



Поправки к статье

Просим читателей обратить внимание на ряд поправок к статье «Квантовые технологии: от научных открытий к новым приложениям», опубликованной в журнале ФОТОНИКА, №6, стр. 574–583; DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.574.583. В статью внесены ряд правок и уточнений, которые не были учтены в публикации по техническим причинам.

Квантовые технологии: от научных открытий к новым приложениям

А. К. Федоров,

Российский квантовый центр (ООО «МКЦТ»), <http://www.rqc.ru>, Москва, Сколково, Россия

Квантовые технологии – одно из наиболее динамически развивающихся направлений. Квантовые технологии открывают новые возможности для целого ряда областей. За счет своих уникальных свойств квантовые системы могут стать основой нового поколения высокопроизводительных вычислительных устройств (квантовых компьютеров), методов защиты информации (с использованием квантовой криптографии), а также высокоточных измерительных устройств (квантовых сенсоров и квантовых метрологических устройств). Обзор посвящен прогрессу, наблюдаемому в основных сферах современных квантовых технологий: квантовой обработки информации, квантовой криптографии, а также квантовой метрологии и квантовой сенсорике.

Ключевые слова: квантовая обработка информации, квантовая криптография, квантовая метрология, квантовая сенсорика.

Статья получена: 08.08.2019. Принята к публикации: 30.09.2019.

РАЗДЕЛ «ВВЕДЕНИЕ»

При обсуждении транзисторов с топологическими размерами порядка нескольких нанометров речь идет о системах, создаваемых в лабораториях.

РАЗДЕЛ «КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ»

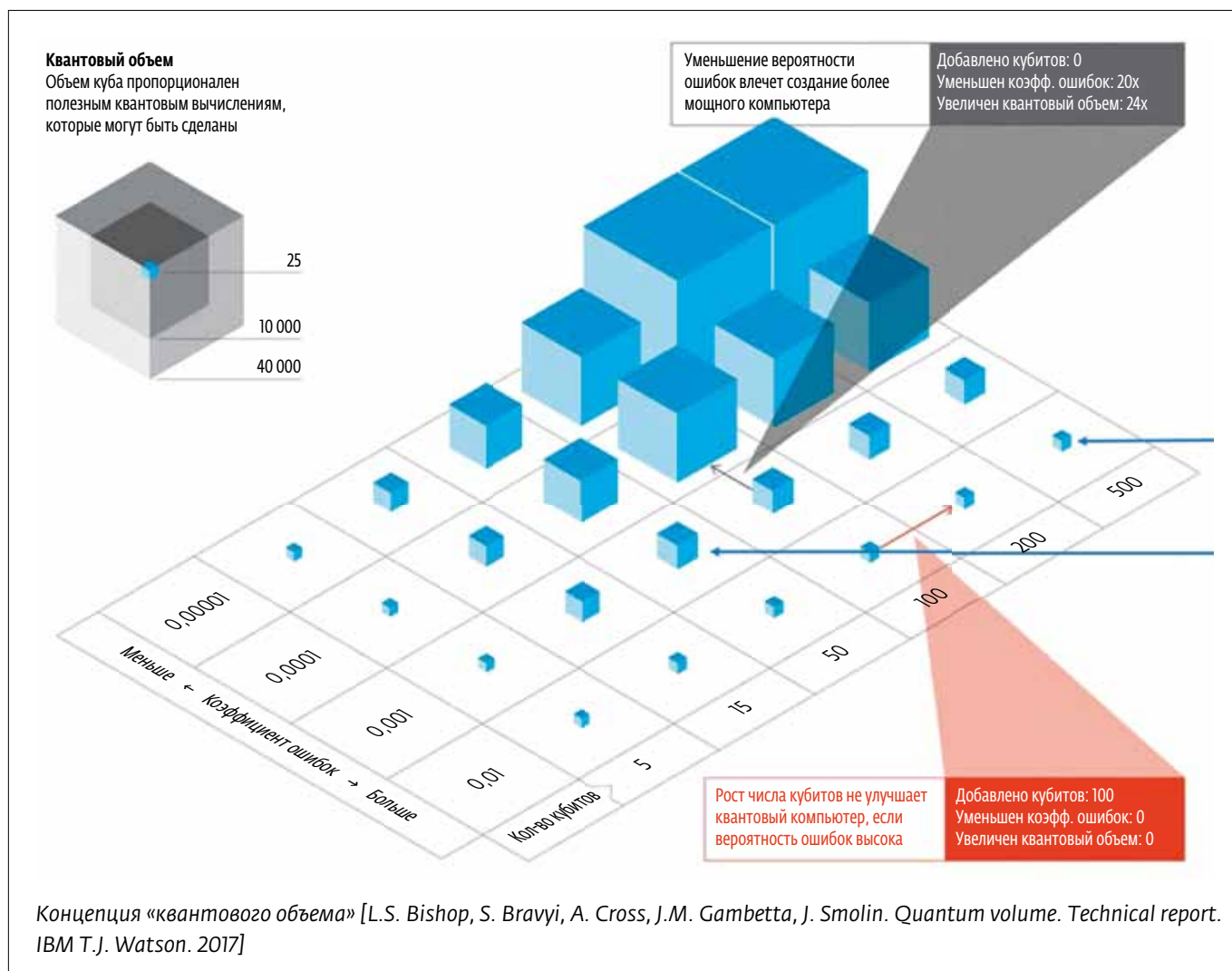
Стоит отметить, что, помимо аналоговых квантовых симуляторов, существуют также и цифровые квантовые симуляторы.

Универсальные квантовые компьютеры также можно использовать для моделирования различных систем. В таком случае говорят о цифровых квантовых симуляторах. Именно о них идет речь в абзаце про моделирование физических процессов в материалах, а также в ходе химических реакций.

РАЗДЕЛ «КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ И СЕНСОРИКА»

В разделе была нарушена последовательность ссылок на литературу. Здесь и далее приведен текст с правильными ссылками и нумерацией ссылок в оригинальной статье.

Основная сложность создания квантовых компьютеров заключается в том, чтобы изолировать квантовые системы от окружающей среды. Это связано с тем, что даже малейшие изменения окружения могут деструктивно повлиять на квантовую систему, что может привести к декогеренции. С другой стороны, если квантовые системы столь чувствительны, то с их помощью могут быть созданы разнообразные сенсоры.



Квантовые сенсоры, например реализованные в виде кристалла размером порядка нескольких нанометров, могут быть внедрены в клетку живого организма без нарушения ее жизнедеятельности и затем использоваться для измерения микроскопических полей внутри этой клетки [55]. Это открывает совершенно новые горизонты для биологии и медицины. Становится доступным колоссальный объем знаний о жизнедеятельности частей клеток, развитии болезней, механизмов функционирования лекарств. Квантовые датчики помогут разобраться и в структуре связей головного мозга человека, сделав возможным лечение его болезней.

Одним из наиболее перспективных искусственных атомов можно назвать NV-центр окраски в алмазе, который уже сегодня начинает активно использоваться в качестве чувствительного сенсора. Такой дефект возникает, если в кристалле алмаза, состоящего из атомов углерода, удалить два атома в соседних узлах решетки, а на место одного из них поме-

стить азот (NV-центр, т.е. «nitrogen-vacancy center», азото-замещенная вакансия). Алмаз обладает не только уникальной оптической чистотой, но и также уникальной чистотой с точки зрения имеющих в нем спинов. Сам NV-центр позволяет оптическими методами считывать его внутренне состояние, тем самым измеряя магнитные или электрические поля. Всего в нескольких кубических миллиметрах алмаза можно разместить достаточно NV-центров, чтобы реализовать чувствительность, сопоставимую с лучшими существующими магнитометрами. Кроме того, NV-центр можно локализовать в пределах нескольких нанометров, на базе этого центра может быть реализован магнитометр сверхвысокого разрешения, способный видеть спины отдельных частиц. Системы на основе NV-центров разрабатываются в России и используются для различных биомедицинских приложений [56, 57].

Квантовые технологии позволяют создать сверхточные датчики позиционирования (с использованием



атомных часов), а также новое поколение метрологических устройств. Квантовые или атомные часы представляют собой приборы для измерения времени, в которых в качестве периодического процесса используются собственные колебания, связанные с процессами, происходящими на уровне атомов или молекул. Определение положения космических кораблей, спутников, баллистических ракет, самолетов, подводных лодок, а также передвижение автомобилей в автоматическом режиме по спутниковой связи (GPS, ГЛОНАСС, Galileo) немислимы без атомных часов. Атомные часы используются также в системах спутниковой и наземной телекоммуникации, в том числе в базовых станциях мобильной связи, международными и национальными бюро стандартов и службами точного времени, которые периодически транслируют временные сигналы по радио. Исследования и разработки в области создания оптических часов на ультрахолодных атомах и ионах привели к снижению относительной погрешности частоты вплоть до единиц в 18-ом знаке после запятой. Использование новых высокоточных методов сличения частот открывает новые возможности при проведении фундаментальных исследований (чувствительные тесты общей теории относительности, поиск дрейфа фундаментальных констант, поиск «темной материи»), а также в современной навигации и гравиметрии. В работе обсуждаются основные методы, использующиеся при создании высокоточных часов (в том числе транспортируемых) на основе ультрахолодных атомов и ионов, и возможность их использования в современных задачах релятивистской гравиметрии.

В 2017 году Министерством образования и науки РФ поддержан проект 14.610.21.0010 «Разработка генератора ультрастабильных опорных сигналов частоты на холодных ионах иттербия для повышения на порядок точности геопозиционирования, космической навигации и формирования новых сегментов массового спроса на рынке приложений глобальной спутниковой навигации», задачей которого является создание компактного (1 м³) стандарта частоты на одиночном ионе иттербия [58].

В целом в России на данный момент развивается ряд решений в области квантовой сенсорики и метрологии, имеющих практические приложения и коммерческие перспективы, к ним можно отнести: оптические атомные/ионные часы [58]; гравиметры/акселерометры на атомах рубидия; гироскопы на ансамблях спинов в твердом теле; локальные сенсоры магнитного поля и температуры на основе азотзамещенной вакансии в алмазе и электрического поля; датчики электромагнитных полей на основе когерентных состояний спинов в магнитоупорядо-

ченных средах; спинтронные сенсоры; магнитоплазменные сенсоры; твердотельные фотоумножители; спектрограф (электронный нос) с использованием микрорезонаторов; источники и приемники фотонов (см., например, [59, 60]).

Традиционно сильно развита в РФ область квантовой оптомеханики (см. например обзор [61]). Достижения научной школы, созданной В.Б. Брагинским, в этой области были отмечены при вручении премии по фундаментальной физике за открытие гравитационных волн. Сегодня «Московская группа» продолжает исследования в этой области квантовых измерений для различных приложений, которые, помимо гравитационных волны, включают также атомно-силовые микроскопы и квантово-оптическую память.

Одним из ярких представителей школы Брагинского был Михаил Леонидович Городецкий, профессор МГУ и научный директор Российского квантового центра (2016–2018 годы). Михаил Леонидович умер в январе 2019 года, находясь на пике научной карьеры. Данный обзор посвящается светлой памяти Михаила Леонидовича – яркого ученого, внесшего колоссальный вклад в развитие квантовых технологий в России и в мире.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен обзор последних достижений в области квантовых технологий в России и в мире.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (проект МК-923.2019.2).

ЛИТЕРАТУРА

55. Kucsko G., Maurer P. C., Yao N. Y., Kubo M., Noh H. J., Lo P. K., Park H., Lukin M. D. Nanometer scale quantum thermometry in a living cell. *Nature*. 2013; 500: 54.
56. Fedotov I. V., Doronina-Amitonova L. V., Voronin A. A., Levchenko A. O., Zibrov S. A., Sidorov-Biryukov D. A., Fedotov A. B., Velichansky V. L., Zheltikov A. M. Electron spin manipulation and readout through an optical fiber. *Sci. Rep.* 2014; 4: 5362.
57. Fedotov I. V., Doronina-Amitonova L. V., Sidorov-Biryukov D. A., Safronov N. A., Blakley S., Levchenko A. O., Zibrov S. A., Fedotov A. B., Kilin S. Ya., Scully M. O., Velichansky V. L., Zheltikov A. M. Fiber-optic magnetic-field imaging. *Opt. Lett.* 2014; 39: 6954.
58. Колачевский Н. Н., Хабарова К. Ю., Заливако И. В., Семериков И. А., Борисенко А. С., Шерстов И. В., Багаев С. Н., Луговой А. А., Прудников О. Н., Тайченачев А. В., Чепуров С. В. Перспективные квантово-оптические технологии для задач спутниковой навигации. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2018; 5: 13.
59. Kalashnikov D. A., Paterova A. V., Kulik S. P., Krivitsky L. A. Infrared spectroscopy with visible light. *Nat. Photonics*. 2016; 10: 98.
60. Shushakov D. A., Bogdanov S. V., Kolobov N. A., Levin E. V., Pozdnyakov Y. I., Shpakovskiy T. V., Shubin V. E., Sitarsky K. Yu., Torgovnikov R. A. The new-type silicon photomultiplier for ToF LiDAR and other pulse detecting applications. *Proceedings of SPIE*. 2018; 10817: 108170J.
61. Danilishin S. L., Khalili F. Ya., Miao H. Advanced quantum techniques for future gravitational-wave detectors, arXiv:1903.05223, to be published in *Living Reviews in Relativity*.

14–16 апреля 2020

Москва, КВЦ «Сокольники»



Единственная
в России выставка
вакуумного
и криогенного
оборудования



Вакуумное
оборудование

Криогенное
оборудование

Оборудование
для нанесения
функциональных
покрытий

Получите бесплатный
билет по промокоду

tsfera2

vacuumtechexpo.com

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+ 7 (495) 252 11 07
vacuumtechexpo@mvk.ru

При поддержке

