

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН для квантовых сетей

О.Егорова, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН / egorova@nsc.gpi.ru,
К.Ерохин, инженер МТУСИ / k.u.erohin@mtuci.ru,
С.Журавлев, младший научный сотрудник Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН / mazerator3000@yandex.ru,
А.Зайцев, аспирант МТУСИ / a.i.zaycev@mtuci.ru,
С.Казанцев, д.ф.-м.н., профессор МТУСИ, заведующий сектором НИО "Квантовый центр" МТУСИ / s.i.kazantsev@mtuci.ru,
О.Колесников, к.т.н., заведующий кафедрой МТУСИ, заведующий сектором НИО "Квантовый центр" МТУСИ / o.v.kolesnikov@mtuci.ru,
Ю.Миронов, к.т.н., декан факультета "Сети и системы связи" МТУСИ, руководитель НИО "Квантовый центр" МТУСИ / i.b.mironov@mtuci.ru,
С.Семенов, д.ф.-м.н., директор НЦВО РАН / sls@fo.gpi.ru,
М.Шульга, инженер НИО "Квантовый центр" МТУСИ / m.i.shulga@mtuci.ru

УДК 681.7.068: 621.383, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.108.8.44.51

Проанализированы перспективы применения многосердцевинного оптического волокна для построения квантовых сетей. Показано, что у такого волокна есть ряд преимуществ при реализации технологии квантового распределения ключей между несколькими группами абонентов. С использованием межвузовской квантовой сети общей протяженностью 17 км проведены тестовые эксперименты по созданию трех квантовых и четырех классических каналов связи через одно многосердцевинное волокно. Продемонстрирована возможность одновременной передачи по многосердцевинному волокну классических и квантовых данных с использованием как фазового, так и поляризационного кодирования, что позволило сформировать квантовые ключи между тремя парами абонентов.

ВВЕДЕНИЕ

В период стремительного развития квантовых технологий наибольший интерес вызывают области исследований, связанные с проблемой создания квантовых компьютеров, и задачи квантовой криптографии [1, 2]. Работу над квантовыми

компьютерами может позволить себе небольшое число лабораторий, их функциональность пока сильно ограничена, но большинство экспертов не сомневаются в скором прогрессе в этой области, и уже рассматриваются возможные варианты организации квантовых сетей, по которым будут

передаваться данные посредством одиночных фотонов [3, 4]. Стимулом к развитию таких сетей служит распространение систем связи, защищенных по технологии квантового распределения ключей (КРК) [5]. Достаточно подробно принципы технологии КРК анализируются в серии материалов [6-8] и обзорных статьях [3, 5].

В ряде технологически развитых стран технология КРК широко представлена на рынке телекоммуникационных услуг. В России устройства квантовой связи собственной разработки предлагают компании "ИнфоТеКС", "СМАРТС-Кванттелеком", "КуРЭйт" и "Криптософт". Все доступные на рынке коммерческие блоки КРК предусматривают организацию квантового канала (КК) связи через отдельное оптическое волокно, еще одно волокно используется для классического канала связи [3, 6]. Необходимость использования двух оптических волокон обусловлена деструктивным влиянием, которое может оказывать световая мощность в классическом канале связи на процесс регистрации информации, закодированной одиночным фотоном [5]. Очевидно, что прокладка между узлами квантовой сети нескольких оптических кабелей приводит к дополнительным материальным издержкам. Ранее в работах [9, 10] была показана возможность одновременной организации КК и классического канала связи в одном многосердцевинном волокне, а в ряде последующих работ были получены экспериментальные и теоретические оценки влияния классического канала связи на характеристики КК [11-13]. При этом все исследования проводились на лабораторных макетах КРК, а не на серийно выпускаемых установках. Кроме того, большая часть экспериментальных исследований выполнялась с использованием лишь одного КК, характеристики одновременной работы нескольких КК оценивались только теоретически.

Цели настоящей работы – оценка перспектив применения многосердцевинных волокон (МСВ) для построения квантовых сетей и экспериментальное исследование возможности реализации одновременно более двух КК и классических каналов связи в одном многосердцевинном волокне (при использовании МСВ и коммерческих блоков КРК российского производства).

ПРОТЯЖЕННЫЕ КВАНТОВЫЕ СЕТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МСВ

В дальнейшем под квантовой сетью понимается коммуникационная сеть, в которой передаваемые данные защищаются с использованием

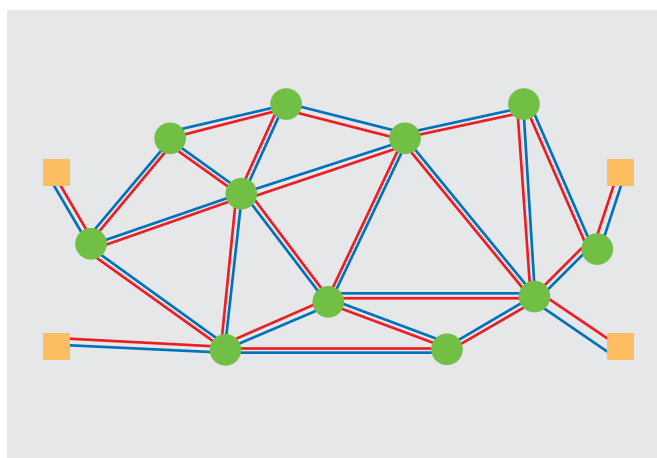


Рис.1. Принципиальная схема квантовой сети

технологии КРК. На рис.1 приведена принципиальная схема квантовой сети, где показаны основные ее элементы. Квадратами показаны конечные пользователи, а двойные линии, соединяющие узлы квантовой сети, обозначают квантовый и классический каналы связи. Здесь под КК связи понимается канал связи, способный обеспечить передачу квантовой информации, переносимой одиночными фотонами между узлами сети или конечными пользователями. Основными ключевыми элементами, необходимыми для работы КК связи, являются: источники одиночных фотонов, детекторы одиночных фотонов и квантовый генератор случайных чисел [14-16]. Количество выданных патентов по ключевым элементам КРК за последние годы растет экспоненциально, что свидетельствует о высокой степени готовности этой технологии для широкого внедрения в сферу телекоммуникационных услуг [14, 17].

Следует отметить, что необходимость использования двух типов каналов связи (квантового и классического) заложена в технологии КРК [6-8]. В более общем определении квантовой сети в узлах сети могут располагаться любые квантовые компьютеры, то есть устройства, функции которых позволяют принимать, хранить, передавать или обрабатывать квантовую информацию [4]. В таком случае узлом квантовой сети может быть и квантовый повторитель работы, над созданием которого сегодня интенсивно трудятся специалисты [1, 18]. Но и в более общей постановке, когда квантовые компьютеры или повторители соединяются между собой, также необходим классический канал информации между узлами квантовой сети (например, для синхронизации и контроля параметров квантового компьютера).

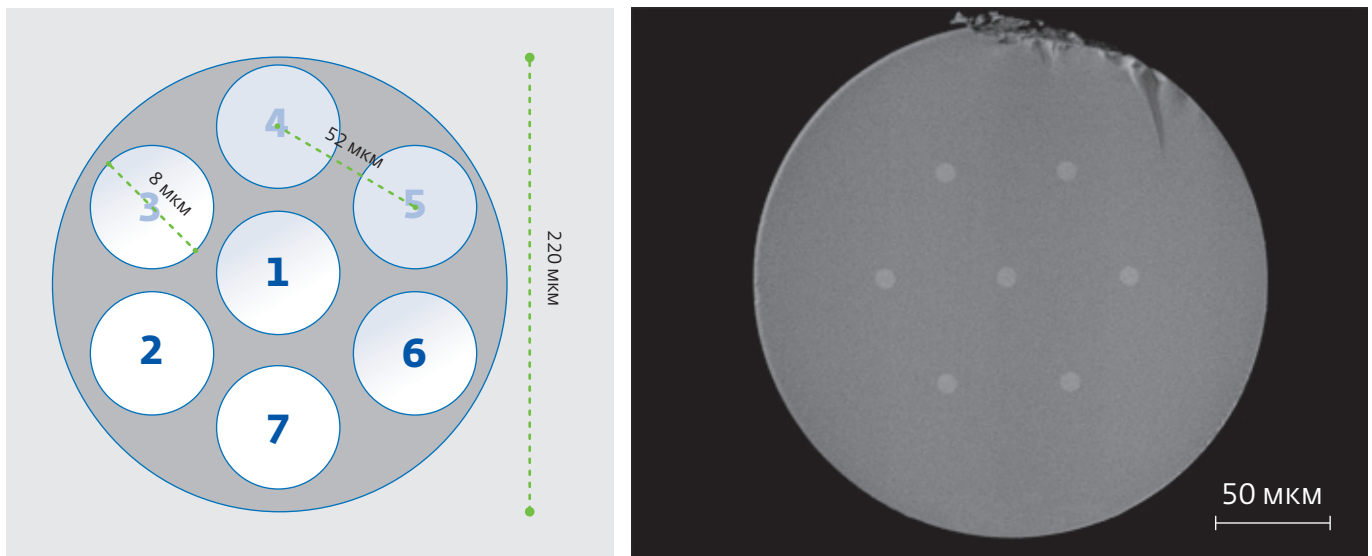


Рис.2. Поперечное сечение 7-сердцевинного гексагонального оптического волокна: а – схематическое изображение с обозначением сердцевин; б – фотография скола МСВ, использованного в эксперименте

При построении протяженных квантовых сетей предполагается, что средой передачи телекоммуникационных сигналов будет оптическое волокно как универсальная направляющая среда, позволяющая передавать одиночные фотоны на дистанции, превышающие 200 км [19]. В таком случае можно ожидать, что применение МСВ позволит уменьшить материальные издержки при реализации квантовой сети, поскольку в одной сердцевине этого волокна может быть организован классический канал связи, а в других – КК связи.

Работы по созданию и совершенствованию различных типов МСВ интенсивно ведутся во многих странах, налажен промышленный выпуск некоторых типов МСВ. В России такой тип оптического волокна выпускает ПАО "ПНППК". Сегодня основные области применения МСВ связаны с созданием различных волоконно-оптических датчиков [20, 21], волоконных лазеров [22] и реализацией пространственного уплотнения каналов связи, что позволяеткратно числу сердцевин увеличить поток информации, передаваемой по волоконно-оптической линии связи [23, 24].

Для задач реализации протяженных квантовых сетей важнейшими параметрами канала являются слабое затухание и низкий уровень шумовых помех. В случае применения МСВ последний параметр имеет особенно большое значение, поскольку перекрестные помехи от классического канала связи, которые не оказывают существенного влияния на передачу классических данных по соседним сердцевинам, приводят к значительному

увеличению количества ошибок передачи квантовых битов информации, переносимых одиночными фотонами.

Основной параметр, характеризующий ошибки передачи в КК связи, – QBER (процент ошибок, возникающих при передаче квантовых данных) [5]. При определенном пороговом уровне QBER, который зависит как от квантового протокола, так и применяемого оборудования, КК связи считается скомпрометированным, и передача квантового ключа не производится [5, 8]. Поэтому при оценке перспективности применения МСВ в квантовых сетях важно проверить работу серийных коммерческих блоков КРК, а не лабораторных макетов. Нами исследовалось влияние перекрестных помех от классических каналов на скорость генерации квантового ключа и величину QBER с использованием серийно выпускаемого оборудования квантовой связи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовалось гексагональное МСВ с семью сердцевинами, которое было предоставлено ПАО "ПНППК" (<https://pnppk.ru/>). Схематично разрез многосердцевинного волокна показан на рис.1а, а на рис.1б приведена фотография поперечного скола МСВ, полученная с помощью микроскопа.

Для перехода от многосердцевинной к односердцевинной технологии применялось специальное устройство FAN-IN/FAN-OUT, выполненное

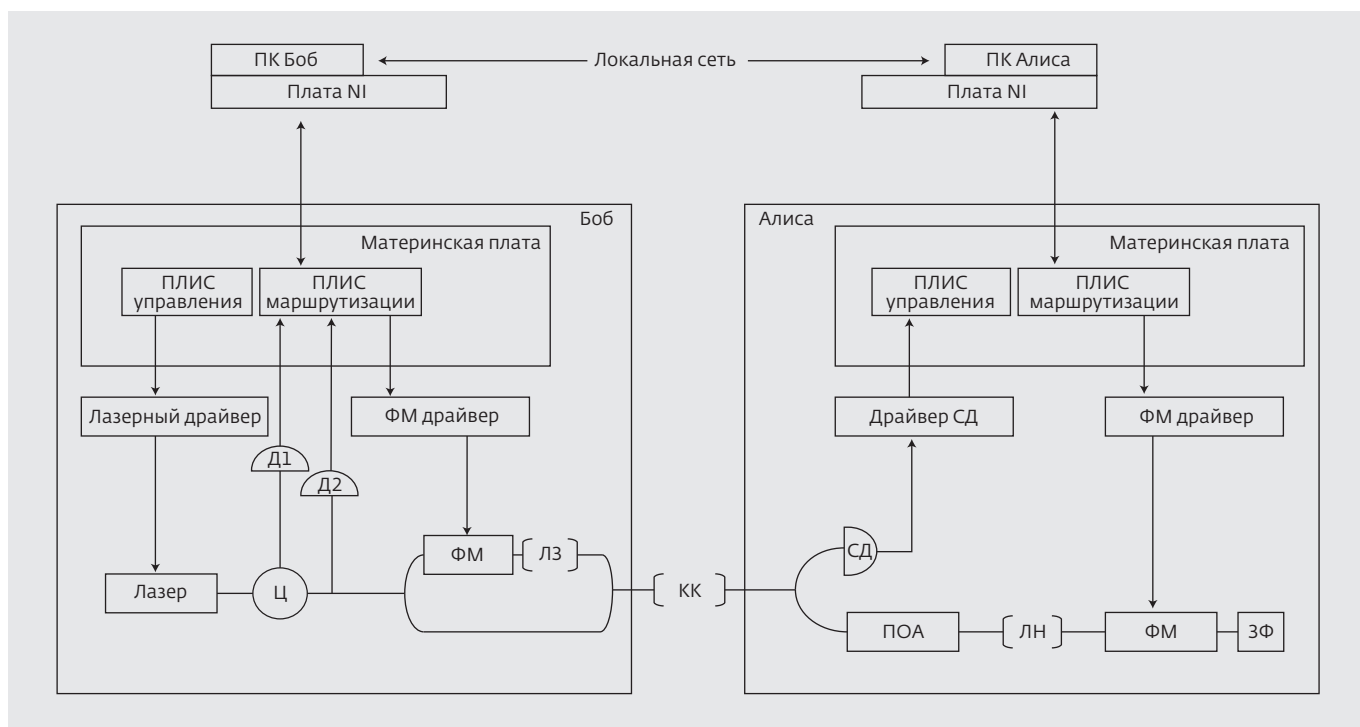


Рис.3. Принципиальная схема работы НОК, на котором была реализована технология КРК с использованием фазового кодирования [28]. Л – лазер; Д1 и Д2 – детектор одиночных фотонов; Ц – циркулятор; ФМ – фазовый модулятор; ЛЗ – линия задержки; КК – квантовый канал; СД – синхродетектор; ПОА – переменный оптический аттенюатор; ЛН – линия накопительная; ЗФ – зеркало Фарадея

сотрудниками НЦВО РАН [25]. Для первичных экспериментов использовался отрезок МСВ длиной 3 м, который был уложен в оптическую кассету в кроссе. К выходам одномодовых волокон с помощью сварочного аппарата Fujikura FSM-100P+ были приварены оптические пигтейлы с выходами FC/UPC и FC/APC. Для быстрой смены каналов на выходах предусмотрены коннекторы типа SC, работающие по технологии push-pull.

Для реализации КК связи через МСВ использовалось несколько блоков КРК, в частности, научно-образовательные комплексы (НОК), разработанные российской компанией QRate [26]. Схема работы данного оборудования показана на рис.3 [27]. Два блока КРК, которые традиционно называют Алиса и Боб, по ВОЛС формируют между собой квантовый ключ с применением так называемой двух-проходной оптической схемы, на которой реализуется протокол BB84 с фазовым кодированием квазиоднофотонных импульсов. В блоках КРК НОК, как и в большей части коммерческих блоков, вместо источника одиночных фотонов применяются ослабленные лазерные импульсы [17]. Подробно принципы работы этого оборудования описаны в [28].

Отметим, что НОК разрабатывался для учебно-исследовательских целей, в том числе для проведения конкурсов WorldSkills в компетенции "Квантовые технологии", поэтому данное оборудование предоставляет пользователю различные инструменты анализа [28]. В частности, возможность контроля в режиме реального времени длины квантового ключа и параметра QBER позволяет использовать НОК как многофункциональный инструмент для анализа характеристик КК. В экспериментах были задействованы НОК-1 и НОК-2. Одна пара блоков КРК (Алиса1 и Боб1) работала на длине волны $\lambda = 1547,27$ нм (НОК-1), а вторая пара (Алиса2 и Боб2) при $\lambda = 1552,57$ нм. Заметим, что в блоках НОК специальный селективный фильтр на частоту передающего лазера в системе не устанавливался.

Наряду с НОК в эксперименте применялись блоки КРК QKD312 промышленной установки компании QRate [26, 29]. Ранее аналогичные блоки КРК были задействованы при проведении исследований КРК в свободной атмосфере [30]. В блоках установки QKD312 криптографический ключ передавался с использованием модифицированного протокола BB84 – decoy-state, при этом информация,

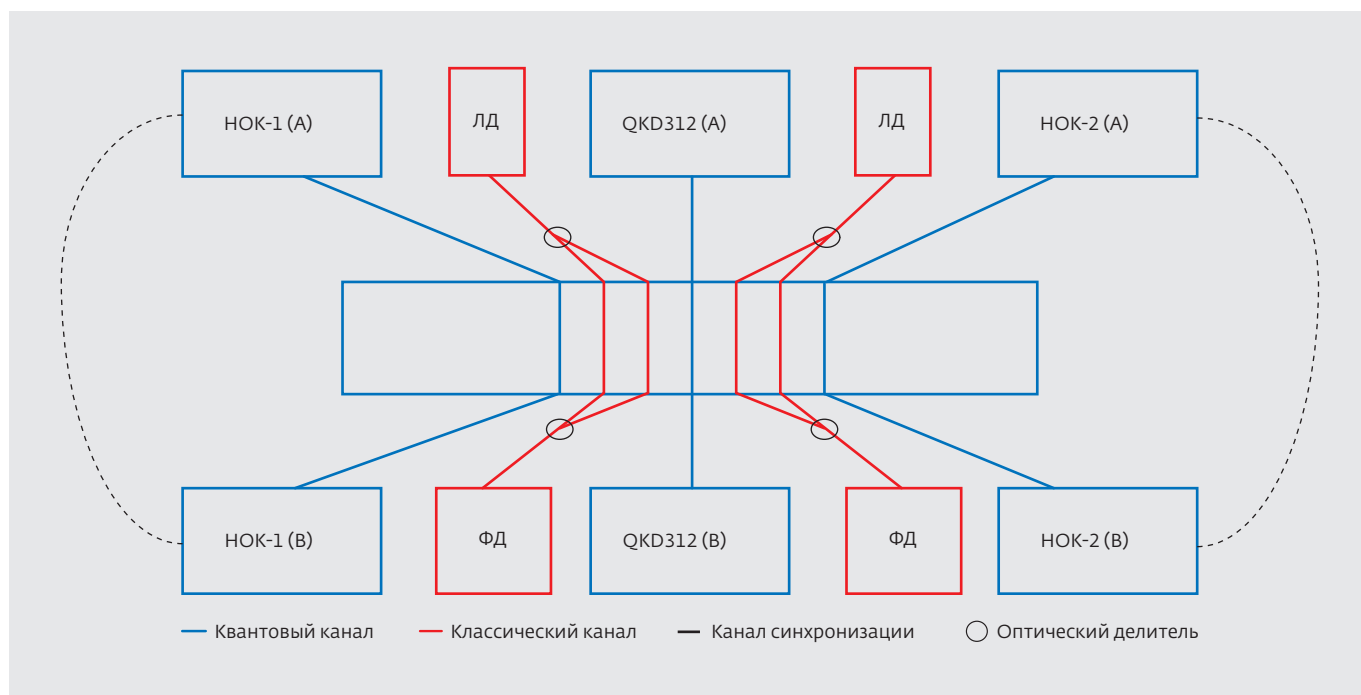


Рис.4. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик КК связи, реализованного через МСВ

в отличие от блоков КРК НОК, кодировалась поляризацией фотона, длина волны которого составляла $\lambda = 1554,94$ нм. Один из блоков промышленной установки (Боб3) был размещен в МИСиС, а второй блок КРК (Алиса3) – в лаборатории Квантового центра МТУСИ, что позволило подключать кросс с МСВ в разрыв квантовой сети МТУСИ-МИСиС общей протяженностью 17 км.

Таким образом, в экспериментах с МСВ могли быть организованы три независимых КК связи, каждый по своей сердцевине. На рис.4 показана принципиальная схема экспериментальной установки, на которой исследовалось влияние классических каналов связи на КК, проходящих через одно МСВ. Для моделирования влияния на КК классических каналов связи, реализованных по соседним сердцевинам, в кросс подключался источник непрерывного лазерного излучения на основе лазерного диода Nolatech DFB-1550 нм 14BF-10 мВт, работающего на длине волны 1547 нм и установленного в контроллер CLD1015 фирмы Thorlabs. С помощью делителя пучка излучение от лазера распределялось по нескольким сердцевинам.

В работе [15] показано, что модуляция лазерного излучения, аналогичного реальному информационному потоку, приводит к дополнительному росту QBER в КК, проходящем в соседней

сердцевине гексагонального МСВ. В частности, согласно [13], увеличение QBER при действии модулированного с частотой 10 ГГц лазерного излучения будет на 15–16% выше, чем влияние, которое оказывает на КК непрерывное лазерное излучение такой же мощности. В связи с этим в предварительных исследованиях не использовалась модуляция лазерного диода Nolatech DFB-1550 нм 14BF-10 мВт, а исследовалось только влияние мощности лазерного излучения, которая вводилась в МСВ в одну или одновременно в несколько сердцевины МСВ. Мощность классического канала связи на входе и выходе МСВ контролировалась с помощью фотоприемника – Thorlabs S156C. Общий классический канал между всеми блоками КРК поддерживался через модули Wi-Fi и модем, подключенные к QKD312(A) через блок СКЗИ "Континент-4" компании "Код Безопасности".

Поскольку предоставленный отрезок МСВ был малой протяженности (3 м), то значительное влияние на характеристики канала связи оказывало сопрягающее устройство, соединяющее МСВ с обычным волокном, потери в устройстве сопряжения были выше, чем в МСВ. Конечно, наличие высоких потерь в согласующем устройстве не позволяло на коротком отрезке МСВ адекватно оценить полные характеристики МСВ для передачи квантовых данных, в частности, зависимость скорости

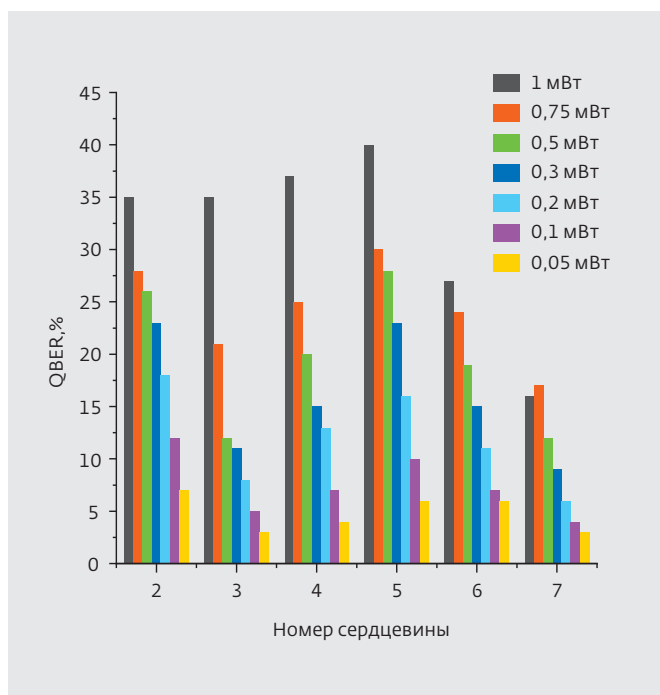


Рис.5. Влияние классических каналов, подключенных к разным сердцевинам, на КК в первой сердцевине

генерации квантового ключа, передаваемого по МСВ, от длины волокна. Поэтому исследователи сосредоточились на выявлении качественных зависимостей, как мощность классического канала будет влиять на характеристики КК при использовании оборудования и описанных выше методик. Измерения проводились в том числе и при мощности классического канала, когда значение QBER значительно превышало предельно допустимый уровень, при котором возможна безопасная передача данных, предусмотренная протоколом квантового распределения ключа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании влияния классического канала на КК связи для КК выделялась одна сердцевина многосердцевинного волокна. В первой серии экспериментов КК реализовывался по сердцевине № 1, а во второй по сердцевине № 2 (см. схему рис.1а), при этом шесть оставшихся сердцевины использовались для последовательного подключения классического канала. Результаты исследований, когда КК шел через сердцевину № 1, представлены на рис.5. На нем видно, что классический канал в сердцевинах 2-5 оказывает наибольшее влияние по сравнению с каналами 6-7, что может быть связано с особенностями изгиба многосердцевинного оптического волокна

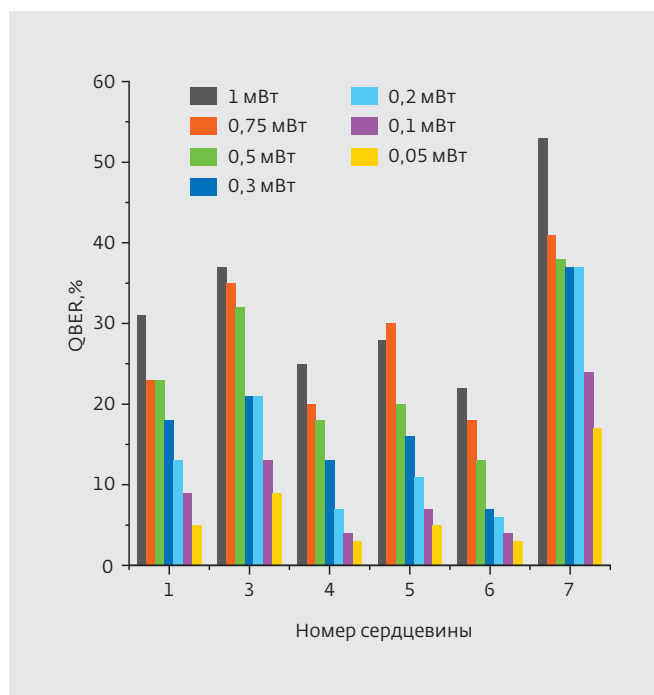


Рис.6. Влияние классических каналов связи, подключенных к разным сердцевинам, на КК во второй сердцевине

в касете кросса, когда сердцевина 6 и 7 проходят по внешнему диаметру.

Стоит отметить, что при передаче классического канала мощностью от 0,5 мВт наблюдается значительный рост QBER и на таком коротком отрезке волокна. Результаты экспериментов, когда КК проходит по сердцевине № 2, иллюстрирует рис.6. Видно, что канал 7 выбивается среди остальных, что, наверное, связано с особенностями переходника с МСВ на обычное волокно.

Эксперименты, которые проводились с таким коротким отрезком МСВ, носят оценочный характер, чтобы выявить основные тенденции и качественные зависимости. Использовался заведомо завышенный уровень мощности в классическом канале, при котором величина QBER была выше уровня, на котором гарантируется адекватная работа протокола BB84 в блоках КРК НОК. Для надлежащей работы протокола КРК в нашей конфигурации предельный уровень мощности в классическом канале не должен превышать 0,1 мВт, что во многом связано с особенностями монтажа устройства FAN-IN/FAN-OUT, которое изготавливалось для тестовых экспериментов. Здесь в полной мере не использовались все методы для защиты от перекрестных помех в МСВ и переходном устройстве.

Из анализа диаграмм на рис.6-7 следует, что целесообразно размещать КК на боковой части МСВ.

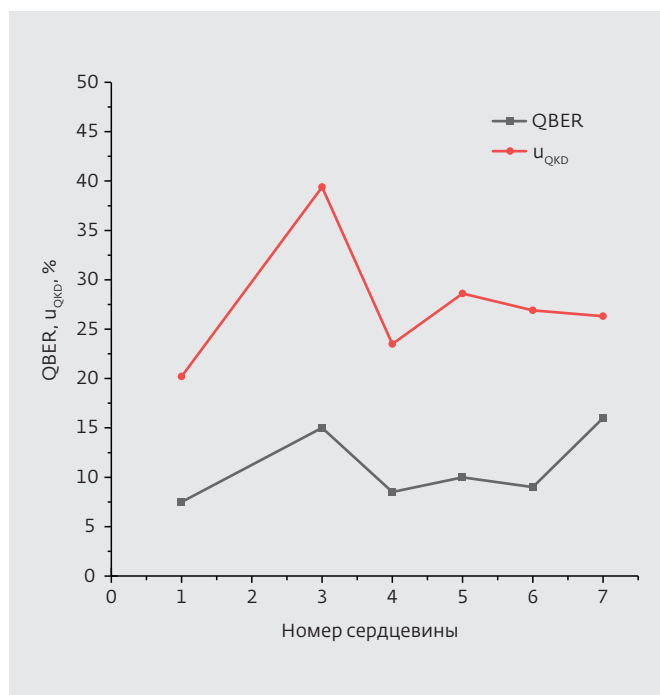


Рис. 7. Зависимости QBER и приведенной скорости генерации ключа, u_{QKD} при фиксированной мощности классического канала (1 мВт), вводимой в различные сердцевинки МСВ

На рис. 7 показано, как соотносятся между собой приведенная скорость генерации квантового ключа и QBER, измеренные в первой серии экспериментов, когда квантовый канал был реализован в сердцевинке № 2. Как видно из этого рисунка, параметр QBER хорошо коррелирует с данными по скорости генерации ключа, поэтому данный параметр принимался за основной, по которому оценивались характеристики.

Примечательно, что когда одна и та же мощность классического канала была распределена вначале по двум, а потом по четырем сердцевинкам, параметр QBER в КК, который был реализован по сердцевинке № 2, стал выше, чем когда вся мощность классического канала проходила по сердцевинке № 1. В связи с этим полагаем, что делить мощность классического канала связи по нескольким сердцевинкам нецелесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые в мире продемонстрирована возможность одновременной реализации трех КК и четырех классических каналов связи по одному МСВ. При этом и МСВ, и блоки КРК изготовлены российскими компаниями. Фактически в МТУСИ была реализована первая квантовая

сеть с использованием МСВ. Анализ перспектив применения МСВ для квантовой связи выявил значительные преимущества данного подхода к созданию протяженных квантовых сетей, были получены экспериментальные данные о характеристиках КК, реализованных в соседних сердцевинах МСВ.

Результаты прямых экспериментальных исследований показали, что с точки зрения снижения влияния перекрестных помех от классических каналов связи на квантовый канал деструктивное влияние нескольких классических каналов сильнее, чем одного такой же совокупной мощности, а КК связи не влияют друг на друга. Поэтому при создании протяженных квантовых сетей МСВ целесообразно применять для организации КК, а для классического канала связи нужно использовать не более одной сердцевинки.

Выполненные нашим коллективом исследования также продемонстрировали высокий потенциал модульной платформы НОК для проведения исследований характеристик КК и работы квантовой сети, что позволило отработать методики исследований. Следует отметить, что МСВ позволяет не только экономить материальные ресурсы при создании квантовых сетей, но и реализовывать системы квантовой связи, предложенные в [31], что будет исследовано нами после модификации НОК. Дальнейшие исследования работы квантовых систем связи целесообразно проводить на более длинных отрезках МСВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулик С.П. Квантовые технологии: современное состояние и перспективы // НАНОИНДУСТРИЯ. 2020. Т. 13. № S4(99). С. 702.
2. Sidhu J.S. et al. Advances in space quantum communications // IET Quantum Communication. 2021. Vol. 2. No. 4. PP. 182–217.
3. Martin V. et al. Quantum technologies in the telecommunications industry // EPJ Quantum Technology. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 19.
4. Сукачев Д.Д. Протяженные квантовые сети // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 10. С. 1077–1094.
5. 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.
6. Кулик С.П. Квантовая криптография. Часть 1 // Фотоника. 2010. № 2. С. 36–41.
7. Кулик С.П. Квантовая криптография. Часть 2 // Фотоника. 2010. № 3. С. 56–59.

8. Кулик С.П. Квантовая криптография. Часть 3 // Фотоника. 2010. № 4. С. 28–35.
9. Dynes J.F. et al. Quantum key distribution over multicore fiber // Optics express. 2016. Vol. 24. No. 8. PP. 8081–8087.
10. Asif R. Quantum encrypted signals on multiuser optical fiber networks; Simulation analysis of next generation services and technologies, 2017 8th International Conference on the Network of the Future (NOF), 2017. PP. 159–164.
11. Cañas G. et al. High-dimensional decoy-state quantum key distribution over multicore telecommunication fibers // Physical Review A. 2017. Vol. 96. No. 2. PP. 022317.
12. Geng J. et al. Integration in C-band between quantum key distribution and classical channel of 25 dBm launch power over multicore fiber media // Opt. Lett. 2022. Vol. 47. PP. 3111–3114.
13. Kong W. et al. Impact of classical modulation signals on quantum key distribution over multicore fiber // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. No. 13. PP. 4341–4350.
14. Миронов Ю.Б. и др. Анализ перспектив развития источников одиночных фотонов в системах квантового распределения ключей // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22–33.
15. Калачев А.А. Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 // Фотоника. 2017. № 1. С. 88–101.
16. Калачев А.А. Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 2 // Фотоника. 2017. № 2. С. 80–88.
17. Зайцев А.И., Зубилевич А., Колесников О., Коробов А. Источники одиночных фотонов для инфокоммуникационных систем // ПЕРВАЯ МИЛЯ 2022. № 6(106). С. 64–69.
18. Langenfeld S. et al. Quantum repeater node demonstrating unconditionally secure key distribution // Physical review letters. 2021. Vol. 126. No. 23. P. 230506.
19. 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. No. 7. P. 070501.
20. Бутов О.В. и др. Полностью волоконный высокочувствительный датчик изгиба для атомной промышленности // Фотон-экспресс. 2019. № ВКВО. С. 26–27.
21. Shemer K. et al. Optical fiber point sensors based on forward Brillouin scattering // Optics Express. 2022. Vol. 30. No. 22. PP. 39321–39328.
22. Достовалов А.В., Скворцов М.И., Вольф А.А. и др. Волоконный ВКР-лазер на основе 7-сердцевинного световода с перекрестной связью между сердцевинами // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 12. С. 1088–1090.
23. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л. и др. Эффективность ВОЛС. Оценка и пути повышения. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. 128 с.
24. Коршунов В.Н., Шишова Н.А. Многоканальные оптические волокна для высокоскоростных ВОСП // Вестник связи. 2021. № 6. С. 11–15.
25. Патент № 2707383 С1 Российская Федерация, МПК G02B 6/40. Способ изготовления устройства ввода-вывода для многосердцевинного оптического волокна: № 2019110726 : заявл. 10.04.2019; опубл. 26.11.2019 / С.Л.Семенов, С.Г.Журавлев, О.Н.Егорова.
26. Канапин А.А., Дуплинский А.В., Соколов А.С., Воробей С.С., Миллер А.В., Курочкин В.Л., Курочкин Ю.В. Распределение квантового ключа с различными типами кодирования по телекоммуникационным оптоволоконным линиям // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 207–208.
27. Стефаненко Л.И. и др. Квантовая криптография в аспекте популяризации науки и развития профессионально-технической квалификации // Восемнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов: г. Томск, 5–7 мая 2021 года. STT Publishing, 2021. С. 159–172.
28. Rodimin V., Ponomarev M., Sharoglazova V. [et al.] Modular platform for photonic optical experiments and quantum cryptography // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019. Proceedings, Tomsk, 18–20 апреля 2019 года. Tomsk, 2019. P. 8729637.
29. Киктенко Е.О., Пожар Н.О., Дуплинский А.В. [и др.] Демонстрация сети квантового распределения ключа в городских оптоволоконных линиях связи // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 9. С. 798–802.
30. Боев А.А., Воробей С.С., Казанцев С.Ю. [и др.] Возможность построения модульной системы квантового распределения ключей в атмосфере // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 15. С. 15–18.
31. Горбадей О., Зеневич А., Соловьев А. Система передачи ключа шифрования на основе протокола квантовой криптографии // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 6(106). С. 60–63.