

КАФЕДРА «НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ»

Р.Р. Файзуллин, А.А. Мальцев, З.Р. Идиатуллов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В статье дается общая характеристика учебно-педагогической и научно-исследовательской деятельности кафедры «Нанотехнологии в электронике», прослеживаются ключевые моменты развития кафедры. Отмечены основные направления научно-исследовательской деятельности. Представлены наиболее значимые результаты научных исследований.

Ключевые слова: микроэлектроника, радиотехника, нанотехнологии.

История развития микроэлектроники на радиотехническом факультете КАИ

Основываясь на успешном многолетнем опыте кафедры «Конструирование и производство микроэлектронной аппаратуры» (КиП МЭА), обеспечившей предприятия СССР и России квалифицированными инженерами, разрабатывающих отечественную микроэлектронику, в конце 2013 года на её базе была сформирована новая кафедра «Нанотехнологии в электронике» (НТвЭ). Обратимся к истории, ключевые вехи которой показывают мощный потенциал и дальновидность наших выпускников и организаторов в развитии отечественной науки и прикладных исследований в области отечественной микроэлектроники.

Основатель кафедры КиП МЭА, д.т.н., проф. Ермолаев Юрий Петрович, окончил полный курс КАИ в 1950 году по специальности «Авиационные двигатели» и, по окончании института, работал старшим технологом на заводе п/я 423. В связи с требованиями оборонной промышленности в начале 1952 года в КАИ был создан радиотехнический факультет (РТФ), на котором была организована специальная конструкторско-технологическая подготовка студентов. В 1952 году Ермолаев Ю.П. прошел по конкурсу на должность старшего преподавателя по специальности конструирование и технология радиоаппаратостроения на кафедру «Теоретическая радиотехника», а затем переходит на новую кафедру «Технология радиоприборостроения», где активно занимался научно-исследовательской и хозяйственной работой в области конструирования и производства радиоаппаратуры. В 1960 году на РТФ была выделена отдельная кафедра «Производство радиоаппаратуры» (ПРА), при которой приказом Минвуза РСФСР в 1962 г. создается проблемная научно-исследовательская лаборатория микроэлектроники (ПНИЛМЭ), одна из пяти, созданных в стране проблемных лабораторий для выполнения НИР и ОКР для предприятий страны. Создание этой лаборатории было инициировано при поддержке первого зав. кафедрой ТРЭ, первого доктора наук на РТФ, ректора КАИ в 1967-1977 гг., проф. Нигматуллина Р.Ш. Научным руководителем лаборатории назначен Ю.П. Ермолаев. В 1964 г. Ермолаев Ю.П. защищает кандидатскую диссертацию в области микроэлектроники, в 1965 г. ему присвоено ученое звание доцента по кафедре «Производство радиоаппаратуры», а в 1970 году он избран заведующим кафедрой «Производство радиоаппаратуры», позже, в 1976 г. была образована кафедра «Микроэлектроника и конструирования» (МИК).

В этот период в СССР существенно выросла потребность в специалистах конструкторах-технологах, ориентированных на высокие технологии в области электронного приборостроения и микроэлектроники. РТФ КАИ встал в один ряд ведущих

ВУЗов страны в области микроэлектроники наряду с МИЭТ, МИФИ, МАИ, МЭИС, ЛЭТИ, ТРТИ (Таганрог), ГГУ, СГУ, ЛПИ (Львов). Проводимые в этот период всесоюзные конференции, НИР и ОКР по микроэлектронике были закрытыми и находились под контролем руководства оборонных министерств с соответствующим их планированием и материальным обеспечением. Поэтому к НИР и ОКР по микроэлектронике стали подключаться НИИ и КБ по директивам Минэлектропрома СССР. Наиболее плодотворно сложились производственные отношения РТФ с авторитетной в СССР фирмой - ОКБ МЭИ, создававшей уникальную радиоэлектронную аппаратуру для космических исследований и оборонной промышленности, с Ульяновским ПО «Комета», ведущей фирмы страны по военно-морской электронике, с ГИПО по тематике миниатюрных лазерных дальномеров.

Модернизированная экспериментально-производственная база ПНИЛМЭ и созданная на ее основе НИЛ-12 позволяла обрабатывать тонкопленочные и толстопленочные технологии изготовления специализированных гибридных интегральных микросхем, отличающихся от уже освоенных предприятиями МЭП, с учетом жестких требований оборонных предприятий, а главное – готовить высококвалифицированных специалистов, владеющих принципиально новыми технологиями.

В 1974 г. Ермолаев Ю.П. успешно защищает первую в СССР докторскую диссертацию по микроэлектронике. В 1976 г. ему присвоено ученое звание профессора. По его инициативе кафедра ПРА была разделена на три кафедры: кафедра «Микроэлектроника и конструирование РЭА (МИК)» (зав. каф. проф. Ермолаев Ю.П.), кафедра «Конструирование и производство ЭВА» (зав. каф. доц. Даутов О.Ш.) и кафедра «Производство радиоаппаратуры (ПРА)» (зав. каф. проф. Чабдаров Ш.М., декан РТФ). Затем, в 1986г. на базе кафедр МИК и ПРА была создана кафедра «Конструирование и производство микроэлектронной аппаратуры» (КиПМЭА), которой Ермолаев Ю.П. руководил до 1992 г. В период с 1992 г. по 1996 гг. кафедрой руководил проф. Тюхтин М.Ф. - ученик Ермолаева Ю.П., прекрасно владеющий английским языком, единственный ученый на РТФ, который смог добиться годичной стажировки в престижном Масачусетском технологическом институте в г. Бостоне (США) в 1973 г., где изучал доступные достижения американских исследователей в области микроэлектроники СВЧ и методов их автоматизированного проектирования.

Ермолаев Ю.П. был одним из ведущих ученых в области отечественной микроэлектроники и комплексной микроминиатюризации РЭА. Под его руководством сформировалась целая научная школа по созданию специализированных функциональных микроэлектронных ВЧ и СВЧ устройств с использованием гибридных бескорпусных кристаллов больших интегральных схем и микросборок.



Доц. Ермолаев Ю.П.,
1965г.



Проф. Ермолаев Ю.П., проф. Нигматуллин Р.Ш.,
проф. Чабдаров Ш.М.

В конце 80-х годов в Республике Татарстан была сформирована мощная программа по созданию экспериментально-производственной базы для серийного производства интегральными микросхем на основе технологии комплексной микроминиатюризации, включая применение базово-матричных кристаллов и перестраиваемых полупроводниковых интегральных схем. Но, в начале 90-х по известным причинам, эта стратегически важная для страны программа рухнула.

С 1996 по 2013 гг. кафедрой КиП МЭА руководил д.т.н., проф. Насыров И.К. Избранный по конкурсу в 1996 г. он активно развивает научно-исследовательскую работу в области проектирования гибридных СВЧ микросхем и эксплуатационной надежности сложных радиотехнических систем. Основные научные направления, которыми занимался Ильгиз Кутдусович: оптимальный прием сигналов сверхнизкочастотного диапазона, ионика твёрдого тела и микроэлектронные структуры на основе твердых электролитов, микроэлектронные устройства СВЧ-диапазона, математические методы моделирования. Под его руководством защищено 9 кандидатских и 2 докторских диссертации. Являясь проректором по учебно-методической нашего института, Насыров И.К. организует работу по внедрению многоуровневой системы образования, разрабатывает образовательные программы с учетом стандартов 2-го поколения. В 2002г. за заслуги в развитии науки и техники, плодотворную педагогическую деятельность ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан». С коллегами кафедры Насыров И.К. в сложнейшей конкурентной борьбе выигрывает федеральный мегагрант по линии Роснано и в 2010г. организует на РТФ НИИ нанотехнологий и наноматериалов, который оснастили уникальным новейшим аналитическим оборудованием корреляционной микроскопии высокого разрешения на сумму около трех с половиной миллионов евро.



Насыров Ильдус Кутдусович (23.09.1943 - 04.02.2021). Доктор технических наук, профессор, федеральный эксперт в сфере профессионального образования России - член Гильдии экспертов; действительный член (академик) Международной академии высшей школы, академик Академии Нелинейных Наук. Награжден: медалью им. К.Э. Циолковского Федерацией космонавтики России; медалью «За заслуги в развитии инженерного образования», медалью «Ветеран труда».

Это позволило сделать принципиальный прорыв и выйти на мировой уровень в исследовании наноразмерных систем и понимания нанотехнологических процессов синтеза новых материалов для различных областей и приложений, появилась возможность разрабатывать новые методы диагностики и анализа микро- и наносистем, выполнять экспериментальные методы исследования и метрологии наноструктур, разрабатывать физико-химические модели процессов создания новых поколений композиционных материалов, полимеров и эластомеров, решать задачи синтеза элементов электроники и наноэлектроники.

Становление кафедры «Нанотехнологии в электронике»

Основываясь на успешном многолетнем опыте коллектива кафедры КиПМЭА, в конце 2013 года на её базе были сформированы две новых кафедры: «Конструирование и технология производства электронных средств» (КиТПЭС) и «Нанотехнологии в электронике» (НТВЭ).

В январе 2014г. начальник УНИР КНИТУ-КАИ, выпускник кафедры МИК, д.т.н. Файзуллин Р.Р. был избран по конкурсу зав. кафедрой НТвЭ. (Протокол №1 заседания Ученого совета КНИТУ-КАИ от 23 января 2014г.).



Файзуллин Рашид Робертович, 1961 г.р. в 1984 г. закончил с отличием КАИ по специальности «Инженер конструктор - технолог радиоэлектронной аппаратуры». После защиты кандидатской диссертации - ст. преп., доцент каф. РТС; с 1991-1996 работал ст. научн. сотр. Казанского НИИ радиоэлектроники (ныне АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко»), с 1993г. заместитель главного конструктора по разработке перспективных систем связи специального назначения. После защиты докторской диссертации, до 2014г. работал начальником УНИР КНИТУ-КАИ и профессором по кафедре РТС.

Кафедра НТвЭ обеспечивает подготовку бакалавров (11.03.04) и магистров (11.04.04.) по направлению «Электроника и нанoeлектроника» и специалистов по направлению 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», специализация - инфокоммуникационные системы на транспорте и их информационная защита. Оба направления крайне интересны и востребованы на рынке труда, где выпускники успешно находят себе достойное применение, пройдя обучение по нашим образовательным программам.

На каф. НТвЭ за этот период сформировались исследовательские группы, определяющие основные направления научно-исследовательской деятельности:

- посткорреляционные модели негауссовских случайных процессов, статистический синтез алгоритмов и мультипроцессорных устройств обработки сложных сигналов в негауссовских каналах систем связи с подвижными объектами (руководитель - проф. Файзуллин Р.Р.);
- повышение пропускной способности фазовых радиотехнических систем передачи информации при сильных межсимвольных искажениях радиотракта (руководитель - доц. Лернер И.М.);
- квантовая теория дифракции на нанотрубках для элементов нанoeлектроники (руководитель - доц. Халитов З.Я.)
- химические источники тока на основе синтеза никелевых наноструктурированных волокон (руководитель - доц. Морозов М.В.)
- разработка токопроводящих оптически прозрачных покрытий, на основе ориентированных металлических наносистем (руководитель - доц. Низамеев И.Р.)

Первое и второе направления развиваются благодаря нашим замечательным корифеям РТФ, известным в СССР и России ученым, основателям научных школ - д.т.н., профессору, академику АН РТ, заслуженному радисту СССР, генеральному конструктору системы государственного опознавания СССР Чабдарову Ш.М. и д.т.н., профессору, заслуженному деятелю науки и техники России Ильину Г.И. Это новое научное направление статистического анализа и синтеза радиотехнических систем передачи информации, работающих в сложных помеховых комплексах и возмущающих воздействий в негауссовских частотно-селективных радиоканалах с высоким уровнем межсимвольных искажений на базе моделей и методов вероятностных смесей распределений и теории разрешающего времени. Разрабатываемые подходы и алгоритмы, вне ограничений корреляционной теории оптимального приема, позволяют более полно и единообразно, формализовать и получать новые аналитические и технически реализуемые решения,

позволяющие повысить системную ёмкость, помехоустойчивость и удельную пропускную способность современных систем связи. Важно отметить, что разрабатываемые классы алгоритмов сочетают достоинства полигауссовых и марковских алгоритмов, обладают важными свойствами параллелизма и рекуррентности, что обеспечивает возможность их эффективной реализации на базе современных вычислительных структур.

Третье направление связано с решением задач разработки дискретных элементов наноэлектроники, не нуждающихся для своей работы в какой-либо массивной подложке. Предлагается в качестве основы для формирования элементов использовать диэлектрические нанотрубки. По сравнению с углеродными нанотрубками это обеспечивает неограниченно широкий круг вариаций структуры и свойств цилиндрических кристаллов и даже совмещение цилиндрических структур с различным типом проводимости. Проводящие, резистивные и полупроводящие цилиндрические слои дискретных элементов синтезируются на внутренней и внешней поверхностях диэлектрической нанотрубки, формируя цилиндрические структуры типа «металл-диэлектрик-металл» или «металл-диэлектрик-полупроводник» в пределах одной наночастицы. Однако критический масштаб такого наноэлектронного устройства ставит под сомнение возможность его производства в рамках традиционных планарно-массовых технологий. Предлагается автоматическая сборка трёхмерных устройств-блоков из дискретных наноэлементов в поле сканирующего электронного микроскопа с использованием программ распознавания образов. Для этого группой исследователей кафедры, под руководством доц. Халитова З.Я., решена научная проблема описания и анализа весьма специфичных структур, на которых основаны наноэлементы. Это так называемые радиальные цилиндрические структуры, образующиеся в процессе плотнейшей упаковки атомов на цилиндрической подложке, являющиеся новыми объектами как кристаллографии, так и технологии. Авторами разработаны модели структур радиальных трубок и математический аппарат их структурного анализа дифракционным методом, позволяющие диагностировать структурный тип трубок в ряду «коаксиальные (ахиральная и хиральная) и спиральные (рулонная и конусная)» с последующей их идентификацией и калибровкой.

Направление создания эффективных химических источников тока (ХИТ) нового поколения с повышенными эксплуатационными характеристиками, развиваемое научной группой под руководством доц. Морозова М.В., крайне актуально для работы в составе гибридного привода автомобилей с рекуперативным торможением и в электромобилях. Эффективность химических источников тока в значительной степени определяется степенью развитости и объемной упорядоченности поверхности активного вещества электродов, для чего требуется создавать упорядоченные структуры с заданными свойствами на наноуровне и обеспечивать более высокую удельную мощность ХИТ. Исследование данной проблемы связано со сложной динамикой движения ионов в электролите за счет наличия сольватной оболочки вокруг иона. Принципиально новым подходом является технология формирования активной поверхности положительного электрода никель-кадмиевого аккумулятора, модифицированного вертикально ориентированными никелевыми микроволоконками с наношипированной поверхностью. Впервые на основе данной технологии предложен оксидно-никелевый электрод для химического источника тока с удельной емкостью не менее 50 Ач/кг и удельной энергией не менее 65 Втч/кг.

Разработка токопроводящих оптически прозрачных покрытий актуальна для жидкокристаллических дисплеев, оптоэлектронных устройств, полупроводниковых фотоприемников, органических светодиодов в связи с истощением мировых запасов индия. Решение этой проблемы стало возможным благодаря использованию наносетей металлов, синтезируемых различными способами. Исследователи в группе доц. Низамеева И.Р.

разработали новую методику синтеза ориентированных наносетей химическим осаждением из жидкой фазы с использованием «мягкого» мицеллярного шаблона, в качестве которого выступают молекулы ПАВ, образующие в результате самоорганизации на межфазной границе «твердое тело-жидкость» мицеллы в виде цилиндров. Для достижения оптимальных характеристик оптически прозрачных покрытий выявлена корреляция морфологии мицеллярного шаблона с его способностью формировать наносети платины на силикатном стекле. Выполнены исследования зависимости коэффициента прозрачности и поверхностного сопротивления прозрачного покрытия от концентрации прекурсора платины. Проведены экспериментальные исследования проводимости композиционного материала, состоящего из полимерной матрицы и наносетей платины.

В рамках сотрудничества с Московским институтом электронной техники мы вошли в госпрограмму сети дизайн-центров ведущих вузов России, получили доступ к дорогостоящим САПРам. На базе нашего дизайн-центра уже повысили квалификацию сотрудники института и работники предприятий-партнёров. Все виды цифровых разработок и интегральных схем ведутся в соответствующих САПРах, с возможностью их реального изготовления и прототипирования.

Когда мы транспортируем математическую модель и алгоритмику в функциональные блоки (вычислители, декодеры, шифраторы, приемники, ОЗУ и пр.), мы знаем, какие характеристики по быстродействию, спектральному составу, групповым задержкам, помехозащищенности и т.д. должны быть на входе и выходе. Отечественная база уже отвечает этим параметрам: несколько российских и белорусских предприятий делают микроэлектронику, включая процессоры и ПЛИС, на которых можно реализовать весь программируемый электронный «мозг» будущего устройства, а вспомогательное простейшее «обрамление» ключевой роли не играет и может быть импортным. Зеленоградский «ПКК Миландр» вышел с серьёзными разработками центров проектирования интегральных микросхем. МЦСТ догоняет американцев по скоростям: в 2016-м Эльбрус уступал вдвое, а анонсированный на 2021 год процессор, близок к зарубежным аналогам, ряд тестов это подтверждает. Если в 2021–2025 годах обеспечат производительность хотя бы 750 Гфлопс с двойной точностью на центральном процессоре, то отечественная элементная база способна будет выполнять задачи для перспективных разработок.

Образовательная деятельность кафедры НТвЭ

Преимущественной особенностью кафедры на сегодняшний день стало активное привлечение студентов, абитуриентов и аспирантов в научно-исследовательскую деятельность в области комплексных фундаментальных и прикладных научных исследований и смежных отраслях, благодаря оснащённости кафедры мощной современной технологической и аналитической базой мирового уровня (лаборатории кафедры расположены в Центре прикладных нанотехнологий 8-го учебного здания КАИ).

Направление «Электроника и наноэлектроника» во всех промышленно развитых странах является одним из приоритетных направлений стратегического развития. По прогнозам ведущих мировых экспертов, именно развитие наноразмерных технологий в электронике и других отраслях определяют технологический облик XXI века. Это неизбежно, поскольку главной тенденцией развития современного цифрового мира электроники является постоянное увеличение функциональности, а точнее, интеллектуальности любых технических систем и устройств при снижении их массогабаритных и энергетических характеристик. Это IT-сфера, мобильная связь, беспилотный транспорт, встраиваемые системы, интернет-вещи, искусственный интеллект,

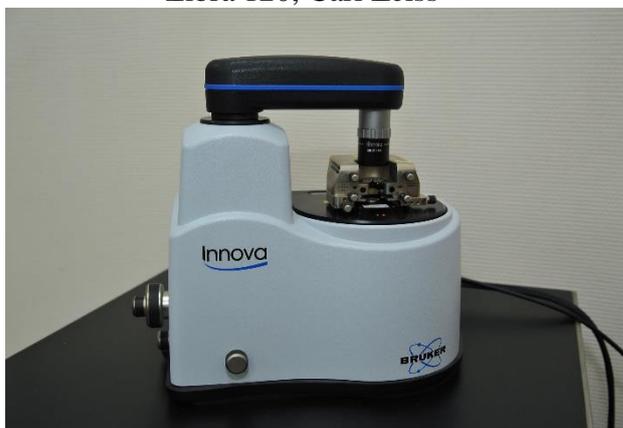
квантовые коммуникации, робототехника, оптоинформатика, биомедицинские системы, цифровые предприятия, перечислять можно бесконечно.



Просвечивающий электронный микроскоп
Libra 120, Carl Zeiss



Сканирующий электронный микроскоп
Auriga CrossBeam, Carl Zeiss



Просвечивающий электронный микроскоп
Libra 120, Carl Zeiss



Сканирующий электронный микроскоп
Auriga CrossBeam, Carl Zeiss

В этой связи, современное поколение специалистов определяет облик формирующегося цифрового мира, который характеризуется как: Intelligent Wireless Connected World (Интеллектуальный мир беспроводной связи). Интеграция потенциала современной радиоэлектроники, фотоники, прорывных квантовых технологий открывает принципиально новые возможности для развития сквозных цифровых технологий, определяющих стремительные изменения современного общества. По этой причине на инженеров, способных разрабатывать электронный «интеллект» для любых, сложнейших технических устройств и систем всегда есть спрос, а их труд щедро оплачивается в любой стране.

Таким образом, три ключевые составляющие определяют профессиональную квалификацию нашего выпускника:

- Первая составляющая базируется на радиоэлектронике, фотонике, микроэлектронике, нанoeлектронике, квантовой электронике.
- Вторая составляющая базируется на беспроводных (мобильных), спутниковых, квантовых и интеллектуальных сетевых технологиях.
- Третья составляющая базируется на разработке, конструировании, математическом и имитационном моделировании в среде САПР сквозного проектирования и программировании будущих радиоэлектронных устройств и систем.

Эпоха современного технологического уклада общества обнажила дефицит идей. Китай технологически способен произвести что угодно, но не зря HR-агентства гоняются за головами, способными генерировать идеи, «положить» их на математику, математику - на алгоритмы, а затем в рамках САПР спроектировать основу будущих микросхем. Квалифицированные разработчики - большой дефицит. А в нашем институте развиваются заложенные с 50-х годов мощные научные школы: синтеза антенн, квантовой электроники, статистической радиотехники, фотоники, дробных операторов и фрактальных элементов, микроволновой техники, оптики, гибридной СВЧ микроэлектроники, хемотроники. Мы сохранили преемственность, воспитываем молодые кадры, не хватает лишь проектов с предприятиями, чтобы наши студенты и аспиранты на конкурсной основе работали в реальных проектах и решали практические, «боевые» для них задачи и профессионально росли.

Лаборатории кафедры оснащены современным технологическим и аналитическим оборудованием микроскопии высокого разрешения мирового уровня от таких производителей, как «Carl Zeiss», «Shimadzu», «Bruker»:

№	Наименование оборудования	Функциональное назначение
1	Auriga CrossBeam, Carl Zeiss	Сканирующий электронный микроскоп
2	Libra 120, Carl Zeiss	Просвечивающий электронный микроскоп
3	Axio Imager.Z2m, Carl Zeiss	Прямой световой оптический микроскоп
4	Axio Observer Z1, Carl Zeiss	Инвертированный световой оптический микроскоп
5	Axio Lab A1, Carl Zeiss	Прямой световой оптический микроскоп
6	Shimadzu XRD-7000S	Рентгеновский дифрактометр
7	Bruker Innova	Сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения
8	UV-3600, Shimadzu	Спектрофотометр
9	EDX-800HS, Shimadzu	Рентген-флюоресцентный энергодисперсионный спектрометр.
10	FemtoScan	Зондовый микроскоп
11	NT-MDT	Зондовый микроскоп
12	Jem 1200X	просвечивающий электронный микроскоп
13	PGSTAT 302 N, Metrohm Autolab	Многофункциональная система потенциостат-гальваностат
14	Autosorb-iQ MP, Quantachrome	Анализатор площади поверхности
15	Q150T	Настольная вакуумная система напыления
16	PoliMat 2	Автоматическая установка для электролитической полировки и травления с отдельным электропитанием для полировки и травления
17	SimpliMet 3000	Пресс для горячей запрессовки образцов автоматический гидравлический, с электрогидравлическим действием и водяным охлаждением
18	Delta AbrasiMet	Лабораторный настольный отрезной станок
19	УЗДН2Т	Ультразвуковой диспергатор 22,44
20	Buehler Isomet 5000.	Прецизионный отрезной станок
21	LKB4	Ультрамикротом
22	Jeol	Вакуумная установка термического распыления металлами и углеродом

Наиболее широким и информативным методом в области исследований наноструктурированных материалов, бесспорно, являются просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения и сканирующая электронная микроскопия в комплексе с микронзондовым и дифракционным локальным анализом, позволяющих визуализировать наноструктуру объекта, идентифицировать наноразмерные фазы и определить структурные параметры отдельных наночастиц. Атомно-силовая микроскопия позволяет получать картины поверхности объектов с высоким разрешением деталей.

Просвечивающий электронный микроскоп Carl Zeiss «Libra-120» предназначен для исследований реальной атомарной структуры тонких сечений массивных объектов, порошкообразных, пленочных и других объектов, изучаемых в физике твердого тела, материаловедении, биологии (например, нанотрубки, фуллерены).

Изобретение Биннинга и Рорера в 1986 года сделало сегодня видимыми настоящие атомы. Исследования любой сложности в многих режимах в зависимости от типа образца: будь то металл, диэлектрик или полупроводник, а также электрическая модификация поверхности, обеспечиваются сканирующим зондовым микроскопом высокого разрешения Bruker «Innova».

Метод рентгеноструктурного анализа в применении к наноструктурированным материалам позволяет не только определять структурные параметры наночастиц и их содержание в объеме матрицы, но является наиболее эффективным методом определения их размеров. Термографический анализ в комплексе с электронной микроскопией и рентгеноструктурным анализом обеспечивает определение температурных интервалов устойчивости наноструктурных элементов.

Комплекс спектроскопических методов, таких как атомно-абсорбционная спектроскопия, оптическая спектроскопия, рентген-флюоресцентный анализ и газовая хроматография дают информацию об элементном и молекулярном составе объектов, а также о характере взаимодействия наночастиц с основной матрицей.

Используя универсальную рабочую станцию Auriga CrossBeam, которая работает как сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения (0,3 нм) и как технологическая станция (FIB колонна), было проведено поперечное травление сфокусированным ионным пучком участка транзистора. Благодаря уникальной технологии электронной колонны Gemini был проведен высокочувствительный фазовый контраст (Low Loss BSE) на внутрилинзовом детекторе обратно-рассеянных электронах. Это современная методика, разработанная одним из ведущих сотрудников компании Carl Zeiss позволяет нам различать даже слаболегированные участки на срезе транзистора.

Волновые свойства электрона проявляются в явлении одноэлектронного туннелирования. Это явление представляет, как один из прогрессивных путей создания новых типов электронных приборов, в которых контролируется перемещение определенного количества электронов. Поскольку времена туннельного перехода малы, теоретический предел быстродействия одноэлектронных приборов очень высок, а также энергопотребление одноэлектронных схем должно быть чрезвычайно низким. В результате они представляют большой интерес как один из прогрессивных путей создания новых типов микро- и нанoeлектронных приборов.

"NANOTECHNOLOGIES IN ELECTRONICS" DEPARTMENT

R.R. Faizullin, A.A. Maltsev, Z.R. Idiatullov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
Russian Federation, 420111, Kazan, K. Marx, 10

Annotation. The article gives a general description of the educational, pedagogical and science research activities of the Department of Nanotechnology in Electronics, traces the key points in the department development. The main directions of science research activity are marked. The most significant scientific research results are presented.

Keywords: microelectronics, radio engineering, nanotechnologies.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2022 г.