



Источники одиночных фотонов. Обзор

Часть 1

В. Г. Криштоп

- ¹ Институт проблем технологий микроэлектроники РАН,
г. Черноголовка, Моск. обл.
² АО «ИнфоТeCS», Москва.
³ Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный, Моск. обл.

В обзоре рассмотрены различные способы создания однофотонных источников (ИОФ). Задача генерации одиночных фотонов может решаться разными способами, и на текущий момент среди них нет такого, который был бы существенно предпочтителен. Обширный список литературы дает возможность провести анализ перспектив развития источников одиночных фотонов.

Ключевые слова: однофотонный источник (ИОФ), кубиты, группировка и антигруппировка фотонов, квантовое распределение ключей (КРК), расщепление по числу фотонов, состояния-«ловушки», основные платформы для изготовления ИОФ

Статья получена: 01.08.2024
Статья принята: 16.08.2024

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области способов генерации одиночных фотонов привели к существенному развитию методов манипулирования квантовыми объектами, к более глубокому пониманию квантовой физики и, кроме того, увенчались заметным количеством нобелевских премий. Результаты этих исследований используются на практике в экспериментальной и прикладной физике, в некоторых областях химии и биологии, а также в приборостроении и криптографии.

В первой части обзора обсуждаются необходимые и желательные требования к однофотонным источникам и критерии характеризации источников. А затем максимально широко, но относи-

Single-Photon Sources. Review

Part 1

V. G. Krishtop

¹ Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, Chernogolovka, Moscow region.

² JSC "InfoTeCS", Moscow.

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region.

The review discusses various ways to create single-photon sources (SPS). The task of generating single photons can be solved in various ways, and at the moment there is no one among them that would be significantly preferable. An extensive list of literature makes it possible to analyze the prospects for the development of single-photon sources.

Keywords: single-photon source (SPS), qubits, bunching and antibunching, QKD – quantum key distribution, decoy states, photon number splitting, the main platforms for the manufacture of SPS

The article received on: 01.08.2024

The article accepted on: 16.08.2024

INTRODUCTION

Research in the field of single photon generation methods has led to significant development of methods for manipulating quantum objects, to a deeper understanding of quantum physics, and in addition, has yielded in a significant number of Nobel prizes. The results of these studies are being implemented both in experimental and applied physics, in some fields of chemistry and biology, as well as in instrumentation and cryptography.

The first part of the review discusses the necessary and desirable requirements for single-photon sources and criteria for characterizing sources. And then, as broadly as possible, but relatively briefly, scientific articles on the development of single-photon sources in various ways are reviewed. The first part of the review includes single-photon sources based on single ions and based on single atoms.

The second and third parts reviews SPS on quantum dots, on color centers in crystals, on carbon nanotubes



тельно кратко обозреваются работы по созданию однофотонных источников различными способами. В первую часть обзора вошли источники одиночных фотонов на основе одиночных ионов и на основе одиночных атомов.

Во второй и третьей части будут рассмотрены ИОФ на квантовых точках, на центрах окраски в кристаллах, на улеродных нанотрубках и дефектах в них, на нанокристаллах и слоистых нанокристаллах, на одиночных молекулах, в низкоразмерных структурах и ионах металлов в полимерной матрице, а также ансамблевые системы, и источники на нелинейных кристаллах.

Обзор предназначен для широкого круга читателей, имеющих базовые знания в области квантовой физики, и желающих получить представление о состоянии данной области. Использованы материалы нескольких англоязычных обзоров. Отдельную ценность представляет обширный список литературы, от которого можно отталкиваться, приступая к изучению требуемых разделов.

ЗАЧЕМ НУЖНЫ ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ [1]

Однофотонные источники используются в квантовой криптографии для создания систем квантового распределения ключей (системы КРК). Используя однофотонные состояния, можно гарантировать конфиденциальность коммуникации и обнаружение любых попыток вмешательства.

Однофотонные источники предоставляют возможность создавать и манипулировать отдельными квантовыми битами (кубитами). Это необходимо для разработки квантовых компьютеров и других устройств, способных выполнять квантовые вычисления. Предполагается, что вычислительная мощность квантовых вычислителей в целом ряде специфических задач будет значительно выше, чем имеющиеся на данный момент классические вычислительные мощности даже самых мощных имеющихся сейчас суперкомпьютеров (квантовая угроза).

Кроме того, однофотонные источники используются для проведения фундаментальных физических экспериментов, направленных на проверку и изучение основных принципов квантовой физики. Также однофотонные источники нашли применение в квантовых сенсорах и в медицине.

В идеале источником одиночного фотона может служить любая одиночная квантовая частица – атом, молекула, ион, квантовая точка и т. д., спо-

собами. В первую часть обзора вошли источники одиночных фотонов на основе одиночных ионов и на основе одиночных атомов.

The review is intended for a wide range of readers who have basic knowledge in the field of quantum physics and want to get an idea of the state of research and development in the field of SPS. Materials from several previous reviews were used. An extensive list of literature is of particular value, which one can rely on when proceeding to studies of the required sections.

WHAT SINGLE-PHOTON SOURCES ARE INTENDED FOR [1]

Single-photon sources are used in quantum cryptography to create quantum key distribution systems (QKD systems). Using single-photon states, it is possible to guarantee the confidentiality of communication and the detection of any interference attempts.

Single-photon sources provide the ability to create and manipulate individual quantum bits (qubits). This is necessary for the development of quantum computers and other devices capable of performing quantum computing. It is assumed that the computer performance of quantum computers in a number of specific tasks will be significantly higher than the currently available classical computer performance of even the most powerful supercomputers currently available (Quantum Threat).

Besides, single-photon sources are used to conduct fundamental physical experiments aimed at verifying and studying the basic principles of quantum physics. Single-photon sources have also found application in quantum sensors and medicine.

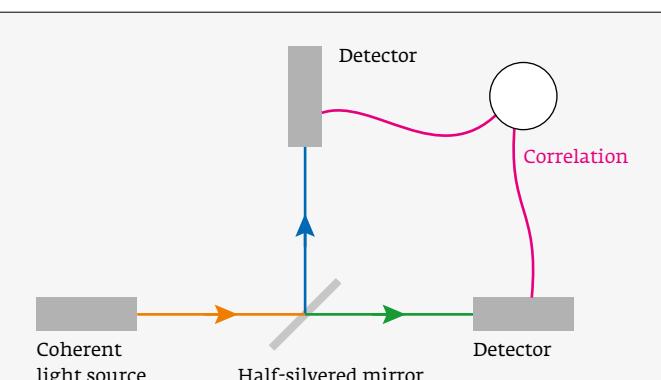


Рис. 1. Схема Хэнбери Брауна и Твисса для подтверждения одиночности источника [4]

Fig.1. The Hanbury Brown and Twiss scheme for confirming photon singleness of the source [4]

собная поглощать и излучать光子 в узкой полосе оптических частот. Основной проблемой на этом пути является повышение эффективности сбора однофотонного излучения. Также необходима разработка простых методов электрического управления испусканием одиночного фотона [2].

Соответственно, для реализации однофотонного источника требуется организовать относительно изолированную стабильную квантовую систему, имеющую атомоподобную структуру энергетических уровней и разрешенный излучательный переход между ними, обеспечить ее контролируемое (электрическое или оптическое) возбуждение и последующую излучательную релаксацию из возбужденного состояния, и затем суметь эффективно собрать и перенаправить получившееся однофотонное излучение.

В идеальном случае источник квантовых состояний должен одновременно обеспечивать истинно однофотонную статистику, быть детерминированным, быстрым и работающим вне лабораторных условий.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА $g^{(2)}(\tau)$

Для характеристики источников фотонов применяется интерферометр Хэнбери Брауна-Твисса (ХБТ-интерферометра).

Однофотонное излучение с выхода системы КРК подается на симметричный волоконный делитель, к каждому из выходов которого подключены одинаковые детекторы однофотонные детекторы. Показания детекторов обрабатываются системой измерения временных интервалов (схема корреляций). Так как фотон не может поглотиться на двух приемниках одновременно, то он детектируется только одним из приемников с вероятностью, определяемой квантовой эффективностью приемника.

Таким образом, при наличии идеального однофотонного излучения на выходе системы КРК, детекторы регистрировали бы испускаемые одиночные фотонны строго по одиночке, но никогда не срабатывали бы синхронно. В случае, если источник не идеален, и испускает в том числе многофотонные импульсы, существует вероятность, что одна часть фотонов этого импульса будет детектирована первым детектором, а другая часть – одновременно вторым детектором, вследствие чего приемники будут срабатывать синхронно.

Чем ближе источник одиночных фотонов к идеальному, чем ниже доля многофотонных импульсов, тем реже будут происходить

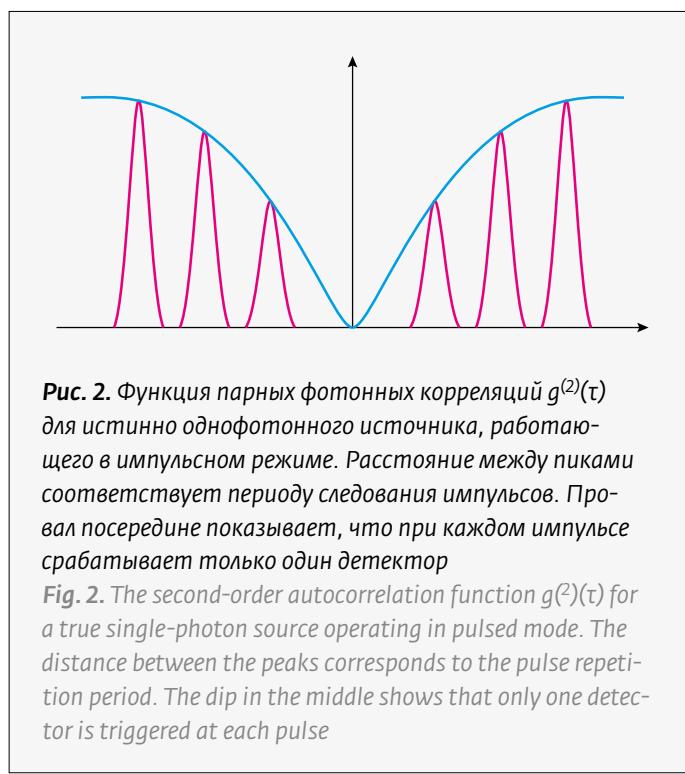


Рис. 2. Функция парных фотонных корреляций $g^{(2)}(t)$ для истинно однофотонного источника, работающего в импульсном режиме. Расстояние между пиками соответствует периоду следования импульсов. Провал посередине показывает, что при каждом импульсе срабатывает только один детектор

Fig. 2. The second-order autocorrelation function $g^{(2)}(t)$ for a true single-photon source operating in pulsed mode. The distance between the peaks corresponds to the pulse repetition period. The dip in the middle shows that only one detector is triggered at each pulse

Ideally, any single quantum particle – an atom, molecule, ion, quantum dot, etc., capable of absorbing and emitting photons in a narrow band of optical frequencies – can serve as a single-photon source. The main problem is to increase the efficiency of collecting single-photon radiation. It is also necessary to develop simple methods of electrical control of the single photon emission [2].

Accordingly, to implement a single-photon source, it is necessary to organize a relatively isolated stable quantum system having an atom-like energy structure and a permitted radiative transition between energy levels, to ensure its controlled (electrical or optical) excitation and subsequent radiative relaxation from the excited state, and then be able to effectively collect and redirect the resulting single-photon radiation.

Ideally, the source of quantum states should simultaneously provide true single-photon statistics, be deterministic, fast, and must work outside laboratory conditions.

THE SECOND-ORDER CORRELATION FUNCTION $g^{(2)}(\tau)$

The Hanbury Brown-Twiss interferometer (HBT interferometer) is used to characterize photon sources.

Single-photon radiation from the output of the QKD system is fed to a symmetrical fiber-optic splitter. Identical single-photon detectors are connected to each



синхронные срабатывания фотоприемников ХБТ-интерферометра.

При помощи измерителя временных интервалов строится взаимная корреляционная функция срабатываний фотодетекторов $g^{(2)}(\tau)$ (в англоязычной литературе – Grangier parameter, second-order Glauber autocorrelation function). Функция $g^{(2)}(\tau)$ показывает, с какой вероятностью фотон будет детектирован вторым детектором через интервал времени τ после срабатывания первого детектора. Значение автокорреляционной функции второго порядка $g^{(2)}(\tau)$ в нулевой момент времени характеризует «степень однофотонности» сигнала.

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle^2}.$$

По форме $g^{(2)}(\tau)$ можно судить о статистике источника [3, 4].

Итак, для подтверждения однофотонного режима источника одиночных фотонов измеряется корреляционная функция второго порядка $g^{(2)}(\tau)$. Именно результаты экспериментального измерения $g^{(2)}(\tau)$ приводят ученые в научных статьях в качестве доказательства однофотонности исследуемых источников. Для истинного однофотонного источника $g^{(2)}(0)=0$, для реальных источников значение $g^{(2)}(0)$ менее 1/2 считается

of the outputs of the splitter. The detector readings are processed by a time interval measurement system (correlation scheme). Since a single photon cannot be absorbed by two detectors at the same time, it is detected by only one of the detectors with a probability determined by the quantum efficiency of the detector.

Thus, in the presence of ideal single-photon radiation at the output of the QKD system, the detectors would register the emitted single photons strictly singly, but would never be triggered synchronously. If the source is not ideal, and emits multiphoton pulses, among other things, there is a possibility that the first detector will detect one part of the photons of this pulse, and the second detector will detect the other part simultaneously. As a result, the detectors will be triggered synchronously.

The closer the single-photon source is to the ideal one, the lower the proportion of multiphoton pulses, the less likely synchronous triggering of the HBT interferometer photodetectors will occur.

Using a time interval meter, Grangier parameter, or second-order Glauber autocorrelation function $g^{(2)}(\tau)$ is constructed. The function $g^{(2)}(\tau)$ shows with what probability the photon will be detected by the second detector in the time interval τ after the first detector is triggered. The value of the second-order autocorrelation function $g^{(2)}(\tau)$ at zero time characterizes the “single-photon quality” of the signal.

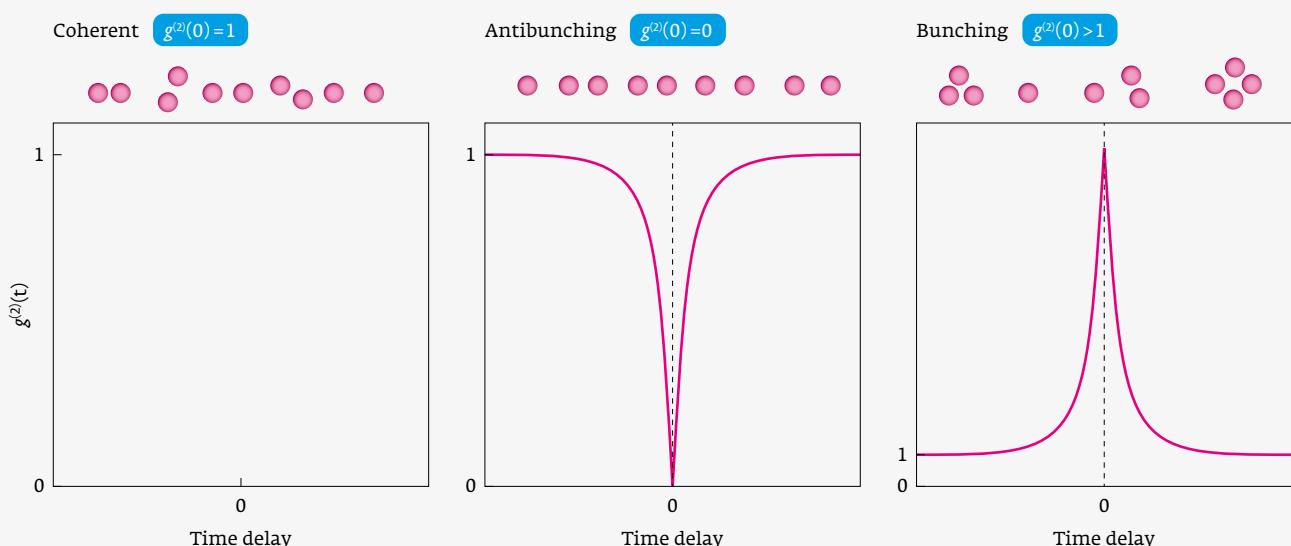


Рис. 3. Когерентный источник (ослабленный лазер), однофотонный источник, и источник с группировкой фотонов (Delmic Blog)
Fig.3. A coherent source (attenuated laser), a single-photon source, and a source with bunching of photons (Delmic Blog)



достаточным подтверждением режима однофотонности. В реальных экспериментах уже были продемонстрированы достаточно малые значения значения $g^{(2)}(0)$, вплоть до 7.5×10^{-5} [5].

ГРУППИРОВКА, АНТИГРУППИРОВКА И КОГЕРЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК

Ослабленный лазер является когерентным источником и имеет пуассоновское распределение вероятностей $P(n)$ излучения n фотонов в ослабленном оптическом импульсе.

Значение $g^{(2)}(0)$ для источника с пуассоновской статистикой равно единице $g^{(2)}(0)=1$ (группировка фотонов отсутствует). Если излучение имеет субпуассоновскую статистику, то $g^{(2)}(0)<1$, если суперпуассоновскую, то $g^{(2)}(0)>1$.

Источники одиночных фотонов демонстрируют антигруппировку. Для истинного однофотонного источника $g^{(2)}(0)=0$. В квантовой криптографии желательна именно антигруппировка (antibunching) фотонов. Поскольку электроны испускаются по одному, вероятность одновременного наблюдения двух фотонов для идеального источника равна 0. Источник фотонов является антигруппированным, если $g^{(2)}(0) < g^{(2)}(\tau)$ [6].

При разработке и реализации протоколов КРК необходимо учитывать специфику когерентных состояний [7].

Группировка фотонов может возникать в источниках с резонаторами, когда время жизни фотона в резонаторе сопоставимо с периодом следования импульсов.

Производя измерение вероятностей, входящих в выражение корреляционной функции, можно оценить значение корреляционной функции и показать, насколько верна гипотеза о пуассоновской статистике.

ОСЛАБЛЕННЫЙ ЛАЗЕР КАК ИСТОЧНИК ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ КРК

Существующие однофотонные системы КРК в подавляющем большинстве используют псевдооднофотонный источник на основе ослабленного лазера [8]. Как правило, в системах КРК интенсивность лазера ослабляется до такой степени, что в среднем в каждом импульсе содержится менее одного фотона. В качестве аттенюатора часто применяется толстая кремниевая пластинка и вместе с ней управляемый аттенюатор для точной подстройки. Также иногда применяются микромеханические управляемые зеркала, вмонтированные в разрыв оптоволокна, которые перенаправляют излучение полностью или частично.

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle^2}.$$

The form $g^{(2)}(\tau)$ can be used to characterize the statistics of the source [3, 4].

So, to confirm the single-photon mode of a source, the second-order Glauber autocorrelation function $g^{(2)}(\tau)$ is measured. It is the results of the experimental measurement of $g^{(2)}(\tau)$ that scientists show in scientific articles as proof of the single-photon nature of the sources under study. For a true single-photon source, $g^{(2)}(0)=0$, for real sources, a value of $g^{(2)}(0)$ less than 1/2 is considered sufficient confirmation of the single-photon mode. Real experiments have demonstrated very small values of the $g^{(2)}(0)$ value, up to 7.5×10^{-5} [5].

BUNCHING, ANTIBUNCHING AND COHERENT SOURCE

The attenuated laser (faint laser, weak laser) is a coherent source and has a Poisson probability distribution $P(n)$ of emission of n photons in an attenuated optical pulse.

The value of $g^{(2)}(0)$ for a source with Poisson distribution is equal to one $g^{(2)}(0)=1$ (there is no bunching of photons). If the radiation has sub-Poisson statistics, then $g^{(2)}(0)<1$, if super-Poisson, then $g^{(2)}(0)>1$.

Single-photon sources demonstrate antibunching. $g^{(2)}(0)=0$ for a true single-photon source. In quantum cryptography, it is precisely the antibunching of photons that is desirable. Since photons are emitted one at a time, the probability of simultaneous observation of two photons for an ideal source is 0. The photon source is antibunched, if $g^{(2)}(0) < g^{(2)}(\tau)$ [6].

The specifics of coherent states should be taken into account in the development and implementation of QKD protocols [7].

Photon bunching can occur in sources with resonators when the photon lifetime in the resonator is comparable to the pulse repetition period.

By measuring the probabilities included in the expression of the correlation function, it is possible to estimate the value of the correlation function and show how true the hypothesis of Poisson statistics is.

ATTENUATED LASER AS A SINGLE-PHOTON SOURCE FOR QKD

The existing single-photon CRT systems overwhelmingly use a quasi-single-photon source based on a weakened laser [8]. Typically, in QKD systems, the laser intensity is attenuated to such an extent that, on average, each pulse contains less than one photon. A thick silicon wafer is often used as an attenuator, and with it a con-

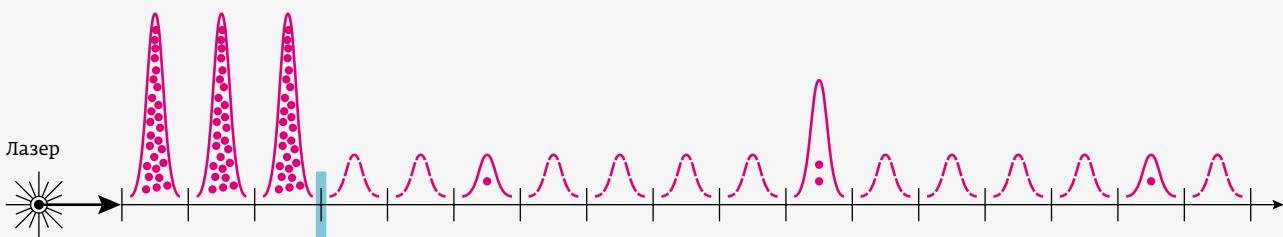


Рис. 4. У лазера, ослабленного до интенсивности 0,2 фотона в импульсе, большая часть импульсов оказываются «пустыми», и в среднем только примерно пятая часть всех импульсов содержит фотон. Но при этом неизбежно есть известная доля импульсов, которые содержат более одного фотона, и избавиться от них невозможно

Fig. 4. For a laser attenuated to an intensity of 0.2 photons per pulse, most of the pulses turn out to be "empty", and on average only about one in five pulses contain a photon. But at the same time, there is inevitably a certain fraction of pulses that contain more than one photon, and it is impossible to get rid of them

Количество фотонов в импульсе ослабленного лазера подчиняется статистике Пуассона. При ослаблении лазерного излучения до интенсивности 0,1–0,2 фотона на импульс подавляющее большинство импульсов, преодолевших аттенюатор, содержат всего один фотон (рис. 4). В ослабленном лазерном излучении наряду с однофотонными импульсами неизбежно присутствует доля многофотонных импульсов, соответствующая вероятностному распределению Пуассона. Например, среднее значение числа фотонов в импульсе $\mu = 0,1$ приводит к вероятности 90% для нуля фотонов, 9% для одного фотона и 1% для более чем одного фотона [9].

Степень «однофотонности» квазиоднофотонного источника является критически важной характеристикой для систем КРК. Необходимо учитывать долю многофотонных импульсов при физической реализации протокола квантового распределения ключей, чтобы протокол оставался безопасным. Все доказательства секретности протоколов предполагают, что злоумышленник обладает полным доступом к квантовой линии и не ограничен в технических средствах, и вся информация, которую принципиально возможно извлечь из линии, будет им полностью извлечена и использована. В данном случае это означает, что все многофотонные импульсы могут быть «подслушаны». Поэтому в технической реализации квантового протокола для обеспечения математической безопасности необходимо учитывать все многофотонные импульсы как утечку информации к злоумышленнику.

trolled attenuator for precise adjustment. Micromechanical controlled mirrors mounted in a fiber gap are also sometimes used, which redirect radiation completely or partially.

The number of photons in the pulse of a weakened laser obeys Poisson distribution. When the laser radiation is attenuated to an intensity of 0.1–0.2 photons per pulse, the vast majority of pulses that have overcome the attenuator contain only one photon (Fig.4). In attenuated laser radiation, along with single-photon pulses, there is inevitably a fraction of multiphoton pulses corresponding to the Poisson distribution. For example, the average value of the number of photons in a pulse of $\mu = 0.1$ leads to a probability of 90% for zero photons, 9% for one photon and 1% for more than one photon [9].

The single photon emission purity of a quasi-single-photon source is a critically important characteristic for QKD systems. To keep the QKD-protocol secure, it is necessary to take into account the proportion of multiphoton pulses in the physical implementation of the quantum key distribution system. All protocol security proofs suggest that the attacker has full access to the quantum line and is not limited in technical means, and all information that is fundamentally possible to extract from the line will be fully extracted and used by him. In this case, this means that all multiphoton pulses can be "eavesdropped". Therefore, in the technical implementation of the quantum protocol, in order to ensure mathematical security, it is necessary to take into account all multiphoton pulses as information leakage to an attacker.

This means that in real QKD systems, it is necessary to carefully ensure that the permitted single-photon



Это означает, что в реальных системах КРК необходимо внимательно следить за тем, чтобы разрешенный однофотонный режим был установлен изначально и строго выдерживался в реальных условиях эксплуатации. Все элементы, обеспечивающие однофотонный режим оптического излучения, должны быть калиброваны на длине волны излучателя, и однофотонный режим должен быть подтвержден при всех возможных режимах работы. Для подтверждения однофотонного режима источника одиночных фотонов требуется произвести измерения среднего числа фотонов, используемых при передаче одного квантового состояния, наблюданного на выходе системы и подтвердить пуассоновскую статистику распределения числа фотонов в оптических импульсах на выходе системы.

Для этого необходимо произвести измерения:

- частоты передачи однофотонных квантовых состояний;
- средней мощности излучения;
- средней длины волны излучаемых в квантовый канал связи фотонов;
- значения автокорреляционной функции второго порядка в нулевой момент времени, характеризующее «степень однофотонности» передаваемого по квантовому каналу сигнала.

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО ЧИСЛА ФОТОНОВ В ИМПУЛЬСЕ

Если вероятность $P(n)$ излучения n фотонов в одном оптическом импульсе, поступающем в квантовый канал связи от системы КРК, описывается пуассоновским распределением, то достаточно контролировать среднее число фотонов μ в одном оптическом импульсе, чтобы обеспечить достаточно «однофотонный» режим работы излучателя системы КРК, и аккуратно учитывать долю неоднофотонных импульсов для обеспечения безопасности протокола [10].

Методы, позволяющие определить среднее число фотонов в одном оптическом импульсе системы КРК, подробно описаны в спецификации Европейского института телекоммуникационных стандартов (ETSI): ETSI Group Specification QKD 011 [11].

Среднее число фотонов μ в одном оптическом импульсе рассчитывается по величине средней мощности излучения. Зная среднюю энергию одного оптического импульса и частоту следования неослабленных оптических импульсов, и длину волны лазера, можно рассчитать среднее число фотонов μ в одном импульсе по формуле:

mode is initially set and strictly maintained in real operating conditions. All elements providing a single-photon mode of optical radiation must be calibrated at the wavelength of the emitter, and the single-photon mode must be confirmed under all possible operating modes. To confirm the single-photon mode of a source, it is necessary to measure the average number of photons used in transmitting a single quantum state observed at the output of the system and confirm the Poisson statistics of the photons number distribution in optical pulses at the system output.

To do this, it is necessary to measure:

the transmission frequency of single-photon quantum states;

average radiation power;

- the average wavelength of photons emitted into the quantum channel;
- the second-order correlation function, characterizing the single photon emission purity of the signal transmitted over the quantum channel.

MEASUREMENT OF THE AVERAGE NUMBER OF PHOTONS PER PULSE

If the probability $P(n)$ of emission of n photons in one optical pulse entering the quantum channel from the QKD system obeys the Poisson distribution, then it is sufficient to control the average number of photons in optical pulse to ensure a “sufficiently single-photon” operating mode of the QKD system emitter, and carefully take into account the proportion of non-single-photon pulses to ensure security of the protocol [10].

The methods for determining the average number of photons in one optical pulse of the QKD system are described in detail in the ETSI Group Specification QKD [11] (ETSI – European Telecommunications Standards Institute).

The average number of photons in one optical pulse n is calculated by the value of the average radiation power. Knowing the average energy of one optical pulse and the repetition rate of the unattenuated optical pulses, and the wavelength of the laser, we can calculate the average number of photons in one pulse:

$$\mu = \frac{P \cdot \lambda}{f \cdot c \cdot h}, \quad (2)$$

where P is the average radiation power [W];

f is the pulse repetition rate [Hz];

λ is the average radiation wavelength [nm];

h is Planck's constant ($h \approx 6.63 \cdot 10^{-34}$ [J·s]);

c is the speed of light in vacuum

($c \approx 2.99 \cdot 10^8$ m/s).



$$\mu = \frac{P \cdot \lambda}{f \cdot c \cdot h}, \quad (2)$$

где P – средняя мощность излучения [Вт];

f – частота следования импульсов [Гц];

λ – средняя длина волны излучения [м];

h – постоянная Планка ($h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с]),

c – скорость света в вакууме ($c \approx 2,99 \cdot 10^8$ м/с).

Знание квантовой эффективности, вероятности темновых отсчетов и послеимпульсов, а также частоты следования импульсов (необходимо синхронизировать калибранный фотодетектор и выход системы КРК) позволяет произвести перерасчет частоты срабатываний фотодетектора под действием излучения с выхода системы КРК в среднее число фотонов. В реальных системах КРК среднее число фотонов в импульсе контролируется постоянно, чтобы доля многофотонных импульсов, не превышала порогового значения, при котором квантовый протокол перестанет быть секретным.

КОНТРОЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АТАКЕ С РАСПЩЕПЛЕНИЕМ ПО ЧИСЛУ ФОТОНОВ [12]

В стабильном ослабленном лазерном излучении количество фотонов импульсе описывается пуссоновской статистикой, что неизбежно приводит к известной доле многофотонных импульсов. С одной стороны, этот факт накладывает дополнительные ограничения на техническую реализацию квантового протокола, но, с другой стороны, знание статистики дает относительно простую и изящную возможность обнаруживать постороннее вмешательство в процесс выработки квантового ключа.

Это используется в Decoy-state методе [7, 13, 14], который заключается в приготовлении и передаче наряду с информационными состояниями специально приготовленных контрольных состояний (состояний-«ловушек», Decoy States). Помимо информационных состояний со средним числом фотонов μ , Алиса готовит контрольные состояния (состояния-«ловушки») с другими средними числами фотонов v_1 и v_2 . При этом, какое из состояний будет послано, каждый раз выбирается случайным образом. Для приготовления контрольных состояний в протоколах с Decoy-state применяются электрооптические модуляторы интенсивности.

Ева заранее не знает, состояние с каким средним числом фотонов находится в канале, поэтому

��识 of the quantum efficiency, the probability of dark counts and after pulses, as well as the pulse repetition rate (it is necessary to synchronize the calibrated photodetector and the output of the QKD system) makes it possible to recalculate the frequency of the photodetector under the influence of radiation from the output of the QKD system to the average number of photons. In real QKD systems, the average number of photons per pulse is constantly monitored so that the proportion of multiphoton pulses does not exceed the threshold value at which the quantum protocol ceases to be secret.

DECAY-STATES FOR COUNTERING A PHOTON NUMBER SPLITTING ATTACK [12]

In stable attenuated laser radiation, the number of photons in a pulse is described by Poisson statistics, which inevitably leads to a known share of multiphoton pulses. On the one hand, this fact imposes additional restrictions on the technical implementation of the quantum protocol, but on the other hand, knowledge of statistics provides a relatively simple and elegant opportunity to detect outside interference in the process of quantum key distribution.

This is used in the Decoy-state method [7, 13, 14], which consists in preparing and transmitting, specially prepared decoy states, along with information states. In addition to information states with an average number of photons μ , Alice prepares some share of decoy states with other average numbers of photons: v_1 and v_2 . At the same time, which of the states will be sent is randomly selected each time. Electro-optical intensity modulators are used to prepare information states and decoy states in Decoy-state protocols.

Eve does not know in advance the state with what average number of photons is in the channel, so it acts the same with each parcel. Her intervention distorts the statistics of Bob's counts in different ways for each set of states with an average number of photons per pulse μ , v_1 and v_2 .

After basis announcement and discarding mismatched bases, Bob finds out which set of states each click answered, and can calculate statistics separately for each set with the numbers μ , v_1 and v_2 . According to the statistics of detector triggers for decoy states, Bob calculates the proportion of a single-photon component in information pulses. If this proportion remains within the required limits, then the protocol will remain secure, Alice and Bob start information reconciliation and privacy amplification procedures, considering that the key is formed only on a single-photon component.

And if the proportion of a single-photon component turns out to be different than it is predetermined by Poisson statistics for three sets of states with photon



с каждой посылкой действует одинаково. Ее вмешательство по-разному искажает статистику отсчетов Боба для каждого набора состояний со средним числом фотонов в импульсе μ , v_1 и v_2 .

После процедуры разглашения базисов Боб узнает, какому набору состояний отвечали каждые клики, и может подсчитать статистику раздельно по каждому набору с числами μ , v_1 и v_2 . По статистике срабатываний детекторов для контрольных состояний Боб может вычислить долю однофотонной компоненты в информационных импульсах. Если эта доля остается в необходимых пределах, то протокол останется безопасным, Алиса и Боб проводят усиление секретности, считая, что ключ формируется только на однофотонной компоненте.

А если доля однофотонной компоненты оказывается иной, нежели это предопределено статистикой Пуассона для трех наборов состояний с числами фотонов μ , v_1 и v_2 , то можно предполагать, что злоумышленник вмешался и затеял атаку с расщеплением по числу фотонов (Photon Number Splitting – PNS) [12].

Конечно, было бы намного удобнее располагать идеальным однофотонным источником, источником с числом фотонов в импульсе строго равным единице. Такой источник упростил бы техническую реализацию квантовых протоколов и ослабил бы математические требования к секретности протоколов. Существует целый ряд требований, которым должен удовлетворять идеальный однофотонный источник.

КАКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИДЕАЛЬНОМУ ОДНОФОТОННОМУ ИСТОЧНИКУ? [15]

- Один фотон может быть испущен в любое произвольно определенное время пользователем (то есть источник является детерминированным или «по требованию», «Одиночный фотон по запросу»).
- Вероятность испускания одного фотона составляет 100%.
- Вероятность многофотонной эмиссии составляет 0%.
- Последующие испускаемые фотоны неразличимы.
- Частота повторения максимальна (ограничена только временной продолжительностью однофотонного импульса).

Отклонения от этих идеальных характеристик, которые всегда присутствуют в реальном мире, должны быть учтены при постановке экспериментов и разработке схем шифрования.

numbers μ , v_1 and v_2 , then it can be assumed that the attacker intervened and launched a Photon Number Splitting attack (PNS) [12].

Of course, it would be much more convenient to have an ideal single-photon source – a source with exactly one photon per pulse. Such a source would simplify the technical implementation of quantum protocols and weaken the mathematical requirements for protocol security. There are a number of requirements that an ideal single-photon source must meet.

WHAT ARE THE REQUIREMENTS FOR AN IDEAL SINGLE-PHOTON SOURCE? [15]

- one photon can be emitted at any arbitrarily determined time by the user (that is, the source is deterministic or “on demand” – single photon on demand),
- the probability of emitting one photon is 100%,
- the probability of multiphoton emission is 0%,
- the emitted photons are indistinguishable,
- the repetition rate is maximum (limited only by the time duration of a single-photon pulse).

Deviations from these ideal characteristics, which are always present in the real world, should be taken into account when setting up experiments and developing encryption systems.

For commercial QKD systems, there are additional requirements for an ideal single-photon source:

- the wavelength in the telecommunication C-band range (usually, 1550 nm);
- photon repetition rate over 100 MHz:
 - high brightness;
 - high quantum yield.
- electrical excitation.

WORKING AT ROOM TEMPERATURE

Most traditional single-photon sources require low temperatures to achieve optimal performance. From a practical point of view, the most interesting sources are those that operate at room temperature. Research is being conducted in the field of single-photon sources based on A3B5 semiconductors, such as gallium nitride (GaN) and indium nitride (InN), for example, quantum dots based on gallium nitride (GaN) can provide single-photon radiation at room temperature. Also promising objects for creating single-photon sources at room temperature are color defects in diamond, for example, NV centers (nitrogen vacancy). To date, the development of stable and efficient single-photon sources at room temperature is an active area of research. Technologies and materials continue to evolve, and significant breakthroughs in this area may be achieved in the future.



Для коммерческих систем КРК есть дополнительные требования к идеальному источнику одиночных фотонов:

- длина волны телекоммуникационного С-диапазона (1550 нм);
- частота следования фотонов более 100 МГц:
 - высокая яркость;
 - высокий квантовый выход.
- электрическое возбуждение.

РАБОТА ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Большинство традиционных однофотонных источников требуют низких температур для достижения оптимальной работы. С практической точки зрения наиболее интересны источники, которые работают при комнатной температуре. Исследования проводятся в области однофотонных источников на основе нитридов полупроводников, таких как нитрид галлия (GaN) и нитрид индия (InN), например, квантовые точки на основе нитрида галлия (GaN) могут обеспечивать однофотонное излучение при комнатной температуре. Также перспективными объектами для создания однофотонных источников при комнатной температуре являются дефекты окраски в алмазе, например, NV-центры (азот-вакансия). На текущий день разработка стабильных и эффективных однофотонных источников при комнатной температуре является активной областью исследований. Технологии и материалы продолжают развиваться, и в будущем могут быть достигнуты значительные прорывы в этой области.

РАБОТА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ

В квантовой связи и квантовых сетях требуется однофотонные источники, рассчитанные на телекоммуникационный диапазон длин волн (около 1550 нм). Также интересны источники, излучающие в других окнах прозрачности оптоволокна, – 1310 нм и около 850 нм, – но потери в оптоволокне на этих длинах волн значительно выше.

Это могут быть однофотонные источники на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР, SPDC) в нелинейных кристаллах, которые генерируют пару фотонов с различными энергиями, включая один (или оба) фотон в телекоммуникационном диапазоне. Квантовые точки на основе InAs обладают потенциалом для генерации однофотонных сигналов в ближнем инфракрасном диапазоне. Некоторые ионы в кристаллической матрице, такие как ионы эрбия (Er^{3+}) и празеодима (Pr^{3+}), могут генерировать одиночные фотоны в телекоммуникационном диапазоне.

WORK IN THE TELECOMMUNICATIONS RANGE

Quantum communications and quantum networks require single-photon sources designed for the telecommunication wavelength range (about 1550 nm). Sources emitting in other optical fiber transparency windows are also interesting, – 1310 nm and about 850 nm, – but losses in optical fiber at these wavelengths are much higher.

These can be single-photon sources based on spontaneous parametric down-conversion (SPDC) in nonlinear crystals that generate a pair of photons with different energies, including one (or both) photon in the telecommunications range. InAs-based quantum dots have the potential to generate single-photon signals in the near infrared range. Some ions in the crystal matrix, such as erbium (Er^{3+}) and praseodymium (Pr^{3+}) ions, can generate single photons in the telecommunications range.

Superconducting nanowires, superconducting monatomic contacts, carbon nanotubes and graphene nanostructures, nanocrystals and quantum dots in a liquid or polymer matrix may also be promising.

Another area of scientific research in the field of developing single-photon sources for the telecommunication wavelength range is the development of methods for converting single photons of submicron wavelengths into photons of the telecommunication range. This can be done, for example, using cascade Raman scattering in a stepwise Bragg resonator in a single-mode optical fiber [16], or using four-wave mixing in a periodically poled lithium niobate waveguide [17]. Very attractive in this context is the idea of integrating single synthetic nanodiamonds containing a single color center directly into an optical fiber or into the structure of a photonic integrated circuit, after which frequency conversion can be implemented using well-developed fiber or integrated technologies.

At the same time, optical communication systems and quantum key distribution systems in open space (in the atmosphere, earth-satellite or in space between two spacecraft) are being actively developed, where different wavelengths can be used, and for these tasks there is no a requirement of a strictly defined wavelength for the source.

INDISTINGUISHABILITY OF EMITTED PHOTONS

For practical use, photons emitted from a single-photon source must be indistinguishable. *Indistinguishable photons* must have the same wavelength, polarization, and temporal and spatial extent. The Hong-Ou-Mandel effect is used to characterize indistinguishability.



Также перспективными могут быть сверхпроводящие нанопровода, сверхпроводниковые одноатомные контакты, углеродные нанотрубки и графеновыеnanoструктуры, нанокристаллы и квантовые точки в жидкостной или полимерной матрице.

Другое направление научного поиска в области разработки однофотонных источников на телекоммуникационный диапазон длин волн – это разработка методов конверсии одиночных фотонов субмикронных длин волн в фотоны телекоммуникационного диапазона. Это можно сделать, например, с помощью каскадного комбинационного рассеяния в ступенчатом брегговском резонаторе [16], или с помощью четырехволнового смешения в кристалле ниобата лития с периодически поляризованной доменной структурой [17] внутри длинного волновода. Очень привлекательной в этом контексте является идея интеграции единичных синтетических наноалмазов, содержащих один центр окраски, прямо в оптоволокно или в структуру фотонной интегральной схемы, после чего преобразование частоты можно реализовать с помощью хорошо развитых волоконных или интегральных технологий.

В то же время сейчас активно разрабатываются системы оптической связи и системы квантового распределения ключей по открытому пространству (в атмосфере, земля–спутник или в космосе между двумя космическими аппаратами), где могут использоваться различные длины волн, и для этих задач требование строго определенной длины волны для источника не ставится.

НЕРАЗЛИЧИМОСТЬ ИЗЛУЧАЕМЫХ ФОТОНОВ

Для практического использования фотоны, испускаемые одним источником фотонов, должны быть неразличимы. Неразличимые фотоны должны иметь одинаковую длину волны, поляризацию, а также временную и пространственную протяженность. Для характеристики неразличимости фотонов используется эффект Хонга-У-Манделя.

Эффект Хонга-У-Манделя (HOM) представляет собой явление двухфотонной интерференции, при котором два неразличимых фотона интерфе-рируют на симметричном светоделителе, и оба фотона всегда выходят на один и тот же, но случайный выходной порт.

Два фотона из одного источника подготавливаются таким образом, чтобы они одновременно поступали на два входа светоделителя. Детекторы

The Hong-Ou-Mandel (HOM) effect is a two-photons interference phenomenon, wherein two indistinguishable photons are interfered on a symmetrical beam splitter, and the photons always emerge on the same, but random output port.

Two photons from one source are prepared so that they arrive simultaneously at the two inputs of a symmetrical beam splitter. Detectors are placed at both outputs of the beam splitter, and the coincidence between the two detectors is measured. If the photons are indistinguishable, there should be no coincidences[18]. Almost perfect indistinguishability has been experimentally realized [19, 20].

ELECTRICAL OR OPTICAL PUMPING.

One of the requirements of practical implementation is the use of electric pumping. It is generally believed that electric pumping is more technically simple to implement than optical or microwave, and this opinion is justified by a completely reasonable desire to use standard microelectronic technologies for the production of single-photon sources. The implementation of electrical control in microelectronic technology is not a problem, while the implementation of optical components in an integrated design is not yet a generally accepted practice.

At the same time, we should not forget about the rapid development of photonic integrated circuit technologies, as well as the growing desire of microelectronics manufacturers to integrate optical data buses to connect blocks of modern silicon chips. Sooner or later, this will lead to the creation of microelectronic transceivers and receivers as elements of an integrated circuit of a next-generation processor, or as elements of a photonic integrated circuit, and the technological issues of optical pumping distribution to a single-photon emitter will be largely resolved. Currently, it is impossible to go without mentioning the desire for electrical control of a single-photon source, but in the near future this issue will turn out to be unprincipled.

KEY PARAMETERS OF SINGLE-PHOTON SOURCES FOR QKD SYSTEMS

Table 1 lists the parameters that are monitored during metrological measurements of single-photon sources in an accredited testing laboratory.

THE MAIN TYPES OF SINGLE PHOTON SOURCES

So, the use of an attenuated laser is a compromise temporary technical solution, which is used due to the lack of commercially available true single-photon sources. True single-photon sources could mitigate the protocol



размещаются на обоих выходах светоделителя, и измеряются совпадения между двумя детекторами. Если фотоны неразличимы, оба фотона всегда приходят на один и тот же детектор, и совпадений быть не должно [18]. Экспериментально получена почти полная неразличимость [19, 20].

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЛИ ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА

Одним из требований практической реализации является использование электрической накачки. Принято думать, что электрическая накачка более технически проста в реализации, чем оптическая или СВЧ, и это мнение обосновано вполне разумным желанием применить для производства однофотонных источников стандартные микроэлектронные технологии. Реализация электрического управления в микроэлектронной технике не является проблемой, в то время как реализация оптических компонентов в интегральном исполнении пока еще не является общепринятой практикой.

В то же время, не следует забывать о стремительном развитии технологий фотонных интегральных схем, а также о все возрастающем желании производителей микроэлектроники интегрировать оптические шины данных между блоками современных микросхем. Это рано или поздно приведет к созданию микроэлектронных трансиверов и ресиверов как элементов интегральной микросхемы процессора следующего поколения, либо как элементов фотонной интегральной схемы, и технологические вопросы подведения оптической накачки к однофотонному излучателю окажутся в значительной степени решены. В настоящее время нельзя обойтись без упоминания о положении об электрическом управлении однофотонным источником, но в скором будущем этот вопрос окажется непринципиальным.

Таблица 1. Ключевые параметры однофотонных источников для систем КРК
Table 1. Key parameters of single-photon sources for QKD systems

№ п/п No.	Наименование параметра Parameter name	Единица измерения Measurement unit
1	Тактовая частота Clock frequency	Гц Hz
2	Нестабильность тактовой частоты Clock frequency instability	Гц/ч [*] Hz/h [*]
3	Частота следования оптических импульсов Optical pulse repetition rate	Гц Hz
4	Среднее число фотонов The average photons number	фот./имп. photon/pulse
5	Средняя мощность оптического излучения The average optical power	Вт W
6	Долговременная стабильность средней мощности оптического излучения Long-term stability of the average optical power	дБ/ч ^{**} dB/h
7	Кратковременная стабильность средней мощности оптического излучения Short-term stability of the average optical power	дБ dB
8	Временной профиль излучения источника Time profile of the source	
9	Временной джиттер источника Time jitter of the source	с s
10	Временной профиль источника	
11	Длина волны (частота) оптического излучения Wavelength (frequency) of optical radiation	нм (Гц) nm (Hz)
12	Ширина линии излучения Width of the radiation line	Гц (нм) Hz (nm)
13	Квантовая эффективность Quantum efficiency	%

implementation requirements and increase the speed of quantum key generation. Currently, active scientific research is underway, and a large number of scientific articles on the topic of single-photon sources are being published. Single-photon sources for other wavelengths are already being sold. The emergence of commercial single-photon sources for QKD by optical fiber is not far off.

Probabilistic (non-deterministic) sources are based on photon pairs that are created using parametric down-conversion (PDC) in bulk crystals [21, 22] and waveguides [23, 24] and four-wave mixing (FWM) processes in optical fibers [25, 26].

Deterministic sources (allowing to emit a single photon “on demand”) use color centers [27, 28], quantum



КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОДНОФОТОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ КРК

В табл. 1 перечислены параметры, которые контролируются при метрологических измерениях однофотонных источников в аккредитованной испытательной лаборатории.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИСТОЧНИКОВ ОДНОЧНЫХ ФОТОНОВ

Итак, использование ослабленного лазера является компромиссным временным техническим решением, которое используется в силу отсутствия коммерчески доступных истинно однофотонных источников. Истинно однофотонные источники могли бы смягчить требования к реализации протокола и увеличить скорость выработки квантового ключа. В настоящее время ведутся активные научные разработки, и публикуется большое количество научных статей по теме однофотонных источников. Уже продаются однофотонные источники на другие длины волн. Появление коммерческих однофотонных источников для КРК по оптоволокну не за горами.

Вероятностные (недетерминированные) источники основаны на парах фотонов, которые создаются с использованием параметрического рассеяния с понижением частоты света (parametric downconversion - PDC) в объемных кристаллах [21, 22] и волноводах [23, 24] и процессов четырехвольнового смешения (four-wave mixing - FWM) в оптических волокнах [25, 26].

Детерминистические источники (позволяющие испускать одиничный фотон «по требованию») используют центры окраски [27, 28], квантовые точки [29–31], одиночные атомы [32, 33], одиночные ионы [34], одиночные молекулы [35] и атомные ансамбли [36].

Четкое различие между двумя типами источников размывается в реальных приложениях, т. к. к примеру, истинно детерминированный источник на основе центра окраски становится вероятностным при условии учета потерь, связанных с выходом излучения из области материала, где находится центр окраски.

ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ С ОПОВЕЩЕНИЕМ (HERALDED SINGLE-PHOTON SOURCES) [37–40]

Однофотонные источники с оповещением представляют возможность точно определить момент генерации одного фотона. Однофотонные источники с оповещением генерируют одиночные

dots [29–31], single atoms [32, 33], single ions [34], single molecules [35] and atomic ensembles [36].

The clear distinction between the two types of sources is blurred in real applications, because, for example, a truly deterministic source based on the color center becomes probabilistic, provided that losses associated with radiation output from the material area where the color center is located are taken into account.

HERALDED SINGLE-PHOTON SOURCES [37–40]

Heralded single-photon sources provide an opportunity to accurately determine the moment of generation of a single photon. Heralded single-photon sources generate single photons and simultaneously send a heralding that a photon has been successfully generated. This allows us to know exactly when and where a single photon was generated.

Heralded single-photon sources provide certainty of the presence of a single photon by pre-detection or notification of its generation. A typical implementation of such a source uses a nonlinear optical process known as spontaneous parametric scattering using nonlinear crystals. In this process, under certain conditions of interaction of photons with matter, one photon decomposes into two – a signal photon and a heralding photon. A heralding photon, which is information about the generation of a photon signal, can be detected and registered using a photodetector or other light detector. This heralding allows you to know for sure that the generation of a single photon has occurred, and provides information about its status.

Such sources operate on the basis of certain quantum mechanical processes, such as spontaneous parametric scattering, emission of fluorescent glow from a single-molecular crystalline dye or a high-intensity fluorescent lamp. Nonlinear optical processes in nonlinear crystals are often used. The most widely used heralded single-photon sources based on spontaneous parametric down-conversion (SPDC) and spontaneous four-wave mixing (FWM).

THE MAIN PLATFORMS USED FOR THE MANUFACTURE OF SPS [41]

- SPS on single atoms and ions;
- SPS on nonlinear effects in crystals: spontaneous parametric down-conversion (SPDC) or four-wave mixing (FWM);
- SPS on quantum dots;
- SPS on NV-centers in diamond and color centers in nanocrystals;
- SPS on carbon nanotubes.

фотоны и одновременно отправляют оповещение о том, что фотон был успешно сгенерирован. Это позволяет нам точно знать, когда и где произошла генерация одного фотона.

Однофотонные источники с оповещением обеспечивают определенность наличия одиночного фотона путем предварительного обнаружения или оповещения о его генерации. В типичной реализации такого источника используется нелинейный оптический процесс, известный как спонтанное параметрическое рассеяние с использованием нелинейных кристаллов. В этом процессе при определенных условиях взаимодействия фотонов с материей один фотон разлагается на два – фотон сигнала и фотон оповещения. Фотон оповещения, который является информацией о генерации фотона сигнала, может быть обнаружен и зарегистрирован при помощи фотодетектора или другого детектора света. Это оповещение позволяет точно знать, что генерация одного фотона произошла, и предоставляет информацию о его состоянии.

Такие источники работают на основе определенных квантовомеханических процессов, таких как спонтанное параметрическое рассеяние, эмиссия флюоресцентного свечения от одномолекулярного кристаллического красителя или флюоресцентная лампа высокой интенсивности. Часто используются нелинейные оптические процессы в нелинейных кристаллах. Наиболее широко используются однофотонные источники с оповещением на основе спонтанного параметрического преобразования с понижением частоты (SPDC) и спонтанного четырехвольнового смешения.

ОСНОВНЫЕ ПЛАТФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИОФ [41]

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

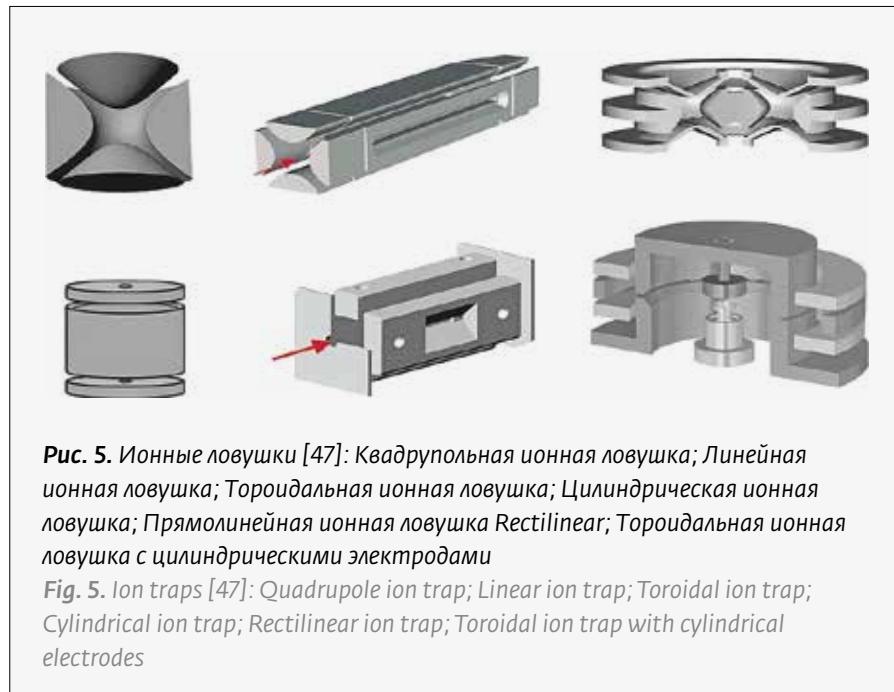


Рис. 5. Ионные ловушки [47]: Квадрупольная ионная ловушка; Линейная ионная ловушка; Тороидальная ионная ловушка; Цилиндрическая ионная ловушка; Прямоугольная ионная ловушка Rectilinear; Тороидальная ионная ловушка с цилиндрическими электродами

Fig. 5. Ion traps [47]: Quadrupole ion trap; Linear ion trap; Toroidal ion trap; Cylindrical ion trap; Rectilinear ion trap; Toroidal ion trap with cylindrical electrodes

SINGLE-PHOTON SOURCES BASED ON SINGLE IONS [42–46]

To create a single photon source based on single ions for a wavelength of 1550 nanometers, the most suitable ions are ions of rare earth elements such as erbium (Er), thulium (Tm) or Praseodymium (Pr) operating in the infrared region of the spectrum. This is due to the fact that ions of rare earth elements have energy transitions between energy levels corresponding to the telecom wavelength. In particular, erbium (Er) ions are widely used to generate single photons at 1550 nm. For a wavelength of 1310 nanometers, cerium (Ce³⁺), praseodymium (Pr³⁺), ytterbium (Yb³⁺) or erbium (Er³⁺) ions are best suited.

Special magnetostatic traps are used to hold ions (Penning trap, Paul trap, radio frequency trap, trap with a rotating electric field, etc.) (Fig.5.). Ions can be formed directly by ionizing gas near or inside the trap (for example, by an electron beam or corona discharge) and held in the trap for a sufficient time to excite energy levels and spontaneous or stimulated photon emission. Buffer gas or laser cooling is used to cool the particles. Due to the Coulomb repulsion of charged particles, it is possible to organize a trap in such a way that exactly one ion is held in a certain area of space, and exactly one photon is emitted at each exposure.

The ions used as single-photon emitters [48–50] have a configuration of energy levels with two ground states and one excited state. With the help of a radio frequency ion trap, it is possible to stably localize a single ion in the center of an optical resonator, and limit the ion wave



ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНЫХ ИОНОВ [42–46]

Для создания источника одиночных фотонов на основе одиночных ионов для длины волны 1550 нм наиболее подходящими ионами являются ионы редкоземельных элементов, такие как эрбий (Er), тулий (Tm) или празеодим (Pr), работающие в инфракрасной области спектра. Это связано с тем, что ионы редкоземельных элементов имеют энергетические переходы между энергетическими уровнями, соответствующие телекомовской длине волн. В частности, ионы эрбия (Er) широко используются для генерации одиночных фотонов при 1550 нм. Для длины волны 1310 нм лучше всего подходят ионы церия (Ce³⁺), празеодимия (Pr³⁺), иттербия (Yb³⁺) или эрбия (Er³⁺).

Для удержания ионов используются специальные магнитостатические ловушки (Ловушка Пеннига, Ловушка Паули, радиочастотная ловушка, ловушка с вращающимся электрическим полем и т.д., рис. 5). Ионы могут образовываться непосредственно путем ионизации газа вблизи или внутри ловушки (например электронным пучком или коронным разрядом) и удерживаться в ловушке достаточное время для возбуждения энергетических уровней и спонтанного или стимулированного испускания фотона. Для охлаждения частиц используется буферный газ или лазерное охлаждение. Благодаря кулоновскому отталкиванию заряженных частиц, возможно организовать ловушку таким образом, чтобы в определенной области пространства удерживался ровно один ион, и при каждом воздействии испускался ровно один фотон.

Ионы, используемые в качестве однофотонных эмиттеров [48–50], имеют конфигурацию энергетических уровней с двумя основными состояниями и одним возбужденным состоянием. С помощью радиочастотной ионной ловушки можно стабильно локализовать одиночный ион в центре оптического резонатора и ограничивать волновой пакет иона на длине, намного меньшей оптической длины волны, а также фиксировать положение волнового пакета с точностью до нескольких нанометров. Это обеспечивает непрерывное производство однофотонных импульсов. Поскольку внутри резонатора находится только один ион, возможность многофотонных событий исключается [49, 51].

Одиночные ионы как основа однофотонного источника имеют то преимущество, что все они идентичны и демонстрируют неразличимость между разными источниками и разными импульсами от одного и того же источника.

packet to a length much shorter than the optical wavelength, as well as fix the position of the wave packet with an accuracy of several nanometers. This ensures the continuous production of single-photon pulses. Since there is only one ion inside the resonator, the possibility of multiphoton events is excluded [49, 51].

Single ions as the basis of a single-photon source have the advantage that they are all identical, and demonstrate indistinguishability between different sources and different pulses from the same source.

The difficulty lies in the fact that resonant ion transitions occur in the ultraviolet region and excited states have high rates of spontaneous decay. Radiation in the resonant mode is accompanied by spontaneous radiation. In addition, the ion can remain in the ground state at the end of the excitation pulse without emitting a single photon. These factors can seriously reduce the probability of emitting single photon during each pump cycle. Another problem concerns how efficiently light can be collected, since the usual solution for neutral atoms – using strongly coupled resonators – is difficult for charged particles.

The improvement of experimental techniques in the manipulation of individual ions is due to the fact that one of the priorities in the development of quantum computers is the development of a quantum computer based on trapped ions [52–54]. Demonstrators of a quantum computer based on several hundred trapped ions have already been developed. It should be noted that the same applies to individual atoms; diffraction methods for creating three-dimensional optical atomic traps have made it possible to capture and hold more than ten thousand individual atoms.

SINGLE-PHOTON SOURCES BASED ON ULTRACOLD ATOMS

In traps, due to electromagnetic forces, it is possible to retain not only ions or charged elementary particles, but also neutral atoms if they have of nonzero dipole moments or magnetic moments.

Sources of single photons based on individual atoms typically operate at low temperatures and/or in vacuum conditions. Today, alkali metals atoms such as Cs and Rb are used [55–60].

First, you need to prepare a system in which individual atoms will be present. This can be achieved, for example, by laser cooling of a beam of atoms and placing atoms in optical traps.

To stop an atom, it needs to be cooled, i. e., to reduce its speed to less than a few centimeters per second. There are various ways to do this, but the most convenient method turned out to be laser cooling. Laser beams create a series of standing waves of polarized light, whose

Трудность заключается в том, что резонансные переходы ионов происходят в ультрафиолетовой области и возбужденные состояния имеют высокие скорости спонтанного распада. Излучение в резонансном режиме сопровождается спонтанным излучением. Кроме того, ион может остаться в основном состоянии в конце импульса возбуждения, не испустив ни одного фотона. Эти факторы могут серьезно снизить вероятность испускания одного фотона в течение каждого цикла накачки. Еще одна из проблем касается того, насколько эффективно можно собирать свет, поскольку обычное решение для нейтральных атомов – использование сильно связанных резонаторов – затруднительно для заряженных частиц.

Совершенствование экспериментальных техник в манипулировании отдельными ионами связано с тем, что одним из приоритетных направлений в разработке квантовых компьютеров является разработка квантового вычислителя на отдельных ионах [52–54]. Уже разработаны демонстраторы квантового вычислителя на нескольких сотнях отдельных ионов. Надо заметить, что это же касается отдельных атомов; дифракционные методы создания трехмерных оптических атомных ловушек позволили захватить и удерживать более десяти тысяч отдельных атомов.

ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНЫХ АТОМОВ

В ловушках за счет электромагнитных сил возможно удержание как ионов или заряженных элементарных частиц, так и нейтральных атомов при наличии у них ненулевых дипольных или магнитных моментов.

Источники одиночных фотонов на основе одиночных атомов обычно работают при низких температурах и/или в условиях вакуума. На сегодняшний день используются щелочные атомы, такие как Cs и Rb [55–60].

Сначала необходимо подготовить систему, в которой будут присутствовать отдельные атомы. Это может быть достигнуто, например, путем лазерного охлаждения пучка атомов и размещения атомов в оптических ловушках.

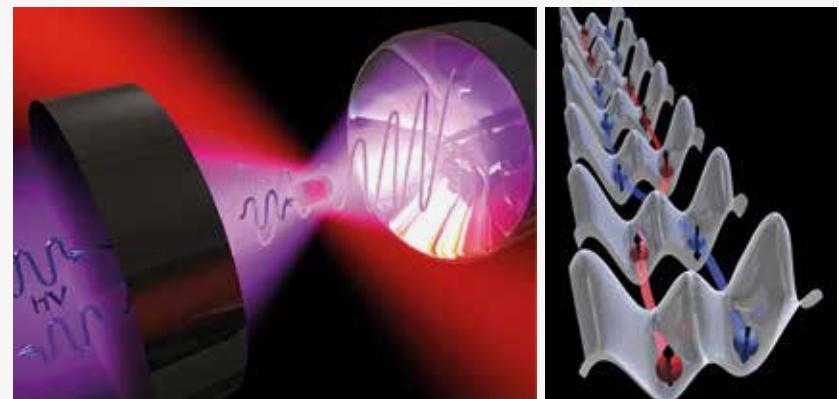


Рис. 6. Одиночный атом в резонаторе (nature.com) и одиночные атомы в силовых ловушках (Max Planck Institute, www.mpg.mpg.de)
Fig.6. A single atom in a resonator (nature.com) and single atoms in power traps (Max Planck Institute, www.mpg.mpg.de)

electric fields resemble a kind of comb. When an atom passes through it, bursts of electric field alternately “reset” the atom to an increasingly lower energy state and cool it down more and more [61].

Various traps have been developed to hold single atoms. One of the most common ways to hold single atoms is using optical gratings. Focused laser beams are used, which create an electromagnetic field with periodic potential wells for atoms. There are also magnetic, electrostatic, magneto-optical and microdipole traps [61, 62]. Historically, the Pauli trap and the Penning trap were invented first. Holographic traps are very interesting from a technical point of view, where the three-dimensional structure of potential wells in space is formed as a result of projecting a hologram through a holographic mask [63].

After capturing single atoms inside the trap, the atoms are excited by a laser. The laser system must be tuned to a certain energy corresponding to the transition of the selected atom from the ground state to the excited state. As a result of the excitation of a single atom, its electron transitions to an excited state. Relaxation from the excited state to the ground state is accompanied by the emission of a single photon. In each such process, a single photon is generated on a single atom. The emission of single photons can occur spontaneously or through a stimulated process, depending on the experimental conditions. As in the case of single ions, individual neutral atoms are identical, and different impulses from the same source and from different sources are indistinguishable. Ultracold atoms have a long coherence length, which means that the photons

Чтобы остановить атом, его нужно охладить, т.е. понизить его скорость менее нескольких сантиметров в секунду. Сделать это можно разными способами, но самым удобным оказался метод лазерного охлаждения. Лазерные лучи создают серию стоячих волн поляризованного света, электрические поля которых напоминают своего рода гребенку. Когда атом проходит сквозь нее, всплески электрического поля поочередно «сбрасывают» атом во все более и более низкое энергетическое состояние и все сильнее и сильнее охлаждают его [61].

Разработаны различные ловушки для удержания одиночных атомов. Один из распространенных способов удержания одиночных атомов – использование оптических решеток. Используются фокусированные лазерные пучки, которые создают электромагнитное поле с периодическими потенциальными ямами для атомов. Существуют также магнитные, электростатические, магнитооптические и микродипольные ловушки [61, 62]. Исторически первыми были изобретены ловушка Паули и ловушка Пеннинга. Очень интересными с технической точки зрения устройствами являются голограммические ловушки, где трехмерная структура потенциальных ям в пространстве формируется в результате проецирования голограммы через голограммическую маску [63].

После захвата одиночных атомов внутри ловушки атомы возбуждаются лазером. Лазерная система должна быть настроена на определенную энергию, соответствующую переходу выбранного атома из основного состояния в возбужденное состояние. В результате возбуждения одиночного атома происходит переход его электрона в возбужденное состояние. Релаксация из возбужденного состояния в основное состояние сопровождается испусканием фотона. В каждом таком процессе на одиночном атоме генерируется одиночный фотон. Испускание одиночных фотонов может происходить спонтанно или через стимулированный процесс, все в зависимости от условий эксперимента. Как и в случае с одиночными ионами, одиночные нейтральные атомы идентичны, и разные импульсы от одного и того же источника и от разных источников неразличимы. Одиночные атомы обладают большой длиной когерентности, что означает, что фотоны, испускаемые этими атомами, могут сохранять фазовую корреляцию на больших временных интервалах.

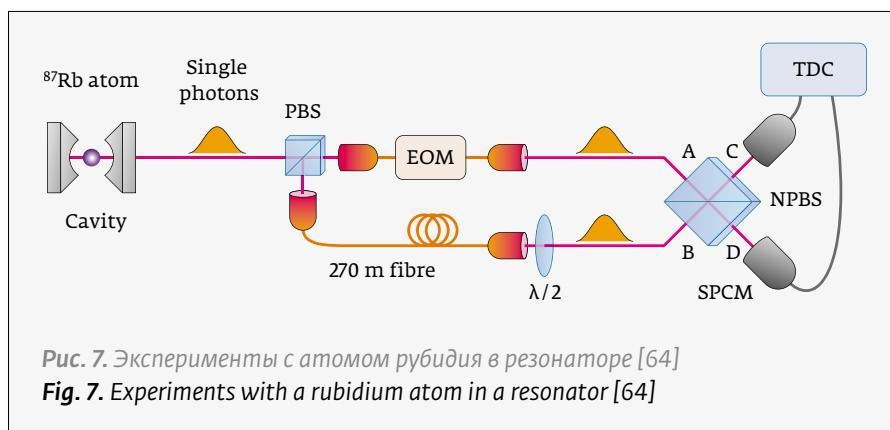


Рис. 7. Эксперименты с атомом рубидия в резонаторе [64]

Fig. 7. Experiments with a rubidium atom in a resonator [64]

emitted by these atoms can maintain phase correlation over long time intervals.

MONATOMIC EMITTER

Another approach may be as follows: single atoms are first captured and cooled inside an open magneto-optical trap. Then the trap is turned off (or periodically turned off and on, or the amplitude of the field in the trap is periodically modulated) and the cooled atoms alternately fall freely under the influence of gravity and one by one pass through a high-precision optical resonator tuned to the frequency of the radiative optical transition of atoms. The probability of photon emission in a resonator with a suitable frequency is significantly higher than in free space, due to the Purcell effect. The efficiency of single photon generation for this approach may be close to 1, but the implementation of a monatomic emitter requires serious experimental efforts. Narrow beams of atoms are also used, irradiation of which with a laser yields single-photon radiation.

Single photon sources based on ultracold atoms have significant disadvantages: high complexity of implementation in comparison with other methods of generating single photons, limited operating conditions, low generation rate, poor scalability. The creation of single photon sources based on ultracold atoms requires a complex experimental arrangement. The implementation of a single-photon source on ultracold atoms requires high stability of the system, precise adjustment and control of experimental conditions. Creating large arrays of single-photon sources based on ultracold atoms is becoming technically difficult and requires significant costs and efforts. The rate of generation of single photons based on ultracold atoms may be low, especially in comparison with some other methods such as spontaneous parametric scattering or generation through quantum dots.

25-27 СЕНТЯБРЯ 2024
г. Самара



**22-я международная
выставка-форум**

ПРОМЫШЛЕННЫЙ САЛОН

**Ваше оборудование —
наши покупатели**

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



СОЮЗ
МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
РОССИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

ЭКСПО-ВОЛГА
организатор выставок с 1986 г.

г. Самара, ул. Мичурина, 23а
тел.: (846) 207-11-24

www.expo-volga.ru



ОДНОАТОМНЫЙ ЭМИТТЕР

Другой подход может быть следующим: одиночные атомы сначала захватываются и охлаждаются внутри открытой магнитооптической ловушки. Потом ловушка выключается (или периодически выключается и включается, или амплитуда поля в ловушке периодически модулируется) и охлажденные атомы поочередно падают под действием силы тяжести и один за другим проходят через оптический резонатор высокой точности, настроенный на частоту излучательного оптического перехода атомов. Вероятность испускания фотона в подходящем по частоте резонаторе существенно выше, чем в свободном пространстве, благодаря эффекту Парселла. Эффективность генерации одиночных фотонов для этого подхода может быть близка к единице, но реализация одноатомного эмиттера требует серьезных экспериментальных усилий. Также используются узкие пучки атомов, облучение которых лазером дает на выходе однофотонное излучение.

Источники одиночных фотонов на основе одиночных атомов имеют существенные недостатки: высокая сложность реализации в сравнении с другими методами генерации одиночных фотонов, ограниченные рабочие условия, низкая скорость генерации, плохая масштабируемость. Создание источников одиночных фотонов на основе одиночных атомов требует сложной экспериментальной установки. Реализация однофотонного источника на одиночных атомах требует высокой стабильности системы, точной настройки и контроля условий эксперимента. Создание больших массивов источников одиночных фотонов на основе одиночных атомов становится технически сложным и требует значительных затрат и усилий. Скорость генерации одиночных фотонов на основе одиночных атомов может быть невелика, особенно в сравнении с некоторыми другими методами, такими как спонтанное параметрическое рассеяние или генерация через квантовые точки.

REFERENCES

Зачем нужны однофотонные источники

1. Развитие фотоники в России и мире: публичный аналитический доклад. – М.: Сфера Библио. 2016. 432 с. ISBN 978-5-9909093-0-4.
2. Рябцев И. И., Юркевичюс С. П., Гриценко А. Е. Проблемы и перспективы создания квантовых систем связи. Инноватика и экспертиза. 2020; 1 (29):2733. <https://doi.org/10.35264/1996-2274-2020-1-27-33>

Корреляционная функция второго порядка $g^{(2)}(\tau)$

3. Бычков С. Б., Глазов А. И., Зотов А. В., Тихомиров С. В. Методика и результаты исследования источника одиночных фотонов с помощью однофотонного фотодетектора на основе MRS-лавинного фотодиода. ВКБО-2021, стендовые доклады. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-428-429>
4. Hanbury Brown, R.; Twiss, R. Q. Correlation between Photons in two Coherent Beams of Light. *Nature*. 1956; 177 (4497): 27–29. <https://doi.org/10.1038/177027a0>

5. Schweickert L., Jöns K. D., Zeuner K. D., Covre da Silva S. F., Huang H., Lettner T., Reindl M., Zichi J., Trotta R., Rastelli A., Zwiller V. On-demand generation of background-free single photons from a solid-state source. *Applied Physics Letters*. 2018;112(9): 093106. <https://doi.org/10.1063/1.5020038>

Группировка, антигруппировка и когерентный источник

6. Paul H. Photon antibunching. *Reviews of Modern Physics*. 1982;54 (4): 1061–1102. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.54.1061>
7. Lo H. K., Ma X., Chen K. Decoy state quantum key distribution. *Phys. Rev. Lett.* 2005; 94, (23): 230504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.230504>

Ослабленный лазер как источник одиночных фотонов для КРК

8. Eisaman M. D., Fan J., Migdall A., Polyakov S. V. Invited Review Article: Single-photon sources and detectors. *Review of Scientific Instruments*. 2011; 82 (7): 071101–071101-25. <https://doi.org/10.1063/1.3610677>
9. Al-Kathiri S., Al-Khateeb W., Hafizulika M., Wahiddin M. R., Saharudin S. Characterization of mean photon number for key distribution system using faint laser. 2008. International Conference on Computer and Communication Engineering. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2008.4580803>

Измерение среднего числа фотонов в импульсе

10. Молотков С. Н. О секретности волоконных систем квантовой криптографии без контроля интенсивности квазиоднофотонных когерентных состояний. *Письма в ЖЭФТ*. 2015; 101(8):647–643. <https://doi.org/10.7868/S0370274X15080135>
11. Стандарт ETSI Group Specification QKD 011 V1.1.1 (2016-05) https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/011/01.01.01_60/gs_QKD011v010101p.pdf.

Контрольные состояния для противодействия атаке с расщеплением по числу фотонов

12. Сущев И. Атаки на системы квантового распределения ключей. 2023. *Квантовые технологии информационной безопасности*. <https://quantum-crypto.ru/>. <https://quantum-crypto.ru/articles/ataki-na-sistemy-kvantovogo-raspredeleniya-klyuchey>.
13. Hwang W.-Y. Quantum Key Distribution with High Loss: Toward Global Secure Communication. *Phys. Rev. Lett.* 20003; 91 (5): 057901. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.91.057901>
14. Lo H.-K., Ma X., Chen K. Decoy State Quantum Key Distribution. *Physical Review Letters*. 2005;94 (23): 230504. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.94.230504>

Какие требования к идеальному однофотонному источнику?

15. Lounis B., Orrit M. Single-photon sources. *Reports on Progress in Physics*. 2005;68(5):1129–1179. <https://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/68/5/R04>
16. Попов В. Г., Криштоп В. Г., Тарелкин С. А., Корель И. И. Комбинационное рассеяние света квазиоднофотонных импульсов в оптоволокне с накачкой. Физика и техника полупроводников. 2020; 54: 727. <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2020.08.49631.07>
17. Esfandyaropour V., Langrock C., Fejer M. Cascaded downconversion interface to convert single-photon-level signals at 650 nm to the telecom band. *Optics Letters*. 2018;43: 5655–5658. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005655>
18. Hong C. K., Ou Z. Y., Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Phys. Rev. Lett.* 1987;59 (18): 2044–2046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.2044>
19. Somaschi N., Giesz V., De Santis L., Loredo J. C., Almeida M. P., Hornecker G., Portalupi S. L., Grange T., Anton C., Demory J. Near-optimal single-photon sources in the solid state. *Nature Photonics*. 2016; 10 (5): 340–345. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.23>
20. X. Ding, Y. He, Z.-C. Duan, N. Gregersen, M.-C. Chen, S. Unsleber, S. Maier, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, C.-Y. Lu, J.-W. Pan. On-demand single photons with high extraction efficiency and near-unity indistinguishability from a resonantly driven quantum dot in a micropillar. *Phys. Rev. Lett.* 2016; 116 (2): 020401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.010401>

Основные типы источников одиночных фотонов

21. Guibert H. E., Gauthier D. J. Enhancing Heralding Efficiency and Biphoton Rate in Type-I Spontaneous Parametric Down-Conversion. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2015;21(3):215–224,. 6400610. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2375161>
22. Jabir M. V., Samanta G. K. Robust, high brightness, degenerate entangled photon source at room temperature. *Scientific Reports* 7. 2017; 12613. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12709-5>
23. Shukhin A., Latypov I. Z., Shkalikov A. V., Kalachev A. A. Simulating Single-Photon Sources Based on Backward-Wave Spontaneous Parametric Down-Conversion in a Periodically Poled KTP Waveguide. *EPJ Web of Conferences*. 2015;103: 10009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201510310009>



23-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ

8–11
ОКТЯБРЯ 2024

МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО
ПАВИЛЬОН 1

- СОТНИ НОВИНОК ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СВАРКИ, РЕЗКИ, ПАЙКИ
- ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРОДУКЦИИ
В ДЕЙСТВИИ
- НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЧЕМПИОНАТЫ
ПО СВАРКЕ И КОНФЕРЕНЦИИ

ПОЛУЧИТЕ БИЛЕТ
ПО ПРОМОКОДУ
tehnosphera



Одновременно и на одной площадке с

2-й Международной выставкой
крепежа и оснастки

FASTENEX

Международной выставкой
оборудования и инструмента

TOOL MASH

Посещение выставок бесплатно по билету на Weldex



Организатор
Organiser



+7 499 750 08 28
WELDEX@ITE.GROUP

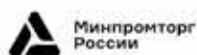


24. Massaro M., Meyer-Scott E., Montaut N., Herrmann H., Silberhorn C. Improving SPDC single-photon sources via extended heralding and feed-forward control. *New Journal of Physics*. 2019; 21:053038. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/ab1ec3>
25. Goldschmidt E. A., Eisaman M. D., Fan J., Polyakov S. V., Migdall A. Spectrally bright and broad fiber-based heralded single-photon source. *Phys. Rev. A*. 2008;78: 013844. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.78.013844>
26. Rottwitt K., Koefoed J. G., Christensen E. N. Photon-Pair Sources Based on Intermodal Four-Wave Mixing in Few-Mode Fibers. *Fibers*. 2018;6. <https://doi.org/10.3390/fib6020032>
27. Wu E., Rabreau J. R., Roger C., Treussart F., Zeng H., Grangier P., Prawer S., Roch J.-F. Room temperature triggered single-photon source in the near infrared. *New Journal of Physics*. 2007; 9(12):434. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/9/12/434>
28. Alleaume R., Treussart F., Messin G., Dumeige Y., Roch J.-F., Beveratos A., Bourri-Tualle R., Poizat J.-P., Grangier P. Experimental open-air quantum key distribution with a single-photon source. *New Journal of Physics*. 2004;6:92. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/092>
29. Kako S., Santori C., Hoshino K., Gotzinger S., Yamamoto Y., Arakawa Y. A gallium nitride single-photon source operating at 200K. *Nature Materials*. 2006;5:887. <https://doi.org/10.1038/nmat1763>
30. Strauf S., Stoltz N. G., Rakher M. T., Coldren L. A., Petroff P. M., Bouwmeester D. High-frequency single-photon source with polarization control. *Nature Photonics*. 2007;1:704–708. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.227>
31. Huber M., Reindl S. F., Silva C. D., Schimpf C., Martín-Sánchez J., Huang H., Pireddi G., Edlinger J., Rastelli A., Trotta R. Strain-Tunable GaAs Quantum Dot: A Nearly Dephasing-Free Source of Entangled Photon Pairs on Demand. *Phys. Rev. Lett.* 2018;121: 033902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.033902>
32. Hennrich M., Legero T., Kuhn A., Rempe G. Photon statistics of a non-stationary periodically driven single-photon source. *New Journal of Physics*. 2004; 6: 86. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/086>
33. Higginbottom D. B., Slodička L., Araneda G., Lachman L., Filip R., Hennrich M., Blatt R. Pure single photons from a trapped atom source. *New Journal of Physics*. 2016;18(9):093038. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/18/9/093038>
34. Maurer C., Becher C., Russo C., Eschner J., Blatt R. A single-photon source based on a single Ca⁺ ion. *New Journal of Physics*. 2004;6(1):94. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/094>
35. Steiner M., Hartschuh A., Korlacki R., Meixner A. J. Highly efficient, tunable single photon source based on single molecules. *Appl. Phys. Lett.* 2007;90:183122. <https://doi.org/10.1063/1.2736294>
36. Chen S., Chen Y.-A., Strassel T., Yuan Z.-S., Zhao B., Schmiedmayer, Pan J.-W. Deterministic and Storable Single-Photon Source Based on a Quantum Memory. *J. Phys. Rev. Lett.* 2006;97:173004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.173004>
37. Panyukov I. V., Shishkov V. Yu., Andrianov E. S. Heralded single-photon source based on an ensemble of Raman-active molecules. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2022;39: 2138–2148. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.457400>
38. Signorini S., Pavese L. On-chip heralded single photon sources. *AVS Quantum Sci.* 2020;2 (4): 041701. <https://doi.org/10.1116/5.0018594>
39. Kaneda F., Garay-Palmett K., U'Ren A. B., Kwiat P. G. Heralded single-photon source utilizing highly nondegenerate, spectrally factorable spontaneous parametric downconversion. *Opt. Express*. 2016;24: 10733–10747. <https://doi.org/10.1364/OE.24.010733>
40. Schiavon M., Vallone G., Ticoczi F., Villoresi P. Heralded single-photon sources for QKD applications. *Phys. Rev. A*. 2016;93:012331. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.012331>
- Основные платформы, используемые для изготовления ИОФ
41. Миронов Ю. Б., Казанцев С. Ю., Шаховой Р. А., Колесников О. В., Машковцева Л. С., Зайцев А. И., Коробов А. В. Анализ перспектив развития источников одиночных фотонов в системах квантового распределения ключей. *Научно-емкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2021;13(6):22–33. <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2021-13-6-22-33>
- Источники одиночных фотонов на основе одиночных ионов
42. Cirac J., Zoller P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. *Phys. Rev. Lett.* 1995;74: 4091. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4091>
43. Leibfried D., Blatt R., Monroe C., Wineland D. Quantum dynamics of single trapped ions. *Rev. Mod. Phys.* 2003;75 (1): 281–324. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.281>
44. Stick D., Hensinger W., Olmschenk S., Madsen M. J., Schwab K., Monroe C. Ion trap in a semiconductor chip. *Nature Physics*. 2006;2: 36–39. <https://doi.org/10.1038/nphys171>
45. Pogorelov I., Feldker T., Marciniak Ch.D., Postler L., Jacob G., Kriegelsteiner O., Podlesnic V., Meth M., Negnevitsky V., Stadler M., Höfer B., Wächter C., Lakhmanskij K., Blatt R., Schindler P., Monz T. Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator. *PRX Quantum*. 2021;2: 020343. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.020343>
46. Blatt R., Roos C. F. Quantum simulations with trapped ions. *Nature Physics*. 2012;8(4): 277–284. <https://doi.org/10.1038/nphys2252>
47. Tian Y., Higgs J., Li A., Barney B., Austin D. E. How far can ion trap miniaturization go? Parameter scaling and space-charge limits for very small cylindrical ion traps. *J. Mass Spectrom.* 2014; 49: 233–240. <https://doi.org/10.1002/jms.3268>
48. Maurer C., Becher C., Russo C., Eschner J., Blatt R. A single-photon source based on a single Ca⁺ ion. *New J. Phys.* 2004;6: 94. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/094>
49. Keller M., Lange B., Hayasaka K., Lange W., Walther H. Continuous generation of single photons with controlled waveform in an ion-trap cavity system. *Nature*. 2004;431: 1075. <http://dx.doi.org/10.1038/nature02961>
50. Barros H. G., Stute A., Northup T. E., Russo C., Schmidt P. O., Blatt R. Deterministic single-photon source from a single ion. *New J. Phys.* 2009;11: 103004. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/103004>
51. Minnegaleev M. M., Dyakonov I. V., Gerasimov K. I., Kalinkin A. A., Kulik S. P., Moiseev S. A., Saygin M. Yu., Urmancheev R. V. Observation and investigation of narrow optical transitions of 167Er³⁺ ions in femtosecond laser printed waveguides in 7LiYF₄ crystal. *Laser Physics Letters*. 2018; 15(4): 045207. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaa6a6>
52. Kielpinski D., Monroe C., Wineland D. Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer. *Nature (London)*. 2002;417:709. <https://www.nature.com/articles/nature00784>
53. Riebe M., Monz T., Kim K., Villar A. S., Schindler P., Chwalla M., Hennrich M., Blatt R. Deterministic entanglement swapping with an ion-trap quantum computer. *Nature Physics*. 2008; 4: 839. <https://doi.org/10.1038/nphys1107>
54. Home J. P., Hanneke D., Jost J. D., Amini J. M., Leibfried D., Wineland D. J. Complete Methods Set for Scalable Ion Trap Quantum Information Processing. *Science*. 2009;325: 1227. <https://doi.org/10.1126/science.1177077>
- Однофотонные источники на основе одиночных атомов
55. Hennrich M., Legero T., Kuhn A., Rempe G. Photon statistics of a non-stationary periodically driven single-photon source. *New J. Phys.* 2004;6:86. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/086>
56. Hijlkema M., Weber B., Specht H. P., Webster S. C., Kuhn A., Rempe G. A single-photon server with just one atom. *Nature Physics*. 2007;3: 253. <http://dx.doi.org/10.1038/nphys569>
57. Kuhn A., Hennrich M., Rempe G. Deterministic Single-Photon Source for Distributed Quantum Networking. *Phys. Rev. Lett.* 2002;89:067901. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.067901>
58. Wilk T., Webster S. C., Specht H. P., Rempe G., Kuhn A. Polarization-Controlled Single Photons. *Phys. Rev. Lett.* 2007;98: 063601. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.063601>
59. Dayan B., Parkins A. S., Aoki T., Ostby E. P., Vahala K. J., Kimble H. J. A Photon Turnstile Dynamically Regulated by One Atom. *Science*. 2008;319:1062. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1152261>
60. Aoki T., Parkins A. S., Alton D. J., Regal C. A., Dayan B., Ostby E., Vahala K. J., Kimble H. J. Efficient Routing of Single Photons by One Atom and a Microtoroidal Cavity. *Phys. Rev. Lett.* 2009;102: 083601. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.083601>
61. Латышев С. Нобелевские премии 1997 года. Очень холодные атомы. *Наука и жизнь*. 1998(1). <https://www.nkj.ru/archive/articles/10172>
62. Grajcar M., Van der Ploeg S. H. W., Izmailov A., Il'ichev E., Meyer H.-G., Fedorov A., Shnirman A., Schön G. Sisyphus cooling and amplification by a superconducting qubit. *Nature Physics*. 2008;4(8):612–616. <https://doi.org/10.1038/nphys1019>
63. Бобров И. Б., Самойленко С. Р., Страупе С. С., Кулик С. П. Динамические голограммические ловушки для одиночныхнейтральных атомов. Программа Всероссийской научной конференции «Физика ультрахолодных атомов – 2018». 17–19 декабря 2018 года, Академгородок. Новосибирск, проспект Лаврентьева 13. Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Сайт конференции: www.isp.nsc.ru/quantum18
64. Aljunid S. A., Chng B., Paesold M., Maslennikov G., Kurtsiefer C. Interaction of light with a single atom in the strong focusing regime. *Journal of Modern Optics*. 2011;58: 299–305. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.522780>

21–24.10.2024



ТЕХНОФОРУМ



www.technoforum-expo.ru

**«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»**

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Реклама



12+

65 лет ЭКСПОЦЕНТР