

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-837-847

УДК 004.056.5, 535.8

Создание уязвимостей в системах квантового распределения ключей в результате атаки импульсным лазером

Дарья Дмитриевна Ружицкая¹✉, Ирина Вадимовна Жлуктова²,
 Михаил Александрович Петров³, Константин Александрович Зайцев⁴,
 Полина Павловна Ачева⁵, Николай Алексеевич Зуников⁶,
 Алексей Вячеславович Шилько⁷, Джейлан Актас⁸, Фридерика Джолингер⁹,
 Даниил Олегович Трефилов¹⁰, Анастасия Александровна Поносова¹¹,
 Владимир Александрович Камынин¹², Вадим Викторович Макаров¹³

^{1,2,3,4,5,6,7,10,11,12,13} Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация

^{2,12} Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация

^{8,9} Университет Бристоль, Бристоль, BS8 1QU, Великобритания

¹³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119049, Российская Федерация

¹ dariaruzh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6545-4298>

² iv.zhuktova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5619-011X>

³ petrov-ma@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7218-7693>

⁴ Zaitsev20k@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5928-770X>

⁵ Achevap17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7920-0483>

⁶ zunikov.na@phystech.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8759-2082>

⁷ AlexeyShilko_1996@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3188-1192>

⁸ djeylan.aktas@bristol.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0586>

⁹ friederike.johlinger@bristol.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0003-0644-8319>

¹⁰ trefdaniil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3003-7221>

¹¹ nastyaleksi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-5939>

¹² kamyninva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>

¹³ makarov@vad1.com, <https://orcid.org/0000-0003-4341-7837>

Аннотация

Предмет исследования. Протоколы квантовой коммуникации считаются безопасными при условии, что все входящие в систему устройства полностью охарактеризованы, а побочные каналы закрыты. Однако в результате воздействия лазерного излучения возможно изменение характеристик компонентов систем квантовой коммуникации, что приводит к появлению уязвимостей в системе квантового распределения ключей. В работе рассмотрено влияние импульсного лазерного излучения на волоконно-оптические изоляторы, применяемые в системах квантовых коммуникаций. Изоляторы защищают источник системы от атакующего оптического излучения, который приходит от «подслушивающей» стороны по квантовому каналу. Снижение коэффициента изоляции может вывести всю систему из безопасного состояния, и злоумышленник сможет получить доступ к информации о секретном ключе. **Метод.** Выполнена имитация сценария наиболее вероятной атаки на источник системы квантового распределения ключей импульсным лазером. Экспериментальная установка воздействует на волоконные изоляторы импульсным лазерным излучением в четырех режимах генерации импульсов на длине волны 1064 нм (в пределах окна прозрачности изоляторов) со средней мощностью до 840 мВт. Проведен контроль коэффициента изоляции и пропускной способности с использованием лазерного диода с длиной волны 1550 нм и средней мощностью 10,5 мВт. Для разделения используемых лазеров применены спектрально-селективные разветвители. **Основные результаты.** Показано, что коэффициент изоляции в направлении из квантового канала в систему на длине волны 1550 нм снижается с исходного значения 59,1 дБ до 24,5 дБ.

© Ружицкая Д.Д., Жлуктова И.В., Петров М.А., Зайцев К.А., Ачева П.П., Зуников Н.А., Шилько А.В., Актас Д., Джолингер Ф., Трефилов Д.О., Поносова А.А., Камынин В.А., Макаров В.В., 2021

Пропускная способность в направлении из системы в квантовый канал на этой же длине волны уменьшается с 0,6 дБ до 1,2–12,3 дБ или не изменяется, в зависимости от параметров импульсного лазерного излучения. Мониторинг температуры показал, что при воздействии импульсным излучением температура корпуса изолятора изменяется незначительно. Полученные эффекты изменения коэффициента изоляции и пропускной способности могут быть объяснены наличием нелинейных эффектов в магнитооптическом кристалле изолятора.

Практическая значимость. Результаты работы найдут применение при практической оценке безопасности систем квантовой коммуникации – оценки безопасности систем квантового распределения ключа. Результат может быть использован при составлении стандартов сертификационных процедур оценки безопасности систем квантовой связи. Работа содержит рекомендации по усилению безопасности блока источника сигнала в системах квантовой коммуникации. В качестве контрмер по защите от воздействия импульсного лазерного излучения предложено использовать оптические предохранители с заданной предельной пороговой мощностью, детекторы для мониторинга входной мощности оптического излучения и узкополосные оптические фильтры на входе в систему квантовой коммуникации.

Ключевые слова

квантовая связь, квантовая коммуникация, квантовая криптография, уязвимости систем квантовой связи, атака лазерным повреждением, импульсный лазер

Благодарности

Работы проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-11-2021-078 от 29.09.2021.

Ссылка для цитирования: Ружицкая Д.Д., Жлуктова И.В., Петров М.А., Зайцев К.А., Ачева П.П., Зуников Н.А., Шилько А.В., Актас Д., Джоллингер Ф., Трефилов Д.О., Поносова А.А., Камынин В.А., Макаров В.В. Создание уязвимостей в системах квантового распределения ключей в результате атаки импульсным лазером // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 837–847. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-837-847

Vulnerabilities in the quantum key distribution system induced under a pulsed laser attack

Daria D. Ruzhitskaya¹✉, Irina V. Zhluktova², Mikhail A. Petrov³, Konstantin A. Zaitsev⁴, Polina P. Acheva⁵, Nikolay A. Zunikov⁶, Aleksei V. Shilko⁷, Djeylan Aktas⁸, Friederike Johlinger⁹, Daniil O. Trefilov¹⁰, Anastasiya A. Ponosova¹¹, Vladimir A. Kamynin¹², Vadim V. Makarov¹³

^{1,2,3,4,5,6,7,10,11,12,13} Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation

^{2,12} Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

^{8,9} University of Bristol, Bristol, BS8 1QU, United Kingdom

¹³ National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, 119049, Russian Federation

¹ dariaruzh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6545-4298>

² iv.zhluktova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5619-011X>

³ petrov-ma@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7218-7693>

⁴ Zaitsev20k@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5928-770X>

⁵ Achevap17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7920-0483>

⁶ zunikov.na@phystech.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8759-2082>

⁷ AlexeyShilko_1996@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3188-1192>

⁸ djeylan.aktas@bristol.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0586>

⁹ friederike.johlinger@bristol.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0003-0644-8319>

¹⁰ trefdanil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3003-7221>

¹¹ nastya-aleksi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-5939>

¹² kamyninva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>

¹³ makarov@vad1.com, <https://orcid.org/0000-0003-4341-7837>

Abstract

Quantum communication protocols are considered secure provided that all devices included in the system are fully characterized, and side channels are closed. However, as a result of laser radiation exposure, it is possible to change quantum communication systems components' characteristics. This leads to vulnerabilities appearing in the quantum key distribution system. In this paper, we consider the effect of pulsed laser radiation on fiber-optic isolators used in quantum communication systems. Isolators protect the source of the system from attacking optical radiation coming from the “eavesdropping” side via the quantum channel. Lowering the isolation factor can bring the entire system out of a secure state. This gives an eavesdropper access to information about the secret key. The scenario of the most probable attack to the source of the quantum key distribution system via a pulsed laser was simulated. The experimental setup provided exposure of fiber isolators with pulsed laser radiation at a wavelength of 1064 nm (within the transparency window of the isolators) with a mean power up to 840 mW in four different pulse generation modes. The isolation factor and throughput of tested samples were monitored using a laser diode with a wavelength of 1550 nm and average power of 10.5 mW. Spectrally selective splitters were used to separate the lasers. It is shown that the isolation factor (isolator attenuation in the direction from the quantum channel to the system) at a wavelength of 1550 nm decreases from the initial value of 59.1 dB to 24.5 dB. The throughput (in the direction from the system to the quantum channel) at the same wavelength decreases from 0.6 dB to 1.2–12.3 dB or remains the same, depending on the acting pulsed laser radiation parameters. Temperature monitoring showed that the temperature of the isolator body changes insignificantly when

exposed to pulsed radiation. The obtained effects of changing the isolation coefficient and throughput can be explained by the presence of nonlinear effects in the magneto-optical crystal of the isolator. The results of the work can be applicable in the practical evaluation of quantum communication systems security, in particular, the security evaluation of quantum key distribution systems. The results can be used to prepare the standards for certification procedures for assessing the security of quantum communication systems. The work gives recommendations for enhancing signal source unit security in quantum communication systems. Namely, as countermeasures to protect against the effects of pulsed laser radiation, it is proposed to set optical fuses with a limited threshold power, detectors for monitoring input optical radiation power, and narrow-band optical filters at the entrance of the quantum communication system.

Keywords

quantum communication, quantum cryptography, quantum communication systems vulnerabilities, laser-damage attack, pulsed lasers

Acknowledgements

This work is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-11-2021-078 dated September 29, 2021.

For citation: Ruzhitskaya D.D., Zhluktova I.V., Petrov M.A., Zaitsev K.A., Acheva P.P., Zunikov N.A., Shilko A.V., Aktas D., Johlinger F., Trefilov D.O., Ponosova A.A., Kamynin V.A., Makarov V.V. Vulnerabilities in the quantum key distribution system induced under a pulsed laser attack. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 837–847 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-837-847

Введение

Квантовое распределение ключей (КРК) позволяет создать секретный криптографический ключ у двух удаленных пользователей — источника и приемника [1]. Теоретическое доказательство безопасности систем КРК основано на законах квантовой физики и гарантирует секретность генерируемого ключа в случае любых атак, в том числе использующих квантовый компьютер [2, 3]. На практике несовершенства реализации систем КРК в сравнении с их теоретической моделью позволяют злоумышленнику получить информацию о секретном ключе и остаться незамеченным [4–9]. В настоящее время известно порядка 25 уязвимостей, для борьбы с которыми разработаны соответствующие практические меры, предотвращающие утечку секретной информации.

Для защиты источника систем КРК от атак (затраченным лазерным излучением [7], троянским конем [10, 11] и лазерным повреждением [12, 13]), при вводе излучения в источник, во многих практических реализациях волоконных и интегральных устройств на выходе из источника устанавливаются волоконные изоляторы. В работах [14, 15] выполнено исследование данных элементов при атаке мощным непрерывным лазером и установлено, что волоконный изолятор является эффективной контрмерой, если его дополнительная копия, неучтенная в доказательстве безопасности, устанавливается на выходе источника КРК.

Согласно теории лазерного повреждения оптических материалов [16], непрерывное лазерное излучение и лазерные импульсы длительностью более 1 нс индуцируют дефекты термического характера. Тогда как импульсное лазерное излучение может привести к диэлектрическому пробою (при импульсах длительностью от 1 пс до 1 нс) и лавинной мультифотонной ионизации (при импульсах менее 1 пс). Так как злоумышленник не ограничен в выборе лазера, актуальным является изучение всех возможных механизмов повреждения компонентов систем КРК, использующихся для защиты их источника. Если для атаки на систему КРК применить более короткую, чем телекоммуникационную,

длину волны, то создать уязвимость будет возможно при меньшей мощности лазерного излучения, в отличие от λ равной 1550 нм [10].

Цель работы — демонстрация создания уязвимости источника системы КРК при атаке на систему импульсным лазером. Объекты исследования — волоконно-оптические изоляторы на входе в систему КРК, обеспечивающие безопасность источника системы, ограничивая несанкционированный доступ за счет значительного ослабления излучения, приходящего из канала связи в систему КРК. Задача работы — экспериментально установить возможность существенного уменьшения коэффициента изоляции оптических изоляторов на их рабочей длине волны (телекоммуникационной, $\lambda = 1550$ нм) под действием импульсного лазерного излучения с $\lambda = 1064$ нм, лежащей в диапазоне прозрачности изолятора.

Тестируемые волоконно-оптические изоляторы

Выполним исследование поляризационно-независимых волоконных изоляторов с рабочей длиной волны 1550 нм, использующихся в коммерческих системах КРК. Исследуемые образцы обеспечивают пропускание излучения в прямом направлении с минимальными потерями, а в обратном — с потерями не менее 50 дБ. Основные характеристики волоконных изоляторов в соответствии со спецификацией и начальные измеренные значения коэффициентов изоляции и вносимых потерь представлены в табл. 1.

Основной параметр, определяющий изоляцию компонента — постоянная Верде [17]. Константа Верде описывает силу эффекта Фарадея в материале, и зависит от внешних факторов: температуры материала и длины волны проходящего излучения. На рис. 1, а показан типичный вид зависимости константы Верде (V) от влияющих факторов, полученный в результате моделирования для магнитооптического кристалла YIG (иттриевый железный гранат) внутри изолятора [17]. Приведенный вид зависимости — типичный для всех видов магнитооптических кристаллов, которые используются в волоконно-оптических изоляторах.

Таблица 1. Характеристики тестируемых изоляторов
Table 1. Characteristics of testing components

Параметр	По спецификации	Начальные измеренные значения	
		образец 1	образец 2
Коэффициент изоляции, дБ	Не менее 50	50	59,1
Коэффициент вносимых потерь, дБ	Не более 0,9	0,2	0,6
Рабочая длина волны, нм	1550	—	—
Диапазон рабочих температур, °С	от -5 до +70	—	—

Коэффициент изоляции рассматриваемых образцов в спектральном диапазоне 1020–1400 нм при комнатной температуре определен методом сравнения прошедших мощностей [18]. В качестве источника излучения использована галогеновая лампа, оснащенная волоконным выходом. Спектры источника излучения и пропускания образцов измерены с помощью анализатора оптического спектра HP Hewlett Packard 70004A со спектральным разрешением 1 нм. Результат измерения образца 1 показан на рис. 1, б. В представленном диапазоне наблюдается существенное снижение коэффициента изоляции в сравнении с его максимальным значением на рабочей длине волны. В диапазоне длин волн 1050–1280 нм затухание составляет порядка 12–15 дБ. Для образца 2 получена аналогичная зависимость с идентичными параметрами.

Параметры импульсного лазера

В работах [14, 15] выполнено исследование воздействия мощного непрерывного лазера на волоконные изоляторы для рабочей длины волны 1550 нм, соответствующей рабочей длине волны образца. Из-за высокого коэффициента изоляции мощное излучение погло-

щается компонентом, что приводит к его нагреванию. При применении непрерывного излучения со средней мощностью порядка 3,5–4,5 Вт происходит разрушение образца, что приводит к потере работоспособности системы. С точки зрения безопасности систем КРК, обрыв линии связи считается благоприятным исходом, так как гарантирует сохранность секретной информации — попытка взлома предотвращается [11, 12, 14, 15].

Для минимизации изменения температуры магнитооптического кристалла внутри изолятора в результате поглощения лазерного излучения, в настоящей работе использован лазер с рабочей длиной волны, соответствующей минимальным значениям коэффициента изоляции для спектрального диапазона 1050–1280 нм.

При подборе параметров генерации импульсного излучения для проведения атаки лазерным повреждением волоконного изолятора учтены следующие факторы. Согласно теории лазерного повреждения оптических материалов [16], характер повреждения зависит от длительности импульсов воздействующего лазера. Так, для получения повреждения тестируемого компонента, отличного от термического и полученного в [14, 15], необходимо использовать импульсы с длительностью от 1 пс до 1 нс. Исследование экспериментальных данных

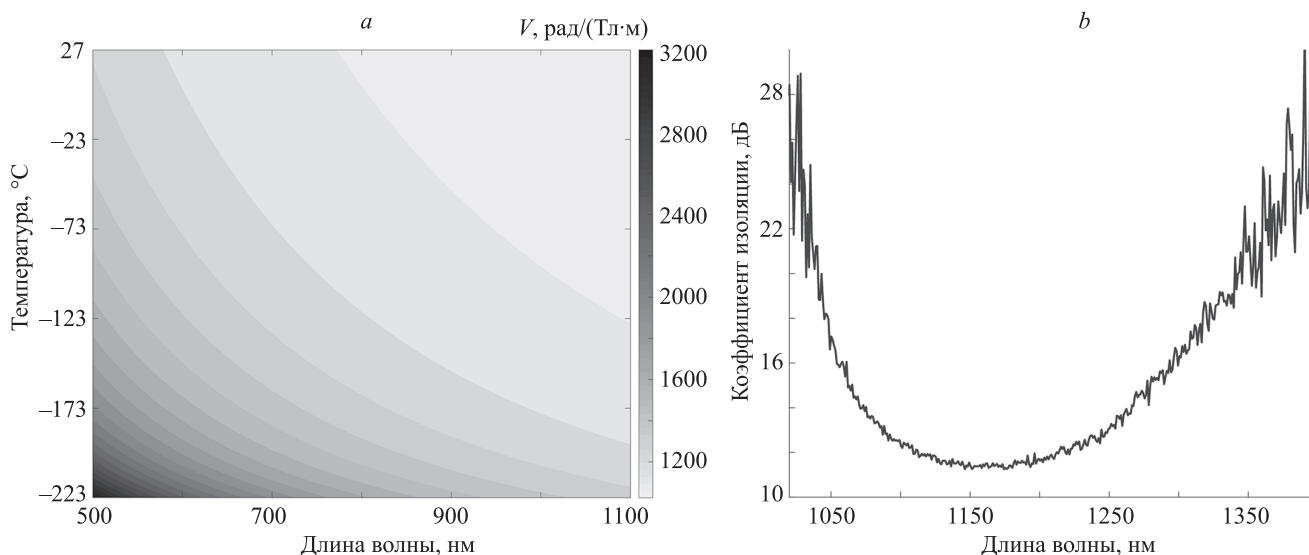


Рис. 1. Характеристики оптического изолятора: типичная теоретическая зависимость постоянной Верде (V) магнитооптического кристалла YIG от температуры и длины волны [17] (а); спектральная зависимость коэффициента изоляции образца 1 в инфракрасной области спектра, включающей минимальные значения затухания (б)

Fig. 1. Optical isolator characteristics: typical theoretical dependence of the Verdet constant (V) of magneto-optical crystal YIG as function of temperature and wavelength [17] (a); spectral dependence of the isolation coefficient of sample 1 in the infrared area of the spectrum, including the minimum attenuation (b)

в работах [10, 19–21] по повреждению и распространению высокоэнергетических импульсов в оптическом волокне показали, что дефект может быть получен как в режиме одиночных импульсов, так и при многоимпульсном воздействии. Для оценки влияния импульсного лазерного излучения на волоконный изолятор представляет интерес проведение серии тестов в различных режимах генерации импульсного излучения. Фактор, ограничивающий выбор лазера — мощность импульсного излучения, которая может распространяться по волокну, не вызывая его разрушение. При длительности импульсов порядка сотен пикосекунд значение пороговой пиковой мощности составляет около 1 МВт [22].

На основании приведенного анализа научных работ и представленных характеристик исследуемых образцов для атаки лазерным повреждением выбран волоконный иттербиевый импульсный лазер с рабочей длиной волны 1064 нм. Импульсный лазер разработан в лаборатории активных сред твердотельных лазеров Института общей физики Российской академии наук [23]. Согласно спектральной зависимости коэффициентов изоляции (рис. 1, б), поглощение излучения импульсного лазера тестируемыми образцами будет минимальным (коэффициент изоляции составляет около 12 дБ), что позволит минимизировать влияние термических эффектов на образец.

В представленной серии тестов импульсный лазер генерировал излучение в четырех режимах. Средняя выходная мощность и энергия импульсов в каждом режиме генерации излучения представлены в табл. 2.

Волоконный иттербиевый лазер оснащен системой контроля стабильности выходных параметров. Мониторинг спектра излучения осуществлен при помощи анализатора спектра HP Hewlett Packard 70004A. Выполнен контроль средней выходной мощности при помощи оптического измерителя мощности Orion/Ogion с датчиком — Ophir 3A. Контроль временных параметров осуществлен с использованием сверхбыстрого фотодиода Alphalas серии UPD-35-IR2-FC и осциллографа Tektronix MSO64 (полоса пропускания 4 ГГц).

Методика исследования воздействия лазерного излучения на образцы

Схема экспериментальной установки (рис. 2) имитирует наиболее вероятный сценарий, в котором злоумышленник атакует источник системы КРК со стороны квантового канала связи. Выполнен ввод излучения импульсного лазера в исследуемые образцы в направлении, противоположном пропусканию изоляторов. Световоды соединены с помощью сварных соединений,

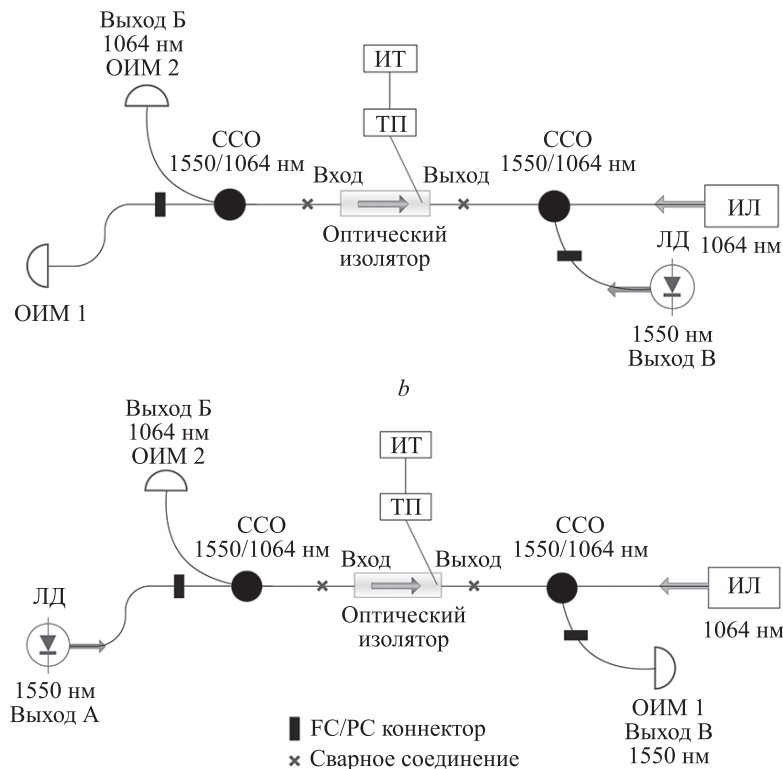


Рис. 2. Схема экспериментальной установки измерения коэффициентов изоляции (а) и вносимых потерь (б). ОИМ 1, 2 — оптический измеритель мощности; ССО — спектрально-селективный ответитель; ТП — термопара; ИТ — измеритель температуры; ИЛ — импульсный лазер; ЛД — лазерный диод. Стрелки на схеме показывают направление излучения от импульсного лазера и лазерного диода в каждом эксперименте

Fig. 2. Experimental setup for measuring the coefficients of isolation (a) and insertion losses (b). OPM (OIM) 1, 2 – optical power meter; WDM (SSO) – wavelength division multiplexing; TC (TP) – thermocouple; TM (IT) – temperature meter; PL (IL) – pulsed laser; LD – laser diode. The arrows in the figure indicate the direction of radiation from the pulsed laser and laser diode in each experiment

Таблица 2. Режимы генерации импульсного лазера

Table 2. Pulsed laser modes

Режим генерации	Количество импульсов	Средняя частота следования между импульсами в пачке, МГц	Частота следования пачки импульсов, МГц	Средняя мощность, мин/макс, мВт	Энергия импульса, мин/макс, нДж	Длительность импульса, пс
Одноимпульсный	1	—	1	81/800	81/800	220
Двухимпульсный	2	1,2	6	115/840	9,5/70	250
Трехимпульсный	3	1,4	20	120/430	2/7,2	300
Многоимпульсный	7	1,8	16	240/830	2,1/7,4	360

для исключения возможного повреждения коннекторов импульсным излучением.

Для измерения коэффициентов изоляции и вносимых потерь на рабочей длине волны образцов использован лазерный диод (Gooch and Housego AA1406) с длиной волны генерации 1550 нм и средней выходной мощностью 10,5 мВт.

Спектрально-селективные ответвители 1550/1064 нм установлены с обеих сторон образца для объединения и разделения излучения импульсного лазера и излучения лазерного диода по длинам волн. Это позволило осуществить одновременное воздействие на образец и контроль его основных параметров.

Для определения коэффициента изоляции к выходу В подключен лазерный диод, а оптический измеритель мощности ОИМ 1 (Thorlabs PM20CH) — к выходу А (рис. 2, а). Для оценки коэффициента вносимых потерь лазерный диод подключен к выходу А, а прошедшая мощность измерена на выходе В (рис. 2, б).

Коэффициенты изоляции и вносимых потерь (α) в зависимости от схемы измерений вычислены из значений мощностей, прошедших через тестируемый компонент, согласно формуле [18]:

$$\alpha = -10 \lg(P_{\text{ОИМ1}}/P_{\text{ЛД}}),$$

где $P_{\text{ОИМ1}}$ — мощность излучения, прошедшая от лазерного диода через тестируемый образец, регистрируемая на ОИМ 1; $P_{\text{ЛД}}$ — вводимая в образец средняя мощность от лазерного диода с учетом потерь на спектрально-селективных ответвителях.

Для исключения возможности повреждения исследуемых изоляторов с помощью термических процессов, проведен мониторинг температуры образцов при помощи термопары, закрепленной на корпусе тестируемого изолятора со стороны ввода излучения от импульсного лазера на рис. 2, и измерителя температуры Center 301. Для обеспечения воспроизводимости теплового контакта использована теплопроводящая кремнийорганическая паста КПП-8 с дополнительным алюминиевым скотчем с теплоизоляцией для закрепления термопары на корпусе исследуемого образца. В течение проведения серии тестов температура корпуса тестируемых изоляторов не превышала диапазон рабочих температур компонента, указанных в табл. 1.

Перед проведением эксперимента по атаке образцов импульсным лазерным излучением с помощью экспериментальной схемы произведена оценка начальных

значений коэффициентов изоляции и вносимых потерь на рабочей длине волны компонента (табл. 1). При помощи измерителя температуры Center 301 зафиксирована начальная температура корпуса образца.

Выполнено включение импульсного лазера на минимальной мощности, а к выходу Б подключен ОИМ 2 (Ophir Orion/TH с датчиком мощности Ophir 3A) для постоянного мониторинга прошедшей через тестируемый изолятор средней мощности импульсного лазера. Продолжительность воздействия на образец от 10 до 20 мин (рис. 2, а). Если изменения коэффициента изоляции не наблюдается за время воздействия, то лазерный диод переключается на выход А для измерения коэффициента вносимых потерь (рис. 2, б). После проведения данного измерения схема возвращается к измерению коэффициента изоляции, а мощность воздействия импульсного лазера увеличивается. Если наблюдается значительное изменение коэффициентов изоляции или вносимых потерь тестируемого компонента, тогда импульсный лазер выключается, а образец оставляется до восстановления к исходным значениям измеряемых коэффициентов и охлаждения до начальной температуры при регистрации нагрева корпуса тестируемого компонента.

Экспериментальные результаты

Для оценки влияния излучения импульсного лазера на тестируемые изоляторы проведена серия экспериментов во всех возможных режимах генерации излучения (табл. 2).

Изменения коэффициентов изоляции и вносимых потерь тестируемых образцов в зависимости от увеличения средней мощности импульсного лазера при каждом исследованном режиме импульсной генерации представлены на рис. 3.

Перед началом серии тестов в одноимпульсном режиме генерации излучения температура корпуса образца 1 составила 23,5 °С. В этом режиме генерации получено снижение коэффициента изоляции на 5 дБ от исходного (табл. 1 и рис. 3, а, линия 1) при средней мощности импульсного излучения 600 и 800 мВт. Коэффициент вносимых потерь при этом незначительно увеличился с 0,2 (рис. 3, б, линия 1) до 0,7 дБ. При указанных значениях средней мощности импульсного излучения температура образца достигла 32,4 °С что не превышает его рабочий диапазон, указан-

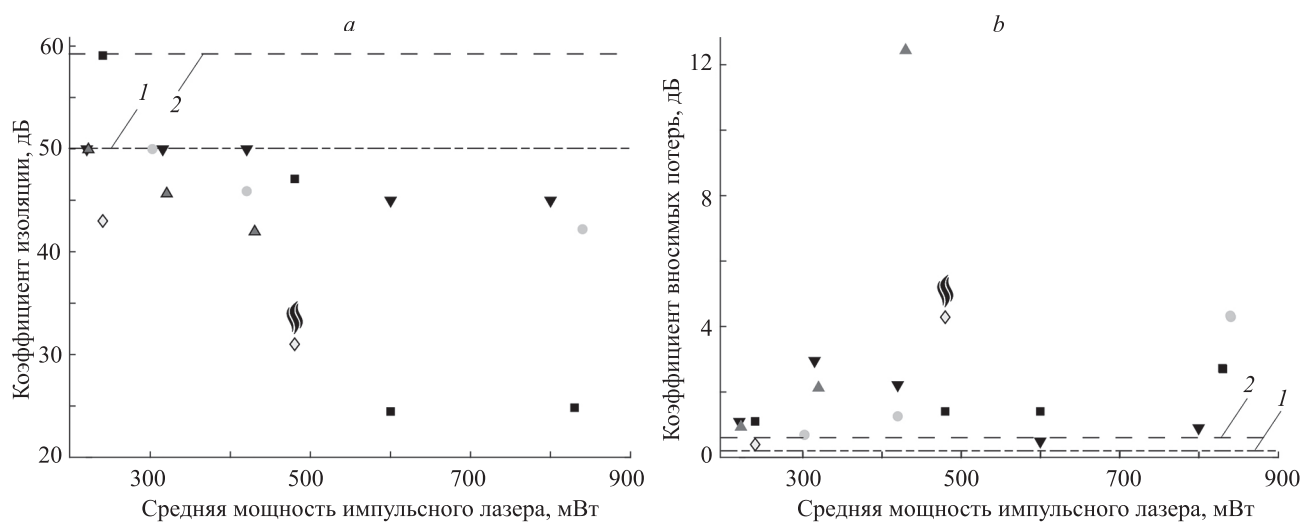


Рис. 3. Зависимость коэффициентов изоляции (a) и вносимых потерь (b) от средней мощности импульсного лазера в тестируемых режимах генерации излучения для образцов 1 и 2.

Обозначения режимов для образца 1: ▼ — одноимпульсный, ● — двухимпульсный, ▲ — трехимпульсный, ◇ — многоимпульсный, ☹ — символ повреждения; для образца 2: ■ — многоимпульсный. Линии 1 и 2 — начальные измеренные значения коэффициентов образцов 1 и 2 соответственно

Fig. 3. Dependence of isolation coefficient and insertion loss coefficient on the mean power of pulsed laser in testing laser modes for samples 1 and 2.

Designation of modes for sample 1: ▼ — one pulse mode, ● — two-pulse mode, ▲ — three-pulse mode, ◇ — multipulse mode, ☹ — damage to sample 1; for sample 2: ■ — multipulse mode. Lines 1 and 2 are the initially measured values of coefficients for sample 1 and sample 2 respectively

ный в табл. 1. После прекращения воздействия импульсного лазера на образец, измеряемые коэффициенты изоляции и вносимых потерь вернулись к исходным значениям.

В двухимпульсном режиме генерации излучения зарегистрировано снижение коэффициента изоляции с 50 до 45,9 дБ и увеличение коэффициента вносимых потерь с 0,2 до 1,2 дБ при средней мощности импульсного лазера 420 мВт. При дальнейшем увеличении средней мощности импульсного лазера до 840 мВт коэффициент изоляции снизился до 42,2 дБ, а коэффициентов вносимых потерь увеличился до 4,2 дБ. Температура корпуса образца 1 при воздействии импульсного лазера со средней мощностью 840 мВт достигла 46 °С (перед началом эксперимента зарегистрирована температура образца 24,4 °С). После прекращения воздействия импульсного лазера на тестируемый изолятор и его охлаждения до

начальной температуры, измеряемые коэффициенты восстановились к исходным значениям.

В режиме трехимпульсной генерации излучения достигнуто максимальное увеличение коэффициента вносимых потерь до 12,3 дБ при средней мощности импульсного лазера 430 мВт (рис. 3, b). При этом коэффициент изоляции снизился на 8 дБ от исходного значения (рис. 3, a). Начальная температура корпуса образца в этой серии тестов 24,7 °С, а на протяжении всей серии не превышала 30 °С. Коэффициенты изоляции и вносимых потерь образца 1 вернулись к исходным значениям после прекращения воздействия импульсного лазера, однако на восстановление потребовалось дополнительное время после возвращения образца к начальной температуре.

Результаты серии тестов в многоимпульсном режиме генерации излучения импульсного лазера приве-

Таблица 3. Результаты серии тестов многоимпульсного режима работы лазера

Table 3. Testing results in multi-pulse laser mode

Минимальное достигнутое значение коэффициента изоляции, дБ		Средняя выходная мощность лазера, мВт	Энергия импульса, нДж	Температура корпуса образца 2, °С
образец 1	образец 2			
Не изменился	Не изменился	240	15	25,6
31 (образец не восстановился)	47,1	480	25,5	24,1
—	24,8	600	37,5	33,1
—	24,8	830	51,8	38,1

дены в табл. 3. Образец 1 был необратимо поврежден в этом режиме при средней мощности импульсного лазера 480 мВт, что отмечено специальным символом на рис. 3. При этом воздействии коэффициент изоляции мгновенно снизился до 31 дБ, а вносимых потерь увеличился до 4,3 дБ, и эксперимент был остановлен. Температура корпуса образца 1 в течение воздействия не изменялась и составляла 24,2 °С. После прекращения воздействия импульсного лазера образец 1 оказался окончательно поврежден — его коэффициенты изоляции и вносимых потерь не восстановились к своим исходным значениям. По окончании серии тестов коэффициент изоляции образца 1 составил 38,7 дБ (исходное измеренное значение 50 дБ), а вносимых потерь увеличился до 4,1 дБ (исходное измеренное значение 0,2 дБ).

Чтобы достоверно оценить влияние многоимпульсного режима и исключить влияние предыдущих режимов работы импульсного лазера на компонент, тест был повторен с идентичным изолятором (образец 2 в табл. 1) в многоимпульсном режиме работы лазера с частотой следования цуга импульсов 16 МГц. Изменение коэффициентов изоляции и вносимых потерь образца 2 в этом режиме генерации излучения в зависимости от средней мощности импульсного лазера показано на рис. 3. Получено снижение коэффициента изоляции с 59,1 до 24,8 дБ при средней мощности 600 и 830 мВт. Увеличение коэффициентов вносимых потерь при этом составило с 0,6 до 1,4 и 2,7 дБ соответственно.

С целью обнаружения механических или термических повреждений после эксперимента с оптического изолятора 1 был демонтирован внешний корпус. На рис. 4, *a* представлена фотография внутренней конфигурации образца 1 без корпуса. Детальное рассмотрение образца 1 показало, что отсутствуют признаки, характерные для термического повреждения при воздействии мощным непрерывным лазером, полученные в [14] (стрелки на рис. 4, *b*). Признаки термического повреждения: обугливание торцевой части изолятора и оболочки волокна, а также деформация волокна со стороны ввода лазерного излучения. Сделать точный вывод о механизме повреждения исследованных об-

разцов 1 и 2 после воздействия импульсного лазера будет возможно только после микроскопического анализа внутренних оптических элементов волоконных изоляторов.

Обсуждение

Изолятор можно считать успешно взломанным, если происходит снижение коэффициента изоляции, без существенного роста коэффициента вносимых потерь. Если коэффициент вносимых потерь увеличен в большей степени, чем снижен коэффициент изоляции, то такой исход благоприятен для безопасности системы КРК, так как результирующие потери для излучения злоумышленника вырастут.

В результате исследования воздействия мощного импульсного лазера с длиной волны 1064 нм на волоконный изолятор, предназначенный для защиты систем КРК с рабочим спектральным диапазоном около 1550 нм, обнаружены два эффекта, ставящие под угрозу секретность генерации ключа: существенное снижение коэффициента изоляции на рабочей длине волны системы с 59,1 до 24,7 дБ без значительного увеличения коэффициента вносимых потерь; высокие значения прошедшей через компонент мощности импульсного лазерного излучения (затухание импульсного лазерного излучения составляет около 12 дБ (рис. 1, *b*)).

Значение коэффициента изоляции на выходе источника КРК играет ключевую роль при доказательстве безопасности генерации ключа в случае атаки троянским конем. В частности, согласно работе [10] значение коэффициента изоляции на выходе источника жестко определяет границы безопасной скорости генерации ключа и дальности передачи ключа при атаке троянским конем. В результате снижения коэффициента изоляции на 30 дБ число обратно-отраженных фотонов злоумышленника на выходе из источника увеличится в 1000 раз, и в случае, если злоумышленник останется незамеченным, он сможет получить избыточную информацию о ключе. Таким образом, система не сможет гарантировать секретность сгенерированного ключа. Например, для протокола BB84 максимальная гаранти-

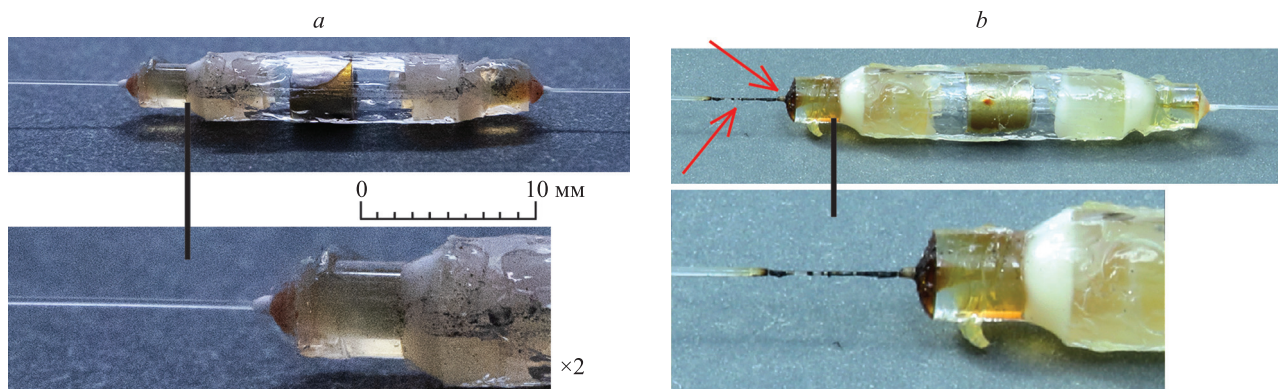


Рис. 4. Сравнение поврежденных изоляторов образца 1, подверженного атаке импульсным (*a*) и непрерывным лазерами [14] (*b*). На выносках увеличено показаны сравниваемые участки

Fig. 4. Comparison of damaged isolators: Sample 1 damaged by pulsed (*a*) and continuous wave lasers [14] (*b*). The compared areas are shown in the figure enlarged

рованная безопасная дистанция при увеличении количества обратно-отраженных фотонов злоумышленника на выходе из источника с 10^{-6} до 10^{-3} при одинаковой скорости генерации ключа (10^{-3} бит/такт) сократится от 100 км до 50–52 км.

Перспективными кандидатами для защиты источника системы КРК от воздействия мощным импульсным лазерным излучением, рассмотренным в работе, могут выступать следующие волоконные компоненты [5, 12]:

- оптический предохранитель — устройство, которое либо разрушается, либо резко ограничивает передаваемый сигнал в случае, когда значение передаваемой в системе КРК мощности превышает заданное пороговое значение;
- узкополосный фильтр — компонент, который будет пропускать только рабочий диапазон длин волн системы КРК, а более длинные или короткие волны будут поглощаться;
- детектор для мониторинга мощности — устройство, которое позволит контролировать уровень мощности в системе КРК, а при наличии изменений в уровне передаваемого сигнала подаст сигнал.

Предлагаемые защитные компоненты должны быть протестированы на устойчивость к воздействию импульсным лазерным излучением. Оценка их устой-

чивости необходима для предотвращения появления побочных каналов в системе КРК.

Заключение

В работе продемонстрировано, что атака на волоконные изоляторы импульсным лазерным излучением с длиной волны, лежащей в диапазоне прозрачности изолятора (1064 нм), способна привести к появлению уязвимостей в системах квантового распределения ключей, с помощью которых злоумышленник может перехватить секретную информацию и остаться незамеченным. Показано, что получить уязвимость в системе квантового распределения ключей с применением атаки лазерным повреждением возможно не только правильно подобрав энергетические и временные характеристики лазерного излучения, но и его спектральный состав. В связи с чем системы квантового распределения ключей требуют дополнительного уровня защиты в виде компонента, который будет ограничивать спектральный состав проходящего в системе квантового распределения ключей излучения. Дальнейшее направление исследования заключается в определении точного механизма повреждения волоконного изолятора с применением макроскопического анализа его внутренних компонентов и разработке дополнительных контрмер.

Литература

1. Bennett C.H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // *Theoretical Computer Science*. 2014. V. 560. Part 1. P. 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2014.05.025>
2. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J., Dušek M., Lütkenhaus N., Peev M. The security of practical quantum key distribution // *Reviews of Modern Physics*. 2009. V. 81. N 3. P. 1301–1350. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301>
3. Lo H.-K., Curty M., Tamaki K. Secure quantum key distribution // *Nature Photonics*. 2014. V. 8. N 8. P. 595–604. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.149>
4. Wiechers C., Lydersen L., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Marquardt C., Makarov V., Leuchs G. After-gate attack on a quantum cryptosystem // *New Journal of Physics*. 2011. V. 13. N 1. P. 013043. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/1/013043>
5. Bugge A.N., Sauge S., Ghazali A.M.M., Skaar J., Lydersen L., Makarov V. Laser damage helps the eavesdropper in quantum cryptography // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112. N 7. P. 070503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.070503>
6. Pang X.-L., Yang A.-L., Zhang C.-N., Dou J.-P., Li H., Gao J., Jin X.-M. Hacking quantum key distribution via injection locking // *Physical Review Applied*. 2020. V. 13. N 3. P. 034008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034008>
7. Sun S.-H., Xu F., Jiang M.-S., Ma X.-C., Lo H.-K., Liang L.-M. Effect of source tampering in the security of quantum cryptography // *Physical Review A*. 2015. V. 92. N 2. P. 022304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.022304>
8. Jain N., Anisimova E., Khan I., Makarov V., Marquardt C., Leuchs G. Trojan-horse attacks threaten the security of practical quantum cryptography // *New Journal of Physics*. 2014. V. 16. N 12. P. 123030. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/12/123030>
9. Huang A., Navarrete Á., Sun S.-H., Chaiwongkhot P., Curty M., Makarov V. Laser-seeding attack in quantum key distribution // *Physical Review Applied*. 2019. V. 12. N 6. P. 064043. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.064043>
10. Lucamarini M., Choi I., Ward M.B., Dynes J.F., Yuan Z.L., Shields A.J. Practical security bounds against the trojan-horse attack in quantum key distribution // *Physical Review X*. 2015. V. 5. N 3. P. 031030. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.031030>

References

1. Bennett C.H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Theoretical Computer Science*, 2014, vol. 560, part 1, pp. 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2014.05.025>
2. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J., Dušek M., Lütkenhaus N., Peev M. The security of practical quantum key distribution. *Reviews of Modern Physics*, 2009, vol. 81, no. 3, pp. 1301–1350. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301>
3. Lo H.-K., Curty M., Tamaki K. Secure quantum key distribution. *Nature Photonics*, 2014, vol. 8, no. 8, pp. 595–604. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.149>
4. Wiechers C., Lydersen L., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Marquardt C., Makarov V., Leuchs G. After-gate attack on a quantum cryptosystem. *New Journal of Physics*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 013043. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/1/013043>
5. Bugge A.N., Sauge S., Ghazali A.M.M., Skaar J., Lydersen L., Makarov V. Laser damage helps the eavesdropper in quantum cryptography. *Physical Review Letters*, 2014, vol. 112, no. 7, pp. 070503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.070503>
6. Pang X.-L., Yang A.-L., Zhang C.-N., Dou J.-P., Li H., Gao J., Jin X.-M. Hacking quantum key distribution via injection locking. *Physical Review Applied*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 034008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034008>
7. Sun S.-H., Xu F., Jiang M.-S., Ma X.-C., Lo H.-K., Liang L.-M. Effect of source tampering in the security of quantum cryptography. *Physical Review A*, 2015, vol. 92, no. 2, pp. 022304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.022304>
8. Jain N., Anisimova E., Khan I., Makarov V., Marquardt C., Leuchs G. Trojan-horse attacks threaten the security of practical quantum cryptography. *New Journal of Physics*, 2014, vol. 16, no. 12, pp. 123030. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/12/123030>
9. Huang A., Navarrete Á., Sun S.-H., Chaiwongkhot P., Curty M., Makarov V. Laser-seeding attack in quantum key distribution. *Physical Review Applied*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 064043. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.064043>
10. Lucamarini M., Choi I., Ward M.B., Dynes J.F., Yuan Z.L., Shields A.J. Practical security bounds against the trojan-horse attack in quantum key distribution. *Physical Review X*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 031030. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.031030>

11. Tan H., Li W., Zhang L., Wei K., Xu F. Chip-based quantum key distribution against trojan-horse attack // *Physical Review Applied*. 2021. V. 15. N 6. P. 064038. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.064038>
12. Makarov V., Bourgoïn J.-P., Chaiwongkhot P., Gagné M., Jennewein T., Kaiser S., Kashyap R., Legré M., Minshull C., Sajeed S. Creation of backdoors in quantum communications via laser damage // *Physical Review A*. 2016. V. 94. N 3. P. 030302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.030302>
13. Huang A., Li R., Egorov V., Tchouragoulov S., Kumar K., Makarov V. Laser-damage attack against optical attenuators in quantum key distribution // *Physical Review Applied*. 2020. V. 13. N 3. P. 034017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034017>
14. Ponosova A., Ruzhitskaya D., Chaiwongkhot P., Egorov V., Makarov V., Huang A. Isolation reduction of quantum cryptography systems induced by continuous-wave high-power laser [Электронный ресурс]. URL: <http://qutes.org/wp-content/uploads/2020/02/PonosovaAA.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.10.2021).
15. Ruzhitskaya D., Ponosova A., Jöhlinger F., Chaiwongkhot P., Egorov V., Aktas D., Rarity J.G., Erven C., Makarov V., Huang A. Protecting QKD sources against light-injection attacks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vad1.com/publications/ruzhitskaya2020.QCrypt-subm43.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.10.2021).
16. Wood R.M. *Laser-Induced Damage of Optical Materials*. CRC Press, 2003. 241 p.
17. Vojna D., Slezák O., Lucianetti A., Mocek T. Verdet constant of magneto-active materials developed for high-power Faraday devices // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. N 15. P. 3160. <https://doi.org/10.3390/app9153160>
18. Hui R., O'Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Academic Press, 2009. 672 p.
19. Smith A.V., Do B.T. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm // *Applied Optics*. 2008. V. 47. N 26. P. 4812–4832. <https://doi.org/10.1364/AO.47.004812>
20. Hadley G.R. High-power pulse propagation in optical fibers // *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*. 2008. P. 4528567. <https://doi.org/10.1109/OFC.2008.4528567>
21. Lemaignère L., Gaudfrin K., Donval T., Natoli J., Sajer J.-M., Penninckx D., Courchinoux R., Diaz R. Laser-induced damage of fused silica optics at 355 nm due to backward stimulated Brillouin scattering: experimental and theoretical results // *Optics Express*. 2018. V. 26. N 9. P. 11744–11755. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011744>
22. Smith A.V., Do B.T., Hadley G.R., Farrow R.L. Optical damage limits to pulse energy from fibers // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2009. V. 15. N 1. P. 153–159. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.2010331>
23. Zhluktova I.V., Filatova S.A., Trikshev A.I., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B. All-fiber 1125 nm spectrally selected subnanosecond source // *Applied Optics*. 2020. V. 59. N 29. P. 9081–9086. <https://doi.org/10.1364/AO.401668>
11. Tan H., Li W., Zhang L., Wei K., Xu F. Chip-based quantum key distribution against trojan-horse attack. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 064038. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.064038>
12. Makarov V., Bourgoïn J.-P., Chaiwongkhot P., Gagné M., Jennewein T., Kaiser S., Kashyap R., Legré M., Minshull C., Sajeed S. Creation of backdoors in quantum communications via laser damage. *Physical Review A*, 2016, vol. 94, no. 3, pp. 030302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.030302>
13. Huang A., Li R., Egorov V., Tchouragoulov S., Kumar K., Makarov V. Laser-damage attack against optical attenuators in quantum key distribution. *Physical Review Applied*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 034017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034017>
14. Ponosova A., Ruzhitskaya D., Chaiwongkhot P., Egorov V., Makarov V., Huang A. *Isolation reduction of quantum cryptography systems induced by continuous-wave high-power laser*. Available at: <http://qutes.org/wp-content/uploads/2020/02/PonosovaAA.pdf> (accessed: 20.10.2021).
15. Ruzhitskaya D., Ponosova A., Jöhlinger F., Chaiwongkhot P., Egorov V., Aktas D., Rarity J.G., Erven C., Makarov V., Huang A. *Protecting QKD sources against light-injection attacks*. Available at: <http://www.vad1.com/publications/ruzhitskaya2020.QCrypt-subm43.pdf> (accessed: 20.10.2021).
16. Wood R.M. *Laser-Induced Damage of Optical Materials*. CRC Press, 2003, 241 p.
17. Vojna D., Slezák O., Lucianetti A., Mocek T. Verdet constant of magneto-active materials developed for high-power Faraday devices. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 15, pp. 3160. <https://doi.org/10.3390/app9153160>
18. Hui R., O'Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Academic Press, 2009, 672 p.
19. Smith A.V., Do B.T. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 26, pp. 4812–4832. <https://doi.org/10.1364/AO.47.004812>
20. Hadley G.R. High-power pulse propagation in optical fibers. *OFC/NFOEC 2008 — 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008, pp. 4528567. <https://doi.org/10.1109/OFC.2008.4528567>
21. Lemaignère L., Gaudfrin K., Donval T., Natoli J., Sajer J.-M., Penninckx D., Courchinoux R., Diaz R. Laser-induced damage of fused silica optics at 355 nm due to backward stimulated Brillouin scattering: experimental and theoretical results. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 9, pp. 11744–11755. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011744>
22. Smith A.V., Do B.T., Hadley G.R., Farrow R.L. Optical damage limits to pulse energy from fibers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.2010331>
23. Zhluktova I.V., Filatova S.A., Trikshev A.I., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B. All-fiber 1125 nm spectrally selected subnanosecond source. *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 29, pp. 9081–9086. <https://doi.org/10.1364/AO.401668>

Авторы

Ружицкая Дарья Дмитриевна — младший научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6545-4298>, dariaruzh@yandex.ru
Жлуктова Ирина Вадимовна — младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация; научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5619-011X>, iv.zhluktova@gmail.com

Петров Михаил Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7218-7693>, petrov-ma@yandex.ru

Зайцев Константин Александрович — научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5928-770X>, Zaitsev20k@gmail.com

Authors

Daria D. Ruzhitskaya — Junior Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6545-4298>, dariaruzh@yandex.ru

Irina V. Zhluktova — Junior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Scientific Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5619-011X>, iv.zhluktova@gmail.com

Mikhail A. Petrov — PhD, Senior Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7218-7693>, petrov-ma@yandex.ru

Konstantin A. Zaitsev — Scientific Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5928-770X>, Zaitsev20k@gmail.com

Ачева Полина Павловна — лаборант, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7920-0483>, Achevap17@yandex.ru

Зуников Николай Алексеевич — лаборант, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8759-2082>, zunikov.na@phystech.edu

Шилько Алексей Вячеславович — младший научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3188-1192>, AlexeyShilko_1996@list.ru

Актас Джейлан — кандидат физических наук, старший научный сотрудник, Университет Бристоля, Бристоль, BS8 1QU, Великобритания, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0586>, djeylan.aktas@bristol.ac.uk

Джоллингер Фридерика — научный сотрудник, Университет Бристоля, Бристоль, BS8 1QU, Великобритания, <https://orcid.org/0000-0003-0644-8319>, friederike.johlinger@bristol.ac.uk

Трефилов Даниил Олегович — младший научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3003-7221>, trefdanil@gmail.com

Поносова Анастасия Александровна — научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2727-5939>, nastyaleksi@mail.ru

Камынин Владимир Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация; научный сотрудник, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>, kamyninva@gmail.com

Макаров Вадим Викторович — кандидат физико-математических наук, профессор, профессор, Российский квантовый центр, Москва, 121205, Российская Федерация; профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119049, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4341-7837>, makarov@vad1.com

Polina P. Acheva — Laboratory Assistant, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7920-0483>, Achevap17@yandex.ru

Nikolay A. Zunikov — Laboratory Assistant, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8759-2082>, zunikov.na@phystech.edu

Aleksei V. Shilko — Junior Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3188-1192>, AlexeyShilko_1996@list.ru

Djeylan Aktas — PhD, Senior Post-Doctoral Research Associate, University of Bristol, Bristol, BS8 1QU, United Kingdom, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0586>, djeylan.aktas@bristol.ac.uk

Friederike Johlinger — Researcher, University of Bristol, Bristol, BS8 1QU, United Kingdom, <https://orcid.org/0000-0003-0644-8319>, friederike.johlinger@bristol.ac.uk

Daniil O. Trefilov — Junior Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3003-7221>, trefdanil@gmail.com

Anastasiya A. Ponosova — Scientific Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2727-5939>, nastyaleksi@mail.ru

Vladimir A. Kamynin — PhD, Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Scientific Researcher, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>, kamyninva@gmail.com

Vadim V. Makarov — PhD, Full Professor, Russian Quantum Center, Moscow, 121205, Russian Federation; Professor, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, 119049, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4341-7837>, makarov@vad1.com

*Статья поступила в редакцию 28.10.2021
Одобрена после рецензирования 10.11.2021
Принята к печати 30.11.2021*

*Received 28.10.2021
Approved after reviewing 10.11.2021
Accepted 30.11.2021*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»