

УДК [539.23:537.533.35]:[001.891:378-052.63]

В. П. Быкова, А. В. Ревина, С. Н. Головчун, С. И. Кузьмин

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ

Для интенсификации производственных процессов в современных условиях необходима тесная связь с разработкой и внедрением нанотехнологий, к которым можно, в частности, отнести создание материалов нового поколения, основные характеристики которых определяются свойствами поверхностей раздела «образец – среда». Известно, что структура поверхности образца закладывается на этапе формирования монокристалла, на атомарном уровне. Таким образом, изучение наноструктуры поверхности образца может привести к открытию и дальнейшему практическому использованию ранее неизвестных свойств материалов. К одним из наиболее распространенных методов изучения нанорельефов поверхностей исследуемых образцов относятся методы сканирующей зондовой микроскопии. Согласно федеральным государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования предлагается уделить большое внимание самостоятельной работе студентов, одним из результативных способов организации которой является экспериментально-исследовательская работа. Рассмотрена возможность организации исследовательской работы студентов в рамках изучения курса общей физики (для направлений «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения») на основе учебного нанотехнологического комплекса Nano Educator, базовым элементом которого является сканирующий зондовый микроскоп.

Ключевые слова: нанотехнология, сканирующая зондовая микроскопия, исследовательская работа студентов.

Введение

Развитие нанотехнологии в настоящее время охватывает широкий круг как фундаментальных, так и прикладных исследований. Технологические процессы в микротехнике, твердотельной электронике, микросистемной технике, биотехнике, энергетике и других областях современной прикладной физики вышли на наноуровень. Нанотехнологический подход определяет перспективность направлений науки и техники и конкурентоспособность наукоемких отраслей промышленности.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития образования в Российской Федерации является внедрение в процесс обучения в высших учебных заведениях таких принципов и методов обучения, которые способствуют формированию у студентов знаний, необходимых для практического применения их в условиях модернизации промышленных предприятий. Именно нанотехнологический подход накладывает отпечаток на принципы обучения студентов в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) Российской Федерации. В основной образовательной программе (ООП) бакалавриата соблюдены требования к уровню освоения содержания дисциплин: обозначены компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины; обозначены основные знания, умения и навыки, которые студент получает в результате изучения дисциплины, в том числе при выполнении исследовательской работы, виды и способы организации которой представляются интересными для рассмотрения.

В 2012 г. нами были разработаны рабочие программы по физике для конкретных направлений и профилей подготовки, в соответствии с Типовым положением о вузе. Согласно требованиям ФГОС ВПО, в них предусматривалась реализация компетентного подхода в обучении студентов через широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий, удельный вес которых составлял 25 % аудиторных занятий, что являлось достаточно хорошим показателем, соответствующим требованиям ФГОС ВПО (с учетом специфики ООП). Так, в разработанной нами программе для дисциплины «Физика» (направление – «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», квалификация – бакалавр, профиль – «Холодильная техника и технологии») для дополнительных глав «Нанотехнология» на самостоятельную работу выделялось 112 ч., а в программе для направления «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» – 327 ч.

Для реализации самостоятельной работы студентов (СРС) в программе предусматривались различные виды работ: рефераты, презентации, тренинги, направленные на отработку навыков работы с техническими средствами и устройствами, тренинг-занятия, направленные на отработку умений и навыков при выполнении специальных обучающих программ и решении задач. При составлении рабочих программ нового поколения по дисциплине «Физика» можно вынести на СРС экспериментально-исследовательскую работу студентов, в частности, с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ).

В современной научной литературе содержится достаточно много информации о СЗМ и принципах работы различных его модификаций для исследования образцов. Разработаны курсы лекций по нанотехнологиям, но исследовательского лабораторного практикума по физике для самостоятельной работы студентов направлений «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» с использованием СЗМ нет. Таким образом, наличие теоретического и исследовательского материала по данной теме и возможность применения его в самостоятельной экспериментально-исследовательской работе по физике студентами определили актуальность темы.

Наноматериалы и сканирующая зондовая микроскопия

Анализируя работы различных авторов по данной проблематике [1, 2], можно прийти к выводу, что главной целью физики нанотехнологий и наноматериалов является создание новых материалов, которые обладают новыми свойствами, определяемыми наноструктурой. Нанотехнология, таким образом, представляет собой комплекс процессов, позволяющих создавать функциональные элементы, применяемые в материалах, устройствах и схемах нанометровых размеров (уровень отдельных молекул и атомов).

Наноматериалы – материалы, созданные с использованием наночастиц и посредством нанотехнологий, обладающие какими-либо уникальными свойствами, обусловленными присутствием этих частиц в материале. Наноматериалы получают либо «сборкой из атомов», либо диспергированием макроскопических материалов. Выделяют следующие типы наноматериалов: наночастицы, нанотрубки и нановолокна, коллоиды, наноструктурированные поверхности или пленки, нанокристаллы. Свойства наноматериалов, как правило, отличаются от аналогичных материалов в массивном состоянии. Например, у наноматериалов можно наблюдать изменение магнитных, тепло- и электропроводных свойств, изменение температуры плавления в сторону ее уменьшения. Для наноматериалов актуальна проблема их хранения и транспортировки, т. к. они очень активны и легко взаимодействуют с окружающей средой. Применение наноматериалов пока не очень широко развито, поскольку подробное их изучение только началось и идет накопление знаний об этих материалах. Среди новейших достижений можно выделить следующие наноматериалы: нанокристаллы, аэрогель, наноаккумуляторы, самоочищающаяся поверхность на основе элемента лотоса, ультралегкая металлическая микрорешетка, углеродные нанотрубки, фуллерены, графен [2].

Нанокристалл – отдельный однородный кристалл, имеющий непрерывную кристаллическую решетку и характеризующийся анизотропией свойств. Идеальный нанокристалл – это трехмерная частица совершенной структуры, являющаяся теоретической моделью, широко используемой в теории твердого тела. Реальный нанокристалл всегда содержит различные неровности на гранях и пониженную симметрию вследствие воздействия окружающей среды. Изделия и элементы, изготовленные из нанокристаллов, применяются в качестве различных преобразователей в радиоэлектронике, квантовой электронике, акустике, вычислительной технике.

Аэрогели – класс материалов, представляющих собой гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной. Такие материалы обладают рекордно низкой плотностью и демонстрируют ряд уникальных свойств: твердость, прозрачность, жаропрочность, чрезвычайно низкую теплопроводность и т. д. Аэрогель знаменит, прежде всего, использованием в качестве материала для ловушек космической пыли, а также газовых и жидкостных фильтров.

Наноаккумуляторы (литиево-ионные аккумуляторы) в настоящее время являются самыми популярными по сравнению с многочисленными представителями перезаряжаемых источников электрической энергии. Преимущества литиево-ионного аккумулятора: более высокая удельная плотность запасенной энергии, низкий саморазряд, простота обслуживания, длительная эксплуатация.

Самоочищающаяся поверхность на основе элемента лотоса – это покрытие ткани сначала специальным связующим полимером, затем наночастицами серебра, которые обладают противомикробным действием. Далее на поверхности наночастиц выращивают еще один полимерный гидрофобный слой, который отталкивает капли воды, заставляя их собирать грязь (принцип действия позаимствован у природы: листья лотоса обладают свойством «самостоятельного очищения»). Такую ткань можно использовать при создании медицинской и спортивной одежды.

Ультралегкая металлическая *микрорешетка* состоит из полых никель-фосфористых трубок. Эти трубки, соединенные в узлах, формируют повторяющуюся решетчатую трехмерную структуру.

Нанотрубки – одно из самых выдающихся открытий современной науки. Они в 50 тыс. раз тоньше человеческого волоса, в 1 000 раз прочнее стали и намного легче пластика. Химическая стабильность, механическая прочность и меняющаяся электропроводность нанотрубок определяют широкий спектр их практического применения в материаловедении, электронике.

Фуллерены – молекулярные соединения атомов углерода, расположенных в вершинах правильных пяти- и шестиугольников, из которых составлена поверхность сферы или эллипсоида (алмаз, карбид, графит и др.).

Графен является двумерным кристаллом, состоящим из одиночного слоя атомов углерода, собранных в гексагональную решетку. Его теоретическое исследование началось задолго до получения реальных образцов материала, поскольку из графена можно собрать трехмерный кристалл графита. Графит является полуметаллом. Кусочки графена можно получить при механическом воздействии на высокоориентированный пиролитический графит. Графен уникальный материал, обладающий широким спектром применения. Например, им можно очистить подземные воды при добыче нефти и газа.

Инструменты исследования

Получение нанозементав на основе отдельных молекул или атомов традиционными методами невозможно [3, 4]. Поэтому для создания элементов с нанометровыми размерами используются как специальные методики, так и специально созданные устройства [5, 6]. К ним относится изобретенный в 1981 г. Г. Биннигом и Х. Рорером (Цюрих, Швейцария) сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), физические принципы работы которого основываются на преодолении потенциального барьера в результате туннельного эффекта (квантово-механический эффект). Создание СТМ позволило открыть новое направление неразрушающего контроля проводников с разрешением около 0,01 нм. Создание в 1982 г. Г. Биннигом, К. Гербером и К. Куэйтом модификации СТМ – атомного силового микроскопа (АСМ) – предоставило возможность изучать рельеф как проводников, так и диэлектриков [7].

С изобретением сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) появилась возможность модификации исследуемой поверхности объекта. В изучаемой локальной области контактирования зонда с исследуемым объектом могут наблюдаться сравнительно большие значения напряженности электрического поля и вектора плотности электрических токов. Все это (совместно или по отдельности) может привести к локальной модификации зонда и исследуемой поверхности. Другими словами, можно говорить о переводе СЗМ из режима измерения в режим литографии при повышении степени взаимодействия между зондом и объектом исследования. Литографический режим позволяет исследовать поверхность объекта наноструктур, что является конечной целью зондовой нанотехнологии.

Уже сконструированы дискретные нанозлектронные приборы, представляющие собой отдельные функциональные элементы: одноэлектронный транзистор, МОМ диод, устройства памяти со сверхплотной записью информации. Их создание ведет к осуществлению идеи молекулярной электроники об использовании отдельных молекул в качестве элементарной базы. В межэлектродном зазоре в результате сильных электрических полей становится ощутима поляризация молекул диэлектрика, а также возможна геометрическая изомерия. Взаимодействие диполей примесей и молекул приводит к возникновению проводящих молекулярных проводников из адсорбата электродов.

В современной научной литературе описано много различных конструкций АСМ и СТМ [5–7]. Для эффективной работы микроскопа измерительная головка СТМ должна удовлетворять целому ряду требований, наиболее важным из которых является требование высокой помехоза-

щищенности. Это обусловлено высокой чувствительностью туннельного промежутка к внешним вибрациям, перепадам температуры, электрическим и акустическим помехам. Выбор той или иной системы виброизоляции диктуется в основном целесообразностью и удобством использования. Кроме того, СТМ или АСМ-игла способна оказывать механическое воздействие непосредственно на подложку. Это может привести к необратимой механической деформации вследствие превышения порога чувствительности в результате царапания или постукивания зонда о поверхность образца.

Другая, не менее важная группа требований – требования к дизайну СТМ, связанные с условиями применения микроскопа и определяемые задачами конкретного эксперимента. В СЗМ наиболее уязвимой частью являются специальным образом подготовленные зонды в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры около десяти нанометров. Расстояние между зондом и поверхностью образца в зондовых микроскопах составляет 0,1–10 нм.

Основываясь на классификации локального взаимодействия СЗМ зонда с поверхностью образца, следует рассмотреть следующие виды зондовой литографии: СТМ литография, АСМ анодно-окислительная литография, АСМ силовая литография, электростатическая зарядовая литография, литография с помощью зонда ближнепольного оптического микроскопа.

Различают два вида воздействия зонда на поверхность исследуемого образца: наногравировка (статическое воздействие) и наночеканка (динамическое воздействие) [6].

Гравировка – процесс формирования рисунка на поверхности предмета. Используя методы СЗМ, можно осуществить *наногравировку* с разрешением порядка нескольких ангстрем. Наногравировка предполагает использование методов контактной силовой микроскопии, в основе которых лежит перемещение зонда по поверхности объекта с достаточно большим прижимом. Условием проведения наногравировки (вид литографии) является превышение твердости материала, из которого изготовлен зонд, над твердостью материала образца. Шероховатость образца допустима, но не более нескольких нанометров. В качестве опытных материалов хорошие результаты показывают такие полимеры, как поликарбонат и полиэтилен. Несомненным преимуществом такой литографии является сравнительная простота проведения эксперимента, а также его дешевизна. К недостаткам этого типа литографии можно отнести получающиеся в результате проведения сеанса краевые неоднородности рисунка, а также быстрое физическое разрушение зонда.

В результате *наночеканки* изменение поверхности происходит благодаря прерывисто-контактному методу сканирования колеблющимся зондом. В отличие от наногравировки наночеканка дает возможность получения рисунка без торсионных искажений. Кроме того, методика «кратковременного укалывания» позволяет продлить время эксплуатации зонда.

Наночеканка-динамическая литография осуществляется при помощи векторного или растрового сканирования. Преимуществом векторного сканирования, которое осуществляется по заранее заданному рисунку, является достаточно высокая скорость. К недостаткам данного вида литографии можно отнести невозможность варьирования силы воздействия зонда на поверхность образца. Отличие растрового сканирования от векторного заключается в сравнительно медленной скорости процесса сканирования, т. к. ее проведение осуществляется по всей площади исследуемой подложки, на которую наносится рисунок. Кроме того, растровая литография не исключает варианта осуществления воздействия на подложку, различного по своей силе.

Работа на СЗМ Nano Educator. Среди экспериментальных методов, развитие которых стимулирует прогресс в нанотехнологиях, методы сканирующей зондовой микроскопии наиболее информативны. Одним из базовых СЗМ является российский прибор Nano Educator [5].

В основе работы СЗМ Nano Educator лежит использование зависимости величины взаимодействия между зондом в виде острой вольфрамовой иглы и поверхностью исследуемого образца от величины расстояния «зонд – образец». Детектируя туннельный ток, протекающий при постоянном электрическом смещении между зондом и образцом, можно исследовать только проводящие объекты, но если детектировать силу взаимодействия «зонд – поверхность», можно исследовать как проводящие, так и диэлектрические образцы.

Рассмотрим общие черты, присущие различным зондовым микроскопам. Пусть взаимодействие зонда с поверхностью характеризуется некоторым параметром P . Если существует достаточно резкая и взаимно однозначная зависимость параметра P от расстояния «зонд-образец» $P = P(z)$, то данный параметр может быть использован для организации обратной связи (ОС), контролирующей

расстояние между зондом и образцом. Система ОС поддерживает значение параметра P постоянным, равным величине P_0 , задаваемой оператором. Если расстояние «зонд – поверхность» изменяется (например, увеличивается), то происходит изменение (увеличение) параметра P . В системе ОС формируется разностный сигнал, пропорциональный величине $(P - P_0)$, он усиливается до необходимой величины и подается на исполнительный элемент (ИЭ), который обрабатывает данный разностный сигнал, приближая зонд к поверхности или отодвигая его до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. Таким образом, можно поддерживать расстояние «образец – зонд» с высокой точностью. В существующих зондовых микроскопах точность удержания расстояния «зонд – поверхность» достигает величины $\sim 0,01 \text{ \AA}$. При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия P , обусловленное рельефом поверхности. Система ОС обрабатывает эти изменения так, что при перемещении зонда в плоскости X, Y сигнал на ИЭ оказывается пропорциональным рельефу поверхности.

Для получения СЗМ-изображения осуществляют сканирование образца, организованное специальным образом. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на ИЭ, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку, переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом сигнал ОС обрабатывается компьютером, и СЗМ-изображение рельефа поверхности $z = f(x, y)$ строится с помощью компьютерной графики.

Таким образом, исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств с помощью сканирующей зондовой микроскопии является кропотливым научно-познавательным процессом, который вполне по силам и молодым исследователям.

С помощью СЗМ Nano Educator студентами была проделана исследовательская работа «Получение первого СЗМ-изображения». В результате работы получено СЗМ-изображение в режиме атомно-силовой микроскопии, которая включает следующие этапы:

- 1) установка образца (рис. 1);
- 2) установка зонда (зондового датчика);
- 3) позиционирование зонда относительно образца (выбор места сканирования);
- 4) первоначальный подвод зонда к образцу, быстрое сближение;
- 5) поиск резонанса и установление рабочей частоты.

Выбор параметров скана (критерии выбора скана, число точек на линии и линий в скане), а также скорость сканирования, параметры обратной связи выбирались нами самостоятельно. Информация, полученная с помощью СЗМ, сохранялась в виде СЗМ-кадра – двумерного массива целых чисел (матрицы). Визуализация СЗМ-кадров производилась средствами компьютерной графики, в виде двумерных яркостных (2D) и трехмерных (3D) изображений.

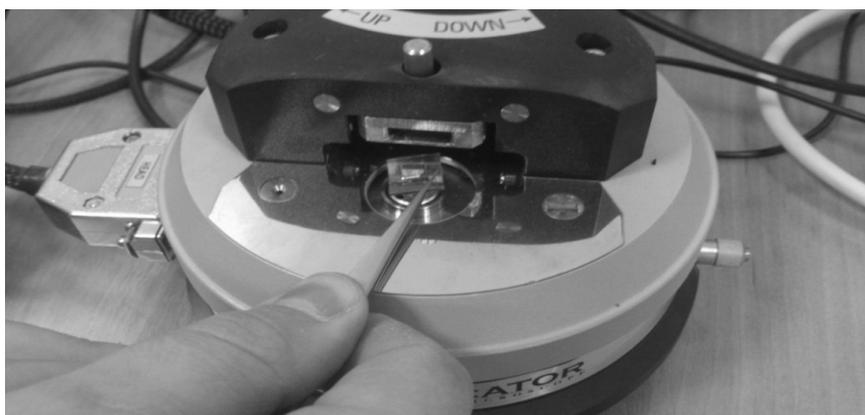


Рис. 1. Установка образца в сканирующий зондовый микроскоп Nano Educator

В другой исследовательской работе «Сканирующая зондовая литография» студенты помещали плоские куски графита между липкими лентами (скотч) и расщепляли их раз за разом, создавая достаточно тонкие слои. После отшелушивания скотч с тонкими пленками графита прижимали к подложке окисленного кремния. Следует отметить, что получить пленку определенного

размера и формы в фиксированных частях подложки (горизонтальные размеры пленок составляют обычно около 10 мкм) достаточно трудно. Используя СЗМ Nano Educator и образец – зачищенный (без записи информации) фрагмент компакт-диска с прижатым к нему скотчем, покрытым графитом с вариантом шаблона, мы получили участок поверхности, на котором была выполнена литография (рис. 2).



Рис. 2. Растровая динамическая силовая литография по шаблону

В области локального контакта зонда с образцом могут возникнуть достаточно большие силы напряженности электрического поля и плотности электрических токов. Совместное действие этих факторов может приводить к заметной локальной модификации поверхности образца и зонда. Повышая уровень взаимодействия между зондом и образцом, мы перевели СЗМ из измерительного режима работы с минимальным уровнем разрушения исследуемой поверхности в литографический режим, обеспечивающий создание на поверхности образца заранее заданных структур с нанометровым уровнем пространственного разрешения. Мы использовали растровую динамическую силовую литографию в режиме атомно-силового микроскопа, используя зонд не более 100 нм, скорость сканирования 2000 нм/с, максимальную глубину воздействия 100 нм, время воздействия 100 мкс, шаг между точками литографии 100 нм (рис. 2). Первичное сближение зонда с образцом осуществлялось с помощью ручного подвода до расстояния 1 мм. Все наши действия контролировались компьютером.

Заключение

Представлен обзор новейших наноматериалов, открытых за последние 10 лет. Установлено, что развитие нанотехнологии происходит благодаря экспериментальным методам исследования, наиболее перспективными из которых являются методы сканирующей зондовой микроскопии. С помощью СЗМ Nano Educator нами была опробована сканирующая зондовая литография, произведены обработка и количественный анализ СЗМ изображений. Таким образом, показан учебно-исследовательский потенциал СЗМ Nano Educator для самостоятельной исследовательской работы студентов в нанолaborатории. В дальнейшем студенты могут использовать сканирующий зондовый микроскоп для исследования биологических объектов, а также изучения микрофлоры воды. Современные возможности лабораторного эксперимента по наблюдению и изучению явлений в нанометровой шкале пространственных размеров и заманчивые перспективы создания уникальных материалов и наноустройств порождают новые теоретические проблемы, а решение этих проблем ведет к интенсивным исследованиям, формирующим новые разделы в вычислительной физике и смежных областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А. Н. Физические основы нанотехнологий: учеб. пособие / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов. Кемерово: КузГТУ, 2012. 123 с.
2. Цао Гочжун. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение / Гочжун Цао, Ван Ин. М.: Научный мир, 2012. 520 с.
3. Сергеев А. Г. Введение в нанометрологию / А. Г. Сергеев. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2010. 296 с.
4. Попов А. М. Вычислительные нанотехнологии: учеб. пособие / А. М. Попов. М.: КноРус, 2014. 309 с.

5. *Миронов В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. М.: Техносфера, 2009. 144 с.
6. *Дедкова Е. Г.* Приборы и методы зондовой микроскопии / Е. Г. Дедкова, А. А. Чуприк, И. И. Бобринский, В. К. Неволин. М.: МФТИ, 2011. 160 с.
7. *Мошников В. А.* Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: учеб. пособие / В. А. Мошников, Ю. М. Спивак. СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ ЛЭТИ, 2009. 80 с.

Статья поступила в редакцию 22.03.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Быкова Валентина Прохоровна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. пед. наук; доцент кафедры «Физика»; v.p.bykova@mail.ru.

Ревина Алла Викторовна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры «Физика»; mizamdir@mail.ru.

Головчун Сергей Николаевич – Россия, 414041, Астрахань; ООО «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго»; канд. техн. наук; начальник отдела эксплуатации ООО «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго»; sergey.golovchun@tec2.astrakhan.ru.

Кузьмин Сергей Иванович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры «Физика»; kuzminsi@mail.ru.



V. P. Bykova, A. V. Revina, S. N. Golovchun, S. I. Kuzmin

NANOTECHNOLOGIES AND THE RESEARCH ACTIVITY OF THE STUDENTS AT THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION

Abstract. To intensify the operating processes in the modern conditions the close connection with the development and implementation of nanotechnologies, in particular, a new generation of the materials, the main characteristics of which are determined by the properties of the interface of the unit "sample-environment", is necessary. It is known that the structure of the sample surface is defined in the atomic-level phase of shaping of a single crystal. Consequently, the study of the nanostructure of the sample surface may contribute to discovery and their further practical application of the previously unknown properties of materials. Scanning probe microscopy is considered one of the most common methods used to study nano-features of the sample surface. According to the Federal State Educational Standards of Higher Professional Education, much attention is given to the individual student activity, one of the most effective types of which is experimental and research activity/experimental method of the research. The paper considers the possibility to form students' research activity within the study of general physics (for courses "Shipbuilding, Ocean Engineering and System Engineering of Marine Infrastructure" and "Refrigeration, Cryogenics and Life Support Systems") on the basis of the educational nanotechnology complex Nano Educator, the basic element of which is scanning probe microscope.

Key words: nanotechnology, scanning probe microscopy, research activity of students.

REFERENCES

1. Smirnov A. N., Ababkov N. V., Pimonov M. V. *Fizicheskie osnovy nanotekhnologii: uchebnoe posobie* [Physical basis of nanotechnologies: textbook]. Kemerovo, KuzGTU, 2012. 123 p.
2. Guozhong Cao, Ying Wang. *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*. World Scientific Publishing Company, 2012. 596 p.
3. Sergeev A. G. *Vvedenie v nanometrologiiu* [Introduction to nanometrology]. Vladimir, Izd-vo VIGU. 2010. 296 p.

4. Popov A. M. *Vychislitel'nye nanotekhnologii: uchebnoe posobie* [Computational nanotechnologies: textbook]. Moscow, KnoRus Publ., 2014. 309 p.
5. Mironov V. L. *Osnovy skaniruiushchei zondovoi mikroskopii* [Bases of scanning probe microscopy]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 144 p.
6. Dedkova E. G., Chuprik A. A., Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K. *Pribory i metody zondovoi mikroskopii* [Tools and methods of probe microscopy]. Moscow, Izd-vo MFTI, 2011. 160 p.
7. Moshnikov V. A., Spivak Iu. M. *Atomno-silovaia mikroskopiia dlia nanotekhnologii i diagnostiki: uchebnoe posobie* [Atomic and power microscopy for nanotechnologies and diagnosis: textbook]. Saint-Petersburg, Izd-vo SPb GETU LETI, 2009. 80 p.

The article submitted to the editors 22.03.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bykova Valentina Prokhorovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate in Pedagogics; Assistant Professor of the Department "Physics"; v.p.bykova@mail.ru.

Revina Alla Victorovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate in Engineering; Assistant Professor of the Department "Physics"; mizamdir@mail.ru.

Golovchun Sergey Nikolaevich – Russia, 414041, Astrakhan; Ltd "LUKOIL-Astrakhanenergo"; Candidate in Engineering; Head of the Operational Department of Ltd "LUKOIL-Astrakhanenergo"; sergey.golovchun@tec2.astrakhan.ru.

Kuzmin Sergey Ivanovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate in Engineering; Assistant Professor of the Department "Physics"; kuzminsi@mail.ru.

