

УДК 378.162.32

Новые возможности в преподавании курсов по зондовой микроскопии и нанотехнологиям

Борис Альбертович Логинов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1; e-mail: b-loginov@mail.ru

Ставшее уже традиционным преподавание курсов по зондовой микроскопии для студентов и старших школьников с появлением новых отечественных микроскопов-конструкторов марки «СММ-2000» пополнилось новыми педагогическими приёмами. Теперь учащиеся сами собирают микроскопы своими руками; вживую наблюдают и открывают для себя мир атомов; приобщаются к мировой науке делая кадры образцов для учёных всего мира; выполняют разнообразные проектно-исследовательские работы самостоятельно ставя их задачи и цели, а школьники знакомятся с наномиром распечатывая на 3D-принтере полученные в микроскопе рельефы и играя в наномире в компьютерных играх, использующих эти рельефы как карты местности. Это делает освоение зондовой микроскопии эмоциональным и глубоким, ориентируя и подготавливая учащихся на занятия серьёзной наукой.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, зондовая микроскопия, нанотехнологии.

Введение

История преподавания в России учебных курсов по зондовой микроскопии берет начало в середине 1990-х годов. Тогда на основе сканирующих зондовых микроскопов, разработанных в Московском институте электронной техники (МИЭТ), впервые в России были начаты курсы в МИЭТ и в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1]. После 2000-го года такие курсы начали возникать повсеместно - как на основе разработанных в МИЭТ микроскопов марки «СММ-2000», так и на основе еще более распространившихся в то время микроскопов марки «Наноэдыукатор» фирмы НТ-МДТ.

Однако проведение учебных курсов в то время было связано с определенными трудностями. В 2005-м году автора данной статьи, являющегося разработчиком микроскопа «СММ-2000», к тому времени уже серийно выпускающегося на заводе «ПРОТОН», настоятельно пригласили в МИФИ разработать и провести 72-часовой учебный курс на основе класса поставленных туда микроскопов «СММ-2000». К удивлению автора, он неожиданно оказался в неприятной ситуации. Начав, как это правильно делать, с рассказа о Нобелевской премии, присужденной за изобретение сканирующего туннельного микроскопа, показывающего атомы без вакуумирования образцов – автор на протяжении всего семестра убегал от просьб студентов наконец-то продемонстрировать как этот микроскоп показывает атомы. Дело в том, что

выпускаемые не только в России, но и в мире серийные микроскопы этого типа не делались настолько основательно, чтобы показывать атомы. Потребляющие эти микроскопы области науки и техники пока не доходили до уровня атомов, и вкладывать силы и средства в достижение атомного разрешения не было актуальным. Но оказалось актуальным для преподавания. Используя ресурсы своей организации, автор на два года ушел в разработку новой итерации микроскопа «СММ-2000», которая должна была показывать атомы, причем даже не в комфортных условиях научной лаборатории, а непосредственно на парте в руках студента.

Мало кто слышал, чтобы требования организации учебного процесса приводили к совершенствованию научного оборудования, но здесь это произошло. Обычно наоборот – научные приборы специально ужимают, уменьшая их функциональные и качественные характеристики и превращая их в более простые учебные приборы.

Описание новых возможностей

Вышеописанная переработка микроскопа «СММ-2000» с целью получения надежного атомного разрешения неожиданно сыграла в сторону учебного процесса еще и тем, что оказалось: достичь выдающихся результатов по разрешению атомов удалось не путем усложнения, а лишь путем серьезного упрощения конструкции микроскопа с уменьшением числа его составляющих, каждая из которых, однако, была тщательно просчитана методами математического моделирования по всем характеристикам, начиная от упругости и кончая модами резонансных частот. Микроскоп стал состоять

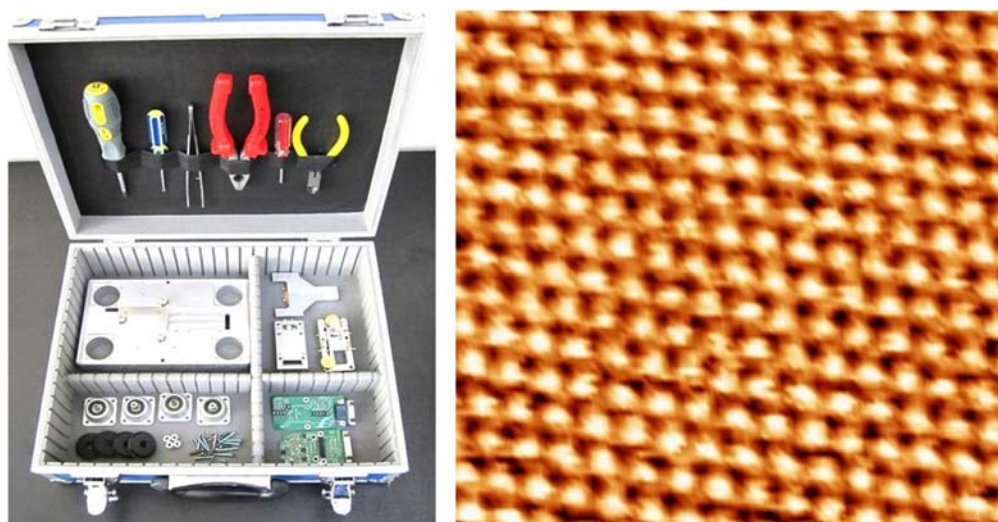


Рисунок 1. Чемоданчик с деталями микроскопа СММ-2000 и полученные на собранном микроскопе атомы пиролитического графита.

лишь из 16 совершенно надежных деталей, скручиваемых винтами. Наподобие конструктора «Лего», его стали давать студентам чемоданчик с деталями и отвертками (рис. 1), и они стали собирать микроскопы на занятиях, иногда даже инициативно соревнуясь между собой – как будто сдают норматив сборки автомата Калашникова (рис. 2).



Рисунок 2. Сборка микроскопа СММ-2000 и аналогия со сборкой автомата Калашникова.

Все описанное выше привело к возникновению новых возможностей в преподавании зондовой микроскопии.

Во-первых, стало возможным такое преподавание, когда учащиеся испытывают настоящий эмоциональный шок, открывая что мир на самом деле состоит из атомов. Это ведь они сами видят на собранном своими руками микроскопе: последовательно увеличивают и увеличивают изображение, и вдруг на увеличении порядка 1 миллиона крат с удивлением видят, что весь рельеф поверхности на самом деле состоит из множества кругленьких атомов. Степень удивления при этом можно сравнить с удивлением людей в прежние времена, когда они узнавали что Земля вертится. Наличие эмоционального восприятия делает курс по зондовой микроскопии незабываемым, формирует современную естественнонаучную картину мира и стимулирует к новым знаниям и высоким профессиям.

Во-вторых, ввиду того, что учащиеся сами рассматривают детали и собирают из них микроскоп своими руками, глубина освоения микроскопа абсолютным большинством группы учащихся увеличивается настолько, что микроскоп для них становится просто «обычным инструментом». Он не остается «волшебной коробочкой», как это зачастую на учебных курсах по зондовой микроскопии. Это очень важно, так как чтобы в современной науке сделать открытия, чаще всего требуется не просто пользоваться стандартным микроскопом, а делать разные дополнительные приспособления, например, подогреть образец, подать напряжение или поместить в вакуум. Вероятность сделать открытие стандартной техникой очень мала ввиду того что стандартной техникой уже пользовалось очень большое количество пытливых

людей. Конечно же, как-то переделать микроскоп под условия своего специфичного эксперимента может только тот, кто досконально знает микроскоп и из-за этого не боится рискнуть, знает что не сломает его. Студенты с восхищением экспериментируют, например, сканируют поверхность раскаляемой ими током до белого каления нихромовой проволоки с нанесенными на нее какими-либо нанообъектами и наблюдают в динамике рост или иное изменение морфологии каких-либо поверхностных наноструктур, снимая последовательно кадр за кадром и делая далее из этих кадров видеоролики. Собравшие своими руками микроскоп учащиеся начинают понимать, что «не боги горшки обжигают», что вполне можно делать любые такие же сложные научные приборы – это особенно важно в современных условиях засилия в российских ВУЗах кажущейся недостижимой зарубежной научной аппаратурой.

В-третьих, микроскоп «СММ-2000», заимев надежное атомное разрешение из-за требований учебного процесса, работая на любых стандартных профессиональных зондах (кантилеверах) и будучи внесенным в государственный реестр средств измерений РФ (№46918) – заодно стал и передовым научным прибором, к работе на котором есть интерес профессионалов – исследователей и научных людей всего мира. Имея такие микроскопы, преподаватель зондовой микроскопии может обратиться к любым ему знакомым исследователям в своем ВУЗе, в знакомых научных институтах, да и к любым незнакомым ему исследователям мира с предложением послать ему образцы на реальные исследования. И далее дать эти образцы учащимся, чтобы они исследовали их под его руководством и под руководством исследователя, приславшего образец, и передающего учащемуся свою искру научного поиска. Это совсем не похоже на выдачу стандартных лабораторных образцов с целью повторения известных результатов. Это – вовлечение учащихся в реальную мировую науку. При этом, если исследование образца было правильным и полезным, чаще всего исследователи, получив бесплатную возможность изучения образца, вписывают учащегося в соавторы научных публикаций. Это стимулирует учащихся к продолжению занятий наукой и дает им бесценный начальный научный опыт и публикации, что дает им возможность далее претендовать на гранты. Представляется также весьма полезным, используя полученные учащимся данные исследований, учить их и стимулировать к оформлению этих результатов в формате настоящей научной статьи, со всеми её элементами в виде названия, аннотации, введения, результатов, обсуждения, заключения, списка литературы и т.д. По результатам двух первых лет проведения курсов в МИФИ автор этой статьи издал пособие с рекомендациями по оформлению студентами статей и статьями учащихся [2], и наблюдал повышение самооценки учащимися в своих глазах как настоящих научных деятелей после оформления ими исследований в виде настоящих статей, опубликованных в виде сборника в издательстве своего ВУЗа.

В-четвертых, преподавание курса по зондовой микроскопии, проводимое на микроскопе «СММ-2000», дает практически неограниченное число очень нужных ВУЗам современных тематик для самостоятельных, курсовых, дипломных и аспирантских работ. Этот микроскоп представляет собой «маленькую вселенную» по методам исследования. Он имеет три основных режима получения кадров рельефа поверхности – сканирующей туннельной и атомно-силовой контактной и бесконтактной (полуконтактной) микроскопии, но также имеет более 25 дополнительных режимов, которые дают с нанометровой точностью карты распределения различных физических свойств на полученном рельефе в широком диапазоне температур от -40 до $+150$ градусов по Цельсию: электропроводности, электрических потенциалов, ёмкости, намагниченности, электролюминесценции, фоточувствительности, электронной плотности, концентрации примесей и других полупроводниковых свойств, теплопроводности, трения, адгезии, упругости, вязкости, акустических свойств, пьезо- и ферро- свойств, и даже молекулярного состава. Это дает учащимся возможность самостоятельного подбора задач и целей проектно-исследовательской, конструкторской и научно-инновационной деятельности – путем подбора для исследуемых образцов дополнительных режимов, выявляющих параметры специфичных для них физических свойств, с реконструированием микроскопа под этот режим. Умножением количества исследуемых в разных режимах свойств на количество возможных типов объектов исследования как раз и получается практически неограниченное число тематик современного физического эксперимента, например, далеко не исчерпанное автором за 7 лет его преподавания на кафедре квантовой физики и нанотехнологий МИЭТ.



Рисунок 3. Полученных в микроскопе рельефы наномира: в 3D-печати и как местность в компьютерных играх.

В-пятых, наличие в составе микроскопа современного управляющего компьютера подключает также информационные технологии обучения. Студенты подробно изучают и повторяют теорию зондовой микроскопии, а также погружаются в увлекательную идею нанотехнологий, для которых микроскоп является инструментом – как по учебным видеороликам, размещенным как на компьютере микроскопа, так и на

информационных ресурсах типа YouTube [3]. Дистанционное же управление микроскопами дает педагогам и учащимся совершенно новый тип выполнения самостоятельных работ – в виде удаленных физических практикумов и проектных исследований. Установив в дневное время исследуемый образец в микроскоп, как показала практика, студенты активно используют своё свободное, в том числе вечернее, время – для его наблюдений, управляя микроскопом с носимых девайсов или же с обычного компьютера, даже из библиотеки. Это для них представляется чем-то современным, интересным, и иногда даже материально вознаграждаемым со стороны исследователей, предоставляющих образцы, что дает студентами опыт коммерциализации своих знаний и умений. Преподавателям при этом становится доступным учет потраченного студентом времени на самостоятельные работы. Для ВУЗов и преподавателей открывается также возможность сетевого метода обучения со значительным увеличением академических часов оказываемых образовательных услуг и широким охватом как студенческой аудитории страны, так и старшеклассников для целей их профессиональной ориентации. Привлечение дополнительных к «сборке своими руками» приемов (рис. 3) повышения привлекательности курса для школьников, таких как распечатка в макромасштабе на 3D-принтерах рельефов наномира и даже атомов, полученных в микроскоп, с возможностью прикоснуться таким образом к наномиру руками; компьютерные игры (стратегические, логические, приключенческие) и игры виртуальной реальности по «картам местности» в виде рельефов только что полученного студентом в микроскопе наномира – позволяет приобщать к микроскопии и высоким технологиям школьников в распространяющихся в ВУЗ-ах в настоящее время центрах профориентации, кванториумах, детских технопарках, образовательных центрах, а также непосредственно в школах.

Заключение

Таким образом, с появлением нового типа учебного пособия по зондовой микроскопии – «Микроскопа сканирующего зондового СММ-2000» – в России появились новые возможности преподавания, не имеющиеся пока в настоящее время больше нигде в мире, что может привести к созданию задела для опережающего развития России как в данном направлении, так и во многих областях науки и техники, использующих сканирующую зондовую микроскопию. Разработанный автором учебный курс [4] «Сканирующая зондовая микроскопия» уже внедрен в ряде ВУЗов [5–7] и получил высокую оценку председателя комиссии РАН по нанотехнологиям, академика Алферова Ж.И., а также учебно-методического объединения по специальности «Нанотехнологии в электронике» в лице академика Чаплыгина Ю.А. и председателя учебно-методической комиссии, член-корреспондента Горбачевича А.А., заведующего

кафедрой квантовой физики и нанотехнологий МИЭТ, на которой был впервые апробирован разработанный автором вышеописанный учебный курс. Автор благодарит также профессора Ханина С.Д., заведующего кафедрой физической электроники Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена, за мотивацию к обнародованию наработанного материала и методическую помощь.

Литература

1. Карпухин С.Д., Быков Ю.А., Шеколов М.А. Сканирующая туннельная микроскопия. Аппаратура, принцип работы, применение: Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 г., 48 стр.
2. Логинов Б.А. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: Учебно-методическое пособие. – М.: МИФИ, 2008 г., 224 стр.
3. Логинов Б.А. Сканирующая зондовая микроскопия: Лабораторная работа «Сборка и настройка сканирующего туннельного микроскопа», 2011, URL: https://www.youtube.com/watch?v=6ghQc_ZdUbE
4. Логинов Б.А. Учебная программа курса «Сканирующая зондовая микроскопия», 2011, URL: <http://www.z-proton.ru>
5. Шульгин Б.В., Григоров И.Г., Логинов Б.А. Методы и средства микроскопии: Методические указания – Екатеринбург: ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет – УПИ», 2005, 188 стр.
6. Нестеров С.Б., Логинов Б.А., Зилова О.С., Сабирзянов Н.Р. Сканирующие зондовые микроскопы. Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 г., 200 стр.
7. Андреева Н.В., Габдуллин П.Г., Журкин А.М. Экспериментальные методы исследования: методики туннельной и атомно-силовой микроскопии. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2015, 105 стр.

Learning Courses on Scanning Probe Microscopy: New Opportunities

Boris A. Loginov

*Head of nuclear modification and semiconductor surface analysis research laboratory,
senior lecturer of quantum physics and nanotechnology department,*

National Research University of Electronic Technology;

Head of Precision Instruments Department, Plant JSC «Zavod PROTON»

bld. 1, Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia; e-mail: b-loginov@mail.ru

Received October 24, 2017

PACS 01.50.Qb

Traditional learning courses on scanning probe microscopy for students using new designed microscopes «SMM-2000» has replenished with new techniques. Now students:

can assemble microscopes with their hands; try to see and ascertain whether the materials actually made of atoms; include to the world of science making scans of actual samples of scientists around the world; and perform a variety academic work in a serious research itself setting their goals and objectives. Pupils are attached to the nano-world printing on 3D-printer obtained in the microscope reliefs and playing in the nanoworld in computer games, using the reliefs as maps of the game area. This makes full and emotional learning, orienting and preparing students to serious science.

Keywords: scanning tunneling microscopy, atomic force microscopy, probe microscopy, nanotechnology.

References

1. *Karpuchin S.D., Bykov Yu.A., Schekotov M.A.* Scanning Tunneling Microscopy: Instruments, principle of operation, application: Tutorial – Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999, 48 pp.
2. *Loginov B.A.* Scanning Tunneling and Atomic Force Microscopy: Tutorial – Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2008, 224 pp.
3. *Loginov B.A.* Scanning Probe Microscopy: Laboratory work «Assembly and adjustment of a scanning tunneling microscope», 2011, URL: https://www.youtube.com/watch?v=6ghQc_ZdUbE
4. *Loginov B.A.* Scanning Probe Microscopy: Learning course program, 2011, URL: <http://www.z-proton.ru>
5. *Shulgin B.V., Grigirov I.G., Loginov B.A.* Microscopy Methods and Tools: methodological guidelines – Ekaterinburg, Ural State Technical University, 2005, 188 pp.
6. *Nesterov S.B., Loginov B.A., Zilova O.S., Sabirzyanov N.R.* Scanning Probe Microscopes: Tutorial – Moscow, National Research University MPEI Publishing House, 2007, 200 pp.
7. *Andreeva N.V., Gabdullin P.G., Zhurkin A.M.* Experimental research methods: Tunneling and atomic force microscopy methodics. Tutorial. – St.Peterburg, St.Petersburg State Polytechnic University, 2015, 105 pp.