

Раздел IV. Информационные технологии

УДК 001.89: 539.2 (621.382.132)

Б.Г. Коноплев, О.А. Агеев

ЭЛИОННЫЕ И ЗОНДОВЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

В рамках реализации Федеральной адресной инвестиционной программы (мероприятия по развитию инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2007 г.) и в соответствии распоряжением Правительства РФ от 08.02.2007 г. №146-р, приказами Федерального агентства по образованию № 441 от 02.03.07 г. и № 1412 от 03.08.07 г. в Южном федеральном университете на базе Технологического института ЮФУ в г. Таганроге создан научно-образовательный центр по направлению "Нанотехнологии".

НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ обеспечивает органичное соединение научного, учебного и производственного процессов путем широкого вовлечения в его деятельность преподавателей и студентов, объединение научного потенциала кафедр для решения учебных, учебно-методических, технических и экономических задач, стоящих перед университетом, предприятиями Южного федерального округа, подготовку кадров высшей квалификации и студентов по индивидуальным планам.

Основными направлениями деятельности НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ являются:

- ◆ проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и иных работ по договорам и заказам;
- ◆ учебная и учебно-методическая деятельность;
- ◆ выполнение научно-методических разработок и издательская деятельность;
- ◆ целевая подготовка специалистов для народного хозяйства, подготовка кадров высшей квалификации;
- ◆ учебно-производственная деятельность по выполнению заказов и реализации изделий социально-бытового, культурного, хозяйственного и технического назначения;
- ◆ внедренческая деятельность по реализации наукоемкой продукции.

Направления научных работ НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ:

- ◆ наноматериалы;
- ◆ наноэлектроника;
- ◆ наносистемная техника;
- ◆ производственные нанотехнологии;
- ◆ биомедицинские нанотехнологии;
- ◆ нанодиагностика;
- ◆ нанохимия;
- ◆ нанопфизика.

Структура НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ включает в себя два специализированных чистых помещения – класса 5 ИСО (общая площадь 100 м²) и 7/5 ИСО (общая площадь 400 м²), а также лаборатории:

- ◆ лаборатория кластерных технологий (чистое помещение класса 5 ИСО);
- ◆ лаборатория эллионных нанотехнологий;
- ◆ лаборатория зондовых нанотехнологий;
- ◆ лаборатория наноматериалов;
- ◆ технологическая гермозона для формирования структур микро- и наномеханики (чистое помещение класса 7/5 ИСО);
- ◆ лаборатория микро- и наносистем;
- ◆ лаборатория моделирования нанотехнологий и САПР;
- ◆ лаборатория оптоэлектроники и нанооптики.

Тематика основных научно-исследовательских проектов, выполняемых в настоящее время:

- ◆ разработка функционально-интегрированных элементов сверхбольших интегральных схем на основе туннельно-связанных квантовых областей;
- ◆ разработка нетермически активируемых технологических процессов создания элементной базы нанoeлектроники;
- ◆ разработка и исследование элементной базы, методов и средств проектирования микро- и наносистем на кристалле.

В настоящее время проводятся работы с предприятиями и ведомствами: «Курчатовский институт», институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, ЗАО “Нанотехнологии МДТ” (г. Москва), “Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи”, Южный научный центр РАН, «ООО завод Кристалл» (г. Таганрог) и др.

На базе НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ создается центр подготовки и переподготовки специалистов Южного федерального округа, ориентированных на инновационную деятельность в области нанотехнологий.

Все оборудование осваивается сотрудниками Центра, широко используется при выполнении НИОКР и в учебном процессе студентов, магистрантов и аспирантов. Для школьников Таганрога проводятся ознакомительные занятия по основам нанотехнологии.

На факультете электроники и приборостроения Технологического института ЮФУ с 2003 г. ведется подготовка инженеров по специальности “Нанотехнология в электронике”, а также бакалавров и магистров по направлению “Нанотехнология”. В 2008 г. состоялся первый выпуск специалистов.

Результаты научных исследований являются основой для подготовки и защиты докторских и кандидатских диссертаций. Осуществляется подготовка кандидатов и докторов наук по специальностям:

- ◆ 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах по техническим наукам;
- ◆ 05.11.17 – приборы, системы и изделия медицинского назначения по техническим наукам;
- ◆ 01.04.06 – акустика по техническим наукам.

Оборудование, которым оснащен НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ, позволяет проводить исследования и разработки, соответствующие современным тенденциям развития нанотехнологии [1 - 3].

В состав оборудования НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ входит многофункциональный сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс НАНОФАБ НТК-9 (разработка ЗАО "Нанотехнология МДТ" (г. Зеленоград)) (рис. 1), который представляет собой нанотехнологический комплекс с расширенными аналитическими возможностями, состоящий из сверхвысоковакуумных аналитических и технологических модулей, которые объединены сверхвысоковакуумной транспортной системой в координатно-связанную технологическую линию для решения задач разработки, контроля и мелкосерийного производства изделий методами нанотехнологии.



Рис. 1. Многофункциональный сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс НАНОФАБ НТК-9

В технологических процессах, реализованных в НАНОФАБ, используется широкий спектр методов активного физического воздействия для изготовления наноразмерных структур и синтеза новых перспективных материалов: ионно-лучевое воздействие, плазменное воздействие, лазерное воздействие, СЗМ-литография и др.

Нанотехнологический комплекс НАНОФАБ НТК-9 оснащен модулями, которые обеспечивают комплексное решение поставленных задач и получения новых знаний в области нанотехнологий и перспективных материалов:

- ◆ модуль сверхвысоковакуумного сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) в котором реализован широкий диапазон аналитических методик сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии, с возможностями литографа, ассемблера нанокластеров, наноманипулятора;
- ◆ модуль со сверхвысоковакуумной сканирующей ионной системой с возможностью фокусировки пучка ионов галлия до 10 нм, для анализа и формирования структур методами травления фокусированным пучком ионов, и анализа в режиме ионно-электронного микроскопа;
- ◆ модуль с высококовакуумной сканирующей ионной системой с возможностью фокусировки пучка ионов галлия до 10 нм для локального формиро-

вания структур методами ионного травления и деструкции элементоорганических соединений под действием фокусированного пучка ионов (локальный CVD-процесс);

- ◆ модуль со сверхвысоковакуумной сканирующей ионной системой с возможностью масс-сепарации и фокусировки пучка ионов до 10 нм для локальной ионной имплантации;
- ◆ сверхвысоковакуумный модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs и твердых растворов на его основе;
- ◆ специализированный модуль иницированного плазмой газофазного осаждения, для выращивания углеродных нанотрубок (CVD-модуль).
- ◆ модуль нанесения сегнето- и пьезоэлектрических пленок методом импульсного лазерного осаждения;
- ◆ модуль отжига образцов;
- ◆ модули загрузки и транспортировки образцов.

Для проведения структурно-аналитических исследований физико-химических процессов и методов активного физического воздействия для изготовления наноразмерных структур и синтеза новых перспективных материалов нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 оснащен:

- ◆ модулем СЗМ, в котором реализован широкий диапазон аналитических методик сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии;
- ◆ вторично-ионным масс-спектрометром и растровым электронным микроскопом в модуле травления фокусированным ионным пучком;
- ◆ дифрактометром быстрых электронов в модулях молекулярно-лучевой эпитаксии и импульсного лазерного осаждения;
- ◆ пирометром в модуле молекулярно-лучевой эпитаксии.

Уникальность нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 состоит в том, что он характеризуется наиболее полной комплектацией и объединяет большинство перспективных групповых и индивидуальных методов активного физического воздействия, применяемых в нанотехнологии [1 - 3].

К аналитико-технологическому оборудованию, которое имеется в НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ относится растровый электронно-ионный микроскоп с системой электронной литографии Nova NanoLab 600 (FEI Company, Netherland) (рис. 2). РЭМ Nova NanoLab 600 предназначен для исследования внутреннего строения объектов на микро- и наноуровнях, создания трехмерных изображений образцов. Отличительной особенностью комплекса является совместное использование фокусированных электронного и ионного пучков. Это позволяет совмещать операции модификации подложек ионным пучком с выполнением анализа и контроля технологического процесса электронным лучом. В состав Nova 600 входят: электронно-лучевая колонна, оснащенная катодом с полевой эмиссией, ускоряющее напряжение от 200 В до 30 кВ, разрешение 1,1 нм при 15 кВ; ионная колонна Magnum с галлиевым жидкометаллическим источником ионов, ускоряющее напряжение от 5 кВ до 30 кВ, разрешение 7 нм; 4-х канальная газовая инжекционная система; система энергодисперсного рентгеновского микроанализа EDAX GENESIS 6000i; система электронно-лучевой литографии Raith ELPHY 6 MHz. Система оснащена 5-и осевым программно-управляемым моторизованным предметным столиком (150×150×10 мм), позиционирующим образец с высокой точностью.



Рис. 2. Электронно-ионный сканирующий микроскоп Nova NanoLab 600

НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ оснащен комплектом оборудования для формирования структур микро- и наномеханики, структурных исследований и контрольно-измерительного оборудования для исследования электрофизических параметров, установленного в технологической гермозоне – чистом помещении класса 7/5 ИСО, общей площадью 400 м². В состав этого комплекта входит различное оборудование отечественного и зарубежного производства:

- ◆ установка плазмохимического осаждения в индуктивно-связанной плазме STE ICPd 47;
- ◆ установка плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме STE ICPe 45;
- ◆ установка плазмохимического осаждения poly-Si OXFORD Plasma Lab 80 plus LPCVD;
- ◆ установка плазмохимического травления в кислородной плазме YES-CV200RFS;
- ◆ установка электронно-лучевого и магнетронного напыления AUTO500;
- ◆ установка термического отжига STE ThA 49 LC;
- ◆ установка совмещения и экспонирования MJB4;
- ◆ центрифуги для нанесения резистов и сушки WS-400E-NPP, WS-400E-6NPP;
- ◆ плитки для сушки резистов и образцов HP-401-250, HP-160-250;
- ◆ шкаф химический для химико-динамического травления VLF Wet Processing Station;
- ◆ печь диффузионная СДОМ-3_100-М;
- ◆ установка для измерения ЭДС Холла Escoria HMS-3000/1T;
- ◆ зонд для полужолирующих подложек LEI 2017B;
- ◆ установка бесконтактного измерения удельного сопротивления LEI 1510m40;
- ◆ измерительный комплекс Keithley 4200-SCS;
- ◆ зондовая станция ЭМ6070А;
- ◆ микроскоп интерференционный МИИ-4М;

- ♦ оптические микроскопы различного назначений.

Кроме того, в НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ имеется так же комплект оборудования для исследований зондовыми методами (производитель – ЗАО “Нанотехнология-МДТ”, г. Зеленоград):

- ♦ сканирующая зондовая нанолaborатория Ntegra Vita;
- ♦ сканирующий зондовый микроскоп Solver P47Pro;
- ♦ учебные сканирующие зондовые микроскопы NanoEducator.

Имеющееся оборудование позволяет создавать элементы микро- и наномеханических систем методом ионно-лучевого травления [1, 3].

В частности, были проведены исследования по созданию топологии элементов шаблонов для LIGA-технологии. В качестве образца для экспериментальных исследований использовалась пленка золота на кремнии толщиной 500 нм. Травление по заданному шаблону производилось в течение 3 мин при токе ионного пучка порядка (1-2) нА. В процессе ионно-лучевого травления осуществлялась визуализация структуры с помощью растрового электронного микроскопа.

На рис. 3 представлены результаты формирования и исследования тестовых элементов шаблонов для LIGA-технологии методами растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Кроме того, в ходе исследований были сформированы массивы упорядоченных наноразмерных структур с высоким аспектным соотношением – автоэлектронных эмиттеров мембранные балки и макеты чувствительных элементов датчиков кантилеверного типа (рис. 4).

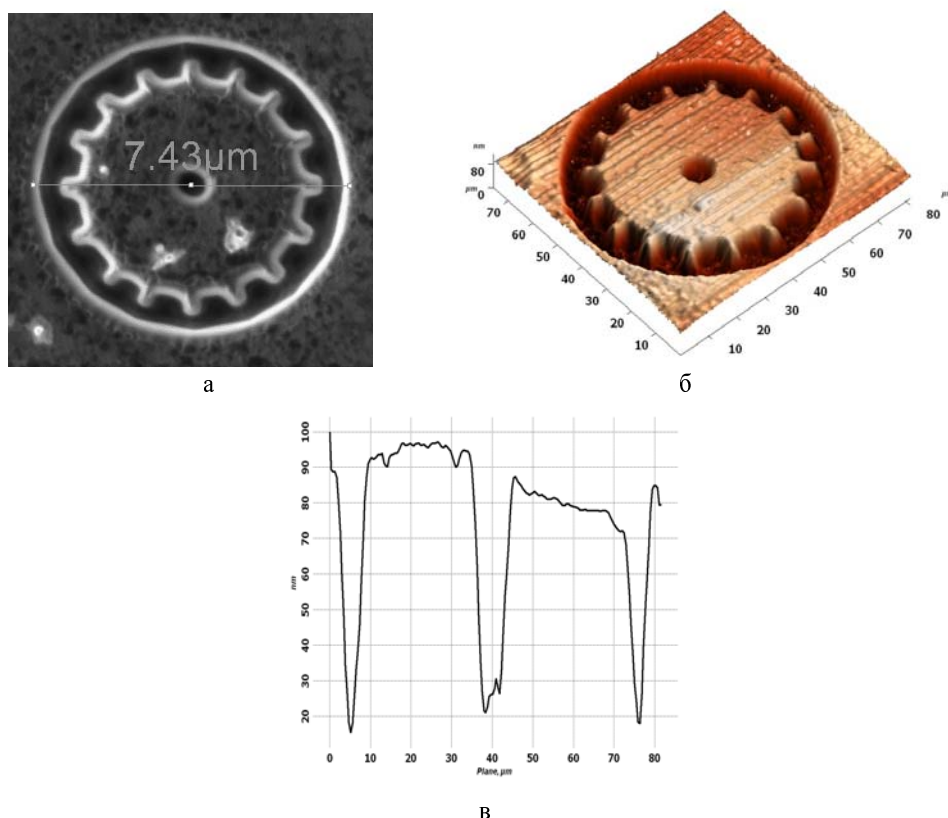


Рис. 3. Тестовые элементы шаблонов для LIGA-технологии:
а – РЭМ-изображение; б – АСМ-изображение; в – профиль структуры

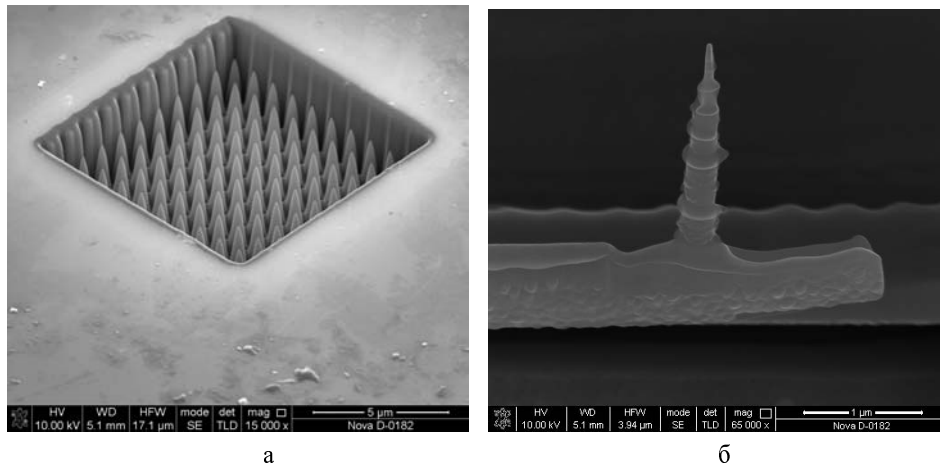


Рис. 4. Массив эмиссионных наноразмерных структур (а) и макет чувствительного элемента датчика кантилеверного типа (б) сформированные ионно-лучевым травлением

Применение фокусированных ионных пучков дает возможность производить прецизионное ионно-лучевое травление ИМС и локальное осаждение материалов при подаче в зону воздействия пучка газа, являющегося носителем осаждаемого материала. Изучение внутренней структуры микросхем осуществляется построением серии срезов ионным пучком с последующим контролем плоскости среза в растровом электронном микроскопе (рис. 5,а). Использование специализированных программных сред дает возможность восстанавливать трехмерную структуру слоев ИМС.

Метод ФИП может применяться для ретуши топологии ИМС. Например, возможно разрезание металлических проводников для устранения закороток и паразитных связей, осаждение проводящих дорожек для восстановления поврежденных проводящих шин на поверхности ИМС [3].

Одной из возможностей метода фокусированных ионных пучков является создание кросс-секций (рис. 5,б), что может быть использовано для пробоподготовки для метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Для формирования структур элементов нанoeлектроники могут также использоваться прецизионные методы зондовой нанолитографии. В лаборатории зондовой нанотехнологии НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ проводятся исследования стимулированных процессов зондовой нанолитографии и разработка технологии формирования элементов нанoeлектроники метами локального анодного окисления [1, 4, 5].

Исследования нанолитографии проводилось на поверхности пленки титана с помощью зондовой нанолaborатории (ЗНЛ) Ntegra Vita методом локального анодного окисления тонких пленок титана на кремниевой подложке. Влажность в технологической камере контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R с точностью $\pm 1\%$. Нанолитография выполнялась векторным методом в динамическом режиме АСМ, с применением пакета прикладных программ Nova RC1 (1.0.26.1238). Исследование влияния длительности импульсов напряжения на геометрические параметры формируемых оксидных наноразмерных структур проводилось с использованием кремниевых кантилеверов

с проводящим W2C покрытием, путем подачи импульсов напряжения амплитудой 10 В с длительностью от 10 до 1000 мс при трех значениях относительной влажности (50, 70 и 90%), как при стимуляции УФ- и ИК-излучением, так и без нее. Ток цепи обратной связи системы управления СЗМ (параметр SetPoint) составлял 0,5 нА, скорость сканирования – 1,5 мкм/с. Полученное АСМ-изображение оксидных наноразмерных структур представлено на рис. 6.

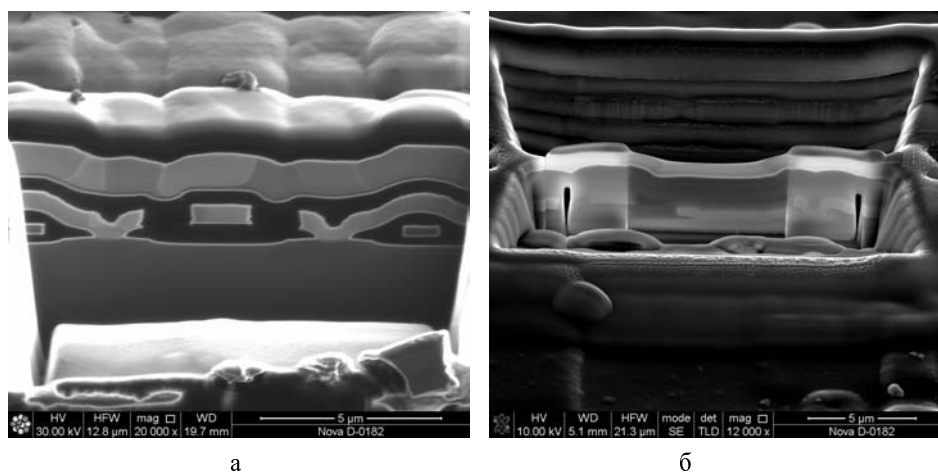


Рис. 5. РЭМ-изображения сечения (а) и кросс-секции участка (б) интегральной микросхемы полученных методом фокусированных ионных пучков

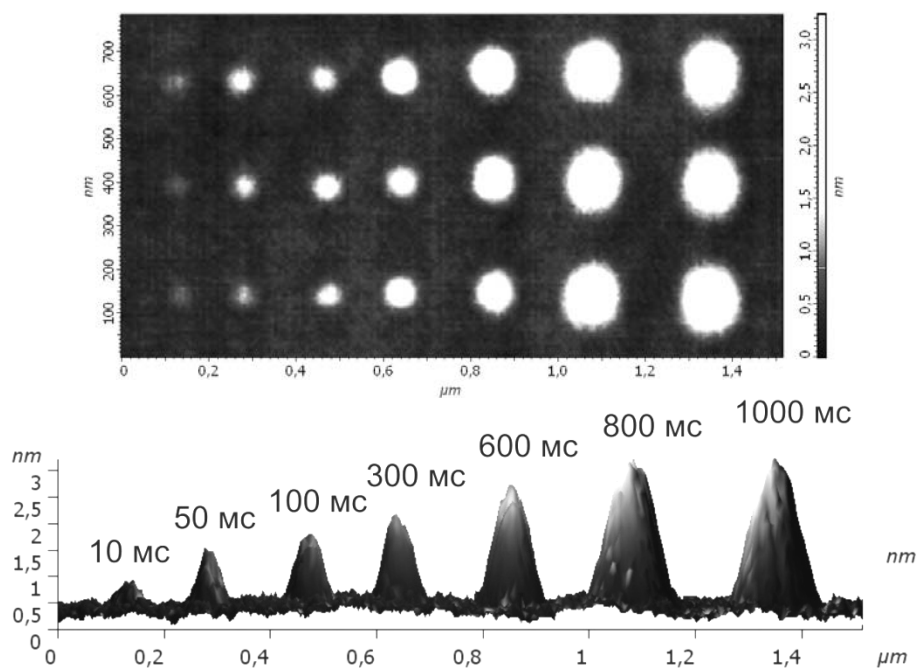


Рис. 6. АСМ-изображение ОНС титана, сформированных методом ЛАО при различной длительности импульсов напряжения

Создание элементов металлической наноэлектроники основано на формировании квазиодномерных каналов проводимости в тонких металлических пленках. При поперечных размерах таких каналов порядка 10 нм в них наблюдаются поперечное квантование энергии электронов и квантовые свойства проводимости при комнатной температуре [4, 5].

Для проверки полученных выводов и исследования влияния стимуляции фотонным излучением на процессы нанолитографии проводилось формирование наноразмерных каналов методом ЛАО. Растровая нанолитография, по шаблону в виде трех пар линий с одинаковым расстоянием между ними, проводилась на пленке титана при облучении области окисления источниками УФ- и ИК-излучения. В результате ЛАО формировались линии из оксида титана. Анализ показывает, что при УФ-стимуляции между оксидными линиями формировался канал из титана с поперечными размерами порядка 11 нм, однородный по всей длине (рис. 7,а). В случае отсутствия фотонной стимуляции, и при облучении ИК-излучением оксидные линии сращивались, и канал не формировался (рис. 7,б). Анализ литературных данных показал, что такие структуры могут быть сформированы как в системах металл-окисел-полупроводник, так и в полупроводниковых гетероструктурах, содержащих слой двумерного электронного газа [1, 4, 5].

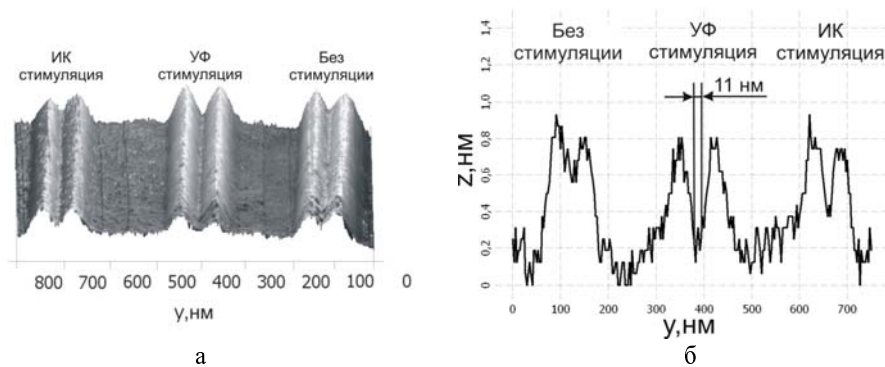


Рис. 7. АСМ-изображение поверхности пленки титана:
а – после проведения ЛАО; б – профилограмма

Структуры на основе каналов проводимости, будучи планарными, более технологичны для соединения элементов при конструировании схем наноэлектроники. Основным достоинством такой структуры является то, что операция литографии осуществляется за один шаг.

На рис. 8 показано АСМ-изображение структуры на основе двух наноразмерных каналов проводимости с поперечными размерами порядка 10 нм, сформированной в пленке титана методом локального анодного окисления. Такая структура может выполнять функцию логического вентиля.

Для исследования электрических характеристик разработанных макетов элементов наноэлектроники необходимо использовать шаблон тестовой структуры. Внешние контактные площадки, с использованием дорожек металлизации, связаны с центральной модифицируемой областью, в основе которой лежит анодоксиляемый материал. Ширина дорожек определяется минимальным размером операции фотолитографии.

В результате проведенных исследований разработаны и экспериментально реализованы макетные наноразмерные структуры диода, диодного моста и логического вентиля на основе наноразмерных каналов проводимости в пленке титана с

помощью нанолитографии методом ЛАО. Полученные результаты могут быть использованы при разработке элементной базы нанoeлектроники.

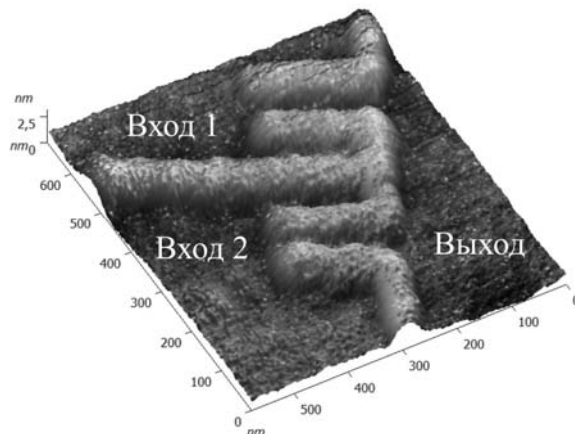


Рис. 8. АСМ-изображение макета структуры логического вентиля, сформированного в пленке титана методом ЛАО

Для формирования и анализа электрических параметров полученных структур элементов нанoeлектроники наиболее эффективно использование многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9, который позволяет проводить комплексные исследования физико-химических процессов, происходящих при формировании наноразмерных структур, контролировать параметры технологических процессов, а также определять параметры изготовленных приборных структур в условиях сверхвысокого вакуума.

Проведены экспериментальные исследования физико-химических процессов и технологических режимов формирования наноразмерных структур с использованием сфокусированных ионных пучков, которые показали, что метод ФИП является перспективным при изготовлении элементов микро- и наносистемной техники.

Установлено, что при анализе структуры СБИС применение оборудования НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ позволяет использовать функциональные возможности систем со сфокусированным ионным пучком, сканирующей электронной микроскопии и просвечивающей растровой электронной микроскопии. Экспериментально выявлена топологическая структура микросхемы, а также проведено препарирование и исследована внутренняя структура ИМС. Отработана методика травления структур по растровым шаблонам и методика создания кросс-секций.

Исследования процессов фотонностимулированной зондовой нанолитографии показали, что метод может быть эффективно использован для изготовления элементов нанoeлектроники, при этом фотонное излучение оказывает дополнительное внешнее воздействие на кинетику процесса ЛАО, что может быть использовано для управления параметрами формируемых оксидных наноразмерных структур и модификации их свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мальцев П.П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сборник статей. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.

3. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
4. Асеев А.Л. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 368 с.
5. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.

УДК 681.324

Л.К. Бабенко, О.Б. Макаревич

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ В ЮЖНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ И ИХ
РЕАЛИЗАЦИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ**

Как определено Концепцией защиты информации в Южном федеральном округе (ЮФО) одной из основных задач развития системы защиты информации является формирование и совершенствование структуры системы защиты в федеральном округе, развитие ее научно-технического и кадрового потенциала. Южный федеральный университет (ЮФУ), будучи одним из ведущих вузов страны, активно участвует во внедрении концепции в Южном федеральном округе.

По проблемам информационной безопасности (ИБ) в ЮФУ в настоящее время реализованы следующие структуры (рис. 1).

Южно-российский региональный центр по проблемам информационной безопасности в системе высшей школы	Факультет информационной безопасности в ТТИ ЮФУ, г. Таганрог
Лаборатория фундаментальных исследований проблем ИБ ИИРПУ КБНЦ РАН, г. Таганрог	Отдел защиты информации в НИИ физики ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Рис. 1. Структура подразделений по проблемам ИБ в ЮФУ

Основные работы по направлению «Информационная информация» проводятся в Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге (бывшем Таганрогском радиотехническом университете) рис. 2.

Работы по ИБ в ЮФУ ведутся в следующих направлениях:

- ◆ подготовка, повышение квалификации и переподготовка кадров;
- ◆ проведение исследований и разработок, направленных на внедрение в сфере науки и производства безопасных информационных технологий;
- ◆ аттестация и лицензирование технических средств защиты информации.