

S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

OBTAINING OF SHORT PULSES IN THE OUTPUT OF A RADIATION-RECEPTION SYSTEM OWING TO THE USE OF COMPENSATING PULSES IN BOTH RADIATING AND RECEIVING OPERATING MODES

A radiation-reception system consisting of two identical piezoelectric plates loaded, each, on one side with water, is considered. The radiator is excited by one half-period of sinusoidal electric voltage at the resonant frequency. It's shown that using of compensating electric pulses for both piezoplates allows to obtain short pulses in the output of a system. The examples of obtaining pulses with duration in the range of 2–5 half-period are given.

Piezoceramic plate, principle d'Alembert, compensation, piezoelectric transducer, acoustic pulse, electric pulse

УДК 577.3

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

И. А. Юдин
ОАО «Завод Магнетон»

Атомно-силовая микроскопия и ее применения в науке, технике и реставрации

Представлен обзор аналитического приборного метода исследования микроструктуры и топографии поверхностей материалов со сверхвысоким разрешением – атомно-силовой микроскопии. Приводится краткое описание физических принципов работы и основных применений этого метода, в том числе для проведения физических и биологических исследований, а также в промышленном производстве и реставрации памятников.

Сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовой микроскоп, нанoidентификация, тонкие пленки, биология и медицина, реставрация

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) относится к группе высокоразрешающих измерительных методов исследования микроструктуры и топографических особенностей материалов, известной под общим названием сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). В 1981 г. швейцарские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер разработали основные принципы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), за что оба впоследствии (в 1986 г.) были удостоены Нобелевской премии по физике. СТМ основана на применении туннельного эффекта и заключается в измерении значения туннельного тока, которое экспоненциально зависит от расстояния зонд–образец. Метод СТМ позволяет строить изображения поверхности с латеральным разрешением в несколько ангстрем. В 1982 г. тот же Герд Бинниг совместно с Кельви-

ном Куэйтом и Кристофером Гербером предложили новую модификацию туннельного микроскопа, основанного на измерении сил межатомного взаимодействия и получившего название атомно-силовой микроскоп (АСМ). АСМ, будучи дальнейшим развитием техники СТМ, предоставляет широкие возможности для получения изображений поверхности различных объектов с атомным разрешением в жидкой и воздушной средах, а также в условиях высокого вакуума. В настоящее время к основным областям применения АСМ относятся физические науки, биология и промышленность. В данной статье дается краткий обзор применений АСМ.

Физические принципы работы АСМ. АСМ основана на измерении силового взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и

зондом микроскопа, закрепленного на конце упругой консоли, называемой кантилевером. Сила, действующая на зонд со стороны образца, приводит к изгибу консоли. Регистрируя уровень изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью. Традиционно, под силами взаимодействия подразумевают дальнедействующие силы Ван-дер-Ваальса. Однако в действительности со стороны поверхности также действуют упругие силы и силы адгезии, магнитные и электростатические силы. В зависимости от характера действующей силы выделяют несколько режимов работы АСМ: контактный, бесконтактный и полуконтактный [1].

Общая схема работы атомно-силового микроскопа представлена на рис. 1. Излучение полупроводникового лазера фокусируется на упругой консоли зондового датчика. Регистрация отраженного излучения выполняется с помощью фоточувствительного элемента – четырехквadrантного фотодиода, который позволяет определять направление и уровень смещения консоли зондового датчика (рис. 2). Перед началом измерений оптическая система микроскопа юстируется таким образом, чтобы отраженное излучение попало в центр фотоприемника. В этом случае фототоки, снимаемые со всех секций фотодиода, будут иметь одно значение. В процессе измерений, в результате деформации изгиба консоли под действием сил взаимодействия происходит отклонение отраженного луча от начального (центрального) положения. Этот сдвиг вызывает изменение фототока для каждой секции. Изменение фототока называется разностным током и позволяет однозначно характеризовать уровень и направление смещения консоли кантилевера.

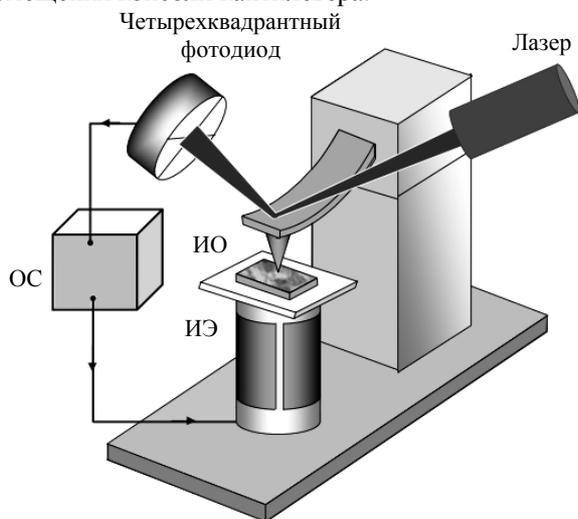


Рис. 1

Фототок, снимаемый с четырех секций четырехквadrантного фотодиода (рис. 1), позволяет сформировать напряжение в цепи обратной связи ОС, которое записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности. С помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента ИЭ расстояние между зондом микроскопа и поверхностью исследуемого образца ИО поддерживается на постоянном уровне (необходимо для осуществления силового взаимодействия). В качестве напряжения, подаваемого на ИЭ, используется напряжение в цепи обратной связи.

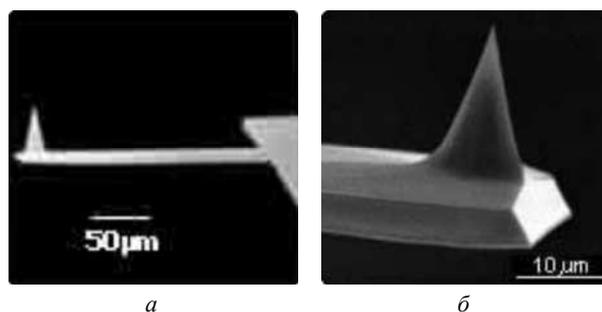


Рис. 2

Контактный режим. В контактном режиме расстояние между зондом и поверхностью составляет примерно единицы ангстрем, что обеспечивает баланс между отталкиванием Паули и силами Ван-дер-Ваальса [2]. Топографическая карта рельефа поверхности формируется следующим образом. Система обратной связи компенсирует уровень изгиба кантилевера, поддерживая силу взаимодействия между зондом и образцом на постоянном уровне, а управляющее напряжение в петле обратной связи пропорционально изменению рельефа поверхности. При сканировании объекта с перепадами высот в несколько ангстрем применяется режим сканирования при постоянном среднем расстоянии. Изгиб консоли, пропорциональный силе взаимодействия между зондом и образцом, регистрируется для каждой точки поверхности. Полученное таким образом изображение представляет собой картину пространственного распределения силы, действующей на зонд со стороны поверхности.

Бесконтактный режим работы. Для исследования биообъектов и ряда органических материалов, обладающих малой механической жесткостью, используется бесконтактный режим работы АСМ. В данном случае пьезовибратор возбуждает колебания кантилевера с амплитудой порядка сотен ангстрем и частотой несколько сотен килогерц [3]. Наличие градиента силы, действующей на

зонд со стороны поверхности, приводит к дополнительному сдвигу резонансной частоты, что в свою очередь вызывает смещение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик в область низких частот. Построение изображения в бесконтактном режиме осуществляется методом фиксации локальных изменений амплитуды и фазы колебаний кантилевера, а наличие дополнительного фазового сдвига используется для получения фазового контраста.

Полуконтактный режим. Несмотря на очевидные достоинства контактной и бесконтактной методик, на практике чаще применяют полуконтактный режим из-за универсальности этого метода. Как и в бесконтактном режиме, пьезовибратор возбуждает колебания кантилевера на частоте, близкой к резонансной, с амплитудой модуляции порядка десятков милливольт [4]. Расстояние между зондом и образцом соответствует касанию в нижнем полупериоде колебаний кантилевера. Суммарное взаимодействие определяется силой упругости в момент соприкосновения и силами Ван-дер-Ваальса. Локальная жесткость поверхности образца существенно влияет на изменение фазы и амплитуды кантилевера. Во время сканирования система обратной связи регистрирует изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера, которые формируют АСМ-изображение и распределение фазового контраста соответственно.

Применение АСМ в научных исследованиях и промышленном производстве. Физические науки, как и промышленность, испытывают потребность в создании универсального метода, позволяющего строить изображения поверхностей различных материалов: полимеров, изделий из керамики, металлов, кристаллов и минералов [5]–[7]. Высокое разрешение способствует применению АСМ для решения целого ряда подобных задач. В частности, АСМ позволяет строить топографические карты поверхностей различных объектов и исследовать физические свойства целого ряда образцов: пористых материалов, тонких пленок и наноструктур.

Наноидентификация. Наноидентификация – один из главных методов измерения и изучения механических свойств материалов (напряжений и деформаций, суммарных напряжений, модуля упругости, коэффициента Пуассона, пластической деформации, механизма разрушения, вязкоупругости и др.). Он заключается в создании на

исследуемой поверхности пятна давления с последующим анализом его формы и размеров или построением зависимости положения индентора от кривой нагрузки. Наноидентификация позволяет исследовать различные дискретные события, происходящие на поверхности образца: активацию источника дислокаций, сдвиг начала неустойчивости и фазовые трансформации, которые могут возникать в процессе работы [8]. Иными словами, наноидентификация является одним из главных методов для изучения и испытания наноматериалов. Применение зонда АСМ в качестве индентора позволяет сфокусировать нагрузочное давление на значительно меньшей площади, что в свою очередь ведет к увеличению массива данных, необходимых для построения 3D-изображения и определения физических свойств исследуемой поверхности.

Исследование морфологии и физических свойств тонких пленок. Одна из главных тенденций современного машино- и приборостроения направлена на создание элементов, обладающих компактными геометрическими размерами. Многие из таких элементов основаны на применении технологии тонкопленочных структур. Толщина пленок лежит в диапазоне от нескольких долей нанометра до нескольких микрометров и в значительной степени определяет их физические свойства. Для производства тонких пленок можно использовать большую часть элементов периодической системы. В настоящее время наибольшее распространение получили пленки на основе металлов и полимеров.

Металлические пленки. Тонкие металлические пленки, обладающие рядом уникальных свойств, применяются при изготовлении различных электронных, магнитных и оптических устройств, например барьеров Шотки, монохроматоров и др. Одним из наиболее важных свойств пленок, имеющих толщину несколько десятков нанометров, является их способность без значительных потерь пропускать свет (коэффициент пропускания может составлять до 90 %). Высокий коэффициент пропускания играет важную роль при создании планарных оптических волноводов, которые широко применяются в задачах оптического зондирования. Тонкие металлические пленки могут быть использованы также для создания оптических зеркал с коэффициентом отражения 90...95 % или в качестве верхнего прозрачного покрытия омического контакта для повышения производительности работы ряда

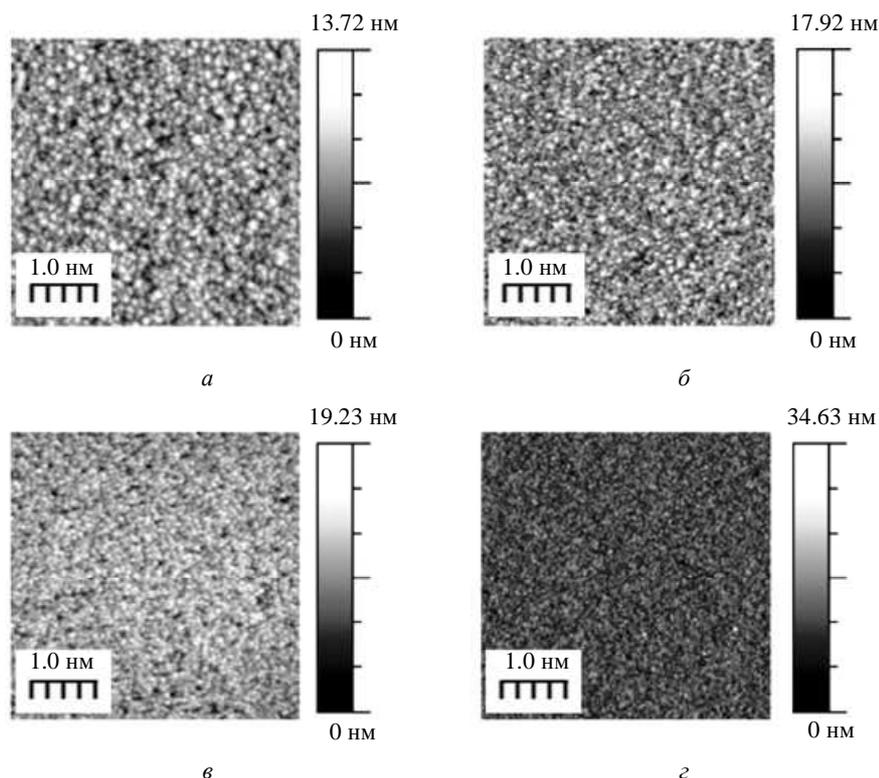


Рис. 3

оптоэлектронных устройств. В частности, одним из перспективных направлений применения тонких металлических пленок является создание на их основе солнечных модулей, используемых для генерации электрической энергии. В этом случае металлические пленки служат для создания контактных соединений солнечных батарей. Их получают методом осаждения металла из паровой фазы на стеклянной подложке. Они способны работать в широком диапазоне температур (от -40 до 150 °C) и характеризуются высокой равномерностью распределения заряда в тонкопленочной структуре. Все это свидетельствует о том, что технологии, основанные на применении тонких металлических пленок, обладают значительным потенциалом, а это предъявляет к ним ряд жестких технологических требований. В связи с этим свойства пленок необходимо тщательно контролировать в процессе производства соответствующих устройств. На рис. 3 показаны АСМ-изображения поверхности (ее шероховатость) пленки оксида цинка на силиконовой подложке в процессе роста при различных температурах.

Полимерные пленки. Широкое применение в различных областях промышленности и разделах современной медицины обуславливает необходимость всестороннего исследования свойств полимерных пленок. При создании биомедицинских

устройств (коронарные стенты, сосудистые трансплантаты, сердечные клапаны, мешки для крови, искусственные органы и т. д.) для обеспечения их оптимальной интеграции с биологической тканью необходимо осуществлять технологический контроль качества поверхности полученных изделий. Другим важным применением полимерных пленок является использование диэлектриков на основе полимерных композиций для создания миниатюрных высокомоощных электронных схем. При их создании к материалам предъявляется ряд требований, соответствующих критериям микроэлектроники: термальная стабильность, низкое влагопоглощение, высокое напряжение пробоя, низкие потери, высокая температура стеклования и низкая шероховатость поверхности. В обоих случаях исследование профиля и физических свойств полимерных пленок является приоритетной задачей, для решения которой используется несколько методов. Однако именно метод АСМ превалирует над остальными, так как обладает рядом достоинств: высоким разрешением, универсальностью, возможностью 3D-визуализации. Применяя АСМ в полуконтактном режиме, удобно проводить морфологический анализ, наблюдать происходящие процессы и строить изображения поверхности с разрешением $1...5$ нм. АСМ является универсальным методом для изучения механических свойств

полимерных пленок, так как позволяет получить трехмерное изображение, а следовательно, и информацию о пространственном распределении деформации структуры и данные о микрорельефе поверхности. Комбинируя методы оптической микроскопии и АСМ в полуконтактном режиме, можно исследовать морфологическую неустойчивость замкнутых полимерных пленок под воздействием температуры [10].

Изучение поверхностных дефектов материалов. Еще одним применением АСМ является исследование поверхностных дефектов, которые могут существенно влиять на изоляционное покрытие тонких металлических проводов, способствуя их окислению и снижению проводимости. К таким дефектам относятся: отверстия, царапины, пористость и наличие выступов. Следует заметить, что речь идет не только об изоляционных покрытиях проводников. На сегодняшний день однослойные или многослойные структуры применяются в целом ряде областей. Диапазон изоляционных покрытий достаточно велик и включает следующие виды покрытий: карбидные, нитридные, покрытия из керамических сплавов, покрытия из металлокерамики, покрытия из метастабильных материалов и т. д. Для диагностики точечных дефектов, локализованных на поверхности твердого тела, АСМ используется в двух режимах: контактном и бесконтактном (в зависимости от материала образца). АСМ позволяет строить топографические карты и карты распределения высот поверхностных дефектов, включающих капли покрытия, микротрещины и т. д. Для моделирования характеристик поверхностных дефектов и построения линий постоянной силы удобно использовать режим частотной и силовой модуляции АСМ, когда топография образца определяется как разность между постоянной высотой сканирования и амплитудой колебаний кантилевера. В целом можно утверждать, что метод АСМ является универсальным и эффективным средством определения поверхностных дефектов. Единственным недостатком этого метода является малое поле сканирования, существенно ограничивающее производительность измерительной системы.

Задача определения поверхностных дефектов является важным этапом технического контроля различных изделий в промышленности. Так, в качестве примера можно привести энергетический сектор, а именно возобновляемые источники

энергии. В настоящее время доля альтернативных источников в общем объеме потребляемой энергии составляет от 8 до 10 %, однако к 2020 г. ожидается ее рост до 15...20 %, из которых 10 % будет приходиться на долю солнечной энергетики. К 2050 г. солнечная энергетика сможет обеспечить до 25...30 % мирового производства энергии [11]. Одним из главных источников возобновляемой энергии является фотовольтаика, основанная на использовании солнечных батарей, и в том числе – тонкопленочных солнечных модулей (ТПСМ). Метод АСМ широко используется для анализа качества пленок аморфного кремния и контроля элементных соединений в ТПСМ.

Применение АСМ в биологии и медицине. АСМ – один из наиболее важных методов исследования биологических систем. Главным отличием метода АСМ от других методик СЗМ является его универсальность. Возможность строить изображения в различных средах в сочетании с несколькими режимами работы позволило исследовать структуру живой клетки, измерить уровень взаимодействия с абиотическими поверхностями других клеток. С помощью АСМ были проведены исследования дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и рибонуклеиновой кислоты (РНК), белков, вирусов, бактерий, различных тканей и органов [12].

Комплексы ДНК и РНК. ДНК и РНК – это биологические полимеры, которые присутствуют почти во всех клетках организма, хранят генетическую информацию, обеспечивают реализацию генетической программы (за это отвечает ДНК) и осуществляют программный синтез белков (это «зона ответственности» РНК). В настоящее время исследование ДНК и РНК является приоритетной задачей генной инженерии. Установлено, что средний размер человеческой клетки – порядка 10 мкм, толщина нити ДНК – 2 нм, а длина достигает 3 м. Таким образом, исследование эластичности нитей ДНК имеет особое значение, так как может дать представление о «плотности упаковки» генетической информации. Применение АСМ позволяет получить данные о структуре и топологии ДНК и РНК, что в свою очередь углубляет понимание этой сложной полимерной молекулы, а накопленные знания нашли применение в области ДНК-нанотехнологии и появившейся сравнительно недавно РНК-нанотехнологии [13]. В их основе лежит способность нуклеиновых кислот к самоорганизации в сложные трехмерные

комплексы. Основываясь на комплементарном взаимодействии, можно использовать ДНК как функциональный элемент в наномашинах и создавать молекулярные переключатели и логические схемы. Однако «камнем преткновения» данной технологии является иммобилизация образца. Использование АСМ в режиме модификации, когда острое АСМ может изменять положение атомов, создает условия для подготовки поверхности субстратов к компенсации зарядов ДНК (и РНК) или образования положительно заряженных субстратов для электростатического удержания нуклеиновых кислот. Особая привлекательность АСМ по сравнению с другими методами построения изображений заключается в способности создавать изображение ДНК- или РНК-наноструктур в динамике, что в свою очередь является необходимым условием их изучения.

Протеины и полипептиды. Белки (протеины, полипептиды) – высокомолекулярные органические вещества, состоящие из альфа-аминокислот, соединенных в единую цепочку пептидной связью. Установлено, что 10...20 % генома живых организмов кодируется белками. АСМ является одним из наиболее мощных инструментов для изучения протеинов и полипептидов, так как в контактном режиме обеспечивает латеральное разрешение 0.5...1 нм и вертикальное разрешение 0.1...0.02 нм. Этого вполне достаточно для исследования структуры, функционала и строения белка. Однако для уменьшения повреждений и снижения деформаций разумнее применять полуконтактный режим, который обеспечивает латеральное разрешение в диапазоне 1.1...1.5 нм и вертикальное разрешение около 0.1 нм [14]. АСМ можно использовать не только для построения изображений белковых комплексов, но и для прямых манипуляций с геометрическими размерами полипептидной цепочки. Подобные манипуляции позволяют определить расстояние между концами полипептидной цепочки и представить полученные данные как функцию удерживающей их силы. Установлено, что зависимость результирующей силы от расстояния можно интерпретировать как потерю энтропии развернутых полипептидных цепочек по мере их распространения. Другой важной проблемой современной биомедицины является исследование проблемы фолдинга белка (это процесс спонтанного сворачивания полипептидной цепи в уникальную нативную простран-

ственную структуру). Ярким примером фолдинга белка является денатурация. Процесс денатурации отдельной белковой молекулы, приводящий к распаду трехмерной структуры, иногда называют плавлением молекулы. Этот механизм до конца не изучен, а получение экспериментальных данных связано со значительными сложностями и высокой стоимостью таких исследований. В настоящее время, применяя различные биофизические методы, специалисты пытаются смоделировать пространственную структуру белка на основе знаний об аминокислотной последовательности белка. Сочетание АСМ с методами молекулярной динамики может стать ключом к решению данной проблемы.

Вирусы, бактерии и микроскопические грибы. Вирусы – неклеточные инфекционные агенты, которые могут воспроизводиться только внутри живых клеток и присутствуют во всех живых организмах на нашей планете. Распространенность и многообразие форм делают вирусы одним из важнейших объектов исследования. Устойчивая тенденция в проблеме изучения вирусов направлена на использование самых передовых и эффективных средств, к которым, несомненно, относится и метод АСМ. Благодаря АСМ были получены изображения вирусов в нанометровом разрешении и исследована плотность распределения капсомеров на поверхности вирусов. Актуальность данного достижения заключается в том, что капсомер – структурная белковая субъединица капсида, внешней оболочки вируса, которая защищает его генетический материал. Иными словами, капсомеры – «броня» вирусов, а их изучение – важная задача современной вирусологии. Однако не менее важным является вопрос исследования процесса инициализации вирусной инфекции и понимание механизмов взаимодействия вирусов с клеточной мембраной. Применение АСМ позволило продвинуться в решении этой проблемы и исследовать целый ряд вирусов, включая вирус табачной мозаики, икосаэдрические вирусы, вирус леса Семлики и др. [15].

Бактерии – одноклеточные организмы, имеющие форму стержня, шара или спирали. Их размеры варьируются в широком диапазоне от 1 до 750 мкм. В настоящее время описано около десяти тысяч видов бактерий, однако их предполагаемое количество – свыше миллиона, что и обуславливает необходимость их дальнейшего изу-

чения. Для исследования бактерий, равно как и вирусов, удобно использовать метод АСМ, который в данном случае позволяет строить изображение поверхности бактерий, определять топологию и поверхностные свойства. Для этого могут быть задействованы 3 режима работы АСМ: контактный, полуконтактный и магнитный. В магнитном режиме существенное действие со стороны поверхности оказывают магнитные силы. АСМ, используя специальный зонд, строит карты распределения магнитных полей. Магнитный режим является разновидностью полуконтактной методики, однако обладает рядом преимуществ при работе в жидких средах. Повышение качества изображения достигается устранением резонанса, возникающего в жидкости при работе в полуконтактном режиме. Используя комплексный подход и комбинируя методы АСМ, электронной микроскопии и биофизические методы, можно исследовать процессы бактериального взаимодействия.

Помимо вирусов и бактерий для современной биологии значительный интерес представляет также исследование микроскопических грибов (микроспоров). Эти микроорганизмы отличаются от бактерий более сложным строением. Вегетативное тело гриба – грибница (мицелий) – состоит из ветвящихся нитей, называемых гифами. Клетки микроспоров разнообразны по форме, размерам, но имеют общие структурные элементы. Клетка всех грибов состоит из клеточной стенки, цитоплазмы с цитоплазматической мембраной и эндоплазматической сетью, митохондриями, рибосомами, включениями, вакуолями, ядром или несколькими ядрами. Микроспоровы, обитающие в полярных районах Арктики и Антарктики, подвергаются значительному воздействию ультрафиолетовых (УФ) лучей, содержащихся в спектре солнечного излучения. Изучение воздействия УФ-излучения на грибы интересно с точки зрения задач астробиологии, поскольку это позволяет моделировать условия воздействия проникающих излучений на биологические объекты в космосе.

В качестве иллюстрации к применению АСМ при исследовании микроскопических грибов на рис. 4 приведено изображение спор микроспора *Aerobasidium pullulan*. Здесь показана топография поверхности данного гриба по трем координатам X , Y и Z (по всем трем осям значения высоты указаны в микрометрах).

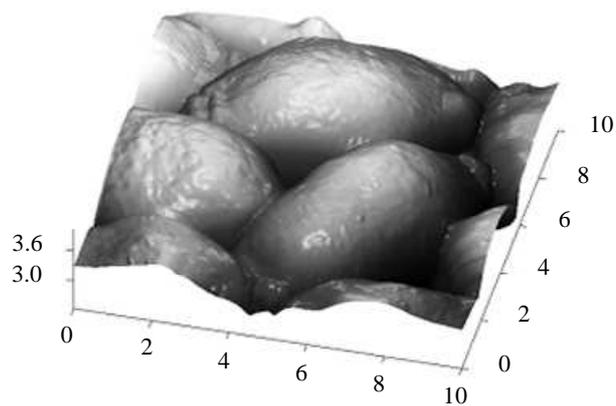


Рис. 4

Отдельный интерес представляет изучение тех видов микроспоров, жизнедеятельность которых может приводить к повреждению исторических памятников, зданий и инженерных сооружений. Одним из методов борьбы с биопоражениями памятников является лазерная обработка и УФ-облучение при помощи ламп. Однако эти вопросы пока еще находятся в стадии проработки [20]. АСМ позволяет исследовать механические свойства микроспоров, что дает возможность оценивать результаты воздействия лазеров и УФ-ламп.

Ткани и органы. Способность атомно-силовой микроскопии строить трехмерные изображения в нанометровом разрешении позволяет применять этот метод для изучения различных заболеваний органов зрения, например катаракты. Так, с применением АСМ в контактный и магнитный режимы были исследованы структурные и физиологические свойства глазных тканей различных животных. Анализ полученных изображений позволяет отслеживать изменение физических свойств хрусталика по мере его помутнения [16]. В перспективе метод атомно-силовой микроскопии может быть применен для исследования различных тканей глаза и связанных с ними заболеваний. Возможности АСМ строить изображения как полупроводников, так и диэлектриков в различных средах позволили исследовать дентин человеческого зуба и минимизировать влияние различных артефактов, обусловленных дегидратацией. Применение АСМ полезно, главным образом, при изучении коллагеновых сетей дентина и его изменений, обусловленных термальными нагрузками. Установлено, что изменения, происходящие с интертубулярным и перитубулярным дентином, вызваны воздействием фосфорной кислоты, самопротравливающих праймеров, ополаскивате-

лей и других составляющих склеивающих реставрационных материалов, используемых в современной стоматологии.

АСМ и нанотехнологии. АСМ обеспечивает уникальные возможности для получения качественной и количественной информации по многим физическим характеристикам исследуемого материала, включая размер, морфологию, текстуру и шероховатость поверхности. В связи с этим АСМ широко применяется для решения задач нанометрологии и технического контроля. АСМ, равно как и СКТ, позволяет осуществлять различные манипуляции с нанообъектами. В качестве примера можно привести ДНК- и РНК-нанотехнологии, описанные ранее. АСМ имеет ряд преимуществ по сравнению с СТМ (в частности, позволяет строить 3D-изображения профиля поверхности с атомным разрешением в различных средах), но СТМ имеет большую глубину резкости (около миллиметра) и поле сканирования (несколько квадратных миллиметров). На базе АСМ и СТМ был разработан метод сканирующей зондовой литографии или нанолитографии. В соответствии с видами локального взаимодействия зонда с поверхностью выделяют следующие виды зондовой литографии: СТМ-литографию, АСМ-анодно-окислительную литографию, АСМ-силовую литографию, электростатическую зарядовую литографию и др. [17]. АСМ-силовая литография позволяет модифицировать только топологию поверхности образца. АСМ-анодно-окислительная литография измеряет не только рельеф, но и локальные физические свойства поверхности образца. Так, при подаче напряжения на проводящий АСМ-зонд на поверхности запускается электрохимическая реакция. В настоящее время зондовая литография позволила создать ряд дискретных устройств на основе нанoeлектроники в виде отдельных функциональных элементов: МОМ-диод, одноэлектронный транзистор и различные устройства памяти со сверхплотной записью информации.

АСМ в анализе исторических и археологических объектов. Новое и весьма перспективное направление применения АСМ – это анализ памятников истории и культуры. Исследование исторических, художественных и археологических объектов с помощью АСМ позволяет получать различную информацию, в том числе морфологическую (размер, форма, способ изготовления, наличие повреждений), физическую (физические,

механические и оптические свойства материала образца), химическую (качественный и количественный анализ образований на поверхности образца) и биологическую (выявление метаболической активности и др.).

Для анализа объектов культурного наследия в настоящее время применяется целый ряд оптофизических методов: оптическая и электронная микроскопия, ультрафиолетовая флуоресцентная фотография, инфракрасная (ИК) рефлектография, радиография, рентген-флуоресцентная спектроскопия, ИК-фурье-спектрометрия и др. Разнообразие используемых методов связано с отсутствием универсального приборного метода, который позволял бы провести исчерпывающее всестороннее исследование объектов. По этой причине при анализе памятников обычно используют комплексный подход, и появление новых методов позволяет расширить возможности исследования, основанные на сочетании уже существующих приборных средств. В связи с этим введение в практику исследования памятников метода АСМ значительно расширяет арсенал технических средств в музейной работе.

Так, АСМ в сочетании с методом вольтамперометрии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектрометрии в видимом свете был использован при изучении синего пигмента, который применялся индейцами майя в доклассической и классической архитектуре города Калакмуль на юге Мексики [18]. В результате этих исследований были датированы основные этапы развития комплекса пигмента в настенной живописи майя-периода, а также выявлен цвет пигмента, который является его предшественником. Заметим, что сочетание АСМ и СТМ часто применяется для анализа степени деградации различных пигментных слоев, так как благодаря высокому пространственному разрешению эти методы предоставляют большой объем данных (в том числе, за счет сканирования приповерхностных слоев) о механических свойствах исследуемых образцов, что также может быть полезно при исследовании памятников. Другим примером применения АСМ (в сочетании с методом оптической микроскопии) является исследование текстуры бумаги и получение 3D-изображения топографии красящего пигмента, содержащегося в чернильном меланже, а также исследование процесса его взаимодействия с бумажной основой.

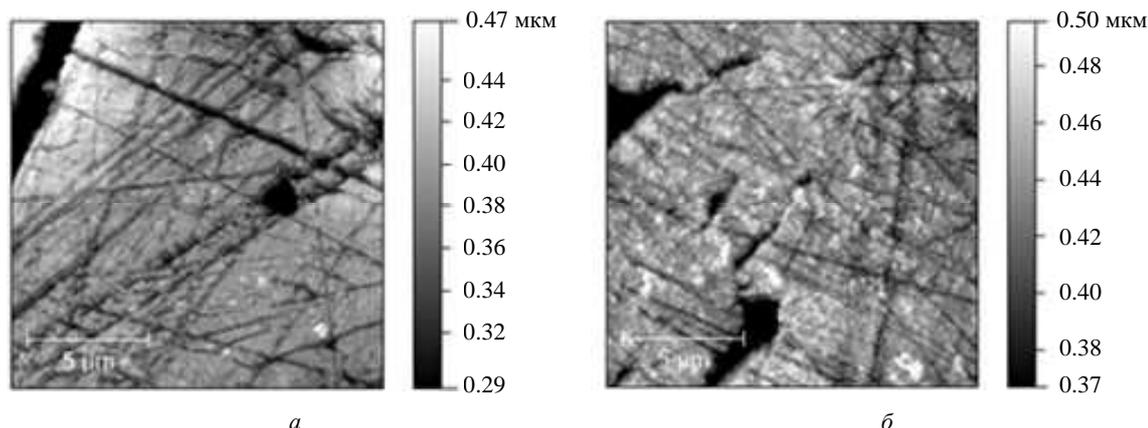


Рис. 5

Весьма интересно применение АСМ для исследования предметов из стекла, являющегося одним из наиболее древних материалов, дошедших до наших дней с античных времен. Так, возраст фаянсовых украшений, найденных в Египте, относится к эпохе первой династии фараонов и насчитывает около пяти тысяч лет. Стекло, равно как и все другие материалы, подвержено старению, которое определяется условиями окружающей среды и его химическим составом. Традиционно, для анализа стеклянных поверхностей применяется метод СЭМ в сочетании с рентгеновской спектроскопией. АСМ является серьезной альтернативой такому подходу, поскольку позволяет исследовать процессы разрушения, происходящие на поверхности исторических объектов, с более высоким пространственным разрешением. АСМ-изображения характеризуют микроструктуру поверхности стекла, что позволяет идентифицировать основные процессы химического распада и механизмы его старения.

Другой пример применения АСМ связан с анализом позолоченных поверхностей полихромных предметов искусства из Европы IX–XIX вв. [19]. В этой работе была использована комбинация методов ИК-фурье-спектроскопии, спектроскопии Рамана, СЭМ и АСМ, а также рентгеновской спектроскопии. В результате была получена детальная информация о процессах деградации и старения этих объектов.

Заметим, что АСМ может применяться также для оценки результатов очистки поверхности памятников в процессе реставрационных работ. В настоящее время наиболее щадящим методом очистки памятников является лазерная обработка,

которая позволяет проводить «деликатное» удаление загрязнений даже с сильноэродированных поверхностей без ущерба для состояния сохранности памятника [20]. Однако, как и любое другое реставрационное вмешательство, результат работы с лазером нужно контролировать. Метод АСМ позволяет оценивать степень воздействия лазерного излучения на объект – это важно для контроля состояния микрорельефа поверхности памятника до и после завершения реставрационных работ. Авторы данной работы в настоящее время проводят исследования в этой области. На рис. 5 приведены АСМ-изображения поверхности белого мелкозернистого мрамора, в том числе необработанного участка в исходном состоянии (а) и соседнего участка того же самого образца после лазерной обработки (б). Из рисунка видно, что воздействие лазера в данном конкретном случае не оказало заметного влияния на шероховатость поверхности. Это свидетельствует о возможности очень «деликатной» очистки поверхности каменных памятников с помощью лазеров в процессе реставрации.

Как видно из приведенных примеров, применение АСМ открывает новые возможности исследования памятников и может быть очень полезно в работе реставраторов музейных объектов.

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что представленный в статье обзор применений АСМ наглядно демонстрирует широкие возможности этой техники, которая, без сомнения, в ближайшие годы получит свое дальнейшее развитие.

В заключение авторы выражают благодарность Н. В. Андреевой за помощь в проведении исследований образцов мрамора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие. М.: Техносфера, 2004.
2. Jarvis M. R., Perez R., Payne M. C. Can Atomic Force Microscopy Achieve Atomic Resolution in Contact

Mode // Physical Review Letters. 2001. Vol. 86, № 7. P. 1289–1290.

3. Foster A. Theoretical Modelling of Non-contact Atomic Force Microscopy on Insulators: the PhD Thesis / University College London, Condensed Matter and Materials Physics Group. 2000.

4. Stark R. W., Drobek T., Heckl W. M. Tapping-mode atomic force microscopy and phase-imaging in higher eigenmodes // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74, № 22. P. 3296–3298.

5. Magonov S. N. AFM in Analysis of Polymers // Encyclopedia of Analytical Chemistry / ed. by R. A. Meyers. Wiley, Chichester, 2000. Vol. 15. P. 13809.

6. Venkataramani K. Non-contact Atomic Force Microscopy Studies of Metal Oxide Surfaces and Oxide Supported Metal Nanoclusters: the PhD Thesis. Aarhus University: Faculty of Science, 2010.

7. Kuwahara Y., Uehara S. AFM Study on Surface Microtopography, Morphology and Crystal Growth of Hydrothermal Illite in Izumiyama Pottery Stone from Arita, Saga Prefecture, Japan // The Open Mineralogy J. 2008. № 2. P. 34–47.

8. Schuh C. S. Nanoindentation studies of materials // Materials Today. 2006. Vol. 9, № 5. P. 32–40.

9. Gerken M., Miller D. A. B. Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion // Applied Optics. 2003. Vol. 42, № 7. P. 1330–1345.

10. Morphological Instability of a Confined Polymer Film in a Thermal Gradient / E. Schaffer, S. Harkema, M. Roerdink et al. // Macromolecules. 2003. Vol. 36, № 5. P. 1645–1655.

11. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

12. Biological Applications of the AFM: From Single Molecules to Organs / S. Kasas, N. H. Thomson, B. L. Smith, P. K. Hansma, J. Miklossy, H. G. Hansma // Int. J. Imaging Syst. Technol. 1996. Vol. 8. P. 151–161.

13. Lyubchenko Y. L., Shlyakhtenko L. S., Ando T. Imaging of nucleic acids with atomic force microscopy // Methods. 2011. Vol. 54. P. 274–283.

14. Observing structure, function and assembly of single proteins by AFM / D. J. Muller, H. Janovjak, T. Lehto et al. // Progress in Biophysics & Molecular Biology. 2002. Vol. 79. P. 1–43.

15. McPherson A., Kuznetsov Y. G. Imaging of Cells, Viruses, and Virus – Infected Cells by Atomic Force Microscopy // Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2011. Vol. 75, № 2. P. 268–285.

16. Atomic Force Imaging of Ocular Tissues: morphological study of healthy and cataract lenses / A. Antunes, F. V. Gozzo, M. I. Borella, M. Nakamura, A. M. V. Sfatle, P. S. M. Barros, H. E. Toma // Modern Research and Educational Topics in Microscopy. 2007. Vol. 1. P. 29–36.

17. Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography / X. N. Xie, H. J. Chung, C. H. Sow, A. T. S. Wee // Materials Science and Engineering. 2006. Vol. 54. P. 1–48.

18. Pascual M. L. V. D., Domenech-Carbo M. T., Domenech-Carbo A. Characterization of Maya Blue pigment in pre-classic and classic monumental architecture of the ancient pre-Columbian city of Calakmul (Campeche, Mexico) // J. of Cultural Heritage. 2009. Vol. 12, iss. 2. P. 140–148.

19. Sandu I. C. A., Busani T., Helena de Sa M. The surface behavior of gilding layer imitations on polychrome artefacts of cultural heritage // Surface and Interface Analysis. 2011. Vol. 43, iss. 8. P. 1171–1181.

20. Геращенко А. Н., Кирцидели И. Ю., Парфенов В. А. Удаление микромицетов с поверхности памятников при помощи лазерной обработки // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. «Физико-математические науки». 2009. № 4 (88). С. 113–118.

V. A. Parfenov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

I. A. Yudin

Magneton J. S. Co.

ATOMIC FORCE MICROSCOPY AND ITS APPLICATION IN SCIENCE, ENGINEERING AND RESTORATION

The review of analytical technique for study of micro-structure and topography of surfaces of materials with extra-high resolution – atomic-force microscopy – is given in the paper. Brief description of physical principles of operation and main application of this technique, including physical and biological researches as well industry and artworks conservation, is presented.

**Scanning probe microscopy, atomic-force microscope, nanoindentation, thin films,
biology and medicine, restoration, ablation**
