

图3-4  $Mn_{16}Fe_{16}Co_xNi_{34-x}Ge_7Si_{27}$ 系列合金在0~1.5 T下的饱和磁化强度与等温磁熵变  
4 结论

本实验主要研究了MnCoGe-FeNiSi复合型磁制冷材料的结构与磁热效应。通过XRD分析表明,随着Co含量的变化合金从低温TiNiSi型正交结构(空间群为Pnma)转变为高温Ni<sub>2</sub>In型六角结构(空间群为P63/mmc)。用振动样品磁强计(VSM)测量了合金的磁性与磁热效应,发现 $T_c$ 横跨室温,热滞后从13 K降至9 K。0~1.5T下该系列合金的最大磁熵变为15.8 JKg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

УДК 544.77: 535.37

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО КЛАССА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДВУМЕРНЫХ НАНОЧАСТИЦ – КВАНТОВЫХ  
НАНОПЛАСТИН**

*Антанович А., Прудников А., Артемьев М.  
Институт физико-химических проблем  
Белорусского государственного университета  
E-mail: antanovi4@gmail.com*

**Abstract.** *In this work we present main results of our work on the synthesis and investigation of novel two-dimensional semiconductor nanocrystals – quantum nanoplatelets. We have demonstrated that they possess various unique optoelectronic properties that are superior to other semiconductor nanoparticles. In addition to that, we developed a series of protocols for the manufacturing of 2D A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup> semiconductor nanoheterostructures and a method for controlled organization of NPLs into stacks with controlled size. These NPs and composite structures on their basis are expected to be highly desirable materials for various practical applications ranging from photocatalysis and bioimaging to the next generation of highly efficient LEDs, displays, photovoltaic devices and lasers.*

Атомарно плоские полупроводниковые нанокристаллы типа A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup> (квантовые нанопластины, КНП) представляют собой новый класс полупроводниковых нанокристаллов (НК). Благодаря их форме и сильному одномерному квантованию, КНП можно рассматривать в качестве аналогов квантовых ям (КЯ), которые широко используют в электронике и производят такими методами, как молекулярно-лучевая эпитаксия. В отличие от КЯ, КНП получают методом коллоидного синтеза, который позволяет получать свободные КЯ без подложки, которые затем легко поддаются модификации и обработке. Со времени открытия КНП было установлено, что по ряду свойств они превосходят аналогичные полупроводниковые нанокристаллы другой размерности. Среди таких свойств находятся нулевой разброс по размеру в направлении квантования и, как следствие, малая ширина полос поглощения и фотолюминесценции (ФЛ) (<10 нм), гигантская сила осциллятора, высокие сечения одно- и двухфотонного поглощения, а также высокое значение электрооптического отклика. КНП считаются перспективными материалами для производства светодиодов и дисплеев с высокой яркостью и цветовым разрешением, фотовольтаических конвертеров солнечного излучения, а также высокочувствительных электрооптических переключателей.<sup>1</sup>

Для того чтобы использовать полупроводниковые НК в практических целях, их часто покрывают оболочкой из широкозонного материала. Это приводит к пассивации поверхностных оборванных связей, концентрации носителей заряда в ядре НК и значительному росту интенсивности ФЛ НК. Более того, оболочка из широкозонного материала увеличивает фото- и химическую стабильность ядер НК. В нашей группе был разработан

новый метод покрытия КНП CdSe оболочкой ZnS при умеренной температуре с использованием диэтилдитиокарбамата цинка. По сравнению с существующими методами нанесения оболочки, данный метод является более быстрым, а также позволяет регулировать положение полос поглощения и ФЛ КНП за счёт изменения толщины оболочки. Рост оболочки на поверхности КНП CdSe сопровождается красным сдвигом и уширением полос поглощения и ФЛ. Тем не менее, ширина данных полос остаётся значительно ниже таковой у НК других размерностей, что позволяет добиться высокого цветового разрешения, что крайне важно для производства современных светодиодов и дисплеев.

Также нами было впервые установлено, что нанесение оболочки CdS на КНП CdSe с использованием других прекурсоров в присутствии ацетат-ионов, приводит к образованию новой гетероструктуры CdSe-CdS типа «ядро-крылья». Методами электронной микроскопии высокого разрешения и элементного картирования было показано, что рост CdS в данных условиях происходит на боковых гранях КНП в эпитаксиальном режиме. Рост «крыльев» сопровождается появлением на спектре поглощения КНП узкой полосы в синей области, соответствующей КНП CdS такой же толщины. В то же время, такие спектральные характеристики ядер CdSe, как положение и ширина полос поглощения и ФЛ, не изменяются. При этом благодаря пассивации оборванных связей на боковых гранях КНП CdSe наблюдается рост интенсивности ФЛ. В подобных гетероструктурах «крылья» CdS играют роль «фотонной антенны» (Рис. 1а), которая позволяет сконцентрировать фотогенерированные носители заряда в ядре НК, тем самым увеличивая вероятность их излучательной рекомбинации. Подобные нанокристаллы являются эффективными поглотителями и люминесцентными конвертерами светового излучения.<sup>2</sup>

Подобный подход был использован нами для получения КНП CdSe-CdTe типа «ядро-крылья». В отличие от упомянутых выше КНП CdSe-CdS, КНП CdSe-CdTe характеризуются ступенчатой диаграммой электронных уровней, что приводит к тому, что наиболее низкое энергетическое состояние для электрона и дырки достигаются в различных частях НК. Это, в свою очередь, приводит к пространственному разделению фотогенерированных носителей заряда. Как и в случае КНП «ядро-крылья» CdSe-CdS, рост CdTe происходит на боковых гранях КНП CdSe в эпитаксиальном режиме и приводит к появлению новой полосы поглощения. При этом, однако, происходит значительное изменение полосы ФЛ: полоса претерпевает значительный красный сдвиг и уширяется, а время жизни возбуждённого состояния возрастает. Данные изменения характерны для гетероструктур с подобным взаимным расположением энергетических уровней. Вместе с тем, в отличие от аналогичных нуль- и одномерных гетероструктур типа «ядро-оболочка», в случае КНП CdSe-CdTe имеется возможность создать электрический контакт с обеими частями гетероструктуры. Это, в свою очередь, позволяет одновременно извлекать оба типа фотогенерированных носителей заряда, что в сочетании с большой площадью образуемых контактов, делает подобные гетероструктуры перспективным материалом для создания новых фотовольтаических и фотокаталитических систем и оптических сенсоров.<sup>3</sup>

Ещё одним направлением нашей работы является создание самоорганизованных структур на основе КНП. Недавно нами было установлено, что добавление различных органических молекул в раствор свободных КНП приводит к их самоорганизации в слоистые структуры (Рис 1 б, в). На сегодняшний день нами разработан метод получения подобных агрегатов контролируемого размера с различным расстоянием между частицами. В подобных агрегатах процесс переноса энергии происходит быстрее процесса Оже-рекомбинации, что позволяет использовать подобные агрегаты в приложениях с высокой интенсивностью накачки и плотностью носителей зарядов, таких как светодиоды, оптические сенсоры и т.п.

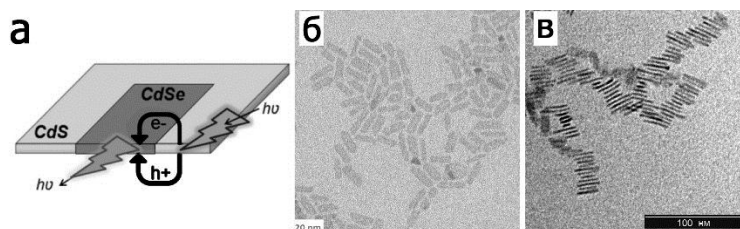


Рисунок 1 – Диаграмма, демонстрирующая принцип действия «фотонной антенны», (а) и ПЭМ-снимки отдельных КНП CdSe (б) и их агрегатов (в).

В данном докладе представлены основные результаты работы по получению и изучению квантовых нанопластин и различных структур на их основе. В работе описаны их основные оптические свойства, а также обозначены их потенциальные практические приложения.

Данная работа выполнялась в рамках программы «Химреагенты».

1. Scott, R.; Achtstein, A. W.; Prudnikau, A.; Antanovich, A.; Christodoulou, S.; Moreels, I.; Artemyev, M.; Woggon, U. Two Photon Absorption in II–VI Semiconductors: The Influence of Dimensionality and Size. *Nano Lett.* 2015, 15, 4985–4992.

2. Prudnikau, A.; Chuvilin, A.; Artemyev, M. V. CdSe-CdS Nanoheteroplatelets with Efficient Photoexcitation of Central CdSe Region through Epitaxially Grown CdS Wings. *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 14476–14479.

3. Antanovich, A.; Prudnikau, A.; Melnikau, D.; Rakovich, Y.; Chuvilin, A.; Woggon, U.; Achtstein, A. W.; Artemyev, M. Colloidal Synthesis and Optical Properties of Type-II CdSe-CdTe and Inverted CdTe-CdSe Core-Wings Heteronanoplatelets. *Nanoscale* 2015, 7, 8084–8092.

УДК 621.744.37: 667.637.2: 678.046.3

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМАЛЬНОМУ ВЫБОРУ ДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ МАТРИЦ

Антонов А.С., Воронцов А.С., Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Струк В.А.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы

E-mail: antonov.science@gmail.com

**Abstract.** *METHODOLOGICAL APPROACHES TO OPTIMAL SELECTION OF HIGH-DISPERSED MATRIX MODIFIERS.* The paper presents the methodological approaches to optimal selection of high-dispersed matrix modifiers based on a systematic approach that takes into account the complex of structural, technological, economic, environmental and other factors. The technology of modifying the surface layer of hydrocarbon by short-pulse laser radiation in the formation of composite materials based on polytetrafluoroethylene was proposed. This technology makes it possible to receive functional composites with advanced characteristics.

В практических приложениях технологии композиционных материалов следует учитывать не только особенности морфологии поверхностного слоя частиц компонентов, которая обуславливает особое энергетическое состояние, но и температурные условия проявления этого состояния и методы его реализации в устоявшихся процессах подготовки, хранения, смешивания и переработки [1, 2].

Необходимо отметить некоторые методологические подходы, которые позволяют обеспечить оптимальный выбор дисперсных модификаторов при создании композитов заданного функционального назначения.