



Фотоника полупроводниковых квантовых точек: прикладные аспекты

А. И. Аржанов^{1,2,3}, А. О. Савостьянов^{1,2,3}, К. А. Магарян¹,
К. Р. Каримуллин^{1,2,3}, А. В. Наумов^{1,2,3}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

² Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

³ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Троицк, Москва, Россия

Полупроводниковые нанокристаллы (квантовые точки, КТ) обладают уникальными фотофизическими свойствами, что открывает широкие возможности их прикладного использования в методах и инструментах современной фотоники. В данной статье рассматриваются возможные приложения КТ. Обсуждаются как существующие устройства, так и перспективы разработки новых методов и приборов фотоники. Рассмотрены инновационные подходы применения КТ в различных областях современных фотонных технологий: оптоэлектронике, биофизике, квантовой оптике, сенсорике, фотовольтаике.

Ключевые слова: квантово-размерный эффект, квантовые точки, светодиоды на квантовых точках, интегральная фотоника, лазеры на квантовых точках, оптические переключатели, детекторы на квантовых точках, фотовольтаика, флуоресцентная наноскопия, биомаркеры, адресная доставка лекарств

Статья получена: 10.01.2022

Статья принята к публикации: 24.01.2022

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые нанокристаллы (квантовые точки, КТ) обладают уникальными фотофизическими свойствами, зависящими от их морфологии и химического состава, а также термодинамических параметров и свойств окружающей среды (характеристики электромагнитного поля, кислотность, влажность, химический состав и т.п.) [1]. Найден-

Photonics of Semiconductor Quantum Dots: Applied Aspects

A. I. Arzhanov^{1,2,3}, A. O. Savostianov^{1,2,3}, K. A. Magaryan¹,
K. R. Karimullin^{1,2,3}, A. V. Naumov^{1,2,3}

¹ Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

² Institute of Spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia

³ Lebedev Physical Institute, RAS, Troitsk Branch, Troitsk, Moscow, Russia

Semiconductor nanocrystals (quantum dots, QDs) have unique photophysical properties, which opens up wide possibilities for their applications in the methods and tools of modern photonics. This article discusses possible applications of QDs. Both existing devices and prospects for the development of new methods and photonics devices are discussed. Innovative approaches to the use of quantum dots in various areas of modern photonic technologies are considered: optoelectronics, biophysics, quantum optics, sensorics, photovoltaics.

Keywords: quantum size effect, quantum dots, quantum dot LEDs, integrated photonics, quantum dot lasers, optical switches, quantum dot detectors, photovoltaics, fluorescence nanoscopy, biolabels, targeted drug delivery

Received on: 10.01.2022

Accepted on: 24.01.2022

INTRODUCTION

Semiconductor nanocrystals (quantum dots, QDs) have unique photophysical properties that depend on their morphology and chemical composition, as well as thermodynamic parameters and environmental properties (electromagnetic field, pressure, acidity, humidity, chemical composition, etc.) (1). The fundamental regularities found in the studies (these issues were covered in detail in the first part of this review in (1)), which determine these relationships, make it possible to carry out the engineering and controlled synthesis of QDs and nanocomposites based on them with desired properties. Thus, QDs are increasingly

ные в исследованиях фундаментальные закономерности (подробно эти вопросы были освещены в первой части данного обзора в [1]), определяющие эти связи, позволяют осуществлять инжиниринг и управляемый синтез КТ и нанокompозитов на их основе с заданными свойствами. Благодаря этому обстоятельству КТ все чаще находят применения в различных отраслях науки и технологиях, и, в первую очередь, в различных приложениях фотоники. Условно можно выделить несколько основных областей применения КТ (см. схему на рис. 1):

- Источники света (включая светоизлучающие диоды, лазерные источники, световые конверторы, источники неклассического света).
- Дисплеи и многокомпонентные экраны.
- Люминесцирующие маркеры – нанометки для различных приложений, включая нанодиагностику конденсированных сред и нанокompозитов, медицинскую диагностику и терапию, адресную доставку лекарств.
- Новые наноматериалы, включая квазидвумерные наноструктуры, природоподобные материалы (например, нейроморфные структуры).
- Световые преобразователи и конверторы, включая элементную базу нелинейной оптики и спектроскопии, световые переключатели (оптические транзисторы), детекторы на различные диапазоны спектра электромагнитного излучения.
- Элементная база квантовых технологий, включая источники неклассического света, квантовую память, квантовые сенсоры.
- Элементная база солнечной энергетики (фотовольтаические элементы).

В данной статье эти направления прикладного использования КТ будут рассмотрены подробно с отсылкой к фундаментальным характеристикам новых материалов, описанных в недавней статье [1].

ИСТОЧНИКИ СВЕТА И LED

КТ могут быть использованы в качестве ярких излучателей как альтернатива органическим люминофорам [2]. Светодиоды на основе КТ за счет высокого квантового выхода обладают более высокой эффективностью

being used in various branches of science and technology, and, first of all, in various applications of photonics. Conventionally, there are several main areas of application of QDs (see the diagram in Fig. 1):

- Light sources (including light-emitting diodes, laser sources, light converters, non-classical light sources).
- Displays and multi-component screens.
- Luminescent labels – nanotags for various applications, including nanodiagnosics of condensed matter, medical diagnostics and therapeutics, targeted drug delivery.
- New nanomaterials for photonics, including quasi-two-dimensional nanostructures, nature-like materials (e. g., neuromorphic structures).
- Light converters, including the basic elements of nonlinear optics and spectroscopy, light switches (optical transistors), detectors for various spectral range.
- Basic elements of quantum technologies, including non-classical light sources, quantum memory and quantum sensors.
- Basic elements of solar energy (photovoltaic cells).

In this article, these applications of QDs will be considered in detail, regarding to the fundamental characteristics of new materials described in our recent paper (1).

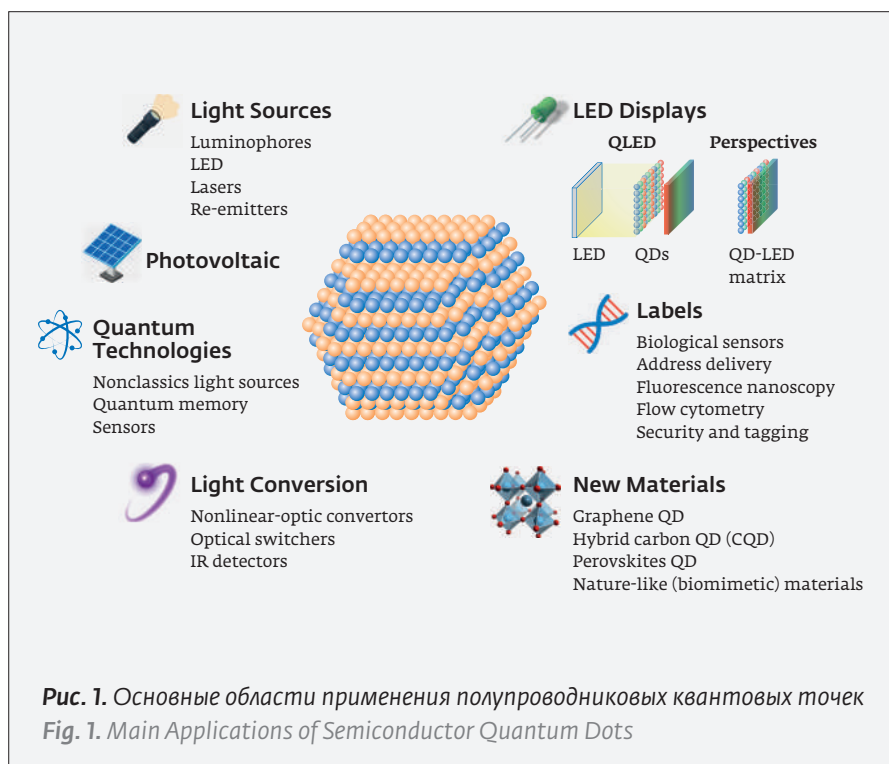


Рис. 1. Основные области применения полупроводниковых квантовых точек
Fig. 1. Main Applications of Semiconductor Quantum Dots



по сравнению с органическими соединениями [3]. Органические люминофоры характеризуются широким спектром излучения, что ограничивает возможности производителей точно настраивать цветовую температуру источника путем смешения излучения нескольких люминофоров (например, синего и желтого). Спектральными свойствами люминофоров на основе КТ можно управлять благодаря эффекту размерного квантования, подбирая спектр свечения за счет использования заданного распределения размеров КТ. Такой люминофор можно возбуждать обычным синим светодиодом благодаря наличию широкого спектра поглощения.

Светодиоды на основе КТ находят применение в быту, став основой технологии, пришедшей на замену привычным органическим ЖК-дисплеям. КТ, используемые в качестве источников излучения в технологии QLED, позволяют создавать дисплеи с высокой яркостью и повышенной цветопередачей. Уже ведутся разработки нового поколения дисплеев (гибкие, прозрачные) на основе КТ, интегрированных с модулями беспроводной связи для использования в носимой электронике [4]. Также продемонстрированы возможности создания носимых устройств с дисплеями на основе массивов КТ для отображения различных биофункциональных параметров живых организмов (например, дистанционная медицинская диагностика). Массивы из КТ, выращенных на эластомерной поверхности, могут прикрепляться к коже и имеют свойство растяжения и низкого энергопотребления. Данное устройство способно визуально отображать сигналы движения тела и температуры кожи от периферийных датчиков [5]. Основным недостатком, ограничивающим широкое внедрение данной технологии, является то обстоятельство, что массив КТ переизлучает свет внешнего источника возбуждения (матрицы светодиодов), а не является самостоятельным источником излучения. В настоящее время ведется активный поиск способов создания отдельных RGB пикселей на основе электролюминесцирующих полупроводниковых нанокристаллов, однако на сегодняшний день технология ограничивается лишь использованием наночастиц в качестве преобразователей частоты излучения [6].

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ДЕТЕКТОРЫ СВЕТА

Поговорим о возможностях преобразования излучения с использованием КТ в качестве детекторов. В настоящее время наибольшее распространение в различных фотоприемниках и матричных сенсорах, функционирующих в видимом диа-

LIGHT SOURCES AND LED

QDs can be used as bright light emitters as an alternative to organic phosphors (2). Due to their high quantum yield, LEDs based on QDs (QLEDs) are more efficient than organic compounds (3). Organic phosphors are characterized by a wide emission spectrum, what limits the ability of manufacturers to fine-tune the color temperature of a light source by mixing emission of several phosphors (e. g., blue and yellow). The spectral properties of QD-based phosphors can be controlled due to the quantum size effect by selecting the luminescence spectrum using a given size distribution of QDs. Such an emitter can be excited with a conventional blue LED due to the presence of a wide absorption spectrum.

QLEDs are, becoming the basis of a technology that has come to replace the LC displays. QDs used as radiation sources in QLED technology make it possible to create displays with high brightness and enhanced color rendering. The development of a new generation of displays (flexible, transparent) based on QDs for wearable wireless electronics is already underway (4). The possibilities of creating wearable devices with displays based on QDs arrays for displaying various biofunctional parameters of living organisms (e. g., remote medical diagnostics) have also been demonstrated. QDs arrays grown on an elastomeric surface can adhere to the human skin and exhibit stretchable properties and low power consumption. This device is capable of visually displaying body movement and skin temperature signals from peripheral sensors (5). The main disadvantage that limits the wide introduction of this technology is the fact that the QD array re-radiates light from an external excitation source (an array of LEDs), and is not an independent source of radiation. Currently, there is an active search for ways to create individual RGB pixels based on electroluminescent semiconductor nanocrystals, but today the technology is limited by using nanoparticles as radiation converters (6).

LIGHT CONVERTERS AND DETECTORS

Let's discuss the possibilities of radiation conversion using QDs as detectors. At present, elements based on silicon, or other semiconductor heterostructures, are most widely used in various photodetectors and matrix sensors operating in the visible spectral range. However, such detectors have a limited operating spectral range from 400 to 1000 nm. Extending the range to the near (1.3–1.5 μm) and middle (20–200 μm) IR regions can become possible due to covering photoactive Si surface with QDs (7). Interest in promoting

пазоне, получили элементы на основе кремния или других полупроводниковых гетероструктур. Однако такие детекторы имеют ограниченный рабочий спектральный диапазон от 400 до 1000 нм. Расширение диапазона в ближнюю (1,3-1,5 мкм) и среднюю (20-200 мкм) ИК-область может стать возможным благодаря использованию КТ на фотоактивной поверхности Si [7]. Интерес к продвижению высокочувствительной детекторной техники в ИК-диапазон связан с бурным развитием оптоэлектронных технологий и телекоммуникаций, новыми задачами квантовой оптики и неинвазивной медицинской диагностики.

Работы по созданию таких детекторов ведутся в настоящее время, в частности удалось создать такие преобразователи не только с использованием эпитаксиальных КТ на наногетероструктурах [8], но и коллоидных КТ [9]. В исследованиях было показано, что осаждение коллоидных КТ на поверхность кремния позволяет уменьшить окно прозрачности полупроводника в ИК-диапазоне за счет создания примесных состояний в запрещенной зоне кремния. Учитывая тот факт, что коллоидные КТ достаточно просты в изготовлении и обладают широкими возможностями по управлению спектральными свойствами, можно полагать, что исследования в данном направлении могут дать мощный импульс для совершенствования кремниевых оптоэлектронных устройств.

Значительный прогресс в разработке детекторов света достигнут при использовании коллоидных квантовых точек PbS, PbSe, Bi₂S₃, In₂S₃ [10], что применяется в гибкой электронике и CMOS-технологиях.

Будучи легко интегрируемыми в различные метаматериалы и гетероструктуры, КТ позволяют перейти к конструированию нового поколения устройств интегральной фотоники. Так в [11] продемонстрирована возможность создания высокочувствительной камеры на средний ИК-диапазон на основе массива плазмонных структур, инте-

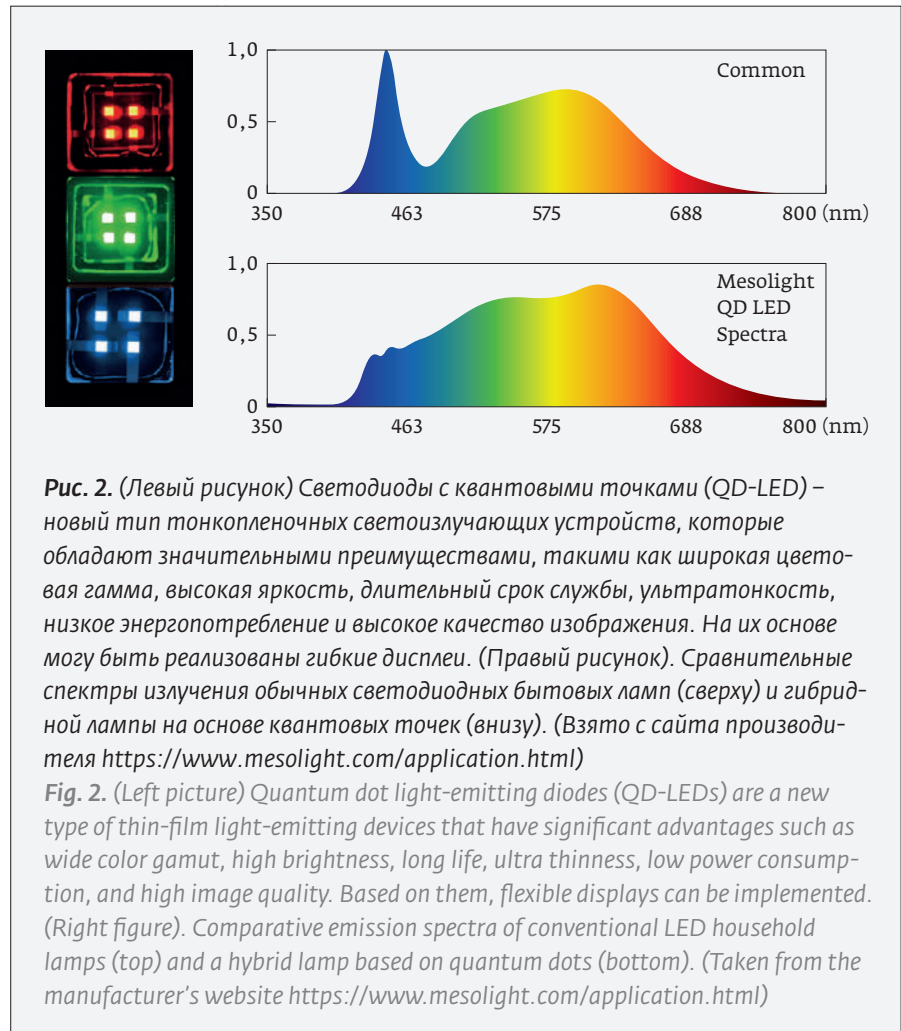


Рис. 2. (Левый рисунок) Светодиоды с квантовыми точками (QD-LED) – новый тип тонкопленочных светоизлучающих устройств, которые обладают значительными преимуществами, такими как широкая цветовая гамма, высокая яркость, длительный срок службы, ультратонкость, низкое энергопотребление и высокое качество изображения. На их основе могут быть реализованы гибкие дисплеи. (Правый рисунок). Сравнительные спектры излучения обычных светодиодных бытовых ламп (сверху) и гибридной лампы на основе квантовых точек (внизу). (Взято с сайта производителя <https://www.mesolight.com/application.html>)

Fig. 2. (Left picture) Quantum dot light-emitting diodes (QD-LEDs) are a new type of thin-film light-emitting devices that have significant advantages such as wide color gamut, high brightness, long life, ultra thinness, low power consumption, and high image quality. Based on them, flexible displays can be implemented. (Right figure). Comparative emission spectra of conventional LED household lamps (top) and a hybrid lamp based on quantum dots (bottom). (Taken from the manufacturer's website <https://www.mesolight.com/application.html>)

highly sensitive detector technology in the IR range is associated with the rapid development of optoelectronic technologies and telecommunications, appearance of the new challenges of quantum optics and non-invasive medical diagnostics.

The development of such detectors is still underway, in particular, it is possible to create light converters not only using epitaxial QDs in nanoheterostructures (8), but also using colloidal QDs (9). It was shown, that the deposition of colloidal QDs on the silicon surface makes it possible to reduce the transparency window of the semiconductor in the IR range due to the creation of impurity states in the bandgap of silicon. Taking into account the fact that colloidal QDs are quite simple to manufacture and have wide possibilities for controlling spectral properties, it can be assumed that research in this direction can give a powerful stimulus to the improvement of silicon optoelectronic devices.

Significant progress in the development of light detectors has been achieved using colloidal QDs PbS,



грированных с системой квантовых точек внутри квантовых ям.

Системы с КТ могут быть использованы и для более сложного преобразования световых потоков. Так в [12] было предложено использовать экситонные уровни полупроводниковых КТ типа CdSe/CdS/ZnS для записи и считывания двухквантовых транзиент-голограмм. В свою очередь нанометровые размеры КТ позволяют рассматривать их использование в фотонных и оптикоэлектронных преобразователях интегральной оптики. Например, в [13] был рассмотрен эффект плазмонного переключения для поверхностных плазмон-поляритонов в графеновом волноводе, интегрированном с штыревым нанорезонатором с КТ. Обнаруженный эффект потенциально обеспечивает возможность управления световыми потоками ИК-диапазона, локализованных в устройстве с размерами 20 нм.

СЕНСОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Высокая чувствительность оптико-спектральных параметров КТ к характеристикам внешнего окружения открывает возможность разработки на их основе различных сенсорных устройств. Например, селективное изменение физико-химических свойств композитов с КТ при контакте с различными веществами положено в основу газовых сенсоров (NO₂) [14].

Температурная зависимость спектральных характеристик КТ может стать основой температурных сенсоров [15, 16] и наносенсоров [17, 18].

Создание композитов с КТ обеспечивает существенное повышение эффективности работы фотокаталитических систем [19].

Сопряжение квантовых точек со сложными нанокompозитами дает возможность высокочувствительного детектирования других физико-химических параметров сред, например в [20] предложено использовать композит полимер-КТ-оксид графена в качестве высокочувствительного рН-сенсора.

Еще один пример использования квантовых точек в качестве сенсоров материальных характеристик среды связан с эффектами локального поля, проявляющимися в зависимости времени жизни возбужденного состояния КТ от значения показателя преломления среды (диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости) [21, 22]. В связи с этим, люминесцирующие КТ могут быть использованы в оригинальной технике микро-рефрактометрии для определения показателя преломления среды и картирования его флуктуаций, в т. ч. на субмикрометровых масштабах [23, 24].

PbSe, Bi₂S₃, In₂S₃ (10), that are used in flexible electronics and CMOS technologies.

Being easily combined with various metamaterials and heterostructures, QDs make it possible to proceed to the design of a new generation integrated photonics devices. Thus, in (11), the possibility of creating a highly sensitive camera for the mid-IR range based on an array of plasmonic structures integrated with a system of QDs included in quantum wells was demonstrated.

QDs-based structures can also be used for more complex conversion of light fluxes. Thus, in (12), it was proposed to use semiconductor CdSe/CdS/ZnS QDs exciton levels for writing and reading two-quantum transient holograms. In turn, the nanometer dimensions of QDs allow to use it in photonic and optoelectronic converters of integrated optics. For example, in (13), the effect of plasmon switching was considered for surface plasmon polaritons in a graphene waveguide integrated with a pin nanocavity with QDs. The detected effect potentially provides the ability to control the light fluxes of the IR range, localized in a device with a size of 20 nm.

SENSOR TECHNOLOGIES

The high sensitivity of QD optical parameters to the characteristics of the external environment opens up the possibility of developing various QD based sensor devices. For example, the selective change in the physical and chemical properties of composites with QDs upon contact with various substances is the basis of gas sensors (e. g. NO₂) (14).

The temperature dependence of the spectral characteristics of QDs can become the basis for temperature sensors (15, 16) and nanosensors (17, 18).

The creation of composites with QDs provides a significant increase in the efficiency of photocatalytic systems (19).

The conjugation of QDs with complex nanocomposites enables highly sensitive detection of other physicochemical parameters of media; e. g., it was proposed in (20) to use a polymer-QD-graphene oxide composite as a highly sensitive pH sensor.

Another example of QD usage as sensors of the material characteristics of a medium is associated with local field effects, which manifest themselves in the dependence of the lifetime of the excited state of a QD on the value of the refractive index of the medium (permittivity, magnetic susceptibility) (21, 22). In this regard, luminescent QDs can be used in the original micro-refractometry technique to determine the refractive index of a medium and map its fluctuations, including on the sub-micrometer scale (23, 24).



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА (ФОТОВОЛЬТАИКА)

В последние годы во всем мире активно развиваются технологии солнечной энергетики. До самого последнего времени основой солнечных панелей является кремний, именно на его основе разработаны и внедрены в реальный сектор экономики наиболее эффективные преобразователи излучения, используемые в солнечной энергетике. По данным Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (NREL) (рис. 3) кремниевые фотовольтаические ячейки обладают достаточно высокой эффективностью преобразования энергии (до 27,6%) [25]. Инжиниринг же многопереходных фотовольтаических элементов обеспечивает увеличение эффективности преобразования вплоть до 47%.

В то же время следует отметить существенные проблемы кремниевой оптоэлектроники – дороговизна и сложность производства.

На сегодняшний день наблюдается интенсивный рост общей мощности генерации электроэнергии с использованием солнечных электростанций (рис. 4). При этом растущие мощности и без того энерго- и ресурсозатратного полупроводникового производства (кремниевых фотовольтаических элементов) приводят к изменению климата на планете, в связи с чем остро встает проблема поиска новых материалов для изготовления солнечных ячеек.

Все чаще в качестве основы светопреобразующих элементов (фотовольтаических ячеек) выступают полупроводниковые нанокристаллы – КТ и композиты (в том числе, гибридные) на их основе. Благодаря наличию широкого спектра поглощения КТ могут эффективно поглощать от УФ- до дальнего ИК-диапазона спектра электромагнитного излучения, что делает их перспективными для использования в солнечной энергетике. КТ уже сейчас занимают определенную нишу в этой области, и с каждым годом эффективность преобразования энергии с их использованием растет. Согласно [26], в настоящее время достигнуто значение эффективности 16,6% для коллоидных перовскитных КТ. Свойства коллоидных растворов нанокристаллов позволяют использовать их для изготовления экзотических фотовольтаических материалов (например, гибких солнечных элементов) [27]. На сегодняшний день существует множество методов изготовления солнечных панелей из коллоидных растворов, среди которых особо следует выделить технологию roll-to-roll (R2R) [28]. Суть метода заключается в осаждении коллоидных растворов путём

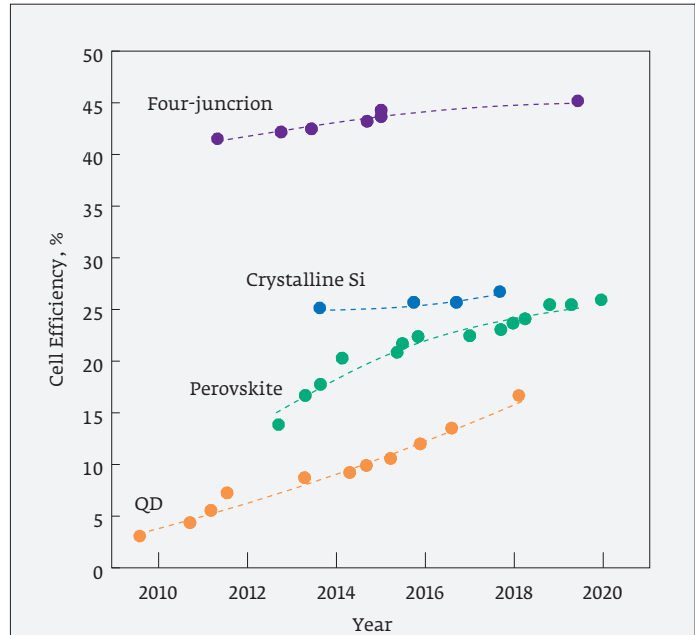


Рис. 3. Данные Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (NREL) для эффективности преобразования энергии солнечного света для разных типов фотовольтаических элементов. (адаптированные данные из <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>)
Fig. 3. Data from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) for solar energy conversion efficiency for different types of photovoltaic cells. (adapted data from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>)

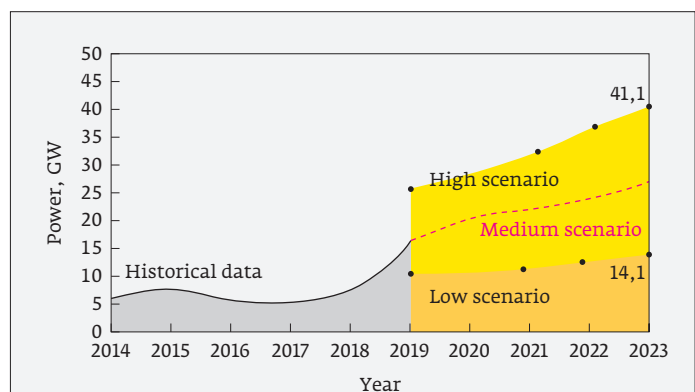


Рис. 4. Данные о объемах солнечной генерации электроэнергии в мире и прогноз на ближайшие годы от Европейской ассоциации солнечной энергетики SolarPower Europe (адаптированы из <https://www.solarpowereurope.org/solarpower-europe-newsletter-december/articlefig02/>)
Fig. 4. Data on the volume of solar electricity generation in the world and forecast for the coming years from the European Solar Energy Association SolarPower Europe (adapted from <https://www.solarpowereurope.org/solarpower-europe-newsletter-december/articlefig02/>)



шаберного нанесения, напыления или инъекционного нанесения коллоидных растворов на гибкую основу с последующим запеканием для получения однородного слоя фотоактивного вещества. Благодаря такой технологии удалось не только создать ультратонкие солнечные элементы, но и существенно удешевить производство фотовольтаических элементов на основе коллоидных КТ.

ЛАЗЕРЫ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

За минувшие шесть десятков лет после изобретения лазера полупроводниковые материалы прекрасно зарекомендовали себя в качестве лазерных сред. После значительного прогресса в синтезе коллоидных КТ в середине 90-х годов вопрос о перспективах их применения для изготовления высокоэффективных, но в то же время крайне компактных лазерных сред, встал особенно остро. Основные преимущества нанокристаллов относительно традиционных объемных материалов, так или иначе, связаны с эффектами размерного квантования, позволяющими достичь достаточно низкого значения порога лазерной генерации при высокой термостабильности и возможности подстраивать длину волны излучения за счет использования КТ различных размеров.

Исследования возможностей лазерной генерации в системах на основе КТ были начаты достаточно давно, и в конце 1990-х прототипы таких лазеров увидели свет [29,30]. Выяснилось, однако, что достижение генерации в полупроводниковых нанокристаллах является весьма сложной задачей. Для создания инверсной заселенности в КТ необходимо возбудить как минимум пару экситонов. Казалось бы, этого не сложно добиться, возбуждая КТ мощными фемтосекундными лазерными импульсами, однако, как обнаружилось, экситоны в КТ размера порядка нескольких нанометров способны достаточно быстро обмениваться энергией (так называемая Оже-рекомбинация), что препятствует созданию инверсной заселенности, необходимой для достижения лазерной генерации.

Эта трудность впервые была преодолена в работе научной группы В.Климова [31], где впервые была продемонстрирована возможность получения инверсной заселенности в плотноупакованных слоях нанокристаллов CdSe с размером 1,2 нм. Измеренные для данных КТ характерные времена безызлучательного перехода между возбуждаемым и заселяемым уровнями составила впечатляющие сотни фемтосекунд как для электронов, так и для дырок, что на порядок меньше времен Оже-рекомбинации (~6 пс для КТ CdSe указанного радиуса).

SOLAR ENERGY (PHOTOVOLTAICS)

In recent years, solar energy technologies have been actively developing all over the world. Recently, silicon has been common material for solar panels, as the most efficient radiation converters used in solar energy have been developed and commercialized. According to the National Renewable Energy Laboratory (NREL) (see Fig. 3), silicon photovoltaic cells have a fairly high energy conversion efficiency (up to 27.6%) (25). Engineering the same multi-junction photovoltaic cells provides an increase in conversion efficiency up to 47%.

At the same time, a significant problem of silicon optoelectronics should be noted – the high cost and complexity of production.

To date, there has been an intensive growth in the total capacity of electricity generation using solar power plants (see Fig. 4). At the same time, the growing capacities of the resource-intensive and energy-consuming semiconductor production (silicon photovoltaic cells) lead to climate change on the planet, in connection with which it the problem of finding new materials for the manufacture of solar cells becomes acute.

Increasingly, semiconductor nanocrystals – QDs and composites (including hybrid ones) based on them act as the basis for light-converting elements (photovoltaic cells). Due to the wide absorption spectrum, QDs can effectively absorb from the UV to the far IR spectral range, which makes them promising for use in solar energy. QDs already occupy a certain niche in this area, and every year the efficiency of energy conversion is growing. According to (26), an efficiency value of 16.6% has been achieved for colloidal perovskite QDs. The properties of colloidal solutions of nanocrystals make it possible to use them for the manufacture of exotic photovoltaic materials (e.g., flexible solar cells) (27). To date, there are many methods for manufacturing solar panels from colloidal solutions, and the roll-to-roll (R2R) technology which is among them should be highlighted (28). The essence of the method is the deposition of colloidal solutions by blade coating, spraying or injection application on a flexible base, followed by baking to obtain a homogeneous layer of a photoactive substance. Thanks to this technology, it is possible to create ultrathin solar cells, and also to reduce the cost of production of photovoltaic cells based on colloidal QDs significantly.

QUANTUM DOT LASERS

In the past six decades since the invention of the laser, semiconductor materials have proven to be excellent laser media. After significant progress in



В дальнейшем был предложен способ осуществления лазерной генерации в КТ и без возбуждения мультиэкситонов (*Single-exciton optical gain in semiconductor nanocrystals*). Материал и диаметр КТ (CdS/ZnSe) были подобраны таким образом, чтобы при возбуждении экситона лазерным импульсом осуществлялось его пространственное разделение, причем электрон оказался локализованным в ядре КТ, а дырка – в ее оболочке. Возникающее при этом локальное электрическое поле достаточно велико (~100 мэВ), что значительно изменяет энергию экситона, рождаемого при следующем акте возбуждения. Как результат, в возбуждаемых последовательными импульсами КТ наблюдается сдвиг полос поглощения, что в свою очередь позволяет создавать в них инверсную населенность. Понимание природы и механизмов этих процессов открыло путь к созданию лазеров на КТ с низким порогом генерации, реализации оптического усиления электрической инжекцией, а также разработке лазеров с оптической накачкой, стандартного светоизлучающего диода с электрическим возбуждением и оп-сип лазеров [32–34].

Эффективная лазерная генерация может быть достигнута в структурах с распределенными брэгговскими решетками на квантовых ямах, точках и с квантовыми каскадами [35]. Интеграция квантовых точек InAs в планарный GaAs волновод полупроводниковой наноструктуры, сопряженный с полупроводниковым лазером с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с квантовыми ямами GaAs в активной области, позволяет реализовать циркулярно-поляризованное излучение [36].

ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Актуальной задачей использования КТ является разработка новых фотонных логических элементов и создание вычислительных архитектур. На замену базовым логическим элементам электроники – транзисторам – приходят оптически активные нанообъекты. За счет их масштабируемости и квантового поведения они представляют большой интерес для создания фотонных устройств обработки сигналов [37]. На данный момент разработано множество наноразмерных логических устройств, работающих на системах из захваченных ионов [38] и одиночных атомов [39], нелинейных материалах [40], одиночных молекулах [41], плазмонных наночастицах [42], вакансионных центрах окраски в алмазах [43] и других. В качестве активного материала для таких систем можно использовать и полупроводниковые коллоидные КТ, которые являются источником одиночных фотонов.

the synthesis of colloidal QDs in the mid-1990s, the question of the prospects for their application for the manufacture of highly efficient, but at the same time extremely compact laser media, became especially acute. The main advantages of nanocrystals over traditional bulk materials are, associated with size quantization effects, which make it possible to achieve a sufficiently low lasing threshold with high thermal stability and the ability to adjust the radiation wavelength using QDs of various sizes.

Research into the study of laser generation in systems based on QDs was started quite a long time ago, and in the late 1990s prototypes of such lasers came to light (29, 30). It turned out, however, that achieving generation in semiconductor nanocrystals is a very difficult challenge. To create a population inversion in a QD, it is necessary to excite at least a pair of excitons. It wouldn't seem that difficult to achieve by exciting the QDs with high-power femtosecond laser pulses, however, as it was found, excitons in QDs with a size of the order of several nm can exchange energy quite quickly (the so-called Auger recombination), which prevents the creation of a population inversion necessary to achieve laser radiation.

This difficulty was first overcome in the work of the V. Klimov scientific group (31), where the possibility of obtaining population inversion in close-packed layers of CdSe nanocrystals with the size of 1.2 nm was demonstrated for the first time. The characteristic times of the nonradiative transition between the excited level and required to populate one, measured for these QDs, amounted to impressive hundreds of femtoseconds for both electrons and holes, which is an order of magnitude shorter than the Auger recombination times (~6 ps for CdSe QDs of the indicated radius).

Subsequently, a method was proposed for implementing laser generation in QDs without excitation of multiexcitons (single-exciton optical gain in semiconductor nanocrystals). The material and diameter of the QD (CdS/ZnSe) were chosen so that after excitation by a laser pulse, exciton spatial separation is carried out in such a way: the electron turned out to be localized in the core of the QD, whereas the hole moved to its shell. The resulting local electric field is strong enough to significantly (~100 meV) change the energy of the exciton produced during the following excitation process. As a result, in QDs excited by successive pulses, a shift of absorption bands is observed, which, in turn, makes it possible to create a population inversion in them. Understanding the nature of the processes has opened the way to the creation of low-threshold QD lasers, the implementation of optical amplification by electrical injection, and the



Полностью функционирующая логика была создана на одиночных полупроводниковых КТ, включающая в себя высокоточные вентили с квантовым управлением [44], фотонные переключатели [45], а также повторители [46]. По аналогии с транзисторами оптические элементы логики могут быть использованы для разработки и построения полностью оптических интегральных микросхем, что может сильно повлиять на прогресс квантовых фотонных технологий в ближайшем будущем.

ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ НАНОСКОПИЯ, БИОМАРКЕРЫ И АДРЕСНАЯ ДОСТАВКА ЛЕКАРСТВ

Квантовые точки используются в качестве эффективных флуоресцентных меток, для доставки лекарств, мониторинга процесса метаболизма лекарств в организме благодаря своим уникальным физико-химическим характеристикам. Другие биомедицинские приложения КТ включают в себя создание чувствительных сенсоров для обнаружения заболеваний и проведение флуоресцентных анализов для разработки новых лекарственных препаратов [47–49].

В последние годы активно развиваются методы флуоресцентной наноскопии (микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения), где КТ могут выступать в качестве одиночных точечных излучателей-маркеров [50,51]. Методы наноскопии развиваются в том числе и в направлении трехмерной визуализации наноструктуры исследуемого объекта, трекинга наночастиц [52].

С конца 1990-х годов количество различных областей применения квантовых точек в биологии и медицине растет в геометрической прогрессии. Полупроводниковые наночастицы активно используются в качестве флуоресцентных меток для биоаналитических целей, таких как обнаружение ДНК, белков, биомолекул и клеток. Для анализа связывания или переноса энергии от биологических структур (например белков) используют механизмы Ферстеровского резонансного переноса энергии (FRET) [53]. Для реализации механизма FRET в качестве донора используется исследуемый биологический объект (например, молекула белка), а в качестве акцептора могут быть использованы КТ. Для этих целей поверхность КТ функционализируют специально выращенными лигандами, способными прикрепиться к сложной молекуле, причем расстояние от центра нанокристалла до молекулы должно находиться в пределах от 1 до 10 нм. При образовании пары донор-акцептор за счет диполь-дипольного взаимодействия происходит передача энергии без промежуточного испускания фотона. Это значит, что про-

development of optically pumped lasers, a standard light-emitting diode with electrical excitation, and on-chip lasers (32–34).

Efficient lasing can be achieved in structures with distributed Bragg gratings on quantum wells, dots, and with quantum cascades (35). Integration of InAs QDs into a planar GaAs semiconductor nanostructure waveguide coupled to an electrically pumped semiconductor laser based on AlAs/AlGaAs microcavity with GaAs quantum wells in the active region makes it possible to realize circularly polarized radiation (36).

OPTICAL SWITCHES

An actual task of using QD is the development of new photonic logic elements and the engineering of computational architectures. Optically active nanoobjects come to replace the basic logical elements of electronics – transistors. Due to their scalability and quantum behavior, they are of great interest in the creation of photonic signal processing devices (37). Numerous nanoscale logic devices have been developed to date, operating on systems of trapped ions (38), single atoms (39), nonlinear materials (40), single molecules (41), plasmonic nanoparticles (42), vacancy color centers in diamonds (43), and others. Semiconductor colloidal QDs, which are sources of single photons, can also be used as an active material for such systems.

Fully functioning logic was created on single semiconductor QDs which consisted of high-precision quantum gates (44), photonic switches (45), and repeaters (46). By analogy with transistors, optical logic elements can be used to design and build all-optical integrated circuits, which will greatly affect the progress of quantum photonic technologies soon.

FLUORESCENCE NANOSCOPY, BIOLABELS AND TARGETED DRUG DELIVERY

QDs due to their unique physical and chemical characteristics are used as efficient fluorescent labels, for drug delivery, monitoring of the process of drug metabolism in the body. Other biomedical applications of QDs include developing sensitive sensors for disease detection and performing fluorescent assays for drug design (47–49).

In recent years, methods of fluorescent nanoscopy (microscopy of superhigh spatial resolution) have been actively developed, where QDs can act as point-like emitters (labels) (50, 51). Nanoscopy methods are also developing in the direction of three-dimensional visualization of the nanostructure of the object under study, tracking of nanoparticles (52).

Since the late 1990s number of different applications of QDs in biology and medicine is growing expo-



цесс передачи безызлучательный, а энергия будет передана акцептору (например, квантовой точке), которая в дальнейшем приведет к рождению фотона люминесценции КТ. Эффективность передачи энергии выше не только за счет пространственной близости двух объектов (эффективность FRET зависит от расстояния как R^6), но и за счет перекрытия спектра возбуждения донора и спектра поглощения акцептора. КТ являются весьма перспективными акцепторами за счет широкого контура поглощения в синей области спектра, в котором поглощают многие биологические объекты.

Еще одна возможность использовать КТ в биологических целях основана на бактерицидных свойствах нанокристаллов на основе серебра. Хорошо известна способность ионов серебра блокировать действие различных типов вирусов, а также оказывать терапевтическое действие при лечении ряда вирусных заболеваний. В связи с этим развитие методов синтеза квантовых точек с использованием серебра, а также гибридных ассоциатов на их основе [54] позволит в дальнейшем создавать препараты с антимикробным действием.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

Одними из наиболее интересных новых материалов являются КТ на основе углерода, в т.ч. так называемые графеновые нанокристаллы [55]. Графеновые КТ не стоит путать с фуллеренами – сферами из атомов углерода. Обычно такие нанобъекты синтезируют из фрагментов графеновой ленты или нанотрубки [56], что делает их похожими скорее на хлопья. Благодаря природной химической инертности и амфифильности графеновые КТ потенциально применимы в различных биологических приложениях. Как и коллоидные полупроводниковые нанокристаллы графеновые КТ характеризуются наличием зависимой от размеров запрещенной зоны флуоресценции, которая возникает вследствие квантово-размерного эффекта. Вкупе эти особенности делают КТ из графена превосходными кандидатами на роль биосовместимых маркеров.

Еще одним интересным квантово-размерным объектом являются полностью неорганические перовскитные КТ (PеQD). В перспективе на их основе могут быть разработаны светоизлучающие устройства без содержания токсичных веществ (кадмия). Такие нанокристаллы схожи по свойствам с полупроводниковыми КТ и характеризуются возможностью управлять шириной запрещенной зоны во всем видимом спектре. Также они демонстрируют рекордные значения эффективного кванто-

нentially. Semiconductor nanoparticles are actively used as fluorescent labels for bioanalytical purposes, such as detection of DNA, proteins, biomolecules, and cells. For analysis of binding or energy transfer from biological structures (e.g., proteins), Förster resonant energy transfer (FRET) mechanisms are used (53). To implement the FRET mechanism, a biological object under study (e.g., a protein molecule) is used as a donor, and QDs can be used as an acceptor. For these purposes, a QD surface is functionalized with specially grown ligands capable of attaching to a specific complex molecule, and the distance from the center of a nanocrystal to a molecule should be from 1 to 10 nm. When a donor-acceptor pair is formed due to the dipole-dipole interaction, energy is transferred without intermediate emission of a photon. This means that the transfer process is non-radiative, and the energy will be transferred to the acceptor (e.g., a QD), which will subsequently lead to creation of a QD luminescence photon. The efficiency of energy transfer is higher not only due to the spatial proximity of two objects (the FRET efficiency depends on the distance as R^6), but also due to overlap of the donor excitation spectrum and the acceptor absorption spectrum. QDs are very promising acceptors due to the wide absorption spectrum in the blue region of the spectrum, appropriate for many biological objects.

Another opportunity to use QDs for biological purposes is based on bactericidal properties of silver-based nanocrystals. The ability of silver ions to block action of various types of viruses, as well as to have a therapeutic effect in the treatment of a numerous viral diseases, is well known. In this regard, the development of methods for QDs synthesis using silver, as well as hybrid associates based on them (54), will make it possible to create drugs with antimicrobial activity in the future.

NEW MATERIALS OF PHOTONICS

One of the most interesting new materials are carbon-based QDs, including so-called graphene nanocrystals (55). Graphene QDs should not be confused with fullerenes – spheres of carbon atoms. Typically, such nanoobjects are synthesized from fragments of a graphene ribbon or nanotube (56) which makes them look more like flakes. Due to the natural chemical inertness and amphiphilicity graphene QDs are potentially applicable in various biological applications. Like colloidal semiconductor nanocrystals Graphene QDs exhibit band gap dependent fluorescence, which arises due to the quantum confinement effect. Together, these features make graphene QDs excellent candidates for the role of biocompatible markers.



вого выхода (93%) [57]. За счет своих фотофизических свойств перовскитные КТ нашли применение в разнообразных оптических приложениях: ячейки оптической памяти [58], фотодетекторы [59], солнечные элементы [60], лазеры [61], светодиоды [62].

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Источники одиночных фотонов

Высокоэффективные источники одиночных фотонов являются ключевыми элементами для реализации, например, квантовых линий связи [63]. Наряду с одиночными атомами, органическими молекулами, центрами окраски в алмазах и др., в качестве таких управляемых источников могут быть использованы полупроводниковые КТ [64]. Основным способом изготовления источников однофотонного излучения на их основе является молекулярная эпитаксия, позволяющая с высокой точностью размещать КТ на подложках, а также внутри оптических волноводов и микрорезонаторов [65-67]. Существуют и другие инновационные методы управляемого синтеза таких структур, например, «прямое лазерное письмо» [68].

Широкий выбор полупроводниковых материалов позволяет получать источники с разной длиной волны излучения: КТ на основе GaN/AlGaIn позволяют получать генерацию в ближнем УФ-диапазоне [69, 70] (~280-330 нм), CdSe/ZnSe [71] и CdSe/ZnSSe [72] в видимом диапазоне (~550 нм), InGaAs/GaAs [73] (900 нм - 1,55 мкм) и InAs/InP [74] (~1,55 мкм) охватывают ИК-диапазон, в том числе и окна прозрачности оптического волокна на 1310 и 1550 нм. В то же время излучательными свойствами КТ можно управлять (рис. 5), например за счет взаимодействия с плазмонными наноструктурами [75].

Основными техническими параметрами, определяющими эффективность работы источников однофотонного излучения, являются значения автокорреляционной функции второго порядка

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}^\dagger(t+\tau) \hat{a}(t) \hat{a}(t+\tau) \rangle}{\langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}(t) \rangle^2},$$

где (\hat{a}^\dagger и \hat{a} - операторы рождения и уничтожения оптического поля, соответственно) и температурный диапазон, в котором возможна однофотонная генерация. Качество последней определяется значением $g^{(2)}(0)$. Для однофотонного излучения в идеальном случае $g^{(2)}(0) = 0$ (так называемая «антигруппировка фотонов»), для реальных источников $g^{(2)}(0)$

Another interesting quantum-well object is the completely inorganic perovskite QD (PeQD) which has opened up great prospects for the development of light-emitting devices without toxic substances (cadmium). Such nanocrystals have similar properties to semiconductor QDs and have an adjustable bandgap throughout the entire visible spectrum. Also, they demonstrate ultra-high effective quantum yields (93%) (57). Due to their photophysical properties, perovskite QDs have found applying in various optical applications: optical memory cells (58), photodetectors (59), solar cells (60), lasers (61), LEDs (62).

QUANTUM DOTS IN QUANTUM TECHNOLOGIES

Single-Photon Sources

High-performance sources of single photons are key elements for the implementation, for instance, of quantum communication lines (63). Along with single atoms, organic molecules, color centers in diamonds, etc., semiconductor QDs can be used as such controlled sources (64). The main method for manufacturing sources of single-photon emission based on them is molecular epitaxy, which makes it possible to place QDs on substrates with high accuracy, as well as inside optical waveguides and microcavities (65, 66, 67). The other innovative methods of controlled synthesis of such structures, for example, direct laser writing (68), also exist.

A wide choice of semiconductor materials makes it possible to obtain light sources with different emission wavelengths: QDs based on GaN/AlGaIn can obtain generation in the near UV range (69, 70) (~280-330 nm), CdSe/ZnSe (71) and CdSe/ZnSSe (72) in the visible range (~550 nm), InGaAs/GaAs (73) (900 nm - 1.55 μm) and InAs/InP (74) (~1.55 μm) cover the IR range, including the optical fiber transparency windows at 1310 and 1550 nm. At the same time, the radiative properties of QDs can be controlled, for example, by interacting with plasmonic nanostructures (75).

The main technical parameters that determine the efficiency of single-photon sources are the values of the second-order autocorrelation function

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}^\dagger(t+\tau) \hat{a}(t) \hat{a}(t+\tau) \rangle}{\langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}(t) \rangle^2}, \quad (1)$$

where (\hat{a}^\dagger and \hat{a} are the creation and annihilation operators of the optical field, respectively) and the temperature range in which single-photon generation is possible. The quality of the latter is determined by the value of $g^{(2)}(0)$. For single-photon radiation, in the

принимает значения от 0 до 0,5, что обусловлено неидеальностью изготовленных КТ и невозможностью полностью исключить детектирование паразитного сигнала во время эксперимента [65]. На сегодняшний день, при температурах в несколько К типичные значения $g^{(2)}(0)$ для КТ составляют 0,02–0,25, максимально же достижимые рабочие температуры существенно колеблются для КТ различного химического состава и могут находиться как в пределах десятков К [76], так и достигать значений 300–350 К [77]. Качество однофотонной генерации ожидаемо ухудшается с ростом температуры и соответствует значениям $g^{(2)}(0)$ в пределах 0,2–0,5 для верхних границ рабочего температурного диапазона.

При контролируемом синтезе малых ансамблей взаимодействующих КТ с сильной связью можно

ideal case, $g^{(2)}(0)=0$ (the so-called “antibunching of photons”), for real sources, $g^{(2)}(0)$ takes values from 0 to 0.5, which is due to non-ideal fabricated QDs and the impossibility of eliminating the detection of a noise signal during the experiment (65). Today, at temperatures of several K, the typical values of $g^{(2)}(0)$ for QDs are 0.02–0.25, while the maximum achievable operating temperatures vary significantly for QDs of various chemical compositions and can be within tens of K (76) and reach values of 300–350 K (77). The quality of single-photon generation expectedly worsens with increasing temperature and corresponds to $g^{(2)}(0)$ values within 0.2–0.5 for the upper limits of the operating temperature range.

With the controlled synthesis of small ensembles of interacting QDs with strong coupling, it is possible to carry out the engineering of multiphoton (entangled)

states. For instance, in the case of shell QDs with a double radiating core (78) or paired QDs (79), one can expect the generation of biphoton states, which are also in demand in problems of quantum informatics.

Quantum memory

Another promising application of QDs in quantum technologies is their use in the implementation of quantum memory devices. In the general case, the principle of operation of quantum memory is based on the processes of controlled absorption and subsequent re-emission of a photon (80). Devices that implement the operation of quantum memory require the most accurate transfer of the initial quantum state; for a number of applications, the storage time of the quantum state and the possibility of simultaneous storage of several states play a role (81, 82).

An example of the practical implementation of quantum memory based on InAs QDs grown in a GaAs matrix using the epitaxy and placed inside an optical cavity, which is a one-dimensional photonic crystal (GaAs/AlAs), is given in (83). In such a scheme, a thin QD layer is located inside the p-n junction formed by GaAs/AlAs

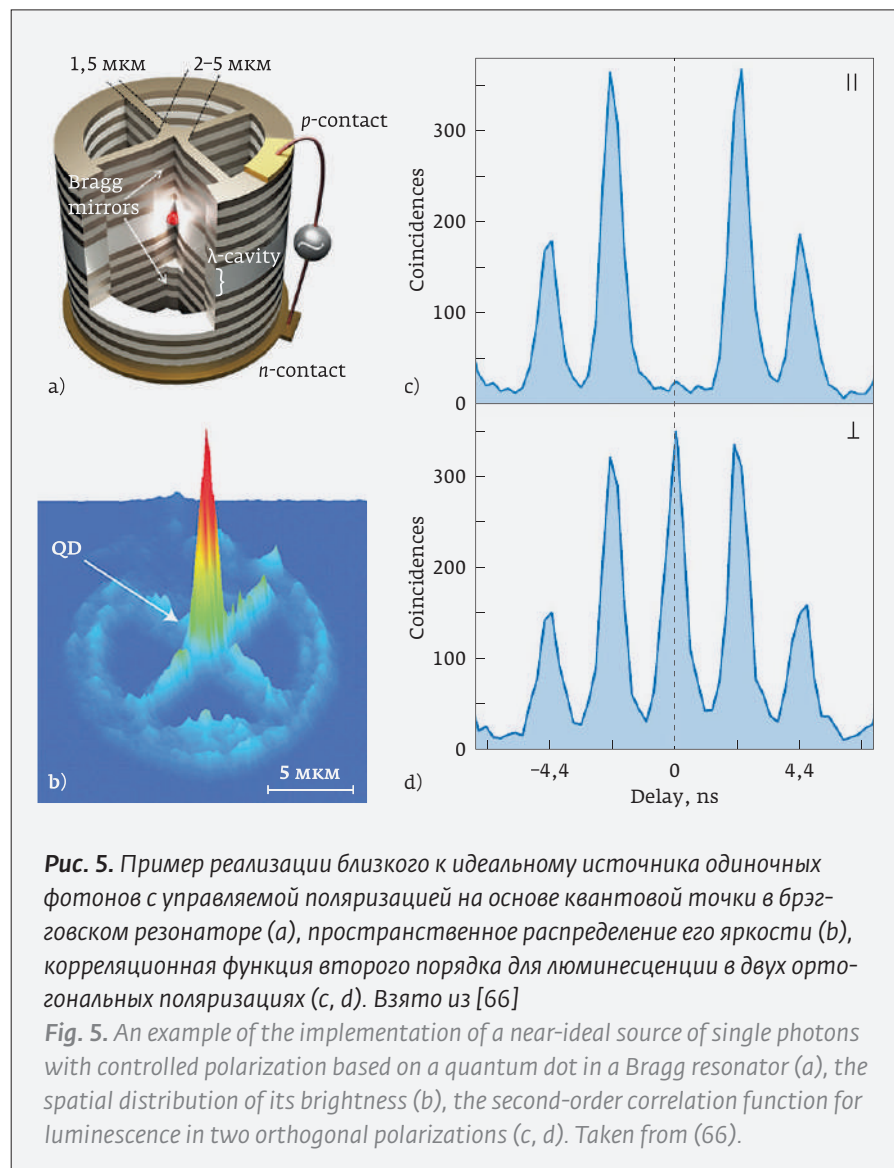


Рис. 5. Пример реализации близкого к идеальному источника одиночных фотонов с управляемой поляризацией на основе квантовой точки в брэгговском резонаторе (а), пространственное распределение его яркости (б), корреляционная функция второго порядка для люминесценции в двух ортогональных поляризациях (с, d). Взято из [66]

Fig. 5. An example of the implementation of a near-ideal source of single photons with controlled polarization based on a quantum dot in a Bragg resonator (a), the spatial distribution of its brightness (b), the second-order correlation function for luminescence in two orthogonal polarizations (c, d). Taken from (66).



реализовать многофотонные (перепутанные) состояния. Например, в случае оболочечных КТ точек с двойным излучающим ядром [78] или спаренных КТ [79] можно ожидать генерацию бифотонных состояний, также востребованных в задачах квантовой информатики.

Квантовая память

Еще одним перспективным применением КТ в квантовых технологиях является их применение в реализации устройств квантовой памяти. В общем случае, принцип действия квантовой памяти основан на процессах управляемого поглощения и последующего переиспускания фотона [80]. От устройств, реализующих работу квантовой памяти, требуется максимально точная передача исходного квантового состояния, для ряда приложений играет роль время хранения квантового состояния и возможность одновременного хранения нескольких состояний [81, 82].

Пример практической реализации квантовой памяти, основанной на КТ InAs с помощью эпитаксии выращенных в матрице GaAs и помещенных внутрь оптического резонатора, представляющего собой одномерный фотонный кристалл (GaAs/AlAs), приводится в работе [83]. В такой схеме тонкий слой КТ располагается фактически внутри р-п перехода, образованного слоями GaAs/AlAs, дополнительно легированного, соответственно, атомами углерода и кремния. Процесс записи в квантовую память запускается при помощи слабого циркулярно-поляризованного светового импульса, возбуждающего в КТ экситон с определенным спиновым состоянием. Подобранный конфигурация потенциальных барьеров приводит к пространственной локализации электрона, в то время как дырка достаточно быстро (по сравнению с характерными временами рекомбинации экситона) туннелирует за пределы КТ. Переход к стадии считывания информации (записанной при помощи спина электрона) запускается подачей электрического импульса, возвращающего в КТ уже пару дырок. Одна из дырок рекомбинирует с электроном, приводя к излучению фотона с поляризацией, определяемой спином электрона (а значит и поляризацией поглощенного ранее фотона). В приведенном эксперименте удалось добиться времени хранения спинового состояния ~ 1 мкс при температуре ~ 10 К.

Квантовые сенсоры

Наконец, еще одним, важнейшим направлением прикладного использования КТ в квантовых технологиях является квантовая сенсорика. Чувстви-

layers additionally doped with carbon and silicon atoms, respectively. The process of writing to quantum memory is triggered by a weak circularly polarized light pulse that excites an exciton with a certain spin state in the QD. The selected configuration of potential barriers leads to the spatial localization of an electron, while a hole rather quickly (compared to the characteristic exciton recombination times) tunnels outside a QD. The transition to the stage of reading information (recorded with the help of the electron spin) is triggered by applying an electric pulse that returns a couple of holes to the QD. One of the holes recombines with the electron, leading to the emission of a photon with a polarization determined by the spin of the electron (and hence the polarization of the previously absorbed photon). In the above experiment, it was possible to achieve a spin state storage time of ~ 1 μ s at a temperature of ~ 10 K.

Based on QDs, it is possible to realize qubits, for example, spin qubits (84).

Quantum sensors

Finally, one more important area of applied use of quantum dots in quantum technologies is quantum sensors. The sensitivity of the optical-spectral characteristics of QDs to the local environment and external parameters is used in quantum sensors to characterize nanodefects (85), for measuring electric fields (86), and temperature (16), (87).

CONCLUSION

Semiconductor nanocrystals (quantum dots) and new composite materials based on them, while continuing to be the subject of intensive fundamental research, are already being actively implemented in various photonic applications. The dependence of the functional properties of QD materials on their morphology and chemical composition provides the possibility of engineering and deterministic synthesis with predetermined (calculated) physicochemical characteristics. In turn, these properties can depend in a known way on the physicochemical parameters of the local environment, thermodynamic and field characteristics. All this explains the growing interest in the applied use of QDs in various photonics methods and tools. QDs has already found its high-performance applications in the light source industry and related technologies (light-emitting diodes, displays, laser sources), solar energy (high-efficiency and low-cost photovoltaic cells), security systems and anti-counterfeiting techniques. QDs are one of the most effective materials for the implementation of the element base of quantum technologies (sources



тельность оптико-спектральных характеристик КТ к локальному окружению и внешним параметрам используется в квантовой сенсорике для характеристики нанодефектов [85], для сенсинга электрических полей [86], температуры [16, >87].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупроводниковые нанокристаллы (квантовые точки) и новые композитные материалы на их основе продолжая оставаться объектом интенсивных фундаментальных исследований, уже сейчас интенсивно внедряются в разнообразных фотонных приложениях. Зависимость функциональных свойств КТ-материалов от морфологии и химического состава КТ обеспечивает возможность их инжиниринга и детерминированного синтеза с заранее известными (расчетными) физико-химическими характеристиками. В свою очередь эти свойства могут известным образом зависеть от физико-химических параметров локального окружения, термодинамических и полевых характеристик. Все это объясняет растущий интерес к прикладному использованию КТ в разнообразных методах и инструментах фотоники. КТ уже нашли свои высокоэффективные приложения в индустрии источников света и смежных технологиях (светоизлучающие диоды, дисплеи, лазерные источники), солнечной энергетике (высокоэффективные и дешевые в производстве фотовольтаические элементы), системах безопасности и антиконтрафактных методиках. КТ являются одним из наиболее эффективных материалов для реализации элементной базы квантовых технологий (источники неклассического света для квантовых компьютеров и квантовых телекоммуникаций, элементная база квантовой памяти, квантовые сенсоры), новых оптических и оптоэлектронных устройств (нелинейные оптические преобразователи, переключатели, конверторы, детекторы), в том числе в бурно развивающихся технологиях интегральной (on-chip) оптики. Многообещающим представляется использование КТ в качестве наномаркеров при решении широкого круга задач биофотоники (флуоресцентная наноскопия, проточная цитометрия, терагностика, природоподобные технологии). Решение многих прикладных задач связано с поиском новых материалов и методов синтеза для производства КТ и наноконпозигов на их основе (тонких пленок, изолированных КТ и их упорядоченных ансамблей, гибридных структур и метаматериалов), в том числе двумерных наноструктур (графен и графеноподобные материалы), КТ на основе углерода и германия,

of non-classical light for quantum computers and quantum telecommunications, the element base of quantum memory, quantum sensors), new optical and optoelectronic devices (nonlinear optical converters, switches, converters, detectors), including in rapidly developing integrated (on-chip) optics technologies. The use of QDs as nanolabels seems promising in solving a wide range of biophotonics problems (fluorescent nanoscopy, flow cytometry, theranostics, nature-like technologies). The solution of many applied problems is associated with the search for new materials and synthesis methods for the production of QDs and nanocomposites based on them (thin films, isolated QDs and their ordered ensembles, hybrid structures and metamaterials), including two-dimensional nanostructures (graphene and graphene-like materials), QDs based on carbon and germanium, diamond QDs with impurity color centers, nanoparticles from materials with a perovskite structure, QDs with complex geometry and morphology (multilayer heterostructural particles, tetrapods, nanorods and nanoplates).

ACKNOWLEDGEMENTS

The review was prepared as part of the State Assignment of the Moscow State Pedagogical University (MSPU) “Physics of nanostructured materials: fundamental research and applications in materials science, nanotechnologies and photonics” with the support of the Ministry of Education of the Russian Federation (AAAA-A20-120061890084-9). The authors are members of the Leading Scientific School of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation IIII-776.2022.1.2).

AUTHORS

- Arzhanov A. I., Moscow Pedagogical State University, Moscow; Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow; P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk, Russia.
ORCID: 0000-0001-9305-067X
- Savostianov A. O., Moscow Pedagogical State University, Moscow; Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow; P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk, Russia.
ORCID: 0000-0001-8815-8440
- Magaryan K. A., Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-4754-4657
- Karimullin K. R., Moscow Pedagogical State University, Moscow; Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow; P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk, Russia.
ORCID: 0000-0001-6799-2479
- Naumov A. V., Moscow Pedagogical State University, Moscow; Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow; P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk, Russia. www.single-molecule.ru
ORCID: 0000-0001-7938-9802



алмазных КТ с примесными центрами окраски, наночастиц из материалов со структурой перовскита, КТ со сложной геометрией и морфологией (многослойные гетероструктурные частицы, тетраподы, наностержни и нанопластины).

БЛАГОДАРНОСТИ

Обзор подготовлен в рамках выполнения работ по теме государственного задания Московского педагогического государственного университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9). Авторы входят в состав Ведущей научной школы Российской Федерации (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аржанов А. И., Савостьянов А. О., Магарян К. А., Каримуллин К. Р., Наумов А. В. Фотоника полупроводниковых квантовых точек: фундаментальные аспекты. *Фотоника* 2021, 15, 622–640, doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.8.622.641.
2. Vitukhnovsky A. G., Lebedev V. S., Selyukov A. S., Vashchenko A. A., Vasiliev R. B., Sokolikova M. S. Electroluminescence from colloidal semiconductor CdSe nanoplatelets in hybrid organic-inorganic light emitting diode. *Chemical Physics Letters* 2015, 619, 185–188, doi: 10.1016/j.cplett.2014.12.002.
3. Cho S., Kwag J., Jeong S., Baek Y., Kim S. Highly Fluorescent and Stable Quantum Dot-Polymer-Layered Double Hydroxide Composites. *Chem. Mat.* 2013, 25, 1071–1077, doi: 10.1021/cm3040505.
4. Choi M. K., Yang J., Hyeon T., Kim D.-H. Flexible quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays. *npj Flexible Electronics* 2018, 2, 10, doi: 10.1038/s41528-018-0023-3.
5. Lee Y., Kim D. S., Jin S. W., Lee H., Jeong Y. R., You I., Zi G., Ha J. S. Stretchable array of CdSe/ZnS quantum-dot light emitting diodes for visual display of bio-signals. *Chem. Eng. J.* 2022, 427, 130858, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130858.
6. Bae W. K., Brovelli S., Klimov V. I. Spectroscopic insights into the performance of quantum dot light-emitting diodes. *MRS Bull.* 2013, 38, 721–730, doi: 10.1557/mrs.2013.182.
7. Chen B., Wan Y., Xie Z., Huang J., Shang C., Norman J., Li Q., Lau K. M., Gossard A. C., Bowers J. E. Quantum Dot Avalanche Photodetector on Si Substrate. In Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, Washington, DC, 2020/05/10; p. SM3R.2.
8. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Kirienko V. V., Stepina N. P., Nikiforov A. I., Ul'yanov V. V., Chaikovskii S. V., Volodin V. A., Efremov M. D., Seksenbaev M. S. et al. Ge/Si waveguide photodiodes with built-in layers of Ge quantum dots for fiber-optic communication lines. *Semiconductors* 2004, 38, 1225–1229, doi: 10.1134/1.1808834.
9. Tretyakov I., Shurakov A., Perepelitsa A., Kaurova N., Svyatodukh S., Zilberley T., Ryabchun S., Smirnov M., Ovchinnikov O., Goltsman G. Room Temperature Silicon Detector for IR Range Coated with Ag₂S Quantum Dots. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 2019, 13, 1900187, doi: 10.1002/pssr.201900187.
10. Konstantatos G., Sargent E. H. Colloidal quantum dot photodetectors. *Infrared Phys. Technol.* 2011, 54, 278–282, doi: 10.1016/j.infrared.2010.12.029.
11. Lee S. J., Ku Z. Y., Barve A., Montoya J., Jang W. Y., Brueck S. R. J., Sundaram M., Reisinger A., Krishna S., Noh S. K. A monolithically integrated plasmonic infrared quantum dot camera. *Nat Commun* 2011, 2, 6, doi: 10.1038/ncomms1283.
12. Samartsev V. V., Mitrofanova T. G., Khasanov O. K. Two-Quantum Transient Holograms on the Exciton Levels of Semiconductor Quantum Dots. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021, 85, 216–218, doi: 10.3103/S1062873821020222.
13. Shesterikov A. V., Prokhorov A. V. Features of Plasmon Switching in a Graphene Nanoresonator Loaded with a Shell Quantum Dot. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020, 84, 319–323, doi: 10.3103/S1062873820030193.
14. Chizhov A. S., Rummyantseva M. N., Vasiliev R. B., Filatova D. G., Drozdov K. A., Krylov I. V., Marchevsky A. V., Karakulina O. M., Abakumov A. M., Gaskov A. M. Visible light activation of room temperature NO₂ gas sensors based on ZnO, SnO₂ and In₂O₃ sensitized with CdSe quantum dots. *Thin Solid Films* 2016, 618, 253–262, doi: 10.1016/j.tsf.2016.09.029.
15. Savchenko S. S., Vokhmintsev A. S., Weinstein I. A. Temperature dependence of the optical absorption spectra of InP/ZnS quantum dots. *Tech. Phys. Lett.* 2017, 43, 297–300, doi: 10.1134/S1063785017030221.
16. Karimullin K. R., Arzhanov A. I., Eremchev I. Y., Kulnitskiy B. A., Surovtsev N. V., Naumov A. V. Combined photon-echo, luminescence and Raman spectroscopies of layered ensembles of colloidal quantum dots. *Laser Phys.* 2019, 29, 124009, doi: 10.1088/1555-6611/ab4bdb.
17. Podshivaylov E. A., Kniازهva M. A., Gorshlev A. A., Eremchev I. Y., Naumov A. V., Frantsuzov P. A. Contribution of electron-phonon coupling to the luminescence spectra of single colloidal quantum dots. *J. Chem. Phys.* 2019, 151, 174710, doi: 10.1063/1.5124913.
18. Albers A. E., Chan E. M., McBride P. M., Ajo-Franklin C. M., Cohen B. E., Helms B. A. Dual-Emitting Quantum Dot/Quantum Rod-Based Nanothermometers with Enhanced Response and Sensitivity in Live Cells. *J. Am. Chem. Soc.* 2012, 134, 9565–9568, doi: 10.1021/ja302290e.
19. Rempel A. A., Kuznetsova Y. V., Dorosheva I. B., Valeeva A. A., Weinstein I. A., Kozlova E. A., Saraev A. A., Selishchev D. S. High Photocatalytic Activity Under Visible Light of Sandwich Structures Based on Anodic TiO₂/CdS Nanoparticles/Sol-Gel TiO₂. *Top. Catal.* 2020, 63, 130–138, doi: 10.1007/s11244-020-01226-x.
20. Paek K., Yang H., Lee J., Park J., Kim B. J. Efficient Colorimetric pH Sensor Based on Responsive Polymer-Quantum Dot Integrated Graphene Oxide. *ACS Nano* 2014, 8, 2848–2856, doi: 10.1021/nn406657b.
21. Gladush M. G., Anikushina T. A., Gorshlev A. A., Plakhotnik T. V., Naumov A. V. Dispersion of Lifetimes of Excited States of Single Molecules in Organic Matrices at Ultralow Temperatures. *J. Exp. Theor. Phys.* 2019, 128, 655–663, doi: 10.1134/s1063776119030038.
22. Anikushina T. A., Gladush M. G., Gorshlev A. A., Naumov A. V. Single-molecule spectromicroscopy: a route towards sub-wavelength refractometry. *Faraday Discuss.* 2015, 184, 263–274, doi: 10.1039/c5fd00086f.
23. Naumov A. V., Gorshlev A. A., Gladush M. G., Anikushina T. A., Golovanova A. V., Koehler J., Kador L. Micro-Refractometry and Local-Field Mapping with Single Molecules. *Nano Lett.* 2018, 18, 6129–6134, doi: 10.1021/acs.nanolett.8b01753.
24. Pillonnet A., Fleury P., Chizhik A. I., Chizhik A. M., Amans D., Ledoux G., Kulzer F., Meixner A. J., Dujardin C. Local refractive index probed via the fluorescence decay of semiconductor quantum dots. *Opt. Express* 2012, 20, 3200–3208, doi: 10.1364/oe.20.003200.
25. Kwark Y., Sinton R., Gan J., Swanson R. M. IVB-6 a 27-percent efficient silicon solar cell. *IEEE Trans. Electron Devices* 1986, 33, 1855–1855, doi: 10.1109/T-ED.1986.22802.
26. Hao M., Bai Y., Zeiske S., Ren L., Liu J., Yuan Y., Zarrabi N., Cheng N., Ghasemi M., Chen P. et al. Ligand-assisted cation-exchange engineering for high-efficiency colloidal Cs_{1-x}FaxPb₁₃ quantum dot solar cells with reduced phase segregation. *Nature Energy* 2020, 5, 79–88, doi: 10.1038/s41560-019-0535-7.
27. Hu L., Zhao Q., Huang S., Zheng J., Guan X., Patterson R., Kim J., Shi L., Lin C.-H., Lei Q. et al. Flexible and efficient perovskite quantum dot solar cells via hybrid interfacial architecture. *Nat Commun* 2021, 12, 466, doi: 10.1038/s41467-020-20749-1.
28. Kurley J. M., Pan J.-A., Wang Y., Zhang H., Russell J. C., Pach G. F., To B., Luther J. M., Talapin D. V. Roll-To-Roll Friendly Solution-Processing of Ultrathin, Sintered CdTe Nanocrystal Photovoltaics. *Acs Appl Mater Inter* 2021, 13, 44165–44173, doi: 10.1021/acsami.1c08325.
29. Huffaker D. L., Park G., Zou Z., Shchekin O. B., Deppe D. G. 1.3 μm room-temperature GaAs-based quantum-dot laser. *Appl. Phys. Lett.* 1998, 73, 2564–2566, doi: 10.1063/1.122534.
30. Kirstaedter N., Ledentsov N. N., Grundmann M., Bimberg D., Ustinov V. M., Ruvimov S. S., Maximov M. V., Kopev P. S., Alferov Z. I., Richter U. et al. LOW-THRESHOLD, LARGE T-O INJECTION-LASER EMISSION FROM (INGA)AS QUANTUM DOTS. *Electronics Letters* 1994, 30, 1416–1417, doi: 10.1049/el:19940939.
31. Klimov V. I., Mikhailovsky A. A., Xu S., Malko A., Hollingsworth J. A., Leatherdale C. A., Eisler H. J., Bawendi M. G. Optical gain and stimulated



- emission in nanocrystal quantum dots. *Science* 2000, 290, 314–317.
32. Roh J., Park Y.-S., Lim J., Klimov V. I. Optically pumped colloidal-quantum-dot lasing in LED-like devices with an integrated optical cavity. *Nat Commun* 2020, 11, 1–10.
 33. le Feber B., Prins F., De Leo E., Rabouw F. T., Norris D. J. Colloidal-Quantum-Dot Ring Lasers with Active Color Control. *Nano Lett.* 2018, 18, 1028–1034, doi: 10.1021/acs.nanolett.7b04495.
 34. Xie W., Stöferle T., Raino G., Aubert T., Bisschop S., Zhu Y., Mahrt R. F., Geiregat P., Brainis E., Hens Z. On-Chip Integrated Quantum-Dot-Silicon-Nitride Microdisk Lasers. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1604866.
 35. Коэф Й., Фишер М., Легге М., Сейферт Й., Вернер Р., ЛАЗЕРЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ БРЭГГОВСКИМИ РЕШЕТКАМИ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ, ТОЧКАХ И С КВАНТОВЫМИ КАСКАДАМИ. *Фотоника* 2008, 4, 12–17.
 36. Maksimov A. A., Filatov E. V., Tartakovskii I. I. A Semiconductor Injection Laser with Circularly Polarized Radiation. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021, 85, 176–179, doi: 10.3103/S1062873821020192.
 37. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review. *J Optics-Uk* 2018, 47, 307–317, doi: 10.1007/s12596-018-0452-3.
 38. Blatt R., Wineland D. Entangled states of trapped atomic ions. *Nature* 2008, 453, 1008–1015, doi: 10.1038/nature07125.
 39. Shomroni I., Rosenblum S., Lovsky Y., Bechler O., Guendelman G., Dayan B. All-optical routing of single photons by a one-atom switch controlled by a single photon. *Science* 2014, 345, 903–906, doi: 10.1126/science.1254699.
 40. Firstenberg O., Peyronel T., Liang Q.-Y., Gorshkov A. V., Lukin M. D., Vuletić V. Attractive photons in a quantum nonlinear medium. *Nature* 2013, 502, 71–75, doi: 10.1038/nature12512.
 41. Hwang J., Pototschnig M., Lettow R., Zumofen G., Renn A., Götzinger S., Sandoghdar V. A single-molecule optical transistor. *Nature* 2009, 460, 76–80, doi: 10.1038/nature08134.
 42. Krivenkov V., Samokhvalov P., Nabiev I., Rakovich Y. *Quantum dot-based plasmon-exciton emitters with improved one- and two-photon emission properties*; SPIE: 2021; Vol. 11694.
 43. Dutt M. V. G., Childress L., Jiang L., Togan E., Maze J., Jelezko F., Zibrov A. S., Hemmer P. R., Lukin M. D. Quantum Register Based on Individual Electronic and Nuclear Spin Qubits in Diamond. *Science* 2007, 316, 1312–1316, doi: 10.1126/science.1139831.
 44. Kim H., Bose R., Shen T. C., Solomon G. S., Waks E. A quantum logic gate between a solid-state quantum bit and a photon. *Nat. Photonics* 2013, 7, 373–377, doi: 10.1038/nphoton.2013.48.
 45. Wells L. M., Kalliakos S., Villa B., Ellis D. J. P., Stevenson R. M., Bennett A. J., Farrer I., Ritchie D. A., Shields A. J. Photon Phase Shift at the Few-Photon Level and Optical Switching by a Quantum Dot in a Microcavity. *Phys. Rev. Appl.* 2019, 11, 061001, doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.061001.
 46. Buterakos D., Barnes E., Economou S. E. Deterministic generation of all-photon quantum repeaters from solid-state emitters. *Phys Rev X* 2017, 7, 041023.
 47. Chen A. A., Derfus A. M., Khetani S. R., Bhatia S. N. Quantum dots to monitor RNAi delivery and improve gene silencing. *Nucleic Acids Res.* 2005, 33, e190–e190, doi: 10.1093/nar/gni188.
 48. Gongalsky M. B., Osminkina L. A., Pereira A., Manankov A. A., Fedorenko A. A., Vasiliev A. N., Solovyev V. V., Kudryavtsev A. A., Sentis M., Kabashin A. V. et al. Laser-synthesized oxide-passivated bright Si quantum dots for bioimaging. *Sci Rep* 2016, 6, doi: 10.1038/srep24732.
 49. Zdobnova T. A., Dorofeev S. G., Tananaev P. N., Vasiliev R. B., Balandin T. G., Edelweiss E. F., Stremovskiy O. A., Balalaeva I. V., Turchin I. V., Lebedenko E. N. et al. Fluorescent immunolabeling of cancer cells by quantum dots and antibody scFv fragment. *J. Biomed. Opt.* 2009, 14, doi: 10.1117/1.3122775.
 50. Eremchev I. Y., Eremchev M. Y., Naumov A. V. Multifunctional far-field luminescence nanoscope for studying single molecules and quantum dots (50th anniversary of the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences). *Phys. Usp.* 2019, 62, 294–303, doi: 10.3367/UFNr.2018.06.038461.
 51. Naumov A. V. Low temperature spectroscopy of organic molecules in solid matrices: from the Shpolsky effect to the laser luminescent spectromicroscopy for all effectively emitting single molecules. *Phys. Usp.* 2013, 56, 605–622, doi: 10.3367/UFNe.0183.201306f.0633.
 52. Eremchev I. Yu., Prokopova D. V., Losevskii N. N., Mynzhasarov I. T., Kotova S. P., Naumov A. V. Three-dimensional fluorescence nanoscopy of single quantum emitters with highly efficient spatial phase modification of the point spread function based on spiral light beams. *Phys. Usp.* 2022, 10.3367/UFNe.2021.05.038982, doi: 10.3367/UFNe.2021.05.038982.

ЭССЕНТОПТИКС ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



185 – 5200 nm

УНИКАЛЬНО ШИРОКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ
ДИАПАЗОН В ОДНОМ ПРИБОРЕ

—
WORLD-RECORD WAVELENGTH RANGE
IN ONE INSTRUMENT

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com



53. Stryer L. Fluorescence Energy Transfer as a Spectroscopic Ruler. *Annu. Rev. Biochem.* 1978, 47, 819–846, doi: 10.1146/annurev.bi.47.070178.004131.
54. Ovchinnikov O. V., Grevtseva I. G., Smirnov M. S., Kondratenko T. S., Perepelitsa A. S., Aslanov S. V., Khokhlov V. U., Tatyana E. P., Matsukovich A. S. Effect of thioglycolic acid molecules on luminescence properties of Ag₂S quantum dots. *Opt. Quantum Electron.* 2020, 52, doi: 10.1007/s11082-020-02314-8.
55. Pan D., Zhang J., Li Z., Wu M. Hydrothermal route for cutting graphene sheets into blue-luminescent graphene quantum dots. *Adv Mater* 2010, 22, 734–738, doi: 10.1002/adma.200902825.
56. Kvashnin A. G., Kvashnina O. P., Kvashnin D. G. Hydrogen adsorption study. Formation of quantum dots on graphene nanoribbons within tight-binding approach. *Nanotechnology* 2015, 26, 175704, doi: 10.1088/0957-4484/26/17/175704.
57. Chen W. -C., Fang Y. -H., Chen L. -G., Liang F. -C., Yan Z. -L., Ebe H., Takahashi Y., Chiba T., Kido J., Kuo C. -C. High luminescence and external quantum efficiency in perovskite quantum-dots light-emitting diodes featuring bilateral affinity to silver and short alkyl ligands. *Chem. Eng. J.* 2021, 414, 128866, doi: 10.1016/j.cej.2021.128866.
58. Chang Y. -H., Ku C. -W., Zhang Y. -H., Wang H. -C., Chen J. -Y. Ultrafast Responsive Non-Volatile Flash Photomemory via Spatially Addressable Perovskite/Block Copolymer Composite Film. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 2000764, doi: 10.1002/adfm.202000764.
59. Yang Y., Wei L., Pei J. Application of meta-analysis technique to assess effectiveness of HACCP-based FSM systems in Chinese SLDBs. *Food Control* 2019, 96, 291–298, doi: 10.1016/j.foodcont.2018.09.013.
60. Chen L. -C., Lee K. -L., Huang C. -Y., Lin J. -C., Tseng Z. -L. Preparation and Characteristics of MAPbBr₃ Perovskite Quantum Dots on NiOx Film and Application for High Transparent Solar Cells. *Micromachines* 2018, 9, 205, doi: 10.3390/mi9050205.
61. Sutherland B. R., Sargent E. H. Perovskite photonic sources. *Nat. Photonics* 2016, 10, 295–302, doi: 10.1038/nphoton.2016.62.
62. Wang H. -C., Bao Z., Tsai H. -Y., Tang A. -C., Liu R. -S. Perovskite Quantum Dots and Their Application in Light-Emitting Diodes. *Small* 2018, 14, 1702433, doi: 10.1002/sml.201702433.
63. Wootters W. K., Zurek W. H. A Single Quantum Cannot be Cloned. *Nature.* 1982;299(5886):802–3.
64. Klimov V. V. Control of the emission of elementary quantum systems using metamaterials and nanometaparticles. *Phys-Usp.* 2021;64(10):990–1020.
65. Arakawa Y., Holmes M. J. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview. *Applied Physics Reviews.* 2020;7(2).
66. Somaschi N., Giesz V., De Santis L., Loredò J. C., Almeida M. P., Hornecker G. et al. Near-optimal single-photon sources in the solid state. *Nature Photonics.* 2016;10(5):340–745. DOI: 10.1038/nphoton.2016.23.
67. Wang H., He Y. M., Chung T. H., Hu H., Yu Y., Chen S. et al. Towards optimal single-photon sources from polarized microcavities. *Nature Photonics.* 2019;13(11):770–775. DOI: 10.1038/s41566-019-0494-3.
68. Vitukhnovsky A. G., Zvagelsky R. D., Kolymagin D. A., Pisarenko A. V., Chubich D. A. Three-Dimensional Optical Lithography and Nanoscale Optical Connectors. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2020;84(7):760–765. DOI: 10.3103/S1062873820070321.
69. Kako S., Holmes M., Sergent S., Burger M., As D. J., Arakawa Y. Single-photon emission from cubic GaN quantum dots. *Applied Physics Letters.* 2014;104(1). DOI: 10.1063/1.4858966.
70. Arita M., Le Roux F., Holmes M. J., Kako S., Arakawa Y. Ultraclean Single Photon Emission from a GaN Quantum Dot. *Nano Letters.* 2017;17(5):2902–7. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b00109.
71. Tribu A., Sallen G., Aichele T., Andre R., Poizat J. P., Bougerol C. et al. A High-Temperature Single-Photon Source from Nanowire Quantum Dots. *Nano Letters.* 2008;8(12):4326–9. DOI: 10.1021/nl802160z.
72. Quitsch W., Kummell T., Gust A., Kruse C., Hommel D., Bacher G. Electrically driven single photon emission from a CdSe / ZnSSe single quantum dot at 200 K. *Applied Physics Letters.* 2014;105(9). DOI: 10.1063/1.4894729.
73. Dusanowski L., Holewa P., Marynski A., Musial A., Heuser T., Srocka N. et al. Triggered high-purity telecom-wavelength single-photon generation from p-shell-driven InGaAs / GaAs quantum dot. *Optics Express.* 2017;25(25):31122–9. DOI: 10.1364 / OE.25.031122.
74. Miyazawa T., Takemoto K., Nambu Y., Miki S., Yamashita T., Terai H. et al. Single-photon emission at 1.5 μm from an InAs / InP quantum dot with highly suppressed multi-photon emission probabilities. *Applied Physics Letters.* 2016;109(13). DOI: 10.1063 / 1.4961888.
75. Kukushkin V. I., Mukhametzhano I. M., Kukushkin I. V., Kulakovskii V. D., Sedova I. V., Sorokin S. V. et al. Control of semiconductor quantum dot emission intensity and polarization by metal nanoantennas. *Physical Review B.* 2014;90(23). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.235313.
76. Zwiller V., Aichele T., Seifert W., Persson J., Benson O. Generating visible single photons on demand with single InP quantum dots. *Applied Physics Letters.* 2003;82(10):1509–1511. DOI: 10.1063/1.1558952.
77. Fedorych O., Kruse C., Ruban A., Hommel D., Bacher G., Kummell T. Room temperature single photon emission from an epitaxially grown quantum dot. *Applied Physics Letters.* 2012;100(6). DOI: 10.1063/1.3683498.
78. Torchyńska T. V. Emission of double core infrared (CdSeTe) / ZnS quantum dots conjugated to antibodies. *Journal of Luminescence.* 2013;137:157–161. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.12.048.
79. Eremchev I. Y., Lozing N. A., Baev A. A., Tarasevich A. O., Gladush M. G., Rozhentsov A. A. et al. Luminescence Microscopy of Single Quantum Dot Pairs with Nanometer Spatial Resolution. *Jetp Letters.* 2018;108(1):30–37. DOI: 10.1134/S0021364018130076.
80. Heshami K., England D. G., Humphreys P. C., Bustard P. J., Acosta V. M., Nunn J. et al. Quantum memories: emerging applications and recent advances. *J. Mod Optic.* 2016;63(20):2005–2028. DOI: 10.1080/09500340.2016.1148212.
81. Simon C., Afzelius M., Appel J., de la Giroday A. B., Dewhurst S. J., Gisin N. et al. Quantum memories. *European Physical Journal D.* 2010;58(1):1–22. DOI: 10.1140/epjd/e2010-00103-y.
82. Perminov N. S., Petrovkin K. V., Tarankova D. Y., Moiseev S. A. Optimization of Photon Molecules for Quantum Memory. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2019;83(12):1459–1461. DOI: 10.3103/S1062873819120207.
83. Young R. J., Dewhurst S. J., Stevenson R. M., Atkinson P., Bennett A. J., Ward M. B. et al. Single electron-spin memory with a semiconductor quantum dot. *New Journal of Physics.* 2007;9. DOI: 10.1088/1367-2630/9/10/365.
84. Chekhovich E. A., Glazov M. M., Krysa A. B., Hopkinson M., Senellart P., Lemaître A. et al. Element-sensitive measurement of the hole-nuclear spin interaction in quantum dots. *Nat Phys.* 2013;9(2):74–78. DOI: 10.1038/nphys2514.
85. Kerski J., Lochner P., Ludwig A., Wieck A. D., Kurzmann A., Lorke A. et al. Quantum Sensor for Nanoscale Defect Characterization. *Physical Review Applied.* 2021;15(2):13. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.024029.
86. Tsukanov A. V., Chekmachev V. G. Electric-field sensor based on a double quantum dot in a microcavity. *Semiconductors.* 2017;51(9):1200–1207. DOI: 10.1134/S1063782617090214.
87. Generalova A. N., Oleinikov V. A., Sukhanova A., Artemyev M. V., Zubov V. P., Nabiev I. Quantum dot-containing polymer particles with thermosensitive fluorescence. *Biosensors & Bioelectronics.* 2013;39(1):187–193. DOI: 10.1117/12.931427.

АВТОРЫ

- А. И. Аржанов, Московский педагогический государственный университет, Москва; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Троицк, Россия.
ORCID: 0000-0001-9305-067X
- А. О. Савостьянов, Московский педагогический государственный университет, Москва; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Троицк, Россия.
ORCID: 0000-0001-8815-8440
- К. А. Магарян, Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-4754-4657
- К. Р. Каримуллин, Московский педагогический государственный университет, Москва; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Троицк, Россия.
ORCID: 0000-0001-6799-2479
- А. В. Наумов, Московский педагогический государственный университет, Москва; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Троицк, Россия. www.single-molecule.ru.
ORCID: 0000-0001-7938-9802



ИЛВСТ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СЕМЕЙСТВО РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ»



ИЛИСТ-M



ИЛИСТ-L



ИЛИСТ-L+



ИЛИСТ-XL



ИЛИСТ-2XL



РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ-L+»

- размер выращиваемого изделия до – \varnothing 1500 мм, h – 1000 мм
- максимальный вес изделия – 1000 кг
- волоконный лазер мощностью до 3 кВт
- производительность – до 125 см³/ч
- контролируемая атмосфера чистого аргона – 12 м³
- восемь синхронно управляемых осей
- порошковый питатель на две колбы
- набор сопел подачи порошка с быстрой заменой
- вакуумируемый шлюз

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

- нержавеющие и высокопрочные стали
- жаропрочные никелевые сплавы
- титановые сплавы
- сплавы на основе кобальта и меди

Проводим теоретическую и практическую переподготовку персонала промышленных предприятий для работы на аддитивных установках прямого лазерного выращивания.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а

Тел. +7 (812) 757-22-22, e-mail: ilwt@ilwt.smtu.ru www.smtu.ru www.ilwt-stu.ru

