

УДК 621.315.592

В.А. Быков

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЭМС И НЭМС, МИКРО– И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к нанотехнологиям вообще, а следовательно, и к оборудованию, необходимому для проведения фундаментальных и прикладных работ, техническому обеспечению новых производственных мощностей, которые позиционируются как производства, базирующиеся на нанотехнологиях. Возможные варианты решения задач, над которыми в настоящее время работают разработчики группы компаний ИТ-МДТ, будут показаны в представляемом докладе.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), оборудование для нанотехнологий, НАНОФАБ, ИНТЕГРА.

Введение. Одно из важнейших направлений использования нанотехнологий – наноэлектроника, т.е. разработка и промышленное изготовление наноэлектронных элементов, а также интеграция их с существующими технологиями для миниатюризации электронных устройств. В этом процессе можно выделить три этапа: 1) разработка наноэлектронных элементов, 2) создание наноэлектронных схем и 3) тестирование и определение функциональных характеристик как отдельных элементов, так и сложных конструкций на их основе. Фактически молекулярный уровень характерных размеров накладывает исключительно жесткие требования по чистоте условий, в частности большая часть операций должна производиться в условиях сверхвысокого вакуума. Все это естественным образом привело к необходимости создания конвейерных технологических комплексов, в которых все шаги по созданию, модификации наноэлектронных элементов, встраиванию их в более сложные схемы и тестированию свойств осуществляются в рамках единого автоматизированного процесса. Так, сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс на платформе НАНОФАБ 100 представляет собой совокупность кластеров, каждый из которых включает в себя несколько технологических модулей, объединенных общей транспортно-распределительной системой. Кластеры могут быть ориентированы как на технологии групповой обработки (молекулярно-пучковая эпитаксия, газофазное осаждение, лазерная абляция и т.д.), так и на технологии нанолокальной обработки и исследования. К этим последним и

относятся модули сканирующей зондовой микроскопии (вместе с модулями фокусированных ионных пучков, растровой электронной микроскопии, масс-спектрального анализа и некоторыми другими). Методы СЗМ используются для оценки качества поступающих пластин (входной контроль), для исследования пластин, прошедших через ту или иную обработку (межоперационный контроль), а также для тестирования свойств уже готовых наноэлектронных элементов и схем (функциональный контроль).

Подводя итоги, можно сказать, что процесс развития СЗМ оборудования миновал эпоху универсальных приборов и вошел в эпоху специализации. Вектор специализации СЗМ для научных исследований – это а) максимальная гибкость в изменении «научной специальности» (в рамках НаноЛаборатории ИНТЕГРА эта задача решена за счет большого числа специализированных модулей, совместимых с единой общей платформой) и б) возможность интеграции с другими («не СЗМ-ными») исследовательскими подходами. Специализация оборудования для образовательного процесса идет по пути снижения стартового порога - упрощение СЗМ приборов, с одной стороны, и обеспечение методической базы – с другой. Наконец, специализация СЗМ в составе автоматизированных промышленных комплексов полностью определяется требованиями технологического процесса. Автоматизированные конвейерные комплексы для разработки и изготовления наноэлектронных устройств сейчас находятся в самом начале своего пути, и лишь спустя

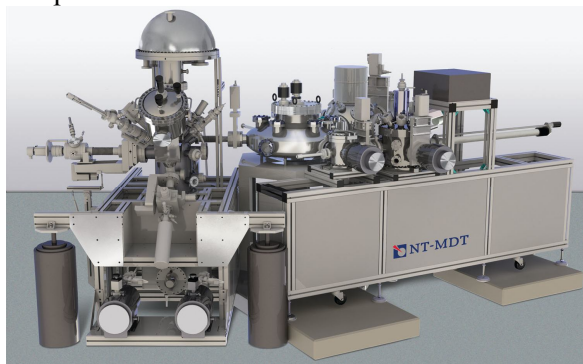
несколько лет можно будет с определенной долей уверенности предсказывать траекторию их развития.

Приборостроение для нанотехнологии – состояние и перспективы развития. Разработчикам МЭМС и НЭМС, современной микроэлектроники, приборов нанoeлектроники, а также новых технологических процессов в этих направлениях интересны нанотехнологические комплексы – НАНОФАБЫ, которые могут быть реализованы в кластерных, многомодульных вариантах, легко перестраиваемых под нужды различных технологических процессов. На таких станциях возможны как моделирование требуемых элементов, так и аналитические исследования результатов технологических операций и свойств самих элементов.



Система НАНОФАБ 100, функционирующая в ЮФУ (Таганрог)

Особый интерес представляют собой исследовательские нанотехнологические комплексы при уникальных установках, таких как синхротроны, импульсные лазеры на свободных электронах.



Малый нанотехнологический комплекс НАНОФАБ 25, объединяющий технологические и аналитические модули

Разработка специальных аналитических модулей, таких как модули электрофизических измерений, совмещенные с модулями рентгеновской спектроскопии и, в особенности, высоко разрешающей рентгеновской микроскопии,

позволит, наряду с высоким пространственным (порядка 10 нм), получать и высокое временное разрешение, что позволит изучать, по крайней мере, квазиобратимые динамические процессы в наноструктурах с разрешением до 0,1 нс на синхротронах и на несколько порядков выше на лазерах на свободных электронах.

СЗМ для широкого круга исследований – концепция НаноЛаборатории. Вскоре, после того как стало ясно, что сканирующая зондовая микроскопия дает возможность не только получать изображения наноразмерных объектов, но и проводить количественные измерения самых разных физических параметров, стала очевидной и принципиальная проблема дальнейшего развития. Очевидно, что не может быть один и тот же прибор одинаково приспособлен для работы со всеми возможными объектами. Например, объекты клеточных биологов очень мягкие и легко подвергаются необратимому разрушению. Для работы с ними необходимы не только особые «щадящие» режимы СЗМ и специальные «мягкие» зонды, но и особые условия окружающей среды – жидкость, атмосфера с повышенным содержанием CO_2 и т.д. Алмазные кристаллы или сверхтвердые покрытия, напротив, слишком тверды, поэтому обычные зонды и стандартные технические решения также не годятся для изучения многих их характеристик. Для каких-то экспериментов требуются условия высокого вакуума, в каких-то случаях исследователи интересуют изменения, происходящие с образцом в ходе электрохимических превращений, для каких-то задач образец необходимо нагреть или охладить. Получается, что для успешной работы с любым «нестандартным» объектом исследователь должен найти, приобрести или изготовить «нестандартный» высокоспециализированный СЗМ прибор. Поскольку «нестандартных» объектов существенно больше, чем «стандартных», в самом ближайшем будущем научное сообщество должно было бы столкнуться с огромным разнообразием узкоспециализированных вариантов СЗМ. Наконец, это многообразие становится совсем уже невообразимым, если осознать, что для ответа на многие актуальные вопросы необходимо провести комплексное исследование образца не только с помощью СЗМ, но и другими методами – спектроскопическими, дифрактометрическими, электронно-микроскопическими и т.д. и т.п.

НТ-МДТ была первой компанией, которая пошла по пути разработки универсальной исследовательской платформы, в рамках которой можно относительно легко менять специали-

зацию данного конкретного прибора путем замены и/или добавления отдельных модулей. Коммерческое имя платформы – ИНТЕГРА – указывает на возможность интеграции разных подходов. Так, Нано- Лаборатория ИНТЕГРА Прима – это универсальный СЗМ для решения наиболее типовых, «стандартных» задач. Функциональность этого исследовательского комплекса может быть расширена в одном из 7 направлений.

ИНТЕГРА Аура – низковакуумные измерения. Добавление модулей, обеспечивающих низковакуумные условия, позволяет существенно повысить чувствительность двух- и многопроходных СЗМ методик, в которых стоит цель измерить электрические или магнитные свойства образца. Дело в том, что в вакууме повышается добротность колебаний кантилевера, а значит, увеличиваются чувствительность, надежность и достоверность в измерениях слабых сил. При этом переход от атмосферного давления к вакууму 10^{-2} торр обеспечивает почти десятикратное возрастание добротности. При дальнейшем увеличении вакуума величина добротности быстро выходит на плато. Таким образом, с точки зрения увеличения добротности кантилевера ИНТЕГРА Аура представляет собой оптимальное соотношение цены и качества. Причем под ценой в данном случае подразумевается не только собственно стоимость установки. По сравнению с высоковакуумными комплексами, существенно меньшим оказывается время, необходимое для достижения необходимого уровня вакуума (в ИНТЕГРА Аура вакуум, обеспечивающий десятикратное увеличение добротности, достигается всего за 1 минуту), легче становится обслуживание и т.д.

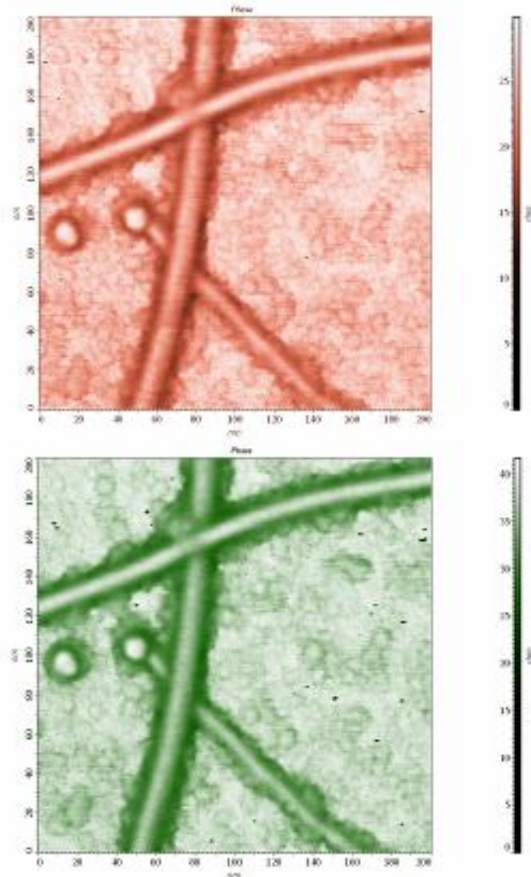
ИНТЕГРА Максимум – автоматический сбор больших массивов данных. Для многих промышленных приложений принципиально важно иметь возможность исследовать большие образцы, накапливая большие массивы данных в автоматическом режиме по заранее заданным алгоритмам. Это может быть контроль качества поверхностей оптических элементов (например, исследование шероховатости поверхности линз), или определение конкретных электрических параметров в заданных областях 100 мм кремниевой пластины, или тестирование большого массива микрообразцов полимерного материала для выбора оптимального сочетания механических свойств при оптимизации условий химического синтеза. Таким образом, отличительные черты данного направления развития – это а) работа с большими образцами и б) сбор

больших массивов данных в автоматическом режиме.

ИНТЕГРА Терма – решение проблемы термодрейфа. В любом зондовом микроскопе существует некоторый дрейф – неконтролируемое смещение зонда относительно образца. Оно возникает из-за того, что в работающем приборе всегда существуют градиенты температуры. Неравномерное расширение или сжатие разных деталей устройства как раз и приводят к тому, что зонд и образец с течением времени смещаются относительно друг друга. В хороших коммерческих СЗМ такой дрейф составляет 20-50 нм в час (величина дрейфа, кроме всего прочего, зависит от внешних условий – в термостатируемом помещении, в котором отсутствует циркуляция воздуха, величина дрейфов приближается к нижней границе диапазона). Такой дрейф не сказывается на результатах работы, если исследование проводится на относительно большой площади. Однако при размере скана несколько десятков нанометров для многих задач термодрейф становится критическим. Прежде всего, это эксперименты, требующие продолжительного времени. Получить единичное изображение можно меньше чем за минуту, смещение в несколько ангстрем, которое произойдет за это время, не сильно исказит картину. Однако если на небольшом поле сканирования выбран некий характерный объект, например наночастица, и необходимо получить несколько последовательных изображений именно данной частицы с получасовыми интервалами, – такая задача не под силу обычным СЗМ. Существенно затруднены из-за дрейфов оказываются эксперименты, связанные с манипуляциями нанообъектами, а также нанолитографии на малых полях. Ну и, конечно, влияние температурных дрейфов приобретает колоссальное значение в тех случаях, когда температуру образца нужно менять в процессе исследования. Диапазон неконтролируемых смещений при этом (в лучших коммерческих СЗМ приборах) составляет 50-300 нм, т.е. при нагреве или охлаждении образца на 10° нужно быть готовыми к дрейфу до 3 микрон.

НаноЛаборатория ИНТЕГРА Терма была разработана как СЗМ со сниженным уровнем температурных дрейфов. За счет симметрии конструкции измерительного модуля, тщательного подбора материалов с учетом их коэффициентов теплового расширения, а также благодаря двойному контуру внутренней термостабилизации, величина дрейфа при изменении температуры образца в ИНТЕГРА Терма составляет 10-15 нм на градус К. Понятно, что

полностью избавиться от температурных дрейфов невозможно, однако уникальность конструкции данного СЗМ состоит в том, что при изменении температуры образец и зонд в нем смещаются сонаправленно. Температурное расширение/сжатие частей прибора в этом случае в гораздо меньшей степени влияют на качество СЗМ измерений. Оказалось, что и стабильность системы при долгосрочных экспериментах в условиях постоянной (комнатной) температуры также существенно повысилась – дрейф составляет всего 3-5 нм в час. Таким образом, ИНТЕГРА Терма представляет еще одно направление развития СЗМ – обеспечение стабильности при работе на малых полях (меньше 100 нм) в течение долгого времени (часы).



Два изображения кремниевых нанотрубок, полученные в рамках одного эксперимента, проходившего в течение семи часов: термодрейф за это время составляет всего 35 нм

ИНТЕГРА Спектра – спектроскопия КР сверхвысокого разрешения за пределом дифракции. НаноЛаборатория ИНТЕГРА Спектра изначально создавалась как измерительный комплекс, в котором один и тот же образец можно исследовать методами СЗМ, конфокальной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР).



ИНТЕГРА Спектра – в 2006 году прибор вошел в список 100 важнейших разработок, сформированный журналом “R&D”

Однако в процессе разработки выяснилось, что решение задач по совмещению конфокального оптического микроскопа и СЗМ (уменьшение дрейфов в оптической части системы, позиционирование зонда в определенных зонах светового пучка, повышение эффективности сбора оптических сигналов) открыло путь для принципиально новых возможностей. Оказалось, что зонд (с покрытым золотом острием), расположенный в фокусе светового пучка, может выступать нанолокальным «усилителем» комбинационного рассеяния (КР) в приповерхностном слое образца. Сигнал КР в непосредственной близости от острия зонда оказывается во много раз больше, чем от других участков образца, освещаемых тем же пучком света. Напомним, что минимальный диаметр светового пятна в фокусе оптической системы ограничен дифракцией и не может быть меньше 170 нм, т.е. именно такое разрешение является предельным для КР спектроскопии с помощью конфокального оптического микроскопа. Зона локального усиления КР составляет от нескольких до нескольких десятков нанометров вокруг острия зонда. Именно размером этой зоны определяется разрешение, с которым можно производить спектроскопию КР и картировать распределение интенсивности того или иного характеристического сигнала по поверхности образца (а значит, получать данные о химическом составе образца). Таким образом, конвергенция подходов зондовой микроскопии и подступивших к своему физическому пределу возможностей оптической микроскопии позволила перешагнуть через этот предел и реализовать исследовательский комплекс для КР спектроскопии с пространственным разрешением около 50 нм.