

Наноэлектроника
Практическое занятие 10

к.т.н., доц. Марончук И.И.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Диагностика и методы
исследования
нанообъектов и наносистем

Ближнепольная оптическая микроскопия

Ближнепольная (БП) микроскопия - это способ диагностики, разрешающая способность которого не зависит от рабочей длины волны устройства λ , а определяется размером апертуры зонда D . Уже к концу 1990-х были созданы БП микроскопы (БПМ) микронного и субмикронного разрешения. В самое последнее время появились первые образцы БПМ, имеющие $D \sim 30$ нм. Для приборов диапазона СВЧ соотношение D/λ составляет 10^{-5} - 10^{-6} , т.е. устройства обладают «глубоким» субволновым разрешением. Важно, что БП микроскопия это бесконтактная неразрушающая диагностика. Наибольшие перспективы применения БПМ связывают с твердотельной микро- и наноэлектроникой, хотя, соответствующие методы интересны также для материаловедения, дефектоскопии, медицины, фундаментальных исследований и др.

Оптическая микроскопия ближнего поля позволяет исследовать оптические свойства поверхности с разрешением порядка 30 нм.

Ближнепольная микроскопия - один из методов сканирующей зондовой микроскопии, сходный по своим принципам и применению с атомно-силовой микроскопией, но обладающий аналитическими возможностями оптической микроскопии.

Ближнепольный микроскоп может оснащаться дополнительными аналитическими методиками такими, как спектроскопия комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия), спектроскопия фотолюминесценции, оптического отражения и пропускания и т.п. Такой комплексно-оборудованный микроскоп превращается в мощный аналитический прибор, позволяющий проводить исследования состава с нанометровым разрешением

История создания

Если попытаться кратко сказать, что такое ближнепольная оптика (БПО), то это- направление оптики, где показано, что в рамках классических представлений можно получить изображение с разрешением в 10-100 раз выше, чем в обычном (дальнепольном) микроскопе, если источник света имеет размер $a \approx \lambda / (10-100)$ расстоянии, т.е. в ближнем поле ($a \gg \lambda$).

Любопытно, что также как и лазеры, и голография, БПО, которую иногда называют третьей революцией в оптике XX века или оптикой XIX века, могла быть создана уже в начале нашего столетия, когда были сформулированы основные теоретические предпосылки этого направления.

Их связывают прежде всего с формулировкой законов сохранения на границе двух сред, где наряду с уходящим (распространяющимся) излучением возникает быстро затухающее или эванесцентное поле, известное с момента классических опытов Ньютона по полному внутреннему отражению. Фундаментальными свойствами этого поля является его стационарность (не излучается в направлении, перпендикулярном поверхности) и затухание по экспоненциальному закону при удалении от поверхности. По существу эванесцентное поле сосредоточено на расстоянии меньше $\lambda/2$ от поверхности светящихся объектов и с атомарной дискретностью воспроизводит ее физико-химическую структуру. Таким образом, достаточно найти способ измерения распределения светового поля непосредственно у поверхности исследуемого образца и можно будет получать изображения с разрешением значительно выше дифракционного предела.

Одним из перспективных путей решения этой задачи является использование в световой микроскопии, как и в широко известных растровых туннельных электронных и атомно-силовых микроскопах, микрозондовых принципов формирования изображения. Естественно для этого должен использоваться оптический зонд субдлинноволнового размера, способный излучать или воспринимать свет, находясь непосредственно у поверхности образца.

Идея построения светового микроскопа на этом принципе, по-видимому, впервые была высказана Сингом в 1928 г. Экспериментально эта идея была подтверждена в 1972 г., когда Аш и Николс продемонстрировали ближнепольное изображение с разрешением $\lambda/60$ в работе «Сверхразрешающий апертурный микроскоп», используя электромагнитное излучение с длиной волны 3 см и освещая им отверстие диаметром 1,5 мм на расстоянии 5 мм от поверхности. Они же предложили начать работы по созданию на основе этого принципа микроскопов для видимой и ИК областей спектра.

В связи со сложностью изготовления и управления элементами оптики размером менее λ исследования по созданию ближнепольного растрового оптического микроскопа (БРОМ) были начаты лишь в начале восьмидесятых годов, после появления технических возможностей создания устройств для перемещения элементов приборов с нанометровой дискретностью на основе пьезоэлектрического эффекта.

В отличие от появившихся к этому времени туннельных электронных и атомно-силовых микроскопов БРОМ имеет существенные преимущества: фотоны не имеют массы и электрического заряда, свободно распространяются в воздухе и многих диэлектрических материалах, легко изменяют поляризацию, имеют сравнительно большую длину волны и т.д. Эти особенности оптического излучения позволяют БРОМ существенно пополнить возможности других микронных приборов.

Среди возможных механизмов формирования контраста в БРОМ следует отметить поглощение, отражение, люминесценцию, цвет и др. Эти возможности отсутствуют в электронной и атомно-силовой микроскопии. Помимо всего, световой микроскоп является сравнительно дешевым и неразрушающим методом контроля в обычных условиях и позволяет исследовать биологические и медицинские препараты в естественных условиях.

Традиционные методы получения оптических изображений объектов имеют существенные ограничения, связанные с дифракцией света. Одним из основополагающих законов оптики является существование так называемого дифракционного предела, который устанавливает минимальный размер (R) объекта, изображение которого может быть построено оптической системой при использовании света с длиной волны λ :

$$R \approx \frac{\lambda}{2n},$$

где n - показатель преломления среды. Для оптического диапазона длин волн предельный размер составляет величину порядка 200÷300 нм. В ближнепольной оптической микроскопии используются другие принципы построения изображения объекта, которые позволяют преодолеть трудности, связанные с дифракцией света, и реализовать пространственное разрешение на уровне 10 нм и лучше.

Ближнепольный оптический микроскоп (БОМ) был изобретен Дитером Полем (лаборатория фирмы IBM, г. Цюрих, Швейцария) в 1982 году сразу вслед за изобретением туннельного микроскопа. В основе работы данного прибора используется явление прохождения света через субволновые диафрагмы (отверстия с диаметром много меньше длины волны падающего излучения).

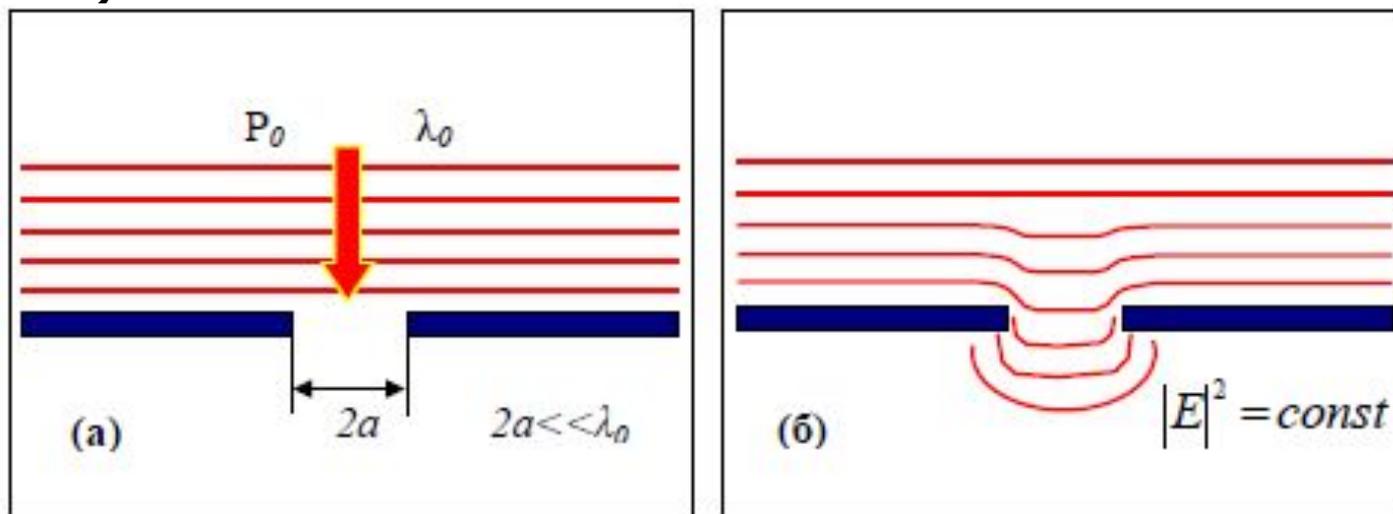


Рис. (а) - Прохождение света через отверстие в экране с субволновой апертурой. (б) - Линии постоянной интенсивности оптического излучения в области субволнового отверстия

При прохождении света через субволновое отверстие наблюдается ряд особенностей. Электромагнитное поле в области диафрагмы имеет сложную структуру. Непосредственно за отверстием на расстояниях $Z < 100 a$ располагается так называемая ближняя зона, в которой электромагнитное поле существует, в основном, в виде эванесцентных (не распространяющихся) мод, локализованных вблизи поверхности диафрагмы. В области расстояний $Z > 100 a$ располагается дальняя зона, в которой наблюдаются лишь излучательные моды. Мощность излучения за субволновой диафрагмой в дальней зоне может быть оценена по следующей формуле:

$$P_{\text{в}} = \frac{128}{27\pi} k^4 a^6 W_0,$$

где k - волновой вектор, W_0 - плотность мощности падающего излучения.

Оценки показывают, что для излучения с длиной волны порядка $\lambda = 500$ нм и диафрагмы с отверстием ~ 5 нм мощность излучения в дальней зоне составляет по порядку величин 10^{-10} от мощности падающего излучения.

Поэтому, на первый взгляд, кажется, что использование малых отверстий для построения растровых оптических изображений исследуемых образцов практически невозможно. Однако, если поместить исследуемый объект непосредственно за отверстием в ближней зоне, то вследствие взаимодействия эванесцентных мод с образцом часть энергии электромагнитного поля переходит в излучательные моды, интенсивность которых может быть зарегистрирована оптическим фотоприемником. Таким образом, ближнепольное изображение формируется при сканировании исследуемого образца диафрагмой с субволновым отверстием и регистрируется в виде распределения интенсивности оптического излучения в зависимости от положения диафрагмы $I(x, y)$. Контраст на БОМ изображениях определяется процессами отражения, преломления, поглощения и рассеяния света, которые, в свою очередь, зависят от локальных оптических свойств образца.

С физической точки зрения Ближнепольная Сканирующая Оптическая Микроскопия (БСОМ) основана на присутствии в дальней зоне излучения вполне идентифицируемых следов взаимодействия света с микрообъектом, находящимся в ближнем световом поле, которое локализовано на расстояниях много меньших длины волны. В техническом смысле БСОМ сочетает элементы обычной оптики и сканирующей зондовой микроскопии. Отличительным элементом ближнепольных приборов является оптический зонд (рис.), обычно представляющий собой заостренное оптическое волокно, наружная поверхность которого, за исключением вершины конуса, покрыта непрозрачным слоем металла.

При сканировании зонд собирает оптическую информацию с поверхности образца с разрешением равным диаметру апертуры.

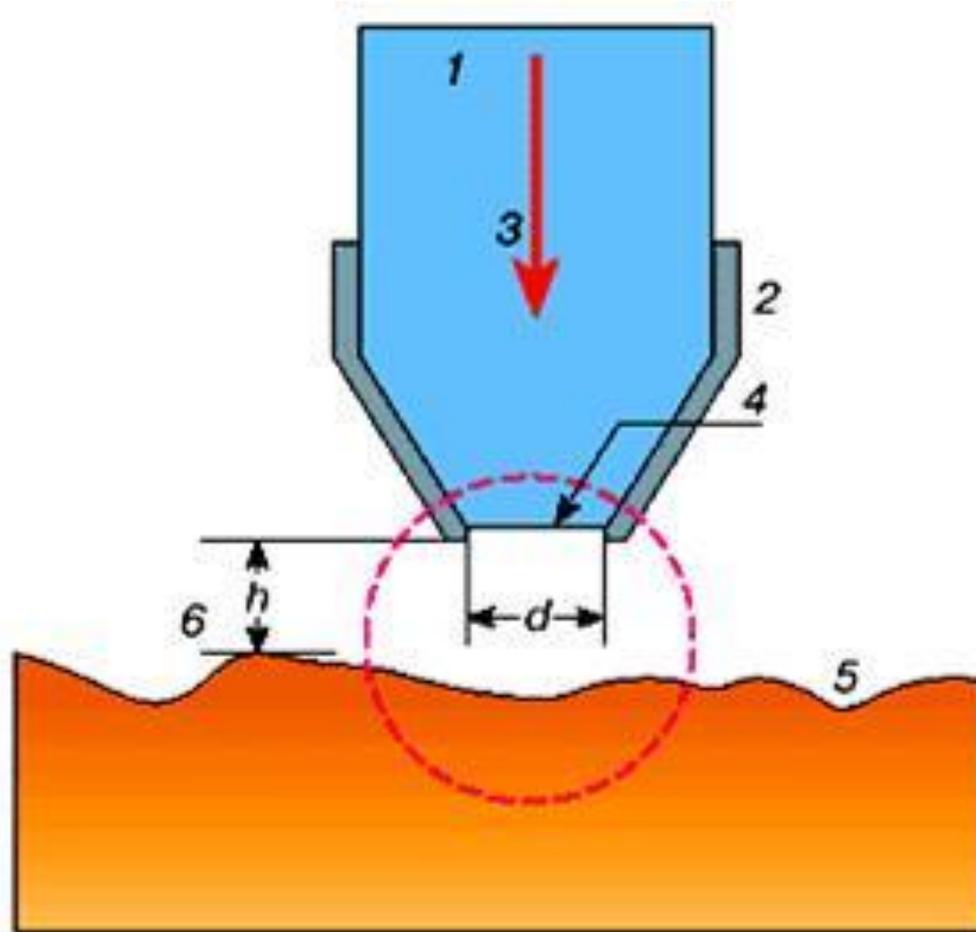
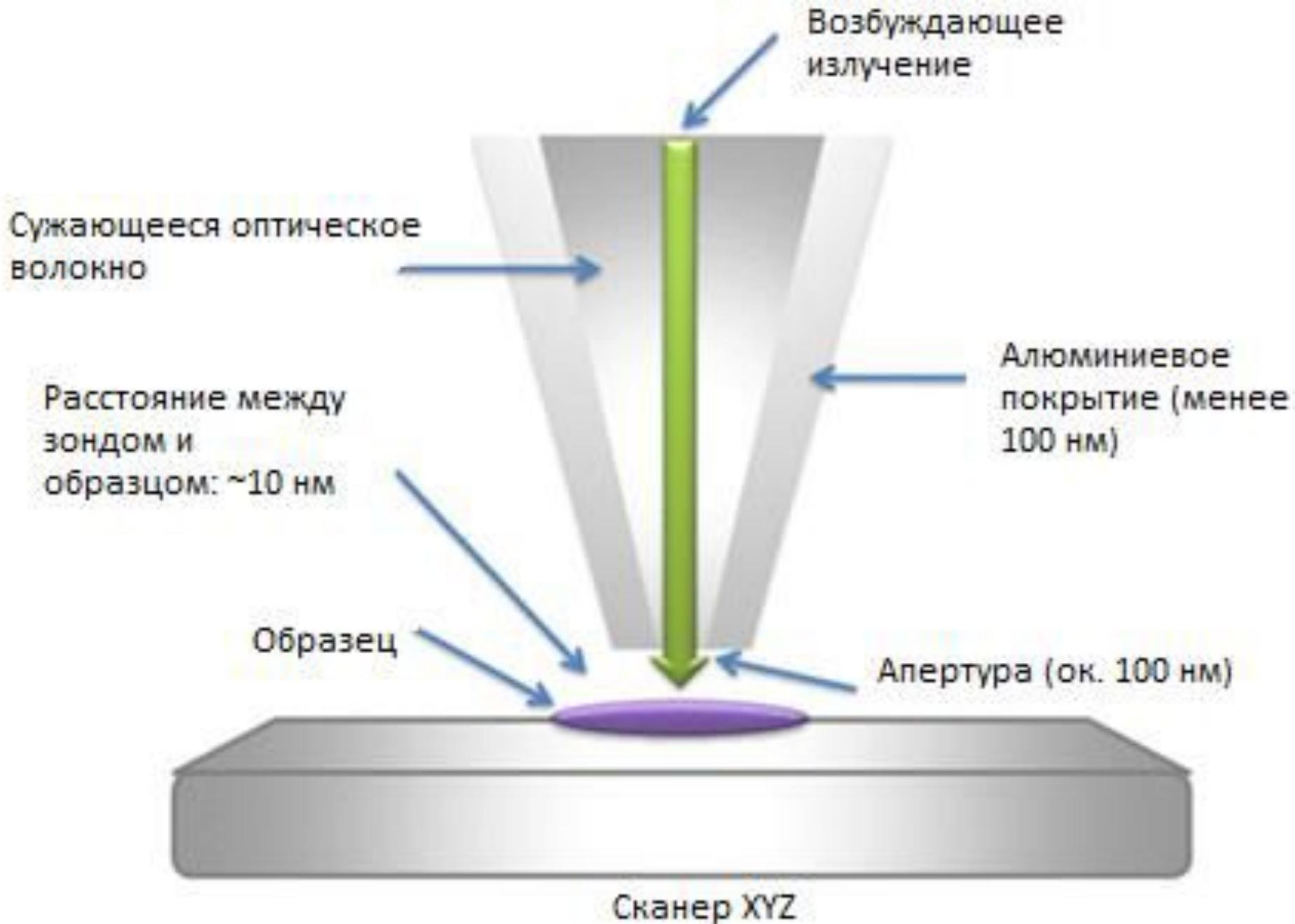


Рис. Схема волоконно-оптического ближнепольного зонда: 1 - заострённое оптическое волокно; 2 - металлическое покрытие; 3 - проходящее через зонд излучение; 4 - выходная апертура зонда, $d \ll \lambda$; 5 - поверхность исследуемого образца и расстояние до зонда, $h \ll \lambda$. Штрихами очерчена область ближнепольного контакта.



Кончик СБОМ зонда

Зонды БОМ на основе оптического волокна

На сегодняшний день существует несколько схем реализации ближнепольного оптического микроскопа. Наиболее широкое применение нашли БОМ с зондами на основе оптического волокна, представляющего собой аксиально-симметричный оптический волновод из материалов с отличающимися показателями преломления (рис.).

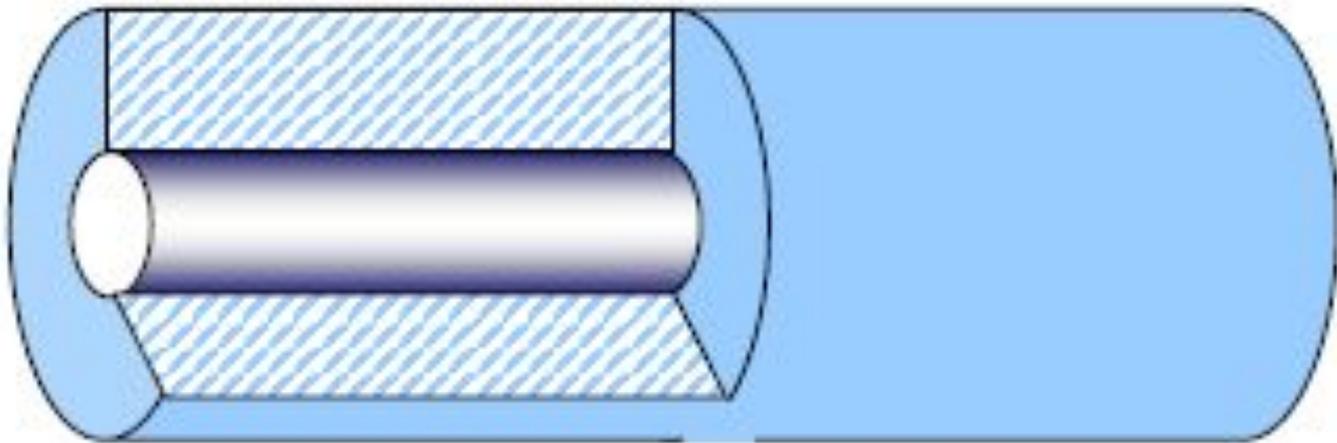
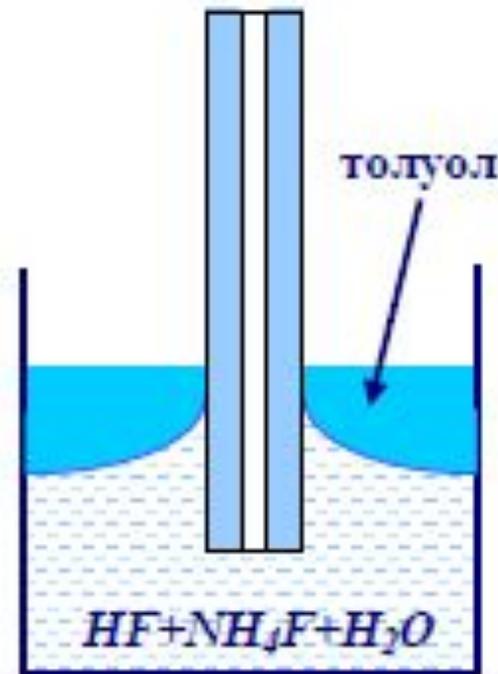


Рис. Схематическое изображение строения оптического волокна

Оптическое волокно состоит из сердцевины (core) и оболочки (cladding). Снаружи волокно покрывается защитным слоем. Сердцевина и оболочка изготавливаются, как правило, из особого кварцевого стекла. При этом стекло, используемое для оболочки, имеет меньший показатель преломления, чем стекло для сердцевины. (На практике показатель преломления стекла регулируется с помощью легирующих добавок, так что коэффициенты преломления сердцевины и оболочки различаются на величины порядка 1%). Такая система, вследствие явления полного внутреннего отражения, позволяет локализовать оптическое излучение в области сердцевины и практически без потерь транспортировать его на большие расстояния.

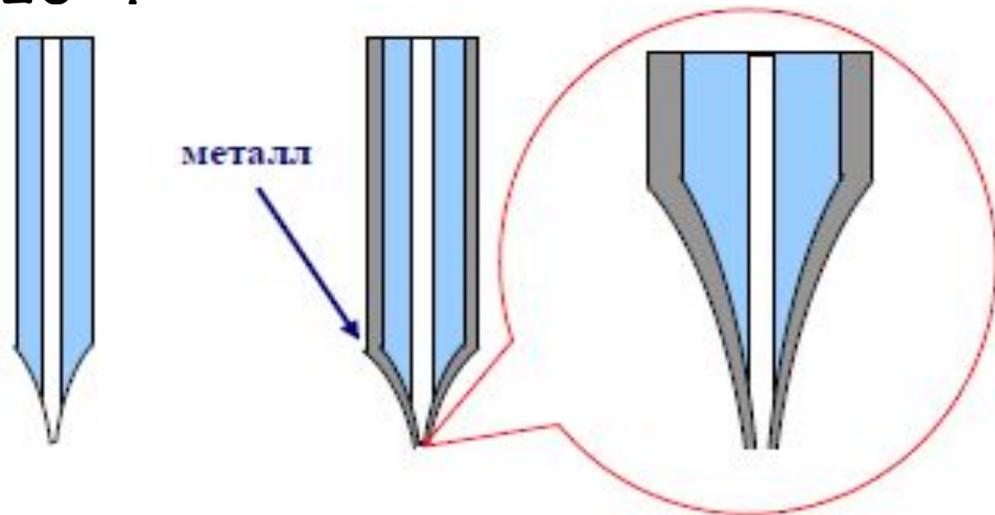
Зонды для БОМ изготавливаются следующим образом. Очищенный от защитного слоя конец оптического волокна погружается в раствор, состоящий из двух несмешивающихся жидкостей - смеси HF , NH_4F , H_2O , которая является травителем для кварца, и жидкости с меньшей плотностью, например, толуола. Толуол располагается поверх травителя и служит для формирования мениска смачивания на границе толуол-травитель-волокно (Рис.).

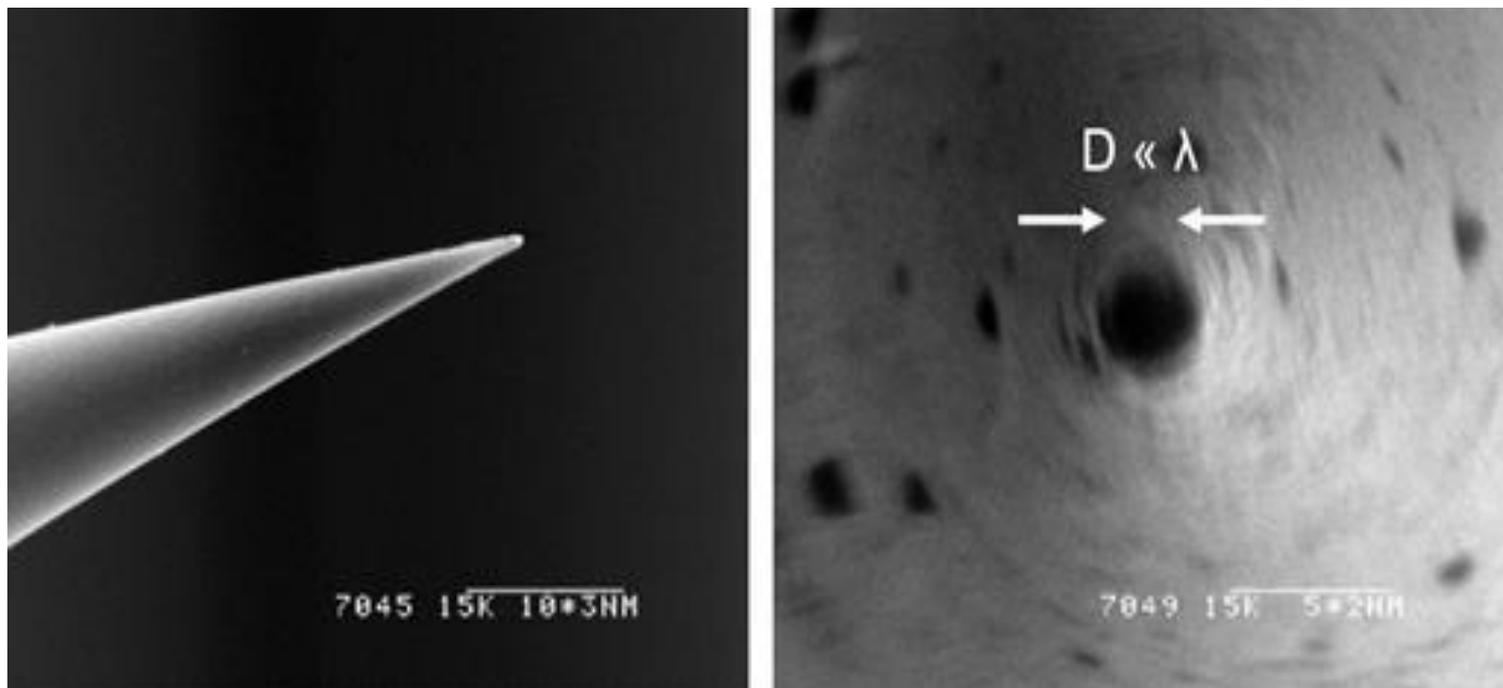
Изготовление БОМ зондов на основе оптического волокна, химическое травление волокна.



По мере травления толщина волокна уменьшается, что приводит к уменьшению высоты мениска. В результате в процессе травления на конце волокна происходит формирование конусообразного острия (рис.) с характерными размерами меньше 100 нм. Затем кончик зонда покрывается тонким слоем металла. Покрытие наносится с помощью вакуумного напыления под углом порядка 30° к оси волокна, так что на кончике острия в области тени остается незапыленный участок малой апертуры, который и является ближнепольным источником излучения. Оптимальный угол при вершине зондов составляет порядка 20° .

Вид кончика волокна после травления и напыление тонкой пленки металла.





Апертурный зонд, полученный методом химического травления с последующим напылением металла на его боковую поверхность.

"Shear-force" метод контроля расстояния зонд-поверхность в ближнепольном оптическом микроскопе

Для работы БОМ необходимо удерживать зонд над поверхностью на расстояниях порядка 10 нм и менее. Существуют различные решения данной проблемы, однако наиболее широкое распространение получили БОМ с так называемым "shear force" методом контроля расстояния между зондом и образцом.

Чаще всего применяются схемы "shear-force" контроля с использованием пьезодатчика на основе кварцевого резонатора камертонного типа (рис.).

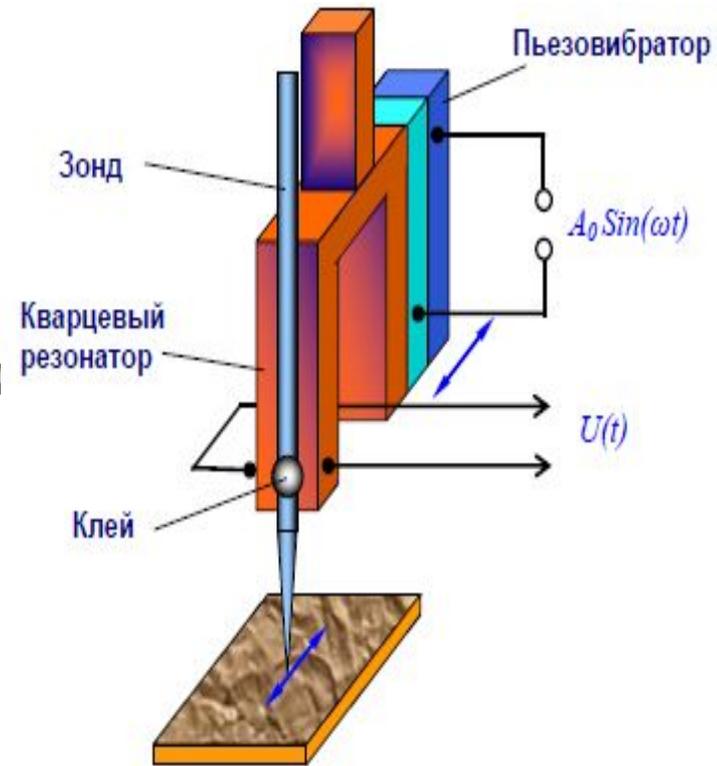
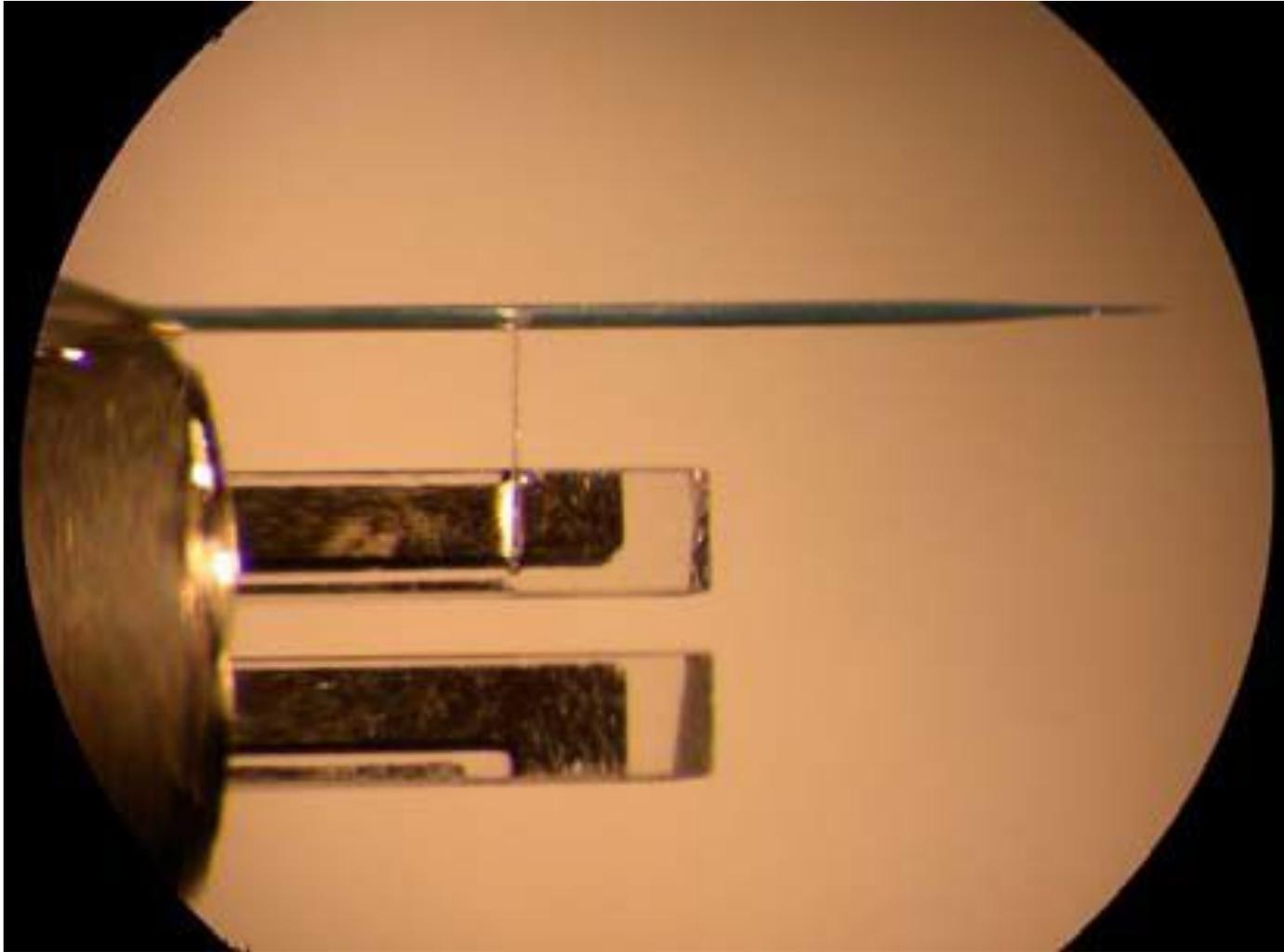


Рис. Схема "shear-force" датчика расстояния зонд-поверхность на основе кварцевого резонатора камертонного типа

Зонд БОМ крепится к кварцевому резонатору с помощью клея. Вынужденные колебания камертона на частоте, близкой к резонансной частоте системы зонд - кварцевый резонатор, возбуждаются с помощью дополнительного пьезовибратора. При этом зонд совершает колебательное движение параллельно поверхности образца. Измерение силы взаимодействия зонда с поверхностью производится посредством регистрации изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний кварцевого резонатора на частоте возбуждения (по переменной составляющей напряжения на электродах резонатора $U(t)$). Теория "*shear force*" контроля достаточно сложна, и здесь мы ограничимся лишь качественными соображениями.



На рис. представлена фотография крепления зонда к камертону
через перемычку

При сближении зонда и образца наблюдаются несколько эффектов. Во-первых, появляется дополнительное диссипативное взаимодействие зонда с поверхностью за счет сил вязкого трения (в тонкой прослойке воздуха, прилегающего к поверхности, и в тонком слое адсорбированных молекул на поверхности образца).

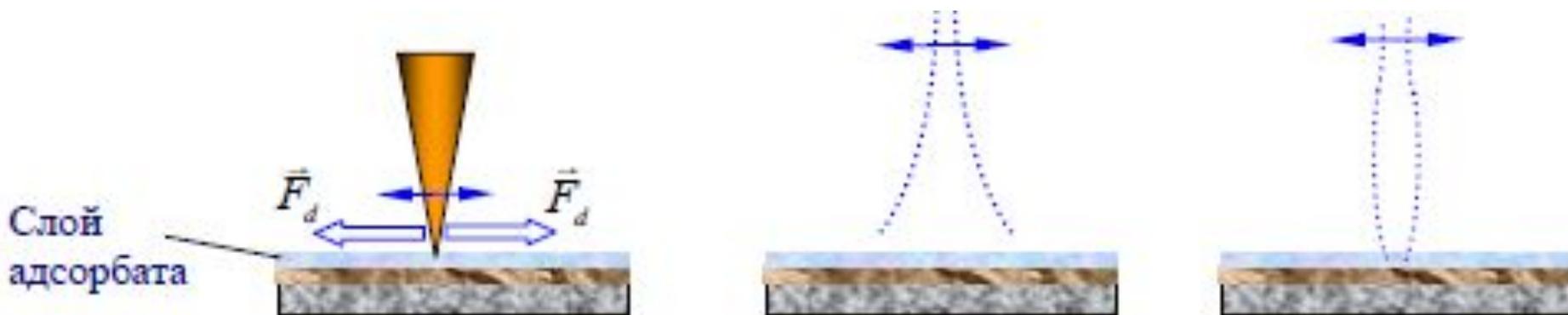


Рис. Диссипативные силы, действующие на зонд, и смена моды колебаний зонда вблизи поверхности образца.

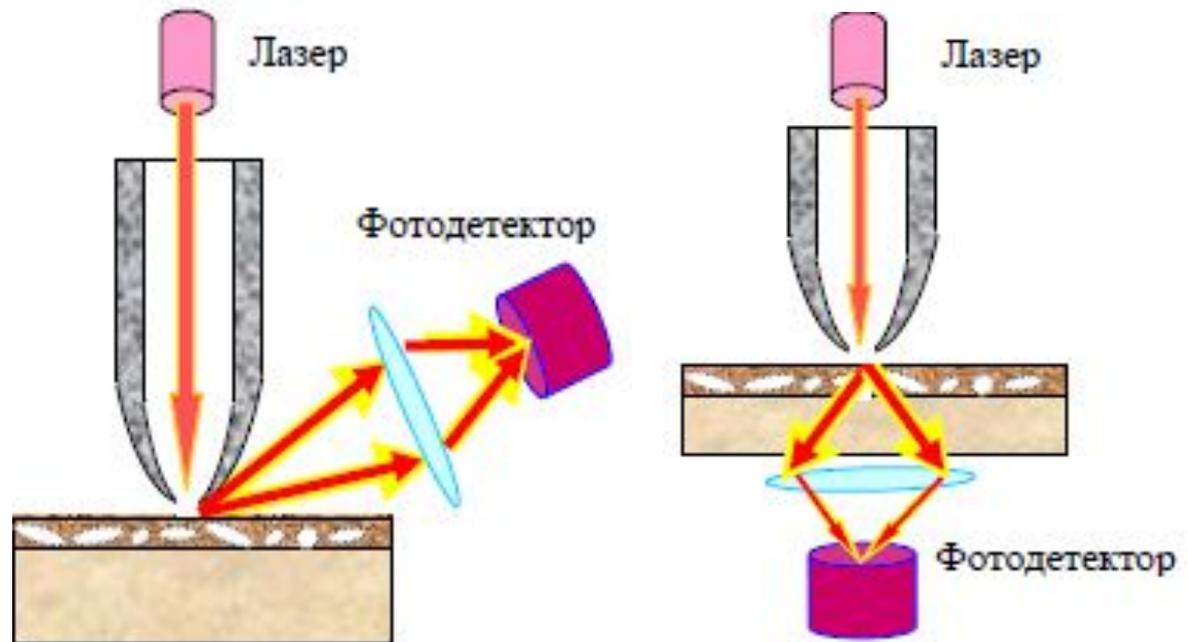
Это приводит к уменьшению добротности системы, а следовательно, к уменьшению амплитуды колебаний и уширению АЧХ И ФЧХ системы зонд-резонатор на резонансной частоте. Во-вторых, при малых расстояниях зонд-поверхность происходит изменение моды колебаний в системе зонд - резонатор. В свободном состоянии мода колебаний соответствует колебаниям стержня со свободным концом, а при сближении с образцом (в пределах при касании зонда поверхности) переходит в колебания стержня с закрепленным концом. Это приводит к увеличению резонансной частоты в системе зонд-резонатор, т.е. сдвигу АЧХ в сторону более высоких частот.

Экспериментально данные явления наблюдались в работах. Изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний в системе зонд-резонатор используются в качестве сигналов обратной связи для контроля расстояния зонд-поверхность в ближнепольных оптических микроскопах.

Конфигурации БОМ

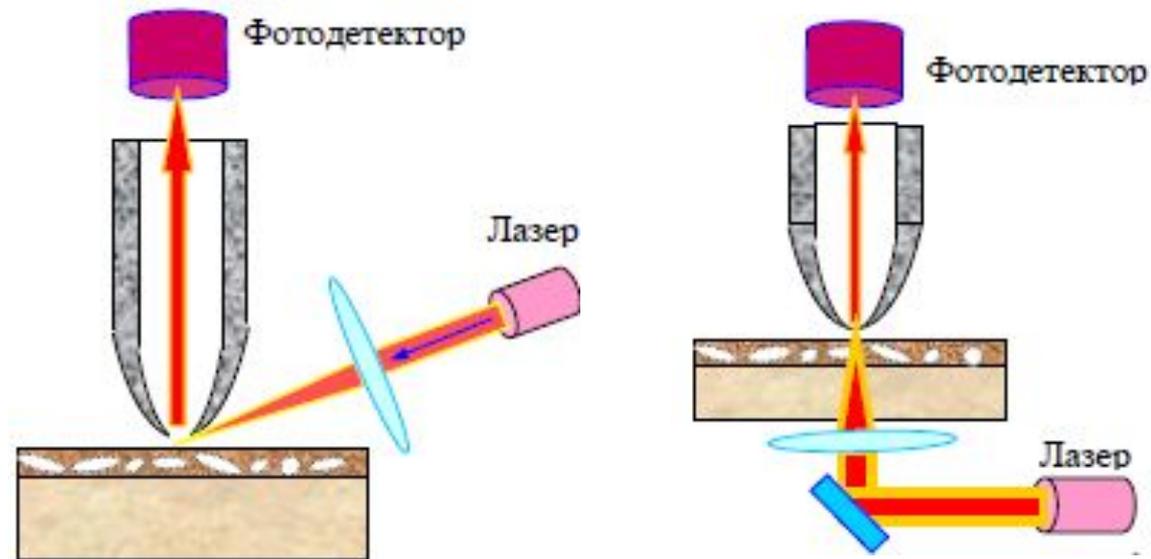
На практике используются несколько конструктивных схем ближнепольного оптического микроскопа. Основные конфигурации БОМ показаны схематично на рис. Наиболее часто реализуется схема, в которой оптическое излучение лазера локализуется в пространстве с помощью волоконного зонда. Такая схема позволяет получить максимальную мощность излучения в области субволнового отверстия и проводить исследование образцов как на отражение (рис. а), так и на просвет (рис. б).

Возможные
конфигурации
ближнепольного
оптического
микроскопа



Для увеличения чувствительности излучение, отраженное от образца или прошедшее сквозь образец, собирается на фотоприемнике с помощью фокусирующего зеркала или линзы. Данная конфигурация БОМ широко используется в экспериментах по ближнепольной оптической литографии. В экспериментах, когда требуются высокие уровни оптической накачки (как, например, при исследовании локальных нелинейных свойств образцов), реализуется схема, в которой мощное лазерное излучение направляется на исследуемую структуру, а прием осуществляется с помощью ближнепольного зонда (рис. а, б).

Возможные
конфигурации
ближнепольного
оптического
микроскопа



На рис. в качестве примера приведено АСМ / БОМ изображение полупроводниковой структуры InAs/GaAs с квантовыми точками, полученное с помощью микроскопа, работающего по схеме, показанной на рис. а.

В эксперименте использовался HeCd лазер ($\lambda=442$ нм). Ближнепольное оптическое изображение образца представляет собой совокупность отраженного от поверхности образца излучения и люминесцентного излучения, соответствующего переходу между уровнями размерного квантования в InAs точках.

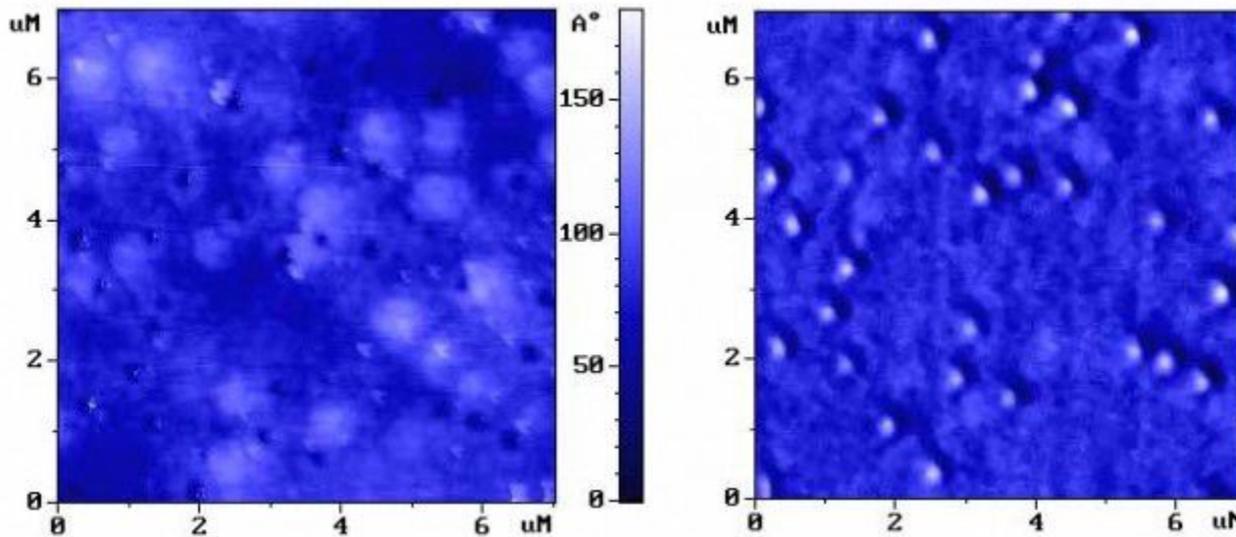


Рис. "Shear force" АСМ изображение рельефа поверхности (слева) и ближнепольное оптическое изображение (справа) образца с квантовыми точками InAs

Интересная, но менее распространенная схема, в которой возбуждение структуры и прием ближнепольного излучения осуществляются через зонд микроскопа, приведена на рис.

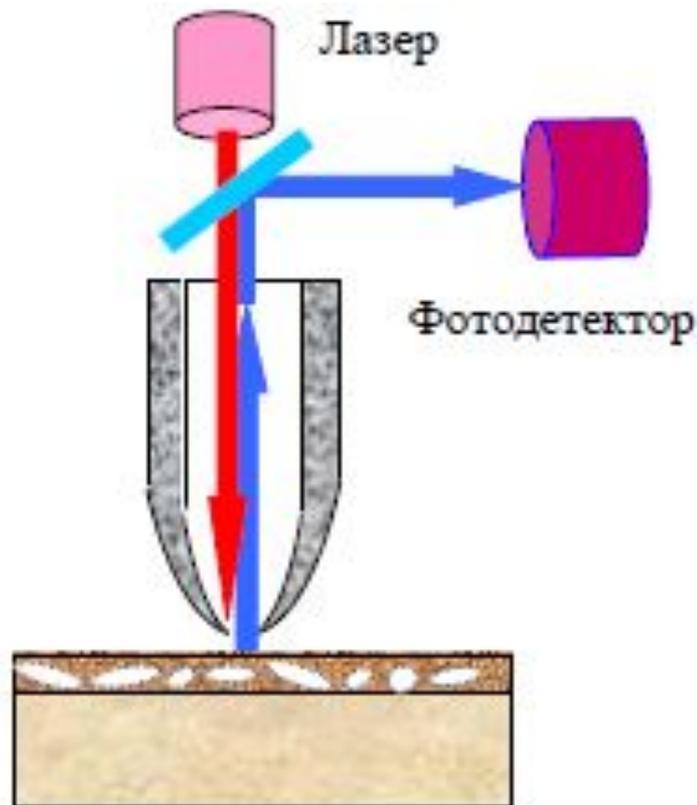


Рис. Схема БОМ, в котором засветка образца и прием излучения осуществляются с помощью одного и того же зонда

Такое совмещение ближнепольного источника с ближнепольным приемником является весьма многообещающим методом, обеспечивающим очень высокое пространственное разрешение. Однако в данной схеме излучение дважды проходит через субволновое отверстие. Это приводит к тому, что приходящий на фотоприемник сигнал имеет очень низкую интенсивность, и требуются высокочувствительные методы его регистрации. Сопряжение БОМ с оптическим монохроматором позволяет проводить локальные спектроскопические исследования образцов.

В отличие от туннельного и атомно-силового микроскопов, сразу завоевавших признание, БСОМ некоторое время оставался в тени. Уникальные возможности БСОМ были убедительно продемонстрированы лишь в начале 90-х годов, когда удалось решить две важные технические проблемы: существенно повысить энергетическую эффективность зондов и обеспечить надежный контроль расстояния между острием и образцом. В последние годы в десятках лабораторий успешно ведутся работы по использованию БСОМ при решении широкого круга задач физики поверхности, биологии, техники записи и считывания информации и др. С 1993 года в США ведется промышленный выпуск приборов БПО.

К настоящему времени создано около 20 типов БСОМ, различающихся особенностями оптической схемы и функциональным назначением зонда. В зависимости от наличия или отсутствия диафрагмы на конце зонда их можно разбить на две основные группы: апертурные и безапертурные. Принцип действия апертурных БСОМ, составляющих преобладающее большинство современных приборов, поясняет приведенная на рис. блок-схема микроскопа.

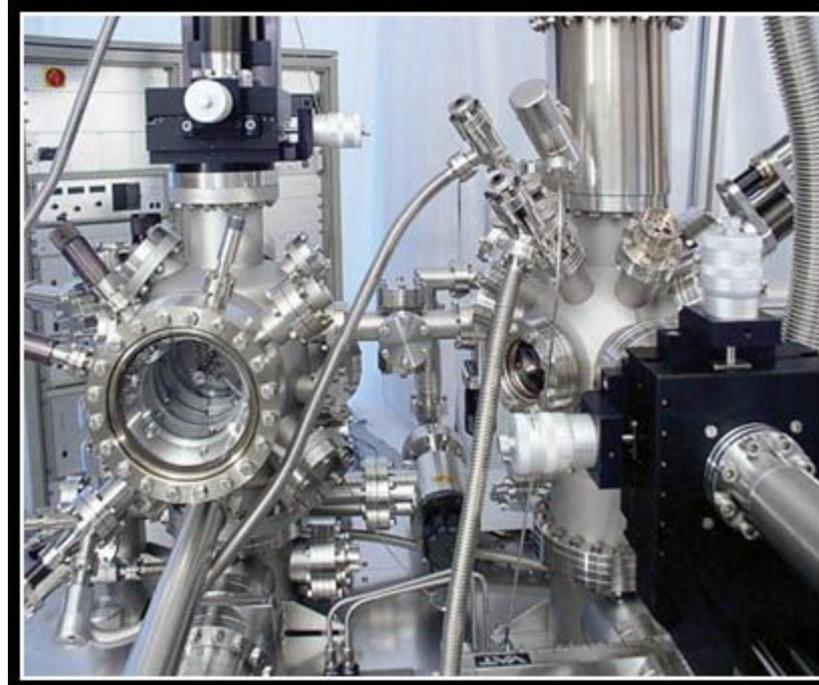
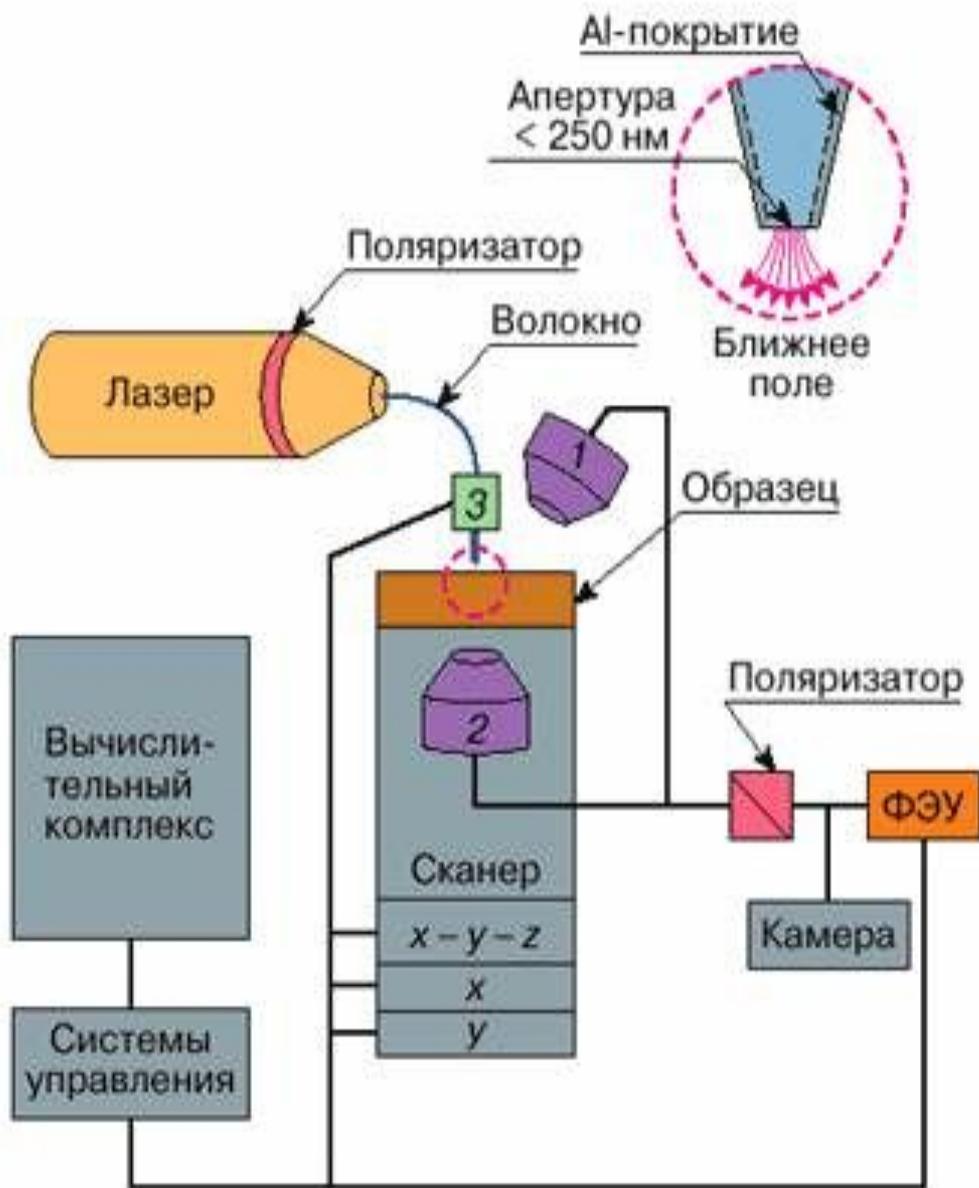


Рис. Блок-схема ближнепольного микроскопа 1-микрообъектив, работающий в отраженном свете; 2- микрообъектив, работающий в проходящем свете; 3- пьезодвижитель для перемещения зонда. Штрихами очерчена область ближнепольного контакта

Луч лазера (обычно гелий-неонового или аргонового) через согласующий элемент попадает в заостренное металлизированное волокно и на выходе сужается до размеров диафрагмы. Взаимное перемещение острия и образца в трех измерениях x , y , z осуществляется с помощью пьезодвижителей. Прошедшие через образец или отраженные и рассеянные фотоны улавливаются одним из микрообъективов (2 или 1 соответственно, см. рис.) и направляются в регистрирующий прибор, обычно фотоумножитель. Такой микрообъектив, как правило, входит в схему обыкновенного оптического микроскопа, что позволяет осуществить выбор исследуемого участка и его привязку к более широкому полю.

Приведенная на рис. схема относится к приборам, работающим в режиме освещения (illumination mode).

Широко распространены приборы, работающие в режиме сбора фотонов (collection mode), когда зонд переносит фотоны от образца, освещенного, например, через микрообъектив, к детектору. В комбинированном режиме (освещение / сбор) зонд выполняет одновременно обе функции.

Чтобы установить острие на нужной высоте над образцом, во всех сканирующих зондовых микроскопах используют зависимость величины I регистрируемого сигнала от z . В большинстве типов БСОМ зависимость $I(z)$ неоднозначна, поскольку наряду с ближнепольным сигналом I_1 регистрируется также периодически изменяющийся с z сигнал I_2 , вызванный интерференцией падающей и переотраженных в системе зонд-образец волн. Это затрудняет или делает полностью невозможным надежный контроль z по величине $I = I_1 + I_2$ при сближении острия с образцом.

Лучшим решением проблемы является введение в БСОМ вспомогательных узлов, позволяющих им осуществлять также функции сканирующего туннельного или атомно-силового микроскопов, в которых определение z не вызывает существенных трудностей.

В таких комбинированных приборах запись изображения осуществляется одновременно по двум каналам, один из которых воспроизводит рельеф поверхности, а другой - локальное распределение показателя преломления в тончайшем приповерхностном слое. Возможность различения оптического и топографического контрастов существенно упрощает интерпретацию изображения.

Наибольшее распространение получил метод контроля z , основанный на изменении тангенциальной составляющей силы физического взаимодействия острия с образцом (shear force).

Разрешающая способность ближнепольных микроскопов

Основной характеристикой БСОМ является пространственное разрешение, которое в большей степени зависит от условий освещения или в более общем случае - от наблюдения образца, структуры его поверхности и микрогеометрии зонда. Как упоминалось ранее, функция импульсного отклика дифракционно-ограниченной оптической системы описывается распределением Эри. Полуширина главного максимума распределения соответствует разрешению по Рэлю:

$$\Delta x = 0,61\lambda / \sin \varphi,$$

где φ - апертурный угол

В пределе при $\varphi \rightarrow \pi/2$ $\Delta x \rightarrow \Delta x_{\min} = 0,61\lambda$. При прохождении света через малую диафрагму из-за рассеяния и геометрических ограничений происходит искажение и расширение Δf спектра переносимых пространственных частот, которое также описывается распределением Эри $\Delta f = 0,61/\alpha$. В результате при $\alpha \rightarrow 0$ волновое поле непосредственно за диафрагмой содержит сколь угодно большие пространственные частоты и как следствие этого $\Delta x_{\min} \rightarrow 0$. В реальной ситуации из-за конечной проницаемости металлического экрана (покрытия) минимальный эффективный радиус диафрагмы определяется глубиной проникновения света в металл или толщиной δ скин-слоя. С учетом этого ожидаемое предельное разрешение, например, для зонда с алюминиевым покрытием в видимом диапазоне спектра составляет $\Delta x_{\min} \approx 2\delta \approx 13$ нм, что соответствует лучшим экспериментальным результатам. Отсутствие физических ограничений размера вершины зонда в безапертурных БСМ позволяет реализовать в них разрешения лучше 1 нм.

Определение ближнего поля

Аппаратное обеспечение ближнепольной микроскопии

Микроскопия ближнего поля с использованием апертуры.

В общем случае зонд для апертурной микроскопии ближнего поля представляет собой заостренное оптическое волокно покрытое слоем металла и апертурой на острие волокна. Размер апертуры и материал покрытия варьируются в зависимости от методики и требуемого разрешения. Как правило, диаметр апертуры 50-100 нм, и в качестве покрытия используется алюминий или серебро.

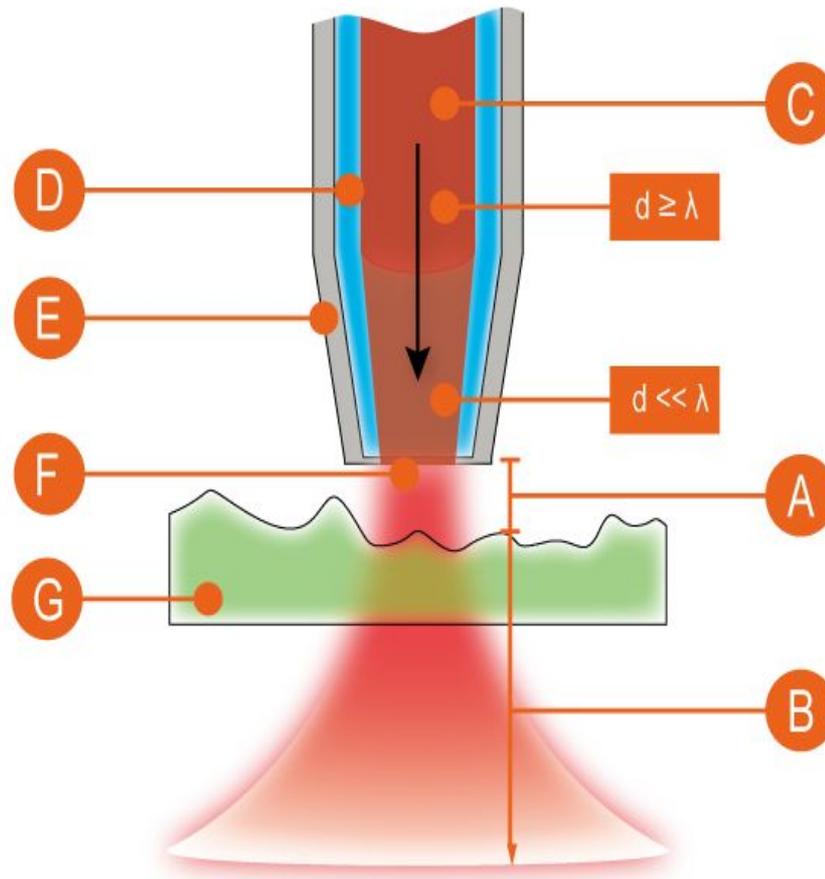
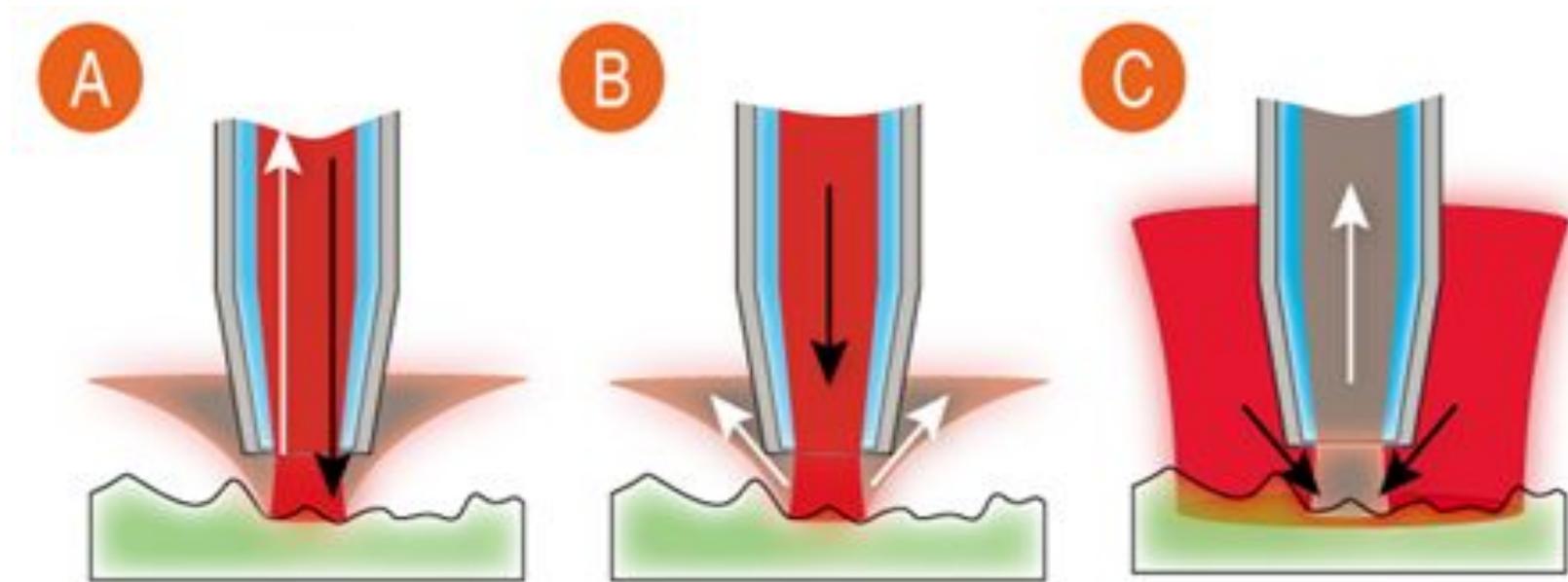


Рис.5 Схема получения ближнепольного оптического изображения в точке с использованием апертуры **A** - область ближнего поля ($h \ll \lambda$), **B** - область дальнего поля ($h \geq \lambda$), **C** - лазерное излучение, **D** - оптическое волокно, **E** - металлическое покрытие оптического волокна, **F** - апертура ($d \ll \lambda$), **G** - образец

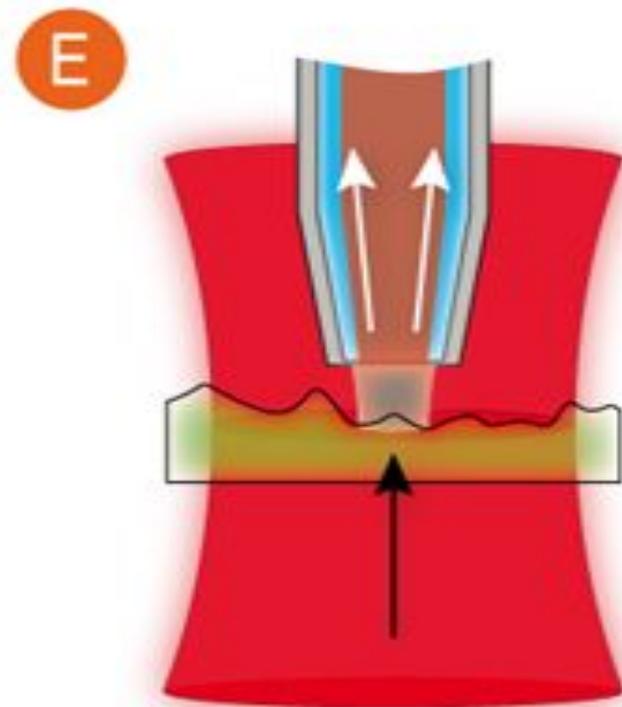
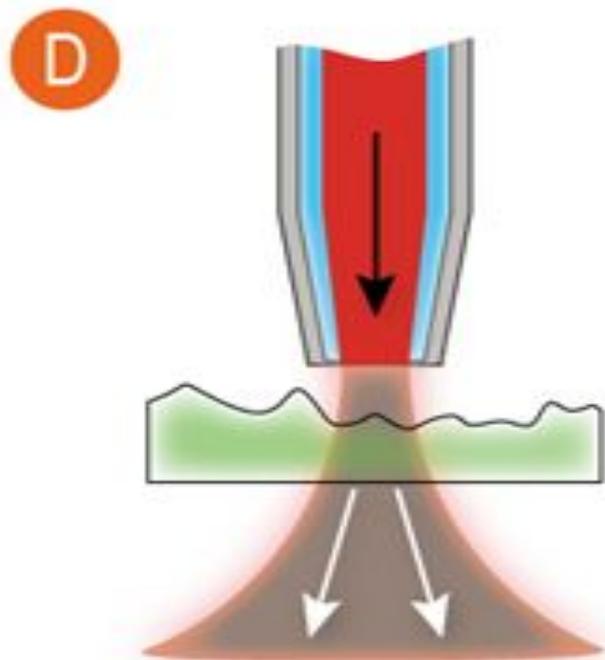
Методики освещения и/или детектирования сигнала

Существуют различные методики ближнепольной оптической микроскопии с использованием апертуры

А - падающее и отраженное излучение идут по одному и тому же оптическому волокну; **В** - падающее излучение идет по оптическому волокну зонда, детектируется отраженное от поверхности образца излучение; **С** - для освещения образца используется внешний источник лазерного излучения, для сбора отраженного излучения используется зонд;



D - для подвода излучения к образцу используется зонд, детектируется прошедшее через образец излучение. Методика применима только к прозрачным образцам; **E** - для подвода излучения к образцу используется внешний источник лазерного излучения, детектируется излучение прошедшее через образец. Методика применима только к прозрачным образцам



Аппаратура для СБОМ

СБОМ позволяет решать следующие задачи:

1. Определять рельеф исследуемого образца;
2. Получать данные об оптических свойствах поверхности образца (коэффициентах отражения и пропускания, распределения люминисцентных характеристик);
3. Проводить измерения локальных спектральных характеристик;
4. Выполнять нанолитографические операции.

Все ближнепольные микроскопы включают несколько базовых элементов конструкции:

1. зонд;
2. система перемещения зонда относительно поверхности образца по 2-м (X-Y) или 3-м (X-Y-Z) координатам (система развертки);
3. регистрирующая система;
4. оптическая система.

Рассмотрим строение сканирующего ближнепольного микроскопа на примере прибора «Интегра Соларис»

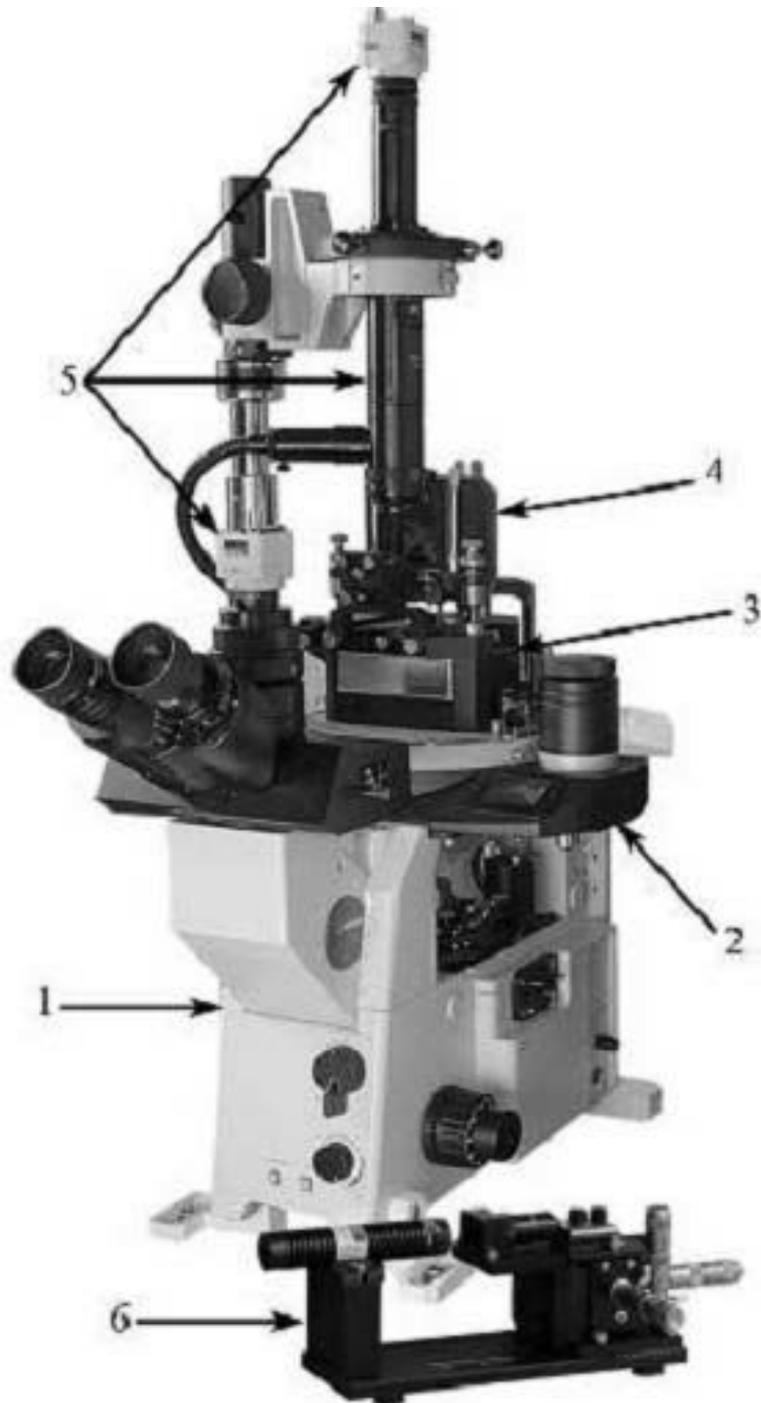


Рис. Общий вид ЗНЛ Интегра Соларис.
1-инвертированный оптический микроскоп,
2- базовый блок Интегра,
3- сменное основание,
4- сканирующая измерительная головка,
5- система видеонаблюдения,
6-лазерный модуль

Исследование оптических характеристик с разрешением ниже дифракционного предела производится с помощью СБОМ измерительной головки с оптоволоконным зондовым датчиком, ввод излучения в который осуществляется с помощью лазерного модуля. Выбор участка поверхности образца для исследований и контроль процедуры подвода зонда к образцу осуществляется с помощью системы видеонаблюдения. Конструкция сменного основания позволяет наряду со СБОМ изображением получать и оптическое изображение исследуемого образца с помощью инвертированного микроскопа.

Объектив инвертированного микроскопа располагается в сменном основании, в котором встроены системы грубой и точной фокусировки, позволяющие использовать высокоразрешающие объективы, в т.ч. иммерсионные. В сменном основании помимо системы грубого ручного позиционирования образца содержится также система точного XY позиционирования, также позволяющая осуществлять XY сканирование. Получение высокого разрешения обеспечивается также использованием виброизолирующей платформы с системой активной виброизоляции.

Оптический инвертированный микроскоп позволяет получать наряду со СБОМ изображением также и оптическое, визуально следить за процессом подвода зонда, а также снимать оптический сигнал с помощью модуля ФЭУ.

Базовый блок Интегра служит для установки на него сменного основания, а также подключения через него измерительной головки и сменного основания к контроллеру.

В базовом блоке расположен механизм подвода, обеспечивающий подвод объектива к образцу автоматизировано, с помощью шагового двигателя, либо вручную.

Сканирующее сменное основание служит для установки исследуемого образца, измерительной головки и объектива инвертированного микроскопа.

Лазерный модуль предназначен для ввода лазерного излучения в оптическое волокно. Используется твердотельный лазер с длиной волны 488нм.

СБОМ измерительная головка предназначена для измерения рельефа поверхности образца и его приповерхностных оптических характеристик, при этом в процессе измерений могут регистрироваться амплитуда и фаза колебаний зонда.

Датчик (Рис.) состоит из следующих основных частей: кварцевого резонатора 1, приклеенного к нему одномодового оптического волокна 2 и текстолитового основания с контактными площадками 3.

Конец оптического волокна, который крепится к кварцевому резонатору клеевым соединением, заострен до образования острия с радиусом закругления порядка 50-100нм. На этот конец напылен слой металла таким образом, чтобы на острие остался чистый участок с апертурой диаметром 50-100нм. Датчиком, используемым для контроля расстояния между зондом и образцом, является U-образный (камертонного типа) кварцевый резонатор, к одному из плеч которого приклеен заостренный конец оптического волокна таким образом, что он выступает на 0.5-1.0мм. Именно между этим заостренным концом и исследуемой поверхностью осуществляется силовое взаимодействие.

Сигнал, вырабатываемый кварцевым резонатором, снимается через контактные площадки.

Конструкция такого зонда позволяет локализовать электромагнитное поле в области пространства с размерами меньше длины волны используемого излучения.

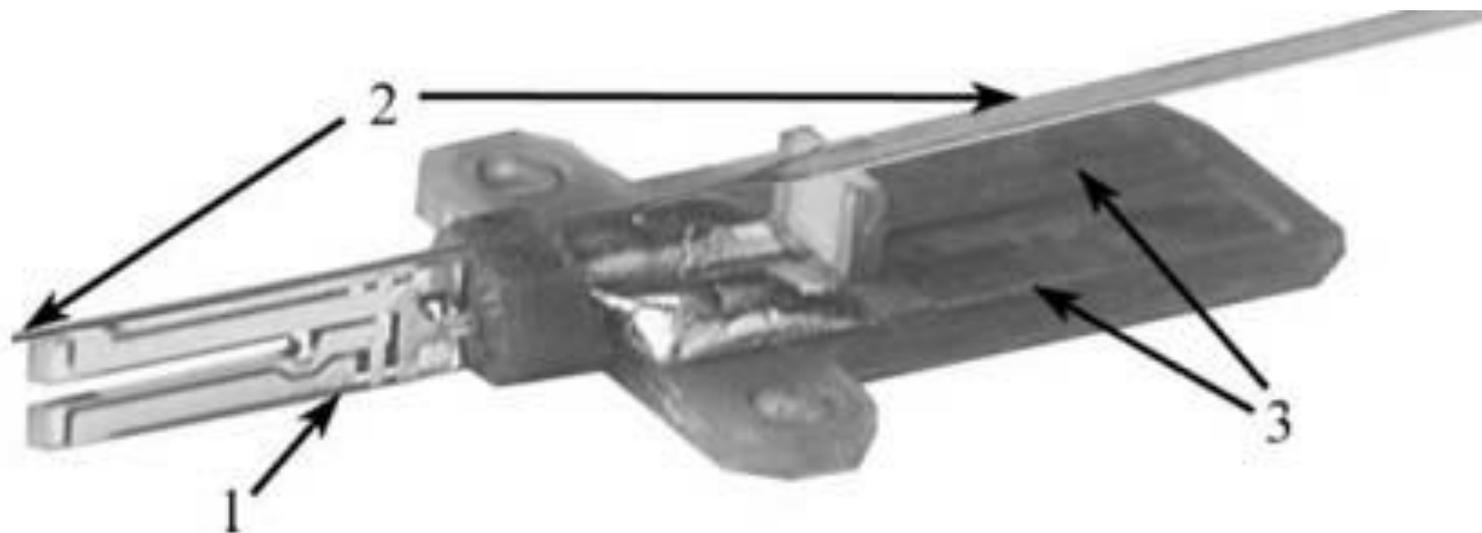


Рис. Устройство зондового датчика. 1- кварцевый резонатор, 2- оптическое волокно, 3- контактные площадки

Принцип работы СБОМ

Рассмотрим СБОМ на примере Интегра Соларис.

Оптоволоконный зондовый датчик устанавливается на сканере, расположенном внутри измерительной головки. В место крепления зондового датчика на сканере располагается пьезодрайвер, колеблющийся на резонансной частоте системы зонд-кварцевый резонатор-держатель зонда. С контактов кварцевого резонатора снимается сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний. При приближении зонда к поверхности образца резонансная частота системы меняется за счет атомарного взаимодействия (поперечно-силовая микроскопия) кончика зонда с поверхностью. Происходит резкое падение амплитуды, изменение фазы колебаний кварцевого резонатора. Соответственно, изменяется величина изменяемого с него сигнала.

Эти изменения отслеживаются синхронным детектором, входящим в систему обратной связи, которая управляет перемещениями пьезотрубки сканера по оси Z. Таким образом, система обратной связи поддерживает величину взаимодействия между зондом и поверхностью образца во время сканирования. Величина взаимодействия косвенно задается параметром Set-Point в программе управления сканированием.

Управляющий сигнал, подаваемый на Z-секцию сканера, служит источником данных для воспроизведения рельефа поверхности образца.

Образец (обычно на подложке) устанавливается на держатель образца. На сменное основание устанавливается измерительная головка. После этого, с помощью моторизированной винтовой опоры, зонд подводится к образцу на расстояние, определяемое параметром Set-Point и, начинается сканирование в плоскости образца.

Для ввода лазерного излучения свободный конец оптического волокна очищается от полимерного покрытия и скалывается. Затем конец волокна закрепляется на юстировочном столике лазерного модуля. Лазерное излучение фокусируется объективом на конце волокна. Излучение распространяется по оптическому волокну до выходной апертуры на заостренном конце волокна, при этом поверхность исследуемого образца ввиду малого расстояния между зондом и поверхностью оказывается в ближнем поле выходящего из волокна оптического излучения. Выходящее из кончика зонда излучение рассеивается образцом, при этом часть рассеянного излучения собирается оптической системой и направляется на детектор ФЭУ. Сигнал с ФЭУ служит источником данных для воспроизведения оптического изображения образца.

Применения ближнепольной оптики

Возможность улучшения на порядок и более локальности оптических методов исследования поверхности весьма существенна при решении широкого круга научных и прикладных задач. Анализируя взаимодействие света с неоднородной поверхностью методами обычной оптики, приходится усреднять влияние многих дефектов, находящихся в пределах облучаемого участка.

Применение БСОМ облегчает исследование отдельных неоднородностей нанометрового размера. Первым подтверждением этой особенности стало обнаружение одночастичных плазмонов, возбуждаемых светом в металлизированных латексных сферах.

К числу объектов, для которых проблема локальности оптического анализа играет первостепенную роль, относятся гетероструктуры с квантово-размерными свойствами. В них с помощью БСОМ удастся не только локализовать отдельные центры люминесценции, что само по себе представляет значительный интерес, но и разделить их спектры. Такие исследования дают ценную информацию как о структурных особенностях системы, в том числе о шероховатости (на атомном уровне) границ раздела, так и о механизме диффузии и распада квазичастиц типа экситонов. Исследования в БСОМ эффекта наведенного фототока позволяют выявлять приповерхностные дефекты в полупроводниковых образцах с разрешением почти на порядок лучше, чем разрешение широко используемых на практике методов ОВИС и ЕВИС (optical / electron beam induced current).

Ближнепольная микроскопия представляет большой интерес для различных биологических исследований. В первую очередь это связано с тем, что с ее помощью (как и с помощью многих других оптических методов) можно изучать биологические объекты без их повреждения и в естественном окружении (*in vivo*). БСОМ дает контрастное изображение как для прозрачных, так и для отражающих или рассеивающих объектов, причем обладает не только высоким пространственным, но и временным разрешением. Несколько лет назад в работах ван Хюлста (van Hulst) была убедительно показана уникальная возможность обнаружения с помощью БСОМ нанометровых размеров, обладающих избирательной способностью к сцеплению с различными элементами внутриклеточной структуры или участками ДНК.

БСОМ способен регистрировать единичные молекулы флуорофоров. При этом многократное сканирование поверхности позволяет следить за динамикой процессов, связанных с изменением положения молекул, их ориентацией, прочностью связи с окружающей матрицей и т.д., в том числе при импульсном облучении с нано- и пикосекундным разрешением во времени.

Методы БПО интересны для наноэлектроники, где они позволяют исследовать поверхность и топологию элементов с высокой локальностью. Вместе с тем можно оказывать на поверхность и тонкий слой "силовое" воздействие (в частности, модифицировать их структуру), если ближнее поле характеризуется высокой напряженностью. Это направление применений БПО, называемое также нанооптикой, также интенсивно развивается. Примером может служить нанесение с помощью БСОМ различных рисунков, характерный размер элементов которых составляет 50-70 нм (!).

Возможность в несколько раз улучшить разрешение при фотолитографии, а также на порядок и более повысить плотность записи информации (например, на магнитооптических средах) является чрезвычайно заманчивой и стимулирует большое число работ, направленных на решение этих задач. Однако переход от лабораторных исследований к разработке промышленных технологий сдерживается малой скоростью нанесения рисунка на поверхность путем сканирования зонда. Требуемая скорость сканирования связана с мощностью излучения, которая ограничена термической устойчивостью зонда. Как уже отмечалось, в типичных условиях лишь 10^{-6} - 10^{-4} часть светового потока попадает на образец, а основная часть поглощается металлическим покрытием зонда и нагревает его. Соответствующий анализ показал, что распределение температуры в зонде существенно зависит от его микрогеометрии и структуры поля вблизи вершины.

Обычно наиболее нагретая область находится на значительном удалении от вершины. Этого, однако, достаточно, чтобы уже при световой мощности ~ 10 мВт, падающей на входное сечение стеклянного волоконного зонда с алюминиевым покрытием выходной конической части, при мощности дошедшего до образца излучения ~ 10 нВт происходило разрушение зонда из-за плавления алюминиевого покрытия в согласии с результатами измерений.

Существенное увеличение энергетической эффективности ближнепольных зондов является одной из важнейших научно-технических проблем нанооптики. Один из интересных путей ее решения заключается в использовании металлического стержневого зонда, подвод излучения к вершине которого осуществляется за счет возбуждения цилиндрической поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ).

При этом отпадают трудности, вызванные отсечкой поля в заостренном кварцевом волоконном зонде и как следствие - большими потерями энергии. Анализ показывает, что поле ПЭВ у вершины зонда сконцентрировано в области, соизмеримой с ее диаметром.

При рассмотрении эффективности воздействия интенсивного света на вещество в области ближнепольного контакта необходимо иметь в виду, что длина свободного пробега неравновесных носителей, возникших при поглощении света, и размер области, где происходит разветвленный процесс фотовозбуждения и разогрева вещества, могут существенно превосходить размер апертуры зонда.

Область применений БПО быстро расширяется. Новые направления находятся на стадии формирования идеи или ее экспериментальной проверки. Одна из них связана с возможностью использования методов БПО для контроля поверхности элементов мощных лазеров. Как правило, оптический пробой оптических материалов и элементов инициируется дефектами, природа которых не всегда известна. Наиболее естественный подход к обнаружению таких дефектов состоит в использовании для анализа поверхности и тонких слоев излучения с той же частотой, что и при силовом воздействии. Возможность визуализации малых оптических неоднородностей и проведения их спектрального анализа в БСОМ позволяет рассматривать его как эффективное средство решения этой задачи.