



Источники одинокных фотонов. Обзор

Часть 3

В. Г. Криштон

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники РАН,
г. Черноголовка, Моск. обл., Россия.

² АО «ИнфоТеКС», Москва, Россия.

³ Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный, Моск. обл., Россия.

Статья продолжает обзор источников однокных фотонов, в котором рассматриваются различные способы создания однофотонных источников (ИОФ). Ранее в первой части обзора (Photronics Russia. 2024; 18(5): 376–396) обсуждались требования к однофотонным источникам и критерии их характеристики, описывались источники однокных фотонов на основе однокных ионов и на основе однокных атомов. ИОФ на квантовых точках и на центрах окраски в кристаллах были рассмотрены во второй части обзора (Photronics Russia. 2024; 18(8): 610–620). В третьей части рассмотрены однофотонные источники на углеродных нанотрубках и дефектах в них (инженерия дефектов в нанотрубках), на нанокристаллах и слоистых нанокристаллах.

Ключевые слова: квантовые точки, углеродные нанотрубки, инженерия дефектов в нанотрубках, индексы хиральности, нанокристаллы, низкоразмерные наноструктуры

Статья поступила: 01.08.2024

Статья принята: 16.08.2024

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ (УНТ)

Углеродные нанотрубки могут служить источниками однокных фотонов [140]. Углеродные нанотрубки представляют собой один или несколько слоев графена, свернутых в цилиндр. При кажущейся их простоте нанотрубки – это целый класс различных нанообъектов с самыми разнообразными свойствами. В силу своего уникального строения они одновременно демонстрируют свойства и одномерных, и двумерных, и трехмерных мате-

Single Photon Sources. A Review

Part 3

V. G. Krishtop

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

² JSC “InfoTeCS”, Moscow.

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia.

The article continues the review of single photon sources while considering various methods for the single photon sources (SPS) development. Earlier, the first part of the review (Photronics Russia. 2024; 18(5): 376–396) discussed the requirements for single-photon sources and their characterization criteria, described the single-ion and single-atom-based single-photon sources. The SPSs based on the quantum dots and color centers in the crystals were considered in the second part of the review (Photronics Russia. 2024; 18(8): 610–620). The third part considers the single-photon sources based on the carbon nanotubes and their defects (defect engineering in the nanotubes), on nanocrystals and layered nanocrystals.

Keywords: quantum dots, carbon nanotubes, nanotube defect engineering, chirality indices, nanocrystals, low dimensional nanostructures

Article received: August 01, 2024

Article accepted: August 16, 2024

CARBON NANOTUBES (CNT)

Carbon nanotubes can be used as the single photon sources [140]. The carbon nanotubes are one or more layers of graphene rolled into a cylinder. Despite their apparent simplicity, the nanotubes represent an entire class of various nanoobjects with a wide variety of properties. Due to their unique structure, they simultaneously demonstrate the properties of one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional materials. For example, carbon nanotubes have demonstrated superconductivity and the

риалов. Например, в углеродных нанотрубках продемонстрированы сверхпроводимость и мемристорный эффект. Несмотря на то, что нанотрубки были теоретически предсказаны и наблюдались экспериментально достаточно давно, разнообразие нанотрубок всевозможных геометрий и модификаций продолжает приумножаться. Их свойства изучаются до сих пор и на этом пути открываются все новые горизонты.

Углеродные нанотрубки могут быть одностенными или многостенными, открытыми или закрытыми, их диаметр и длина могут варьироваться в широких пределах (рис. 13). Диаметр нанотрубок может составлять от одного до нескольких десятков нанометров, а длина достигает нескольких микрон.

Одностенные нанотрубки обладают таким параметром, как «хиральность» (рис. 14), что можно упрощенно представить как угол по отношению к кристаллографическим осям, под которым «вырезан» из плоскости участок графена, из которого «свернута» в цилиндр данная нанотрубка. В общем случае нанотрубки, так же как и однослойный графен, демонстрируют металлический характер проводимости. Однако одностенные нанотрубки с определенными индексами хиральности демонстрируют полупроводниковые свойства.

Для однофотонных источников используются именно одностенные полупроводниковые углеродные нанотрубки. В таких нанотрубках при воздействии внешнего излучения или электрического тока происходит образование экситонов. Экситон – это незаряженная водородоподобная квазичастица, состоящая из связанных между собой электрона и дырки. Экситоны в полупроводниковых углеродных нанотрубках рекомбинируют

memristor effect. Despite the fact that nanotubes have been theoretically predicted and observed experimentally quite a long time ago, the diversity of nanotubes with various geometries and modifications continues to expand. Their properties are still being

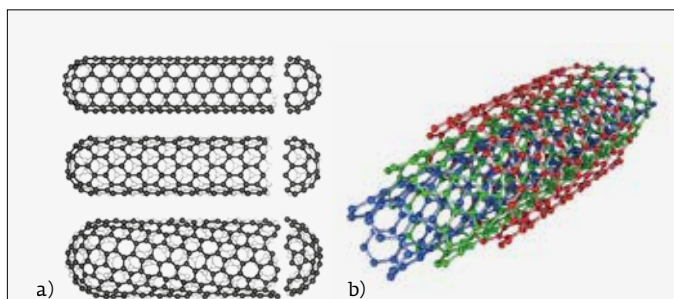


Рис. 13. Схематические модели одностенных и многостенных углеродных нанотрубок [141]

Fig. 13. Schematic models of single-walled and multi-walled carbon nanotubes [141]

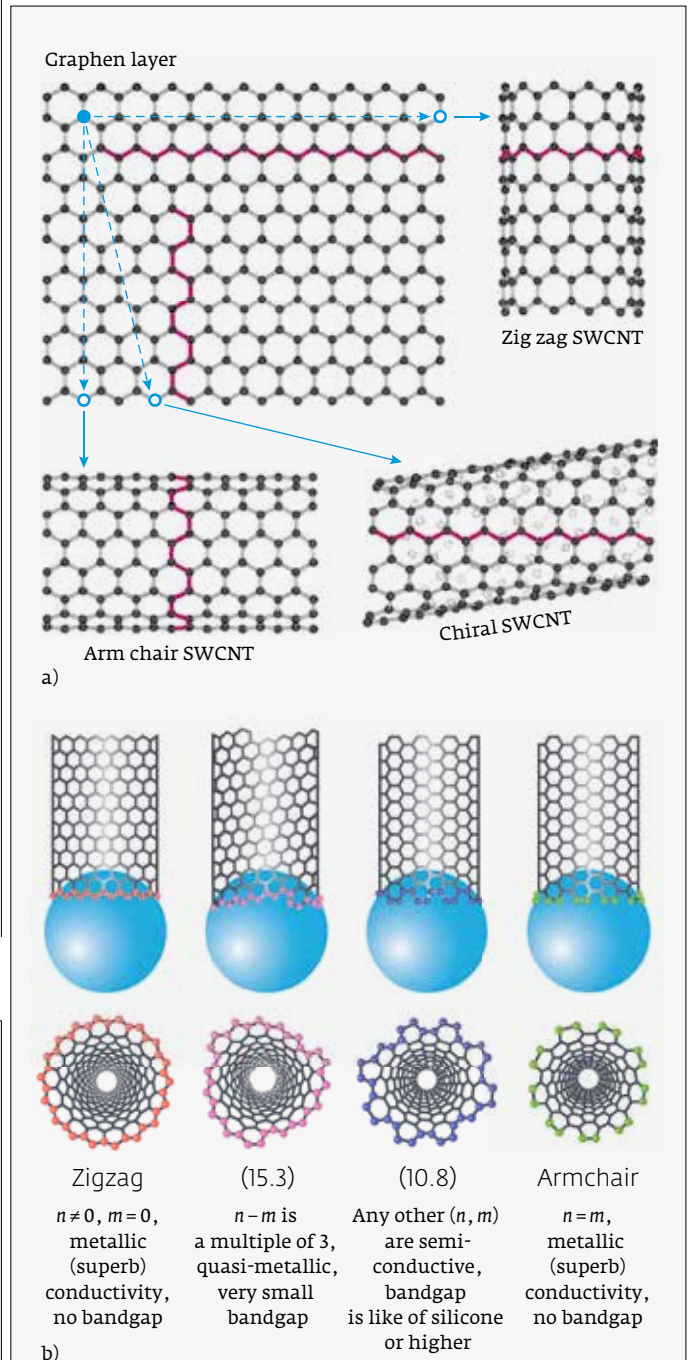


Рис. 14. Нанотрубки с разной хиральностью [142, 143]

Fig. 14. Nanotubes with various chirality [142, 143]

с испусканием фотона. Таким образом, полупроводниковые нанотрубки под воздействием оптического или электрического возбуждения излучают фотоны в видимом и инфракрасном диапазоне [144], т. е. демонстрируют фотолюминисценцию и электролюминисценцию.

Чтобы создать источник одиночных фотонов, необходимо внедрить в полупроводниковую одностенную нанотрубку специальный дефект, который будет способствовать рекомбинации экситона вблизи этого дефекта. При этом, если размеры экситона и диаметр нанотрубки сопоставимы, то вблизи дефекта (в области вынужденной рекомбинации) за один раз рекомбинирует ровно один экситон и излучает ровно один фотон. Время жизни экситона на бездефектных участках нанотрубки значительно выше, и вероятность спонтанной рекомбинации значительно меньше. Другой способ – это обустройство в нанотрубке экситонной ловушки, угодив в которую, экситон локализуется, после чего ему остается только благополучно рекомбинировать по окончании своего времени жизни.

Кроме того, экситоны в нанотрубках, подобно атомам газов, могут связываться по два и образовывать экситонную молекулу, которая тоже при рекомбинации излучает один фотон. Также была продемонстрирована рекомбинация с испусканием одиночного фотона при аннигиляции двух экситонов, движущихся по нанотрубке навстречу друг другу [145], и аннигиляция (рекомбинация) экситона на нульмерном состоянии в нанотрубке [146] (рис. 15).

В качестве оптически активного дефекта, принуждающего экситоны к рекомбинации, могут выступать самые различные объекты. Изобретение таких объектов и изготовление нанотрубок, содержащих эти объекты, даже получило специальное название – Defect engineering of carbon nanotubes – разработка дефектов углеродных нанотрубок [147].

Дефекты в строении углеродных нанотрубок делятся на несколько категорий: топологические дефекты, дефекты, связанные с регибридизацией атома углерода, и дефекты ненасыщенных (оборванных) связей.

Топологические дефекты кристаллической структуры бывают чрезвычайно разнообразны.

studied, and new horizons are opening up along this path.

The carbon nanotubes can be single-walled or multi-walled, open or closed, their diameter and length can vary widely (Fig. 13). The diameter of nanotubes can be from one to several tens of nanometers, and their length reaches several microns.

The single-walled carbon nanotubes (SWCNT) have such a parameter as chirality (Fig. 14) that can be simply represented as an angle relative to the crystallographic axes, at which a section of graphene is “cut” from the plane. This nanotube is rolled into a cylinder from such section. In general, the nanotubes, like single-layer graphene, show metallic conductivity. However, the single-walled nanotubes with the certain chirality indices demonstrate the semiconducting properties.

For the single-photon sources, the single-walled semiconductor carbon nanotubes are applied. In such nanotubes, the excitons are formed when exposed to the external radiation or electric current. An exciton is an uncharged hydrogen-like quasiparticle consisting of an electron and a hole bound together. The excitons in the semiconductor carbon nanotubes are recombined with the photon emission, thus, the semiconductor nanotubes under the influence of optical or electrical excitation emit photons in the visible and infrared ranges [144], i. e. they show the photoluminescence and electroluminescence properties.

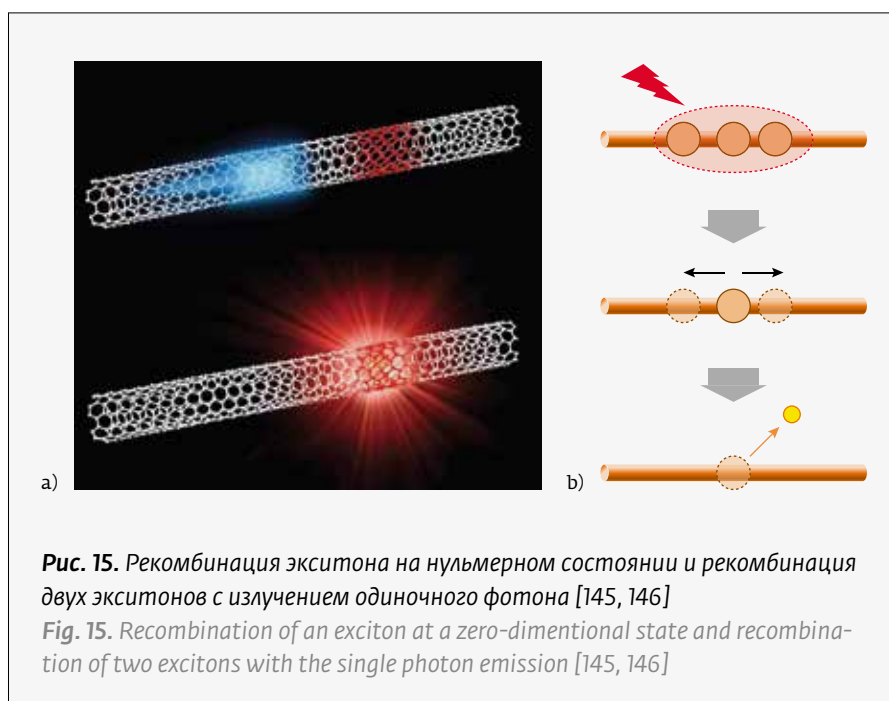


Рис. 15. Рекомбинация экситона на нульмерном состоянии и рекомбинация двух экситонов с излучением одиночного фотона [145, 146]
Fig. 15. Recombination of an exciton at a zero-dimensional state and recombination of two excitons with the single photon emission [145, 146]

Например, образование пятиугольника и семиугольника в гексагональной структуре (дефект Стоуна-Уэйлса); «локтевые» дефекты, которые приводят к изгибу нанотрубки (например, образование пары семиугольник-пятиугольник на разных сторонах нанотрубки напротив друг друга); кольцевой сдвиговой дефект, подобный дислокации в трехмерных кристаллах, свернутой в кольцо (бамбукоподобная перемычка), или сужение нанотрубки (рис. 16).

Весьма популярным для извлечения одиночных фотонов из одностенных нанотрубок является кристаллический дефект, связанный с гибридизацией электронных оболочек углерода [151, 152]. Дело в том, что электронные орбитали углерода могут гибри-

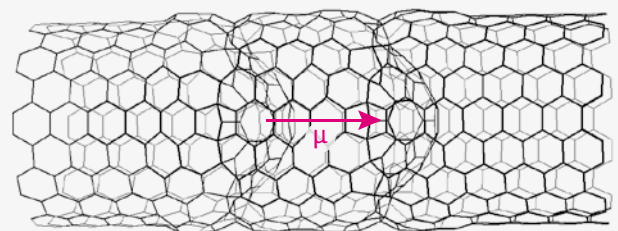
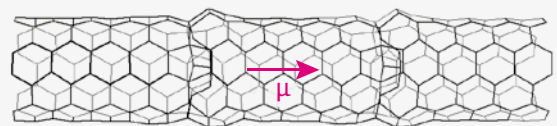
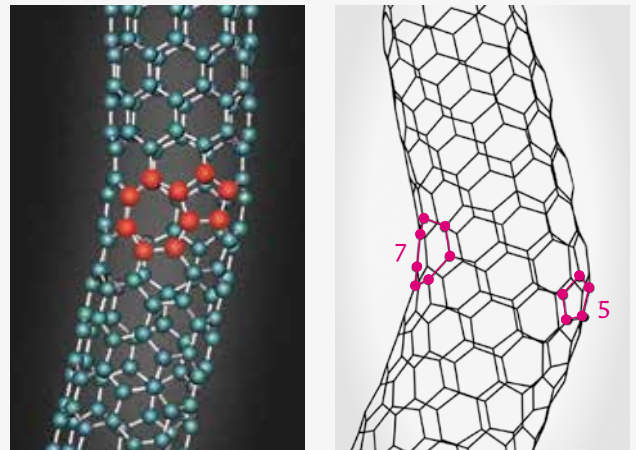
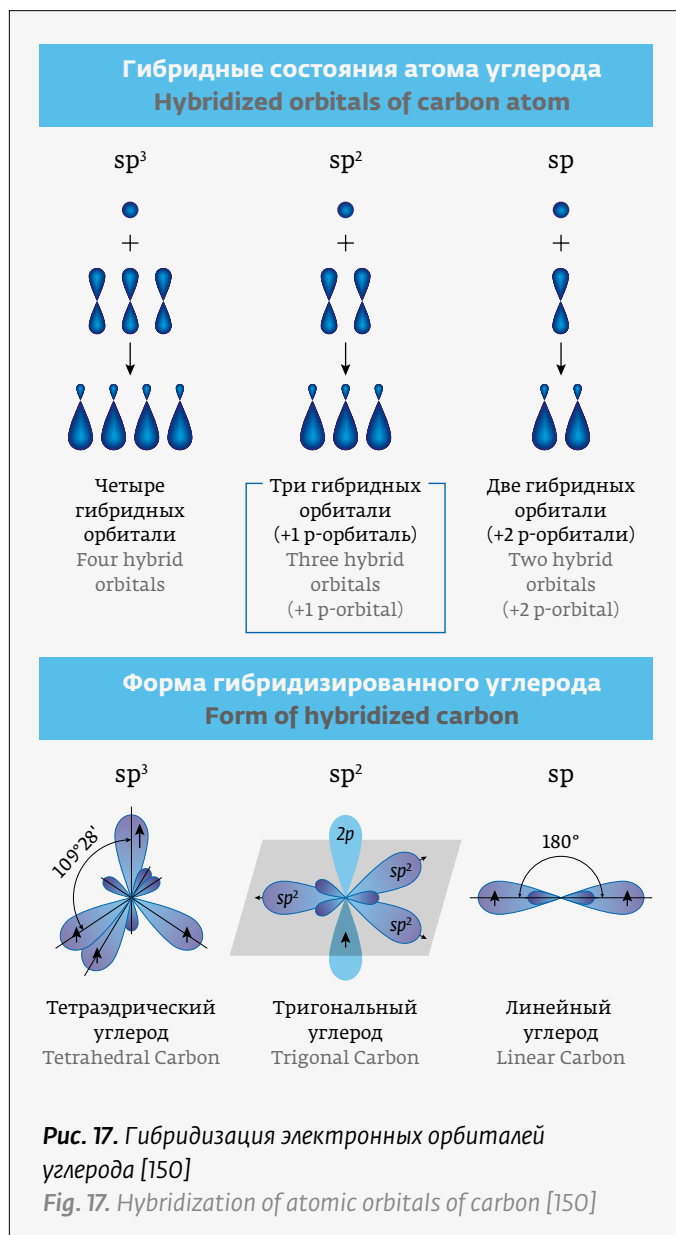


Рис. 16. Дефект Стоуна-Уэйлса [148] и «локтевой дефект» [149], бамбукоподобные структуры [150]

Fig. 16. Stone-Wales defect [148] and elbow defect [149]; bamboo-like structures [150]



To develop a single photon source, it is necessary to introduce a special defect into the semiconductor single-walled nanotube that will promote the exciton recombination near this defect. In this case, if the exciton size and the nanotube diameter are comparable, then near the defect (in the area of stimulated recombination) there is recombination of exactly one exciton and emission of exactly one photon. The exciton lifetime in the defect-free areas of a nanotube is significantly higher, and the spontaneous recombination probability is significantly lower. Another way is to arrange an exciton trap in a nanotube. Having fallen into such a trap, the exciton becomes localized, after which it only has to be successfully recombined at the end of its lifetime.

дизироваться разными способами (рис. 17). Участвующие в правильной гексагональной решетке графена атомы углерода имеют sp^2 -гибридизацию, но с помощью специальных химических реакций можно присоединиться к отдельному атому в кристаллической решетке, и тогда гибридизация отдельного атома в решетке изменится на sp^3 . В таком случае sp^3 -гибридизированный атом углерода будет создавать неоднородность в идеальной решетке из sp^2 атомов, и стехиометрически правильная нанотрубка будет иметь неоднородность в распределении электронной плотности.

Другой класс дефектов: дефекты ненасыщенных (оборванных) связей (рис. 18). Такие дефекты в большом количестве образуются при термической обработке нанотрубок при высоких температурах. Например, на рис. 18 показаны некоторые пиролитические дефекты при отжиге нанотрубок на воздухе при температуре 600–700°. Наряду с азотом и кислородом нанотрубки могут быть легированы фтором.

Важным качеством источников одиночных фотонов на основе углеродных нанотрубок является возможность однофотонного излучения при комнатной температуре [153–157]. Также интересно, что частота излучения зависит от диаметра нанотрубки, что дает возможность «настройки» частоты источника в широком диапазоне.

Перечисленными возможностями дело далеко не исчерпывается. Так называемые методы функционализации нанотрубок позволяют создавать химически модифицированные нанотрубки множеством различных способов. Нанотрубки могут быть легированы примесными атомами. К внешней поверхности нанотрубок могут быть присоединены дополнительные атомы и радикалы. Внутри нанотрубок могут содержаться цепочки одиночных атомов или органические молекулы. В настоящее время активно изучаются пиподы (pearod) – нанотрубки, нафаршированные фуллеренами, как стручок гороха. Нанотрубки разных диаметров и хиральностей могут сшиваться друг с другом под разными углами (например, полупроводниковые и металлические нанотрубки). Они могут всячески разветвляться (нанотрубки Y- типа, H-типа и X-типа) или сворачиваться в тор. Нанотрубки могут декорироваться фуллеренами подобно галлам ореховых листьев. В качестве контактов к нанотрубке могут использоваться синтезированные с регулярным порядком нуклеотидов нити ДНК (полинуклеотиды), обернутые вокруг нанотрубки.

В довершение ко всему, нанотрубки могут быть не только углеродными. Уже получены нанотрубки

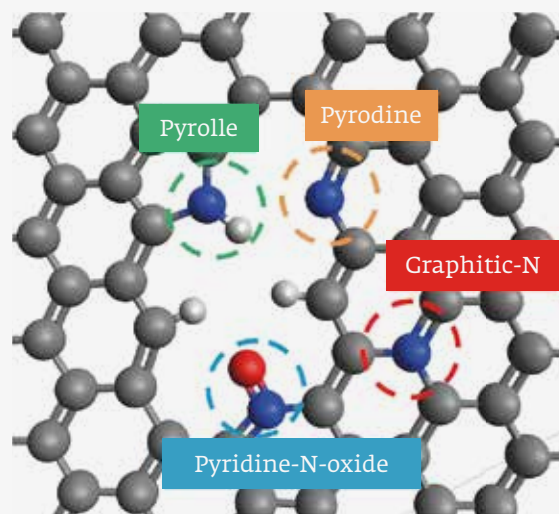


Рис. 18. Дефекты ненасыщенных (оборванных) связей. Различные конфигурации соединения азота с углеродом в решетке графена (серые кружки – атомы углерода; синие – азота; красные – кислорода; белые – водорода (источник: Русграфен, rusgraphen.ru)

Fig. 18. Defects of unsaturated (dangling) bonds. Various configurations of nitrogen-carbon compounds in the graphene lattice (gray circles – carbon atoms; blue circles – nitrogen atoms; red circles – oxygen atoms; white circles – hydrogen atoms (source: Rusgraphen, rusgraphen.ru)

In addition, the excitons in nanotubes (similar to the incident reactants), can bind in pairs and generate an exciton molecule that also emits one photon upon recombination. Recombination with a single photon emission during the annihilation of two excitons moving along a nanotube towards each other [145] and an exciton annihilation (recombination) at a zero-dimensional state in a nanotube [146] (Fig. 15) have also been demonstrated.

A wide variety of items can be applied as the optically active defects that force the excitons to recombine. The invention of such items and production of nanotubes containing these items have even received a special name: defect engineering of carbon nanotubes [147].

Defects in the carbon nanotube structure are divided into several categories: topological defects; defects related to the carbon atom rehybridization; and defects of unsaturated (dangling) bonds.

The topological defects of the crystal structure can be extremely diverse, for example, formation

из нитрида бора, карбида бора, карбида кремния и нитрида углерода; из оксидов и дихалькогенидов переходных металлов; из оксида цинка, который является хорошим пьезоэлектриком, а также многослойные углеродные нанотрубки, покрытые оксидом цинка; нитрида и селенида галлия; дисульфида молибдена и вольфрама. Также существует принц-технология для сворачивания в трубку напряженных эпитаксиальных гетероструктур, например, AlGaAs/GaAs, GaAs/InGaAs, Si/SiGe (названа по фамилии российского ученого В. Я. Принца).

Все эти методы позволяют получать новые объекты и материалы с новыми и пока еще экспериментально не изученными свойствами, и к ним применимы аналогичные принципы конструирования однофотонных источников.

НАНОКРИСТАЛЛЫ, НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ

Различные наноструктуры и нанобъекты очень перспективны для использования в качестве однофотонного источника, т. к. при переходе к наноразмерам в низкоразмерной структуре (двумерной или одномерной, или даже нульмерной), так же, как и в квантовой точке, возникают уровни размерного квантования, которыми можно управлять и которые можно заставить работать в квантовом режиме. В настоящее время изобретено великое множество различных наноструктур для организации однофотонного режима излучения, и нет даже надежды обзореть их сколь бы то ни было полно в журнальной статье.

Приведем только пару примеров. На рис. 19 показан оптический резонатор в виде легированного эрбием волновода с регулярной структурой нанометровых отверстий. Атомы эрбия в игольчатом кремниевом кристалле излучают свет с длиной волны 1536 нм, что соответствует короткому краю стандартного С-диапазона в телекоммуникационных ВОЛС.

На рис. 20 показан нанопровод из нитрида галлия с квантовой точкой из нитрида индия-галлия. В таком нанопроводе реализован однофотонный режим излучения с линейной поляризацией и электрической накачкой [160].

СЛОИСТЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ

Полупроводниковые нанокристаллы «ядро-оболочка» (Core-shell semiconducting nanocrystals, CSSNCs) представляют собой новый класс материалов, которые обладают промежуточными свойствами между свойствами небольших отдельных молекул и свойствами объемных кристаллических

of a pentagon and a heptagon in a hexagonal structure (Stone-Wales defect); elbow defects that lead to the nanotube bending (for example, formation of a heptagon-pentagon pair on various nanotube sides opposite to each other); a ring shearing defect similar to the dislocation in three-dimensional crystals, rolled into a ring (bamboo-like bridge); or narrowing of the nanotube (Fig. 16).

The crystalline defect related to the hybridization of the electron orbitals of carbon is rather popular for extracting single photons from the single-walled nanotubes [151, 152]. The fact is that the electron carbon orbitals can be hybridized in different ways (Fig. 17). The carbon atoms available in the regular hexagonal lattice of graphene have sp^2 -hybridization. However, with the help of special chemical reactions it is possible to attach to a single atom in the crystalline lattice, and then the hybridization of this single atom in the lattice will be changed to sp^3 . In this case, the sp^3 -hybridized carbon atom will develop a non-uniformity in the ideal lattice of sp^2 atoms. Therefore, a stoichiometrically regular nanotube will have a non-uniformity in the electron density distribution.

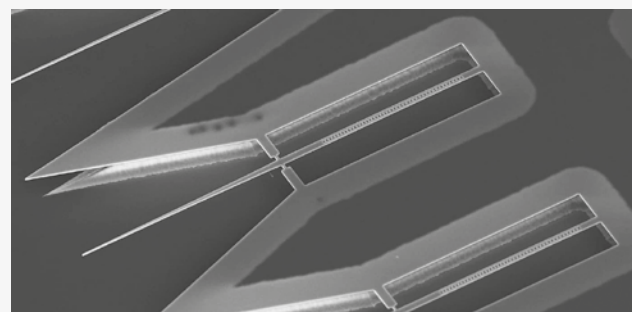


Рис. 19. Оптический резонатор для квантовых сетей на основе кремния, легированного атомами эрбия: вместо зеркал в резонаторе используется регулярная структура отверстий нанометрового размера в кристаллическом кремнии; атомы эрбия, помещенные в кремниевый кристалл, излучают на длине волны 1536 нм (с помощью таких резонаторов можно генерировать одиночные фотоны с заданными свойствами) [158, 159]

Fig. 19. Optical resonator cavity for quantum networks based on silicon doped with the erbium atoms: instead of the mirrors, the resonator uses a regular structure of nanometer-sized holes in the crystalline silicon; the erbium atoms placed in the silicon crystal emit at a wavelength of 1536 nm (using such resonators, it is possible to generate single photons with the specified properties) [158, 159]

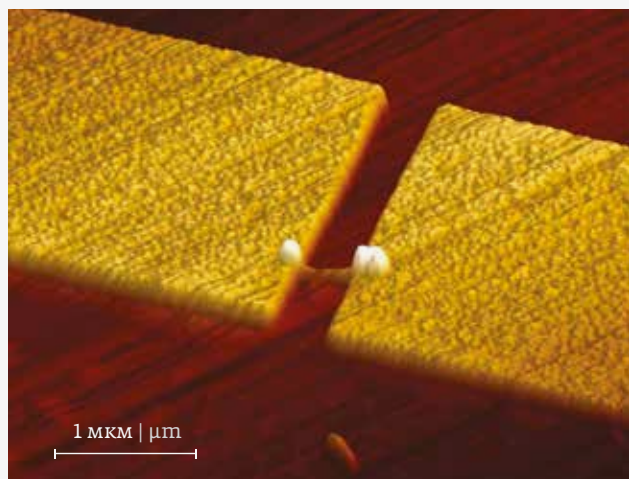


Рис. 20. Однофотонный излучатель с линейной поляризацией и электрической накачкой – нанопровод из нитрида галлия с квантовой точкой из нитрида индия-галлия [160]

Fig. 20. Single-photon emitter with the linear polarization and electrical pumping – a gallium nitride nanowire with indium gallium nitride quantum dot [160]

полупроводников. Эти нанокристаллы состоят из полупроводникового ядра – квантовой точки – и оболочки из отдельного полупроводникового материала. Ядро и оболочка обычно состоят из полупроводников типов II-VI, IV-VI и III-V с такими конфигурациями, как CdS/ZnS, CdSe/ZnS, CdSe/CdS и InAs/CdSe (типичное обозначение: core/shell) [161, 162]. Органически пассивированные квантовые точки имеют низкий квантовый выход флуоресценции из-за связанных с поверхностью ловушек [163]. CSSNC решают эту проблему, поскольку оболочка увеличивает квантовый выход за счет пассивации поверхностных состоя-

Another class of defects includes the defects of unsaturated (dangling) bonds (Fig. 18). Such defects are formed in the large quantities during thermal treatment of the nanotubes at high temperatures. For example, Fig. 18 shows some pyrolytic defects during the nanotube annealing process in air at a temperature of 600–700 degrees. Along with nitrogen and oxygen, the nanotubes can be doped with fluorine.

An important quality of single-photon sources based on the carbon nanotubes is the possible single-photon emission at a room temperature [153-157]. It is also interesting that the emission frequency depends on the nanotube diameter that makes it possible to set the source frequency in a wide range of values.

The possibilities listed above are far from exhaustive. The so-called nanotube functionalization methods allow the development of chemically modified nanotubes in a variety of ways. The nanotubes can be doped with the impurity atoms. Additional atoms and radicals can be attached to the outer surface of nanotubes. The inner part of the nanotubes can contain the chains of single atoms or organic molecules. The peapods, namely the nanotubes stuffed with the fullerenes like a pea pod, are currently being actively studied. The nanotubes of various diameters and chiralities can be cross-linked to each other at different angles (for example, semiconductor and metallic nanotubes). They can be branched out in all sorts of ways (the Y-type, H-type and X-type nanotubes) or rolled into a torus. The nanotubes can be decorated with fullerenes like the nut leaf galls. The DNA strands (polynucleotides) synthesized with a regular order of nucleotides and wrapped around the nanotube can be used as the contacts for the nanotube.

Finally, the nanotubes may not only be the carbon ones. The nanotubes made of boron nitride, boron carbide, silicon carbide, and carbon nitride; of transition metal oxides and dichalcogenides; of zinc oxide that



Рис. 21. Квантовые точки представляют собой ядро из селенида кадмия, прослойку из сульфида ртути в оболочке из сульфида кадмия: CdSe/HgS/CdS [165]

Fig. 21. Quantum dots with a core of cadmium selenide, an interlayer of mercury sulfide in the shell of cadmium sulfide: CdSe/HgS/CdS [165]

ний [163]. Кроме того, оболочка обеспечивает защиту от изменений окружающей среды, фотоокислительной деградации и обеспечивает еще один путь модульности [163, 164]. Точный контроль размера, формы и состава как ядра, так и оболочки позволяет настраивать длину волны излучения в более широком диапазоне длин волн, чем в случае с любым отдельным полупроводником.

Очень привлекательна относительная простота получения нанокристаллов CSSNC чисто химическими методами в коллоидных растворах без применения дорогостоящих микроэлектронных технологических установок. Еще одна интереснейшая возможность заключается в простоте нанесения нанокристаллов на подготовленную поверхность микрочипа в виде суспензии и способность коллоидных нанокристаллов самоорганизовываться в монослой.

Более тонкие возможности управления стабильностью и частотой излучения предоставляют трехслойные нанокристаллы, в которых между ядром и оболочкой внесен спейсерный (буферный) слой из специально подобранного материала (рис. 21). Например квантовые точки представляют собой ядро из селенида кадмия, прослойку из сульфида ртути в оболочке из сульфида кадмия: CdSe/HgS/CdS. В таких системах уже было продемонстрировано однофотонное излучение при комнатной температуре (рис. 22) [165].

Также интересны органические соединения подобных многослойных нанокристаллов и специальных органических радикалов, содержащих редкоземельные ионы. Например, был разработан гибридный материал, состоящий из трехслойных нанокристаллов CdSe/CdS/ZnS, окруженных оболочкой из специально подобранного комплексного соединения редкоземельного иона неодима с органическими молекулами. Органическая «обвязка» служит своеобразным «аккумулятором» для энергии накачки и катализатором возбуждения ядра [166].

В продолжение обзора будут рассмотрены однофотонные источники на коллективных состояниях в ансамблевых системах, на одиночных молекулах, на ионах металлов в полимерной матрице, а также источники на нелинейных кристаллах.

REFERENCES

Нанотрубки

Carbon Nanotubes

Пионеры однофотоники нанотрубок

Pioneers of Single-Photonics of Nanotubes

140. A. Högele, C. Galland, M. Winger, A. Imamoglu. Photon Antibunching in the Photoluminescence Spectra of a Single Carbon Nanotube. *Phys. Rev. Lett.* 2008; 100(21): 217401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.217401>

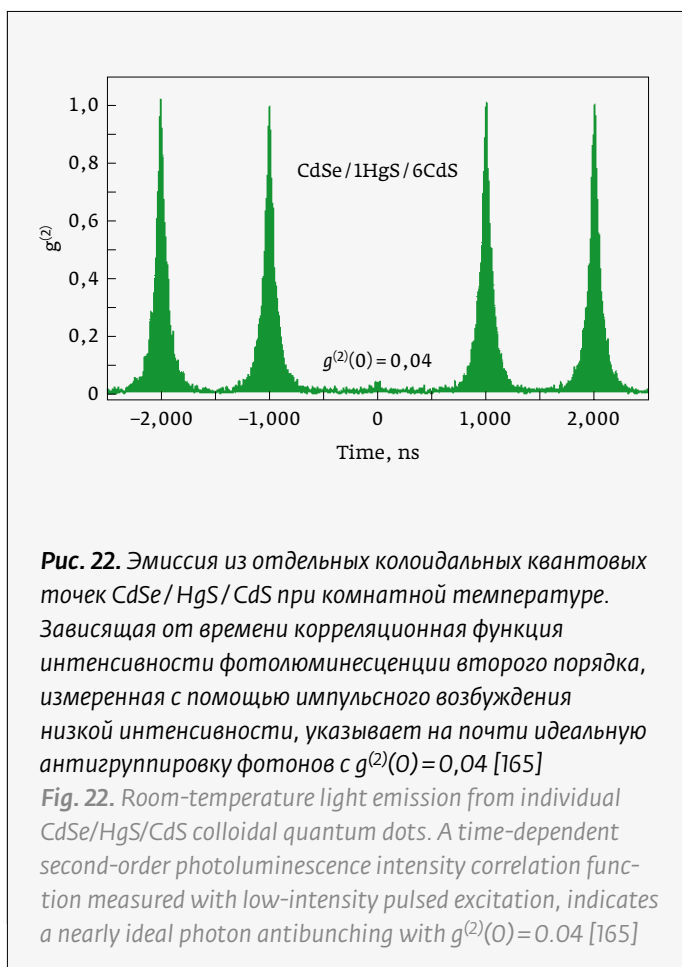


Рис. 22. Эмиссия из отдельных коллоидальных квантовых точек CdSe/HgS/CdS при комнатной температуре.

Зависящая от времени корреляционная функция интенсивности фотolumинесценции второго порядка, измеренная с помощью импульсного возбуждения низкой интенсивности, указывает на почти идеальную антигруппировку фотонов с $g^{(2)}(0) = 0,04$ [165]

Fig. 22. Room-temperature light emission from individual CdSe/HgS/CdS colloidal quantum dots. A time-dependent second-order photoluminescence intensity correlation function measured with low-intensity pulsed excitation, indicates a nearly ideal photon antibunching with $g^{(2)}(0) = 0.04$ [165]

is a high-quality piezoelectric, have been obtained. Moreover, there are the multilayer carbon nanotubes coated with zinc oxide; gallium nitride and selenide; molybdenum disulfide and tungsten. There is also a Prince technology for rolling up the strained epitaxial heterostructures into a tube, for example, AlGaAs/GaAs, GaAs/InGaAs, Si/SiGe (named after the Russian scientist V. Ya. Prince).

All these methods make it possible to obtain new items and materials with the advanced and as yet experimentally unstudied properties. In principle, the similar construction principles of single-photon sources can be applicable to them.

NANOCRYSTALS, LOW DIMENSIONAL NANOSTRUCTURES

Various nanostructures and nanoobjects are very promising for use as a single-photon source, since when moving to the nanoscale in a low-dimensional structure (two-dimensional or one-dimensional, or even zero-dimensional), as well as in the quantum dot, the dimensional quantization levels occur that



Про устройство нанотрубок

About carbon nanotubes structure, properties

141. **R. Saito, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus.** *Physical Properties of Carbon Nanotubes.* Imperial College Press. London. 1998).
142. **А. В. Суй, В. И. Строганов, В. В. Криштоп, В. А. Максименко.** *Оптические свойства наноматериалов.* Т. 1. Кристаллы. – под ред. А. В. Суй – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008.
143. **M. Filchakova, V. Saik.** Single-walled carbon nanotubes: structure, properties, applications, and health & safety. 2021; May 13. Tuball.com
144. **P. Avouris, M. Freitag, V. Perebeinos.** Carbon-nanotube photonics and optoelectronics. *Nature Photonics.* 2008–06; 2(6): 341–350. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.94>
145. **A. Ishii, T. Uda, Y. K. Kato.** Room-temperature single photon emission from micron-long air-suspended carbon nanotubes. *Phys. Rev. Applied.* 2017;8:054039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.054039>
146. **Y. Miyuchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, K. Matsuda.** Brightening of excitons in carbon nanotubes on dimensionality modification. *Nature Photonics.* 2013;7: 715–719. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.179>
147. **H. Zhang, Z. Zhou, J. Qiu, P. Chen, W. Sun.** Defect engineering of carbon nanotubes and its effect on mechanical properties of carbon nanotubes/polymer nanocomposites: A molecular dynamics study. *Composites Communications.* 2021; 28:100911. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100911>
148. **A. Thomas, L. Heinemann, A. Ramirez, A. Zehe.** Options for the Development of Noninvasive Glucose Monitoring. *Journal of Diabetes Science and Technology.* 2015;10(3): 782–789. <https://doi.org/10.1177/1932296815616133>
149. **E. G. Rakov.** The chemistry and application of carbon nanotubes. *Russian Chemical Reviews,* 2001; 70(10): 827–863. <https://doi.org/10.1070/rc2001v070n10abeh000660>
150. **O. E. Glukhova, A. S. Kolesnikova, G. V. Torgashov, Z. I. Buyanova.** Elastic and electrostatic properties of bamboo-shaped carbon nanotubes. *Physics of the Solid State.* 2010;52(6): 1323–1328. <https://doi.org/10.1134/s1063783410060326>

Источники на основе дефекта, обусловленного sp^3 гибридизациейSources based on a defect caused by sp^3 hybridization

151. **Y. Piao, B. Meany, L. R. Powell, N. Valley, H. Kwon, G. C. Schatz, Y. Wang.** Brightening of Carbon Nanotube Photoluminescence through the Incorporation of sp^3 Defects. *Nature Chemistry.* 2013;5:840–845. <https://doi.org/10.1038/nchem.1711>
152. **X. He, N. F. Hartmann, X. Ma, Y. Kim, R. Ihly, J. L. Blackburn, W. Gao, J. Kono, Y. Yomogida, A. Hirano, T. Tanaka, H. Kataura, H. Htoon, S. K. Doorn.** Tunable Room-Temperature Single-Photon Emission at Telecom Wavelengths from sp^3 Defects in Carbon Nanotubes. *Nature Photonics.* 2017; 11: 577. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.119>

Демонстрация однофотонного излучения нанотрубок при комнатной

Demonstration of single-photon radiation from nanotubes at room temperature

153. **S. K. Doorn, H. Htoon, H. Kataura, T. Tanaka, A. Hirano.** Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp^3 defects in carbon nanotubes. *Nature Photonics,* 2017; 11(9): 577–582. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.119>
154. **N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothhaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki.** Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond. *Nature Photonics.* 2012;6:299–303. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.75>
155. **A. Ishii, T. Uda, Y. K. Kato.** Room-temperature single photon emission from micron-long air-suspended carbon nanotubes. *Phys. Rev. Applied.* 2017;8:054039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.054039>
156. **A. Baydin, F. Tay, J. Fan, M. Manjappa, W. Gao, J. Kono.** Carbon Nanotube Devices for Quantum Technology. *Materials* 2022;15:1535. <https://doi.org/10.3390/ma15041535>
157. **A. Borel, T. Habrant-Claude, F. Rapisarda, J. Reichel, S. K. Doorn, C. Voisin, Y. Chassagneux.** Telecom Band Single-Photon Source Using a Grafted Carbon Nanotube Coupled to a Fiber Fabry–Perot Cavity in the Purcell Regime. *ACS Photonics.* 2023;10(8):2839–2845. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.3c00541>

Нанокристаллы, низкоразмерные наноструктуры

Nanocrystals, Low Dimensional Nanostructures

158. **A. Gritsch, L. Weiss, J. Früh, S. Rinner, A. Reiserer.** Narrow Optical Transitions in Erbium-Implanted Silicon Waveguides. *Phys. Rev. X.* 2022;12:041009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.041009>
159. **A. Gritsch, A. Ulanowski, A. Reiserer.** Purcell enhancement of single-photon emitters in silicon. *Optica.* 2023;10, 783–789. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.486167>

can be controlled and operated in a quantum mode. At present, an enormous number of various nanostructures have been invented for arrangement of a single-photon emission mode. Moreover, there is not even a hope to review them in any complete way in an article.

Let us give a couple of examples. Fig. 19 shows an optical resonator cavity in the form of an erbium-doped waveguide with a regular structure of nanometer holes. The erbium atoms in a needle-like silicon crystal emit light with a wavelength of 1536 nm that corresponds to the short edge of the standard C-band in the fiber-optic communication.

Fig. 20 shows a gallium nitride nanowire with an indium gallium nitride quantum dot. This nanowire implements a single-photon emission mode with the linear polarization and electrical pumping [160].

LAYERED NANOCRYSTALS

The core-shell semiconducting nanocrystals (CSSNCs) represent a new class of materials that demonstrates the properties being intermediate between those of small individual molecules and those of bulk crystalline semiconductors. These nanocrystals consist of a semiconductor core (a quantum dot) and a shell made of a separate semiconductor material. The core and shell are typically composed of II–VI, IV–VI, and III–V type semiconductors with the configurations such as CdS/ZnS, CdSe/ZnS, CdSe/CdS, and InAs/CdSe (typical designation: core/shell) [161,162]. The organically passivated quantum dots have low fluorescence quantum yields due to the surface-bound traps [163]. The CSSNCs address this issue since the shell increases the quantum yield by passivating the surface states [163]. Moreover, the shell provides protection against the environmental changes, photooxidative degradation and provides another route to modularity [163, 164]. Precise control of the dimensions, shape, and composition of both core and shell allows the emission wavelength to be set in a wider range of wavelengths than is possible with any single semiconductor.

The relative simplicity of obtaining CSSNC nanocrystals by purely chemical methods in the colloidal solutions, without any application of expensive microelectronic process units, is rather attractive. Another interesting possibility is the simplicity of nanocrystal application to the prepared microchip surface in the form of a suspension, and the ability of colloidal nanocrystals to be self-organized into a monolayer.

More subtle possibilities for controlling the radiation/emission stability and frequency are provided by the three-layer nanocrystals where a spacer (buffer) layer of a specially selected material is introduced between



Научно-практическая конференция «ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ»



Формат
участия —
очно.

Для
докладчиков
участие
бесплатное



22-23
апреля

Конференция посвящена современным исследованиям в области систем дополненной, виртуальной и смешанной реальности, которые включают особенности разработки и принципов построения подобных устройств, проектирование оптических модулей и синтез оптических компонентов, перспективную элементную базу и технологические аспекты изготовления, разработку AR/VR/MR-приложений, а также опыт практического применения, эффекты реального внедрения вышеперечисленных систем в различных областях и эргономические особенности взаимодействия пользователя с ними.

По результатам конференции будет опубликован сборник трудов, индексируемый в РИНЦ (к рассмотрению принимаются материалы, прошедшие экспертный контроль).



10 февраля

Начало регистрации
и приёма докладов

31 марта

Окончание
приёма докладов

10 апреля

Окончание регистрации
для слушателей

СЕКЦИЯ
1

Оптические
схемы и элементы
для AR/VR
дисплеев

СЕКЦИЯ
2

Компонентная база
и перспективные
технологии
дисплейных
и фотонных систем

СЕКЦИЯ
3

Практическое
применение
AR/VR устройств

СЕКЦИЯ
4

Эргономические
аспекты
использования
AR/VR

СЕКЦИЯ
5

Алгоритмы
и программное
обеспечение
для AR/VR и систем
визуализации

Круглый стол

Актуальные вопросы разработки отечественных устройств дополненной и смешанной реальности



+7 (499) 263-63-44



arconf@bmstu.ru



ar.bmstu.ru



160. S. Deshpande, J. Heo, A. Das, P. Bhattacharya. Electrically Driven Polarized Single Photon Emission for InGaN Quantum Dot in a Single GaN Nanowire. *Nature Communications*. 2013; <https://doi.org/10.1038/ncomms2691>

Слоистые нанокристаллы. Core-shell semiconducting nanocrystals (CSSNCs)
Core-shell semiconducting nanocrystals (CSSNCs)

161. Q. Q. Dou, A. Rengaramchandran, S. T. Selvan, R. Paulmurugan, Y. Zhang. Core-shell upconversion nanoparticle – semiconductor heterostructures for photodynamic therapy. *Scientific Reports*. 2015;5: 8252. <https://doi.org/10.1038/srep08252>

162. A. R. Loukanov, C. D. Dushkin, K. I. Papazova, A. V. Kirov, M. V. Abrashev, E. Adachi. Photoluminescence depending on the ZnS shell thickness of CdS / ZnS core-shell semiconductor nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2004;245 (1–3): 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.06.016>

163. P. Reiss, M. Protière, L. Li. Core/Shell Semiconductor Nanocrystals. *Small*. 2009;5(2): 154–168. <https://doi.org/10.1002/smll.200800841>

164. X. Peng, M. C. Schlamp, A. V. Kadavanich, A. P. Alivisatos. Epitaxial Growth of Highly Luminescent CdSe/CdS Core/Shell Nanocrystals with Photostability and Electronic Accessibility. *Journal of the American Chemical Society*. 1997;119(30): 7019–7029. <https://doi.org/10.1021/ja970754m>

165. V. Sayevich, Z. Robinson, Y. Kim, O. Kozlov, H. Jung, T. Nakotte, Y.-S. Park, V. Klimov. Highly versatile near-infrared emitters based on an atomically defined HgS interlayer embedded into a CdSe/CdS quantum dot. *Nature Nanotechnology*. 2021;16:1–7. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00871-x>

166. M. Metlin, S. Ambrozovich, V. Korshunov, V. Fedyanin, P. Tananaev, I. Taydakov. Near-infrared single-photon emitters based on colloidal CdSe/CdS/ZnS nanocrystals and Nd(III) 1,3-diketonate. *Opt. Lett.* 2020;45: 5480–5483. <https://doi.org/10.1364/OL.401227>

the core and the shell (fig. 21). For example, the quantum dots represent a core made of cadmium selenide, an interlayer of mercury sulfide in the shell of cadmium sulfide: CdSe/HgS/CdS. The single-photon emission at a room temperature has already been demonstrated in such systems (Fig. 21) [165].

The organic compounds of such multilayer nanocrystals and special organic radicals containing the rare earth ions are also rather interesting. For example, a hybrid material consisting of three-layer nanocrystals CdSe/CdS/ZnS, surrounded by a shell made of a specially selected comprehensive compound of rare earth neodymium ion with organic molecules has been developed. The organic strapping is used as a kind of accumulator for pumping energy and a core excitation catalyst [166].

In the remaining part of the review, the single-photon sources on the collective states in the ensemble systems, on the single molecules, on the metal ions in a polymer matrix, as well as the sources on nonlinear crystals will be considered.

ОБ АВТОРЕ

В. Г. Криштон; e-mail: vladimir.krishtop@infotecs.ru.
ORCID: 0000-0001-6063-2657

ABOUT AUTHOR

V. G. Krishtop; e-mail: vladimir.krishtop@infotecs.ru.
ORCID: 0000-0001-6063-2657



Металлообработка. Сварка — Урал

международная выставка технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства

18–21 марта 2025
Екатеринбург

крупнейший специализированный
региональный проект в России



телеграм-канал

@expometal



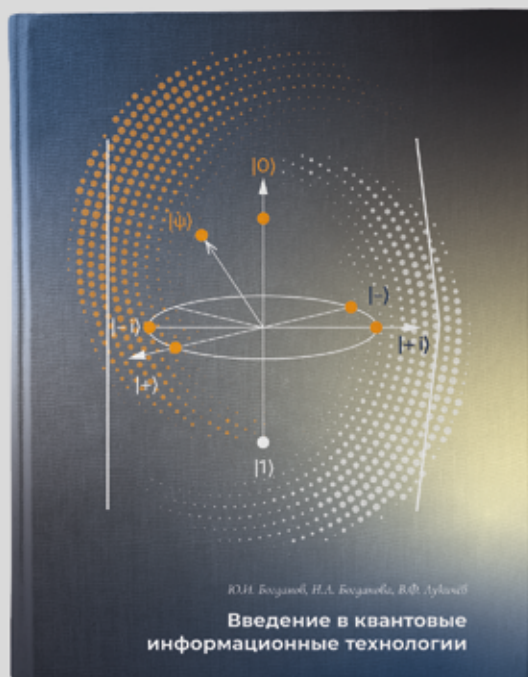
(342) 264-64-27
egorova@proexpo.ru

metal-ekb.proexpo.ru





ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



*Ю.И. Богданов, Н.А. Богданова,
В.Ф. Лукичѐв*

Введение в квантовые информационные технологии

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 468 с.
ISBN 978-5-94836-704-0

Цена 1600 руб.

Книга посвящена квантовым информационным технологиям, представляющим собой новую быстро развивающуюся область науки и техники, основанную на использовании квантовых систем для реализации принципиально новых методов передачи сообщений и вычислений (квантовые каналы связи, квантовая криптография, квантовый компьютер). Книга основана на курсах, читаемых авторами в МГУ им. М.В. Ломоносова, НИУ МИЭТ, МФТИ и НИЯУ МИФИ.

Книга рассчитана на студентов, магистрантов и аспирантов, получающих образование в области физико-математических наук и высоких технологий. Настоящее издание будет также интересно широкому кругу научных работников и инженеров различных специальностей, активно интересующихся развитием передовых научных направлений и технологий.

Как заказать наши книги?

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

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosfera.ru