



В. Ф. Гузик, С. М. Гушанский
Е. В. Ляпунцова, В. С. Потапов

Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-технологическая академия

**В. Ф. ГУЗИК, С. М. ГУШАНСКИЙ
Е. В. ЛЯПУНЦОВА, В. С. ПОТАПОВ**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ КВАНТОВЫХ
КОМПЬЮТЕРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ**

Монография

Москва – Ростов-на-Дону – Таганрог
Физматлит – Издательство Южного федерального университета
2019

УДК 004.38

ББК 32.973

Г753

Печатается по решению экспертной группы комитета по инженерному направлению науки и образования при ученом совете Южного федерального университета (протокол № 7 от 17 апреля 2019 г.)

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *Г. В. Куповых*
доктор технических наук, профессор *В. И. Божич*

Гузик, В. Ф.

Г753 Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов : монография / В. Ф. Гузик, С. М. Гушанский, Е. В. Ляпунцова, В.С. Потапов. – Москва : Физматлит ; Ростов-на-Дону – Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. – 287 с.

ISBN 978-5-9221-1792-0 (Издательство Физматлит)

ISBN 978-5-9275-3232-2 (Издательство ЮФУ)

Монография посвящена основам теории построения квантовых компьютеров. В ней рассмотрены физико-технические принципы построения современных квантовых вычислителей. Приводится описание разработанных симуляторов квантовых вычислительных устройств. Описана разработанная открытая архитектура модели квантового вычислителя. Рассмотрена реализация широкого плана квантовых алгоритмов, предназначенных для реализации самых разнообразных задач науки и техники. Книга может быть полезна специалистам, работающим в области информационных технологий и вычислительной техники, а также студентам и аспирантам, обучающимся по этим специальностям.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки России № 2.3928.2017/4.6, кафедра вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета.

УДК 004.38

ББК 32.973

ISBN 978-5-9221-1792-0 (Издательство Физматлит)

ISBN 978-5-9275-3232-2 (Издательство ЮФУ)

© Физматлит, 2019

© Гузик В. Ф., Гушанский С. М.,
Ляпунцова Е. В., Потапов В. С., 2019

© Оформление. Макет. Издательство
Южного федерального университета, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 7 |
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СКВ, АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ .. | 30 |
| 1.1. Основные понятия квантовой теории информации | 30 |
| 1.2. Формализм квантовых вычислений | 33 |
| 1.3. Квантовые алгоритмы | 42 |
| 1.4. Квантовая запутанность и ее меры | 47 |
| 2. ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВУ | 59 |
| 2.1. Использование низколежащих энергетических уровней ионов, захваченных ионными ловушками, созданных в вакууме с помощью электрических и магнитных полей определенной конфигурации, при лазерном охлаждении ионов до микрокельвиновых температур | 59 |
| 2.2. Ядерные спины с $I = 1/2$ и метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) | 60 |
| 2.3. Использование двух спиновых или орбитальных электронных состояний в квантовых точках | 63 |
| 2.4. Квантовый вычислитель на жидком гелии | 64 |
| 2.5. Квантовый вычислитель на электронных волнах | 66 |
| 2.6. Ионный кристалл как квантовый вычислитель | 66 |
| 2.7. Квантовый вычислитель в алмазе | 67 |
| 2.8. Использование квантовых электродинамических полостей и фотонных кристаллов | 68 |
| 2.9. Квантовый компьютер на основе углеродных нанотрубок | 69 |
| 2.10. Квантовый компьютер на миллиардах спинов | 70 |
| 2.11. Твердотельный квантовый чип | 72 |
| 2.12. Анионы | 73 |
| 2.13. Фотонный квантовый компьютер. Физическая аппаратура | 73 |
| 2.14. Оптические квантовые компьютеры | 75 |
| 2.15. Схема для микроволнового захваченного ионного квантового компьютера | 79 |
| 2.16. Управление квантовыми гейтами азотно-замещенной вакансией в алмазе | 88 |

| | |
|--|-----|
| 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ КВУ | 109 |
| 3.1. Достижения и перспективы разработки и исследования модели квантового вычислителя..... | 109 |
| 3.2. Сравнение моделей квантовых вычислителей (МКВ)..... | 110 |
| Архитектурные особенности МКВ..... | 116 |
| Программные особенности МКВ..... | 118 |
| Симуляция квантовых эффектов / физических процессов..... | 119 |
| Пользовательский интерфейс МКВ..... | 121 |
| Прочее..... | 123 |
| Результаты сравнения и классификации сред моделирования..... | 123 |
| 3.3. Оценка МКВ | 125 |
| Разработка обобщенной архитектуры моделирующей среды | 128 |
| Разработка интерфейса пользователя..... | 130 |
| Интерфейс МКВ..... | 133 |
| Область манипуляции КС..... | 134 |
| Область определения начального состояния квантовых битов | 135 |
| 3.4. Алгоритм исполнения моделирующей среды..... | 139 |
| 4. АРХИТЕКТУРА СИМУЛЯТОРОВ КВУ | 144 |
| 4.1. Симуляторы квантовых вычислительных устройств | 144 |
| 4.2. Открытая архитектура симулятора квантового вычислителя. | 153 |
| Принципы открытой архитектуры симулятора КВ..... | 153 |
| Взаимодействие элементов симулятора квантового вычислителя..... | 153 |
| 4.3. Определение оптимального уровня модульности симулятора квантового вычислителя..... | 155 |
| Реализация в языках программирования | 155 |
| Модульная организация симулятора квантового вычислителя..... | 155 |
| Оценка уровня модульности симулятора КВ..... | 156 |
| 4.4. Выполнение набора экспериментов по нахождению оптимального симулятора квантового вычислителя (СКВ) | 156 |
| Выполнение полного или дробного набора экспериментов | 157 |
| Вывод матрицы набора экспериментов..... | 158 |
| Постановка задачи регрессионного анализа..... | 163 |
| 4.5. Классификация СКВ..... | 166 |
| 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ | 178 |
| 5.1. Понятие квантового алгоритма..... | 180 |
| 5.2. Общая структура квантового алгоритма | 183 |

| | |
|--|-----|
| 5.3. Разработка квантовых алгоритмов..... | 188 |
| 5.4. Оценка сложности КА по функции трудоемкости..... | 191 |
| 5.5. Описание алгоритмов | 196 |
| Алгоритм Дойча..... | 196 |
| Алгоритмы, основанные на квантовых Фурье-преобразованиях..... | 197 |
| Поисковый алгоритм Гровера..... | 197 |
| Алгоритм факторизации Шора..... | 198 |
| Алгоритм нахождения периода функции..... | 199 |
| Алгоритм Бернштейна – Вазирани..... | 199 |
| Алгоритм Залки – Визнера..... | 200 |
| Алгоритм Саймона..... | 200 |
| Алгоритмы, основанные на квантовом случайном блуждании..... | 202 |
| Адиабатические квантовые алгоритмы..... | 205 |
| Распознавание образов на квантовом компьютере..... | 207 |
| Квантовый алгоритм свёрточного декодирования Витерби..... | 209 |
| Квантовый криптоанализ..... | 210 |
| Абелева скрытая подгруппа..... | 211 |
| Неабелева скрытая подгруппа..... | 212 |
| Связное дерево..... | 212 |
| Квантовый алгоритм нахождения минимума функции..... | 213 |
| Квантовый алгоритм для нахождения подмножества..... | 213 |
| Машинное обучение..... | 215 |
| Квантовые алгоритмы контролируемого / неконтролируемого машинного обучения..... | 219 |
| Строковая перезапись..... | 220 |
| Квантовые нейронные сети в процессах обучения и управления..... | 221 |
| Квантовый алгоритм Монте – Карло..... | 223 |
| Алгоритм квантового хеширования..... | 226 |
| Программирование с «d-wave»: Алгоритм раскраски карты..... | 229 |
| Алгоритм двумерной упаковки..... | 233 |
| Алгоритм, усложняющий «экзаменационные задачи» для КвК..... | 237 |
| Алгоритм квантового отжига..... | 241 |
| 5.6. Классификация квантовых алгоритмов | 250 |
| 5.7. Реализация квантовых алгоритмов с применением запутанности и теории игр..... | 252 |

| | |
|---|-----|
| 5.8. Использование задач теории игр в области квантовых вычислений | 265 |
| 5.9. Использование квантовых нейронных сетей для вычислений | 270 |
| Влияние запутанного состояния на вычисления в квантовой нейронной сети..... | 271 |
| Вычисление XOR-функции с помощью КНС..... | 273 |
| Алгоритм обучения квантовой нейронной сети на основе суперпозиции | 276 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 278 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 280 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современной науке и технике постоянно возникает необходимость в решении таких стратегически важных задач, как предсказание погоды и расчет климатических изменений, создание онкологических препаратов, обработка сигналов из Вселенной для поиска внеземных цивилизаций, обработка символьной информации, криптоанализ, опережающий расчет траекторий движущихся воздушных и космических объектов и другие задачи. Практическая реализация перечисленных задач на современных, даже суперкомпьютерных, системах требует недопустимо большого промежутка времени или вообще невозможна.

В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Их работа основана на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание для преобразования входных данных в выходные, которые реально смогут обеспечить эффективную производительность на 3–4 порядка выше, чем любые современные вычислительные устройства, что позволит решать перечисленные выше и другие задачи в натуральном и ускоренном масштабе времени. Особенно интерес к квантовым компьютерам возрос после того, как Канадская компания D-Wave Systems объявила о продаже первого в мире коммерческого квантового компьютера «Орион» мощностью 16 кубитов. Его презентация прошла в Калифорнийской Силиконовой Долине, в музее компьютерной истории.

В настоящее время во многих передовых странах мира интенсивно ведутся научно-исследовательские работы по разработке и созданию квантовых компьютеров и их программного обеспечения. Публикуется большое количество статей и монографий.

Данная монография посвящена решению задачи исследования и разработки методов функционирования квантовых алгоритмов и моделей квантовых вычислительных устройств. Актуальность этой работы не вызывает сомнения, так как развитие данного направления в квантовом мире имеет большое значение для реализации квантовых вычислительных устройств. Без моделирования квантового вычислителя создание прототипа модели становится затруднительной, а иногда и вовсе невозможной задачей.

В монографии приведены основные теоретические и практические результаты в области квантового компьютеринга, которым научные сотрудники кафедры вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (ВТ ИКТИБ ЮФУ) под руководством доктора технических наук, профессора Гузика В. Ф. занимаются более 15 лет.

Монография содержит анализ способов физической реализации квантовых вычислительных устройств. В ней рассмотрены вопросы о квантовом параллелизме, квантовой запутанности и реализуемых на их основе квантовых алгоритмов. Проведена разработка методики построения симуляторов квантовых вычислительных устройств с целью проверки работоспособности существующих квантовых алгоритмов и алгоритмов, которые появятся в будущем.

На основе анализа семидесяти моделей разработана модульная модель квантового вычислителя с открытой архитектурой. На основе введенного понятия квантового алгоритма проведено исследование на разработанной модели большого количества алгебраических и числовых теоретических алгоритмов, оракульных алгоритмов, алгоритмов моделирования и т.д., которые используются при реализации практических и теоретических задач.

Эти исследования подтверждают научную и практическую ценность монографии. Монография, выполненная в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки России №2.3928.2017/4.6 кафедрой ВТ ИКТИБ ЮФУ, предназначена специалистам, работающим в области информационных технологий и вычислительной техники, а также студентам и аспирантам, обучающимся по указанным специальностям.

ВВЕДЕНИЕ

Квантовый компьютер (КвК) [1] – это вычислительный прибор, который основан на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание (перепутывание) для преобразования входных данных в выходные. В классическом компьютере количество данных измеряется битами, а в квантовом компьютере – кубитами. основополагающий принцип квантовых вычислений состоит в использовании квантово-механических объектов для представления данных и их обработки [57].

Стремление повысить вычислительную мощность компьютеров и обеспечить непревзойденные масштабы решаемых задач является одним из определяющих факторов развития суперкомпьютерных технологий. Важное значение придается разработке фундаментально новых физических принципов вычислений, где наиболее перспективным направлением является квантовый компьютеринг. Квантовые компьютеры могут находить решения задач такого же масштаба, что и современные суперкластеры, применяя всего несколько сот кубитов. Главной преградой на сегодняшний день является низкая устойчивость квантовых вычислений на больших временах из-за влияния окружающей среды, увеличения квантовых корреляций между элементами компьютера (кубитами), контролируемого переклочения состояний кубитов.

Интерес к квантовому компьютерингу был стимулирован открытием в середине 1990-х гг. нескольких алгоритмов, позволяющих за рациональное время решать на таком устройстве безвыходные для обычного компьютера задачи. Хотя квантовые вычисления еще не готовы к переходу от теории к практике, тем не менее можно обоснованно догадываться, какую форму, возможно, квантовый компьютер примет или, что более важно для дизайнера языка программирования, по какому интерфейсу можно будет взаимодействовать с таким квантовым компьютером [101].

Лет 20 назад ученым удалось создать искусственные ловушки для одиночного иона (или атома), а в последние годы появились ловушки, в которых можно удерживать много атомов или ионов. В ловушках легко исследовать физические свойства изолированных атомов, управлять их излучением, воздействуя на атом извне световыми импульсами, электрически и магнитными полями, меняя температуру. В случае большого количе-

ства атомов – исследовать их коллективные свойства (в частности, сверххолодную жидкость – бозе – конденсат).

В связи с появлением таких «макроатомов» возникла идея использовать их для создания квантовых компьютеров. В них элементарной ячейкой-битом является один атом (ион) с двумя устойчивыми квантовыми состояниями. Такая ячейка памяти была названа кубитом (русское написание английского слова *qubit*, где *qu* – сокращение от *quantum* – квантовый). Переключения (переходы) между двумя состояниями кубита осуществляются при воздействии на атом (ион) излучения с частотой, равной расстоянию (в частотных единицах) между уровнями энергии атома.

Важно понять, что и в гигантских ЭВМ, и в КвК действует один и тот же исходный принцип выбора между двумя разными информационными состояниями. Это может быть выбор между «0» и «1». Но может и между двумя квантовыми состояниями в атоме.

Промышленных образцов квантового компьютера в природе пока нет. К настоящему времени формируются лишь принципы их работы, в лабораторных условиях созданы прототипы логических квантовых ячеек. Появление же реально действующих устройств – дело уже следующего века и всецело зависит от прогресса новейших высоких технологий, в том числе нанотехнологии, имеющей дело с микродетальями размером порядка длины световой волны и даже меньше, а также с прогрессом нанофотоники – науки, изучающей свойства и законы излучения атомов в нанорезонаторах.

Известно, что корпорация ИВМ и ее исследовательский центр с 1998 по 2001 гг. продемонстрировали экспериментальные устройства в 2, 3, 5, 7 кубитов, громко названные квантовыми компьютерами. Однако они относятся, скорее, не к КвК, а к проблеме квантовой информации, криптографии и телепортации. Тем более, что неустойчивость в работе этих установок сами их создатели объясняли «нарушением когерентности состояний».

Физик-теоретик Владислав Фёдорович Чельцов, область его научных интересов – разработка теории управления излучением атомов с помощью микрорезонаторов (чаще используется другой термин – нанорезонатор), что имеет прямое отношение к проблеме создания так называемых квантовых компьютеров (КвК) – является крупным учёным в области КвК. На эти исследования его благословили когда-то академики М. Леонтович и Р. Хохлов, представлявшие к защите кандидатскую диссертацию Чельцова. В области развития КвК он отмечает следующее: миниатюризация

компьютерной техники может дойти буквально до размеров длины световой волны.

Его оценка в развитии КвК лет 10 назад была скромной, носила популярный характер, и время, необходимое для создания КвК, отнюдь не связывалось с началом нового века.

У промышленного, или, как теперь говорят, коммерческого, устойчиво работающего КвК, когда его на самом деле создадут, будут два потрясающих преимущества. Прежде всего, для отдельных его модулей мы будем иметь дело с размерами порядка световой волны. А усиление быстрогодействия будет связано со скоростями излучения и поглощения фотонов в специальных устройствах (от 108 до 1018 см/с). Из чего следуют все остальные преимущества и нынешние рекламно-фантастические их интерпретации.

На пути к КвК возникает целый ряд задач фундаментального свойства. И в их решении в начале нового века действительно достигнуты серьезные результаты, которые, конечно же, были бы невозможны без концентрации значительного исследовательского потенциала.

В Соединенных Штатах, при Университете штата Нью-Мексико на средства гранта Национального научного фонда США в 2005 г. создан Центр квантовой информации и контроля. При нем работает научный семинар, где с сообщениями выступают специалисты стран, прямо или косвенно ведущих исследования по созданию квантовых компьютеров. В эти исследования вложены большие средства, и в них участвуют многие научные коллективы США, Канады, Австрии, Германии, Норвегии, Франции, Швеции, Швейцарии. В Соединенных Штатах эти исследования ведутся в таких крупных научных центрах, как Национальная лаборатория Сандиа (термоядерный синтез), Национальная лаборатория в Лос-Аламосе (ядерная физика), Национальный институт стандартов и технологий в Боулдере, Калифорнийский институт технологий, Массачусетский институт технологий, а также в университетах отдельных штатов, располагающих соответствующей экспериментальной базой. Практически при каждом крупном университете США и других стран-участников этих работ созданы аналогичные центры.

В феврале 2007 г. СМИ обнародовали сенсацию: первый в мире коммерческий КвК мощностью 16 кубитов – его назвали «Орион» – создан ка-

надской компанией D-Wave Systems. Его презентация прошла в Калифорнийской Силиконовой Долине, в Музее компьютерной истории.

В интернете можно найти довольно оптимистические прогнозы, связанные с этим событием. Вот, например, один из них, размещенный под заголовком «Квантовый компьютер: революция в электронике» на сайте «Наука. «Известия» (inauka.ru): «По оценкам, квантовый компьютер должен был родиться лишь к 2030 г. По мнению профессора Центра квантовых вычислений Оксфордского университета Эндрю Штайна, построить работающий квантовый компьютер – все равно что овладеть холодным термоядерным синтезом. Уже в 2008 г. D-Wave собирается создать систему в 1000 кубитов, что позволит обрабатывать больше потоков данных, чем существует частиц во Вселенной. Доступ программистов для работы с «Орионом» будет открыт уже в 2007 г. Среди первых задач квантовых компьютеров – предсказание погоды и расчет климатических изменений, создание онкологических препаратов, обработка сигналов из Вселенной для поиска внеземных цивилизаций. Вместе с тем квантовый компьютер, который никто не собирается засекречивать, моментально сделает легковесной всю современную криптографию, все кодовые системы, что вызовет хаос в облаках, связанных с безопасностью и конфиденциальностью.

Что касается сенсаций, в том числе и о создании КвК мощностью 1000 кубитов и других, профессор В. Чельцев считает, что здесь просто имеет место путаница между так называемой квантовой телепортацией и квантовым компьютером. В престижном научном журнале «Природа. Физика» (№ 10.Т.2, 2006) опубликована статья о квантовой телепортации с использованием двух кубитов как у отправителя, так и у получателя.

Среди прорывов 2009 г. физики выделяют дебют квантового компьютера – прототипное устройство было представлено в ноябре и получило одобрение научного сообщества (с подробностями можно ознакомиться на [Physics world.com](http://Physics.world.com)).

Собственно, прорыв был двухступенчатым: в августе Джонатан Хоум (Jonathan Home) из Национального института стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology) и его коллеги сообщили о первом устройстве, которое получило условное название квантового компьютера. Это был чип, который выполнял ряд квантовых логических операций без потери информации. Над его созданием ученые работали не один год. Но к концу 2009 г. наконец удалось объединить все промежуточные

достижения в единое устройство, что, по мнению редакции специализированного портала Physicsworld, является настолько важным этапом, что его можно выделить в категорию «Прорыв года в области физики».

Устройство (рис. В.1) даже выглядит немного похожим на чип первого поколения компьютеров, но, как отмечает Physics world, не следует ожидать, что «скоро будет запущена квантовая версия операционной системы Windows».

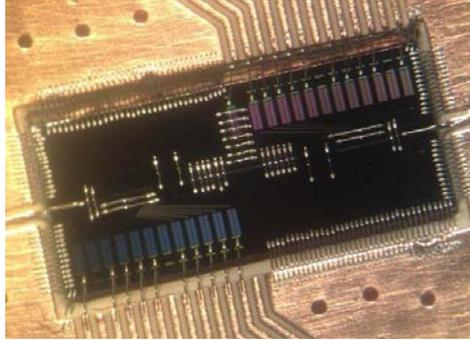


Рис. В.1. Внешний вид КвК

Точность выполнения операций квантовым чипом составляет 94 %, что впечатляет, если принять во внимание пионерский опыт квантовых вычислений, однако этого совершенно недостаточно для полноценного использования компьютера, в котором объединено много таких процессоров. Здесь требуется точность 99,99 %.

Эксперты в сфере квантовых вычислений характеризуют работу коллег из Национального института стандартов и технологий как большой шаг вперед. Борис Блинов (Boris Blinov) из Вашингтонского университета (University of Washington) в Сиэтле назвал ее *tour-de-force*, т.е. проявлением высочайшей изобретательности. Речь идет о работе группы под руководством Дэвида Ханнеке (David Hanneke), в которую вошел и Джонатан Хом, сообщивший в ноябре о создании квантового компьютера на двух ионах бериллия, удерживаемых магнитной ловушкой при температуре, близкой к абсолютному нулю. Эти ионы представляют собой кубиты (квантовые биты), и система из двух ионов бериллия под влиянием ультрафиолетовых лазерных импульсов выполнила, по меньшей мере, 160 различных операций квантового вычисления.

После того как по миру разнеслась весть о создании в России иннограда «Сколково», в нашу страну зачастили ученые высшего мирового разряда, что раньше, прямо скажем, было редкостью.

Но визит нобелевского лауреата Вольфганга Кетгерли выделяется даже на этом фоне. Нобелевскую премию он получил до неприличия, по нынешним меркам, рано, в 44 года. О каком еще ученом коллеги могут сказать, что он сначала открыл новую область физики, а потом сам же ее закрыл, поскольку не оставил в этой области белых пятен?!

В Москву Вольфганг Кетгерли прибыл в сопровождении еще нескольких совсем не пожилых профессоров.

Большинство работает в Массачусетском технологическом институте (MIT), где количество нобелевских лауреатов чуть не дотягивает до сотни. Зачем покидать мировую столицу науки и спешить в холодную и провинциальную с точки зрения научных прорывов, Москву? Профессор Кетгерли сказал «Известиям», что его заинтересовал проект «Сколково», который среди прочих проектов предусматривает строительство нового центра квантовой оптики и квантовых технологий. «Мир стоит на пороге квантовой революции, когда фундаментальные достижения физики смогут активно использоваться для получения материалов с принципиально новыми, пока недостижимыми свойствами, – буйно фантазировал нобелевский лауреат Кетгерли. – Сверхскоростной квантовый компьютер, о котором говорят как о революционном прорыве, становится все ближе. Квантовые технологии обещают гигантские коммерческие выгоды во всех областях – от информатики и энергетики до медицины и транспорта. В Россию мы приехали по той причине, что здесь сохранилась отличная научная школа. К примеру, идею топологического квантового компьютера высказал сотрудник ФИАНа Алексей Китаев, который давно работает в Калифорнии. Я уверен, что знание и наука должны иметь много географических точек роста. Квантовый центр в Сколкове, возможности которого мы хотим выяснить во время поездки, поможет не только России, но и всей мировой науке. Мы посетим российские научные центры и проведем переговоры с первым заместителем главы администрации президента РФ Владиславом Сурковым и президентом фонда «Сколково» Виктором Вексельбергом».

В результате этой встречи было принято решение о создании Международного центра квантовой оптики и квантовых технологий, где будут сконцентрированы разработки по одному из наиболее перспективных

научных направлений. В группе Кетгерли – два американских профессора, которые получили образование в России, – Михаил Лукин и Евгений Демлер. Они закончили МФТИ, как и недавние нобелевские лауреаты Андрей Гейм и Константин Новосёлов. В России вовсе ученые не работали. Сразу после Физтеха, в начале 1990-х, когда наша наука дышала на ладан, они уехали в Америку, где снискали признание, но не забыли о России, которая сегодня предоставила им шанс подняться на новую высоту.

«В знаменитом Массачусетском технологическом институте среди профессоров по физике русских – больше 10 %, это первое место среди всех стран, но Россия радоваться по этому поводу не может, – говорит обладатель полутора десятков американских престижных научных наград профессор Михаил Лукин. – Проект «Сколково» и квантовый центр – уникальная идея. После долгого застоя наука в России получает шанс на возрождение. Очень скоро прорывные фундаментальные исследования в квантовой физике начнут приносить прикладную пользу. Если удастся создать в Сколково условия для занятий наукой, в новом квантовом центре, забыв об эмиграции, будут работать не только российские ученые, сюда потянутся ученые из других стран, что для России пока немыслимо».

«Мировая наука обогащается за счет взаимодействия многих культур и многих научных школ, – говорит профессор Джон Дойл, который имеет индекс цитирования даже выше, чем Вольфганг Кетгерли. – Русская научная школа в физике – один из мировых лидеров. В Америку приезжает много молодых ученых, но русские – лучшие. Только я думаю, что если русские получат возможность заниматься наукой дома, в России, и мировой науке, и русским ученым будет лучше».

Единственный не американец в группе Кетгерли – итальянский профессор Томмазо Каларко имеет для нас не меньший интерес, чем все вместе взятые американцы. Итальянец работает в Германии и является координатором научных программ ЕС по проблемам квантовой информатики. «К сожалению, признает профессор Каларко, пока у Европы нет совместных проектов с российскими институтами, хотя личных контрактов немало. «Квантовый центр в Сколково, – сказал профессор Томмазо Каларко, – это создание мощной структуры, которая открывает путь к совместным проектам. Удачных примеров в мире много – Институт Макса Планка в Мюнхене, Центр квантовой оптики в Барселоне, Центр холодных атомов в МПГ. «Сколково» должно встать в этот ряд».

Кстати, идея квантового компьютера впервые много лет назад была высказана выпускником МГУ Юрием Маниным, который защитил докторскую диссертацию в 26 лет, получил Ленинскую премию в 30 лет, но уже 20 лет живет на Западе. Юрий Манин – академик чуть не всех академий мира, только не РАН, потому что у него нет времени на прохождение наших бюрократических процедур. Отличие квантового компьютера от классического состоит в том, что обычные ЭВМ построены на принципе «ноль-один», а квантовый компьютер – это не «или-или», а в один и тот же момент оба состояния – «и-и». Это связано с корпускулярно-волновым дуализмом фотона, носителя информации в квантовом компьютере, который оперирует квантовыми битами или кубитами, которые могут принимать одновременно два значения, неизмеримо увеличивая мощность компьютера.

О балансе пользы и удовольствия в сегодняшних совместных российско-американских исследованиях квантовых систем рассказал выпускник Физтеха, профессор Гарварда, содиректор совместного гарвардско-массачусетского Центра холодных атомов, а с 2012 г. ещё и председатель научно-консультативного совета Российского квантового центра Михаил Лукин (рис. В.1).



Рис. В.2. М. Лукин

У истоков Российского квантового центра – три выпускника Физтеха: Михаил Лукин, Евгений Демлер (Гарвард и соответственно научное руководство) и Сергей Белоусов (Москва, компании Parallels и Acronis в сфере

IT и венчурный фонд Qwave). Впрочем, основным источником финансирования РКЦ в данный момент выступает пятилетний грант Фонда «Сколково». Синергия этих ресурсов должна, по замыслу устроителей, вылиться в работающий инструмент по реинтеграции России в мировую науку высочайшего уровня. Международная конференция по квантовым технологиям, которая регулярно (уже второй раз) проходит в Москве, подтверждает серьёзность заявки и вполне тянет на научное событие 2013 г. Она успешно избежала риска стать «встречей выпускников»; список участников – впечатляющее созвездие учёных мирового класса, своей однородностью лишний раз доказывающее, что для большой науки не существует политических и государственных границ. А круглый стол конференции собрал представителей в области квантовых технологий, в диапазоне от учёных до инвесторов и чиновников.

В частности М. Лукин отметил: «Хорошо то, что в России про большую науку заговорили и думают. Потому что когда я заканчивал Физтех в начале 90-х, об этом не думал никто. Я слежу за ситуацией, читаю про реформу Академии наук... не хочу углубляться в эту болезненную тему, но ведь всем понятно, что существующая система неэффективна. С другой стороны, почти всё лучшее, что у нас есть в науке, находится в системе Академии наук, и ей нет никакой альтернативы.

Идея Российского квантового центра заключалась в том, чтобы попытаться объединить все здоровые силы, снаружи и изнутри, учёных и из России – из университетов, из РАН, и из-за рубежа. Я участвую в проекте РКЦ не ради денег, я ничего за это не получаю, с моей стороны это своего рода community service – работа на благо общества. Я вырос в России, бесплатно получил в Физтехе первоклассное образование, которое определило мою жизнь, сформировало мою карьеру. Людям, которые сделали для тебя что-то хорошее, надо помогать, если есть такая возможность.

Квантовый центр финансируется уже в течение года, и за этот год сделано довольно много. Есть научная группа, она работает в здании «Урал» в Сколково. По-моему, это единственный проект в Сколково, в котором есть несколько реальных лабораторий, с оборудованием, работающими учёными, студентами. Уже пошли публикации, некоторые в соавторстве, но появились и статьи, сделанные в России. Задышала какая-то реальная жизнь. То, что это всё – подопытный кролик, я знаю. Но такой проект, как РКЦ,

может развиваться только при условии, что все здоровые силы – университеты, Академия наук, учёные из-за рубежа – работают вместе.

Конечно, один центр в отдельно взятой области знания, абсолютно изолированный от окружающей среды, ни к чему большому не приведёт. Если всё начнётся и закончится на этом отдельно взятом куске земли, то вряд ли результаты будут хороши. Но с чего-то начинать надо. Очевидно, что один квантовый центр не может перевернуть ситуацию. Но он может стать моделью, одним из векторов развития реформы. Я надеюсь, что таких центров будет много, тогда создастся какая-то среда. Нужно создавать видимые, прозрачные, функциональные площадки, на которых бы работали совместно разные люди с разными научными интересами. В том числе люди, которые рады возможности отплатить России добром за то хорошее, что для них было сделано в «предыдущей» жизни.

Основные результаты исследований отмеченных выше американских ученых изложены в приведенном списке литературы монографии [53–56].

В последние годы в России квантовым вычислениям уделяется большое внимание, поскольку математика и квантовая физика являются традиционно сильными сторонами отечественной науки. Локомотивом экспериментальной реализации квантовых вычислений в России был создатель многих советских компьютеров, директор Физико-технологического института РАН академик Камиль Валиев, автор известной книги «Квантовые компьютеры и квантовые вычисления» [102]. Но первое измерение кубита было сделано лишь в середине 2013 г. Этот кубит был сделан в Германии, однако в мае 2015 г. российские ученые самостоятельно изготовили первый российский кубит и измерили его. Эта работа была сделана совместно лабораторией Олега Астафьева в МФТИ и лабораторией Валерия Рязанова Российского квантового центра, располагающейся на территории Института физики твердого тела РАН в Черноголовке. В марте 2016 г. изготовлено устройство, представляющее собой дальнейшее развитие созданного ранее кубита. Ученые из лаборатории искусственных квантовых систем и Центра коллективного пользования МФТИ впервые в России создали и протестировали сверхпроводящую двухкубитную схему с управляемой связью.

Существующий уровень того, что делается в мире по кубитам сейчас, – это простые устройства от трех до девяти кубитов. Чтобы добраться до этого начального уровня, лидирующим в мире исследовательским группам пришлось пройти примерно десятилетний путь. За прошедшую декаду за-

падные исследователи от первых экспериментальных устройств – отдельных кубитов – продвинулись до простых схем, включающих несколько кубитов.

Знания, которые уже накоплены в этой области, очень полезны, чтобы не повторять ошибок и идти дальше прямоком. Развитие этой области в России – это вопрос людей и времени, не говоря уже о деньгах. Нужны сотрудники, которые могут экспериментально исследовать подобного рода задачи. Таких молодых ученых в мире всего несколько сотен, это аспиранты и кандидаты наук, уже поработавшие в данной области. Эти люди сейчас все нарахват, поскольку область исследований квантового компьютера стремительно развивается. Google не только купил процессор D-Wave, но и создал собственную лабораторию в июне 2014 г., куда переманил сильнейшую команду – всю группу Джона Мартинеса из Санта-Барбары. Эта корпорация, как и D-Wave, создает квантовый компьютер на сверхпроводниках, но использует путь, альтернативный подходу D-Wave, который далеко не всем кажется правильным. Многие физики имеют сомнения, что устройства, которые продает эта канадская компания, являются действительно квантовыми. Кроме Google из известных частных компаний свои лаборатории по созданию квантового компьютера сделали также IBM и Microsoft.

Необходимость квантового компьютера для России обусловлена соображениями национальной безопасности. У США, видимо, скоро появится такое устройство, причем благодаря поддержке государства, которое финансировало его разработку как раз через различные агентства, связанные с национальной безопасностью. России не стоит отставать в гонке, поскольку есть множество разнообразных приложений этих технологий. В США на разработку подобных устройств уже были потрачены сотни миллионов долларов. А в России – это лаборатории РКЦ и грант Алексея Устинова, хотя он имеет не прямое отношение к созданию квантового компьютера, – это примерно пять миллионов долларов. Есть также новая лаборатория Олега Астафьева в МФТИ, но там масштабы немного меньше. Алексей Устинов в интервью говорит: «Это несравнимое с американским по объемам финансирование, но ведь пока и не строим квантовый компьютер, скорее занимаемся фундаментальной наукой. Не скрою, нас пришлось бы еще долго уговаривать начать заниматься сложнейшей технической задачей по построению квантового компьютера, которая кажется нереалистичной в существующих пока условиях. Даже если не брать в расчет отсутствие не-

обходимого финансирования, непонятно, как уговорить способных и квалифицированных людей, которые могут заниматься данным направлением. Вопрос не просто в деньгах, надо создать среду, в которой это все сможет развиваться – решение задачи требует колоссальных интеллектуальных и инженерных усилий и нельзя просто заплатить деньги и рассчитывать все это получить. Хотя, я думаю, как всегда найдутся люди, которые пообещают это сделать за определенную сумму лет за пять. Но не думаю, что они дадут результат за пять лет. Предстоит огромная работа, сопоставимая по сложности и объему с советским атомным проектом».

Из групп специалистов, которые реально могут получать первые результаты в этом направлении, в России есть пока только 5 организаций: Физтех (МФТИ), МИСиС, Институт физики твердого тела РАН, Российский квантовый центр и Новосибирский технический университет. Пока есть стремление делать новые интересные физические эксперименты с небольшим количеством кубитов, не повторяя, а скорее, опираясь на то, что уже сделано на Западе и не стремясь делать сколь-нибудь пригодное для практики вычислительное устройство.

Создание первого в России сверхпроводящего кубита

Давно ведутся исследования различных физических систем, которые можно использовать в качестве кубитов: квантовые точки, азот-вакансии в алмазах, холодные нейтральные атомы и другие системы. Достижение, о котором идет речь, – создание именно сверхпроводящего кубита.

Если говорить о готовности перейти от исследования физических эффектов в квантовых системах к практической реализации квантового компьютера, то серьезным достижением является создание именно сверхпроводящего кубита. В мае 2015 г. группа ученых из Московского физико-технического института, Российского квантового центра, Национального исследовательского технологического университета МИСиС, Института физики твердого тела РАН и ряда других организаций под руководством Олега Астафьева (со стороны МФТИ), Алексея Устинова (со стороны РКЦ) и Валерия Рязанова впервые смогла создать такой сверхпроводящий кубит в российской лаборатории. Созданные ими кубиты состоят из четырех джозефсоновских контактов на «петле» размером в один микрон. Контакты состоят из алюминиевых полосок, разделенных слоем диэлектрика (оксида алюминия) толщиной около 2 нанометров. Ученые прозондировали устройство микроволновым излучением и определили, что его свойства со-

ответствуют заданным параметрам. Это стало важным шагом по созданию квантовых вычислительных устройств, которые могут сделать революцию в области вычислительной техники.

Именно сверхпроводящие кубиты, вариант которых удалось реализовать российским ученым, используются в компьютере D-Wave. В этом устройстве действительно наблюдаются квантовые эффекты – некоторые кубиты оказываются в перепутанных состояниях, что подтвердила публикация в уважаемом научном журнале *Physical Review X* в 2014 г. Но, как выяснилось, для решаемых на этом компьютере задач квантовая механика пока не дала никаких вычислительных преимуществ. Хотя само по себе это еще ничего не говорит о дальнейших перспективах D-Wave, его архитектура из 1024 кубитов позволяет реализовать единственный алгоритм – так называемый «квантовый отжиг», позволяющий решать некоторые задачи оптимизации, сводящиеся к поиску глобального минимума. Универсальные квантовые вычисления реализовать намного труднее.

Создание первой в России сверхпроводящей двухкубитной схемы с управляемой связью

В марте 2016 г. изготовлено устройство, представляющее собой дальнейшее развитие созданного ранее на Физтехе кубита. Ученые из лаборатории искусственных квантовых систем и Центра коллективного пользования МФТИ впервые в России создали и протестировали сверхпроводящую двухкубитную схему с управляемой связью. В схеме, созданной учеными, управление связью кубитов происходит следующим образом: часть сверхпроводящего квантового тока отводится из одного кубита в другой и наоборот. Управляя долей тока, циркулирующего между кубитами, можно управлять взаимодействием элементов. Базовыми элементами физтеховской двухкубитной схемы стали трансмоны. Это зарядовые кубиты, энергия в которых находится преимущественно в электрическом поле. За счет большой емкости трансмон менее чувствителен к электрическим шумам, чем другие архитектуры. Ключевыми элементами трансмонов, как и любых сверхпроводящих кубитов, являются джозефсоновские переходы, позволяющие манипулировать энергетическими уровнями таких систем. Два джозефсоновских перехода в кольце образуют сверхпроводящий квантовый интерферометр, дающий возможность производить подстройку параметров кубита внешним магнитным полем. Время фазовой когерентности в данном

случае составляет обычно около 30–40 микросекунд. Однако известно, что это значение можно увеличить с помощью различных манипуляций.

Исследователи из МФТИ создали в своей лаборатории схему, которая является полигоном для тестов и проверок новых идей. Необходимо наладить технологические процессы, аналоги маршрутов проектирования схем, развить технологию борьбы с шумами и метрологическое обеспечение, а также программное обеспечение, которое будет обеспечивать управление кубитными схемами. «Масштабирование от двух до четырех кубитов с точки зрения квантовых вычислений не открывает принципиально новых возможностей. Интересно увеличение до 5–10 элементов, когда появляется возможность выполнять алгоритмы коррекции ошибок – это требует около 200 микросекунд когерентности. Основным направлением дальнейшей работы является усовершенствование системы с целью увеличить времена когерентности», – заявил один из авторов двухкубитной схемы, заместитель руководителя Центра коллективного пользования МФТИ Дмитрий Негров.

Исследования в Институте физики полупроводников (ИФП) им. А. В. Ржанова СО РАН в Новосибирске

Сверхпроводники – не единственное направление, в котором действуют российские разработчики кубитов. В Институте физики полупроводников (ИФП) им. А.В. Ржанова СО РАН в Новосибирске занимаются и квантовыми точками, и азотными вакансиями в алмазе, и ультрахолодными нейтральными атомами. В институте есть единственная в России экспериментальная установка, где реализовано лазерное охлаждение и возбуждение отдельных атомов в такие состояния, когда эти атомы начинают очень сильно друг с другом взаимодействовать.

Это нужно для выполнения двухкубитовых логических операций. Экспериментальная установка состоит из вакуумной камеры с парами рубидия, полупроводниковых и твердотельных лазеров для охлаждения и возбуждения атомов, а также системы регистрации квантовых состояний, чувствительной к отдельным атомам (рис. В.3).

Группа сотрудников ИФП под руководством доктора физико-математических наук Игоря Рябцева впервые в мире продемонстрировала резонансное диполь-дипольное взаимодействие двух отдельных атомов и показала, что можно управлять им с помощью радиочастотного электриче-

ского поля. Предполагается, что уже в ближайшее время это позволит наблюдать эффект блокады, важный для двухкубитовых операций. Теоретические работы группы направлены на повышение точности захвата отдельных атомов в оптические дипольные ловушки, а также разработку оригинальных схем квантовых вычислений, где в качестве кубита используется не один атом, а атомный ансамбль. Этими работами российская группа занимается в тесной кооперации с американскими и британскими коллегами.



Рис. В.3. Новосибирская установка для квантовых вычислений на холодных атомах

Проблему квантовых вычислений иногда сравнивают по сложности с разработкой атомной бомбы. Вопрос о том, возможен ли практически применимый квантовый компьютер, по сей день остается открытым. В США в 2009 г. были продемонстрированы первые двухкубитовые логические операции с двумя нейтральными холодными атомами. Сейчас группа из Университета Висконсин-Мадисон работает с 49 кубитами, и это большой рывок вперед. Если с таким массивом удастся получить приемлемые результаты в плане точности вычислений, то можно надеяться, что дальнейшее масштабирование будет уже не столь серьезной проблемой. Вместе с тем инвестиции в данную тематику в США несопоставимы с российскими и превышают их на порядки. Поэтому отечественные исследователи предпочитают работать в кооперации с зарубежными – это позволяет внести свой вклад в развитие данной области и одновременно держать руку на пульсе, чтобы при необходимости пойти уже по известному правильному пути.

Экспериментальная установка в ИФП СО РАН, несмотря на свою относительную простоту, позволяет детально исследовать физические эффекты, которые применяются в Мадисоне для реализации квантовых вычислений. Теоретические результаты российской группы тоже представляют значительный интерес для американцев. В то же время экспериментальные методы и теоретические расчеты американской группы активно используются специалистами из ИФП. С учетом высокой стоимости экспериментальных исследований такая кооперация исключительно эффективна. Хотя финансирования российской группе, конечно же, не хватает.

Использование сверхпроводящего кубита в качестве однофотонного источника СВЧ-излучения

Международная группа учёных, включающая руководителя лаборатории искусственных квантовых систем МФТИ Олега Астафьева, использовала сверхпроводящий кубит в качестве однофотонного источника СВЧ-излучения. Учёные подчёркивают, что такой источник может переизлучать частоту излучения и обладает высокой эффективностью. Технология имеет большой потенциал для применения в квантовых компьютерах, а также в изучении взаимодействия между светом и веществом. Результаты работы опубликованы в журнале *Nature Communications* 22 августа 2016 г.

Однофотонные источники являются важным компонентом квантовых вычислительных систем. Такие излучатели включают в себя микрорезонатор: его геометрия определяет длину волны излучаемого фотона. Оперативная настройка длины волны и соответствующей ей частоты в таких системах невозможна. Группа учёных из Лондонского университета (Великобритания), Института физико-химических исследований RIKEN (Япония), Национальной физической лаборатории NPL Великобритании и МФТИ (Россия) разработала однофотонный источник без жёсткого и непереключаемого резонатора.

В роли источника единичного фотона можно использовать единичный атом (рис. В. 3). При переходе атома из возбуждённого состояния в нижнее избыток энергии испускается в виде кванта света – фотона. Проблема подобного излучателя в том, что фотон испускается в произвольном направлении, и «поймать» его для дальнейшего использования – непростая задача. Поэтому эффективность таких систем (существуй они в реальности) была бы мала.

На рис. В.4 непрозрачный экран с отверстием гораздо меньше, чем длина волны. Двухуровневый атом находится справа от экрана близко к отверстию. Свет с левой стороны возбуждает атом, но не проникает через отверстие. Возбуждённый атом излучает единичный фотон. Чтобы создать направленное излучение, учёные использовали искусственный атом – кубит, построенный из нескольких джозефсоновских контактов. Джозефсоновский контакт состоит из двух сверхпроводников, разделённых тонким слоем диэлектрика. Куперовские пары могут туннелировать через тонкий слой диэлектрика, переводя кубит из возбуждённого в основное состояние и обратно. Для поддержания сверхпроводимости, а также правильного функционирования прибора рабочая температура прибора должна быть близка к абсолютному нулю.

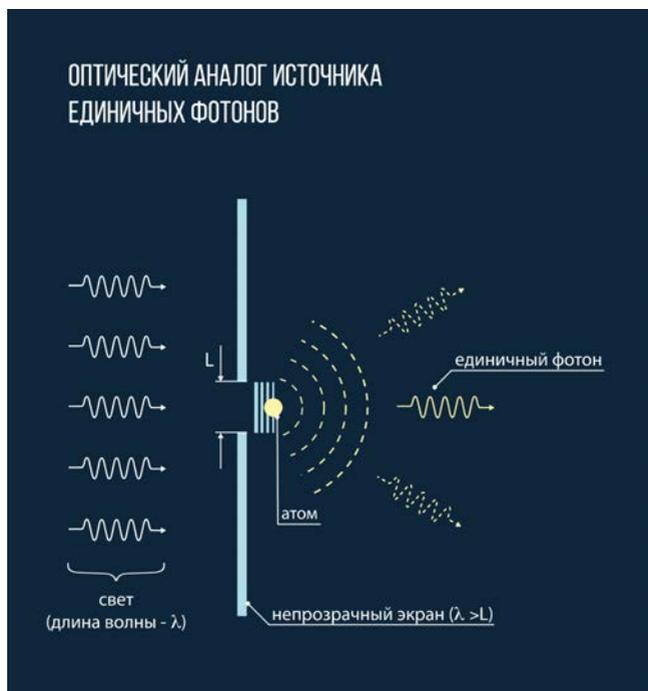


Рис. В.4. Оптический аналог источника

Источник представляет собой кубит, расположенный на стыке двух изолированных друг от друга волноводов, по которым могут распростра-

няться электромагнитные волны (квантом электромагнитной волны является фотон). Авторами работы эти волноводы обозначены как линия управляющего сигнала и линия излучения. Между кубитом и обеими линиями сочетание проводников и диэлектрика создаёт два конденсатора, за счёт чего кубит оказывается подключённым к линиям через электрическую ёмкость. Или, как принято говорить в электротехнике, имеет ёмкостные связи.

Кубит ёмкостной связью слабо связан с линией управляющего сигнала и сильно связан с линией излучения. Управляющий сигнал (приходит слева, если смотреть на схему источника) воздействует на кубит, переводя его в возбуждённое состояние, после чего кубит испускает фотон, который по линии излучения может быть доставлен к последующим элементам схемы, что отражено на рис. В.5.

Кубит на рис. В.5 располагается в середине. Тонкие металлические линии осуществляют емкостную связь (ёмкости C_c и C_e) между кубитом, линией управляющего сигнала и линией излучения.



Рис. В.5. Схема разработанного источника единичных фотонов

Особенностью кубита на джозефсоновских контактах является возможность контроля его магнитным полем. От него зависит разница энергий возбуждённого и основного состояния кубита, а значит, и частота (длина волны) излучаемого фотона. Изменение внешнего поля (образец помещается в катушку) позволяет изменять частоту излучаемого фотона в широком диапазоне 7,75–10,5 ГГц. Максимально возможная эффективность вероят-

ности испустить фотон в линию излучения определяется ёмкостями, которые осуществляют связь между линиями передач и кубитом. За счёт правильного подбора соотношения ёмкостей эффективность подобного источника может достигнуть 99,99 %, что ставит его вне конкуренции по отношению к другим однофотонным источникам. В реальности же на эффективность влияют и другие факторы, например, поглощение фотона в диэлектрике (безызлучательная релаксация). В измеряемом образце эффективность составила более 65 % на всём диапазоне частот, что уже является рекордной величиной.

По словам одного из авторов работы Олега Астафьева: «Данный однофотонный источник обладает высокой эффективностью и возможностью излучать фотоны в широком диапазоне частот. Это позволит использовать его в квантовых компьютерах и других квантовых технологиях, в которых единичные фотоны будут использованы в качестве носителей информации, а также для её хранения, обработки и передачи. Единичный фотон невозможно перехватить, не изменив его состояние, поэтому применение данного источника в квантовых системах передачи данных обеспечит абсолютно безопасную передачу данных. Кроме того, он может использоваться в квантовых симуляторах, моделирующих сложные квантово-механические системы, и для изучения фундаментальных взаимодействий между фотонами и веществом».

При практической реализации квантового компьютера как реально действующего вычислительного устройства современная наука сталкивается с рядом фундаментальных трудностей, обусловленных квантовой природой носителей информации. Квантовые состояния оказались очень нестабильными к различного рода возмущающим воздействиям. К ним можно отнести, во-первых, воздействия, связанные с инициализацией и измерением квантовых состояний, во-вторых, взаимодействие квантовых носителей с внешней средой (этот процесс получил название декогерентности). Причем, если первый тип воздействий вносит ошибки в квантовые состояния вследствие нечетности технологических процессов и, в принципе, может быть устранен совершенством технологий, то проблема декогерентности является неразрешимой с точки зрения невозможности изолирования квантовых систем. Поэтому возникает необходимость прогнозировать это влияние на достоверность результата вычисления.