

ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ для инфокоммуникационных систем

А.Зайцев, аспирант МТУСИ / a.zaitcev96@yandex.ru,
А.Зубилевич, к.т.н., независимый эксперт,
О.Колесников, к.т.н., зав. кафедрой МТУСИ,
А.Коровов, аспирант МТУСИ

УДК 621.391.63:535.14, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.106.6.64.68

Проанализировано современное состояние исследований в области создания источников одиночных фотонов для защищенных систем связи. Рассмотрены базовые платформы для создания источников одиночных фотонов, перспективные для применения в волоконно-оптических линиях связи и основные тенденции в развитии систем связи на основе технологии квантового распределения ключей. На основе анализа научной литературы выявлены пути развития технологий для создания перспективных источников одиночных фотонов, предназначенных для телекоммуникационных приложений.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня значительный интерес вызывает технология квантового распределения ключей (КРК), которая применяется для защиты данных, передаваемых по оптическим каналам связи [1, 2]. Коммерческие устройства КРК активно внедряются в учреждениях, требующих повышенной защиты информации, в том числе для обеспечения безопасности государственных тайн [1]. Технология КРК базируется на возможности передать криптографический ключ из точки А (Алиса) в точку Б (Боб) с помощью квантовых состояний электромагнитного поля.

В наиболее надежных реализациях технологии КРК информация передается с помощью одиночных фотонов. В этом случае безопасность передачи данных может быть доказана строго математически: теорема о запрете клонирования

произвольной неизвестной квантовой системы и известный факт о том, что измерение над квантовой системой необратимо изменяет ее характеристики, гарантирует невозможность незаметного извлечения информации, переносимой одиночным фотоном [2]. В связи с этим источник одиночных фотонов (ИОФ) считается одним из важнейших элементов технологии КРК [3, 4]. Целью настоящей статьи является анализ основных тенденций в области разработки и применений ИОФ в системах связи и обзор доступных сегодня коммерческих реализаций ИОФ.

ФОРМИРОВАНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КЛЮЧА В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

К настоящему времени разработано значительное количество разнообразных способов кодирования

информации и передачи их с помощью одиночных фотонов. Алгоритм формирования криптографического ключа на их основе называют квантовым протоколом, рассмотренным в обзоре [2].

В процессе передачи квантового криптографического ключа происходит приготовление фотонов в заданном квантовом состоянии, их передача по квантовому каналу связи и регистрация (измерение) состояния фотона получателем. Часто применяют случайное кодирование базиса и поляризации фотона на стороне отправителя, а получатель случайно выбирает базисы и регистрирует квантовые частицы света. После получения полного ключа по квантовому каналу Алиса, используя открытый канал, может передать зашифрованную информацию Бобу, а тот в свою очередь ее дешифровать. Дальность передачи квантового ключа по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) при использовании специализированных протоколов КРК сегодня может достигать нескольких сотен километров [5].

При использовании идеальных ИОФ и детекторов одиночных фотонов взломать систему невозможно [2, 4]. В этом случае безопасность системы обеспечивается тем, что при измерении состояния фотона оно разрушается. Третья сторона, которая хотела бы получить несанкционированный доступ к передаваемой информации, которую называют Евой (от англ. eavesdropper – подслушивающий), не в состоянии угадать изначально заложенный базис или поляризацию, поскольку не имеет доступа к генератору случайных чисел Алисы.

По итогу оценки квантового коэффициента ошибок (QBER – Quantum Bit Error Rate) в канале между Алисой и Бобом появится понимание о присутствии Евы и о том, что их ключ был скомпрометирован.

Именно по этой причине ИОФ является особо значимой частью для КРК. Стоит отметить, что на сегодняшний день во многих коммерческих системах КРК вместо настоящих ИОФ применяют лазер, импульс которого сильно ослабляется [3, 6]. Поэтому излучение такого источника не является однофотонным, что приводит к усложнению протокола и необходимости постобработки сигнала [6]. Также встречаются коммерческие источники однофотонных состояний на эффекте спонтанного параметрического рассеяния [3]. Данный эффект основан на распаде фотонов когерентного лазерного излучения на пары фотонов в среде с отличной от нуля квадратичной восприимчивостью [7].

Источники одиночных фотонов для телекоммуникационных приложений

Что такое ИОФ?

Источник одиночных фотонов – это не классический источник света. Иногда его называют квантовым. Такой источник позволяет по требованию генерировать минимальную энергию, которая равна единичному кванту света – фотону.

ИОФ существенно отличаются от других источников света, как когерентных (лазеры), так и некогерентных (светодиодные лампы или лампы накаливания, излучение от которых часто называют классическим). Например, в лампе накаливания фотоны испускаются независимо друг от друга, в случайные моменты времени и в произвольные направления. Во всяком случае, с помощью классических источников света нельзя сгенерировать идеальное однофотонное состояние по запросу (даже установив в систему светофильтры, диафрагмы и управляемые аттенюаторы). Это также справедливо и для лазеров, которые образуют когерентную электромагнитную волну, которая характеризуется достаточно узким спектром, определенным поляризационным состоянием и высокой направленностью пучка.

Исключительная возможность генерации однофотонных состояний по требованию выделяет ИОФ в особый класс источников излучения, где требование – это условно нажатая кнопка "пуск" [3]. Схема работы идеального ИОФ изображена на рис.1.

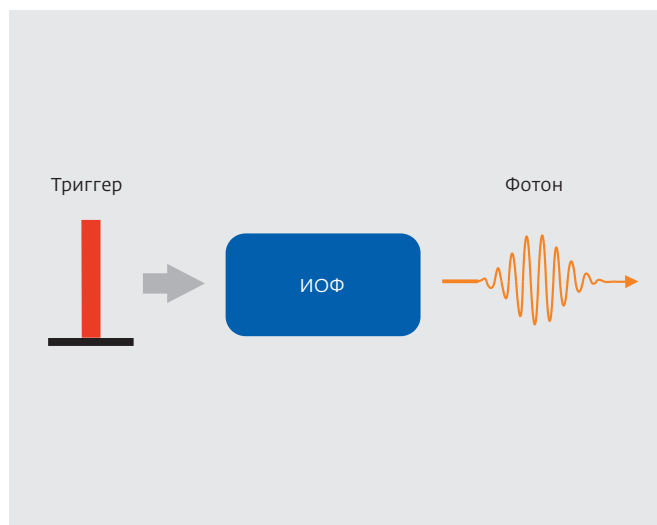


Рис.1. Схема работы идеального источника одиночных фотонов

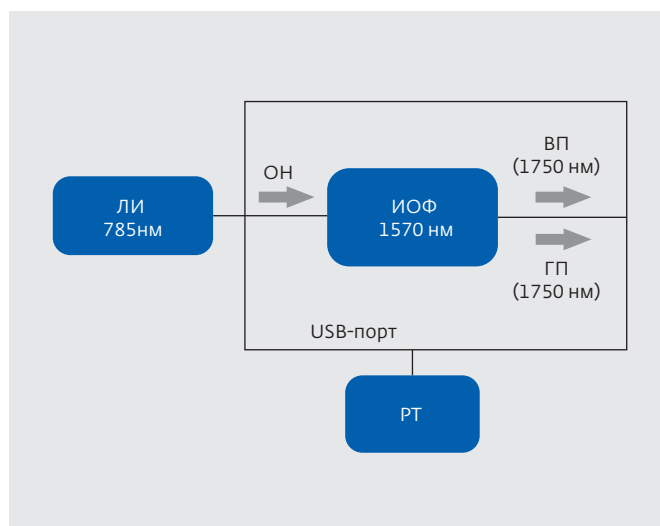


Рис.2. Схема работы ИОФ на СПР (ЛИ – лазерный источник; ОН – оптическая накачка; ИОФ – источник одиночных фотонов; РТ – регулятор температуры; ВП – вертикальная поляризация; ГП – горизонтальная поляризация)

Платформы ИОФ

Основные типы источников одиночных фотонов делятся на:

1. Детерминированные источники на изолированных квантовых эмиттерах:
 - ▶ одиночные атомы;
 - ▶ одиночные ионы;
 - ▶ одиночные молекулы;
 - ▶ квантовые точки;
 - ▶ центры окраски.
2. Вероятностные источники:
 - ▶ спонтанное параметрическое рассеяние (СПР);
 - ▶ четырехволновое смешение.

Объясняя простыми словами: детерминированные источники способны добиться идеальных условий для 100% испускания одиночного фотона по требованию. Впрочем, вероятностные источники таким похвастаться не могут, они испускают одиночный фотон с некоторой вероятностью, таким образом являются стохастическими и не позволяют создавать детерминированные однофотонные состояния. В основе таких источников используются нелинейные оптические эффекты. При подаче импульса накачки, например на периодически поляризованный кристалл ниобата лития, с некоторой вероятностью появляется пара одиночных фотонов. Их также называются "бифотонами". Можно сказать, что при измерении одного из этих

фотонов со 100% вероятностью можно ожидать, что "на свет" появился еще один фотон, который можно использовать как идеальное однофотонное состояние. Схема работы последнего источника изображена на рис.2 [7, 8].

Наукометрический анализ ИОФ

Изучение публикаций в научных и технических изданиях с 2017 по 2021 год по методике, описанной в [9], позволило определить основные платформы, используемые для изготовления ИОФ:

- ИОФ на одиночных атомах и ионах (ОАИ);
- ИОФ на нелинейных эффектах в кристаллах: спонтанный параметрический распад (СПР), либо четырехволновое смешение (ЧВС);
- ИОФ на квантовых точках (КТ);
- ИОФ на NV-центрах в алмазе и центрах окраски в нанокристаллах (ЦОН);
- ИОФ на углеродных нанотрубках (УНТ).

Полученные результаты наукометрических исследований показаны на рис.3.

На сегодняшний день на рынке представлено небольшое количество компаний, которые предлагают коммерческие ИОФ. Имеются такие источники на основе технологии

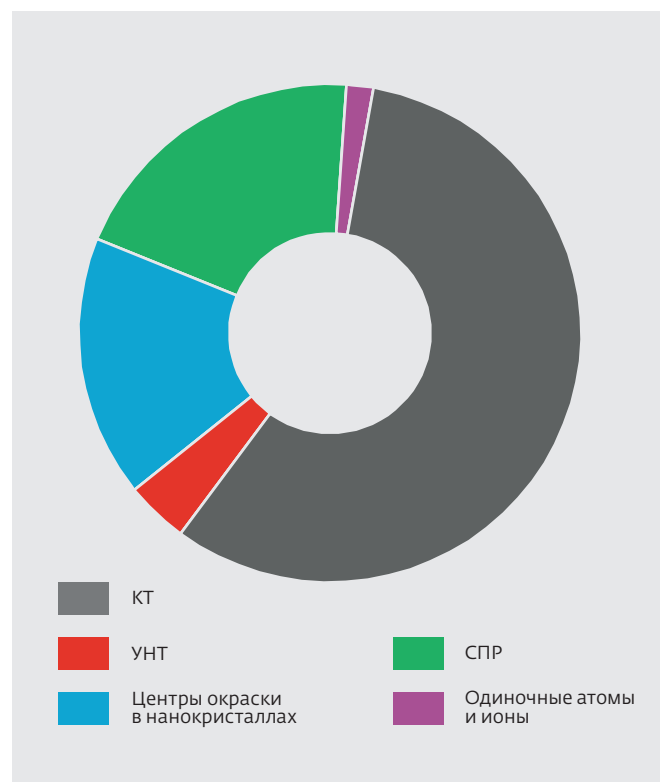


Рис.3. Распределение публикаций ведущих мировых изданий для различных платформ ИОФ (2017–2021 годы)

Таблица 1. Технические характеристики ИОФ компании Quandela

Параметр	Значение
Технология изготовления	Квантовые точки
Длина волны генерации, нм	925 +/-5
Частота одиночных фотонов, МГц	>24
$g(2)(0)$	0,025
Интерференция Хонг – Оу – Манделя	0,94
Эффективность (яркость), %	> 30
Чистота генерации одиночных фотонов, %	> 95
Неразличимость фотонов, %	>90
Время жизни фотонов, пс	250 (+/- 100)
Требуемая энергия импульса возбуждения, пДж	0,1 (на импульс)
Требуемая рабочая температура, К	5–8
Вес, кг	0,01
Страна-разработчик	Франция

с использованием квантовых точек или базирующиеся на эффекте спонтанного параметрического рассеяния. Преобладающей технологией коммерческих устройств сегодня является СПР, так как эта область является более отработанной и дешевой в сравнении с генерацией одиночных фотонов с помощью квантовых точек.

Преимущественные выходные характеристики коммерческих образцов ИОФ на КТ нивелируются использованием криогенных охладителей, которые обеспечивают их работоспособность. Также в соответствии с техническими описаниями коммерчески доступных СПР-источников последние способны работать в штатном режиме при комнатных температурах, но обладают более низкоеффективной генерацией одиночных фотонов.

КОММЕРЧЕСКИЕ ИОФ

Источник на квантовых точках

В качестве примера возьмем компанию Quandela, которая производит коммерческие образцы микросхем на платформе с КТ для обеспечения генерации одиночных фотонов. Они обладают высокими показателями чистоты генерации одиночного фотона ~95%, но, как и говорилось ранее, для поддержания стабильной работы требуются дорогостоящие криогенные установки. Полные

Таблица 2. Технические характеристики ИОФ SPDC-1570 от Optilab

Параметр	Значение
Рабочий диапазон длин волн, нм	1570–1580
Длина волны накачки, нм	785 +/-1
Полоса вырождения SPDC, нм	0,5
Нормализованная скорость генерации пар фотонов, Гц/мВт	> 106
Объявленная эффективность, %	> 60
Диапазон рабочих температур, °С	От +10 до +40
Температура хранения, °С	От –10 до +69
Материал	ППНЛ
Габаритные размеры, мм	70 (Д) x 40 (Ш) x 24 (В)

технические характеристики такого чипа представлены в табл.1.

Источник на спонтанном параметрическом рассеянии

Источник пар фотонов от компании Optilab представляет собой устройство с периодически поляризованным ниобатом лития (ППНЛ), благодаря которому осуществляется вероятностное рассеяние на пары фотонов. Основное применение данного прибора заключается в генерации поляризационно-коррелированных пар фотонов в диапазоне 1570 нм от инфракрасного лазера 785 нм, но также доступен и другой индивидуальный диапазон длин волн. Техническое описание данного ИОФ представлено в табл.2 [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология квантового распределения ключей, безусловно, одна из наиболее перспективных технологий повышения защиты передаваемой информации по каналам ВОЛС.

Дальнейшее развитие технологии КРК будет зависеть исключительно от возможности реализовать идеальные компоненты квантовых систем инфокоммуникаций, при этом особое внимание должно уделяться совершенствованию наиболее

важных элементов данной технологии, к которым относятся ИОФ.

Как видно из приведенных в статье данных, существует несколько путей развития таких источников со своими достоинствами и недостатками. Неоспоримым фактом является то, что из коммерчески доступных устройств источники, спроектированные на СПР-эффектах, способны стабильно работать при комнатной температуре, обеспечивая генерацию однофотонных состояний с достаточно низкой эффективностью, в то время как более производительный и точный источник на квантовых точках требует поддержания криогенных температур, что затрудняет широкое применение последнего в коммерческих системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Martin V.** et al. Quantum technologies in the telecommunications industry // EPJ Quantum Technology. 2021. Vol. 8. No 1. P. 19.
2. **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.
3. **Миронов Ю.Б.** и др. // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22–33.
4. **Калачев А.А.** Элементная база дальнodelствующей квантовой связи. Ч. 1 // Фотоника. 2017. № 1. С. 88–101.
5. **Chen J.** et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km // Phys. Rev. Lett. 2020. Vol. 124. No 7. P. 070501.
6. **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.
7. **Егоров В.** и др. Установка квантовой криптографии с источником одиночных фотонов, основанной на явлении спонтанного параметрического рассеяния света // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 23–27.
8. **Oxborrow M. and Sinclair A.G.** Single-photon sources // Contemporary Physics. 2005. Vol. 46. No. 3. PP. 173–206.
9. **Машковцева Л.С.** и др. Научометрический анализ публикаций по источникам одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2022. № 1. С. 22–31.
10. **OPTILAB LLC** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.optilab.com/> (Дата обращения 20.05.2022).
11. **Bennett C.H. and Brassard G.** Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // Theoretical Computer Science. 2014. Vol. 560. No. 7. PP. 7–11.
12. **Сиднев С.А., Зубилевич А.Л.** и др. Эффективность ВОЛС. Оценка и пути повышения. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. 128 с.

"Ростелеком" упростил присоединение на объектах УЦН

"Ростелеком" запустил специализированный сайт, на котором любой оператор связи может подать заявление на доступ к ресурсам компании на объектах проекта устранения цифрового неравенства (УЦН). Таким образом компания предоставляет операторам возможность использовать готовую инфраструктуру УЦН и предлагает услугу присоединения к своей сети передачи данных (IP-транзит).

IP-транзит – это услуга присоединения и пропуска трафика сетей передачи данных для магистрального доступа в интернет. "Ростелеком" использует IP/MPLS-сеть со скоростью доступа от 1 до 100 Гбит/с. IP-транзит позволит провай-

дерам оптимизировать затраты на кибербезопасность и увеличить пропускную способность своей сети. Тарифы на оказание услуги установлены на уровне действующих расценок на аналогичные услуги "Ростелекома" при подключении в административных центрах субъектов РФ.

При заказе присоединения на объектах УЦН операторы получают возможность подключения своего оборудования к готовой инфраструктуре УЦН, тем самым значительно увеличивая зону покрытия собственных сетей. В зону покрытия также входят почти 14 тыс. уже построенных точек доступа в самых удаленных населенных пунктах страны. "Ростелеком" при этом готов обе-

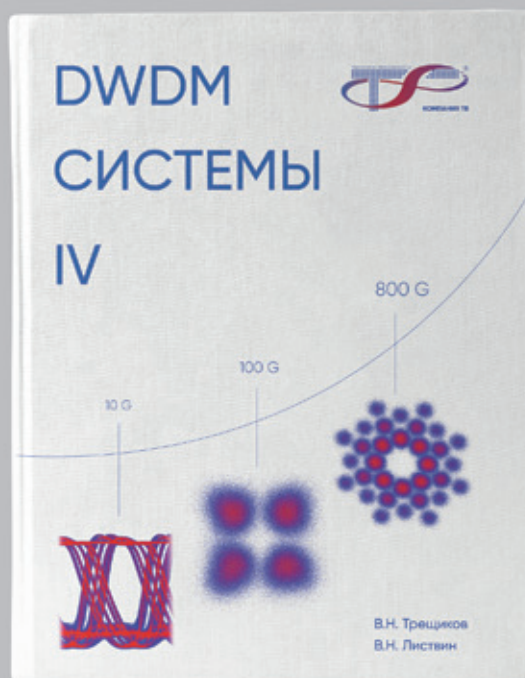
спечить операторам круглосуточную техническую поддержку. В дальнейшем перечень услуг, доступных для получения на объектах УЦН, будет расширяться.

Чтобы подать заявление на присоединение к сети "Ростелекома" на объектах УЦН, необходимо выбрать нужный населенный пункт из перечня на странице "Объекты", нажать на иконку "Подать заявление" или сразу перейти на страницу "Заявления" и заполнить требуемые данные. Ответ на заявление придет в течение 10 рабочих дней.

По информации ПАО "Ростелеком"



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:**



В.Н. Трещиков, В.Н. Листвин

DWDM-системы

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 420с.
ISBN 978-5-94836-634-0

Цена 1960 руб.

В книге собран курс лекций по DWDM-системам, предназначенный для специалистов, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией DWDM-оборудования. Это четвертое издание, расширенное и дополненное, состоящее из четырех разделов. В первой части рассмотрены основы DWDM-систем, история их возникновения и эволюция, во второй части — компоненты волоконно-оптического тракта, в третьей — приемник и передатчик каналообразующего оборудования, в четвертой части — механизмы формирования шумов и способы их расчета применительно к волоконно-оптическим линиям связи.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphere.ru
sales@technosphere.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphere.ru