

УДК [002:311.311] : [004.056.55:535.14]

Л.С. Машковцева, Д.В. Болотов, С.Ю. Казанцев, О.В. Колесников,
Ю.Б. Миронов, А.С. Селюков

Наукометрический анализ публикаций по источникам одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей

Предложена простая методика, базирующаяся на применении инструментов анализа базы данных Scopus, для выявления наиболее перспективных разработок и прогнозирования потока научно-исследовательских работ в области источников одиночных фотонов. Представлены уровни вовлеченности различных стран в исследования по тематике, а также приведены показатели цитируемости наиболее значимых работ. Показано, что область исследований коммуникационных систем с применением рассматриваемых источников находится в стадии активного роста, когда фундаментальные достижения начинают успешно реализовываться в технических устройствах с высоким потенциалом коммерческих приложений. Проанализированы основные технологии, применяемые для создания однофотонных излучателей, и перспективы их использования в системах квантовой связи.

Ключевые слова: наукометрический анализ, фотоника, источники одиночных фотонов, квантовое распределение ключей, квантовые телекоммуникации

DOI: 10.36535/0548-0019-2022-01-3

ВВЕДЕНИЕ

Квантовое распределение ключей (часто используют аббревиатуру КРК) – это способ передачи криптографического ключа, при котором информация переносится с помощью квантовых состояний микрочастиц (обычно фотонов). При этом безопасность связи обеспечивается тем, что всегда существует принципиальная возможность обнаружить постороннее вмешательство в канал связи, поскольку при измерении неизвестного квантового состояния системы происходит разрушение исходного квантового состояния [1–3]. КРК позволяет двум сторонам по открытому каналу связи сформировать надежный криптографический ключ, который в дальнейшем можно использовать для шифровки и дешифровки сообщений.

В настоящее время коммерческие системы КРК доступны и активно внедряются в государственных структурах и банковской сфере, а поток научно-технической литературы (НТЛ), посвященной исследованию систем связи с КРК, постоянно увеличивается [4]. Это обстоятельство связано с тем, что перспектива создания мощных квантовых компьютеров обесценивает системы шифрования с открытым ключом,

которые традиционно используются при передаче данных в различных беспроводных и проводных системах связи [1]. По этой причине системы связи с квантовым распределением ключей и все компоненты, входящие в состав таких систем, являются предметом интенсивных исследований [4].

Одним из важнейших элементов систем связи с КРК является источник одиночных фотонов (ИОФ) [5]. Следует заметить, что на сегодняшний день во многих коммерческих системах квантового распределения ключей вместо настоящих ИОФ применяют лазер, импульс которого сильно ослабляется [2, 6]. Поэтому излучение такого источника не является однофотонным, что приводит к усложнению протокола и необходимости постобработки сигнала [1, 7]. Для надежного функционирования систем квантовой связи актуально создание истинно идеального однофотонного источника, способного по входному сигналу генерировать однофотонное состояние и передавать его в канал связи [2, 8]. Кроме систем связи, источники одиночных фотонов востребованы при создании квантовых компьютеров, а также в метрологии, в фундаментальных исследованиях квантовых систем [5, 9]. Цель настоящей работы – анализ потока

информации в области создания ИОФ, выявление основных тенденций и перспективных направлений исследований ИОФ для систем квантового распределения ключей.

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИСТОЧНИКОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ

В настоящее время для выявления точек роста и основных тенденций в конкретной научной области с успехом применяются методики наукометрического анализа [10–12]. Поэтому для определения наиболее перспективных технологий для ИОФ и оценки общего потенциала этого направления исследований было проведено изучение потока научно-технической литературы на временном интервале с 2000 по 2021 гг. с использованием инструментов базы данных *Scopus* (БД *Scopus*). Основной поиск публикаций проводился по ключевым словам, в которых должна содержаться фраза *single-photon sources* (источники одиночных фотонов).

Для выявления актуальности научного направления изучалась зависимость числа рецензируемых публикаций в течение выбранного временного диапазона. Анализ обзорных и исследовательских статей с наибольшим уровнем цитируемости позволил выделить основные технологии, на которых строятся ИОФ, и провести сравнительный анализ числа работ, в которых использованы разные технологии для генерации однофотонных состояний.

Инструменты анализа БД *Scopus* использовались для поиска публикаций с наибольшим числом цитирований. Кроме того, они позволяли выделить авторов, организации и страны с наибольшей публикационной активностью по тематике ИОФ. Это дает возможность определить значимые достижения, самые активные коллективы исследователей и оценить уровень их компетенций. На основе анализа динамики изменения распределения публикаций по типу и областям знания можно выявить основные тенденции в выбранном направлении исследований. Например, уменьшение доли публикаций в разделе «Физика и астрономия» и увеличение доли публикаций в области инженерных наук может свидетельствовать о фазе активного внедрения результатов исследований в индустриальные приложения. Переход от фундаментальных исследований к внедрению в практику их результатов можно обнаружить на основе динамики регистрации патентов. Выявление участка взрывного роста числа зарегистрированных патентов будет свидетельствовать о высокой важности данного направления исследований с точки зрения коммерческих приложений.

Инструменты анализа БД *Scopus* позволяют определять организации, осуществляющие финансовую поддержку НИР по тематике источников одиночных фотонов, и оценивать уровень выделяемого финансирования. Помимо публикаций по ИОФ в этой базе данных проводился анализ потока научно-технической литературы в смежных направлениях для выявления общих тенденций в области исследования ИОФ. С этой целью

анализировалась динамика публикационной активности в научных разделах, связанных с квантовым распределением ключей и квантовыми генераторами случайных чисел (КГСЧ).

ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА ПО ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕМАТИКЕ (2000–2021 гг.)

Распределение числа работ, в которых в ключевых словах была указана фраза *single-photon sources*, по году публикации показано на рис. 1. В рамках рассматриваемого направления видна тенденция роста их числа, в районе 2015 г. присутствует резкий провал в их количестве, но затем он нивелируется. Уменьшение числа публикаций в рецензируемых изданиях в 2020 г. наблюдается практически во всех научных областях, что обусловлено снижением общей деловой активности, вызванной локдауном. Поскольку 2021 г. еще не закончен, данные о числе статей неполны и, очевидно, будут значительно скорректированы в сторону увеличения в будущем.

Диаграммы, иллюстрирующие вклад различных стран в исследование по тематике ИОФ в течение временных интервалов протяженностью 5 лет, начиная с 2001 г., представлены на рис. 2. Можно заметить, что США и Великобритания, которые были абсолютными лидерами по количеству публикаций в области источников одиночных фотонов до 2005 г. (рис. 2а), с течением времени утратили лидирующие позиции. В дальнейшем исследовательские коллективы из Германии обогнали Великобританию и догнали США, а потом уже исследователи из Китая догнали и перегнали по количеству работ все остальные страны (рис. 2г). Для выявления современных тенденций в публикационной активности стран были отдельно проанализированы работы в области ИОФ с 2020 по 2021 гг. (рис. 3). Этот анализ показывает, что Китай еще больше увеличил свое лидерство по количеству публикаций в области ИОФ по сравнению с предыдущими временными интервалами.

Примечательно, что в течение последних пяти лет в число лидеров по количеству публикаций в области ИОФ удалось войти научным коллективам из России. Это обусловлено тем, что сейчас в России значительное внимание уделяется изучению квантовых информационных систем, а также разработке систем связи с квантовым распределением ключей [1, 7]. Сегодня в России создаются квантовые центры по изучению квантовых технологий, а на базе МТУСИ и МИСиС функционирует первая в России межвузовская сеть с квантовым распределением ключей, что способствует привлечению к работе в данном направлении активных научно-исследовательских групп.

В выборке публикаций по источникам одиночных фотонов за 2000–2021 гг. была выявлена следующая тенденция: тематика с фундаментальных работ смещается в сторону прикладных направлений науки.

Диаграммы, иллюстрирующие распределение публикаций по областям знания в течение 2000–2005 гг. и 2017–2021 гг., представлены на рис. 4. Видно, что доля работ в предметной области «Физика и астрономия», куда в основном относятся исследования фундаментального характера, на современном этапе уменьша-

ется, а доля публикаций в предметных областях «Инженерные науки» и «Науки о материалах» увеличилась. Эта тенденция может свидетельствовать об окончании этапа глубоких фундаментальных исследований основных принципов работы и выходе на этап разработки и

оптимизации реальных устройств на основе ИОФ для различных приложений. В связи с этим полезную информацию можно извлечь из анализа количества патентов, зарегистрированных за период с 2010 по 2020 гг. по рассматриваемой нами тематике.

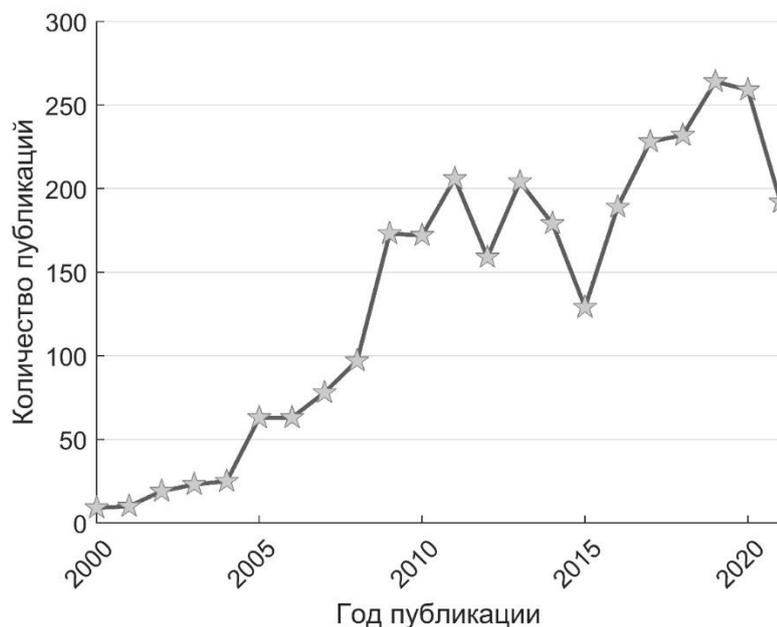


Рис. 1. Распределение количества публикаций по источникам одиночных фотонов по годам

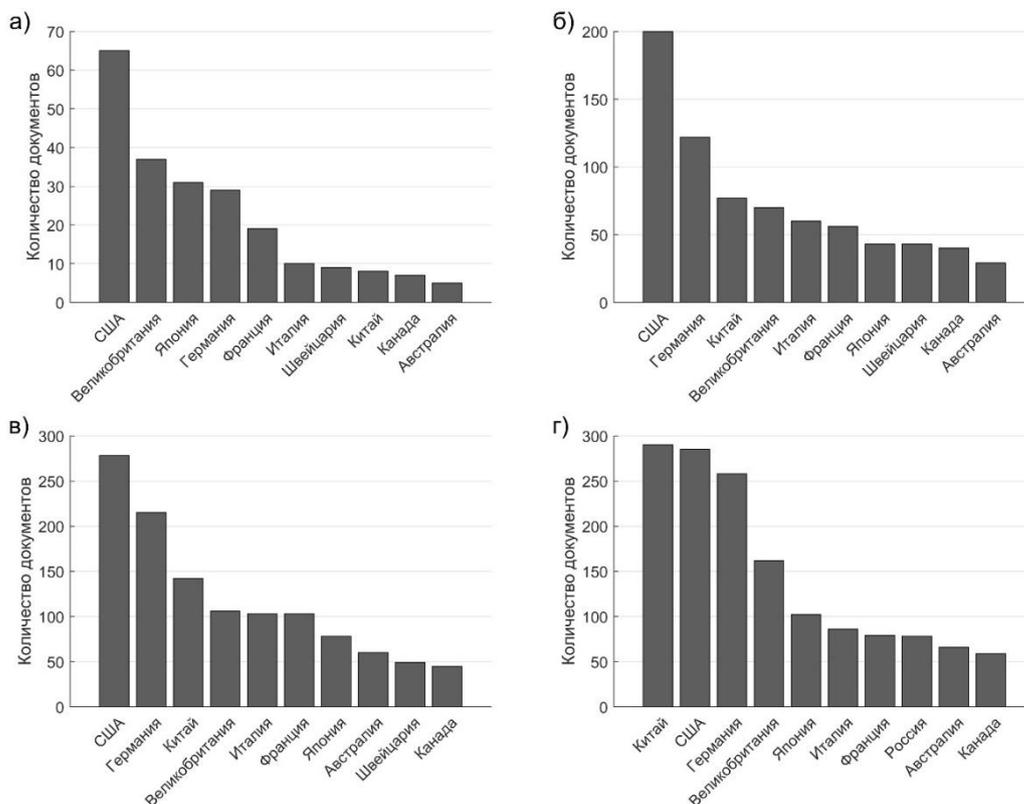


Рис. 2. Рейтинг стран с самым высоким уровнем публикационной активности по источникам одиночных фотонов: а) 2001–2005 гг.; б) 2006–2010 гг.; в) 2010–2015 гг.; г) 2016–2020 гг.

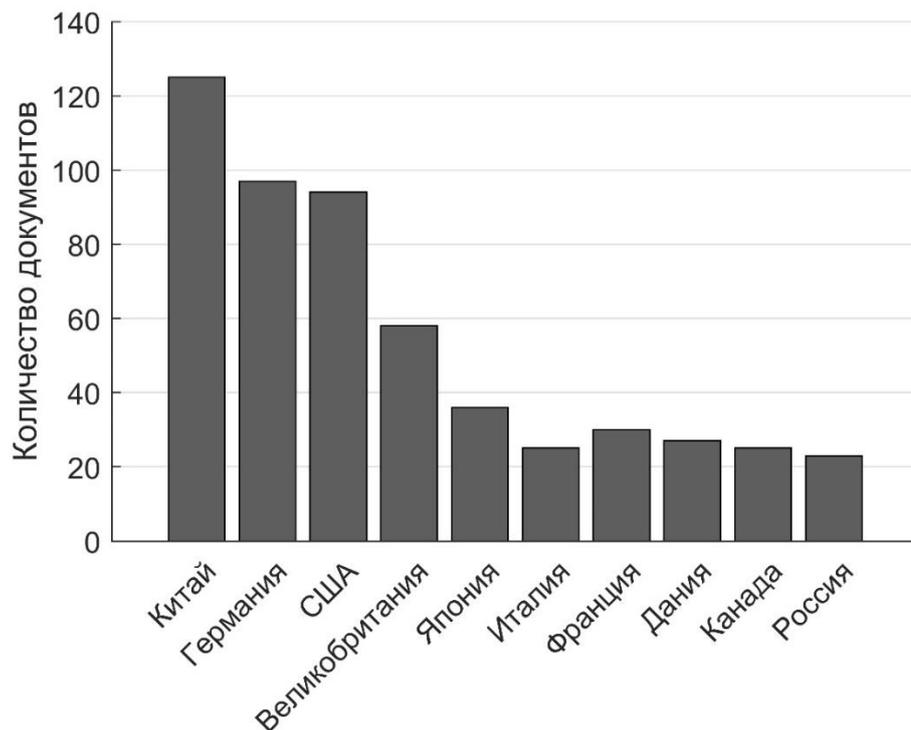


Рис. 3. Рейтинг стран с самым высоким уровнем публикационной активности по источникам одиночных фотонов за 2020–2021 гг.



Рис. 4. Распределение публикаций по тематике источников одиночных фотонов по областям знания: а) 2000–2005 гг.; б) 2017–2021 гг.

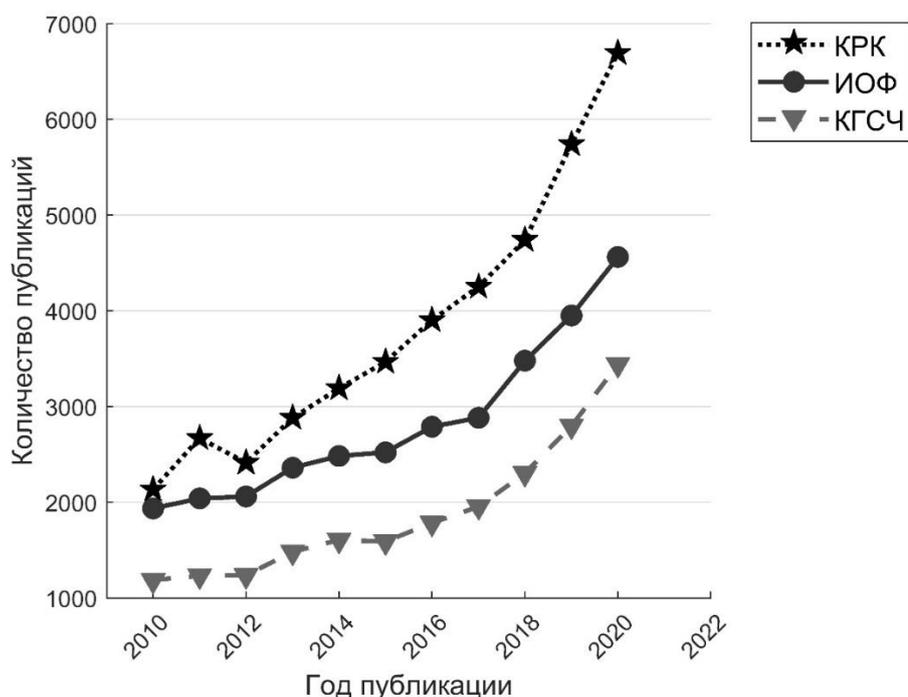


Рис. 5. Распределение числа зарегистрированных патентов на устройства и изобретения в области источников одиночных фотонов (ИОФ), квантовых генераторов случайных чисел (КГСЧ) и квантового распределения ключей (КПК) по году публикации охранного свидетельства

Таблица 1

Журналы первого квартиля по БД Scopus, в которых в 2017–2021 гг. опубликовано наибольшее число статей по тематике источников одиночных фотонов

Название журнала	Число статей за 2017–2021 гг.
Optics Express	59
ACS Photonics	54
Applied Physics Letters	49
Physical Review A	47
Nano Letters	42
Physical Review Letters	33
Optics Letters	23
New Journal Of Physics	21
ACS Nano	20
Optica	19

Динамика регистрации в 2010–2020 гг. патентов, в которых присутствовали в качестве ключевых слов фразы *single-photon sources*, *quantum random number generator*, *quantum key distribution* показана на рис. 5. Следует обратить внимание, что, начиная с 2016 г., наблюдается взрывной рост регистрации патентов на устройства с источниками одиночных фотонов, квантовыми генераторами случайных чисел и квантовым распределением ключей. Примечательно, что даже в условиях пандемии, когда в 2020 г. по многим направлениям наблюдалось снижение научной активности, число зарегистрированных результатов интеллекту-

альной деятельности по тематике ИОФ в мире продолжало увеличиваться, что свидетельствует о безусловной актуальности данного направления. Существенный рост числа зарегистрированных патентов на источники одиночных фотонов подтверждает значительный интерес к этой тематике для коммерческих приложений. Проведение исследовательских работ и оформление заявки на патент требуют определенных материальных затрат, поэтому графики на рис. 5 отражают, в том числе, и значительный рост финансирования, которое выделяется на работы в рассматриваемых направлениях. Анализ публикаций

по перечисленным тематикам показывает значительное пересечение областей исследований. Основываясь на взаимной связи направлений, можно по изменениям в одной области прогнозировать увеличение или уменьшение научно-технических достижений в другой. В частности, из анализа рынка КГСЧ, проведенного группой *Inside Quantum Technology* [13], следует, что в ближайшие годы будет в несколько раз увеличено финансирование научно-исследовательских работ в этой области, и прогнозируется, что объем рынка устройств КГСЧ составит к 2025 г. свыше 6 млрд долл. США.

Основываясь на данных из различных открытых источников, можно сделать вывод, что страны с развитым технологическим сектором увеличивают инвестиции в области квантовых информационных систем. Например, в 2021 г. Великобритания объявила о выделении финансирования Квантового центра на сумму свыше 127 млн долл. США. Кроме того, эксперты *Inside Quantum Technology* предсказывают к 2025 г. увеличение рынка устройств с квантовым распределением ключей на порядок по сравнению с 2020 г. Выявленные тенденции позволяют с уверенностью прогнозировать увеличение интенсивности исследований в области источников одиночных фотонов и рост финансирования работ по этой тематике. Необходимо отметить и высокий уровень публикаций в области ИОФ. Периодические издания, в которых за 2017–2021 гг. было опубликовано наибольшее число статей по тематике ИОФ, представлены в табл. 1. Все эти журналы состоят в первом квартале и, следовательно, имеют высокий рейтинг.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Изучение обзоров по тематике и анализ выборки публикаций за последние пять лет по ключевым словам позволили выделить основные технологии, на основе которых создаются современные источники одиночных фотонов [5, 8, 9]:

- 1) ИОФ на квантовых точках (КТ);
- 2) ИОФ на нелинейных эффектах в кристаллах: спонтанный параметрический распад (СПР), либо чetyрехволновое смешение;
- 3) ИОФ на центрах окраски в нанокристаллах и NV-центрах в алмазе. Этот класс технологий будем сокращенно обозначать – центры окраски в нанокристаллах (ЦОН);
- 4) ИОФ на углеродных нанотрубках (УНТ);
- 5) ИОФ на одиночных атомах и ионах (ОАИ).

Для выявления наиболее значительных современных достижений в области источников одиночных фотонов были проанализированы представленные в табл. 2 работы с наибольшим уровнем цитирования за последние пять лет.

Динамика изменения соотношения публикаций (%), в которых применялись разные технологии для создания ИОФ, показана на рис. 6. Поиск проводился по выборке, из которой исключались обзорные работы, поскольку они, как правило, описывают сразу несколько технологий для получения однофотонных состояний. Для каждого указанного на рис. 6 периода проводилась нормировка количества публикаций.

Таблица 2

Публикации по источникам одиночных фотонов с наибольшим уровнем цитирования за 2017–2021 гг.

Название публикации	Авторы	Число цитирований	Ссылка
High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources	Senellart, P., Solomon, G., White, A.	377	[14]
High-efficiency multiphoton boson sampling	Wang, H., He, Y., Li, Y.-H., et al.	241	[15]
Single-photon nanoantennas	Koenderink, A.F.	160	[16]
Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range	Pawlikowska, A.M., Halimi, A., Lamb, R.A., Buller, G.S.	155	[17]
Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp^3 defects in carbon nanotubes	He, X., Hartmann, N.F., Ma, X., et al.	150	[18]
Boson sampling with 20 input photons and a 60-mode interferometer in a 10^{14} -dimensional Hilbert space	Wang, H., Qin, J., Ding, X., et al.	136	[19]
Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip	Guo, X., Zou, C.-L., Schuck, C., et al.	119	[20]
On-demand generation of background-free single photons from a solid-state source	Schweickert, L., Jöns, K.D., Zeuner, K.D., et al.	115	[21]
First-principles investigation of quantum emission from hBN defects	Tawfik, S.A., Ali, S., Fronzi, M., et al.	112	[22]
Carbon nanotubes as emerging quantum-light sources	He, X., Htoon, H., Doorn, S.K., et al.	111	[23]

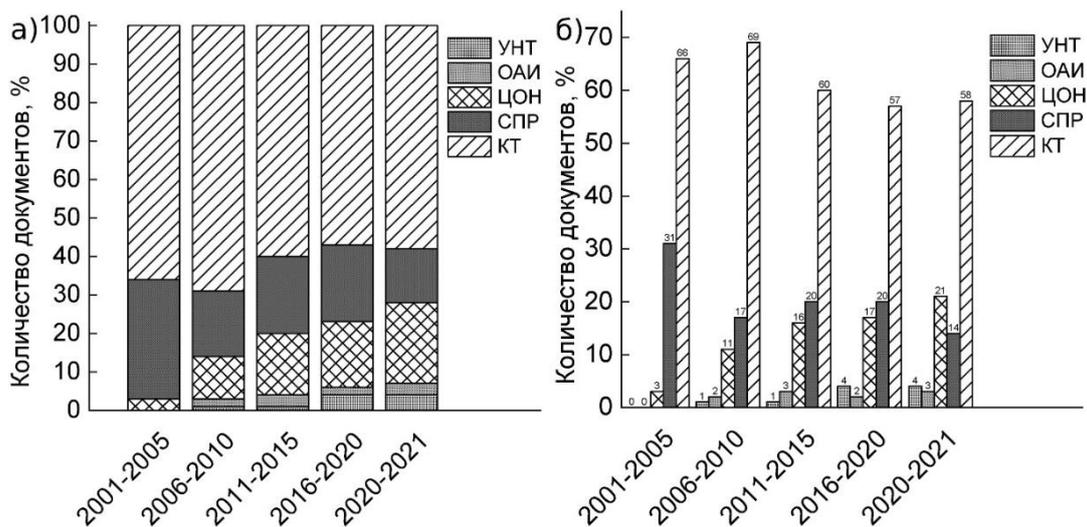


Рис. 6. Динамика изменения соотношения количества публикаций по технологиям, которые применялись для создания источников одиночных фотонов, за 2001–2021 гг.

Таблица 3

Публикации только по источникам одиночных фотонов с наибольшим уровнем цитирования за 2020–2021 гг.

Название публикации	Авторы	Число цитирований	Ссылка
Coherent control of nitrogen-vacancy center spins in silicon carbide at room temperature	Wang, J.-F., Yan, F.-F., Li, Q., et al.	28	[28]
Imaging strain-localized excitons in nanoscale bubbles of monolayer WSe ₂ at room temperature	Darlington, T.P., Carmesin, C., Florian, M., et al.	27	[29]
Channel modelling and performance limits of vehicular visible light communication systems	Karbalayghareh, M., Miramirkhani, F., Eldeeb, H.B., et al.	25	[30]
Quantum secure direct communication based on single-photon Bell-state measurement	Li, T., Long, G.-L.	25	[31]
Coupling hexagonal boron nitride quantum emitters to photonic crystal cavities	Fröch, J.E., Kim, S., Mendelson, N., et al.	21	[32]
Ultrafast quantum photonics enabled by coupling plasmonic nanocavities to strongly radiative antennas	Bogdanov, S.I., Makarova, O.A., Xu, X., et al.	21	[33]
Ultrabright quantum photon sources on chip	Ma, Z., Chen, J.-Y., Li, Z., et al.	18	[34]
Solid-state single photon source with Fourier transform limited lines at room temperature	Dietrich, A., Doherty, M.W., Aharonovich, I., Kubanek, A.	15	[35]
Photoexcited aromatic reactants give multicolor carbon nanotube fluorescence from quantum defects	Zheng, Y., Bachilo, S.M., Weisman, R.B.	15	[36]
Tools for the performance optimization of single-photon quantum key distribution	Kupko, T., von Helversen, M., Rickert, et al.	14	[37]

Как видно на рис. 6, основное внимание уделяется ИОФ на квантовых точках (КТ), что во многом обусловлено широким спектром применения [24–27] и доступностью КТ для исследований. Данные свидетельствуют, что общее количество статей по КТ существенно больше количества публикаций по источникам одиночных фотонов. Значительные успехи в области технологии получения КТ привели к снижению их стоимости, что повлияло на увеличение числа научных групп, занимающихся исследованием КТ. Внимательный анализ ряда работ по квантовым точкам показал, что часто авторы заняты исследованием

различных характеристик КТ, но в ключевых словах указывают ИОФ как возможное практическое применение результатов своих исследований, а это несколько завышает вклад данного направления.

Примечательно, что в настоящее время доля публикаций по ИОФ на нелинейных эффектах спонтанного параметрического распада (СПР) снизилась. Это во многом связано со спецификой научных изданий. Источники одиночных фотонов, основанные на принципе СПР, уже достаточно хорошо исследованы и описаны, а для публикации в журнале требуется такой элемент, как научная новизна. В то же время ИОФ на

нелинейных эффектах сегодня часто применяются как инструмент, а не выступают в качестве предмета исследования [2,6].

В ряде обзорных работ, особенно после 2017 г., отмечается высокий потенциал технологии углеродных нанотрубок для ИОФ [18, 23], которая согласно данным рис. 6 выглядит пока еще слабо, что обусловлено технологической сложностью работы с этими объектами. Высокий потенциал данного направления проявляется при анализе наиболее цитируемых статей за 2020–2021 гг., если исключить цитирование статей по квантовым точкам. Исследовательские статьи по углеродным нанотрубкам входят в топ 10 самых цитируемых при анализе публикаций, посвященных источникам одиночных фотонов за периоды 2017–2021 гг. (табл. 2) и 2020–2021 гг. (табл. 3). При составлении рейтинга статей, представленного в табл. 3, учитывались только исследовательские работы по ИОФ и исключались публикации по квантовым точкам.

Для источников одиночных фотонов особо следует отметить технологии NV-центров в наноалмазе и центров окраски в ряде других нанокристаллов. Анализ научных публикаций, представленный на рис. 6, показывает, что рассматриваемое направление является наиболее динамично развивающимся за последние 20 лет, а это может свидетельствовать о его перспективности для практических приложений. Как видно из табл. 3, работы по ИОФ на центрах окраски в нанокристаллах часто цитируются, что свидетельствует о большом интересе к этой технологии. Примечательно, что в число первых десяти наиболее цитируемых работ по источникам одиночных фотонов на платформе наноалмазов входят публикации авторских коллективов из России. Малая доля статей (см. рис. 6) по такой технологии, как одиночные атомы и ионы, обусловлена технологической сложностью и громоздкостью установок для функционирования ИОФ на этом принципе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенной методики анализа, использующей инструменты базы данных *Scopus*, проведено исследование информационного потока в области источников одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей. Установлено, что в настоящее время большая доля исследований по тематике источников одиночных фотонов приходится на научные группы из Китая, Германии и США, которые являются лидерами по числу публикаций в этой области. На основе анализа статей с самым высоким уровнем цитирования выявлены наиболее перспективные технологии для создания источников одиночных фотонов, предназначенных для систем связи с квантовым распределением ключей. Наибольшее внимание уделяется сегодня источникам одиночных фотонов на квантовых точках и центрах окраски в нанокристаллах, но многие авторитетные исследовательские коллективы также связывают большие надежды с источниками одиночных фотонов на основе технологий углеродных нанотрубок. Установлен значительный рост публикационной активности в области источников одиночных фотонов, что, по-

видимому, свидетельствует о высоком потенциале коммерческого использования источников одиночных фотонов в устройствах с квантовым распределением ключей. Выявлено существенное взаимопересечение трех направлений исследований в областях источников одиночных фотонов, квантовых генераторов случайных чисел и квантового распределения ключей, в которых за 2016–2020 гг. наблюдается взрывной рост числа зарегистрированных патентов, что позволяет прогнозировать в ближайшие годы многократное увеличение инвестиций в области разработок и исследований источников одиночных фотонов для систем с квантовым распределением ключей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на ее основе // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 9. – С. 777-801.
2. Калачев А.А. Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 // Фотоника. – 2017. – № 1. – С. 88-101. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98>
3. Chen J.-P. et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km // Physical Review Letters. – 2020. – Vol.124. – Art.no 070501.
4. Martin V. et al. Quantum technologies in the telecommunications industry // EPJ Quantum Technology. – 2021. – Vol. 8, № 1. – P. 19. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00108-9>
5. Eisaman M. D. et al. Invited review article: Single-photon sources and detectors // Review of scientific instruments. – 2011. – Vol. 82, № 7. – P. 071101. <https://doi.org/10.1063/1.3610677>
6. Егоров В. и др. Установка квантовой криптографии с источником одиночных фотонов, основанная на явлении спонтанного параметрического рассеяния света // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1(77). – С. 23-27.
7. Трушечкин А.С. и др. Стойкость метода обманных состояний в квантовой криптографии // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191, № 1. – С. 93-109. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038882>
8. Cao X., Zopf M., Ding F. Telecom wavelength single photon sources // Journal of Semiconductors. – 2019. – Vol. 40, № 7. – Art.no. 071901. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/40/7/071901>
9. Meyer-Scott E., Silberhorn C., Migdall A. Single-photon sources: Approaching the ideal through multiplexing // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Vol. 91, № 4. – P. 041101. <https://doi.org/10.1063/5.0003320>
10. Буйлова Н.М., Осипов А.И. Наукометрический анализ публикаций по наноэнергетике. По материалам выпуска РЖ ВИНТИ РАН "Физика нанообъектов и нанотехнология" // Научно-техническая информация. Сер. 1. – 2012. – № 11. – С. 30-34.
11. Дымкова С.С. Разработка информационной системы для продвижения результатов научных

- исследований // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 7. – С. 38-41.
12. Буйлова Н.М., Осипов А.И. Научометрический анализ публикаций по материалам выпуска "Физика нанобъектов и нанотехнология" РЖ ВИНТИ РАН: Графен // Научно-техническая информация. Сер. 1. – 2011. – № 11. – С. 22-25.
 13. Inside quantum technology. Quantum random number generators: a ten-year market assessment // 2021 – Report IQT-QRNG-0121. – URL: <https://www.inside-quantumtechnology.com/product/quantum-random-number-generators-a-ten-year-market-assessment>
 14. Senellart P., Solomon G., White A. High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources // Nature nanotechnology. – 2017. – Vol. 12, № 11. – P. 1026-1039. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.218>
 15. Wang H. et al. High-efficiency multiphoton boson sampling // Nature Photonics. – 2017. – Vol.11, № 6. – P. 361-365. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.63>
 16. Koenderink A.F. Single-photon nanoantennas // ACS photonics. – 2017. – Vol. 4, № 4. – P. 710-722. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00061>
 17. Pawlikowska A.M. et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range // Optics express. – 2017. – Vol. 25, № 10. – P. 11919-11931. <https://doi.org/10.1364/OE.25.011919>
 18. He X. et al. Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp^3 defects in carbon nanotubes // Nature Photonics. – 2017. – Vol.11, № 9. – P. 577-582. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.119>
 19. Wang H. et al. Boson sampling with 20 input photons and a 60-mode interferometer in a 1014-dimensional Hilbert space // Physical review letters. – 2019. – Vol. 123, № 25. – Art.no. 250503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.250503>
 20. Guo X. et al. Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip // Light: Science & Applications. – 2017. – Vol. 6, № 5. – P. e16249-e16249. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.249>
 21. Schweickert L. et al. On-demand generation of background-free single photons from a solid-state source // Applied Physics Letters. – 2018. – Vol. 112, № 9. – C. 093106. <https://doi.org/10.1063/1.5020038>
 22. Tawfik S. A. et al. First-principles investigation of quantum emission from hBN defects // Nanoscale. – 2017. – Vol. 9, № 36. – P. 13575-13582. <https://doi.org/10.1039/c7nr04270a>
 23. He X. et al. Carbon nanotubes as emerging quantum-light sources // Nature materials. – 2018. – Vol. 17, № 8. – P. 663-670. <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0109-2>
 24. Bera D. et al. Quantum dots and their multimodal applications: a review // Materials. – 2010. – Vol. 3, № 4. – P. 2260-2345. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
 25. Ващенко А.А. и др. Органический светоизлучающий диод на основе плоского слоя полупроводниковых нанопластинок CdSe в качестве эмиттера // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 100, № 2. – С. 94-98. <https://doi.org/10.1134/S0021364014140124>
 26. Селюков А.С. и др. Электрoluminescence коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 147, № 4. – С. 687–701. <https://doi.org/10.1134/S1063776115040238>
 27. Ovchinnikov O. et al. Colloidal Ag_2S/SiO_2 core/shell quantum dots with IR luminescence // Optical Materials Express. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 89-104. <https://doi.org/10.1364/OME.411432>
 28. Wang J.F. et al. Coherent control of nitrogen-vacancy center spins in silicon carbide at room temperature // Physical review letters. – 2020. – Vol. 124, № 22. – Art.no. 223601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.223601>
 29. Darlington T.P. et al. Imaging strain-localized excitons in nanoscale bubbles of monolayer WSe 2 at room temperature // Nature Nanotechnology. – 2020. – Vol. 15, № 10. – P. 854-860. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0730-5>
 30. Karbalayghareh M. et al. Channel modelling and performance limits of vehicular visible light communication systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69, № 7. – P. 6891-6901. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.2993294>
 31. Li T., Long G.L. Quantum secure direct communication based on single-photon Bell-state measurement // New Journal of Physics. – 2020. – Vol. 22, № 6. – P. 063017. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab8ab5>
 32. Fröch J.E. et al. Coupling hexagonal boron nitride quantum emitters to photonic crystal cavities // ACS nano. – 2020. – Vol. 14, № 6. – P. 7085-7091. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01818>
 33. Bogdanov S. I. et al. Ultrafast quantum photonics enabled by coupling plasmonic nanocavities to strongly radiative antennas // Optica. – 2020. – Vol. 7, № 5. – P. 463-469. <https://doi.org/10.1364/optica.382841>
 34. Ma Z. et al. Ultrabright quantum photon sources on chip // Physical Review Letters. – 2020. – Vol. 125, № 26. – P. 263602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.263602>
 35. Dietrich A. et al. Solid-state single photon source with Fourier transform limited lines at room temperature // Physical Review B. – 2020. – Vol. 101, № 8. – P. 081401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.081401>
 36. Zheng Y., Bachilo S.M., Weisman R.B. Photoexcited aromatic reactants give multicolor carbon nanotube fluorescence from quantum defects // ACS nano. – 2019. – Vol.14, № 1. – P. 715-723. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b07606>
 37. Kupko T. et al. Tools for the performance optimization of single-photon quantum key distribution // npj Quantum Information. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41534-020-0262-8>

Материал поступил в редакцию 25.11.21.

Сведения об авторах

МАШКОВЦЕВА Любовь Сергеевна – кандидат химических наук, главный специалист отдела научной информации по физике ВИНТИ РАН, доцент кафедры «Направляющие телекоммуникационные среды» Московского технического университета связи и информатики
e-mail: l.s.mashkovceva@mtuci.ru

БОЛОТОВ Денис Вячеславович – студент магистратуры Московского технического университета связи и информатики
e-mail: d.v.bolotov@mtuci.ru

КАЗАНЦЕВ Сергей Юрьевич – доктор физико-математических наук, главный специалист отдела научной информации по физике ВИНТИ РАН, профессор кафедры «Направляющие телекоммуникационные среды» Московского технического университета связи и информатики
e-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru

КОЛЕСНИКОВ Олег Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Направляющие телекоммуникационные среды» Московского технического университета связи и информатики
e-mail: o.v.kolesnikov@mtuci.ru

МИРОНОВ Юрий Борисович – декан факультета «Сети и системы связи» Московского технического университета связи и информатики
e-mail: i.b.mironov@mtuci.ru

СЕЛЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом научной информации по физике ВИНТИ РАН, старший преподаватель кафедры «Математика» Московского политехнического университета
e-mail: selyukov@lebedev.ru