

# Сканирующий зондовый микроскоп ВЕГА - система для решения задач микро- и наноэлектроники

В.А. Быков, Ан.В. Быков, Ю.А.Бобров, В.В.Котов, С.И. Леесмент, В.В. Поляков

ООО «НТ-МДТ», г. Москва

**Аннотация** — Изложены возможности нового прибора разработки Компании ООО «НТ-МДТ» - сканирующего зондового микроскопа «ВЕГА», способного работать с образцами размером до 200х200х40 мм с предельным для атомно-силовой микроскопии разрешением для исследования свойств и метрологического контроля поверхностных наноструктур микро и наноэлектроники.

**Ключевые слова** — сканирующий туннельный микроскоп, СТМ, сканирующий атомно-силовой микроскоп, АСМ, сканирующий зондовый микроскоп, СЗМ, комбинационное рассеяние, Рамановская спектроскопия, Рамановская микроскопия сверхвысокого разрешения, ближнепольная оптическая микроскопия, безапертурная сканирующая зондовая микроскопия ближнего поля, кантилевер, картридж, нанотехнология, метрология, нанометрология, наноэлектроника, медицина, диагностика, онкология, вирусы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени сканирующая зондовая микроскопия вошла в состав классических методов исследования наноструктур и широко используется для качественной оценки физико-химических, геометрических, электрических, магнитных параметров поверхностей, биологических объектов, в том числе, живых клеток и их реакцию на состав и параметры окружающей среды.

Кроме топографии высокого пространственного разрешения, сканирующие зондовые микроскопы позволяют измерять целый ряд физических свойств поверхностных структур:

- распределение сил трения между зондом и поверхностью в процессе сканирования;
- распределение поверхностного электрического потенциала (Кельвин-мода);
- распределение поверхностной проводимости;
- распределение электрической емкости системы зонд-поверхность  $C(x,y)$ , а также  $dC/dz$ ,  $dC/dV$ ;
- распределение магнитных сил в системе зонд с заданной намагниченностью – поверхность;
- распределение пьезоэлектрических свойств;
- распределение теплопроводности;
- распределение механических свойств (модуля Юнга, твердости);
- распределение адгезионных свойств.

- Исследовать электрические свойства поверхностей, плотность поверхностных состояний.
- Исследовать строение и свойства приповерхностных двойных слоев на границе – изучаемый объект, адсорбированный на твердой подложке – проводящая жидкость.
- Изучать и диагностировать живые клетки и образцы тканей, изучать взаимодействия вирусов и лекарственных препаратов с клетками конкретного организма.
- Изучать с разрешением, значительно превышающим дифракционный предел оптические свойства поверхностей.
- Производить модификацию поверхности, замещать химические функциональные группы в режимах СЗМ литографии.

Для этого интенсивно развиваются т.н. комбинированные методы, позволяющие одновременно работать в режимах атомно силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (Рамановскую), люминесцентной спектроскопии, безапертурной ближнепольной микроскопии с возможностью визуализации распределение модулированного вибрирующим зондом рассеянного излучения в видимом, ИК и терагерцовом диапазонах длин волн с разрешением до 10 нм.

В результате интенсивного развития микроэлектроники появились новые, мощные микропроцессоры, программируемые логические интегральные схемы, появляются схемы адаптивной логики, позволяющие создавать приборы с элементами искусственного интеллекта, что существенно снижает требования к уровню пользователя приборов. Уже в настоящее время в функциях приборов введена возможность быстрого, автоматического подбора параметров сканирования в «Теппинг» моде, что делает атомно-силовые микроскопы нашей компании доступными для технологов, материаловедов и, даже, школьников, дает возможность получать высококачественное изображение топографии поверхности.

Появившаяся новая элементная база позволила создать контроллеры, обеспечивающие скорость сканирования до 2Гц на строку и при этом снимать силовую кривую из 3000 измерений в точке.

Реализация этой возможности и позволила нам реализовать режим сканирующей зондовой спектроскопии – HybriD™ mode (рис.1) [2] – Прыжковая АСМ, что позволило измерять:

- Рельеф поверхности в режимах притяжения и отталкивания
- Модуль Юнга
- Адгезию и работу адгезии
- Проводимость
- Латеральный и вертикальный пьезоотклик
- Температуру и теплопроводность
- Термоэлектрические свойства
- Электростатические свойства: потенциал поверхности, работу выхода, диэлектрическую проницаемость и т.д.

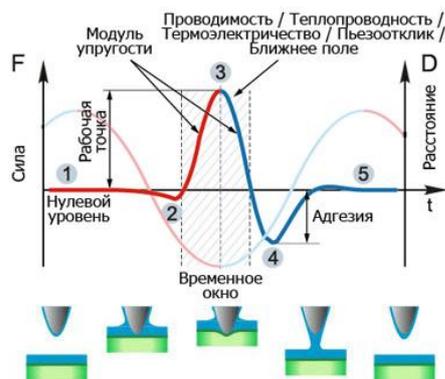


Рис.1. HybriD™ mode – Прыжковая АСМ

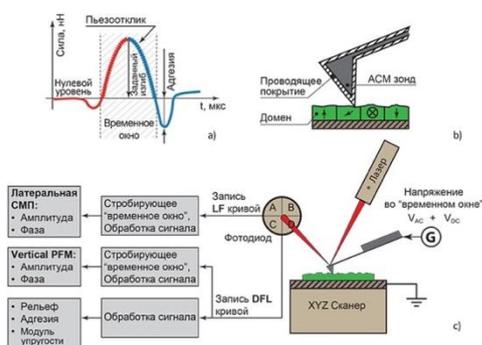


Рис.2. Прыжковая АСМ пьезоотклика

Дальнейшее развитие HybriD™ mode позволило создать новые, очень информативно-емкие методы, позволяющие измерять пьезоэлектрические свойства материалов (рис.2) [14,15]. В этом режиме в процессе измерения силовой кривой в нужный момент между зондом и образцом подается переменный электрический сигнал заданной амплитуды и частоты, что позволяет исследовать пьезоэлектрические материалы. Поскольку зонд АСМ отводится от поверхности в каждой точке сканирования, сила латерального взаимодействия зонда и образца

значительно уменьшается по сравнению с обычным контактным методом.

Это дает новые возможности для исследований пьезоотклика мягких, плохо закрепленных и хрупких объектов, таких как биологические образцы, наночастицы и т.д.

Кроме того, становится возможным использование зонда АСМ с более высокой жесткостью и резонансной частотой. Благодаря этому была реализована возможность двухпроходных резонансных электростатических измерений: Кельвин-зондовая Силовая Микроскопия или Электростатическая Силовая Микроскопия могут использоваться одновременно с измерениями рельефа, адгезии, модуля упругости и исследованиями пьезоотклика.

В настоящее время разработано и производится целый ряд сканирующих зондовых микроскопов, комбинаций СЗМ и спектрометров, приборов для обучения, контроля параметров строительных объектов ([www.ntmdt-si.ru](http://www.ntmdt-si.ru)).

Для исследования наноструктур микро- и нанoeлектроники разработаны специальные приборы – ВЕГА, позволяющие проводить исследования на пластинах диаметром до 200 мм (рис.3). Вибрационная защита, термостабилизация приборов такова, что позволяет получать разрешение вплоть до атомарного.

ВЕГА – многофункциональный сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ) широкого применения предназначен для проведения измерений на образцах больших размеров (до 200 мм в диаметре). Он принадлежит к новейшему поколению сканирующих зондовых микроскопов, обладающих высокой степенью автоматизации, широким набором АСМ методик, цифровым контроллером. Легкость управления для малоопытного пользователя обеспечивается автоматической настройкой системы регистрации изгибов кантилевера.

Ключевыми особенностями АСМ ВЕГА являются:

Предельное качество отображения, что обеспечивается использованием встроенной акусто- и виброизоляции, термостабилизации, лучшей в индустрии чувствительностью оптической системы регистрации и уникальной конструкцией системы сканирования зондом, позволяющей достигать атомного разрешения в рутинных измерениях.

В базовой конфигурации доступны 50+ АСМ методик, включая метод HybriD, что позволяет проводить все ультрасовременные наномеханические, электрические и магнитные исследования.

Интеллектуальный алгоритм ScanTronic™ для оптимизации параметров сканирования одним кликом мыши, позволяющий проводить совершенные измерения рельефа с использованием амплитудно-модуляционного метода независимо от опыта оператора.



Si пластина диаметром 200 мм и набор образцов на рабочем столе микроскопа АСМ НОРР 6х6 нм; распределение поверхностного потенциала на кремниевой наноструктуре 40х40мкм.

**Рис. 3. Сканирующий зондовый микроскоп ВЕГА**  
(<https://www.ntmdt-si.ru/products/automated-afm/vega>)

Автоматизированное исследование множественных образцов с использованием простого пользовательского интерфейса для создания сценария поточечного сканирования и базы данных для сохраненных полученных изображений.

Контроль образцов с размерами до 200×200 мм и толщиной до 40 мм в любой точке поверхности с точностью позиционирования 1 мкм.

Широкая возможность кастомизации: установка дополнительного оптического оборудования, разработка специализированных держателей образцов, совмещение с транспортной системой, автоматизация измерений и анализа данных в соответствии с требованием заказчика.

Атомно-силовой микроскоп ВЕГА позволяет проводить следующие измерения:

#### **Контактный метод:**

Рельеф, Латеральная сила, Силовая модуляция, Ток растекания, Силовая микроскопия пьезоотклика, Контактная резонансная микроскопия.

#### **Амплитудно-модуляционный метод:**

Рельеф, Отображение фазы, Одно- и двухпроходная, Кельвин-зондовая силовая микроскопия с фазовой и амплитудной модуляцией, Двухпроходная и Покадровая Магнитно-силовая микроскопия, Одно- и двухпроходная Электростатическая силовая микроскопия, Сканирующая ёмкостная силовая микроскопия (отображение  $dC/dZ$  и  $dC/dV$ ).

#### **HybriD метод:**

Рельеф, Модуль упругости (от 104 до 1011 Па), Работа адгезии, Объемная силовая спектроскопия, Ток, Пьезоотклик, Вязкоупругость, Кельвин-зондовая силовая микроскопия с фазовой и амплитудной модуляцией, Магнитно-силовая микроскопия, Электростатическая силовая микроскопия, Сканирующая ёмкостная силовая микроскопия (отображение  $dC/dZ$  и  $dC/dV$ ).

#### **Спектроскопия:**

Сила-, Амплитуда-, Фаза-, Частота-, Ток-расстояние,  $I(V)$ , Пьезоимпульсная, Пользовательские методики.

#### **Нанолитография:**

Вольтовая, Токовая, Силовая (Векторные и растровые).

#### **Выводы**

Можно уверенно констатировать, что к настоящему времени в России выполнены разработки и организовано производство практически полного, за исключением сверхвысоковакуумных СЗМ, комплекса приборов и методов для исследования микро и наноструктур с использованием сканирующих зондовых микроскопов. Для лабораторий – созданы приборы линии ИНТЕГРА, для системы образования в школах и колледжах - бюджетные, но достаточно мощные НАНОЭДЬЮКАТОРЫ и СОЛВЕР-НАНО, а для исследовательских работ – приборы кратко описанные в настоящей статье. Следует отметить, что развитие нанoeлектроники, создание новой элементной базы дают возможность дальнейшего совершенствования приборов, все более и более внедрять системы искусственного интеллекта в программное обеспечение с раскрытием возможностей развивающейся элементной базы контроллеров, срок морального старения которых сегодня составляет около 5 лет.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] <https://www.ntmdt-si.ru/products/automated-afm/vega>
- [2] <https://www.ntmdt-si.ru/products/features/hybrid-mode>
- [3] Stöckle, Raoul M.; Suh, Yung Doug; Deckert, Volker; Zenobi, Renato (February 2000). "Nanoscale chemical analysis by tip-enhanced Raman spectroscopy". *Chemical Physics Letters*. 318 (1–3): 131–136.
- [4] Thomas Schmid, Christian Camus, Sebastian Lehmann, Daniel Abou-Ras, Christian-Herbert Fischer, Martha Christina Lux-Steiner, and Renato Zenobi. Spatially resolved characterization of chemical species and crystal

- structures in CuInS<sub>2</sub> and CuGa<sub>x</sub>Se<sub>v</sub> thin films using Raman microscopy// Phys. Status Solidi, No. 5, 2009
- [5] Johannes Stadler, Thomas Schmid, and Renato Zenobi. Chemical Imaging on the Nanoscale – Top-Illumination Tip-Enhanced Raman Spectroscopy// CHIMIA 2011, 65, No. 4 235.
- [6] F. Zehnhäusern, Y.Martin, K.Wickramasinghe. Scanning interferometric apertureless microscopy – optical imaging with 10 Angstrom resolution. // Science 269, pp.1083-1085, (1995).
- [7] B.Knoll, F.Keilmann, A.Kramer, R.Guckenberger. Contrast of microwave near field microscopy. // Appl. Phys. Lett, 70, pp. 2667-269 (1997).
- [8] Kazantsev D.V., Kuznetsov E.V., Timofeev S.V., Shelaev A.V., Kazantseva E.A. Apertureless near-field optical microscopy// Physics-Uspekhi. 2017. T. 60. № 3. С. 259-275.
- [9] Milovanovic M, Korchev YE, Lab MJ, Bashford CLet al., 1997, Scanning probe microscopy of soft samples: Comparison of AFM with SICM, BIOPHYSICAL JOURNAL, Vol: 72, Pages: TU430-TU430, ISSN: 0006-3495
- [10] <https://www.imperial.ac.uk/people/y.korchev/publications>.
- [13] Zhou Y, Saito M, Miyamoto T, Novak P, Shevchuk AI, Korchev YE, Fukuma T, Takahashi Y., 2018, Nanoscale imaging of primary cilia with scanning ion conductance microscopy, Analytical Chemistry, Vol: 90, Pages: 2891-2895, ISSN: 0003-2700
- [14] Калинин А.С. Прыжковая Силовая микроскопия пьезоотклика: комплексное изучение биопьезоэлектриков. [https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/applications/application\\_notes/098\\_H\\_D\\_PFM\\_A4\\_ru.pdf](https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/applications/application_notes/098_H_D_PFM_A4_ru.pdf).
- [15] А.С. Калинин. Методы атомно-силовой микроскопии для неразрушающего анализа электромеханических свойств наноструктур. Диссертация на соискание степени к.ф.-м.н., Москва 2017. <http://www.nrcki.ru/files/pdf/1508242116.pdf>

## Scanning Probe Microscopy for Nanostructures Investigations from Micro and Nanoelectronics up to Biomaterials

V.A. Bykov, An.V. Bykov, Y.A. Bobrov, V.V. Kotov, S.V. Leesment, V.V. Polyakov

NT-MDT, Moscow, vbykov@ntmdt-si.ru

**Abstract** — The article describes the modern capabilities of scanning probe microscopes for studying the properties and metrological control of surfaces and nanostructures, including micro and nanoelectronic products and biostructures.

**Keywords** — scanning tunneling microscope, STM, scanning atomic force microscope, AFM, scanning probe microscope, SPM, Raman scattering, Raman spectroscopy, ultra-high resolution Raman microscopy, near-field optical microscopy, apertureless scanning probe microscopy of the near field, cantilever, cartridge, nanotechnology, metrology, metrology nanometrology, nanoelectronics.

### REFERENCES

- [1] <https://www.ntmdt-si.ru/products/automated-afm/vega>
- [2] <https://www.ntmdt-si.ru/products/features/hybrid-mode>
- [3] Stöckle, Raoul M.; Suh, Yung Doug; Deckert, Volker; Zenobi, Renato (February 2000). "Nanoscale chemical analysis by tip-enhanced Raman spectroscopy". Chemical Physics Letters. 318 (1–3): 131–136.
- [4] Thomas Schmid, Christian Camus, Sebastian Lehmann, Daniel Abou-Ras, Christian-Herbert Fischer, Martha Christina Lux-Steiner, and Renato Zenobi. Spatially resolved characterization of chemical species and crystal structures in CuInS<sub>2</sub> and CuGa<sub>x</sub>Se<sub>v</sub> thin films using Raman microscopy// Phys. Status Solidi. No. 5. 2009
- [5] Johannes Stadler, Thomas Schmid, and Renato Zenobi. Chemical Imaging on the Nanoscale – Top-Illumination Tip-Enhanced Raman Spectroscopy// CHIMIA 2011, 65, No. 4 235.
- [6] F. Zehnhäusern, Y.Martin, K.Wickramasinghe. Scanning interferometric apertureless microscopy – optical imaging with 10 Angstrom resolution. // Science 269, pp.1083-1085, (1995).
- [7] B.Knoll, F.Keilmann, A.Kramer, R.Guckenberger. Contrast of microwave near field microscopy. // Appl. Phys. Lett, 70, pp. 2667-269 (1997).
- [8] Kazantsev D.V., Kuznetsov E.V., Timofeev S.V., Shelaev A.V., Kazantseva E.A. Apertureless near-field optical microscopy// Physics-Uspekhi. 2017. T. 60. № 3. С. 259-275.
- [9] Milovanovic M, Korchev YE, Lab MJ, Bashford CLet al., 1997, Scanning probe microscopy of soft samples: Comparison of AFM with SICM, BIOPHYSICAL JOURNAL, Vol: 72, Pages: TU430-TU430, ISSN: 0006-3495
- [10] <https://www.imperial.ac.uk/people/y.korchev/publications>.
- [11] Hansma P.K., Drake B., Marti O., Gould S.A.C., Prater C.B. The scanning ion-conductance microscope. Science. 1989; 243: 641-643
- [12] Korchev Y.E., Bashford C.L., Milovanovic M., Vodyanoy I., Lab M.J. Scanning ion conductance microscopy of living cells. Biophys. J. 1997; 73: 653-658
- [13] Zhou Y, Saito M, Miyamoto T, Novak P, Shevchuk AI, Korchev YE, Fukuma T, Takahashi Y., 2018, Nanoscale imaging of primary cilia with scanning ion conductance microscopy, Analytical Chemistry, Vol: 90, Pages: 2891-2895, ISSN: 0003-2700
- [14] Kalinin A.S. Pryzhkovaya Silovaya mikroskopiya p'ezootklika: kompleksnoe izuchenie biop'ezoelektrikov. [https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/applications/application\\_notes/098\\_HD\\_PFM\\_A4\\_ru.pdf](https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/applications/application_notes/098_HD_PFM_A4_ru.pdf).
- [15] A.S. Kalinin. Metody atomno-silovoj mikroskopii dlya nerazrushayushchego analiza elektromekhanicheskikh svoystv nanostruktur. Dissertaciya na soiskanie stepeni k.f.-m.n., Moskva 2017. <http://www.nrcki.ru/files/pdf/1508242116.pdf>