

ОКНО В НАНОМИР

Ляшко М.С., Гурина Т.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Шахлевич Г.М. – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Рассматриваются виды микроскопии высокого разрешения, такие как сканирующая электронная, сканирующая туннельная и атомно-силовая, и исследования, в которых они сыграли решающую роль. Анализируются перспективы их применения при исследовании наноматериалов.

Ключевые слова: наноматериалы и структуры, методы получения, диагностики, визуализации, анализ поверхности, субнанометровое разрешение, зондирующий пучок, СЭМ, СТМ, АСМ.

Введение. В настоящий момент наука и техника столкнулись с новой областью исследований и анализа – наноразмерные материалы. Их свойства являются ценным ресурсом в медицине, электронике, промышленности, экологии и др. Структура мирового потребления наноматериалов и их влияние каждой из отраслей растет с каждым днем. При работе с наноразмерными объектами важнейшее значение имеют средства их получения, анализа структуры, состава и характеристик.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) – метод исследования поверхности объектов с высоким разрешением, позволяющий производить подробный анализ материалов, наиболее распространенный в науке и инженерии. Благодаря высокому разрешению и широкому диапазону увеличений, СЭМ стала незаменимым инструментом в нанoeлектронике, материаловедении, биологии, геологии, медицине и даже судебной экспертизе.

Универсальность СЭМ заключается в использовании пучка электронов (рисунок 1). Из электронной пушки ускоренные полем электроны перемещаются в оптическую колонну, где пучок фокусируется электромагнитными линзами. В колонне поддерживается глубокий вакуум. Расположенные после линз катушки сканирования обеспечивают перемещение пучка по исследуемой области образца. Отраженные от поверхности образца электроны попадают в систему детектирования и формируют ее изображение [1].



Рисунок 1 – Принципиальная схема СЭМ

Примером использования СЭМ является достижения в области изучения одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) учеными Сколтеха. Будучи аллотропной модификацией

углерода, они представляют собой полые цилиндрические структуры диаметром 0,1-50 нм длиной от 1 мкм до нескольких сантиметров. ОУНТ – предмет активного исследования, благодаря таким свойствам, как высокая прочность, огне- и износостойкость и др.

Благодаря усовершенствованию методов микроскопии получение ОУНТ стало эффективнее в 3 раза без потери качества. Метод СЭМ был решающим для визуализации результатов синтеза, контроля качества и верификации теории. Также, в ходе экспериментов ученые обнаружили, что при концентрации водорода ≈ 10 об. %) производительность синтеза выросла в 15 раз, также без ухудшения свойств нанотрубок. Детальное исследование термодинамики процесса и анализ с помощью СЭМ позволили не только зафиксировать этот результат, но и раскрыть принципиальные механизмы роста нанотрубок, что важно для понимания процесса CVD-синтеза в целом (рисунок 2) [4]. Важным аспектом применения СЭМ является необходимость электропроводности образца. Для диэлектриков требуется напыление тонкого слоя металла, что иногда приводит к маскировке структур клеточной оболочки и делает невозможным наблюдение живых клеток (в отличие от АСМ).



Рисунок 2 – СЭМ-изображение вертикально выровненных массивов углеродных нанотрубок. Черные пятна сверху - аморфный углерод

С использованием СЭМ проводится также анализ флуоресцентных характеристик, электронное распределение, дефектов структуры и др.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) – впервые позволила наблюдать отдельные атомы на поверхности. Классическими примерами являются изображения распределения атомов высокоориентированного графита и структуры кремния Si (111) - (7×7), полученные с помощью сверхвысоковакуумных микроскопов. СТМ основан на эффекте туннелирования, пьезоэлектрический эффекте и др.

Туннельный эффект – квантовомеханическое явление прохождения частицы через потенциальный барьер с высотой, превышающей её энергию. В СТМ за счет его создается контролируемый электрический ток, величина которого экспоненциально зависит от расстояния между зондом (острой металлической иглой) и образцом. Ширины туннельного перехода определяется расстоянием между зондом и образцом. Это позволяет отслеживать неровности поверхности, строить ее изображение с атомарным разрешением (рисунок 3).

Пьезоэлектрический эффект – возникновение электрического заряда при деформировании пьезоматериалов (прямой эффект), или же деформирование их структуры под действием заряда (обратный эффект). В СТМ на этом эффекте основан принцип действия измерительной части устройства, обеспечивающей атомарные разрешения, что открывает возможности тонкого взаимодействия с наноструктурами [6].

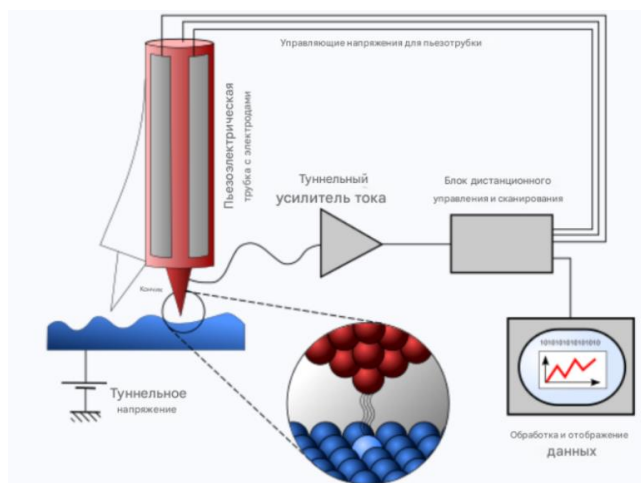


Рисунок 3 – Принципиальная схема СТМ

Метод СТМ один из важнейших при поиске новых наноматериалов, что подтверждается на примере синтеза и исследований двумерных борных наноматериалов. Эти двумерные кристаллы стали настоящим открытием: их прочность, гибкость и эластичность, а также уникальные электронные свойства, стали основой создания батарей для хранения водорода и каталитических реакций. Так, борофен способен удерживать массу водорода, равную 15% от собственной, что делает его перспективным для водородной энергетики. Однако сложность в визуализации и нестабильность материала усложняли изучение материала. Ошибочно считалось, что при осаждении бора на поверхность меди образуется полиморфная модификация борофена. Для определения структуры и свойств атомарно тонких фаз бора был использован СТМ с атомарным разрешением. Это позволило идентифицировать уникальную зигзагообразную структуру Cu_8B_{14} и измерить ее электронные свойства (рисунок 4). Важным доказательством стали два фактора: зигзагообразный узор решетки с характерными линейными дефектами, зафиксированный с разрешением менее 0,1 нм и данные спектроскопии (СТС), показавшие, что работа выхода электронов у пленки ниже, чем у чистой меди, что идеально совпало с расчетами для соединения Cu_8B_{14} . Это доказало, что синтезирован не борофен, а новое соединение. Без СТМ открытие было бы невозможным.

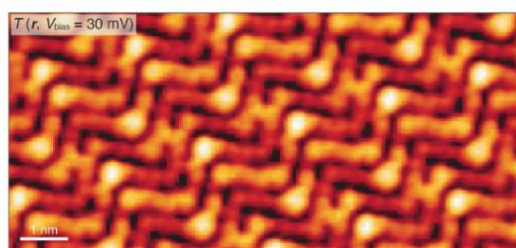


Рисунок 4 – Изображение СТМ с атомным разрешением

СТМ применяется для получения топографии и электрических свойств поверхностей, визуализации атомных узлов. Разработка наноустройств, исследование кристаллических решеток, наноразмерных проводников и наномagnetиков являются задачами СТМ.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет получать изображения поверхности с субнанометровым разрешением и объединяет ряд методик неразрушающей диагностики. АСМ открывает возможности для изучения биологических объектов, полимеров и диэлектриков, анализ которых затруднен или невозможен при электронной микроскопии.

В основе работы АСМ лежит регистрация сил межатомного взаимодействия. Дальнодействующие силы Ван-дер-Ваальса и короткодействующие силы отталкивания, обусловленные перекрытием электронных оболочек атомов острия зонда и атомом

поверхности формируют результирующую силу, которая вызывает изгиб упругой консоли зонда (рисунок 5), по величине которого строят точное изображение рельефа поверхности [5].

Главным преимуществом АСМ перед СЭМ и СТМ является отсутствие необходимости в электропроводящем покрытии образца. Это позволяет исследовать живые клетки и биологические объекты в их естественном состоянии без повреждения. Кроме того, АСМ даёт возможность визуализировать отдельные молекулярные структуры, например, с использованием нанодатчиков с иммобилизованными ферментами.

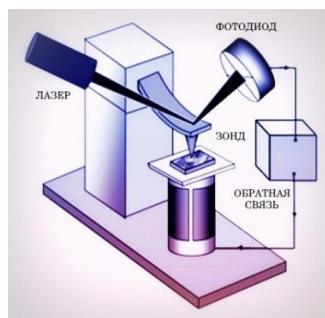


Рисунок 5 – Схема атомно-силового микроскопа и изображения модифицированных зондов для исследования поверхности [5]

Примером практического применения АСМ служит исследование наноструктуры магнетита. Была выдвинута гипотеза о том, что варьирование времени синтеза плёнки полидофамина (PDA) влияет на её химический состав, шероховатость и способность удерживать наночастицы. Природа наблюдаемых зернистых структур оставалась неясной. В эксперименте плёнки PDA формировали окислением дофамина в щелочном растворе, после чего образцы погружали в водную дисперсию наночастиц магнетита. АСМ позволила установить, что количество адсорбированных частиц растёт с увеличением времени синтеза нелинейно. Контрольный эксперимент на чистом золоте показал отсутствие адсорбции, подтвердив ключевую роль PDA-плёнки (рисунок 6). АСМ позволил визуализировать распределение частиц и количественно оценить морфологию поверхности: среднюю высоту структур и параметры шероховатости (R_a и R_q) до и после осаждения [8].

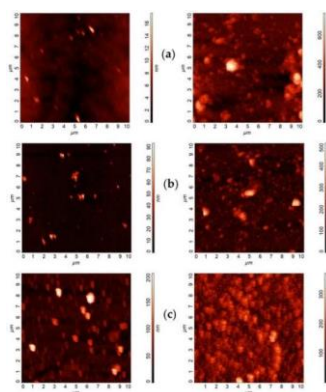


Рисунок 6 - АСМ-изображения PDA/AU [8]

При использовании АСМ ученые проводят измерения межмолекулярных сил, построение трёхмерных карт рельефа, а также исследования гидрогелей и биоматериалов. Основными задачами метода являются анализ биологических макромолекул, изучение наноструктур, разработка наноустройств, биомедицинские исследования и моделирование наномеханических процессов. С помощью АСМ разрабатываются наноиглы из углеродных нанотрубок для внутриклеточных манипуляций и адресной доставки молекул (ДНК, РНК, квантовых точек) без повреждения клеточной мембраны. Метод также позволяет

визуализировать отдельные полимерные цепи (например, полиэтилен или ДНК на подложках из слюды и графита) и изучать деформацию полимерных плёнок под нагрузкой.

Заключение. Все три метода – СЭМ, СТМ и АСМ – являются неотъемлемыми инструментами современного наномира. Это ключевые методы визуализации и анализа в нанотехнологиях, позволяющие учёным и инженерам на атомарном и нанометровом уровне исследовать структуру, состав и свойства наноматериалов и устройств. Их использование важно для разработки новых материалов, совершенствования технологий и расширения границ наномира, что способствует прогрессу в электронике, медицине, материаловедении и других науках. Биотехнологии позволяют специалистам изучение биомолекул, наноразмерных биосенсоров.

Список литературы

1. Исследование наноматериалов методами сканирующей электронной микроскопии: учебно-методический комплекс дисциплины [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1548/2/1334959_methodinst.pdf. Дата доступа: 24.03.2026.
2. Сакович, К. О. Использование сканирующей электронной микроскопии для изучения нанопористых структур / К. О. Сакович [Электронный ресурс]. Минск: БГУИР, 2024. Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/60422/1/Sakovich_Ispolzovanie.pdf. Дата доступа: 24.03.2026.
3. Электронная микроскопия: лабораторные работы. Санкт-Петербург: СПбГУ, [б.г.].
4. Синтез углеродных нанотрубок стал в три раза эффективнее [Электронный ресурс] // Naked Science. 2024. Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/column/sintetri-raza-effektivnee>. Дата доступа: 24.03.2026.
5. Atomic Force Microscope: an overview [Электронный ресурс] // ScienceDirect Topics. Elsevier, [б.г.]. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/atomic-force-microscope>. Дата доступа: 24.03.2026.
6. Низовцова, А. А. Туннельный микроскоп / А. А. Низовцова [Электронный ресурс]. Минск: БГУИР, 2024. Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/57170/1/Nizovcova_Tunnel%27nyj.pdf. Дата доступа: 24.03.2026.
7. Многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп SSM-310 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.itmo.by/engineering/developments/mnogofunktsionalnyy-skaniruyushchiy-zondovyy-mikroskop-ssm-310/>. Дата доступа: 24.03.2026.
8. Поглощение наночастиц магнетита на полидофаминовых пленках, отложенных на поверхностях золота: исследование AFM и XPS // Nanomaterials. 2024. Т. 14, № 21. С. 1699. <http://dx.doi.org/10.3390/nano14211699>.

UDC 537.533.35

THE WINDOW TO THE NANOMIR

Lyashko M.S., Gurina T.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Shakhlevich G.M. – Cand. of Sci, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. This article discusses types of microscopy such as scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy, and atomic force microscopy, and the studies in which they have played a crucial role. The prospects of using new microscopy methods in the field of nanomaterial research are analyzed.

Keywords: nanomaterials, nanotechnology, nanoscale structures, diagnostic methods, visualization, surface analysis, high resolution, subnanometer resolution, probe beam, SEM, STM, AFM.