

Применение технологии квантовых точек для электрооптических и оптоэлектронных устройств

В. Беляев, д. т. н.^{1,2}, Х. Язбек²

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01 и 05.13.01

Технологии квантовых точек развиваются с целью значительного повышения эффективности материалов, используемых как в самой электронике, так и ее передовых направлениях – микро- и наноэлектронике. Большое внимание уделено улучшению характеристик оптоэлектронных и электрооптических устройств, использованию КТ для визуализации сверхмалых биологических объектов.

Многообразие типов квантовых точек (КТ) и их технологий подробно описаны в литературе [1]. Квантовые точки – это полупроводниковые наночастицы с типичным размером от 10 до 100 атомов по диаметру или любому пространственному измерению и, соответственно, размером до 150 нм (в 1000 раз меньше толщины волоса человека). КТ могут менять свои оптические и электрофизические свойства под действием внешних полей.

КТ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Среди наиболее полезных свойств фотовольтаических устройств (солнечные батареи, solar cells) с КТ – сравнительно низкая стоимость, легкий вес и разносторонняя функциональность [2, 3]. В отличие от многих традиционных солнечных элементов, батареи с КТ имеют высокую надежность и эффективность. Им не нужна высокая температура и инертная атмосфера, чтобы генерировать энергию. Они не проявляют деградацию после многих месяцев работы при нормальных условиях.

Процесс изготовления фотовольтаических устройств с КТ требует значительно меньших затрат энергии, чем батареи других типов. Все слои в ячейке, кроме электродов, могут быть осаждены при комнатной температуре, нормальных условиях, без использования растворов в реагентах, применяемых при фотолитографии в микроэлектронике.

Однако дополнительно должна быть проведена работа, чтобы солнечные батареи с КТ соответствовали уровню, полученному для батарей на основе кремния. Пока же их эффективность ниже требуемой по стандартным нормам и составляет примерно 9% преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию. Но

ожидается, что время достижения нужных характеристик для солнечных батарей с КТ будет значительно меньше времени, затраченного на развитие кремниевых батарей (примерно 60 лет).

За очень короткий период технологии квантовых точек показали свою эффективность для фотовольтаических устройств. Первые образцы с КТ на основе сульфида свинца в 2010 году имели эффективность преобразования 2,9%. Через несколько лет в университете Торонто с такими же КТ довели эффективность до 12%. В 2017 году национальная лаборатория возобновляемой электроники (НЛВЭ, National Renewable Energy Laboratory (NREL) министерства энергетики США (U. S. Department of Energy's (DOE) установила новый мировой рекорд для солнечных батарей с КТ – 13,4% [4]. Новый материал – трийодид цезия и свинца (CsPbI_3) – относится к семейству галоидных перовскитов. В открытой цепи он дает относительно высокое напряжение – до 1,2 В. Правда, пока эти характеристики уступают параметрам тонкопленочных батарей этой же лаборатории (23% для диселенида меди-индия-галлия (CIGS)).

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ ДЛЯ ДИСПЛЕЕВ

В устройствах отображения информации КТ используются для повышения эффективности подсветки в жидкокристаллических дисплеях (ЖКД) или увеличения яркости и монохроматичности панелей с органическими светодиодами (OLED).

В настоящее время изготовлены образцы дисплеев, у которых в пленочный усилитель яркости [5, 6] встроены квантовые точки. Благодаря этому энергопотребление дисплея вдвое ниже по сравнению с обычным устройством и, как следствие, стоимость изготовления панели меньше. Технологии подсветки с использованием КТ могут значительно улучшить такие характеристики ЖКД,

¹ Российский университет дружбы народов.

² Московский областной государственный университет.

как цветовая гамма, точность передачи цвета, и снизить энергопотребление панели.

Многие компании вводят в производство технологии квантовых точек без кадмия (в связи с законодательством, ограничивающим использование материалов на основе тяжелых металлов из-за экологических и токсических проблем, связанных с этими элементами). Ряд фирм (QD Vision, Sony, Nanosys, 3M, Amazon, ASUS) выпускают дисплеи с квантовыми точками с 2013 года. Компании Samsung и LG Electronics начали производство больших ЖК-панелей с квантовыми точками в модуле подсветки в 2015 году.

В отчете компании Touch Display Research «Quantum Dot Display Component Market will Reach \$10.6 Billion by 2025» [7] сообщается, что объем производства дисплеев и осветительных приборов с квантовыми точками должен увеличиться с 0,7 млрд долл. в 2015 году до 10,6 млрд долл. в 2025-м.

Преимущества ЖКД со светодиодными подсветками, в которые инкорпорированы КТ (QLED LCD TV) по сравнению с OLED-телевизорами, – более насыщенные цвета (в оригинале Colorific Colors), увеличенные яркость и размер, большой спектр функциональных возможностей и моделей.

Использование КТ-подсветок позволит продлить период доминирования ЖКД на рынке плоскочастотных дисплеев. Для расширения цветовой гаммы и повышения световой эффективности подсветки (а, значит, и всего дисплея) некоторые фирмы разработали новые конструкции модулей с КТ. Например, корейская компания LMS представила квантовый светонакопительный лист (Quantum Light Accumulation Sheet, QLAS), а американские компании – 3M, владеющая технологиями пленочных усилителей яркости BEF и DBEF, и Nanosys – разработали пленку с квантовыми точками (3M Quantum Dot Enhancement Film, 3M QDEF) [8]. В пленке яркий белый цвет формируется «зелеными» и «красными» КТ, диспергированными в слое полимера, который находится между двумя барьерными слоями (рис. 1).

Квантовые точки также используют в качестве добавок к жидким кристаллам для управления физическими свойствами ЖК-материала и, соответственно, электрооптическими характеристиками дисплея [9, 10]. Особо следует упомянуть возможность модификации дискотических ЖК квантовыми точками: CdSe, CdS, CdTe, ZnO, ZnSe, PbS, PbSe, SnS, InP, InS, InN и др. [11]. Эти ЖК перспективны для органической электроники и оптоэлектроники.

В разработке тайваньских университетов (Дальневосточный и Национальный Цинг Хуа) при использовании гигантских квантовых точек с кремниевым композитным материалом достигнута световая эффективность 100 лм/Вт. Это почти треть от теоретически возможной для источников белого света.

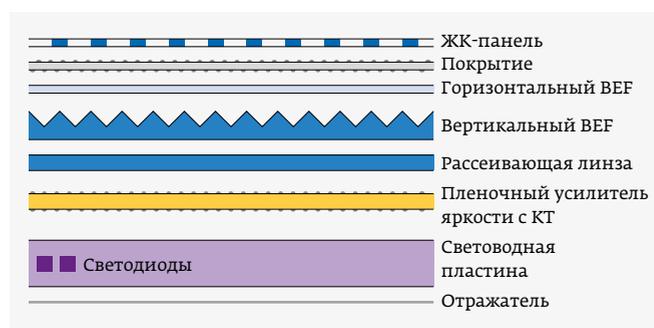


Рис. 1. ЖК-панель с подсветкой, в которой используется пленка с квантовыми точками (QDEF)

Наиболее наглядно преимущества квантовых точек продемонстрированы в выставочной экспозиции Недели Дисплеев 2016 года американской компании QD Vision, которая представила технологию IQ (интеллектуальные или «умные» квантовые точки). На одном стенде были размещены четыре панели: первая с органическими светодиодами, вторая – с ЖК и подсветкой обычными белыми светодиодами, третья – с модулем подсветки, содержащим квантовые точки CdSe, а четвертая – с подсветкой, в которой были квантовые точки InP (рис. 2). Под панелями были установлены индикаторы, показывающие энергопотребление дисплеев.

Современным требованием к экологичному производству ЖК-дисплеев является отсутствие тяжелых металлов при производстве и в конечном продукте. Поэтому в настоящее время ведется интенсивный поиск квантовых точек без кадмия [12].

Помимо «классических» квантовых точек для люминесцентных материалов, широкое применение находят перовскитные наночастицы. Органические и неорганические гибридные перовскиты входят в состав композитных



Рис. 2. Дисплеи с квантовыми точками (справа) и без них (слева)

полимерных пленок, имеют высокую эффективность фотолюминесценции и чистоту цвета (полуширина спектральной линии до 20 нм), беспрецедентную стабильность к воде и нагреву. Эти вещества применяются для подсветки ЖКД, освещения, датчиков, фотомедицинских процедур. С использованием КТ и ОНГП уже созданы и производятся светодиоды с квантовыми точками (QLED), которые могут превзойти органические светодиоды по цветовой гамме, энергоэффективности, стоимости. Ожидается, что световая эффективность излучения приборов с такими материалами превысит 359 лм/Вт, а индекс цветопередачи составит не менее 91.

Ожидается, что использование квантовых точек может значительно улучшить характеристики других оптоэлектронных и электрооптических приборов [13–16].

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

Свойство КТ усиливать оптический сигнал и улучшать его спектральный состав при прохождении света через материал с КТ используется для повышения технических и эксплуатационных параметров полупроводниковых оптических усилителей (ППОУ, Semiconductor Optical Amplifier или SOA) (рис. 3). Они получили широкое применение в системах связи. Краткий обзор по современным технологиям ППОУ и их применению, подготовленный в компании Inphenix (Ливермор, США), изложен в [17]. Обзор российских авторов по этой технологии содержится в [18].

В России одним из лидеров в этом направлении является компания «Нолатех» (Новая лазерная техника) [19]. Она разрабатывает и производит ППОУ со следующими

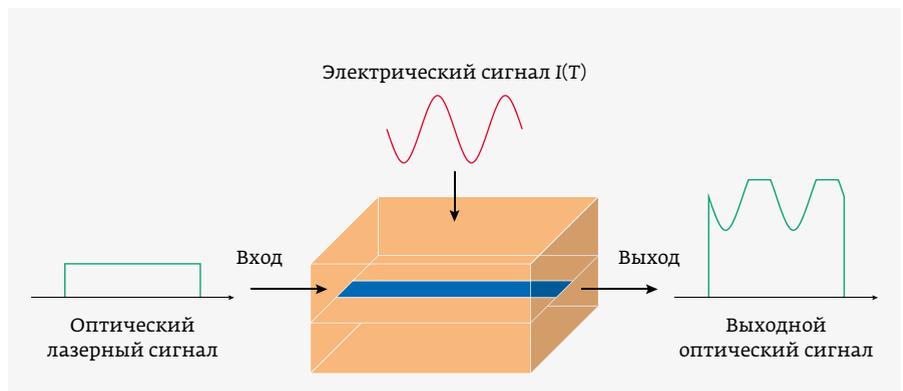


Рис. 3. Конструкция и принцип работы полупроводникового оптического усилителя (ПОУ)

характеристиками: коэффициент усиления 20–28 дБ, спектральная ширина 30–40 нм для 1550 нм. В «Нолатех» создан полупроводниковый оптический усилитель на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAsP-InP на длинах волн 1510–1560 нм. Он предназначен для использования в волоконно-оптических системах передачи информации со спектральным уплотнением в качестве усилителя мощности выходного излучения [20, 21]. На основе ПОУ были созданы полупроводниковый кольцевой лазер и датчик вращения на длину волны 1550 нм [22].

Среди последних отечественных разработок отметим изобретение [23], которое относится к квантовой электронике и квантовым усилителям, а именно к полупроводниковым усилителям оптического излучения лазеров. Предложена конструкция ППОУ, обеспечивающая увеличение выходного сигнала.

В настоящее время для устройств оптических систем передачи информации не использованы все возможности по увеличению их характеристик: пропускной способности, динамического диапазона входного и выходного

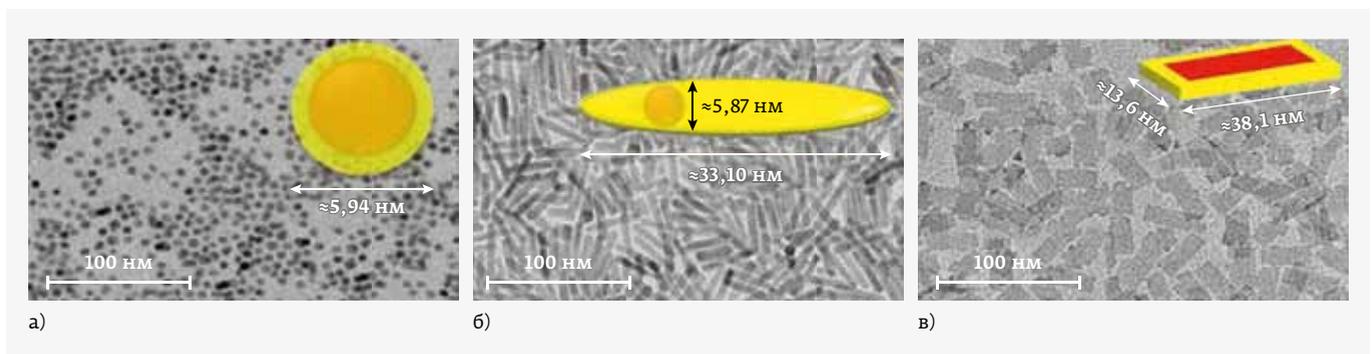


Рис. 4. Изображения наночастиц, полученные методом туннельной электронной микроскопии: а – КТ; б – наностержни; в – нанопластины. На снимки наложены схемы строения НЧ с их размерами. Толщина нанопластины ≈ 1,5 нм (5 монослоев). Красным цветом обозначен сердечник из CdSe, желтым – показаны оболочки/короны наночастицы из CdS

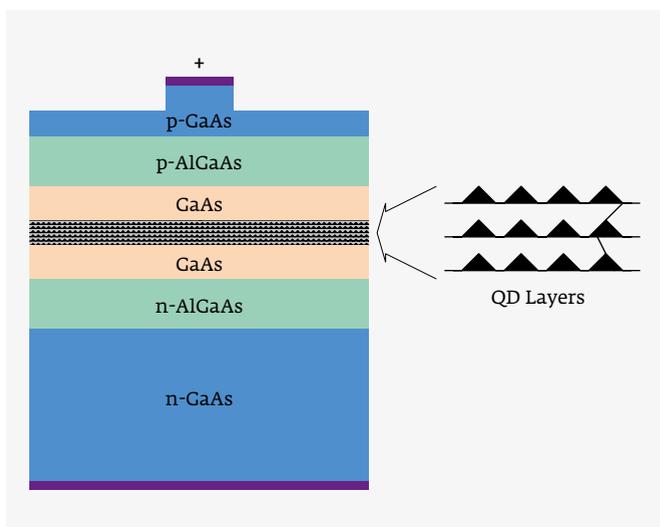


Рис. 5. Волноводная структура КТ ПОУ на основе арсенида галлия с промежуточными р- и п-слоями и многослойной активной областью с КТ

сигналов, отношения сигнал/шум, расстояния передачи. Материалы и конструкции лазерных усилителей света на основе КТ различных видов описаны в [24–28]. А в [29] для этой цели используются не только 0-мерные объекты, но и 1-мерные (квантовые стержни) и 2-мерные (квантовые пластины) (рис. 4).

Конструкция многоэлектродного полупроводникового оптического усилителя как с обычными полупроводниковыми материалами, так и с квантовыми точками, отличающегося повышенной пропускной способностью для

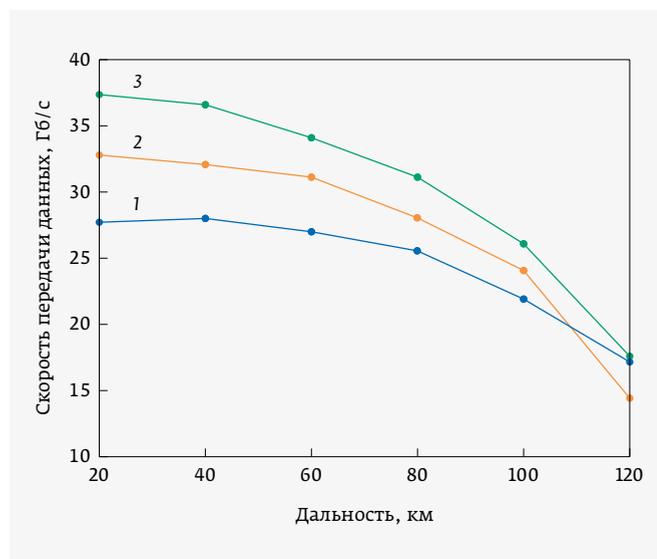


Рис. 7. Зависимость скорости передачи выходного сигнала в Гб/с от расстояния для одноэлектродного ПОУ (1), трехэлектродного ПОУ (2) и трехэлектродного ПОУ с квантовыми точками (3) при мощности входного оптического сигнала 10 дБм. Ток смещения 300 мА

пассивных оптических сетей (рис. 5), описана в литературе [30–32]. Эта конструкция позволяет не только значительно улучшить производительность передачи адаптивно модулированных оптических сигналов с ортогональным частотным разделением каналов (АМООФДМ), но и расширить оптимальные диапазоны рабочих состояний (рис. 6). При этом обеспечивается более высокая

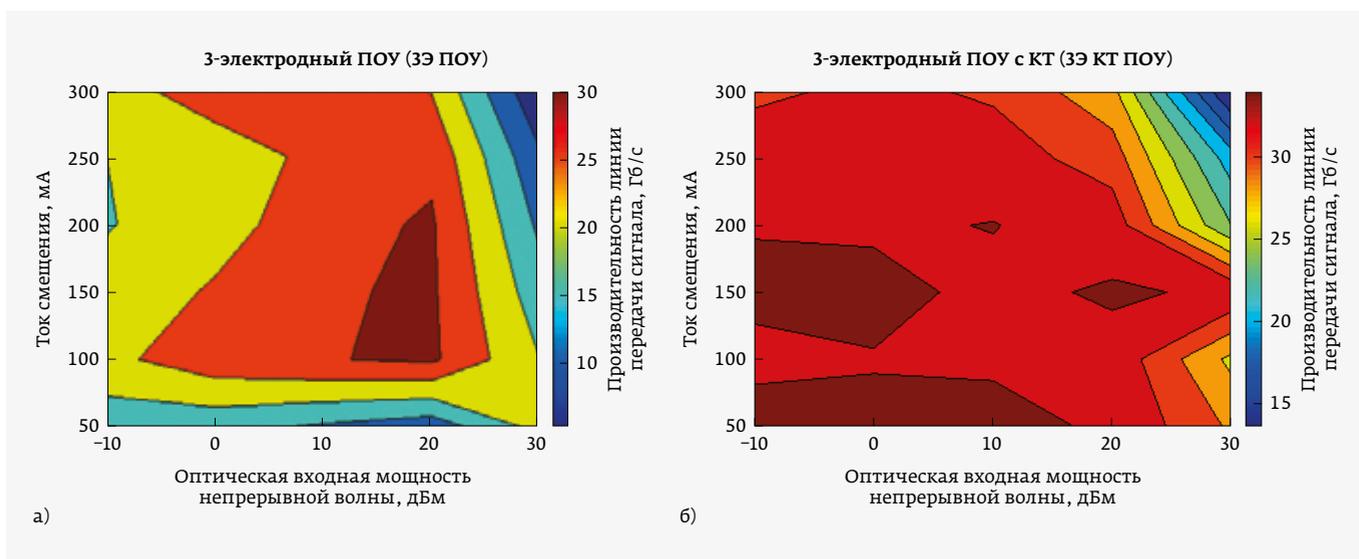


Рис. 6. Зависимость производительности трехэлектродного ПОУ (слева) и трехэлектродного ПОУ с квантовыми точками (справа), выраженной в скорости передачи выходного сигнала в Гб/с, от мощности входного оптического сигнала в дБм и тока смещения в мА. Параметры: дальность - $L=60$ км, длина волны передаваемого сигнала - $\lambda=1550$ нм

скорость передачи сигналов на более дальние расстояния, чем у аналогового устройства (рис. 7). Многоэлектродные конфигурации позволяют снизить входную мощность лазерного излучения, вводимого в модулятор, и обеспечивают значительно более широкий диапазон изменения оптической выходной мощности.

КТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В университете штата Иллинойс (США) в г. Урбана-Чэмпейн (Urbana-Champaign) и клинике Майо (Mayo Clinic) создали новый молекулярный зонд, в котором КТ используются вместо флуоресцентных красителей [32]. Принцип работы зонда основан на методе FISH (fluorescence in situ hybridization, свечение при гибридизации *in situ*, т. е. в клетке) (рис. 8). По сравнению с красителями использование КТ обеспечивает более высокую стабильность и точность.

В экспериментах с клетками HeLa (линия «бессмертных» клеток [1]) и клетками рака простаты было найдено, что сигнал от FISH-клеток с красителем быстро слабеет. А в FISH-клетках с КД люминесценция длилась более 10 мин, что позволило точно сосчитать все РНК и в итоге получить трехмерную карту клетки.

Метод КТ-FISH особенно полезен при изучении экспрессии гена в трехмерных биологических образцах, для которых определение количества и разрешающей способности является большой проблемой. Разработчики превазошли предел размера молекулярной метки в клетках и выявили новые правила клеточного анализа.

Особенно интенсивно для изображений биообъектов разрабатываются методы на основе графеновых квантовых точек (ГКТ). Самыми современными обзорами по применению и перспективам ГКТ для получения изображений биологических объектов (bioimaging) и их изготовлению являются статьи [33, 34]. Достоинствами ГКТ для этого применения являются такие факторы, как их уникальные фотолюминесцентные свойства, возможность управления фотолюминесценцией, исключительные физико-химические характеристики, высокая биосовместимость, малые размеры и низкая стоимость. Биообъекты могут быть исследованы как в *in vitro*, так и *in vivo* условиях (в «пробирке» или в «живой» среде соответственно) (рис. 9).

Исследовательская группа из университета г. Нагоя (Япония) и Бостонского колледжа (США) разработала биосовместимую, гибкую

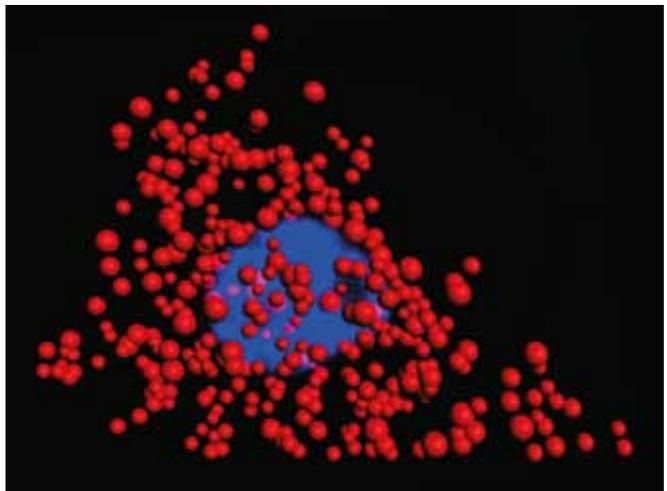


Рис. 8. Квантовые точки вокруг ядра единичной клетки HeLa. КТ освещают места нахождения индивидуальных РНК (обозначены красными точками) в цитоплазме единичной клетки HeLa. Синяя область – это ядро клетки

и растворимую в воде молекулу покоробленного (деформированного, warped) нанографена (ПГ) (рис. 10) [35]. Под действием света молекула может также приводить к гибели клеток. Это новое вещество существенно расширяет область применения нанокремниевых соединений, в том числе диагностику и лечение раковых клеток.

При присоединении различных функциональных групп образуются вещества, светящиеся в разных диапазонах видимого спектра под действием ультрафиолетового излучения при изменении полярности растворителя. При этом молекулы остаются фотостабильными.



Рис. 9. Области применения ГКТ для получения изображений биологических объектов (bioimaging)

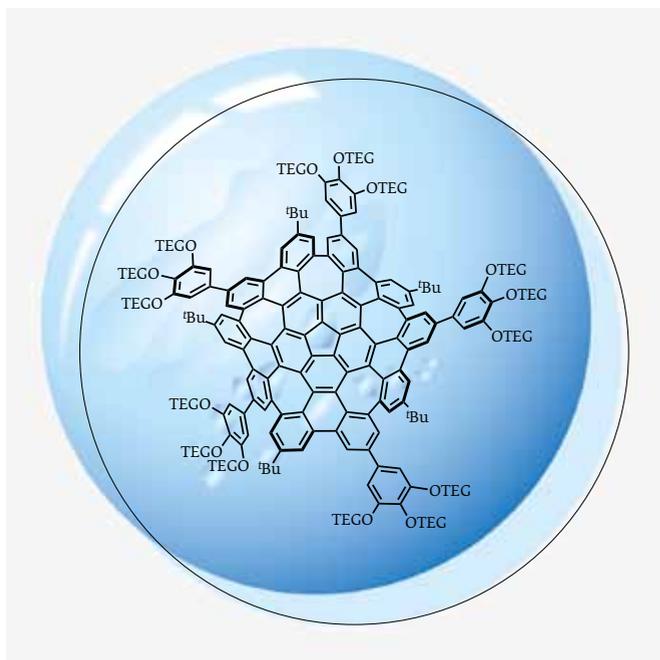


Рис. 10. Схематическое изображение КТ с молекулой покоробленного (деформированного, англ. warped) нанографена

ПГ обладает низкой цитотоксичностью. Однако при облучении синим лазером клетки HeLa с ПГ погибали за 30 мин, а необработанные клетки оставались неповрежденными.

ПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ЦЕПОЧКИ ГКТ ПРИДАЮТ ВЕЩЕСТВУ ВЫСОКУЮ РАСТВОРИМОСТЬ В ВОДЕ

ГКТ могут использоваться и для сверхчувствительного метода обнаружения карциноэмбрионального антигена (carcinoembryonic antigen; сокращенно КЭА или СЕА) – одного из наиболее широко используемых опухолевых маркеров. В [36] описан новый электрохемилюминесцентный иммунодатчик (сенсор) КЭА с использованием стратегии усиления сигнала, основанный на применении полимерного нанокompозита и наночастицы золота, декорированных ГКТ. Обозначение этого композита – GQDs@AuNP (ГКТ@AuНЧ). Состав полимерного нанокompозита – полиформиндол, присоединенный к оксиду графена (англ. poly(5-formylindole)/reduced graphene oxide nanocomposite (P5Flн/erGO)). За счет такой структуры усиливается ионный транспорт при окислительно-восстановительных реакциях и получается большая площадь при иммобилизации первичного антитела. Комплекс GQDs@AuNP использовался в качестве метки для связи со вторичным антителом, что улучшало электронный транспорт и повышало электрохемилюминесценцию. Многократное усиление P5Flн/erGO и GQDs@AuNP позволило сделать линейный диапазон обнаружения

от 0,1 пг / мл до 10 нг / мл, а предел обнаружения довести до 3,78 фг / мл.

* * *

В статье представлено многообразие типов квантовых точек, их технологий, применений как в самой электронике и таких ее передовых разделах, как микро- и наноэлектроника, а также в фотонике, энергетике, биологии, медицине, сельском хозяйстве и др. Показано, что использование мельчайших, 0-мерных частиц приводит к значительному повышению эффективности материалов, используемых в названных отраслях промышленности и социальных направлениях. В статье также показаны возможные пути развития этой важной и интересной технологии.

Работа по анализу полупроводниковых усилителей света частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-07-00602_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев В. В.** Квантовые точки: свойства, технологии, рынок // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 7. С. 152–161.
2. <https://futuremarketsinc.com/the-global-market-for-quantum-dots-2/>. Отчет консалтинговой компании Future Markets от 25 сентября 2019 г.
3. **Jasim K. E.** Quantum Dots Solar Cells. <https://www.intechopen.com/books/solar-cells-new-approaches-and-reviews/quantum-dots-solar-cells> (2015). <https://doi.org/10.5772/59159>.
4. **Sanehira E. M., Marshall A. R., Christians J. A., Harvey S. P., Ciesielski P. N., Wheeler L. M., Schulz P., Lin L. Y., Beard M. C., Luther J. M.** Enhanced mobility CsPbI₃ quantum dot arrays for record-efficiency, high-voltage photovoltaic cells // Science Advances, 2017; 3 (10): eaao4204. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4204>.
5. **Беляев В.** Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Ч. 1. От пикселя до гибкой подложки // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 8 (148). С. 36–47.
6. **Беляев В.** Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Ч. 2. Новые технологии и области применения ЖК-дисплеев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 10. С. 124–131.
7. **Colgrove J.** Отчеты консалтинговой компании Touch Display Research (Исследования сенсорных дисплеев). 2016–2020 гг.
8. **Chen J., Hartlove J., Hardev V., Yurek J., Lee E., Gensler S.** High Efficiency LCDs using Quantum Dot Enhancement Films // SID'14 Symposium Digest of Technical Papers. 2014. PP. 1428–1431.
9. **Vakulin D. A., Frenkel D. A., Gavrish E. O., Konshina E. A.** Impact of Doping CdSe/ZnS Quantum Dots on the Elasticity

- Coefficients of Nematic // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2015. V. 612. No. 1. PP. 110–116. <https://doi.org/10.1080/15421406.2015.1030579>.
10. **Шамилов Р. Р., Нугаева А. А., Чаусов Д. Н. и др.** Наноконкомпозиты на основе гибридных квантовых точек и PFO // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 23. С. 42–44.
 11. **Gowda A., Kumar S.** Recent Advances in Discotic Liquid Crystal-Assisted Nanoparticles // *Materials* 2018, 11, 382; <https://doi.org/10.3390/ma11030382>.
 12. **Pickett N. L., Gresty N. C.** Innovation in Heavy Metal-Free Quantum Dot Technology // *SID'17 Symposium Digest of Technical Papers*. 2017. PP. 562–565.
 13. **Nature Photonics** (<https://doi.org/10.1038/s41566-018-0283-4>).
 14. **Грузевич Ю.** Опико-электронные приборы ночного видения. – М.: Физматлит, 2014.
 15. **Ачильдиев В. М., Грузевич Ю. К., Солдатенков В. А.** Информационные измерительные и опико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.
 16. **Belyaev V. V., Kovtonyuk N. F.** Liquid crystals in spatial light modulators // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 199. V. 265. PP. 599–613.
 17. **Twain A.** 10.08.2017 Introduction to SOA; <http://www.inphenix.com/en/semiconductor-optical-amplifiers/>; <https://medium.com/@lia640230/introduction-to-semiconductor-optical-amplifier-soa-d9eaf7987fd5>, Inphenix, Ливермор, США.
 18. <http://kunegin.com/ref4/vols/p04.htm>.
 19. <http://nolatech.ru/products/soa>. Обзор продукции компании Нолатех (Новая лазерная техника).
 20. **Дураев В., Казаков А., Медведев С.** Полупроводниковый оптический усилитель // *Фотоника*, Вып. 1. С. 16–18 (2010), <http://www.photonics.su/journal/article/2489>.
 21. **Дураев В. П., Медведев С. В.** Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840–1550 нм // *Научное приборостроение*. 2012. Т. 22. В. 3. С. 53–57.
 22. Патент на изобретение РФ: Полупроводниковый усилитель оптического излучения (Авторы: Подоскин Александр Александрович, Пихтин Никита Александрович, Тарасов Илья Сергеевич, Слипченко Сергей Олегович. Правообладатели: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук), № охранного документа: 0002539117. Дата охранного документа: 10.01.2015. <https://edrid.ru/rid/216.013.1e09.html>.
 23. **Yin Y., Ling Y., Chen J. et al.** Modulation Characteristics of Reflective Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers // *Asia Communications and Photonics Conference, OSA Technical Digest (online)*. – USA: OSA, 2017. – Su2A.32.
 24. **Izadyar S. M., Razaghi M., Hassanzadeh A.** Quantum dot semiconductor optical amplifier: investigation of amplified spontaneous emission and noise figure in the presence of second excited state. *Optical and Quantum Electronics* 50, 5 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1265-3>.
 25. **Yu J., Shendre S., Koh W.-K. et al.** Electrically control amplified spontaneous emission in colloidal quantum dots // *Science Advances*. 2019. V. 5. No. 10, eaav3140. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3140>.
 26. **Zhang H., Yuan L., Chen Y. et al.** Amplified spontaneous emission and random lasing using CsPbBr₃ quantum dot glass through controlling crystallization // *Chem. Commun.*, 56, 2853–2856 (2020). <https://doi.org/10.1039/C9CC07676J>.
 27. **Gomis-Bresco J., Dommers-Volkel S., Schops O., Kaptan Y.** Time-resolved amplified spontaneous emission in quantum dots // *Applied Physics Letters* 97(25): 251106–251106–3 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3529447>.
 28. **Chhantyal P., Naskar S., Birr T. et al.** Low Threshold Room Temperature Amplified Spontaneous Emission in 0D, 1D and 2D Quantum Confined Systems. *Sci Rep* 8, 3962 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22287-9>.
 29. **Yazbeck H. A., Belyaev V. V., Tkachenko I. M., Hamze M. M.** Multi-electrode quantum-dot semiconductor optical amplifier as an intensity modulator of signals in optical communication systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1560. P. 012021. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1560/1/012021>.
 30. **Yazbeck H., Hamzeh M., Belyaev V. et al.** Theoretical and numerical study of enhancing the performance of the optical Access networks using ME-SOA // *Electrosviaz*. 2019. No. 6. PP. 46–52.
 31. **Yazbeck H., Belyaev V. V., Tkachenko I. M. et al.** Advantages of AMOOFDM systems over other technologies: a review // *Electrosviaz*. 2020. No. 4. PP. 55–60.
 32. **Tang R., Han S., Teng F., Hu K., Zhang Z., Hu M., Fang X.** Size-Controlled Graphene Nanodot Arrays/ZnO Hybrids for High-Performance UV Photodetectors // *Advanced Science*. 2017. V. 5. No. 1.
 33. **Zhang R., Ding Z.** Recent Advances in Graphene Quantum Dots as Bioimaging Probes // *Journal of Analysis and Testing*. 2018. V. 2. No. 1. PP. 45–60. <https://doi.org/10.1007/s41666>.
 34. **Huang H., Yang S., Li Q., Yang Y., Wang G., You X., Mao B., Wang H., Ma Y., He P., Liu Z., Ding G., Xie X.** Electrochemical Cutting in Weak Aqueous Electrolytes: The Strategy for Efficient and Controllable Preparation of Graphene Quantum Dots // *Langmuir*. 2017. V. 34. No. 1. PP. 250–258. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03425>.
 35. *Angewandte Chemie International Edition* (<https://doi.org/10.1002/anie.201713387>).
 36. **Nie G., Wang Y., Tang Y., Zhao D., Guo Q.** A graphene quantum dots based electrochemiluminescence immunosensor for carcinoembryonic antigen detection using poly(5-formylindole)/reduced graphene oxide nanocomposite // *Biosensors and Bioelectronics*. 2018. V. 101. P. 123.

Генераторы ВЧ-сигналов серии LUCID

Благодаря фазовой когерентности и многоканальности может применяться для широкого диапазона измерительных задач в квантовой физике, для определения характеристик усилителей и в фазированных антенных системах.

- Диапазон частот до 12 ГГц
- До 16 фазокогерентных каналов
- Выходной уровень -90...15 дБм
- Эмуляция генераторов Keysight, R&S, Quicksyn, Anarico и Holzworth

4 варианта исполнения

- На базе ПК
- Стоечный
- Настольный
- Портативный

