

УДК 530.145.1

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОННЫХ МОЛЕКУЛ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ

© 2019 г. Н. С. Перминов^{1,2}, К. В. Петровнин¹, Д. Ю. Таранкова³, С. А. Моисеев^{1,2}. *

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

²Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ”,
Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, Казань, Россия

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

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.

После доработки 20.07.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Предложен пошаговый метод оптимизации многорезонаторной квантовой памяти на основе системы взаимодействующих кольцевых резонаторов, связанных с общим волноводом. Наша схема оптимизации демонстрирует эффективный и надежный способ реализации сверхширокополосной спектрально улучшенной квантовой памяти на чипе.

DOI: 10.1134/S0367676519120214

ВВЕДЕНИЕ

Конструирование многочастичных квантовых систем [1, 2] на основе систем связанных резонаторов, получивших название “фотонных молекул” (ФМ) [3], позволяет создавать резонансные схемы с заранее заданными спектральными свойствами [4–6]. Появление высокодобротных микрорезонаторов [7] и их интеграция в многорезонаторные (МР) структуры [8] делает ФМ интересными для использования в схемах квантовой памяти (КП) [9–11], в которых резонаторы могут иметь разные частоты. Такие схемы демонстрируют возможность значительного увеличения рабочего спектрального диапазона КП, а высокая добротность резонаторов позволяет значительно усиливать постоянные связи как между соседними резонаторами, так и с находящимися в резонаторах атомными системами. Последние свойства делают КП данного типа перспективной для использования в схемах универсального квантового компьютера [12–15].

В настоящей работе представлена разработка новой схемы блочной КП, состоящей из двух простейших ФМ, расположенных вдоль волновода. Мы находим оптимальные параметры связи резонаторов в ФМ и связи ФМ с волноводом для

достижения высокой квантовой эффективности в широком спектральном диапазоне.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исходная идея рассматриваемой схемы КП основана на технике фотонного эха [16–18], называемой AFC-протокол [19], и ее реализации в оптимальном резонаторе [20, 21]. В отличие от [19], в изучаемых нами МР-схемах вместо атомной системы используется система из ФМ, связанных с общим волноводом [9–11]. Каждая ФМ состоит из двух связанных друг с другом одинаковых резонаторов с совпадающими частотами (рис. 1).

Используя известный формализм квантовой оптики [22] для описания такой единичной ФМ [9, 20], получим следующие уравнения для входной $a_1(t)$ и выходной $a_2(t)$ световых мод в волноводе (рис. 1) и мод кольцевых резонаторов $b_1(t)$, $b_2(t)$:

$$\begin{aligned} [\partial_t + id_1 + k/2]b_1(t) + igb_2(t) &= \sqrt{k}a_1(t), \\ [\partial_t + id_2]b_2(t) + igb_1(t) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_1(t) - a_2(t) = \sqrt{k}b_1(t)$, $\{d_1 = 0, d_2 = 0\}$ — отстройки микрорезонаторов от центральной ча-

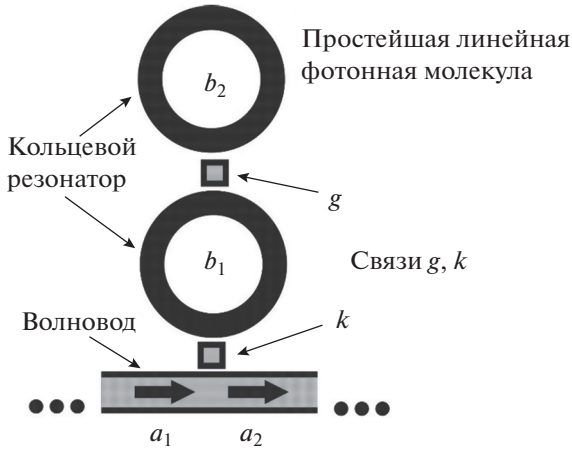


Рис. 1. Простейшая линейная фотонная молекула из двух одинаковых кольцевых резонаторов, связанных с внешним волноводом через один из резонаторов. Связь между первым резонатором и внешним волноводом k , связь между резонаторами g .

стоты ν_0 , g – константа связи между резонаторами, k – константы связи между резонаторами и волноводом, а также мы предполагаем, что потери в резонаторах пренебрежимо малы на рассматриваемых временах. Для исследуемой системы начальное и конечное однофотонные квантовые состояния описываются как $|\Psi_{in,out}\rangle = \int dt e^{-i\nu_0 t} a_{1,2}^\dagger(t) |0\rangle$, а ненулевые коммутационные соотношения для операторов $\{a_n(t), b_n(t)\}$ имеют вид $[a_n(t), a_n^\dagger(t')] = \delta(t - t')$, $[b_n(t), b_n^\dagger(t)] = 1$.

Используя фурье-преобразование, из системы уравнений (1) находим выходное поле $a_2(t)$ через передаточную функцию (ПФ) $S(\nu)$, определяемую через соотношение для операторов $\tilde{a}_2(\nu) = S(\nu) \tilde{a}_1(\nu)$:

$$S(\nu) = (g^2 - \nu^2 + i\nu k/2) / (g^2 - \nu^2 - i\nu k/2), \quad (2)$$

где $a_{1,2}(t) = (2\pi)^{-1/2} \int d\nu e^{-i\nu t} \tilde{a}_{1,2}(\nu)$, а $T(\nu) = \text{Arg}(S(\nu))/\nu$ – функция групповой задержки (или времени задержки, т.е. длительности памяти) от частоты ν .

ПРОЦЕДУРА ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОННЫХ МОЛЕКУЛ

Максимально качественную квантовую память в заданном спектральном диапазоне обеспечивает максимально точное выполнение условия $T(\nu) = T(0)$ [14, 15], эквивалентное условию

$$\partial_\nu^2 T(0) = 0 \quad (3)$$

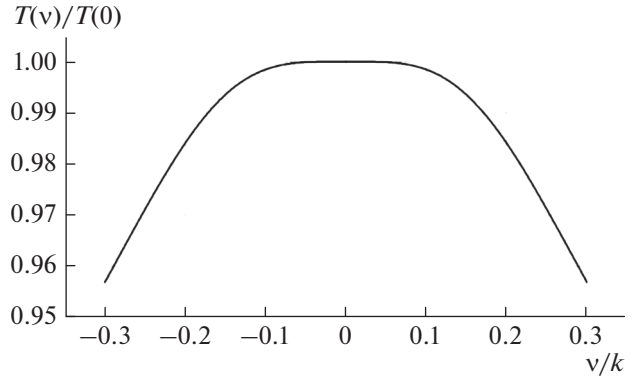


Рис. 2. Групповая задержка $T(\nu)/T(0)$ для квантовой памяти, состоящей из пары фотонных молекул с разными частотами, расположенных вдоль одного волновода.

для ПФ $S(\nu)$ из (2), откуда на первом шаге оптимизации мы имеем первое условие согласования $g = k/\sqrt{12}$ для единичной ФМ.

На втором шаге мы осуществляем спектральное склеивание двух ФМ, расположенных вдоль волновода на расстоянии z и имеющих разные частоты, отстоящие от центральной частоты на $\pm d$. Полная передаточная функция такой пары ФМ имеет вид $S_{total}(\nu) = S(\nu - d) \cdot \exp\{i\nu z/c\} S(\nu + d)$, где c – скорость света в волноводе. Применяя условие (3) уже для $S_{total}(\nu)$ и учитывая первое условие согласования, мы находим второе оптимальное условие, дающее следующие оптимальные параметры:

$$g = k/\sqrt{12}, \quad d = 0.27k. \quad (4)$$

На рис. 2 показана нормализованная групповая задержка $T(\nu)/T(0)$ для всей составной системы из двух ФМ при выполнении условий согласования (4). Мы видим, что в центральном спектральном интервале, имеющем относительный размер $g/k \approx 0.6$, групповая задержка имеет ярко выраженное плато (условие $T(\nu) = T(0)$ хорошо выполняется), что соответствует эффективному спектральному диапазону рабочей памяти $0.6k$. Также отметим, что, увеличив количество используемых резонаторов, можно повысить качество памяти [15] и существенно расширить ее рабочий диапазон, располагая вдоль одного волновода множество таких систем из ФМ с разными частотами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Такая пошаговая оптимизация проста и удобна для экспериментальной реализации, а также не требует использования ресурсоемких методов оптимизации. Предложенная нами схема памяти

на фотонных молекулах открывает путь для сверхширокополосной спектрально улучшенной квантовой памяти на чипе.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 18-42-160007 (базовая идея и анализ результатов – С.А.М., К.В.П., Н.С.П.) а также частично поддержана в рамках бюджетной темы лаборатории квантовой оптики и информатики КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН (проект № 217-2018-0005 – численное моделирование – Н.С.П., Т.Д.Ю.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartmann M.J., Brandao F.G.S.L., Plenio M.B.* // *Las. Photon. Rev.* 2008. № 2. P. 527.
2. *Roy D., Wilson C.M., Firstenberg O.* // *Rev. Mod. Phys.* 2017. V. 89. № 2. Art. № 021001.
3. *Li Y., Abolmaali F., Allen K.W., Limberopoulos N.I. et al.* // *Las. Photon. Rev.* 2017. V. 11. № 2. Art. № 1600278.
4. *Heebner J.E., Boyd R.W.* // *J. Mod. Opt.* 2002. V. 49. № 14–15. P. 2629.
5. *Xia F., Sekaric L., Vlasov Y.* // *Nat. Photon.* 2007. V. 1. № 1. P. 65.
6. *Yariv A., Xu Y., Lee R.K., Scherer A.* // *Opt. Lett.* 1999. V. 24. № 11. P. 711.
7. *Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S.* // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1999. V. 16. № 1. P. 147.
8. *Armani D.K., Kippenberg T.J., Spillane S.M., Vahala K.J.* // *Nature.* 2003. V. 421. № 6926. P. 925.
9. *Moiseev E.S., Moiseev S.A.* // *Laser Phys. Lett.* 2017. V. 14. № 1. Art. № 015202.
10. *Moiseev S.A., Gubaidullin F.F., Kirillov R.S. et al.* // *Phys. Rev. A.* 2017. V. 95. № 1. Art. № 012338.
11. *Moiseev S.A., Gerasimov K.I., Latypov R.R. et al.* // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 3982.
12. *Kurizki G., Bertet P., Kubo Y. et al.* // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2015. V. 112. P. 3866.
13. *Моисеев С.А., Андрианов С.Н.* // *Опт. и спектроск.* 2016. Т. 121. № 6. С. 954; *Moiseev S.A., Andrianov S.N.* // *Opt. Spectrosc.* 2016. V. 121. № 6. P. 886.
14. *Perminov N.S., Tarankova D.Yu., Moiseev S.A.* // *Las. Phys. Lett.* 2018. V. 15. № 12. Art. № 125203.
15. *Perminov N.S., Moiseev S.A.* // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 1568.
16. *Moiseev S.A., Kröll S.* // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87. № 17. P. 173601.
17. *Moiseev S.A.* // *J. Phys. B.* 2007. V. 40. № 19. P. 3877.
18. *Tittel W., Afzelius M., Chanelière T. et al.* // *Las. Photon. Rev.* 2009. V. 4. № 2. P. 244.
19. *De Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M.U. et al.* // *Nature.* 2008. V. 456. № 7223. P. 773.
20. *Moiseev S.A., Andrianov S.N., Gubaidullin F.F.* // *Phys. Rev. A.* 2010. V. 82. № 2. Art. № 022311.
21. *Afzelius M., Simon C.* // *Phys. Rev. A.* 2010. V. 82. № 2. Art. № 022310.
22. *Walls D.F., Milburn G.J.* *Quantum optics.* Berlin: Springer Science & Business Media, 2008. 424 p.