

Нанопотонный квантовый компьютер на основе атомного квантового транзистора

С.Н.Андрианов, С.А.Моисеев

Предложена схема квантового компьютера на основе нанопотонных элементов: двух шин в виде нановолноводных резонаторов, двух наноразмерных блоков многоатомной многокубитовой квантовой памяти и набора нанопроцессоров в виде фотонных квантовых транзисторов, содержащих по два нановолноводных кольцевых резонатора, связанных между собой через квантовую точку. Теоретически изучены режимы работы нанопроцессорных фотонных квантовых транзисторов и продемонстрировано выполнение основных логических операций при работе с ними. Также обсуждаются перспективы предложенного нанопотонного квантового компьютера для работы в высокоскоростных волоконно-оптических сетях.

Ключевые слова: квантовый компьютер, квантовая память, нановолноводный кольцевой резонатор, квантовая точка, квантовые логические вентили.

1. Введение

Выбор и разработка физической схемы универсально квантового компьютера и небольших квантовых вычислителей остается в последние десятилетия актуальной проблемой теоретических и экспериментальных исследований. В настоящее время все большее внимание уделяется построению гибридной схемы квантового компьютера, которая может содержать несколько квантовых процессоров и многокубитовую квантовую память, имеющие различные физические носители. В частности, такая схема активно разрабатывается для компьютера на сверхпроводящих кубитах [1–4]. Несмотря на впечатляющие результаты, по-прежнему непросто добиться значительного подавления эффектов декогеренции у таких кубитов [5], что тормозит дальнейший прогресс в разработке данного компьютера. Возникшие трудности стимулируют поиск новых многочастичных кубитов, имеющих большое время декогеренции (см., напр., [6, 7] и приведенные в них ссылки), а также более быстрых способов реализации квантовых вычислений. В последнем случае нам представляется перспективным использование фотонных систем, которые, как известно, способны значительно ускорить выполнение процессов обработки информации благодаря безынерционности фотонов [8]. Кроме того,

фотонные кубиты непосредственно применяются в квантовых линиях связи и поэтому не нуждаются в дополнительном преобразовании при использовании фотонного квантового компьютера в составе квантовой сети.

Основным вариантом фотонного квантового компьютера является линейный квантовый компьютер [9–11]. Однако работа его квантовых вентилях имеет вероятностный характер, и поэтому для его устойчивого функционирования требуется слишком большое количество физических кубитов [12]. Данные трудности обусловлены невозможностью непосредственного использования фотонов для выполнения двухкубитовых операций, таких как контролируемое отрицание (CNOT), или контролируемое вращение фазы, поскольку фотоны крайне слабо взаимодействуют друг с другом в обычных условиях. Для решения этой задачи в последнее десятилетие прилагаются значительные усилия, направленные на поиск способов существенного усиления фотон-фотонных взаимодействий в различных резонансных атомных системах, например с использованием эффекта взаимной фазовой модуляции слабых световых полей в схеме двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности [13–15]. Несмотря на большой прогресс в этих исследованиях, в том числе благодаря появлению новых многообещающих схем реализации данного подхода, экспериментально все еще не достигнуто необходимое усиление фотон-фотонных взаимодействий. Для преодоления существующих трудностей в работе [16] предложено использовать оптические волноводы, туннельно-связанные с фотонными логическими кубитами, в сопряженных фотонных резонаторах, где двухкубитовые операции выполняются за счет переноса однофотонного возбуждения из волноводов в квантовую точку, подсоединенную к ним встык. Однако такое соединение остается пока не очень эффективным.

В настоящей статье мы разрабатываем альтернативный способ осуществления операции CNOT, который основан на квантовом управлении переносом возбуждения между двумя близко расположенными микрорезонаторами через квантовые состояния атома (квантовой точ-

С.Н.Андрианов. Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Россия, Республика Татарстан, 420111 Казань, ул. Лево-Булачная, 36а; Казанский квантовый центр Казанского национального исследовательского университета, Россия, Республика Татарстан, 420111 Казань, ул. К.Маркса, 10; e-mail: andrianovsn@mail.ru

С.А.Моисеев. Казанский квантовый центр Казанского национального исследовательского университета, Россия, Республика Татарстан, 420111 Казань, ул. К.Маркса, 10; Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского Казанского научного центра РАН, Россия, Республика Татарстан, 420029 Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7; e-mail: samoi@yandex.ru

Поступила в редакцию 25 декабря 2014 г., после доработки – 25 июля 2015 г.

ки), работающего в режиме управляющей сетки фотонно-квантового транзистора. Отметим, что недавно успешно экспериментально реализовано управление переносом однофотонного состояния между оптическими волноводами с использованием резонатора типа шепчущей галереи с одним атомом рубидия [17]. Также экспериментально реализован полностью однофотонный роутер [18]. Используя технологические возможности создания кольцевого волноводного оптического резонатора, или резонатора типа шепчущей галереи, содержащего лишь один управляемый атом, можно поместить второй резонатор близко к данному атому и выбрать ориентацию этого резонатора и подходящее расстояние с помощью существующих нанопозиционеров. Таким образом можно осуществить необходимую связь двух нановолноводных кольцевых резонаторов через одиночную квантовую точку.

Ниже мы описываем основные свойства рассматриваемой нанооптической схемы компьютера и выполнение базовых квантовых операций на ее основе. Предлагаемый способ позволяет, в принципе, выполнять логические операции за меньшее число шагов с достаточно большой эффективностью. Прежде всего мы описываем элементарные операции с однофотонными полями, которые в последующей части работы используются для реализации одно- и двухкубитовых гейтов.

2. Операция переноса возбуждения

Мы используем фотонные логические кубиты, каждый из которых закодирован в виде однофотонного возбуждения, распределенного на паре нановолноводных кольцевых резонаторов, связанных между собой через квантовую точку. Все пары резонаторов с квантовыми точками расположены вдоль двух нановолноводных брэгговских резонаторов (нановолоконные шины), через которые кубиты передаются в резонаторы из двухсекционной квантовой памяти, содержащей ячейки QMa и QMb (рис. 1). Рассмотрим основные операции с одним логическим кубитом. Вначале мы переносим состояние произвольного выбранного логического кубита из ячеек квантовой памяти QMa и QMb в одну пару свободных кольцевых резонаторов, например в пару 1a и 1b. При этом контролирующий атом 1c находится в состоянии $|b\rangle_c$, в котором взаимодействие между световыми полями двух ближайших резонаторов остается подавленным.

Передача фотонных кубитов из ячеек квантовой памяти запускается после восстановления макроскопиче-

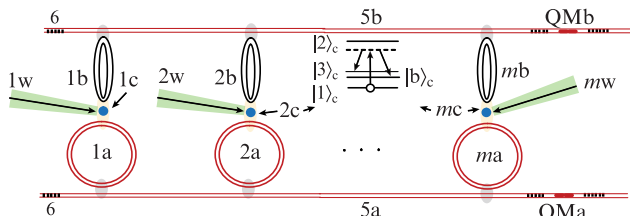


Рис. 1. Архитектура нанофотонного квантового компьютера с многокубитовой памятью:

1a и 1b, 2a и 2b, ..., ma и mb – взаимно ортогональные нановолоконные кольцевые резонаторы первого, второго и m-го логических кубитов; 1c, 2c, ..., mc – квантовые точки; 5a, 5b – нановолокна; 1w, 2w, ..., mw – заостренные оптоволоконна; 6 – брэгговские решетки; QMa, QMb – ячейки квантовой памяти для логических кубитов; на вставке приведены квантовые состояния вентильного трехуровневого атома.

ской когерентности, записанной в атомах памяти с различными частотными расстройками [19]. Хранящимся в памяти M фотонным кубитам соответствуют M расфазированных атомных когерентностей, каждая из которых отвечает отдельному кубиту. Фазировка каждой атомной когерентности будет сопровождаться излучением фотона и его переносом в нановолоконные шины 5a и 5b. Затем однофотонное возбуждение переносится в пару резонаторов (1a и 1b), настроенных в резонанс с нановолноводными шинами.

Эффективный перенос фотонного кубита из памяти в два резонатора реализуется в определенный момент времени t_s после начала взаимодействия, что возможно при выборе оптимальных параметров атомных ансамблей, находящихся в ячейках памяти, для соответствующих постоянных связи резонаторов с нанофотонными волноводами [20, 21]. Сразу после переноса фотонного кубита в момент времени $t = t_s$ прерывается связь резонаторов 1a и 1b с нановолоконными шинами. Например, такое прерывание может осуществляться за счет изменения эффективной длины связи резонатора с нановолоконной шиной при использовании воздействия внешнего лазерного импульса на место контакта [22].

Отметим, что, хотя частоты двух соседних кольцевых резонаторов совпадают друг с другом, прямое взаимодействие между ними и обмен однофотонным возбуждением остаются подавленными за счет выбора различной взаимной пространственной ориентации резонаторов и перевода управляющего атома в блокирующее квантовое состояние $|b\rangle_c$ (рис. 1). После переноса фотонного логического кубита в два резонатора (1a и 1b) и отключения связи этих резонаторов с нановолоконными шинами, мы переводим управляющий атом из блокирующего состояния $|b\rangle_c$ в рабочее состояние $|1\rangle_c$. Для этого используется нерезонансное двухчастотное лазерное излучение, резонансное переходу $|b\rangle_c \rightarrow |1\rangle_c$ и передаваемое по специальному заостренному оптоволокону 1w (рис. 1).

Если частота перехода атома между состояниями $|1\rangle_c$ и $|2\rangle_c$ достаточно близка к частоте резонаторов 1a и 1b, световые поля в двух резонаторах начинают взаимодействовать друг с другом посредством переноса возбуждений через уровень $|2\rangle_c$ управляющего атома. Ниже мы детально описываем динамику этого взаимодействия.

Гамильтониан рассматриваемой системы имеет вид

$$H = H_0 + H_1, \tag{1}$$

где

$$H_0 = H_a + H_r, \tag{2}$$

– основной гамильтониан;

$$H_1 = H_r^{(1)} + H_r^{(2)} \tag{3}$$

– гамильтониан возмущения;

$$H_a = \varepsilon_\mu S_{\mu\mu}^{(0)} \tag{4}$$

– гамильтониан вентильного атома в терминах операторных генераторов $S_{\mu\mu}^{(0)}$ группы SU(3); ε_μ – энергия уровня μ ;

$$H_r = \hbar\omega_r a_1^\dagger a_1 + \hbar\omega_r a_2^\dagger a_2 \tag{5}$$

– гамильтониан фотонов в кольцевых нановолноводных резонаторах 1 и 2; ω_r – частота фотонов;

$$H_{r-a}^{(l)} = G_{21}^{(l)} S_{21}^{(0)} a_l + G_{21}^{(l)*} S_{12}^{(0)} a_l^\dagger \quad (6)$$

– гамильтониан взаимодействия фотонов в резонаторе с трехуровневым вентильным атомом на переходе $1 \rightarrow 2$ в модели Джейнса–Каммингса; $G_{21}^{(l)}$ – постоянная связи; $S_{21}^{(0)}$ и $S_{12}^{(0)}$ – операторы переходов; a_l и a_l^\dagger – операторы уничтожения и рождения фотонов в резонаторах; $l = 1, 2$.

Рассмотрим частный случай, когда частоты фотонов в кольцевых резонаторах 1а и 1б отстроены от частоты перехода $|1\rangle_c \leftrightarrow |2\rangle_c$ вентильного атома на величину Δ , превышающую постоянную связи атомов с модами кольцевых резонаторов. Управляемая частотная отстройка может быть реализована оптически воздействием внешнего лазерного импульса [23], приводящим к быстрому изменению эффективной оптической длины резонатора и вызывающим, в свою очередь, адиабатическое изменение рабочей частоты резонатора в широком спектральном диапазоне. Для описания квантовой динамики фотонного кубита при достаточно большой отстройке Δ мы можем использовать преобразование Шриффера–Вольфа, которое с точностью до членов первого порядка малости дает для эффективного гамильтониана следующее выражение:

$$H_s = H_0 + \frac{1}{2}[H_1, s] \quad (7)$$

при условии, что

$$H_1 + [H_0, s] = 0. \quad (8)$$

Выбирая соответствующим образом параметр s , для эффективного гамильтониана получаем выражение

$$H_s = \varepsilon_\mu S_{\mu\mu}^{(0)} + \hbar\omega_r a_1^\dagger a_1 + \hbar\omega_r a_2^\dagger a_2 + \frac{1}{\hbar\Delta} (|G_{21}^{(1)}|^2 + |G_{21}^{(2)}|^2) \times S_{21}^{(0)} S_{12}^{(0)} + \frac{1}{\hbar\Delta} (|G_{21}^{(1)}|^2 a_1^\dagger a_1 + |G_{21}^{(2)}|^2 a_2^\dagger a_2) (S_{22}^{(0)} - S_{11}^{(0)}) + \frac{1}{\hbar\Delta} (G_{21}^{(1)} G_{21}^{(2)*} a_1 a_2^\dagger + G_{21}^{(1)*} G_{21}^{(2)} a_1^\dagger a_2) (S_{22}^{(0)} - S_{11}^{(0)}), \quad (9)$$

где

$$\frac{1}{\hbar\Delta} = -\frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \hbar\omega_r}. \quad (10)$$

Запишем волновую функцию логического кубита в виде

$$\psi = c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2, \quad (11)$$

где $\psi_1 = |0\rangle_0 |1\rangle_1 |0\rangle_2$ и $\psi_2 = |0\rangle_0 |0\rangle_1 |1\rangle_2$. Здесь цифрами 0, 1 и 2 обозначены состояния вентильного атома и фотонов в резонаторах 1 и 2. Тогда, записывая с учетом гамильтониана (1)–(6) уравнение Шредингера

$$\frac{d\psi}{dt} = -i\varepsilon_{11} c_1 \psi_1 - i\varepsilon_{12} c_2 \psi_2 - i\omega_r c_1 \psi_1 - i\omega_r c_2 \psi_2,$$

$$+ i \frac{|G_{21}^{(1)}|^2}{\hbar^2 \Delta} c_1 \psi_1 + i \frac{|G_{21}^{(2)}|^2}{\hbar^2 \Delta} c_2 \psi_2 + i \frac{G_{21}^{(1)} G_{21}^{(2)*}}{\hbar^2 \Delta} c_1 \psi_2 + i \frac{G_{21}^{(1)*} G_{21}^{(2)}}{\hbar^2 \Delta} c_2 \psi_1, \quad (12)$$

получаем следующую систему уравнений для коэффициентов $c_{1,2}$ волновой функции (11):

$$\frac{dc_1}{dt} = -i \left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}^{(1)}|^2}{\hbar^2 \Delta} \right) c_1 + i \frac{G_{21}^{(1)*} G_{21}^{(2)}}{\hbar^2 \Delta} c_2, \quad (13)$$

$$\frac{dc_2}{dt} = -i \left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}^{(2)}|^2}{\hbar^2 \Delta} \right) c_2 + i \frac{G_{21}^{(1)} G_{21}^{(2)*}}{\hbar^2 \Delta} c_1. \quad (14)$$

При $G_{21}^{(1)} = G_{21}^{(2)} = G_{21}$ и начальных условиях $c_1(0) = 1$, $c_2(0) = 0$ решения уравнений (13), (14) имеют простой вид:

$$c_1 = \exp \left[-i \left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} \right) t \right] \cos \left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} t \right), \quad (15)$$

$$c_2 = i \exp \left[-i \left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} \right) t \right] \sin \left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} t \right), \quad (16)$$

и волновая функция логического кубита записывается в виде

$$\psi = \exp \left[-i \left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} \right) t \right] \times \left[\cos \left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} t \right) \psi_1 + i \sin \left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2 \Delta} t \right) \psi_2 \right]. \quad (17)$$

Формула (17) демонстрирует эффективный перенос возбуждения $Q_{ET}(\varphi)$ ($\varphi = |G_{21}|^2 t / (\hbar^2 \Delta)$) из резонатора 1а в резонатор 1б за счет их косвенного взаимодействия с вентильным атомом, что возможно при выборе подходящей частотной отстройки Δ . Полный перенос возбуждения из одного резонатора в другой возможен и при резонансном взаимодействии резонаторов с вентильным атомом ($\Delta = 0$), как это, например, показано для схемы квантового транзистора [24], в которой используется взаимодействие атомных ансамблей через вентильный атом в двух скрещенных резонаторах.

В качестве вентильного атома можно выбрать, например, квантовую точку, которая имеет достаточно большой дипольный момент на оптическом переходе [25], что необходимо для быстрого переноса однофотонного возбуждения между кольцевыми резонаторами. Важно, что квантовая точка может также иметь достаточно большое время декогеренции ($\sim 10^{-4}$ с) на спиновых подуровнях основного состояния [26, 27]. Вследствие этого возможно выполнение всего необходимого набора операций, связанных с обратимой загрузкой фотонного кубита в кольцевые резонаторы из памяти, осуществлением в них необходимых квантовых вентилях и переносом логического фотонного кубита обратно в память.

3. Логические вентили

Используя рассмотренный выше процесс управляемого переноса однофотонного состояния между двумя резо-

наторами, опишем сначала реализацию операции NOT над системой фотонных кубитов, хранящихся в двух ячейках квантовой памяти. Для работы однокубитового логического вентиля NOT выбранный фотонный логический кубит, хранящийся в двух блоках многоатомной многокубитовой квантовой памяти (QMa и QMb), переносится из них по двум нановолноводным шинам (5a и 5b) в один из процессорных узлов, состоящих из двух кольцевых нановолноводных резонаторов и квантовой точки. Затем кольцевые резонаторы (1a и 1b) выбранного процессорного узла отключаются от шин компьютера 5a и 5b, и происходит квантовый перенос возбуждения между резонаторами 1a и 1b при участии квантовой точки 1c (рис. 1) в соответствии с формулой (17). При этом начальное состояние логического кубита можно записать как

$$\psi_i = (\alpha|1\rangle_1|0\rangle_2 + \beta|0\rangle_1|1\rangle_2)|1\rangle_c, \quad (18)$$

где $|0\rangle_n$ и $|1\rangle_n$ – основное и возбужденное состояния резонатора ($n = 1, 2$); $|1\rangle_c$ – волновая функция основного состояния трехуровневого вентильного атома. При переносе возбуждения волновая функция (18) под действием оператора $Q_{ET}(\varphi)$ преобразуется к виду

$$Q_{ET}(\varphi)\psi_i = \exp\left[-i\left(\varepsilon_{11} + \omega_r - \frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}\right)t\right] \times \left\{ \left\{ \alpha \left[\cos\left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}t\right)|1\rangle_1|0\rangle_2 + i \sin\left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}t\right)|0\rangle_1|1\rangle_2 \right] \right\} + \beta \left[i \sin\left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}t\right)|1\rangle_1|0\rangle_2 + \cos\left(\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}t\right)|0\rangle_1|1\rangle_2 \right] \right\} |1\rangle_c. \quad (19)$$

Отметим, что квантовая динамика уравнения (19) реализуется за счет виртуального возбуждения уровня $|2\rangle_c$ управляющего атома, который в течение всей эволюции находится преимущественно в основном состоянии $|1\rangle_c$. При $|G_{21}|^2 t / (\hbar^2 \Delta) = \pi/2$ и отбрасывании несущественного общего фазового множителя в (19) получим

$$Q_{ET}\left(\frac{\pi}{2}\right)\psi_i = (\alpha|0\rangle_1|1\rangle_2 + \beta|1\rangle_1|0\rangle_2)|1\rangle_c, \quad (20)$$

т. е. операцию NOT. Для успешного завершения этой операции необходимо прекратить процесс переноса возбуждения между резонаторами. Это может достигаться или переносом возбуждения управляющего атома из основного состояния $|1\rangle_c$ на блокирующий уровень $|b\rangle_c$, или же за счет адиабатически быстрой большей отстройки частоты резонаторов от частоты перехода в вентильном атоме с использованием лазерного метода управления частотой резонатора [23]. При этом вращение кубита прекращается за счет резкого уменьшения постоянной связи атома с резонаторами. После выполнения операции NOT кубит возвращается обратно в блоки квантовой памяти по нановолноводным шинам компьютера 5a и 5b. Таким же образом можно реализовать и логический вентиль Адамара, выбирая вдвое меньшее время взаимодействия, удовлетворяющее условию

$$\frac{|G_{21}|^2}{\hbar^2\Delta}t = \frac{\pi}{4}.$$

Для работы двухкубитового логического вентиля контролируемого отрицания CNOT необходимо прове-

дение следующих операций. Сначала из блока квантовой памяти QMb однофотонное возбуждение, соответствующее верхнему состоянию управляющего кубита, переносится в кольцевой резонатор 1b выбранного процессорного узла. Затем этот резонатор отключается от шины компьютера и возбуждение переводится в состояние $|2\rangle_c$ квантовой точки за счет перехода $|1\rangle_c \rightarrow |2\rangle_c$ (рис. 1). После этого внешним лазерным импульсом, подаваемым через заостренное волокно 1w, мы переводим это возбуждение на блокирующий подуровень $|3\rangle_c$, при этом разность населенностей рабочего перехода $|1\rangle_c \rightarrow |2\rangle_c$ становится равной нулю. Далее управляемый кубит переносится из блока квантовой памяти QMa и QMb по шинам 5a и 5b в кольцевые резонаторы 1a и 2b, как и при работе однокубитового вентиля NOT. Однако в данном случае перенос возбуждения между кольцевыми резонаторами процессорного узла не происходит, т. к. населенности состояний $|1\rangle_c$ и $|2\rangle_c$ рабочего перехода квантовой точки равны нулю.

Наконец, возбуждения передаются обратно теми же путями в ячейки квантовой памяти: сначала передается возбуждение управляемого кубита, а затем и управляющего. Если в исходном верхнем состоянии управляющего кубита в блоке квантовой памяти QMb возбуждение отсутствовало, то перенос возбуждения в управляемом кубите будет происходить, как и при работе однокубитового вентиля NOT.

В результате описанных операций реализуется вентиль контролируемого отрицания, который вместе с однокубитовыми вентилями образует универсальный набор вентилях. Следовательно, может быть построен оптический многокубитовый квантовый компьютер, в котором быстрота выполнения операций обеспечивается оптическими способами управления взаимодействием нанопотонных резонаторов с общим волноводным резонатором и квантовыми точками, обеспечивающими управляемую квантовую связь между нанопотонными резонаторами.

В работах [28] и [29] были экспериментально получены значения постоянной связи квантовой точки с фотонами в резонаторе, равные 100 и 160 ГГц соответственно. Следовательно, время осуществления вышеописанных операций может составлять десятки пикосекунд, что позволяет успешно выполнять их за время, меньшее времени хранения информации на промежуточных уровнях квантовой точки, которое может быть увеличено в случае электронных спиновых состояний до 30 нс [30] и даже до десятых долей [26, 27] и единиц [31, 32] микросекунд.

4. Заключение

Таким образом, мы теоретически продемонстрировали возможность создания оптического универсального квантового компьютера на основе эффекта квантового транзистора на нановолноводных резонаторах, связанных между собой управляемым вентильным атомом. Его быстродействие составляет десятки пикосекунд, поскольку ограничивается лишь скоростью переключения частоты резонатора и частотой Раби квантовой точки, выполняющей роль вентильного атома. При этом оперативное хранение квантовой информации в компьютере обеспечивается нановолноводной квантовой памятью на основе фотонного эха, которое может использоваться для работы с большим числом широкополосных фотонных кубитов [19, 20, 21, 33].

В связи с успехами в разработке многокубитовой квантовой памяти представляет интерес создание оптического квантового компьютера, где фотонное эхо используется не только для запоминания фотонных кубитов, но и для осуществления логических операций. Такой вариант построения однопроходного квантового компьютера был предложен в работе [34]. В настоящей работе мы описали схему оптического квантового компьютера, который содержит две ячейки квантовой памяти, позволяющие на основе логических кубитов реализовать многопроходную нанооптическую схему детерминированного квантового компьютера.

Стоит отметить недавнюю экспериментальную реализацию оптического нановолоконного резонатора с брэгговскими решетками [35]. Линейные размеры такого нанооптического резонатора могут составлять несколько сантиметров, что делает возможным пристыковку к нему сразу нескольких кольцевых микрорезонаторов. При этом авторам работы [35] удалось разместить отдельную квантовую точку на поверхности нановолокна с точностью локализации ~ 3 мкм. Данная неопределенность расположения много меньше предполагаемого диаметра кольцевого резонатора, что позволяет успешно соединять два кольцевых резонатора через наноточку в предлагаемой нами оптической схеме.

Таким образом, описанная в настоящей работе архитектура нанооптического квантового компьютера может быть реализована при использовании существующих и активно разрабатываемых технологий на основе высокодобротных оптических резонаторов [22, 23, 35–38] и методов реализации многокубитовой квантовой памяти в резонаторе [19, 39–42]. Многопроцессорная архитектура квантового компьютера обеспечит возможность проведения параллельных вычислений, что ускорит решение задач, а также облегчит решение проблемы подавления декогеренции состояния кубитов, находящихся в вентильных атомах и резонаторах или хранящихся в квантовой памяти. Кроме того, использование нановолноводной шины позволит обеспечить непосредственное сопряжение квантовых процессоров с высокоскоростными волоконными линиями передачи информации. Поэтому такой оптический компьютер может успешно применяться в устройствах квантовой связи – в квантовых репитерах, квантовых роутерах и устройствах формирования квантовой цифровой подписи.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14-12-01333.

- DiCarlo L., Chow J.M., Gambetta J.M., Bishop L.S., Johnson B.R., Schuster D.I., Majer J., Blais A., Frunzio L., Girvin S.M., Schoelkopf R.J. *Nature*, **460**, 240 (2009).
- Neeley M., Bialczak R.C., Lenander M., Lucero M.E., Mariantoni M., O'Connell A.D., Sank D., Wang H., Weides M., Wenner J., Yin Y., Yamamoto T., Cleland A.N., Martinis J.M. *Nature*, **467**, 570 (2010).
- DiCarlo L., Reed M.D., Sun L., Johnson B.R., Chow J.M., Gambetta J.M., Frunzio L., Girvin S.M., Devoret M.H., Schoelkopf R.J. *Nature*, **467**, 574 (2010).
- Mariantoni M., Wang H., Yamamoto T., Neeley M., Bialczak R.C., Chen Y., Lenander M., Lucero E., O'Connell A.D., Sank D., Weides M., Wenner J., Yin Y., Zhao J., Korotkov A.N., Cleland A.N., Martinis J.M. *Science*, **334**, 61 (2011).
- Zhu X., Matsuzaki Y., Amsuss R., Kakuyanagi K., Shimo-Oka T., Mizuochi N., Nemoto K., Semba K., Munro W.J., Saito Sh. *Nat. Commun.*, **5**, 4524 (2014).
- Andrianov S.N., Moiseev S.A. *Phys. Rev. A*, **90**, 042303 (2014).
- Andrianov S.N., Bochkarev V.V., Moiseev S.A. *Eur. Phys. J. B*, **87**, 128 (2014).
- Gibbs H.M. *Optical Bistability: Controlling Light with Light* (Orlando: Acad. Press, 1985).
- O'Brien J.L., Pryde G.J., White A.G., Ralph T.C., Branning D. *Nature*, **426**, 264 (2003).
- Lanyon B.P., Barbieri M., Almeida M.P., Jennewein T., Ralph T.C., Resch K.J., Pryde G.J., O'Brien J.L., Gilchrist A., White A.G. *Nature Phys.*, **5**, 134 (2009).
- Kok P. et al. *Rev. Mod. Phys.*, **79**, 135 (2007).
- Knill E., Laflamme R., Milburn G.J. *Nature*, **409**, 46 (2001).
- Munro W.J., Nemoto K., Spiller T.P. *New J. Phys.*, **7**, 137 (2005).
- Chudzicki C., Chuang I.L., Shapiro J.H. *Phys. Rev. A*, **87**, 042325 (2013).
- Marzlin K.-P., Wang Z.-B., Moiseev S.A., Sanders B.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, A36 (2010).
- Yamaguchi M., Asano T., Sato Y., Noda S. arXiv: 1101.3508 (2011).
- O'Shea D., Junge C., Volz J., Rauschenbeutel A. *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 193601 (2013).
- Shomroni I., Rosenblum S., Lovsky Yu., Bechler O., Guendelman G., Dayan B. *Science*, **345**, 903 (2014).
- Moiseev S.A., Andrianov S.N., Gubaidullin F.F. *Phys. Rev. A*, **82**, 022311 (2010).
- Moiseev S.A., Andrianov S.N. *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.*, **45**, 124017 (2012).
- Moiseev S.A. *Phys. Rev. A*, **88**, 012304 (2013).
- Yariv A. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14**, 483 (2002).
- Preble S.F., Cao L., Elshaari A., Aboketaf A., Adams D. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 171110 (2012).
- Моисеев С.А., Андрианов С.Н., Моисеев Е.С. *Оптика и спектроскопия*, **115**, 406 (2013).
- Hennessy K., Badolato A., Winger M., Gerace D., Atature M., Gulde S., Falt S., Hu E.L., Imamoglu A. *Nature*, **445**, 896 (2007).
- Oulton R., Greilich A., Verbin S.Yu., Cherbunin R.V., Auer T., Yakovlev D.R., Bayer M., Merkulov I.A., Stavarache V., Reuter D., Wieck A.D. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 107401 (2007).
- Kawaki E., Scarlino P., Ward D.R., Braakman F.R., Savage D.E., Lagally M.G., Friesen M., Coppersmith S.N., Eriksson M.A., Vandersypen L.M.K. *Nat. Nanotechnol. Lett.*, **9**, 666 (2014).
- Fushman I., Englund D., Faraon A., Stoltz N., Petroff P., Vuckovic J. *Science*, **320**, 769 (2008).
- Ohta R., Ota Ya., Nomura M., Kumagai N., Ishida S., Iwamoto S., Arakawa Ya. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 173104 (2011).
- Langer L., Poltavtsev S.V., Yugova I.A., Salewski M., Yakovlev D.R., Karczewski G., Wojtowicz T., Akimov I.A., Bayer M. *Nat. Photonics*, **8**, 851 (2014).
- Petta J. R., Johnson A.C., Taylor J.M., Laird E.A., Yacoby A., Lukin M.D., Marcus C.M., Hanson M.P., Gossard A.C. *Science*, **309**, 2180 (2005).
- Greilich A., Yakovlev D.R., Shabaev A., Efros A.L., Yugova I.A., Oulton R., Stavarache V., Reuter D., Wieck A., Bayer M. *Science*, **313**, 341 (2006).
- Moiseev E.S., Moiseev S.A. arXiv: 1412.2459v1.
- Манькин Э.А., Мельниченко Е.В. *Квантовая электроника*, **44**, 1141 (2014).
- Yalla R., Sadgrove M., Nayak K.P., Hakuta K. *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 143601 (2014).
- Barwicz T., Byun H., Gan F., Holzwarth C.W., Popovich M.A., Rakich P.T., Watts M.R., Ippen E.P., Kärtner F.X., Smith H.I. *J. Opt. Networking*, **6**, 63 (2007).
- Watts M.R. *Opt. Lett.*, **35**, 3231 (2010).
- Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Selvaraja S.K., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R. *Laser Photonics Rev.*, **6**, 47 (2012).
- Afzelius M., Simon C. *Phys. Rev. A*, **82**, 022310 (2010).
- Sabooni M., Kometa S.T., Thuresson A., Kröll S., Rippe L. *New J. Phys.*, **15**, 035025 (2013).
- Sabooni M., Li Q., Kröll S., Rippe L. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 133604 (2013).
- Jobez P., Usmani I., Timoney N., Laplane C., Gisin N., Afzelius M. *New J. Phys.*, **16**, 083005 (2014).