

# Ридберговские атомы для квантового компьютера

Институт физики полупроводников СО РАН проводит экспериментальные исследования атомов в высоковозбужденных состояниях. Ожидаемое практическое их применение – в качестве быстрых логических ключей квантового компьютера

Начало квантовой информатики связано с именами российского математика Юрия Манина и американского физика Ричарда Фейнмана, которые три десятилетия назад предложили использовать *квантовые системы* (группы микрочастиц с дискретным набором состояний) для вычислений применительно к моделированию молекулярной динамики и квантовых явлений.

Как базовый пример квантового вычислителя (компьютера) рассмотрим систему, состоящую из множества квантовых объектов, для каждого из которых возможны только два состояния, условно соотносящиеся с логическими значениями «ноль» и «единица». Такие объекты называют *квантовыми битами*, или *кубитами*, а состоящую из них систему – *квантовым регистром*. Классический бит в каждый момент времени достоверно находится только в одном из них, а кубит ведет себя так, как будто находится в обоих состояниях одновременно, поэтому можно говорить лишь о вероятности найти его в каждом состоянии.

Если кубиты взаимодействуют друг с другом, то их состояния оказываются перепутанными, и тогда измерение состояния одного кубита мгновенно изменяет состояние всех остальных. Возникающие вследствие этого особенности квантовых вычислений (например, параллелизм) определяют феноменальное превосходство квантового компьютера в решении некоторых математических задач, недоступных для традиционных

ЭВМ (например, используемое в современной криптографии разложение очень больших чисел на простые множители или поиск в огромном неупорядоченном массиве данных).

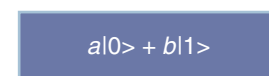
Первые простейшие квантовые вычисления были продемонстрированы на органических молекулах с использованием техники ядерного магнитного резонанса в жидкости. Однако твердотельная основа квантового вычислителя легче реализуема, да и представляется наиболее естественной. На сегодняшний день в реализации простых квантовых алгоритмов наибольшие успехи достигнуты с одиночными ионами в электростатических ловушках. Однако подобным образом создать квантовый регистр большой емкости довольно трудно, поскольку заряженные ионы постоянно взаимодействуют друг с другом, а также с окружающими частицами, что способствует декогерентизации, т.е. разрушению квантового регистра.

Более перспективным в качестве кубитов квантового компьютера видится использование одиночных электронейтральных атомов. Пара долгоживущих подуровней сверхтонкой структуры основного состояния атома может играть роль двух состояний кубита, пригодных для длительного хранения информации. Управление квантовым состоянием может осуществляться последовательностью лазерных импульсов, а захваченные в созданную лазерным излучением оптическую решетку нейтральные атомы способны образовать квантовый ре-

Классический бит



Квантовый бит (кубит)

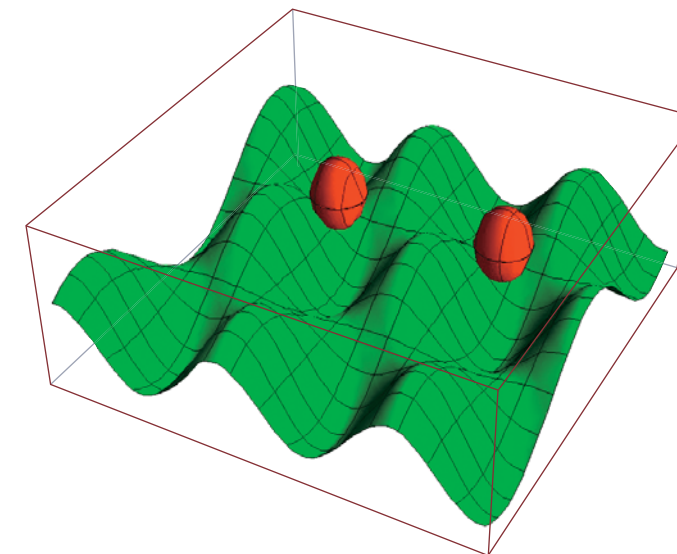


Классический бит может находиться в состояниях 0 или 1. Квантовый бит находится в состоянии суперпозиции: при измерении он может быть обнаружен в состоянии  $|0\rangle$  с вероятностью  $|a|^2$  и в состоянии  $|1\rangle$  с вероятностью  $|b|^2$

гистр практически любого размера. Главное же их преимущество – возможность управлять межатомным взаимодействием путем лазерного возбуждения на высокоэнергетичные уровни. Высоковозбужденные состояния атома, называемые *ридберговскими*, обладают целым рядом уникальных свойств, включая большие времена жизни и способность чувствовать друг друга на значительном расстоянии. Переводя атомы из основного состояния в ридберговское и обратно, мы можем включать и выключать их взаимодействие.

Значительных успехов в реализации квантовых логических операций с отдельными атомами достигла группа ученых из американского университета Висконсин-Мэдисон, которым удалось выполнить инверсию состояния атома, что соответствует самой важной для построения универсального квантового компьютера управляемой операции «логическое отрицание» (Controlled logical NOT). Длительность последовательности лазерных импульсов, необходимых для ее выполнения, составила 7 мкс. Однако полный экспериментальный цикл (включающий подготовку кубитов и регистрацию состояний) длился около секунды, а это значит, что классический компьютер пока остается более быстросрабатывающим.

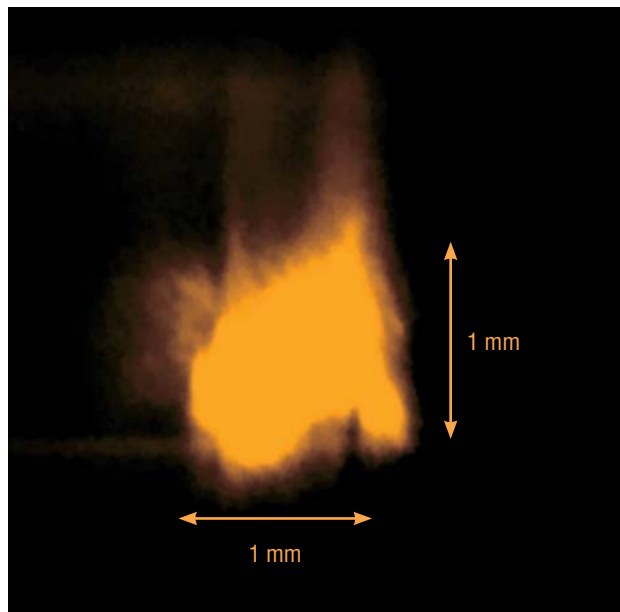
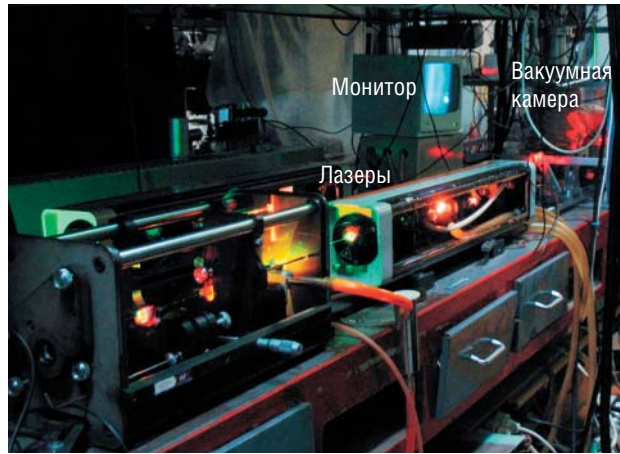
Вопросами практической реализации квантовых вычислений в России занимаются ученые из Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск). Они проводят эксперименты с ультрахолодными



Оптическая решетка для захвата нейтральных атомов получается за счет интерференции встречных лазерных пучков, образующих пространственно-периодический потенциал. Охлажденные атомы занимают места в его минимумах



Атомы в вакуумной камере охлаждаются и возбуждаются лазерным излучением с использованием оптической системы, установленной на столе рядом с камерой. Микроволновое излучение заводится в вакуумную камеру по волноводу через один из оптических вводов. Для компенсации лабораторного магнитного поля установлены катушки, подключенные к прецизионным источникам тока



Для возбуждения атомов в ридберговские состояния мы используем излучение импульсных перестраиваемых лазеров, которое заводится в вакуумную камеру через оптоволокно. В правом нижнем углу монитора видно светлое пятно. Не подумайте случайно, что это световой блик! Так светится облако холодных атомов рубидия при температуре 150 мкК (фото внизу – в увеличенном виде)

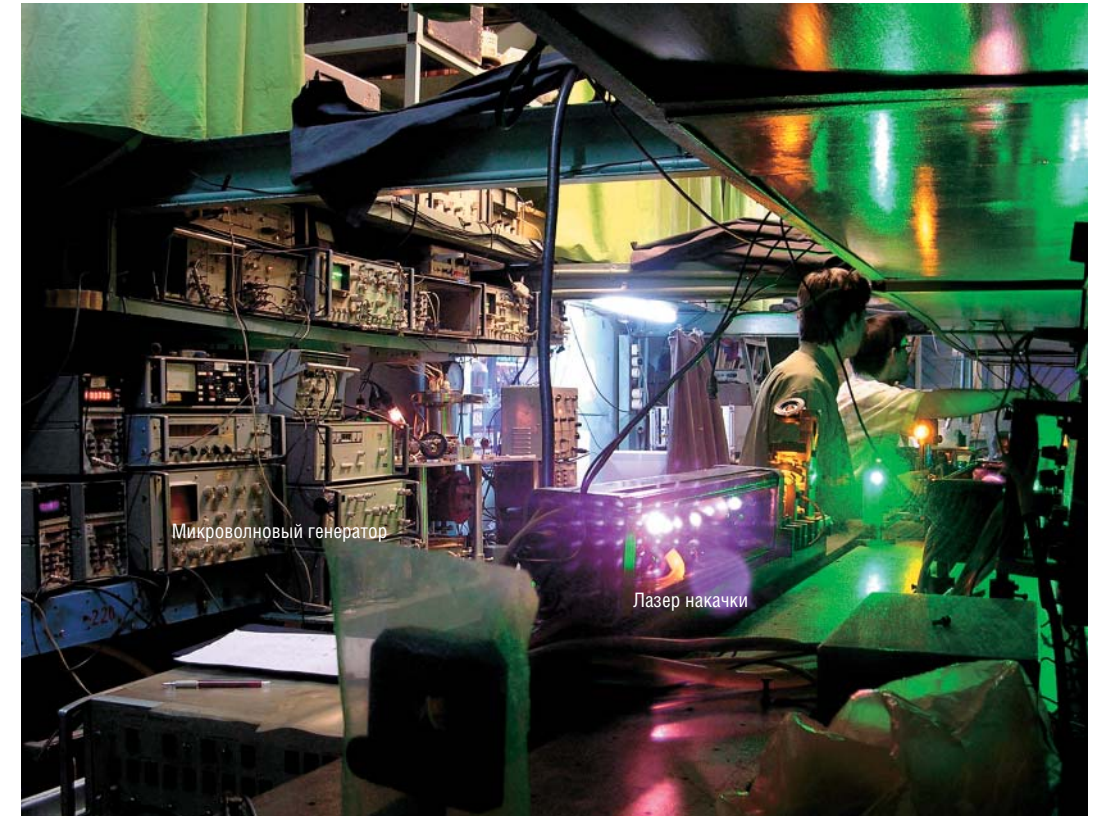
атомами рубидия, для возбуждения которых в ридберговское состояние применяют лазеры с высокой частотой следования импульсов. Среди приоритетных достижений лаборатории следует отметить наблюдение электрически управляемого резонансного диполь-дипольного взаимодействия атомов. Здесь также разработана методика высокоскоростной регистрации числа атомов, возбуждаемых под воздействием каждого лазерного импульса в серии, независимо от остальных. С ее помощью планируется наблюдать эффект дипольной блокады, суть которого состоит в том, что при лазерном возбуждении ансамбля сильно взаимодействующих атомов только один его атом может перейти в ридберговское состояние. Это можно использовать для разработки квантовых схем быстрых логических ключей, поэтому в ближайшее время планируется детальное изучение этого эффекта.

Следующим этапом исследований должна стать реализация двухкубитового квантового фазового ключа в пространственно разнесенных дипольных ловушках. Ожидается, что в ходе этих экспериментов будет наблюдаться инверсия фазы композитной волновой функции, что необходимо для выполнения операции управляемого логического отрицания.

Задача реализации вычислений на квантовых компьютерах потребует еще немало усилий от ученых всего мира, но ее решение способно привести к значительному прогрессу не только в физике, математике, информатике, но и в науке в целом.

*Литература*  
 Манин Ю. И. *Вычислимое и невычислимое*. М.: Советское радио. 1980. 128 с.  
 Валиев К. А., Кокин А. А. *Квантовые компьютеры: надежды и реальность*. Ижевск: РХД. 2001. 352 с.  
 Jaksh D., Cirac J. I., Zoller P., Rolston S. L. et al. *Quantum Gates for Neutral Atoms* // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 2208.  
 Ryabtsev I. I., Tretyakov D. B., Beterov I. I., Entin V. M. *Observation of the Stark-tuned Forster resonance between two Rydberg atoms* // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. P. 073003.

К. ф.-м. н. И. И. Бетеров (Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск)



Идет эксперимент по микроволновой спектроскопии ридберговских атомов. На фото видны импульсный лазер накачки для возбуждения ридберговских атомов и микроволновый генератор с системой стабилизации частоты и контроля спектра

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ (МК-6386.2010.2), РФФИ (10-02-92624, 09-02-90427, 10-02-00133), РАН и фонда «Династия»

**Ключевые слова:** квантовый компьютер, кубит, ридберговские атомы, дальнее взаимодействие, логический ключ.  
**Key words:** quantum computer, qubit, Rydberg atom, long-distance interaction, logical key