

Квантовые точки: свойства, технологии, рынок

В. Беляев, д. т. н.^{1,2}

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01

Представлено многообразие типов квантовых точек и их технологий, возможностей применения в электронике, энергетике, биологии, медицине. Показано, что использование мельчайших, по сути, 0-мерных частиц приводит к значительному повышению эффективности материалов, используемых в названных отраслях.

Одним из перспективных направлений в области современной электроники и фотоники, способным существенно расширить диапазон параметров и функций приборов и материалов, является применение квантовых точек (КТ) [1–5]. Рассмотрены особенности технологии и рынка КТ, а также применения в таких важных социально-экономических направлениях, как биология, медицина и др.

СТРУКТУРА И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ КТ

Квантовые точки – это полупроводниковые наночастицы (НЧ) 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. Когда частица возбуждается от внешнего источника света, она поглощает энергию и переизлучает ее в спектральном диапазоне, зависящем от размера частицы (рис. 1). У КТ высокий коэффициент преобразования света, и переизлучаемый ею свет, как правило, имеет очень узкий спектр.

ОЦЕНКИ РЫНКА КТ И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Современная оценка рынка квантовых точек и различных ниш этого рынка приведена в отчете консалтинговой компании Future Markets от 25 сентября 2019 года (15-е издание) [6]. Согласно отчету, это быстро растущий рынок с предполагаемым

объемом в 2030 году 27,5 млрд долл. Его основными сегментами являются дисплеи для телевизоров и смартфонов, солнечные элементы, ярлыки и чернила для систем безопасности, датчики, лазеры, светодиоды и транзисторы на квантовых точках, фотонные кристаллы, отображение биологических объектов, биомаркеры, освещаемые солнцем окна для домов и теплиц, искусственный фотосинтез, твердотельные элементы памяти, термоэлектрические материалы, микро(нано)компьютеры.

На этом рынке представлены компании из разных стран мира: Applied Quantum Materials, Inc.; Avantama AG, Bio Square, Inc.; Dotz Nano Ltd.; Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP/CAN GmbH; Green Science Alliance Co., Ltd.; Hansol Chemical Co., Ltd.; HP Inc.; IQDEMY Quantum Technology SA; KRI, Inc.; ML System S. A. Zaczernie; Nanoco Group Plc; NanoPhotonica, Inc.; Nanosquare Co., Ltd.; Nanosys, Inc.; Plessey Semiconductors; Samsung; StoreDot Ltd. и др.

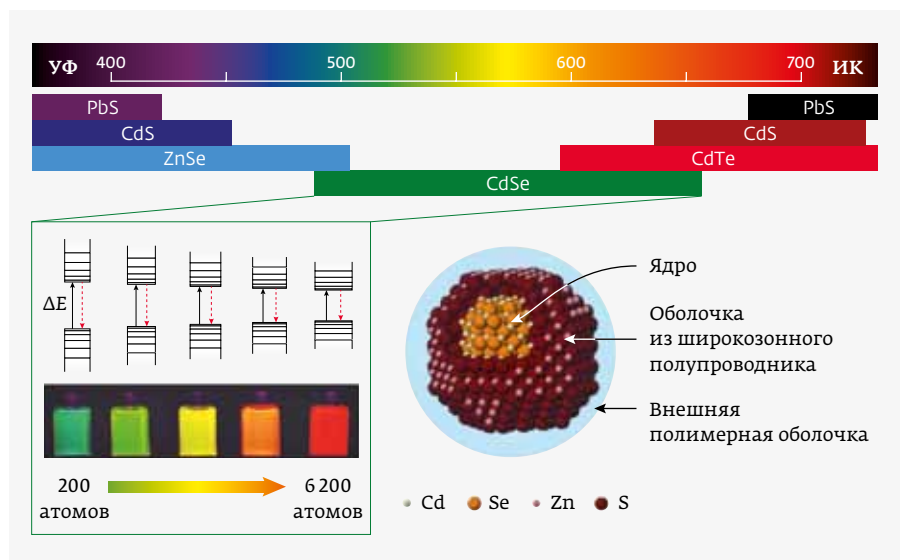


Рис. 1. Спектральный диапазон излучения различных полупроводниковых КТ и его зависимость от размера наночастицы [5]

¹ Российский Университет дружбы народов.

² Московский государственный областной университет.

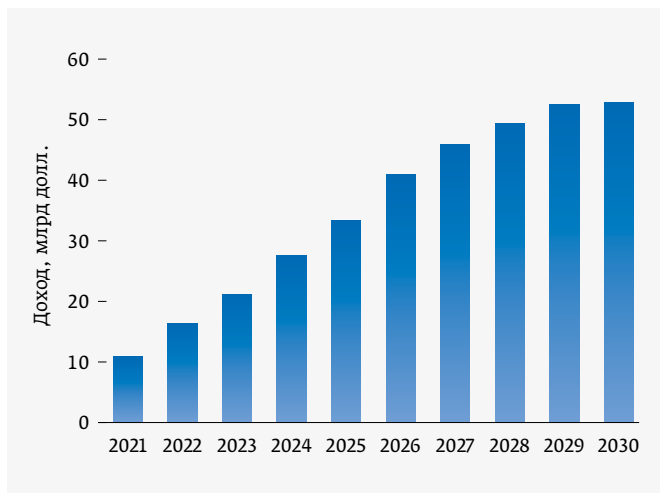


Рис. 2. Прогноз рынка дисплеев с КТ, выраженный в миллиардах долларов

Прогноз рынка дисплеев с КТ приведен на рис. 2. Данные взяты из отчета консалтинговой компании Touch Display Research (Исследования сенсорных дисплеев), любезно предоставленного автору доктором Дженнифер Колгроув (Jennifer Kolgrouv), директором и главным аналитиком технологий сенсорных экранов и прорывных дисплеев [7].

Благодаря сложной композитной структуре и сравнительно малому количеству атомов, составляющих КТ, наблюдается кумулятивное (накопительное) преобразование энергии из одного вида в другой. В КТ с разной структурой используется преобразование светового сигнала в электрический (например, в фотовольтаических элементах) или, наоборот, электрического сигнала в оптический (например, в светодиодах или подсветке дисплеев). При использовании КТ можно визуализировать сигнал или получать электрический отклик при изменении химического или биологического состава окружающей КТ среды. Это явление используется в газовых сенсорах и биомаркерах.

В системах передачи, обработки и отображения информации благодаря применению квантовых точек увеличивается динамический диапазон или цветопередача устройства.

По сравнению с обычными люминофорами КТ имеют ряд преимуществ. КТ – это частицы с типичным размером 2–10 нм, а у люминофоров типичный размер зерен 10–25 мкм. КТ растворимы в органических растворителях, спирте, воде, а люминофоры нет. В КТ не используются редкие металлы, что делает их производство дешевле, чем производство люминофоров. В то же время спектр излучения КТ более узкий, чем у люминофоров.

В настоящее время на коммерческом уровне производятся следующие типы КТ: InP/ZnS, CdSe/ZnS, CdSe/CdTe, PbS, водорастворимые КТ, КТ с перовскитной структурой, печатаемые КТ. Они применяются в таких компонентах дисплеев, как стеклянная световодная пластина, цветные фильтры (Quantum Dot Colour Filters, QDCF) для микросветодиодов и дисплеев, а также в электролюминесцентных дисплеях.

При этом материалы с использованием солей тяжелых металлов, чаще всего кадмия и свинца, считаются вредными и подлежащими замене. В этом направлении в мире ведутся интенсивные исследования.

МАТЕРИАЛЫ КТ БЕЗ КАДМИЯ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Мировым лидером по разработке и изготовлению КТ без кадмия (cadmium-free) является компания Nanoco Group plc. В 2016 году она заключила лицензионное соглашение с компанией Dow Chemical об использовании КТ без кадмия в дисплейной промышленности. Аналогичные соглашения имеются с китайскими и тайваньскими компаниями.

Среди компаний, производящих и поставляющих КТ без кадмия или с его низким содержанием, – Samsung Electronics, Avantama, NN-Labs, Nanosys, OSRAM Licht, Nanoco Group, Crystalplex Corporation, Quantum Materials,



ЭРКОН
Научно-производственное объединение

603104, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6, помещение ПЗ, этаж 2, офис 204

тел. (831)464-50-71 (приемная), (831)202-25-52 отдел продаж

Разработка и производство постоянных непроволочных резисторов, СВЧ резисторов, поглотителей и чип-индуктивностей.

- Современная производственная база.
- Высокое качество.
- Индивидуальный подход к потребителю.

Новинки:

Аттенуатор (поглотитель) ПР1-25 (150 Вт, от 3 до 30 ДБ)
Резистор сверхвысокочастотный Р1-160 (до 20 ГГц)
Мощный резистор Р1-170 (до 1000 Вт)



www.erkon-nn.ru
e-mail: info@erkon-nn.com

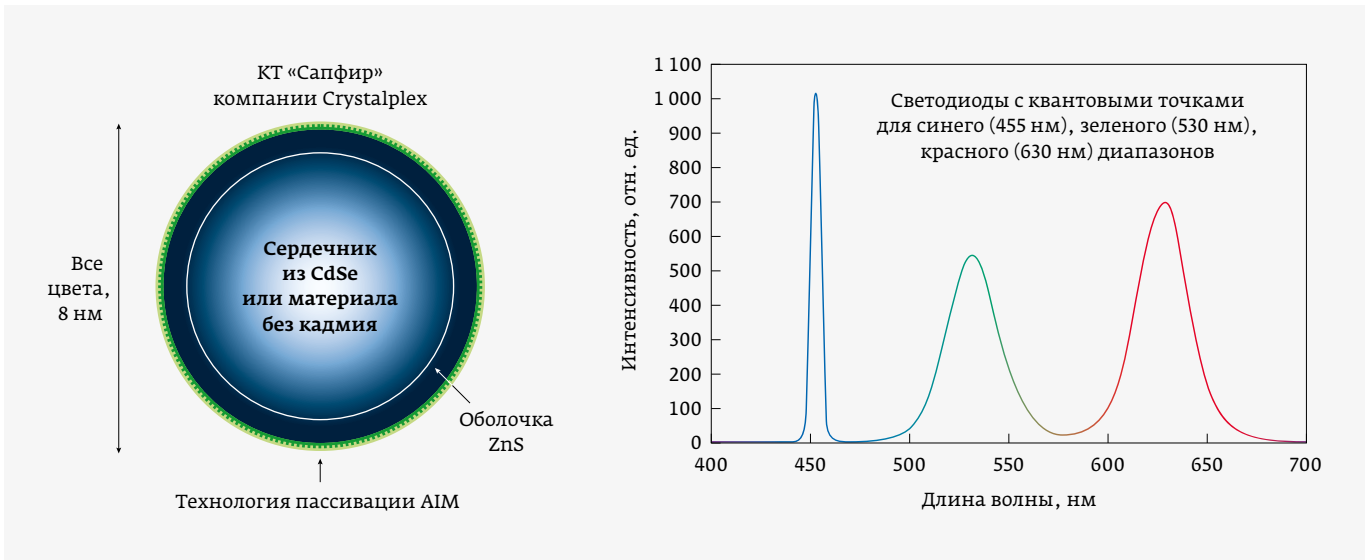


Рис. 3. Структура квантовой точки «Сапфир» и спектр ее излучения для использования в подсветке ЖК-дисплеев

Ocean NanoTech, Navillum Nanotechnologies, Nanosys, Hyperion, Nanograde, UbiQD, VIZIO, RANOVUS, QD Lasers, Fraunhofer IAP, NanoPhotonica, Innolume, Hisense, TCL, QUANTUM SOLUTIONS и др.

Nanoco Group и Crystalplex Corporation запатентовали процесс, который назвали молекулярным посевом [8]. Он обеспечивает воспроизводимый и надежный технологический маршрут производства КТ высокого качества в больших объемах. В процессе используются молекулы молекулярного кластера вещества в качестве места зарождения роста наночастицы. В отличие от формирования обычных КТ, для этого процесса не требуется повышенная температура на этапе инъекции. Рост частицы поддерживается периодическим добавлением прекурсоров при умеренной температуре до тех пор, пока не будет достигнут нужный размер частицы.

Один из перспективных вариантов КТ разработан в американской компании Crystalplex, основанной в 2014 году и имеющей всего пять постоянных сотрудников [8]. Новая разновидность КТ называется «Сапфир». Напомним, что сапфир является окислом алюминия. Цвет излучения (почти весь видимый диапазон) регулируется составом композиции, а не размером, как у обычных КТ. Структура КТ «Сапфир» и спектр излучения для использования в подсветке ЖК-дисплеев приведены на рис. 3. Полуширина спектра излучения КТ для зеленого и красного цвета составляет всего 30 ± 2 нм, благодаря чему цвета становятся яркими и насыщенными.

Технология оболочки КТ называется AIM (Advanced Isolation Mechanism, или передовой механизм изоляции), так как она хорошо защищает ядро от влаги и кислорода воздуха и, соответственно, препятствует деградации КТ.

ГРАФЕНОВЫЕ И УГЛЕРОДНЫЕ КТ

В последние годы наблюдается значительный рост публикаций по КТ на основе графена и окиси графена (рис. 4).

Возможные применения КТ на основе графена:

- детекторы УФ-излучения на основе наноточечных устройств с гибридами графена и окиси цинка;
- гибкий плоский преобразователь влажности в электрический сигнал на основе оксида графена для интерактивной панели без касания;
- датчик для взрывчатых материалов на основе графеновых квантовых точек, допированных азотом и серой;
- оптические насыщенные поглотители для нелинейной оптики;
- фотокатализаторы и фотоэлектрокатализаторы;
- графеновые квантовые точки для изображений биообъектов.

Рассмотрим эти применения подробнее.

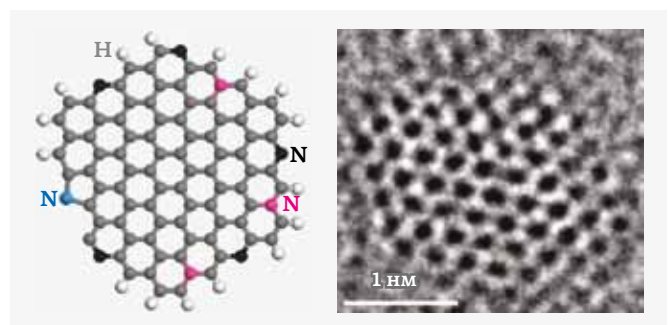


Рис. 4. Графеновая КТ и ее изображение, полученное на зондовом микроскопе

18-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

Chip EXPO-2020

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ

15-17.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА

СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, включая:
 - экспозицию предприятий, являющихся изготовителями изделий, включенных в единый реестр российской радиоэлектронной продукции [Постановление Правительства РФ №878],
 - экспозицию разработок, созданных в рамках государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы» [Постановление Правительства РФ №109],
 - экспозицию разработок, обеспечивающих выполнение приоритетных национальных проектов.
- Дивизионы кластера «Радиоэлектроника» ГК «Ростех»
- Стартапы в электронике
- Квалифицированные поставщики ЭКБ
- Консорциумы и дизайн-центры по электронике
- Участники конкурса «Золотой Чип»
- Корпорация развития Зеленограда

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



РОСЭЛ



ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО» Москва, 121351, ул. Ярцевская, д.4. Тел.: +7 (495) 221-50-15
E-mail: info@chipexpo.ru http://www.chipexpo.ru

Графеновые наноточки (ГНТ) – одни из самых привлекательных графеновых наноструктур благодаря возможности переключения их оптоэлектронных свойств. Сконструировано устройство с ГНТ однородного размера, изготовленное методом литографии полистироловых наносфер [9]. В зависимости от времени травления размер наноточек варьируется от 45 до 20 нм. ГНТ с нанесенными на их поверхность нанопленками окиси цинка (ZnO) используются в детекторе УФ-излучения. У такого фотоприемника с ГНТ размером 20 нм фотоотклик и внешняя квантовая эффективность почти в два раза выше, чем у фотодетектора на основе ZnO – 22,55 мА/Вт и 9,32%, соответственно. Много лучше и время отклика.

Среди различных комплексов с КТ уникальными свойствами для оптоэлектроники обладают КТ с черным фосфором (Black Phosphorus Quantum Dots или BPQD). Недавно исследованы их нелинейно-оптические свойства в диапазоне спектра, который используется для связи и телекоммуникаций [10]. На длине волны 1,55 мкм наблюдался эффект насыщаемого поглощения излучения (уменьшения оптических потерь при большой интенсивности оптического излучения). При использовании сверхбыстрого лазера последовательность лазерных импульсов оставалась стабильной в течение 290 фс. Это считается лучшей современной характеристикой среди коммерческих оптических насыщаемых поглотителей (saturable absorber).

Функциональные графеновые КТ (ГКТ) с зеленой люминесценцией изготавливаются по технологии плавной (facile) электрохимической обработки [11]. ГКТ имеют много кислородсодержащих функциональных групп, они растворимы в водных или органических средах, что облегчает их дальнейшую функционализацию и применение. ГКТ – это новый тип электронно-акцепторного материала для фотовольтаических устройств.

Композиты на основе углеродных квантовых точек (УКТ или CQD = Carbon Quantum Dots) описаны в работе [12]. Поверхность УКТ модифицирована функциональными

амидогруппами, которые присоединяются к аминным группам эпоксидной смолы. После реакции образуются прозрачные и люминесцирующие композиты – CQDs@NH2/эпоху. Значок @ в литературе часто служит для обозначения сложных комплексов, в данном случае квантовых точек. У этого комплекса интенсивность люминесценции в восемь раз выше, чем у исходного композита CQDs@COONa/эпоху. Новый композит имеет хороший потенциал использования в белых светодиодах в качестве материала для оболочки капсулы, в которую помещается светоизлучающая часть.

Углеродные точки (Carbon dots или Cdots) являются важными зондовыми частицами для получения изображений биологических объектов и применения в качестве биодатчиков. Их преимущества – высокая светимость, хорошая биосовместимость, низкая токсичность.

Для повышения эффективности этих полезных свойств углеродных КТ используются различные функциональные заместители. Легирование УКТ азотом позволяет создавать N-Cdots и окисленные N-Cdots с углеродным сердечником и оболочкой, содержащей кислород [13]. Это приводит к повышению люминесценции. Эти N-УКТ были испытаны в живых клетках и позволили получить хорошее качество изображения клеток HeLa, рака, гепатита. HeLa – линия «бессмертных» клеток, используемая во множестве научных исследований в области биологии и фармакологии. HeLa – это название от имени афроамериканской пациентки Henrietta Lachs, из раковой опухоли которой и выделена эта линия клеток в 1951 году.

Ряд современных исследований и разработок нацелен на прямое преобразование энергии в электричество от разных ее источников (свет, тепло, механическое движение, влажность). Однако многие существующие приборы характеризуются жесткой структурой, металлическими электродами и т. п., что ограничивает их использование в переносной бесконтактной (touchless) электронике. В работе [14] продемонстрирован плоский

гибкий преобразователь влажности в электрический сигнал на основе пленок оксида графена для новой интерактивной бесконтактной платформы. При изменении влажности окружающего воздуха автономно генерируется достаточно высокое напряжение 70 мВ и ток 12 мА/см². Разработан бесконтактный интерфейс между датчиком и источником влажности, например пальцами. На основе этого создаются различные бесконтактные приборы для «умной» (smart) искусственной кожи, бесконтактных

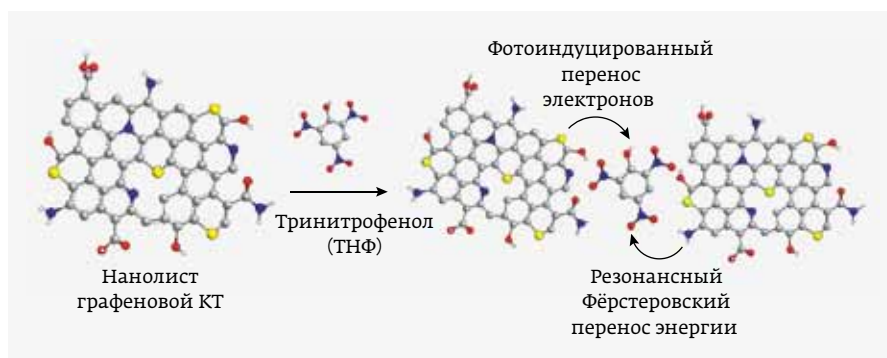


Рис. 5. Схема химической реакции, происходящей с молекулой нитрид-сульфит-ГКТ при взаимодействии с молекулой взрывчатого вещества (ТНФ)

NDT

RUSSIA

NDT Russia

20-я Международная выставка
оборудования
для неразрушающего контроля

27-29
октября
2020

Москва,
Крокус Экспо



Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

MVK Международная
Выставочная
Компания

+7 (812) 380 6010/00
ndt@mvk.ru

Подробнее о выставке:

ndt-russia.ru

12+

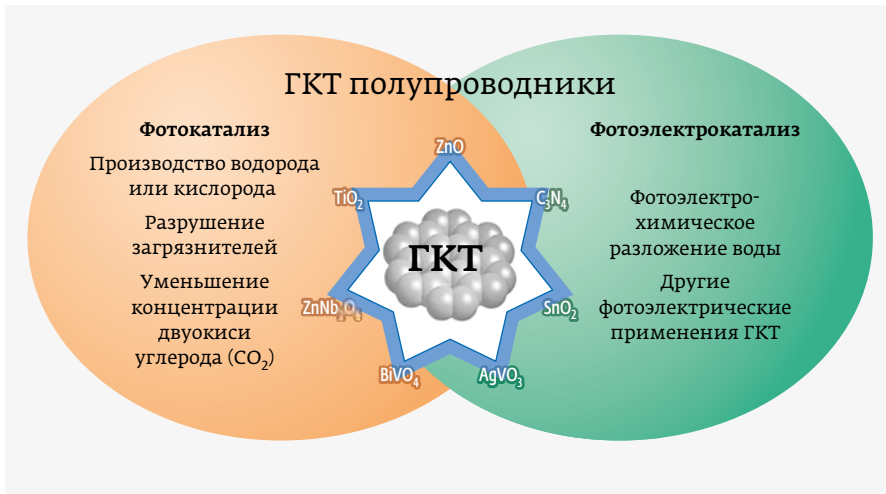


Рис. 6. Применение композитных систем на основе ГКТ и полупроводников для гетерогенного фотокатализа и фотоэлектрокатализа

переключателей и даже панели для ручного письма (handwriting), в состав которых входит сигнализатор положения пальцев.

Такие устройства дают новое направление разработкам «умной» или биомиметической (синоним бионической) электроники.

Если графеновые квантовые точки (ГКТ) допировать азотом и серой, то в результате возникает множество энергетических уровней, локализованных вблизи зоны проводимости [15]. При добавлении небольшого количества взрывчатого вещества (раствор 2,4,6-тринитрофенола (ТНФ) в концентрации 90 мкмоль) наблюдается значительное гашение флуоресценции (рис. 5). Рассчитанный порог обнаружения составляет 19,05 миллиардных долей (ppb).

ГКТ и их азотные комплексы могут служить материалом для суперконденсаторов (приборов накопления электрической энергии) [16]. В результате пиролиза ГКТ и хитозана, служащего источником азота, получается допированный азотом углерод, у которого удельная емкость составляет 545 Ф/г при плотности тока 1 А/г, малое время зарядки, а также высокая циклическая стабильность емкости – после 5 тыс. циклов при токе 10 А/г величина емкости составляет 88,9% от начальной. Напомним, что хитин, из которого получают

хитозан, является основным компонентом экзоскелета членистоногих и ряда других беспозвоночных, а также входит в клеточные стенки некоторых грибов.

Самые современные разработки композитных систем на основе ГКТ и полупроводников для гетерогенного фотокатализа и фотоэлектрокатализа при различных внешних условиях описаны в обзоре [17]. Перспективными направлениями являются селективное разрушение загрязнителей, селективные органические превращения, производства водорода и кислорода, уменьшение концентрации двуокиси углерода (CO₂), фотоэлектрохимическое разложение воды (рис. 6).

В качестве источников натурального углерода для графеновых или углеродных КТ в литературе описаны такие материалы, как соевое молоко, яйца, чеснок, кофейные продукты, мед, оболочки креветок. В работе [18] особое внимание с этой точки зрения уделено биоуглю. Показаны

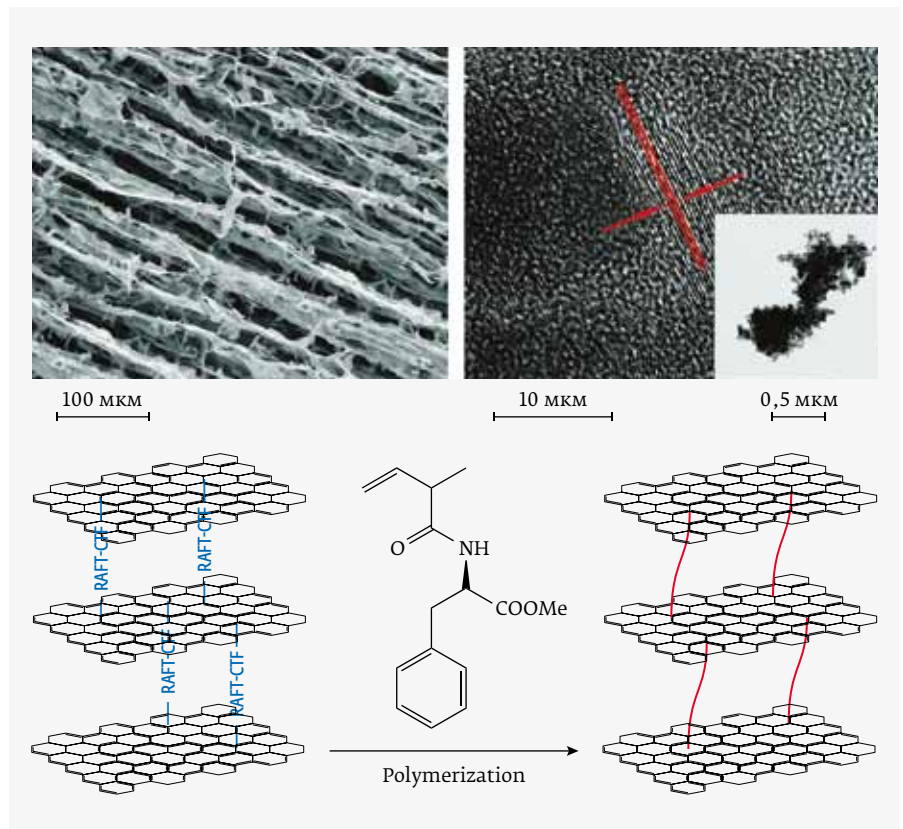


Рис. 7. Структура трехмерного аэрогеля наногрфена, допированного азотом



ПАТРОНАЖ ТПП РФ

21-23
СЕНТЯБРЯ 2020
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Radel

XX МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА РАДИОЭЛЕКТРОНИКА & ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ
- ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ДРУГИЕ НОСИТЕЛИ СХЕМ
- СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- РОБОТОТЕХНИКА
- КОНСТРУКТИВЫ
- МАТЕРИАЛЫ
- ТЕХНОЛОГИИ
- ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТЫ
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ:



FarEXPO **IFE**
Инновации. Качество. В любое время.

radelexpo.ru (812) 777-04-07

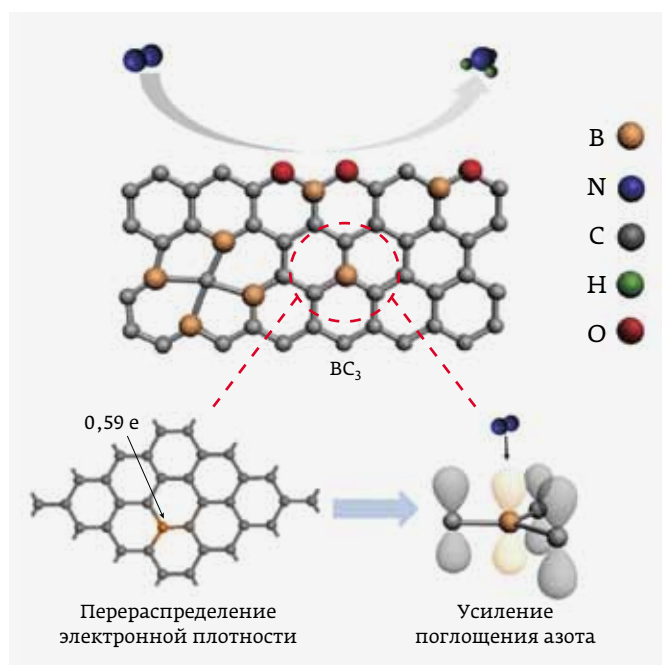


Рис. 8. Структура графена, легированного бором

образцы ГКТ, полученные из кокосового ореха и кенафы (гибискус коноплевый).

Известно тропическое растение шпороцветник ароматный или плектрантус ароматный (*Plectranthus amboinicus*). Среди его применений – лечение воспалительных заболеваний. Но шпороцветник может быть использован и в нанотехнологии. Например, двумерные графеновые листы модифицируются в трехмерные аэрогели нанографена, допированного азотом, а источником азота является как раз шпороцветник ароматный [19]. Комплекс образуется методом естественной сушки аэрогеля. При этом графеновые листы сшиваются органическими цепочками, образующимися из исходного вещества шпороцветника (рис. 7). Обогащение азотом до 12,06 ат. % происходит также за счет использования аммиака и мочевины. В результате аэрогель становится

сверхэластичным (при нагрузке до 95% от максимальной почти нет потери упругости после 60 циклов), хорошо поглощает масло и нефть, обладает отличными электрохимическими характеристиками. Кроме того, аэрогелю присущи высокая огнеупорность, малая плотность, гидрофобность, физико-химическая стабильность. Это делает материал отличным кандидатом для использования при хранении энергии, в катализе и других применениях.

Помимо органических заместителей, графен может быть легирован бором (рис. 8) [20]. При уровне легирования 6,2% материал становится электрокатализатором для производства аммиака с производительностью 9,8 мкг·ч⁻¹·см⁻². Этот материал обладает также одним из наивысших значений электрохимической (фарадеевской) эффективностью, составляющей 10,8% при напряжении –0,5 В.

Аналогичная пористая структура с похожими функциональными свойствами получается при использовании еще одного растительного полисахарида – коньякоглюманна [21]. Исходное азиатское растение называют аморфофаллус коньяк, хотя в научной литературе чаще пишут не коньяк, а конжак.

В теоретической работе [22] показано, что спектр поглощения ГКТ в УФ- и видимом диапазоне в присутствии CO₂ значительно меняется, а в присутствии аргона и азота почти нет. Это следует учитывать при разработке газоанализаторов на основе КТ.

* * *

В заключение можно сказать, что применение мельчайших, 0-мерных частиц приводит к значительному повышению эффективности материалов, используемых в электронике, энергетике, биологии, медицине. Намечены пути развития этой важной и интересной технологии, в том числе с точки зрения охраны окружающей среды.

Работа по анализу влияния квантовых точек на свойства жидких кристаллов частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-57-45011_ИНД_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Klimov V. I.** Optical Nonlinearities and Ultrafast Carrier Dynamics in Semiconductor Nanocrystals // *J. Phys. Chem. B.* 2000. 104. 6112–6123.
2. *Semiconductor and metal nanocrystals.* Edited by V. Klimov. – New York, Marcel Dekker Inc., 2004.
3. **Васильев Р. Б., Дирин Д. Н.** Квантовые точки: синтез, свойства, применение. – М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 50.
4. **Сое S., Woo W.-K., Bawendi M., Bulovic V.** Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices // *Nature.* 2002. 420. PP. 800–803.

ООО "Руднев-Шилаев"
 Разработка и производство:
 - платы сбора данных
 - измерительные приборы
 - виброакустические системы
 - инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67
 (495) 787-63-68

www.rudshel.ru
 adc@rudshel.ru

5. **Олейников В.** Квантовые точки – наноразмерные сенсоры для медицины и биологии. – <https://biomolecula.ru/articles/kvantovye-tochki-nanorazmernye-sensory-dia-meditsiny-i-biologii> (2012).
6. Отчет консалтинговой компании Future Markets от 25 сентября 2019 г. – <https://futuremarketsinc.com/the-global-market-for-quantum-dots-2/>
7. **Colgrove J.** Отчеты консалтинговой компании Touch Display Research (Исследования сенсорных дисплеев). 2016, 2020.
8. <http://www.nanocotechnologies.com/what-we-do/products/cfqd-quantum-dot-films>
9. **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.
10. **Liu M., Jiang X.-F., Yan Y.-R., Wang X.-D., A.-P. Luo, Xu W.-C., Luo Z.-C.** Black phosphorus quantum dots for femtosecond laser photonics // *Optics Communications*, 10.1016/j.optcom.2017.04.020. 2018. V. 406. PP. 85–90.
11. **Li Y., Hu Y., Zhao Y., Shi G., Deng L., Hou Y., Qu L.** An Electrochemical Avenue to Green Luminescent Graphene Quantum Dots as Potential Electron Acceptors for Photovoltaics // *Advanced Materials*. 2011. V. 23. No. 6. PP. 776–780.
12. **Chen L., Zhang C., Du Z., Li H., Zhang L., Zou W.** Fabrication of amido group functionalized carbon quantum dots and its transparent luminescent epoxy matrix composites // *Applied Polymer Science*. 2015. V. 132. No. 42. <https://doi.org/10.1002/app.42667>
13. **Xu Y., Wu M., Liu Y., Feng X.-Z., Yin X.-B., He X.-W., Zhang Y.-K.** Nitrogen-Doped Carbon Dots: A Facile and General Preparation Method, Photoluminescence Investigation, and Imaging Applications // *Chemistry. A European Journal*. 2013. V. 19. No. 7. PP. 2276–2283. <https://doi.org/10.1002/chem.201203641>.
14. **Cheng H., Huang Y., Qu L., Cheng Q., Shi G., Jiang L.** Flexible in-plane graphene oxide moisture-electric converter for touchless interactive panel // *Nano Energy*. 2018. V. 45. P. 37.
15. **Kumar Mondal T., Dinda D., Kumar Saha S.** Nitrogen, sulphur co-doped graphene quantum dot: An excellent sensor for nitroexplosives // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018. V. 257. P. 586.
16. **Tan W., Fu R., Ji H., Kong Y., Xu Y., Qin Y.** Preparation of nitrogen-doped carbon using graphene Quantum dots-chitosan as the precursor and its supercapacitive behaviors // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. V. 112. PP. 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.014>.
17. **Zeng Z., Chen S., Thatt Yang Tan T., Xiao F.-X.** Graphene quantum dots (GQDs) and its derivatives for multifarious photocatalysis and photoelectrocatalysis // *Catalysis Today*. 2018. V. 315. PP. 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.01.005>.
18. **Jamaludin N., Abdul Rashid S., Tan T.** Natural Biomass as Carbon Sources for the Synthesis of Photoluminescent Carbon Dots. In «Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials». P. 109–134. (2019). ISBN: 9780128157572. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815757-2.00005-X>
19. **Meng Q., Wan H., Zhu W., Duan T., Yao W.** Naturally Dried, Double Nitrogen-Doped 3D Graphene Aerogels Modified by Plant Extracts for Multifunctional Applications // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018. V. 6. No. 1. P. 1172.
20. **Yu X., Han P., Wei Z., Huang L., Gu Z., Peng S., Ma J., Zheng G.** Boron-Doped Graphene for Electrocatalytic N₂ Reduction // *Joule*. 2018. V. 2. No. 8. PP. 1610–1622. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.06.007>.
21. **Lian J., Li J., Wang L., Cheng R., Tian X., Li X., Zhou J., Duan T., Zhu W.** Konjac Glucomannan Derived Carbon Aerogels for Multifunctional Applications // *Nano*. 2018. V. 13. No. 10. P. 1850113. <https://doi.org/10.1142/S1793292018501138>.
22. **Raeyani D., Shojaei S., Ahmadi-Kandjani S.** Optical graphene quantum dots gas sensors: Theoretical study // *Superlattices and Microstructures*. 2018. V. 114. P. 321.

ООО «АК Микротех»

Комплексные решения в области микроэлектронного и микросборочного производства
Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования
Отработка и постановка технологических процессов
Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU

