налево (ω_r менялось от 40 до 25 и не показана на рисунке). При $\omega_r = 0$ и уменьшении k от 120 до 50 наблюдался эффект слияния видимых линий спектра в одну композитную линию (рис. 2б). При этом отметим, что собственные моды КП, определяемые не как пики в спектре, а как действительные части полюсов ПФ ($denom(S(v)) = 0$) для нашей экспериментальной системы не сливаются (только

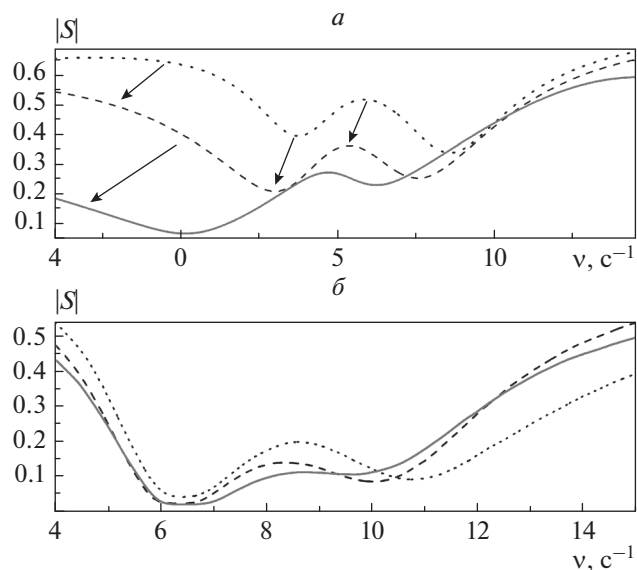


Рис. 1. Оттапливание (а) и слияние (б) линий в спектре МР КП при изменении ω_r (а) и k (б).

приближаются друг к другу (рис. 2в)) ввиду большого значения параметра потерь $\gamma_r = 23$, то есть линии минирезонаторов уширяются из-за γ_r и эффект слияния собственных мод трудно наблюдать. Для его установления нужна расшифровка параметров по спектру.

ПОЛЮСЫ ПФ И УСЛОВИЕ СЛИЯНИЕ СОБСТВЕННЫХ МОД КП

Для случая $\gamma_r = 23$ моделирование спектра хорошо согласуется с экспериментальными данными и не приведено на рисунках, при этом слияния собственных мод не происходит, как это видно из рис. 2в. Поэтому мы выполнили теоретическое моделирование слияния линий в ПФ (1) для случая $\gamma_r = 5$ (рис. 2а), когда также наблюдается слияние собственных мод (рис. 2в) для небольшой области $k \in [29.5; 31.4]$. Для нашей ситуации равенство (слияние) собственных мод (действительных частей полюсов ПФ) эквивалентно равенству соответствующих комплексных полюсов

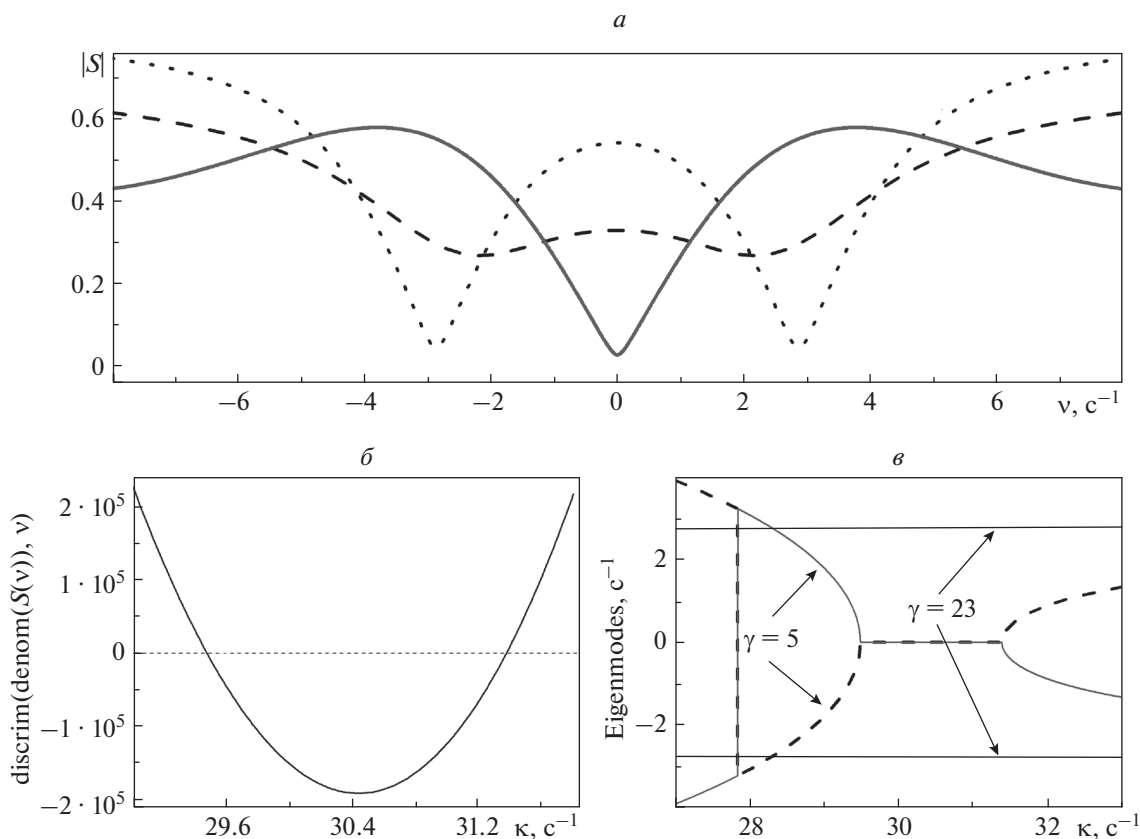


Рис. 2. Слияние линий в спектре МР КП для $\gamma_r = 5$ при уменьшении k (а), сопровождаемое слиянием собственных мод (в) в полюсе ПФ (б).

ПФ, так как мнимые части полюсов ПФ совпадают. Голоморфное условие равенства полюсов (или как говорят “возникновение полюса 2-ого порядка”, или “наличие кратных корней знаменателя ПФ”) определяется условием равенства 0 дискриминанта знаменателя ПФ, то есть условием $\text{discrim}(\text{denom}(S(v)), v) = 0$ (см. рис. 2б). Последнее условие может эффективно использоваться для мониторинга и поиска точки слияния собственных мод при наличии расшифрованных по эксперименту спектроскопических параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для модели широкополосной КП на системе минирезонаторов, интегрированной в волновоодно-резонаторную систему, экспериментально изучен процесс слияния линий минирезонаторов в спектре, обусловленный изменением параметров общего широкополосного резонатора. По экспериментальным данным идентифицированы внутренние параметры 2-резонаторной схемы, изучены процессы отталкивания и слияния собственных мод, а также определены условия слияния собственных мод для МР КП.

Как видно из эксперимента и моделирования, контроль и слияние собственных мод эффективно реализуются в широком диапазоне параметров, что делает МР-систему удобной для осуществления спектрального контроля и эффективного преобразования сохраняемых широкополосных микроволновых полей. Гибкий спектральный контроль практически всех характеристик МР КП и возможность быстрого изменения ее спектрально-топологических характеристик открывают путь для использования МР КП как памяти, интерфей-

са и предвычислителя в схеме универсального квантового компьютера.

Работа частично выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров (экспериментальная часть), частично поддержана грантом РФФИ № 18-42-160007 (базовая идея и анализ результатов), а также частично поддержана в рамках бюджетной темы лаборатории Квантовой оптики и информатики КФТИ ОСП ФИЦ КазНЦ РАН (численное моделирование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moiseev S.A., Gerasimov K.I., Latypov R.R. et al.* // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 3982.
2. *Moiseev S.A., Gubaidullin F.F., Kirillov R.S. et al.* // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. P. 012338.
3. *Moiseev S.A.* // J. Phys. B. 2007. V. 40. P. 3877.
4. *de Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M.U. et al.* // Nature. 2008. V. 456. P. 773.
5. *Moiseev S.A., Andrianov S.N., Gubaidullin F.F.* // Phys. Rev. A. 2010. V. 82. Art. no. 022311.
6. *Moiseev E.S., Moiseev S.A.* // Las. Phys. Lett. 2017. V. 14. Art. no. 015202.
7. *Walls D.F., Milburn G.J.* Quantum optics. 2nd ed., Berlin: Springer-Verlag, 2008, 424 p.
8. *Hammerer K., Sørensen A.S., Polzik E.S.* // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. P. 1041.
9. *Perminov N.S., Moiseev S.A.* // arXiv preprint. 2017. arXiv:1706.00592.
10. *Perminov N.S., Tarankova D.Y., Moiseev S.A.* // arXiv preprint. 2017. arXiv:1711.07014.