

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ СТРУКТУР – СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ЧАСТЬ 1

А.Ляпин, к.г.-м.н. Andrey.Lyapin@ostec-group.ru

Общие тенденции развития современных электронных изделий – миниатюризация и функциональное усложнение. Тонкие электронные и механические структуры невозможно контролировать невооруженным глазом, поэтому для визуального контроля в производственном процессе, как и при отработке технологий, широко используются различные методы микроскопии. Об их возможностях и особенностях рассказывается в статье.

По мере миниатюризации электронных изделий и компонентов возрастают и потребности в получении изображений с большим увеличением. Обычные микроскопы не обеспечивают необходимое разрешение для исследования мелких структур, для их визуализации требуются более мощные системы (рис.1). Например, практически невозможно получить качественное изображение субмикронных структурных элементов топологии современной микросхемы средствами традиционной оптической микроскопии. Через обычную оптику неразличимы объекты размером меньше 0,3-0,4 мкм из-за дифракции в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Теоретический предел разрешения (примерно 200 нм) фактически не достигаем в обычных системах со световой оптикой. Для исследования субмикронных и наноразмерных структур используют неоптические методы микроскопии или сложные узкоспециализированные оптические техники.

К неоптическим средствам визуализации относятся системы, в которых применяются ультразвук (акустический микроскоп), ИК-, СВЧ-, рентгеновское излучение и излучение в радиочастотном

диапазоне. Сконструированы микроскопы, позволяющие строить изображение на основе анализа атомных сил взаимодействия поверхности образца с тонким зондом, сканирующим поверхность. Наиболее мощный и все более востребованный вид неоптической микроскопии основан на электронно-лучевых методах, использующих энергию электронов для формирования увеличенного изображения и проведения микроанализа.

Многообразие существующих видов микроскопии усложняет выбор оптимального решения для визуальных исследований и контроля. Рассмотрим наиболее распространенные методы визуализации микрообъектов.

КЛАССИЧЕСКАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ

Это самый технически развитый и наиболее распространенный метод микроскопии, сформировавшийся в середине XVII века. Создание оптических микроскопов связано с именами Янсена, Галилея, Дреббеля, Гюйгенса, Гука и Левенгука. Базовый элемент таких устройств (рис.2) – пара объектив-окуляр. Современные микроскопы также имеют объектив с окуляром и дополнительно могут включать несколько десятков разнообразных оптических элементов (рис.3).

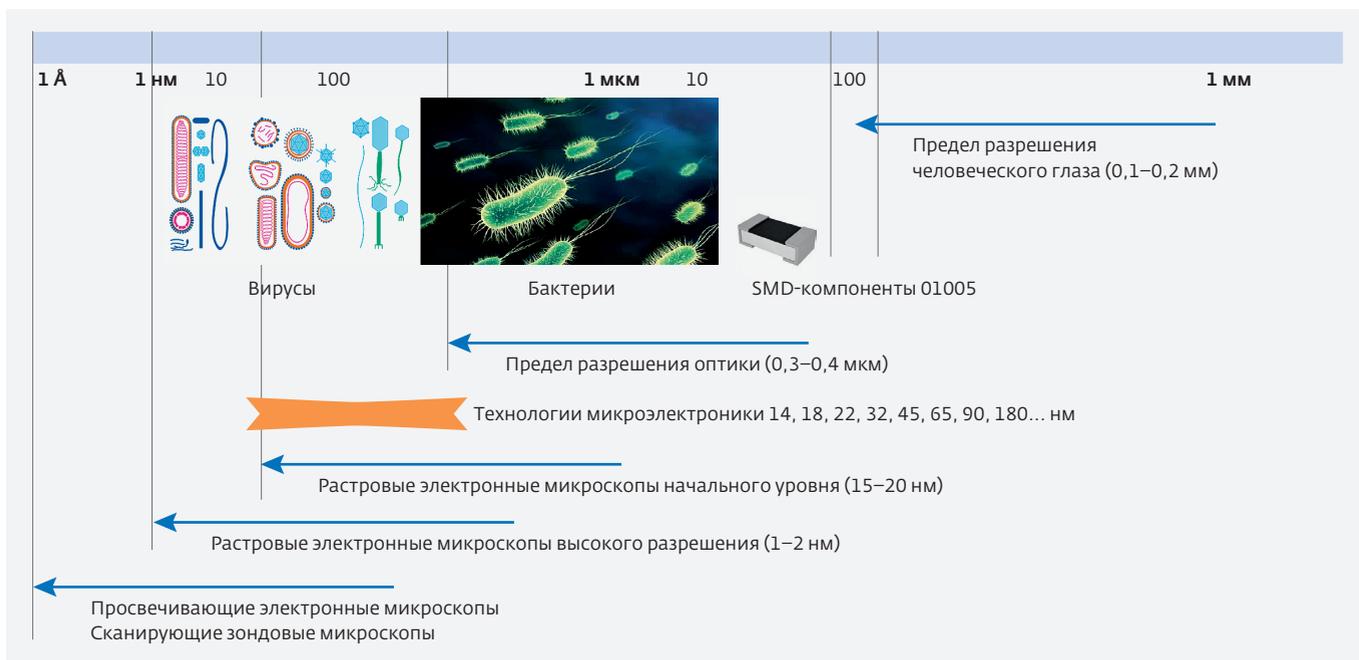


Рис.1. Пределы разрешения различных средств визуализации

Во второй половине 20 столетия появились так называемые безокулярные микроскопы, в которых функцию окуляра выполняет небольшой оптический экран. Преимущества безокулярной оптики – эффект "естественного зрения", минимальный уровень сферических aberrаций, возможность работать в линзах и очках. За почти 500-летнюю историю оптические микроскопы значительно прогрессировали по эргономическим характеристикам и качеству изображения, но мало прибавили в разрешении и возможностях исследования субмикронных структур.

Хороший оптический микроскоп способен различать объекты размером порядка 0,3–0,4 мкм. Получить с его помощью изображение более тонких структурных деталей невозможно в силу физических ограничений, связанных с волновой природой видимого излучения. Один из основных показателей разрешающей силы оптического микроскопа – характеристики объектива. Базовым параметром считается значение числовой апертуры (numerical aperture, NA) – ее большие значения свидетельствуют о высоком качестве объектива. Обычно числовая апертура хороших объективов для работы в воздушной среде составляет 0,92–0,95. При использовании иммерсионной среды числовая апертура имеет более высокие значения, например NA=1,42 для масляной иммерсии. В задачах поляризационной микроскопии применяют объективы с числовой



Рис.2. Оптический стереомикроскоп конца 19 века (Москва, Политехнический музей)

апертурой 1,6 – с таким объективом работают в йодметиленовой иммерсии. За использование объективов с высоким значением NA приходится расплачиваться очень маленькой глубиной резкости. На увеличениях 1000×–1500× даже при изучении мазков, шлифов и тонких срезов бывает трудно найти необходимый слой для фокусирования, когда образец имеет рельеф и толщину вдоль оптической оси большую, чем глубина резкости. Практика показывает, что наиболее востребованными увеличениями в оптической микроскопии являются средние (100×–300×) и небольшие (4×–80×) увеличения.

Традиционно наблюдения в оптическом микроскопе проводят либо в отраженном (эпископическое освещение), либо в проходящем (диаскопическое

освещение) свете, иногда комбинируя оба типа освещения. В зависимости от задачи используют различные методики освещения. Наиболее распространенные – исследования в светлом или темном поле и поляризованном свете. Относительно новые методы: фазового контраста, дифференциально-интерференционного контраста (ДИК по Номарскому), исследования в свете люминесценции, а также более экзотичные методики косого освещения – модуляционного контраста Хофмана и переменного рельефного контраста (VAREL).

Кроме традиционных методик есть виды микроскопии, основанные на иных принципах формирования изображения. Некоторые из них рассматриваются ниже как отдельные виды микроскопии.

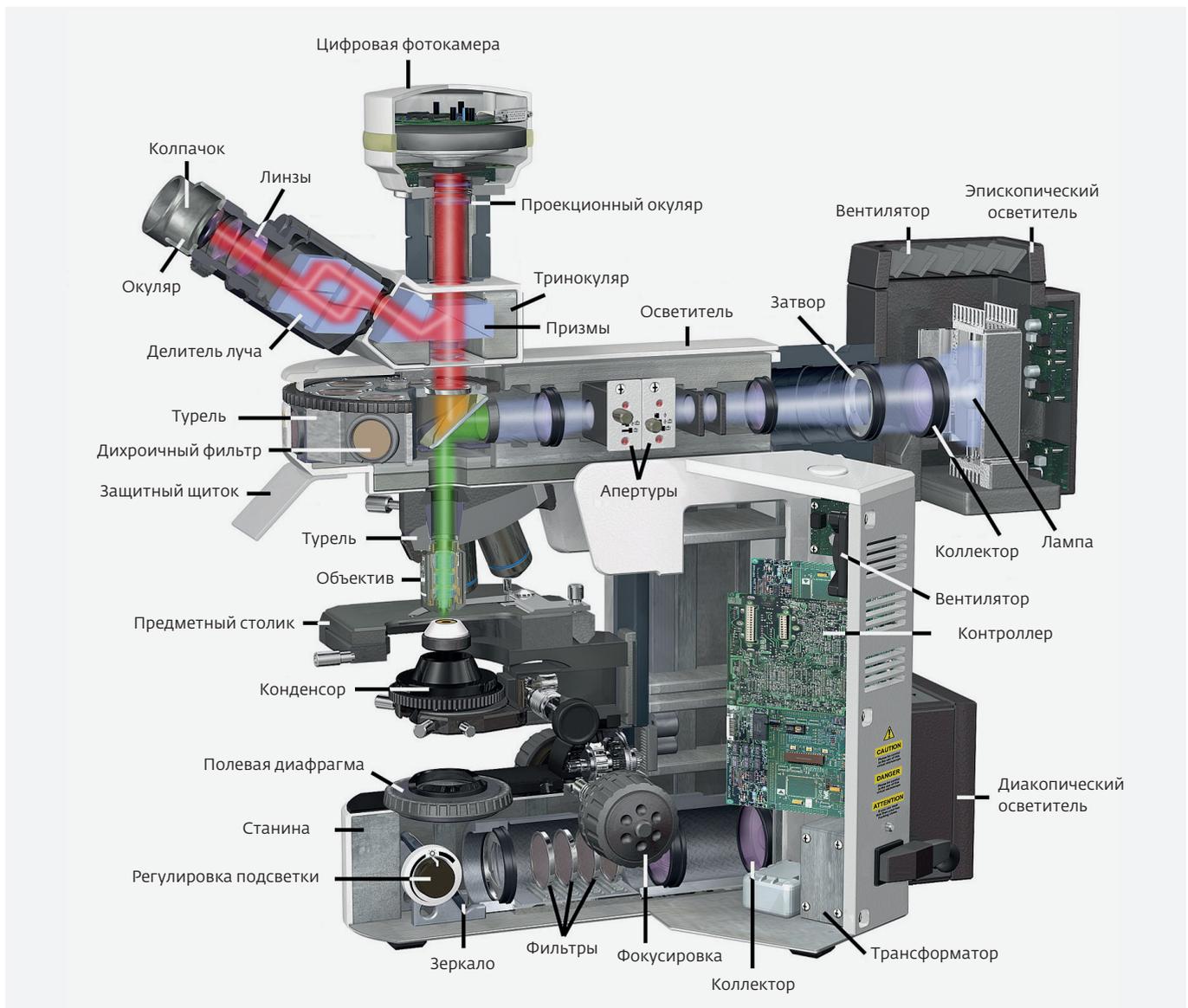


Рис.3. Устройство современного оптического микроскопа

Развитие оптической микроскопии в последние десятилетия связано с широким применением вычислительной техники, точной механики и математической обработки оцифрованных изображений. С помощью компьютера и прецизионных систем позиционирования стало возможным трехмерное моделирование рельефных объектов, существенно улучшилась глубина резкости при большом увеличении. Однако математические методы никоим образом не повышают разрешающую способность классической оптики в плоскости.

ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Существенно улучшить оптическое разрешение можно путем построения изображения с использованием сильно локализованных затухающих (эванесцентных) электромагнитных полей. Это так называемое ближнее поле – зона над поверхностью объекта размером меньше длины волны падающего света. В данной области затухающие световые волны не искажены дифракцией и позволяют получить информацию о нанометровых объектах. Для этого в ближнем поле размещают маленький оптический зонд с апертурой меньше длины волны. Пространственное разрешение такого микроскопа определяется апертурой зонда. Изготовление малых апертур с диаметром в десятки и сотни нанометров – сложная технологическая задача, решение которой стало возможным лишь в последние десятилетия.

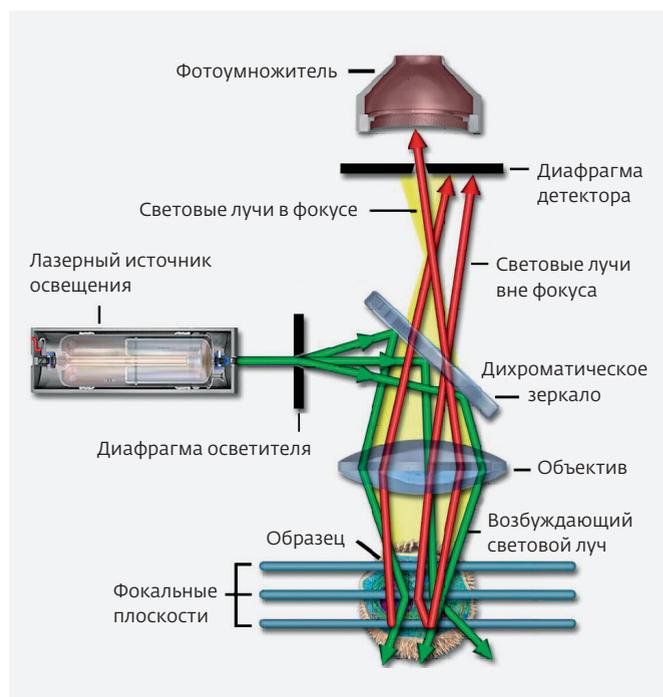


Рис.4. Оптическая схема конфокального микроскопа

В 2010 году усилиями ученых Манчестерского и Сингапурского национальных университетов совместно с Сингапурским институтом хранения данных был создан микроскоп, работающий с ближним полем. Он позволяет получить изображение с разрешением около 50 нм в обычном белом свете. Для сбора эванесцентных волн используются прозрачные микросферы из диоксида кремния диаметром от 2 до 9 мкм. Сферы выполняют роль суперлинз, собирая затухающие колебания из ближнего поля с необыкновенно высоким разрешением. Изображение, собираемое микросферой, рассматривают через объектив обычного микроскопа. Ученые считают, что в ближайшем будущем можно будет использовать такой микроскоп для изучения внутреннего строения живых клеток и получения изображения вирусов и крупных молекул, не подвергая их разрушению, как, например, при растровой электронной микроскопии.

КОНФОКАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ

Конфокальная лазерная микроскопия – это разновидность оптической микроскопии. Однако по сравнению с классической схемой она обеспечивает значительно лучший контраст, более высокое (примерно в 1,5 раза) латеральное разрешение и высокое разрешение вдоль оптической оси. Патент на конфокальную схему микроскопа был выдан в 1961 году в США профессору Марвину Минскому (Marvin Minsky). Рассматривая оптическую схему формирования микроскопического изображения, отметим, что любой объектив имеет в фокальной плоскости образец и в конфокальной (с противоположной стороны объектива) его проекцию – изображение, видимое в окуляр.

В конфокальном микроскопе в фокусе проекции (в конфокальной плоскости) размещается диафрагма, пропускающая свет только от малой области, лежащей в фокальной плоскости (рис.4). Все участки, находящиеся вне фокуса, не принимают участия в формировании изображения, так как свет от них подавляется диафрагмой. В такой конструкции фоновый рассеянный свет от размытых (несфокусированных) областей не мешает формированию изображения. Сразу за диафрагмой размещается фотодетектор, преобразующий излучаемый образцом или отраженный им свет в электрические сигналы для дальнейшей обработки. В конфокальном микроскопе в каждый момент времени можно видеть изображение только одной, довольно малой области (точки). Полноценное изображение

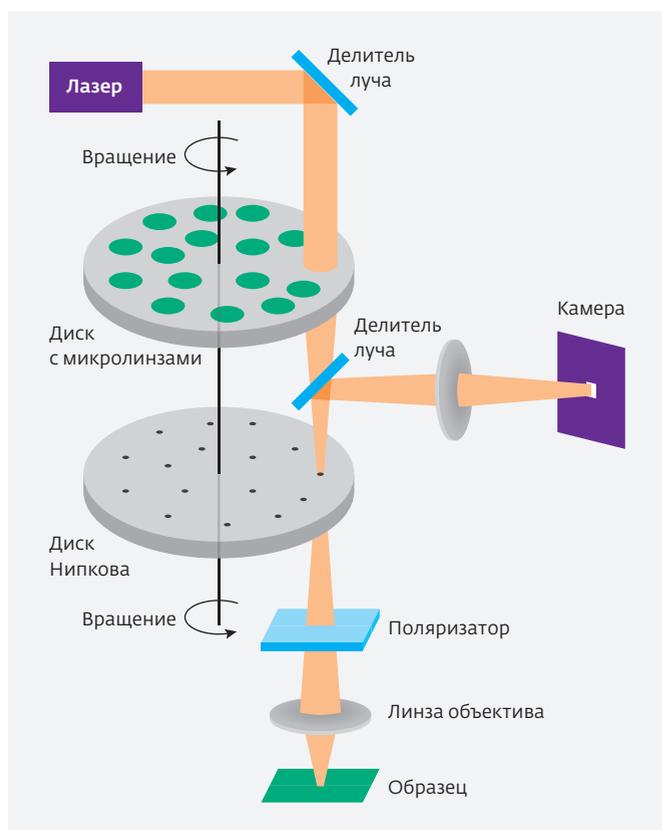


Рис.5. Конфокальная схема с диском Нипкова

строится в результате сканирования поверхности образца.

На практике этот механизм чаще реализован так, что оптическая часть микроскопа, включая диафрагму и детектор, остается неподвижной, а движется лишь образец по заданной схеме сканирования. Очевидно, что здесь проявляется еще одно преимущество конфокального микроскопа – возможность расширить поле зрения. При другом способе построения изображения используются сложные оптические схемы с вращающимися пластинами, на которые по определенному алгоритму нанесены апертуры (диск Нипкова) (рис.5). В конфокальном микроскопе можно сканировать образец как в плоскости, так и по оси Z (вдоль оптической оси), что позволяет осматривать объекты со всех сторон и создавать трехмерные реконструкции (рис.6).

СКАНИРУЮЩАЯ МНОГОФОТОННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ

Данный метод является производным от лазерной сканирующей конфокальной микроскопии. Он связан с использованием лазерных импульсов инфракрасного или длинноволнового видимого диапазона фемтосекундной длительности для возбуждения

в образце специфических флуоресцентных препаратов – флуорофоров. Используется метод преимущественно в биологии для наблюдения за живыми образцами и требует сложной предварительной подготовки – введения флуорофоров в ткани. Затем флуорофоры в образце несколькими фотонами с низкой энергией переводятся в возбужденное (светлое) состояние, при котором они излучают энергию – люминесцируют. Излучаемый свет фиксируется камерой, формируя изображение объекта.

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Сканирующая зондовая микроскопия (scanning probe microscopy, SPM) – группа относительно новых методов исследования поверхности с высоким (атомным) разрешением, теоретические основы которых были сформулированы физиками во второй половине 20-го столетия. Появление сканирующей зондовой микроскопии, по мнению многих экспертов, инициировало развитие нанотехнологий.

Началом практического применения данного метода принято считать 1981 год, когда Гердом Карлом Биннигом и Генрихом Рорером в лаборатории IBM в Цюрихе был сконструирован сканирующий туннельный микроскоп (scanning tunneling microscope, STM) для изучения рельефа проводящих поверхностей. Там же в начале 80-х годов группа ученых разработала сканирующий ближнепольный микроскоп (Scanning near-field optical microscope, SNOM или NSOM). В 1986 году в США Гердом Биннигом, Кельвином Куэйттом и Кристофером Гербером был создан атомно-силовой микроскоп (atomic force microscope, AFM), позволяющий исследовать непроводящие образцы. Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов основан на регистрации и последующей программной визуализации результатов взаимодействия очень тонкого механического или оптического зонда с исследуемой поверхностью. Размер тонкого зонда в зоне анализа поверхности может достигать ширины в несколько атомов (в идеале один атом). Изготовление такого зонда (рис.7) – сложная технологическая задача.

Сканирующий туннельный микроскоп работает следующим образом. К поверхности на расстояние в несколько ангстрем подводится иглообразный зонд, на который подается небольшое напряжение. Разность потенциалов между зондом и образцом приводит к возникновению туннельного тока. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния между образцом и конечной точкой зонда. Типичные значения контролируемых величин в туннельном микроскопе – десятки и сотни пикоампер на расстоянии порядка одного

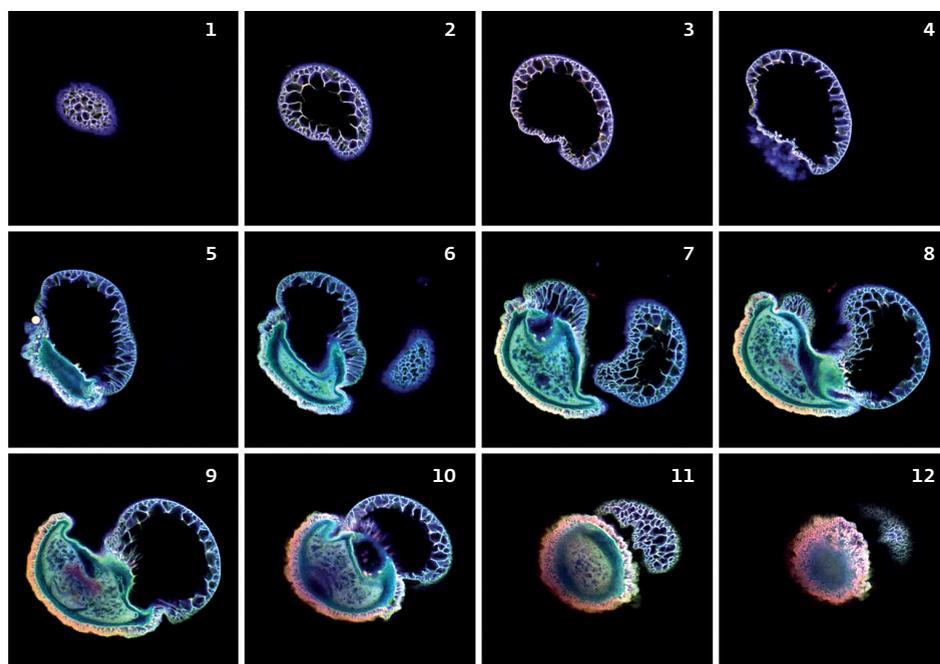


Рис.6. Пример визуализации оптических сечений по оси Z. Источник: Claxton N.S., Fellers T.J., and Davidson M.W. Department of Optical Microscopy and Digital Imaging, National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University, Tallahassee, Florida

ангстрема. Игла сканирует поверхность образца, а для обработки результатов используют один из двух вариантов реализации метода:

- с помощью системы обратной связи величина туннельного тока поддерживается постоянной, а показания снимаются со следящей системы, чутко реагирующей на изменения топографии поверхности в процессе сканирования;
- зонд движется на фиксированной высоте над поверхностью образца, а изменения величины туннельного тока интерпретируются программой как значения высоты.

При использовании туннельного микроскопа существует множество ограничений, особенно когда проводят исследования не в среде глубокого вакуума. Тем не менее именно с помощью туннельного микроскопа можно манипулировать отдельными атомами.

В *атомно-силовом микроскопе* наноразмерный зонд закреплен на длинной упругой консоли, называемой кантилевер. При сближении зонда с образцом начинают проявляться межатомные (преимущественно вандерваальсовы) силы взаимодействия зонда с поверхностью, приводящие к изгибанию кантилевера. Пространственные отклонения кантилевера регистрируются оптической системой с лазером, что позволяет получать информацию о рельефе

отсканированной поверхности. Существует несколько разновидностей этого вида микроскопии: магнитносиловая, электросиловая, силовая микроскопия пьезоотклика. Используются частотные и фазовые возбуждения кантилевера, расширяющие диапазон регистрируемых сигналов.

Сканирующий ближнепольный микроскоп сочетает в себе элементы оптического и сканирующего зондовых микроскопов. Теоретические возможности такой микроскопии были сформулированы еще в 1928 году Е.Х.Сингхом, однако технически реализовать эту идею в то время не представлялось возможным.

Сканирующий микроскоп ближнего поля, изначально оказавшийся в тени туннель-

ного и атомно-силового, набирал популярность по мере того, как открывались его новые возможности для решения задач биологии, материаловедения и физики поверхности. С середины 90-х годов прошлого века в США начался промышленный выпуск ближнепольных сканирующих микроскопов. Сегодня насчитывается около 20 их типов,

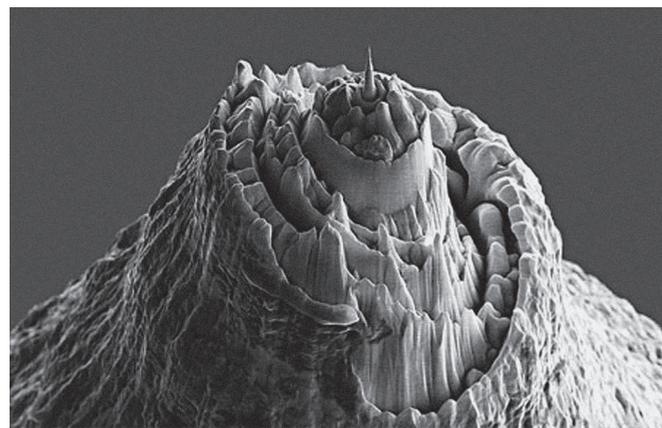


Рис.7. Зонд из золота для ближнепольного сканирующего микроскопа, полученный методом травления ионным пучком. Размер тонкой части – несколько десятков нанометров. Источник: Gazzadi G.C., Gucciardi P., Covi L. S3 National Research Center (INFM-CNR), Modena, Italy

в устройствах используются различные оптические схемы, однако сохраняется общий принцип получения информации о поверхности. Схема большинства таких приборов включает тонкий оптоволоконный зонд с металлическим экраном и апертурой на конце. Диаметр апертуры должен быть меньше длины волны. Зонд сближается с исследуемой поверхностью на расстояние меньше длины волны, и, попадая в область ближнепольного контакта, освещает лазером (обычно гелий-неоновым или аргоновым) поверхность в малой области. Проходящие или отраженные от этой области фотоны через микрообъективы передаются средствам обработки сигнала. В некоторых схемах для сбора фотонов используется тот же оптоволоконный зонд, что и для освещения. Информация об участке поверхности образца создается путем сканирования с небольшим шагом с помощью ультразвукового мотора (пьезодвигателя). Помимо апертурных существуют и безапертурные ближнепольные микроскопы, составляющие, впрочем, немногочисленный класс подобных систем. Основной характеристикой ближнепольного микроскопа является величина пространственного разрешения. Ориентировочно предельное разрешение апертурного ближнепольного микроскопа составляет около 15 нм. Разрешение безапертурного микроскопа может достигать величины порядка 1 нм.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ МИКРОСКОПИИ

Электронно-лучевые методы микроскопии можно разделить на два больших класса, различающиеся аппаратной реализацией исследовательских систем: более простые и экономичные системы визуализации – растровые (сканирующие) электронные микроскопы (РЭМ); сложные и дорогостоящие приборы – просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ).

Некоторые РЭМ функционируют в просвечивающем режиме, и есть ПЭМ, в которых реализована схема сканирования. Однако принципиальные различия этих двух классов микроскопов связаны с величиной ускоряющего напряжения, со стабильностью и размером электронного зонда и реализацией схемы взаимодействия электронного зонда с образцом. Современные РЭМ обеспечивают ускоряющее напряжение до 30 кВ (иногда до 40–50 кВ), диаметр их зонда составляет 70–200 Å.

Класс просвечивающих микроскопов обычно начинается с систем, обеспечивающих ускоряющее напряжение от 100 кВ. Выпускаются и упрощенные ПЭМ с низкой стабильностью электронного зонда



Рис.8. Просвечивающий электронный микроскоп

и пониженным ускоряющим напряжением 60–80 кВ. Современный ПЭМ (рис.8) обеспечивает субнангстремное разрешение и может работать с ускоряющим напряжением до 1000 кВ, например JEM-1000 производства JEOL (Япония).

Помимо визуализации, электронные микроскопы фиксируют различные диагностические сигналы от образца и с помощью специальной аппаратуры, вмонтированной в колонну микроскопа, получают информацию о химическом и фазовом составе поверхности, измеряют наведенный ток, выполняют литографию. Электронно-лучевые методы микроскопии повсеместно внедряются в исследовательскую и производственную практику, находят применение для решения самых разнообразных задач. В микроэлектронике и в новых направлениях, таких как микромеханика и наносенсорика, электронно-лучевые методы также играют значительную роль.

К настоящему времени минимальные размеры структурных элементов микросхем уменьшились до 14 нм, а к 2018 году ожидается появление процессоров, выполненных по технологии 10 нм. Вполне естественно, что дальнейший прогресс микроэлектроники, а также развитие нанотехнологий во многом определяются состоянием средств диагностики, визуализации и контроля.

И здесь ведущую роль играет растровая электронная микроскопия, подробнее о которой – в следующей части статьи.

Продолжение следует. ●