

Масштабируемый квантовый компьютер на оптической основе

Э.А.Манькин, Е.В.Мельниченко*

Предложен способ построения масштабируемого оптического квантового компьютера на основе эффекта фотонного эха. В качестве оптических кубитов предполагается использовать отдельные редкоземельные ионы Pr^{3+} , регулярно расположенные в кристалле ортосиликата Y_2SiO_5 ; операции с кубитами выполняются посредством когерентных и некогерентных лазерных импульсов. Протокол работы включает в себя как метод квантовых вычислений, основанный на измерениях, так и технологию оптических вычислений. Наиболее перспективным для целей квантовых вычислений и коммуникаций представляется использование современных гибридных протоколов фотонного эха, обеспечивающих достаточный уровень квантовой эффективности при считывании записанных состояний.

Ключевые слова: фотонное эхо, квантовый компьютер, квантовые вычисления.

1. Введение

Фотонное эхо (ФЭ) и подобные ему нелинейно-оптические явления, позволяющие манипулировать квантовыми состояниями физических объектов, рассматриваются как перспективная физическая основа для развития протоколов квантовых коммуникаций и квантовых вычислений [1,2].

К настоящему моменту накоплено большое число экспериментальных данных по наблюдению широкого класса явлений, объединенных названием «фотонное эхо». ФЭ наблюдается в атомных ансамблях, в жидкостях, в молекулах, в примесях в твердых телах, в тонких полимерных пленках [3–5] и т.д. Современные протоколы ФЭ позволяют добиться высокой точности манипулирования сигналом.

Параллельно развиваются две ветви приложений ФЭ: для квантовой памяти и для квантовых вычислений. Свойство ФЭ сохранять, а затем воспроизводить форму сигнала позволяет естественным образом задействовать его для устройств оптической памяти. Возможность записывать, хранить достаточно долгое время и точно восстанавливать исходный сигнал в еще большей степени необходима для работы с квантовыми состояниями электромагнитного поля. Возможность создания копии состояния этого поля и последующей его передачи является важным элементом устройства квантового компьютера, т.к. позволяет выполнять вспомогательные операции вы-

числительного цикла без потери данных. Задержка по времени, созданная таким образом, дает возможность, например, осуществить необходимую подготовку или постобработку результатов.

Для создания прототипа квантового компьютера, выполняющего большой объем вычислений, необходимо иметь как минимум два сопряженных устройства с высокой квантовой эффективностью – квантовую память и квантовый регистр. Основной функцией квантовой памяти является хранение квантовых состояний, передаваемых электромагнитным полем. Квантовый регистр, состоящий из набора квантовых ключей, предназначен для операций обработки информации [6].

Среди наиболее успешных с точки зрения квантовой эффективности экспериментов, реализующих квантовые вычисления, можно назвать эксперименты со сверхпроводящими квантовыми точками, микрорезонаторами, ионными ловушками [1, 2, 7]. Однако все перечисленные реализации с трудом поддаются масштабированию, и поэтому вопрос увеличения вычислительной мощности квантового компьютера остается открытым. Создание такой экспериментальной установки, достаточно сложной уже для реализации одной квантовой памяти, требует технических решений, находящихся за пределами современного развития техники. Возможность построения квантовых компьютеров из масштабируемых блоков, пригодных для квантовой обработки, предоставляют наноразмерные твердотельные технологии. Использование твердотельных устройств перспективно еще и с прикладной точки зрения – для сопряжения квантовой памяти и квантового регистра. Таким образом, задача разработки архитектуры оптического квантового компьютера на основе ФЭ актуальна в настоящий момент для квантовых вычислений и оптики.

Целью настоящей работы является возможность применения ФЭ и оптических манипуляций с квантовыми объектами как физической основы для масштабируемого квантового компьютера.

Протоколы приложений ФЭ для квантовой памяти [8, 9] призваны увеличить квантовую эффективность и

* Доложена на III Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Россия, Москва, январь 2014 г.

Э.А.Манькин. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182 Москва, пл. Акад. Курчатова, 1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 123182 Москва, Каширское ш., 31

Е.В.Мельниченко. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 123182 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: melnitchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 7 апреля 2014 г., после доработки – 1 июня 2014 г.

вместе с тем задействовать возможность параллельной обработки информации. Такие результаты, полученные для различных сред, в том числе газовых, для оптоволокна и тонких полимерных пленок [10], существенно расширяют экспериментальную базу для квантовых манипуляций.

2. Технология оптических вычислений

К настоящему моменту предложены различные варианты создания оптического компьютера [11, 12]. На основе ФЭ разработана технология нелинейной оптики (ТОН), построенная на основе векторно-матричного умножителя (ВМУ), выполняющего классические вычисления только путем операций с оптическим полем [11]. В рамках ТОН полностью реализованы все операции, выполняемые классическим компьютером, а именно хранение, обработка, стирание и передача информации. Особенности физического механизма формирования ФЭ позволяют осуществлять не только сложение, но и перемножение битов за один вычислительный цикл на кристалле, что дополнительно повышает быстродействие оптического эхо-процессора. Из широкого класса сред, в которых наблюдается ФЭ, для оптической обработки информации выделяются кристаллы ортосиликатов, допированные редкоземельными ионами. При использовании ТОН информация посредством лазерных импульсов записывается и обрабатывается на ионах редкоземельных элементов Pr^{3+} , внедренных в матрицу Y_2SiO_5 . Выбор ортосиликатных матриц обусловлен их высокой оптической стойкостью, которая позволяет использовать эти матрицы в качестве масштабируемых блоков в условиях реальных вычислений, требующих обработки большого числа лазерных импульсов в единицу времени.

Оптическая память на основе ФЭ основана на тех же принципах, что и оптический процессор. Однако для увеличения длительности хранения информации повышаются требования к охлаждению. Так, например, достигнутые времена фазовой памяти, определяющей время хранения сигнала, составляют ~24 ч. Ведутся работы по получению ФЭ при комнатных температурах, что позволило бы создать материальную базу для перехода к промышленным прототипам оптических вычислений.

На основе технологии оптических вычислений предлагается выполнять не только оптическую, но и квантовую обработку информации с помощью современных протоколов, использующих эффект ФЭ, в том числе гибридных. Для построения масштабируемого квантового регистра предлагается взять за основу архитектуру векторно-матричного умножителя с пиксельной структурой. В один пиксель будет помещен один ион редкоземельного элемента, на уровнях которого будет смоделирован кубит. Использование F-состояний в редкоземельных элементах позволяет применять различные способы квантовых манипуляций, включая, но не ограничиваясь ФЭ, за счет большого числа энергетических уровней и переходов между ними.

3. Квантовые вычисления, основанные на измерениях

Наиболее эффективной представляется организация оптических квантовых вычислений, основанных на измерениях (MQC), к которым относится и однонаправленный квантовый компьютер [6, 13, 14]. Для MQC используется

приготовленный в перепутанном кластерном состоянии массив кубитов. В двумерном случае этот массив образует квадратную «решетку», на которой путем одних только однокубитных измерений в адаптивном базисе выполняется заданный алгоритм.

В отличие от модели квантовой цепочки, где квантовые вычисления выполняются посредством унитарных операций, при MQC информация обрабатывается последовательностью измерений индивидуальных кубитов. Универсальным, т.е. не зависящим от алгоритма, ресурсом здесь является двумерное кластерное состояние.

Процесс вычислений происходит следующим образом (рис.1). Двумерное кластерное состояние $|C\rangle$ достаточно большого размера приготовлено в исходном состоянии. На входе вычислительного регистра находятся выделенные кубиты, на которые подаются входные данные о программе и данные для обработки. Выполняется последовательность адаптивных однокубитных измерений M на выбранных кубитах. Адаптивность заключается в вычислении базиса каждого последующего измерения в зависимости от результата предыдущего измерения, причем пересчет может производиться и на классическом компьютере. По мере продвижения вычислений, которые являются по своей природе недетерминистскими, уменьшается число перепутываний. По окончании всех измерений состояние системы описывается состоянием $|\xi^a\rangle|\psi_{\text{out}}^a\rangle$, где индекс a характеризует набор измерений по всем ветвям измерений. Сами состояния $|\psi_{\text{out}}^a\rangle$ по всем ветвям эквивалентны желаемому выходному состоянию с точностью до оператора Паули. Измеренные кубиты находятся в состоянии $|\xi^a\rangle$, зависящем, в свою очередь, от результата измерений на выходе. Последнее измерение выполняется на выходном кубите и содержит в себе результат вычислений. Важной особенностью метода является соблюдение строгой очередности (временной последовательности) измерений.

К настоящему моменту известны эксперименты, подтверждающие работоспособность метода MQC. В этом эксперименте роль кубитов играют фотоны, что накладывает определенные ограничения на построение детер-

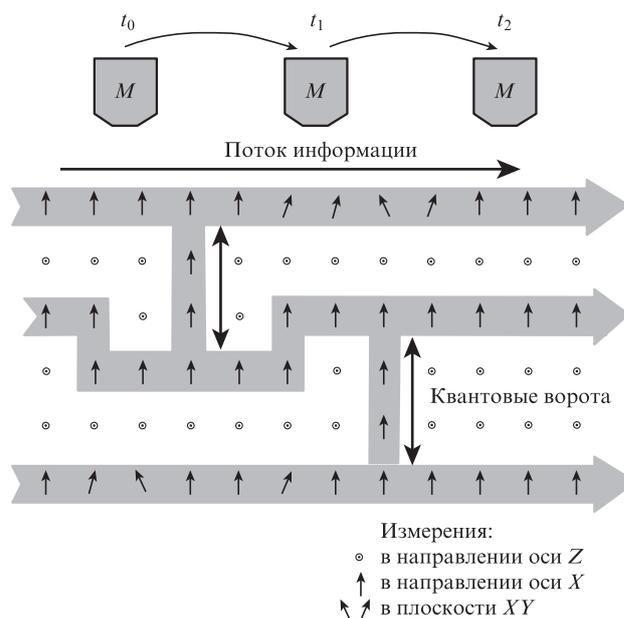


Рис.1. Квантовые вычисления, основанные на измерениях (MQC).

министских квантовых ключей. Более перспективным представляется использование комбинации как линейных оптических методов, так и схем с материальным носителем кубита [15].

4. Оптический квантовый компьютер

Представим физическую реализацию кубита в виде выделенных уровней энергии редкоземельного иона, где частота оптического поля находится в резонансе с ионными спектрами F-электронов. Как и для всякой двухуровневой системы, мы можем ввести псевдоспин аналогично тому, как это сделано в случае ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Тогда сопоставим эволюцию оптического псевдоспина с логическими операциями с кубитом. В условиях однофотонного резонанса мы рассматриваем ионы примеси как двухуровневую систему, для описания которой используются уравнения Блоха. Основному состоянию $|0\rangle$ соответствует вектор Блоха, направленный вверх вдоль оси Z (рис.2).

Положение вектора Блоха строго вверх соответствует возбужденному состоянию $|1\rangle$. Отсюда легко видеть, что любое состояние вида $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, есть возможное чистое состояние псевдоспина.

Все необходимые унитарные преобразования над кубитом будем выполнять посредством оптических π - и $\pi/2$ -импульсов, как это делается в классических протоколах ФЭ. Связи между спинами, необходимые для создания логических элементов, реализуются за счет диполь-дипольного взаимодействия соседних псевдоспинов. Если продолжить аналогию с ЯМР, то диполь-дипольное взаимодействие можно рассматривать здесь как взаимодействие изинговского типа $H_{\text{int}} = C\sigma_z^{(1)}\sigma_z^{(2)}$ [13]. Использование $\pi/2$ -импульса переводит всю систему оптических кубитов, находящихся первоначально в основном состоянии, в когерентные суперпозиционные состояния $|\pm\rangle$ с вероятностью $1/2$. Затем над полученным кластером производится однокубитные измерения по методу MQC.

Преимущество ФЭ по сравнению с другими физическими реализациями, такими как нейтральные атомы, захваченные в оптической двумерной ловушке, заключается в большей адресности воздействий на отдельный кубит. Это достигается при соответствующем распределении оптических кубитов в пластинке кристаллической матрицы ортосиликатов и воздействии на них пространственными оптическими модуляторами. В случае ФЭ эти

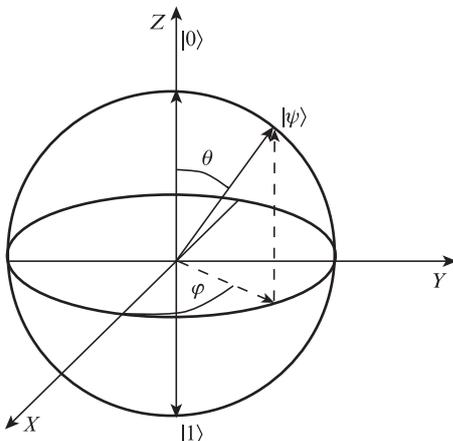


Рис.2. Сфера Блоха.

операции можно выполнять не только последовательно, но и параллельно. Для параллельных вычислений мы можем помещать на область порядка пятна фокусировки не более одного излучателя, чем достигается индивидуальная адресация каждого кубита. Современные экспериментальные техники расширяют классический вариант ФЭ за счет возможности использования всех атомов, вносящих вклад в неоднородно уширенную резонансную линию, что может служить дополнительным ресурсом для формирования независимых вычислительных каналов. Как известно, в классическом случае ФЭ наблюдается на макроскопически большом количестве осцилляторов, что, однако, не является препятствием для использования данного эффекта для работы с индивидуальными квантовыми состояниями. Так, например, предлагается использовать ФЭ и подобные ему эффекты для подготовки исходного кластерного состояния $|C\rangle$, на котором проводятся вычисления. При подготовке нового цикла вычислений необходимо также обеспечить возможность стирать записанные данные, для чего может применяться некогерентный свет.

Все операции над кубитами необходимо проводить за время, меньшее времени фазовой памяти τ_0 . Производительность одного канала вычислений при длительности оптического импульса $\tau_i \approx 10$ фс составит $1/\tau_i \sim 10^{14}$ бит/с. Увеличить плотность информационного потока можно, используя разные частоты оптических резонансов. Если предположить, что на квадратной пластинке размером 3.5 см можно получить $N_{\text{ch}} \sim 10^7$ каналов при размере канала ~ 10 мкм, то в многоканальном режиме максимальная производительность с учетом параллельной обработки оценивается как $N_{\text{ch}}\tau_i \sim 10^7 \times 10^{14} = 10^{21}$ бит/с.

Для использования ФЭ в квантовых вычислениях необходимо сделать процесс считывания результатов более надежным, чем для классического протокола. Целью разработки новых гибридных техник (протоколов) получения ФЭ [9] является повышение квантовой эффективности считывания записанных состояний. Один из таких подходов к уменьшению влияния квантового шума – активный механизм рефазировки (AMP)/(AMR-protocol), в котором рефазировка атомной когерентности осуществляется с использованием нерезонансного взаимодействия с управляющим лазерным полем [9]. Протокол AMP позволяет справиться с проблемой спонтанных переходов, тем самым улучшая качество сигнала, извлекаемого в процессе рефазировки.

Предложения по увеличению квантовой эффективности и устойчивости к шумам активно обсуждаются в настоящее время [16]. Использование трехмерных квантовых ключей (т.е. топологических методов квантовых вычислений) с постобработкой повышает устойчивость к ошибкам.

5. Заключение

Предложенный протокол работы оптического квантового компьютера по методу MQC может быть реализован на основе ТОН. В качестве оптических кубитов предлагается использовать отдельные редкоземельные ионы (Pr^{3+}), регулярно расположенные в кристалле ортосиликата (Y_2SiO_5). Технология на основе ФЭ может применяться как в модернизированном виде, с адаптацией к работе с индивидуальными квантовыми объектами, так и напрямую, для промежуточных классических вычислений.

Преимущество ТОН, основанной на твердотельных наноразмерных технологиях, по сравнению со схемами на охлажденных атомах в трехмерной оптической ловушке заключается в большей адресности, что обусловлено более свободным расположением атомов. Для работы с квантовыми объектами, представляющими кубиты, можно использовать гибридные схемы, включая линейные оптические методы. В этом случае два сопряженных устройства с высокой квантовой эффективностью – квантовая память и квантовый регистр – будут работать по различным методикам, представляя собой одно целое. Тогда квантовые состояния, находящиеся в квантовой памяти, будут передаваться электромагнитным полем в квантовый регистр, состоящий из набора обрабатывающих информацию квантовых ключей.

В качестве метода квантовых вычислений предлагается MQC, в котором информация обрабатывается последовательностью адаптивных измерений индивидуальных кубитов. Вычислительным ресурсом, не зависящим от алгоритма, здесь выступает двумерное кластерное состояние.

Все операции с кубитами, необходимые для квантовых вычислений, выполнимы с помощью когерентных и некогерентных лазерных импульсов. Промежуточные классические вычисления могут быть выполнены посредством ТОН, что существенно повышает быстродействие за счет использования оптических вычислений, а также уменьшает размеры установки. Возможное решение про-

блемы декогерентизации, общей для всех реальных физических устройств, моделирующих квантовый компьютер, состоит в уменьшении времени воздействия на кубит. Если оно будет меньше времени фазовой памяти τ_0 , то обработка информации закончится до начала распада записанного состояния.

1. Kaye P., Laflamme R., Mosca M. *An Introduction to Quantum Computing* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2007).
2. Nielsen M.A., Chuang I.L. *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000).
3. Lobkov V.S., Leontiev A.V., et al. *Laser Phys.*, **17** (4), 332 (2007).
4. Morsink J.B.W., Wiersma D.A. *Chem. Phys. Lett.*, **65** (1), 105 (1979).
5. Shelby R.M., Macfarlane R.M., et al. *Phys. Rev. B*, **21** (11), 5004 (1980).
6. Monroe C., Raussendorf R., et al. arXiv 1208.1661 (2012).
7. Haeffner H., Roos C., Blatt R. *Phys. Rep.*, **469**, 155 (2008).
8. Moiseev S.A. *Phys. Rev. A*, **83** (1), 012307 (2011).
9. Moiseev S.A., Andrianov S.N. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **45**, 124017 (2012).
10. Самарцев В.В. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **72**, (1), 53 (2008).
11. Маныкин Э.А., Мельниченко Е.В. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **68** (9), 1256 (2004).
12. Петрушкин С.В., Самарцев В.В. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **68** (9), 1308 (2004).
13. Raussendorf R., Briegel H. J. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 5188 (2001).
14. Briegel H. J., Browne D. E., et al. *Nature Phys.*, **5**, 19 (2009.)
15. Barrett, S.D., Kok P. *Phys. Rev. A*, **71**, 060310 (2005).
16. Kieling K., Rudolph T., Eisert J. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 130501 (2007).