

# СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ\*

Д.Андреюк, к.б.н., В.Быков, д.т.н.  
spm@ntmdt.ru

В настоящее время в линейке продукции НТ-МДТ более 30 приборов для сканирующей зондовой микроскопии. Некоторые из них используются для узкоспециальных применений и относительно медленно меняются со временем. Другие же, наоборот, в процессе отработки потока запросов, предложений и пожеланий, поступающих в результате обратной связи с пользователями, изменяются очень быстро. Очевидно, именно массовые и наиболее быстроменяющиеся виды оборудования могут служить своеобразным индикатором определенной тенденции в зондовой микроскопии а, возможно, и в научном приборостроении в целом. Ниже проанализированы модели сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) НТ-МДТ, которые, как представляется, отражают важные тенденции в развитии отрасли.

## Интеллектуализация оборудования

### Путь первый: интеграция новых возможностей

Современная наука предъявляет исключительно высокие требования к исследовательскому оборудованию, причем ключевым фактором, определяющим конкурентоспособность научной группы или центра является время. Появляются новые многочисленные экспериментальные подходы и, если они эффективны, быстро получают массовое распространение. В такой ситуации ученый должен не только оперативно понять суть нового метода, но и иметь возможность быстро адаптировать под него имеющуюся приборную базу. Именно такое пожелание пользователей было в свое время реализовано специалистами НТ-МДТ при разработке и со-

вершенствовании платформы ИНТЕГРА.

Концепция платформы заключается в максимальной ее открытости для интеграции с другими (помимо СЗМ) методами исследования для получения максимально полной информации с одного и того же образца. На данный момент предельным воплощением концепции можно считать модельный ряд ИНТЕГРА Спектра, в которой максимально широкий набор возможностей сканирующей зондовой микроскопии объединен со спектральными измерениями и, прежде всего, спектроскопией комбинационного рассеяния (КР).

Прообраз данной модели разрабатывался с 1998 года для исследования локального усиления сигнала КР вблизи наноразмерных неровностей. Позже выяснилось, что эти наработки наилучшим образом позволяют реализовать так называемый режим TERS – Tip Enhanced

Raman Scattering, когда объект одновременно исследуется в режиме конфокальной микроскопии КР и в режиме атомно-силовой микроскопии. При этом специальный зонд с металлизированным острием постоянно находится в луче лазера. За счет усиления КР на острие удается локализовать КР сигнал от образца с разрешением в плоскости до 14–15 нм [1, 2].

В контексте анализа трендов ИНТЕГРА Спектра также представляет интерес, как пример глубокой интеллектуализации научного прибора вследствие интеграции большого количества разных методических подходов. В наиболее распространенной конфигурации данной системы один и тот же образец может быть исследован с помощью различных методов атомно-силовой микроскопии, ближнепольной оптической микроскопии, конфокальной микроскопии/спектроскопии КР, а также метода-

\* Статья представлена ЗАО НТ-МДТ



ми конфокальной оптической и конфокальной флуоресцентной микроскопии [3]. Пример комплексного мультиметодного анализа образца графена показан на рис.1.

Благодаря возможности соединить в одном эксперименте несколько разных методических подходов ИНТЕГРА Спектра была использована для решения таких далеких друг от друга задач, как обнаружение N-вакансий в наноразмерных алмазах [4], анализ биодеградации углеродных нанотрубок в клетках иммунной системы человека [5] и многих других.

Перспективность повышения интеллектуализации за счет интеграции различных исследовательских подходов была оценена экспертами американского журнала Research and Development: в 2006 году прибор ИНТЕГРА Спектра был включен в список 100 лучших мировых разработок в области аналитического приборостроения (R&D100).

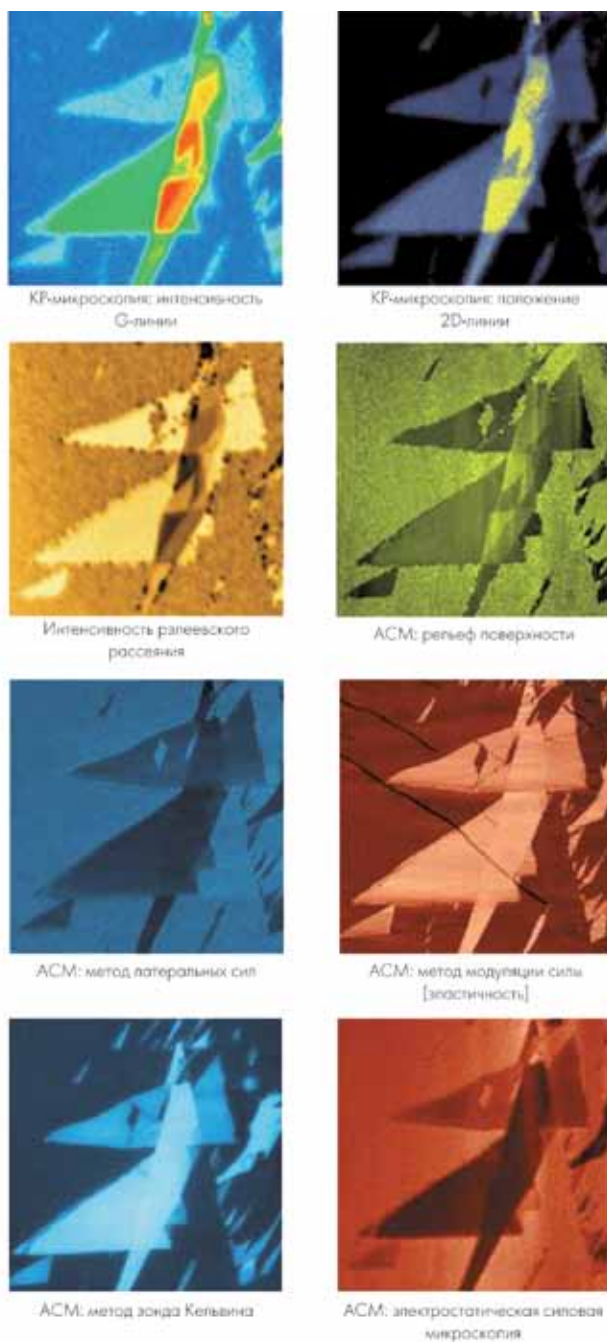
В 2010 году крупное международное консалтинговое агентство Frost&Sullivan признало совмещение различных методов, реализованное в этом приборе, технологией, имеющей высокий потенциал для массовой коммерциализации (Frost&Sullivan Best Practices Award 2010).

### Интеллектуализация оборудования

Путь второй: автоматизация, снижение барьеров для новичков

Противоположную тенденцию демонстрирует другая универсальная модель в линейке СЗМ оборудования – Солвер НЕКСТ, который по сравнению с приборами на платформе ИНТЕГРА имеет полностью закрытый дизайн (его невозможно присоединить к другому прибору или устройству), относительно небольшое пространство для размещения образца, фиксированный набор методов СЗМ. Казалось бы, что эта модель не может иметь рыночных перспектив, однако прибор имеет самую высокую

Рис.1. Исследование графена с помощью ИНТЕГРА Спектра



скорость прироста числа заказов. С 2007 года, когда Солвер НЕКСТ впервые вышел на рынок, количество поставленных за год приборов ежегодно удваивалось, и, судя по результатам первого квартала 2011 года, эти темпы сохранятся и в текущем году.

Причина высокого спроса кроется в способности модели решить главную проблему большинства современных лабораторий – нехватку времени

на освоение нового метода. В данном случае этот метод – сканирующая зондовая микроскопия. В массе современных исследований данный метод уже не ставится во главу эксперимента. Он – всего лишь один из многих инструментальных путей количественного измерения определенных характеристик поверхности объекта. И ученые не готовы тратить дефицитное время на освоение незнакомого прибора, изучение програм-



Рис.2. НАНОЭДЬЮКАР II – общий вид прибора

много обеспечения, проведение большого числа "пристрелочных" экспериментов для определения оптимального сочетания настроек.

Солвер НЕКСТ разработан специально для решения подобных типовых задач. В нем "зашит" огромный пласт экспертного знания, накопленный специалистами компании за два десятилетия работы в зондовой микроскопии, а также полученных в результате общения с пользователями оборудования компании в различных областях науки. В итоге для большинства стандартных измерений результат получается при простом следовании предлагаемому по умолчанию алгоритму, т. е. прибор рекомендует настройки для планируемого измерения, и, если оператор соглашается, сам выдает надежный, полностью воспроизводимый, протоколированный и соответствующий международным стандартам результат. Это принципиально для начинающего пользователя, поскольку снижает требования к его квалификации и опыту работы. С другой стороны, по ряду ключевых технических характеристик (шумы, нелинейность, контроль перемещений зонда, алгоритмы быстрого сканирования и др.) Солвер НЕКСТ полностью конкурентоспособен с лучшими научными приборами для СЗМ на мировом рынке и внутри линейки оборудования НТ-МДТ.

Таким образом, второй магистральный путь интеллектуализации

научного оборудования – максимально полная автоматизация управления, упрощение настроек, и, как результат, снижение потенциального барьера для начинающего пользователя. Именно эти особенности прибора Солвер НЕКСТ признаны экспертами жюри конкурса R&D100 (R&D100 Award 2009) как перспективные.

### От сложного и дорогого к простому и дешевому

Всегда и во всех отраслях промышленности существует перманентный тренд на снижение цены изделия: постоянно появляются новые разработчики, предлагающие минимальный набор возможностей дешевле, чем у производителей с историей и с именем. Логика очевидна – потребитель, имея дело с известным брендом, страхует себя от рисков (меньше вероятности поломки, больше возможностей для технической поддержки, обновлений и т. д.). Разница в цене при одинаковом наборе возможностей – это то, во что будущий пользователь оценивает свой риск. Обычно крупные производители не вступают в конкуренцию в нижнем ценовом сегменте, поскольку их главное достоинство – качество при максимальном количестве возможностей. Сделать недорогой прибор качественным – это задача почти невозможная. Однако благодаря удачному стечению обстоятельств в НТ-МДТ удалось создать одновременно качественный и относительно недорогой прибор. Это НАНОЭДЬЮКАТОР II – новое поколение прибора, которое изначально задумывалось как расширенный вариант "СЗМ тренажера".

Первое поколение НАНОЭДЬЮКАТОРА претерпело несколько усовершенствований и отлично зарекомендовало себя в качестве учебного. Более 200 таких изделий работает по всему миру: в нескольких десятках российских школ оборудованы классы с учебными станциями СЗМ. В определен-

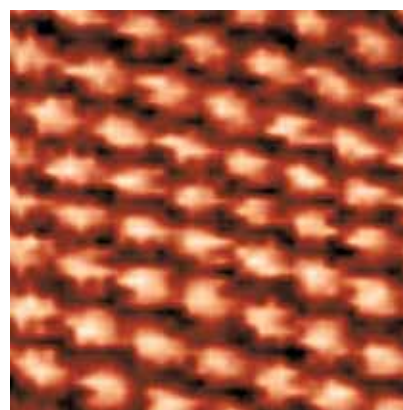


Рис.3. СТМ-изображение атомарной решетки на графите. Размер 2×2 нм

ный момент разработчики компании столкнулись с принципиальными ограничениями в плане дальнейшего усовершенствования изделий. Им пришлось переработать всю конструкцию. Поскольку функционал для учебного прибора не является критичным, главной целью была себестоимость. К моменту старта проекта по созданию нового учебного прибора в компании уже был опыт разработки Солвера НЕКСТ, имелся серьезный задел в электронике, существовали ключевые наработки по программному обеспечению. В итоге сформировалась следующая задача – необходимо переработать конструкцию Солвера НЕКСТ так, чтобы вписаться в граничные условия по себестоимости, что и было с успехом решено.

Был создан компактный, эргономичный и эстетичный прибор (рис.2), себестоимость которого при серийном производстве и минимальной комплектации удалось довести до уровня прибора первого поколения. Таким образом, цена минимального варианта образовательного класса также была примерно прежней (плюс-минус колебания курса валют и инфляция).

На рис.3 показана атомарная решетка графита, полученная с помощью НАНОЭДЬЮКАТОРА II в режиме СТМ. Принципиальные отличия нового прибора от прежнего – общий уровень качества и существенное наращива-





ние функциональные возможности.

Например, в конструкции предусмотрена возможность работы с вольфрамовым зондом, который можно изготавливать самостоятельно (как в первом поколении НАНОЭДЬЮКАТОР), и стандартным кремниевым зондом с кантилевером, которые могут составить при эксплуатации дополнительную статью расходов, хотя результаты измерений при использовании таких зондов существенно выше. Сканеры НАНОЭДЬЮКАТОР II оборудованы датчиками перемещений зонда, что существенно улучшает метрологические характеристики нового прибора. Программное обеспечение разработано для двух наиболее распространенных операционных систем – Windows и MAC OS, имеется специальное приложение для обмена данными с мобильными устройствами – iPhone, iPad и др. Единственное, в чем НАНОЭДЬЮКАТОР II принципиально "недоотягивает до старшего брата" – это отсутствие автоматизации. Все подготовительные операции, выполняемые в Солвере НЕКСТ с помощью 14 встроенных двигателей и "умных" алгоритмов, в НАНОЭДЬЮКАТОРе приходится выполнять вручную.

Таким образом, выпускаемая НАНОЭДЬЮКАТОР II, НТ-МДТ

по сути создала уникальную ситуацию: на рынке появился профессиональный исследовательский прибор, за которым стоит вся мощь технической и информационной поддержки НТ-МДТ и при этом находящийся в нижнем сегменте цены. Реакция оказалась предсказуемой: заказы на новый прибор расписаны до конца года и продолжают поступать!

Подводя итог, назовем три наиболее заметные тенденции.

1. Интеллектуализация научного оборудования, повышение сложности эксперимента за счет комплексного подхода. Максимизация информативности эксперимента накладывает требование возможности интегрировать внешние устройства, добавлять новые модули, согласовывать контроль на уровне электроники и ПО.

2. Интеллектуализация научного оборудования с одновременным упрощением интерфейса. Наиболее сложные и ответственные операции автоматизируются и управляются специальными "умными" алгоритмами. Резко снижаются требования к начальной квалификации оператора, однако качество измерений при решении типовых задач остается на профессиональном уровне.

3. Создание экономичных моделей.

## Литература

1. J. Stadler, T. Schmid, and R. Zenobi. Nanoscale Chemical Imaging Using Top-Illumination Tip-Enhanced Raman Spectroscopy. – Nano Letters, 2010.

2. A. Chan & S. Kazarian Finding a needle in a chemical haystack: tip-enhanced Raman scattering for studying carbon nanotubes mixtures. – Nanotechnology 21, 2010.

3. P. Dorozhkin, E. Kuznetsov, A. Schokin, S. Timofeev, and V. Bykov. AFM + Raman Microscopy + SNOM + Tip-Enhanced Raman: Instrumentation and Applications. – Microscopy Today, 2010.

4. C. Bradac, T. Gaebel, N. Naidoo, M. J. Sellars, J. Twamley, L. J. Brown, A. S. Barnard, T. Plakhotnik, A. V. Zvyagin and J. R. Rabeau Observation and control of blinking nitrogen vacancy centres in discrete nanodiamonds. – Nature nanotechnology, 2010.

5. V. Kagan, N. Konduru, W. Feng, B. Allen, J. Conroy, Y. Volkov, I. Vlasova, N. Belikova, N. Yanamala, A. Kapralov, Y. Tyurina, J. Shi, E. Kisin, A. Murray, J. Franks, D. Stolz, P. Gou, J. Klein-Seetharaman, B. Fadeel, A. Star and A. Shvedova. Carbon nanotubes degraded by neutrophil myeloperoxidase induce less pulmonary inflammation. – Nature Nanotechnology, 2010.