

От нанотехнологии к nanoархитектонике

Д. А. Козодаев

ООО «НТ-МДТ»
г. Зеленоград

kozodaev@ntmdt.nl

Е. Н. Муратова

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

sokolovaeknik@yandex.ru

В. А. Мошников

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

vamoshnikov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы усиления научно-исследовательских работ и включения в образовательный процесс концепций постнанотехнологического этапа – концепции «nanoархитектоники». Приводятся примеры конкретных исследований. Подчеркивается важность связей с индустриальным партнером ООО «НТ-МДТ» и совместных научных исследований с учеными ФТИ РАН и Беларуси.

Ключевые слова: nanoархитектоника, межслойный дизайн, перовскит, солнечная энергетика

I. ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI века стало ясно, что, несмотря на бурное развитие нанотехнологий, для достижения научно-технического прогресса требуется развитие представлений о формировании конструкций из разных продуктов нанотехнологий, обеспечивающих новые синергетические эффекты.

Термин «nanoархитектоника», объединяющий принципы сочетания nanoобъектов взаимно дополняющими свойствами, появился в 1999 году (и в этом же 1999 г состоялся Первый Международный симпозиум по nanoархитектонике в Цукуба, Япония). В 2003 году термин nanoархитектоника впервые был упомянут в рецензируемой статье и в том же году был открыт специализированный исследовательский центр Functional Engineered Nano Architectonics. В 2007 году аналогичные центры были созданы в Цукубе: Международный центр nanoархитектоники материалов в Национальном институте материаловедения (NIMS) и межфазной nanoархитектоники в Национальном институте передовых промышленных наук и технологий (AIST).

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» несколько лет назад была создана R@D магистерская программа «Атомно-молекулярный дизайн и nanoархитектоника». Nanoархитектоника как производство новых функциональных материальных систем с использованием наноразмерных элементов может быть достигнута только посредством слияния нанотехнологий с другими исследовательскими дисциплинами. Усилено изучение физики, химии, материаловедения наносистем.

Каждый магистрант в ходе обучения тесно сотрудничает с руководителем из числа ведущих

педагогических и научных кадров, как правило, докторов наук. Фактически, обучение в исследовательской магистратуре по форме – это мастер-класс руководителя. Мастер (научный руководитель) формулирует магистру общее научное направление и стратегическую задачу на весь период обучения. Научная задача определяет перечень дисциплин, которые должен освоить магистр. Основной упор делается на практические исследования. Эта задача является частью формирующейся концепции nanoархитектоники, которая выходит за рамки области нанотехнологий. Предполагается, что концепция nanoархитектоники включает в себя проектирование функциональных материалов с использованием наноразмерных блоков, основанных на принципах нанотехнологии. Развивается несколько подходов:

- от атомных переключателей к нейроморфным сетям;
- от контроля атомных nanoструктур к альтернативным энергетическим приложениям;
- от традиционных для кафедры физико-химических методов анализа межфазных процессов к анализу биомолекулярных систем.

О научной подготовке магистров можно судить по конкретным мастер-классам.

- Атомно-молекулярный дизайн и синтез. Нетрадиционные механизмы роста. Ориентированное сращивание. Мезокристаллы. Фрактально-перколяционные nanoструктуры. Коллоидные квантовые точки, золь-гель технология, пористые иерархические nanoструктуры, газовые сенсоры и биосенсоры, узкозонные полупроводники, солнечные элементы (проф. В.А. Мошников).
- Физика полупроводников, наноэлектроника, емкостная и адмиттансная спектроскопия, квантово-размерные структуры (квантовые ямы, квантовые точки), широкозонные полупроводники (GaN, алмаз), матричные фотоэлектронные устройства, компьютерные технологии и автоматизация эксперимента, виртуальные приборы (проф. В.И. Зубков).
- Моделирование физических механизмов получения алмазов, графенов, углеродных нанотрубок, разработка и оптимизация структур на их основе, моделирование отдельных приборов на основе этих и иных углеродных материалов (проф. Н.И. Алексеев).

Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, <https://rscf.ru/project/23-42-10029/> с использованием оборудования ООО «НТ-МДТ» в Центре сканирующей микроскопии (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

- Экспериментальные исследования электрических и оптических свойств полупроводниковых полимерных и композитных материалов, а также приборов органической электроники на основе полимерных наноструктур: органических светодиодов, полевых транзисторов, полимерных солнечных элементов, элементов нейроморфных сетей (проф. А.Н. Алешин, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).
- Микро- и наносистемная техника, измерительные и микромеханические преобразователи, сенсорика, проектирование и технология датчиков, размерные и кооперативные явления в микро- и наноструктурах (проф. А.В. Корляков).
- Квантовая теория поля, электродинамика движущихся сред, нелинейные поля в вакууме и геометрия пространства-времени, физика полупроводников, теория экситонов и поляритонов, методы теории групп в квантовой механике и физике твердого тела. Расчет зонной структуры фотонных кристаллов (проф. Г.Ф. Глинский).
- Технология выращивания объемных монокристаллов карбида кремния, физико-химические основы технологии роста объемных монокристаллов, физика ростовых дефектов; эпитаксиальный рост на неизоморфных подложках, бикристаллография границ раздела, рентген дифракционные методы исследования ростовых объектов (проф. А.О. Лебедев).
- Пористые материалы, мезопористый кремний, микропористый кремний, системы адресной доставки лекарств на основе пористого кремния, функциональный состав поверхности, применение пористого кремния в медицине (д.т.н. Ю.М. Спивак).
- Физика окислов переходных металлов и аморфных полупроводников, возобновляемая энергетика, солнечные элементы (проф. Е.И. Теруков, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН).
- Разработка и исследование аналитических микросистем, лабораторий на чипе (ЛНЧ), биочипов для биомедицинских применений. Конструирование и создание прототипов функциональных элементов ЛНЧ, сопряженных с микрофлюидной системой, элементы фотоники, СВЧ (доц. Т.М. Зиминая).
- Моделирование теплофизических процессов, теплофизика микро- и наносистем, микрофлюидика, микро- и наносенсоры и актюаторы, микро- и наноэнергетика, микророботы, физика высоких плотностей энергии. (доц. А.П. Бройко).
- Фотокатализ и фотокаталитические системы, пьезоэлектрические нанокристаллы. Физико-химические особенности синтеза, моделирования и функционирования полупроводниковых фаз переменного состава (доц. А.И. Максимов).

Гибкая система формирования мастер-классов с учетом взаимных интересов студентов и руководителей позволяет совершенствовать процесс развития научно-исследовательской работы в вузе. В качестве примера можно привести формирование новых курсов по

«Альтернативной энергетике» и создание видео курса «Наноматериаловедение» (доц. Е.Н. Муратова, доц. С.С. Налимова).

В качестве примеров научно-исследовательских работ в области наноархитектоники прежде всего отметим работы в области создания мультиферроиков типа «ядро-оболочка» [1]. Мультиферроики были получены путем покрытия наночастиц CoFe_2O_4 оболочкой из BaTiO_3 с использованием золь-гель методов. Переход к таким нанообъектам представляется логичным продолжением получения гетерогенных мультиферроиков. В слоистых мультиферроиках магнитоэлектрический коэффициент недостаточно велик из-за нарушения механических связей и отсутствия оптимальных режимов сочетания свойств.

В мультиферроиках, при наложении магнитного поля, из-за эффекта магнитострикции происходит деформация пьезоэлектрического слоя и возникает ЭДС. Важность развития научно-технического направления мультиферроиков на современном этапе развития науки и техники подтверждается тем, что работа, в которой рассмотрены принципы гетерогенных мультиферроиков, процитирована более 3200 раз [2]! Для понимания физики процессов рекомендуем работу [3].

Отметим, что на пионерскую работу по мультиферроикам $\text{CuFe}_2\text{O}_4 - \text{BaTiO}_3$ [1] насчитывается около 100 цитирований, но идея пользования элементами наноархитектоники конструкций «ядро-оболочка» значительно более общая. Сейчас она реализуется нами при решении задач оптимизации параметров солнечных элементов для межслойного дизайна между активным слоем на основе перовскита и транспортным слоем для носителей заряда [4–6].

Из других наработок по наноархитектонике, которые используются нами, следует отметить результаты работы [7], в которых для солнечных элементов в нужных локальных областях формировались слои p- и n- типов методами 3D печати. Эти способы аддитивной технологии могут успешно применяться для модификации структуры солнечных элементов, особенно, для решения задач повышения временной стабильности и устранения диффузии при разрушении поверхности кристаллитов активного слоя.

В настоящее время активно проводятся совместные научные исследования по солнечным элементам с учеными ФТИ РАН и Беларуси [5, 6, 8–10].

Возможности развития направления «наноархитектоника» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» значительно возросли при открытии Центра сканирующей микроскопии (ЦСМ), совместного с ООО «НТ-МДТ».

Работы, выполненные в ЦСМ и совместно с ООО «НТ-МДТ» в направлении «наноархитектоники», связаны с получением коллоидных квантовых точек типа «ядро-оболочка» [11, 12], создании флуоресцентных зондов для ближнепольной оптической микроскопии [13], аperiодических дифракционных решеток [14], тестовых структур с калиброванными высотами в ангстремном масштабе [15]. Проводятся разработки по метрике иерархических пористых наноматериалов [16].

В ООО «НТ-МДТ» осуществляются разработки оборудования нового поколения для решения задач наноархитектоники [17].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день продолжают развиваться нанотехнологии, но все более востребованными являются концепции наноархитектоники (постнанотехнологический этап). В работе приведены результаты внедрения концепции нанотехнологии в учебный процесс и научные исследования. Выделены особенности сотрудничества СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ООО «НТ-МДТ», ФТИ РАН и БГУИР (г. Минск).

Получены результаты по синтезу и нанодиагностике, обладающие новыми функциональными возможностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shvartsman V.V., Lupascu D.C., Alawneh F., Borisov P., Kozodaev D. Converse magnetoelectric effect in CoFe₂O₄-BaTiO₃ composites with a core-shell structure // *Smart Materials and Structures*. 2011. Т. 20. № 7. С. 075006.
- [2] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions // *Journal of Applied Physics*. 2008. Т. 103. № 3. С. 031101.
- [3] Бичурин М.И. и др. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах / монография под ред. М.И. Бичурина. Федер. агентство по образованию, Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого, 2005 г., 226 с.
- [4] Muratova E.N. The application of nanotechnologies in the development of alternative energy sources // *International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology for a Green and Sustainable future (ICAGS-2023)*. Maharaja's College, Ernakulam, Kerala, India, 5th to 6th of December 2023, P. 17-18.
- [5] Наночастицы, наносистемы и их применение. Альтернативная энергетика: учеб. пособие / под ред. В.А. Мошниковой, Е.Н. Муратовой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 112 с.
- [6] Рябко А.А., Овезов М.К., Максимов А.И., Алешин А.Н., Мошников В.А. Конкурирующие механизмы роста при формировании поликристаллической пленки MAPbI₃ // *Вестник НовГУ*. 2023. 3(130). 365-373.
- [7] Marin V., Holder E., Wienk M.M., Tekin E., Kozodaev D., Schubert U.S. Ink-jet printing of electron donor/acceptor blends: towards bulk heterojunction solar cells // *Macromolecular Rapid Communications*. 2005. Т. 26. С. 319.
- [8] Муратова Е.Н., Мошников В.А., Алешин А.Н., Врублевский И.А., Лушпа Н.В., Тучковский А.К. Исследование и оптимизация процессов кристаллизации растворов гибридных галогенидных перовскитов состава CH₃NH₃PbI₃ // *Физика и химия стекла*. 2023. том 49, № 6, С. 662-671.
- [9] Букреев А.П., Муратова Е.Н., Мошников В.А. Облучение пленок структуры перовскита заряженными частицами // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. Тверь: Изд-во Тверского гос. университета, 2023. Вып. 15, С.75-84. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.075
- [10] Муратова Е.Н., Мошников В.А., Врублевский И.А., Алешин А.Н., Максимов А.И. Исследование и выбор режимов кристаллизации растворов гибридных галогенидных перовскитов состава CH₃NH₃PbI₃ // *IV Всесоюзный Конгресс по сенсорике и экономике «Сенсорное слияние-2023»: сб. докладов*. 30-31 мая 2023 г., Санкт-Петербург, Кронштадт, С. 144-152.
- [11] Korepanov O.A., Aleksandrova O.A., Firsov D.D., Kalazhokov Z.Kh., Kirilenko D.A., Kozodaev D.A., Matveev V., Mazing D.S., Moshnikov V.A. Polyvinylpyrrolidone as a stabilizer in synthesis of agins 2 quantum dots // *Nanomaterials*. 2022. Т. 12. № 14. С. 2357.
- [12] Korepanov O.A., Kozodaev D.A., Aleksandrova O.A., Bugrov A., Firsov D.D., Kirilenko D., Mazing D.S., Moshnikov V.A., Shomakhov Z.V. Temperature- and size-dependent photoluminescence of cuins 2 quantum dots // *Nanomaterials*. 2023. Т. 13. № 21. С. 2892.
- [13] Козодаев Д.А., Корепанов О.А., Мошников В.А. Флуоресцентный зондовый датчик на основе ККТ систем I-III-VI // В сборнике: *Химическая термодинамика и кинетика: сб. науч. трудов XII Международной научной конференции*. Великий Новгород, 2022. С. 154-155.
- [14] Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., Мошников В.А. Аперриодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей ζ-функции римана // В сборнике: *Невская фотоника-2023. Всероссийская научная конференция с международным участием сборник научных трудов*. Санкт-Петербург, 2023. С. 32.
- [15] Козодаев Д.А., Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Тестовые структуры на гетерозипитаксиальных слоях PbTe(111)-on-Si со ступенчатым характером субмикронного рельефа поверхности // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 127-134.
- [16] Korepanov O.A., Moshnikov V.A., Kozodaev D.A., Spivak Y.M. New diagnostic techniques for incorporated porous materials // В сборнике: *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*. 2022. С. 975-977.
- [17] Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов // В сборнике: *НОЛОЕХРО 2023: тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям*. Санкт-Петербург, 2023. С. 125-126.