

Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности

Сканирующая зондовая микроскопия начала развиваться с создания в 1981—1986 годах сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов физиками швейцарского отделения компании IBM в ходе работ в области микропрофилометров сверхвысокого разрешения. За прошедшие годы зондовые микроскопы стали привычным атрибутом практически любой современной материаловедческой лаборатории. Широко применяются они и в промышленности, в частности в субмикронной электронике (межоперационный контроль пластин, тестирование и коррекция СБИС), в производстве DVD- и CD-дисков (контроль качества матриц и выборочный контроль самих дисков), магнитных дисков (выборочный контроль качества магнитных покрытий), в оптической промышленности (контроль качества обработки стекла, лазерных зеркал), промышленности полимеров (контроль качества и идентификация полимерных материалов), медицинской промышленности (контроль качества глазных линз) и др. В последнее время сканирующая зондовая микроскопия интенсивно используется и в производственных процессах.

С момента изобретения в 1981 году сканирующих туннельных микроскопов (СТМ) [1], на которых при исследовании поверхности кристаллических образцов впервые было достигнуто атомарное разрешение, сменилось уже два поколения приборов для сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Исследования на СТМ проводят, сканируя пьезокерамическую иглу относительно образца (или наоборот). Отслеживая зависимость тока в цепи “игла – проводящая поверхность образца” от местоположения иглы при приложении постоянного напряжения, можно восстановить рельеф и характеристики поверхности. Ток измеряется в диапазоне от 10^{-12} до 10^{-6} А.

Как правило, при сканировании величину тока удерживают постоянной, изменяя положение иглы, хотя возможны и прямые измерения тока при фиксации расстояния от иглы до образца. Если на поверхности нет проводящего адсорбционного слоя, ток носит туннельный характер и экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния (рис. 1). Это позволяет получать атомарное разрешение на плоских поверхностях при радиусе кривизны иглы порядка нескольких нанометров, поскольку вклад в ток соседних участков поверхности иглы экспоненциально затухает с расстоянием до поверхности – эффект “физической заточки” иглы.

На рис.2 [2] показано СТМ-изображение поверхности кремния Si (111), на которую при комнатной температуре адсорбирован свинец (менее 0,01 монослоя). Исследова-

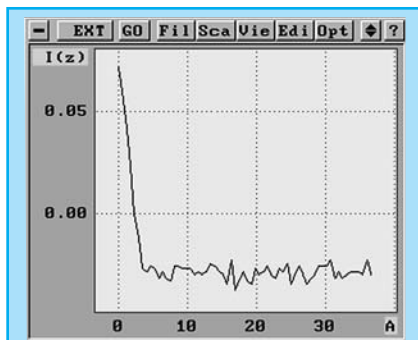


Рис.1. Экспериментальная зависимость тока от расстояния в системе “игла СТМ (Pt₈₀Ir₂₀) – высокоориентированный пиролитический графит” на воздухе. Измерено на приборе СЮЛВЕР-Р4 компании НТ-МДТ

ние проводилось в сверхвысоком вакууме при комнатной температуре. Изображения получены с атомарным разрешением. Отчетливо просматривается 7x7 реконструкция атомной решетки кремния. Видно, что как единичные, так и спаренные адсорбированные атомы свинца располагаются в центрах поверхностной решетки.

На поверхностях ряда материалов, таких как высокоориентированный

пиролитический графит и некоторые слоистые полупроводники, можно наблюдать атомное разрешение не только в условиях сверхвысокого вакуума, но и на воздухе и даже в жидкостях (рис. 3).

Наибольшее практическое значение и широкие возможности для научных исследований имеет электрохимическая СТМ-мода. В данной моде СТМ-измерения проводятся в миниатюрной электрохимической ячейке, задавая потенциалы образца и иглы относительно электрода сравнения. В ходе исследования можно инициировать процессы электрохимического осаждения и разложения, а также десорбции (рис. 4). Эта мода в определенном смысле сродни сверхвысоковакуумной, так как позволяет контролировать условия на поверхности образца и иглы.

Однако применение СТМ в большинстве случаев имеет чисто научное значение, ограничиваясь исследованиями проводящих поверхностей. Кроме того, интерпретация данных СТМ неоднозначна – ток зависит не только от расстояния, но и от плотности электронных состояний, энергии связи электронов, присутствия адсорбционных слоев.

В 1986 году были изобретены атомно-силовые микроскопы (АСМ), построенные подобно патефону – острая игла на пружинке скользит вдоль поверхности, отклонение пружинки измеряется (рис. 5) [3].

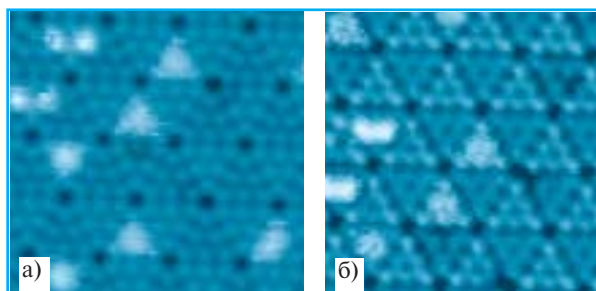


Рис.2. Сверхвысоковакуумное СТМ-изображение поверхности кремния Si (111) после нанесения очень малого (<0,01 монослоя) количества свинца. Размеры сканов: 16,2 x 16,2 нм. Изображения получены в режиме постоянного тока 0,2нА при напряжении между образцом и иглой +2В (а) и -2В (б)

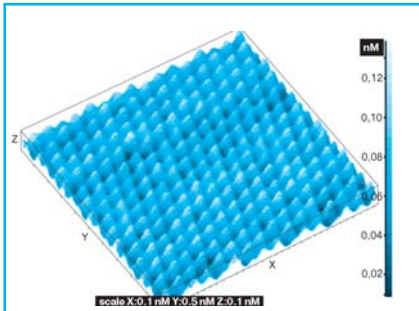


Рис.3. СТМ-изображение поверхности высокоориентированного пиролитического графита с атомарным разрешением. $I = 0,24 \text{ нА}$, $U = 0,2 \text{ В}$. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ-МДТ

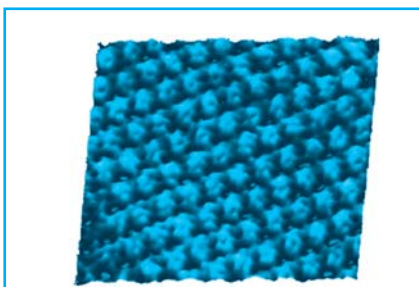


Рис.4. СТМ-изображение анионного монослоя $(\text{SiW}_{12}\text{O}_{40})_4^-$, адсорбированного на поверхности $\text{Ag}(111)$ в электрохимической СТМ-ячейке. Раствор $20 \text{ мМ HF} + 1 \text{ мМ H}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$. Размер скана $11 \times 11 \text{ нм}$. Прибор НАНОСКОП-3 компании Digital Instruments (см. <http://www.di.com>)

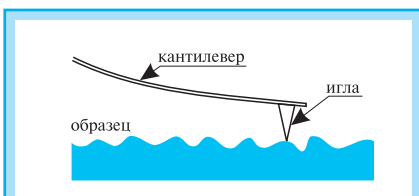


Рис.5. Измерение профиля поверхности в контактной моде АСМ

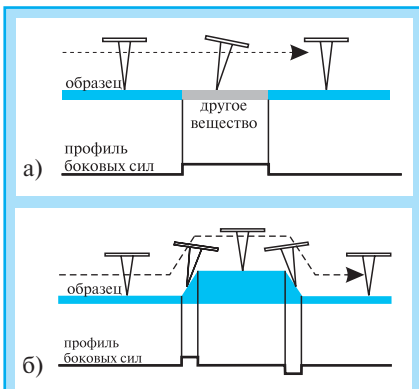


Рис.6. Изменение латеральных сил в процессе сканирования слева – направо. Изменение наклона кантилевера обусловлено различием в силах трения (а) или геометрии образца (б)

Первоначально пружинки изготавливались из тонкой платиновой фольги. К ним приклеивалась острая маленькая иголочка, выбранная, например, из разбитого монокристалла сапфира. В 1990 году была создана промышленная технология производства силовых зондов для АСМ-кантилеверов, после чего началось развитие **второго поколения зондовых микроскопов**. Это поколение включает СТМ и контактные моды АСМ.

При сканировании в контактной моде кантилевер из-за трения изгибается. Если подложка неоднородна, то изгиб кантилевера меняется, его можно измерять и таким образом определять латеральные силы (рис. 6) [4].

Изменение положения кантилевера в процессе сканирования измеряют по-разному: иглой СТМ, интерферометрически, оптико-позиционной схемой, тензодатчиком. Наиболее широко распространена оптико-позиционная схема регистрации (рис. 7) в двух вариантах реализации для образцов различного размера. Небольшие образцы (линейные размеры – до $40\text{--}50 \text{ мкм}$, толщина – до 10 мкм) устанавливаются на пьезоэлектрический трехкоординатный сканер, а кантилевер закрепляется в неподвижном держателе. Более крупные образцы удобнее сканировать кантилевером, хотя это и требует (особенно при размере скана более десятка микрон) применения дополнительных средств слежения за позиционированием в системе “ла-

зер–движущийся на сканере кантилевер–регистрирующий фотодиод”.

В качестве регистрирующего элемента чаще всего используется четырехсекционный фотодиод. Он позволяет регистрировать как изменение наклона кантилевера (нормальное перемещение), так и его осевые изгибы – латеральные силы (рис. 8).

На рис. 9 изображена зависимость силы взаимодействия от расстояния между образцом и поверхностью иглы на воздухе в приближении действия только сил Ван-дер-Ваальса (нет иных взаимодействий: электростатических, магнитных, капиллярных). При под-

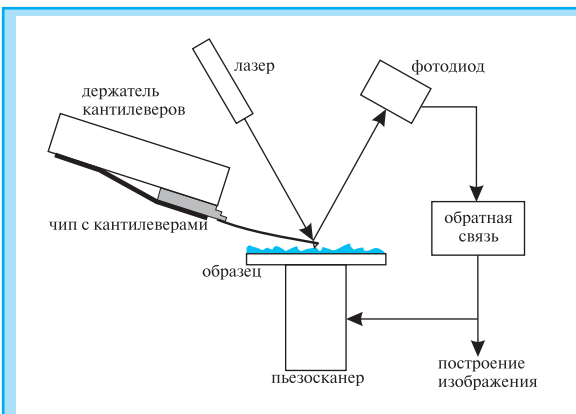


Рис.7. Схема работы атомно-силового микроскопа с оптико-позиционной системой регистрации положения кантилевера при сканировании образцом

ходе иглы к образцу между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к взаимному притяжению. Потенциал этого взаимодействия между единичными атомами пропорционален в пренебрежении запаздыванием $1/R^6$. Результат интегрирования существенно зависит от формы взаимодействующих объектов и слабо – от материалов иглы и образца [5]. Притяжение начинает чувствоваться



Рис.8. Регистрации отраженного от кантилевера лазерного пятна четырехсекционным фотодиодом



Рис.9. Зависимость сил Ван-дер-Ваальса между иглой и образцом от расстояния между ними в вакууме или газе

кантилевером на расстоянии порядка десятков ангстрем. Сканируя поверхность с поддержанием силы притяжения постоянной, можно получить информацию о рельефе поверхности — **бесконтактная мода**. К сожалению, такой режим сканирования неустойчив и часто приводит к сбоям. Это связано с тем, что для силы притяжения на воздухе или в вакууме есть два устойчивых положения равновесия, различающихся знаком производной. В результате при сканировании малые флуктуации могут привести к “залипанию” кантилевера. Следовательно, чтобы устойчиво работать в бесконтактной моде, необходимо учитывать знак производной. Для этого пьезогенератором индуцируются вынужденные колебания кантилевера. При приближении к поверхности амплитуда колебаний из-за взаимодействия с поверхностью уменьшается. Сканирование осуществляется при фиксировании амплитуды колебаний посредством обратной связи, которая отслеживает изменения фазовых соотношений, что и делает устойчивым бесконтактный режим.

На расстояниях порядка единиц ангстрем электронные оболочки поверхностных атомов иглы и образца начинают перекрываться. Знак производной в зависимости силы от расстояния изменяется, в итоге происходит отталкивание — **контактный режим работы АСМ** (рис. 10). Следует отметить, что применение данного режима имеет существенные ограничения. При проведении исследований на воздухе в зазор между кантилевером и поверхностью стекает адсорбат (как правило, это вода), тонкий слой которого практически всегда имеется на поверхностях (рис. 11) — так называемый капиллярный эффект. С одной стороны, этот эффект ограничивает разрешение, так как приводит к

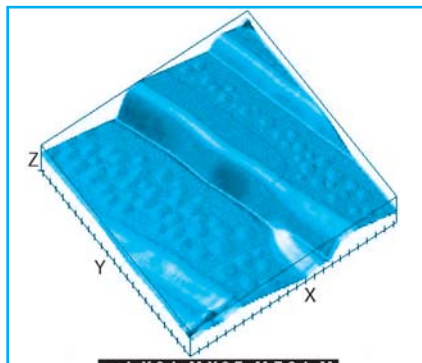


Рис.10 АСМ-изображение рельефа поверхности пленки триглицидсульфата [6], полученное в контактной моде. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании ИТ-МДТ

возрастанию трения покоя. В результате при сканировании с малым шагом кантилевер закручивается и движется неравномерно, рывками. При малых, порядка нескольких нанометров, размерах скана игла вообще может стоять



Рис.11. Капиллярный эффект в контактной моде СЗМ

на месте, покачиваясь вокруг продольной оси. С другой стороны, вследствие капиллярного эффекта к кантилеверу приходится прикладывать достаточно большую силу, что нередко приводит к разрушению или деформации объекта.

Величина капиллярного эффекта зависит от отношения крутильной жесткости кантилевера к силе капиллярного притяжения, порядок которой — 10нН. Однако этот эффект практически не проявляется при исследовании гидрофобных поверхностей гидрофо-

бизированными иглами. Удаётся получить даже изображения атомных решеток таких образцов (рис. 12). Капиллярный эффект отсутствует и в сверхвысоком вакууме после прогрева образцов и при исследовании границы “твёрдое тело — жидкость”.

Но в любом случае, даже в условиях сверхвысокого вакуума и жидкости, устойчиво в контактной моде можно работать при силах поджима кантилевера к образцу не менее 1нН. При радиусе кривизны иглы 20 нм возникает давление на образец порядка 3×10^6 Па ≈ 30 атм, квадратично возрастающее с уменьшением радиуса кривизны. В 1993 году эта проблема была решена изобретением **резонансной моды**. Ее еще называют полуконтактной или **теппинг-модой** [7]. С этого момента началось развитие **третьего поколения СЗМ**.

Суть метода в том, что измерения проводят не неподвижным, а вибрирующим кантилевером. Современные кантилеверы (рис.13) имеют добротность порядка 250 на воздухе и 1000 в вакууме, что позволяет эффективно регистрировать изменения колебаний. Колебания кантилевера на одной из его резонансных частот (как правило, это первая или вторая гармоника) возбуждают внешним пьезогенератором (небольшой пьезокерамический элемент, закрепленный с хорошим механическим контактом вблизи кантилевера). С помощью селективного усилителя и фазового детектора регистрируется амплитуда и фаза возбуждаемого колебания. При приближении к поверхности амплитуда начинает уменьшаться. В зависимости от соотношения резонансной частоты кантилевера и частоты возбуждаемого колебания наблюдаются изменения знака, крутизны изменения и фазы колебания кантилевера. Изменения амплитуды в основном зависят от рельефа поверхности, а фазы — от его физических

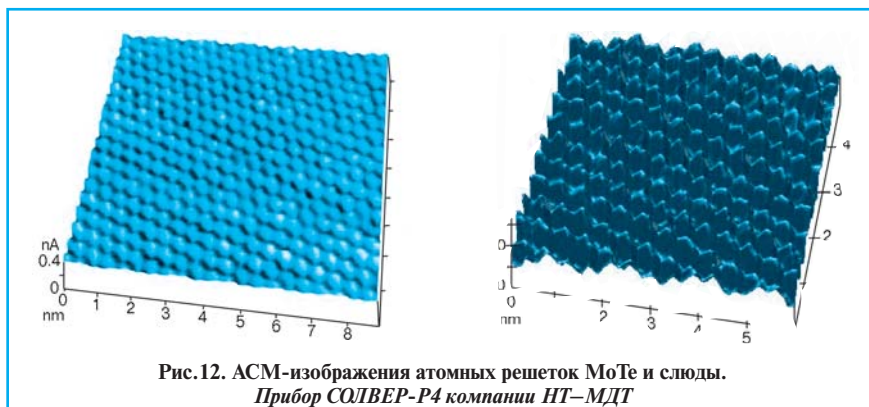


Рис.12. АСМ-изображения атомных решеток МоТе и слюды. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании ИТ-МДТ

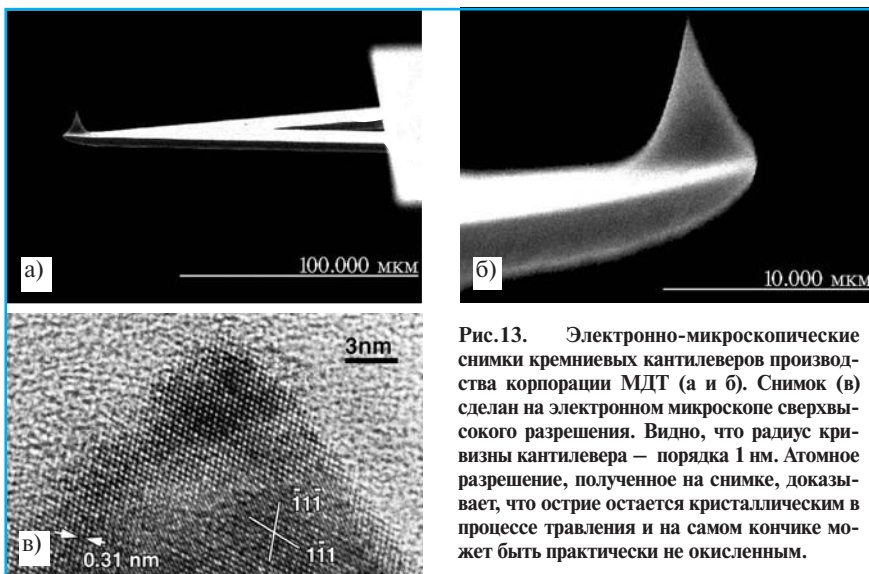


Рис.13. Электронно-микроскопические снимки кремниевых кантилеров производства корпорации МДТ (а и б). Снимок (в) сделан на электронном микроскопе сверхвысокого разрешения. Видно, что радиус кривизны кантилера – порядка 1 нм. Атомное разрешение, полученное на снимке, доказывает, что острие остается кристаллическим в процессе травления и на самом кончике может быть практически не окисленным.

особенностей (эластичности, вязкости слоя адсорбата). Регистрация фазы колебания кантилера позволяет различать тонкую структуру в строении материалов (рис. 14). Амплитуда колебания задается в пределах нескольких сот ангстрем. При сканировании выбираются такие условия, чтобы, с одной стороны, “пробивался” слой адсорбата, а с другой, не начиналось “залипание” кантилера (адсорбат не успевал бы натекает между образцом и иглой) и разрушение образца. Следует отметить, что в резонансной моде давление на образец

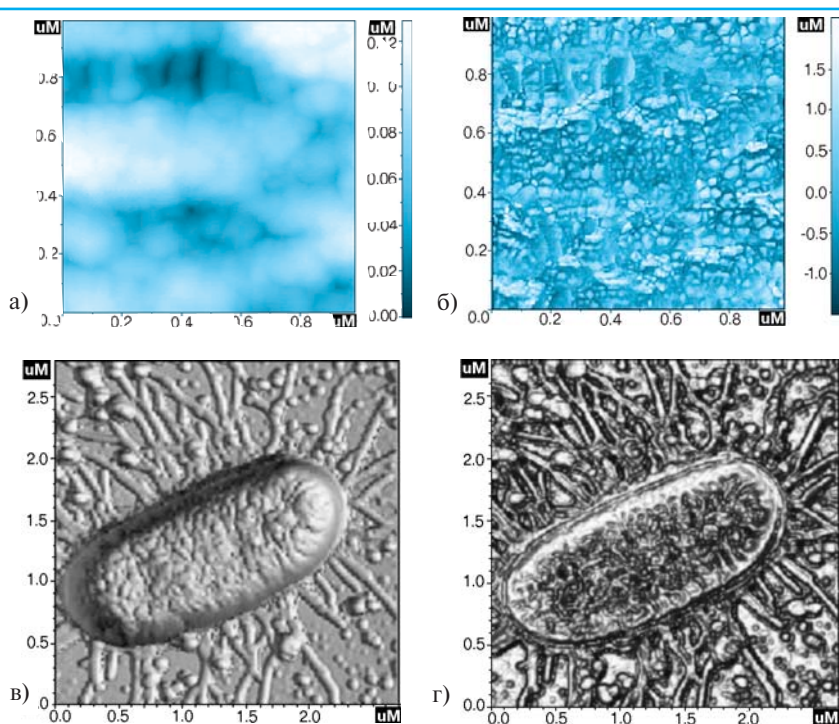


Рис.14. Изображение полимерной целлюлозной мембраны (а, б) и бактерии E.coli–JM109 (в, г), полученные в резонансной моде при постоянной амплитуде колебаний кантилера с регистрацией рельефа (а, в) и регистрацией фазы колебаний (б, г). Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ–МДТ

удаётся снизить на два–три порядка, что позволяет продуктивно использовать сверхострые кантилеры.

На рис.15–16 показан результат исследований в контактной моде на мягких полимерных материалах. Даже при сканировании в жидкости с предельно малыми силами прижима тонкие перемычки полимера деформируются (рис.16б).

В отдельный класс можно выделить объекты, способные впитывать растворитель, например воду из воздуха. В таких веществах вода включается во внутреннюю структуру и их изучение в

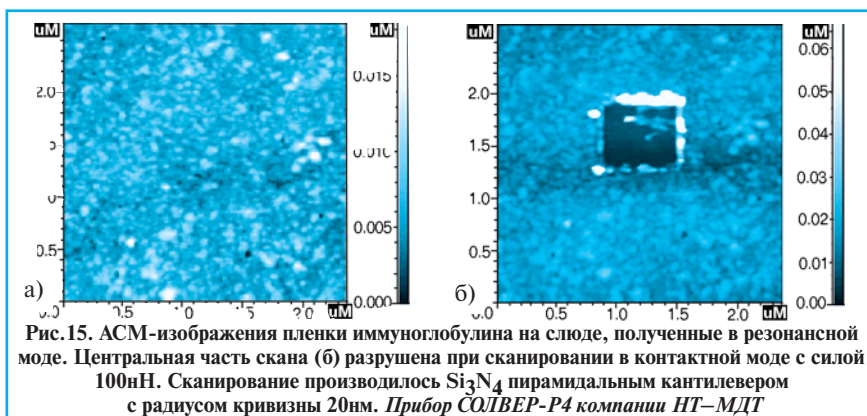


Рис.15. АСМ-изображения пленки иммуноглобулина на слюде, полученные в резонансной моде. Центральная часть скана (б) разрушена при сканировании в контактной моде с силой 100нН. Сканирование производилось Si₃N₄ пирамидальным кантилером с радиусом кривизны 20нм. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ–МДТ

режиме высокого разрешения бесперспективно. Но в отличие от твердых гидрофильных образцов поверхность этих объектов после высушивания остается сухой достаточно долго, пока водой не насытится весь объем (эффект памперса). Следовательно, и для таких объектов при измерениях на воздухе достижимо высокое разрешение. В качестве примера можно привести ориентированные пленки водорастворимых красителей (рис.17) [8,9]. На невысушенных образцах сколь-нибудь информативных изображений получить не удастся. Фазовый контраст практически отсутствует, что естественно для равномерно “набухшей” в растворителе пленки. После высушивания отчетливо проявляется ориентированная текстура, в особенности в фазовом контрасте. Видна деформация пленки вокруг включенной в ее состав пылинки.

Кантилеры со специальными покрытиями позволяют исследовать не только геометрические профили, но и другие характеристики объектов. Большое практическое значение имеют исследования магнитных свойств материалов, в частности пленочных покрытий для магнитной записи информации (рис. 18).

Для регистрации магнитных и электрических силовых полей при-

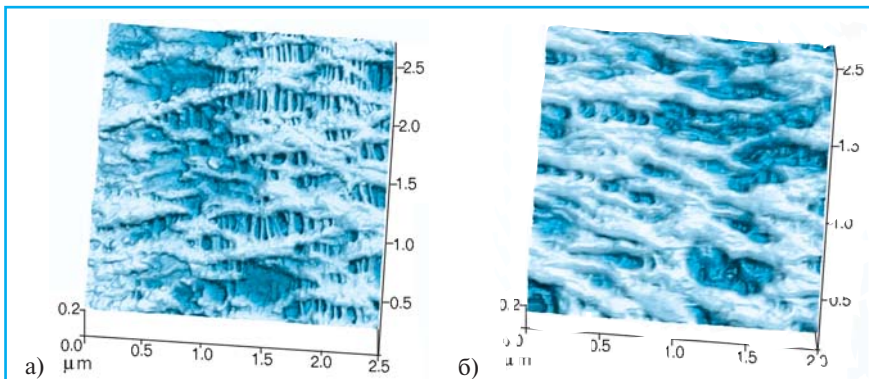


Рис. 16. Изображение полимерной целлюлозной мембраны, полученное в резонансной (а) и контактной (б) моде в жидкостной ячейке при силе поджима ~1нН. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ-МДТ

меняется так называемая лифт-мода. Сканирование производится следующим образом: в контактной или резонансной моде промеряется рельеф поверхности. Затем игла отводится от образца и программно проходит на заданном расстоянии над поверхностью по уже известному рельефу. Неоднородные силовые поля, к которым чувствителен кантилевер, вызывают его отклонения. При измерении магнитных полей используют кантилеверы, поверхность которых покрыта ферромагнитным материалом (как правило, это сплавы кобальта и железа) толщиной несколько сот нанометров.

Весьма важна, в особенности в микроэлектронике, емкостная мода [10]. В ней наряду с геометрическим профилем регистрируется ток смещения, возникающий в системе “образец – кантилевер” при колебании последнего. Этот ток компенсируют, изменяя постоянное напряжение на образце или игле. По величине компенсирующего напряжения определяют работу выхода поверхности – хорошо известный метод вибрирующей емкости (метод Кельвина). Измерения в емкостной моде позволяют различить слои металлизации, окисла, нитрида кремния, оценить различие в толщине окисла.

Для многих практических приложений, особенно в медицине, большой интерес представляет ближнепольная оптическая мода работы зондового микроскопа (рис. 19). В этом режиме зон-

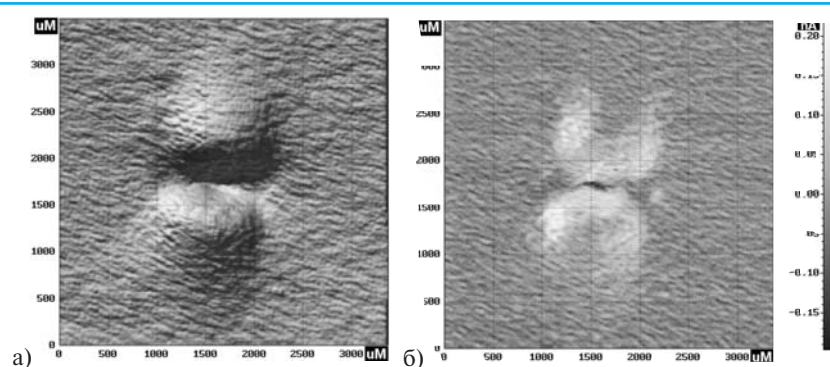


Рис. 17. СЗМ-изображения поверхности ориентированной пленки, полученные при ориентации лиотропного жидкого кристалла красителя дисульфонидаптон. Толщина пленки – порядка 0,2 мкм. Топография в резонансной моде. Образец высушен непосредственно перед измерением подогревом до температуры порядка 100°C в течении пяти минут (а – изображение в резонансной моде с “подсветкой”, б – с регистрацией фазы колебания кантилевера). Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ-МДТ

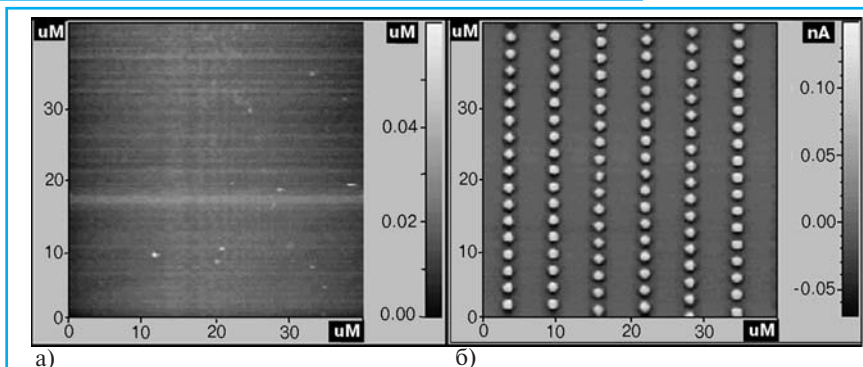


Рис. 18. Изображения поверхности магнитооптического диска (а) и распределения магнитных полей на той же поверхности (б), полученные в лифт-моде с построчным сканированием. Прибор СОЛВЕР-Р4 компании НТ-МДТ

дом является остро отгоченное оптоволокну с радиусом кривизны до 10 нм. Применение сильно заостренных световодов обычно ограничивается эмиссионной способностью поверхности и возможностями регистрирующей системы. Синхронно поддерживая заданное расстояние между острием оптоволокну и подложкой, можно измерять оптические спектры, люминесценцию, светимость поверхности. Наиболее распространены три схемы поддержания световолокну вблизи поверхности: регистрация туннельного

тока между металлизированным волокну и поверхностью, регистрация вынужденных латеральных и нормальных колебаний световолокну. Ближнепольной оптической приставкой можно легко оснастить типовой зондовый микроскоп, способный работать в резонансной моде.

СЗМ позволяют не только изучать различные объекты, но и создавать новые структуры с нанометровым разрешением. С помощью проводящих кантилеверов можно электрически модифицировать поверхностные слои и исследовать полученные наноструктуры.

А что происходит в области зондовой микроскопии в России? Как ни удивительно, но в нашей стране успешно действует один из ведущих мировых разработчиков и производителей СЗМ – корпорация МДТ. Это предприятие серийно производит мультимодовый зондовый микроскоп СОЛВЕР-Р4, по многим параметрам не

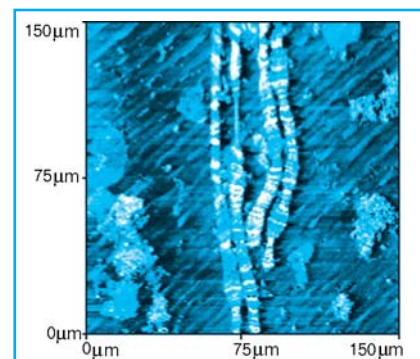


Рис. 19. Ближнепольное оптическое изображение хромосом (<http://www.topometrix.com>)

имеющий мировых аналогов. Прибор относится к СЗМ третьего поколения и предназначен для топографических исследований физических свойств и модификации поверхностей различных объектов на воздухе и в жидких средах. Конструкция базируется на ряде новых технических решений [10–13]. Режимы работы: контактная и бесконтактная АСМ-моды, лифт-мода, СТМ-мода, резонансная мода с ре-



Рис. 20 Сканер прибора *СОЛВЕР-Р4* с установленным образцом

гистрацией амплитуды и фазы колебания кантилевера, АСМ- и СТМ-модуляционные моды. В модуляционных режимах возможна регистрация амплитуды и фазы колебания. Допустимо исследование одних и тех же участков поверхности в различных режимах. Прибор укомплектован головкой ближнепольной оптической микроскопии с петлей обратной связи для поддержания постоянной амплитуды колебания световода (Shear force-микроскоп). Допустимый размер образца – до 40 мм в диаметре и 10 мм в толщину.

СОЛВЕР-Р4 может быть оснащен сканерами трех типов с полями сканирования 7x7x1,5 мкм, 16x16x2,5 мкм, 50x50x4 мкм (рис. 20) и четырьмя различными измерительными головками. Измерительные головки устанавливаются на сканер и коммутируются многоштырьковым разъемом с электронным блоком прибора. Сканеры имеют систему грубой подводки шаговым двигателем, позволяющую при подводе/отводе образца и зонда возвращаться на прежнее место с точностью до единиц нанометров. Благодаря этому можно проводить многодневные исследования одного и того же участка поверхности (изучение медленно протекающих процессов: деградации, инициированных возмущений и т.д.).

Мультиголовочная головка SF002 – основная для СЗМ СОЛВЕР-Р4 (рис. 21). Она содержит оптико-позиционную систему регистрации положения кан-

тилевера в составе полупроводникового лазера мощностью 1 мВт с длиной волны 670 нм, четырехсекционного фотодиода, системы крепления и позиционирования зондов и преусилителей. Кантилеверы крепятся в держатель и устанавливаются на позиционируемый столик.

В СОЛВЕР-Р4 применяются четыре типа столиков. Силовой столик (СС-1) предназначен для измерений в контактных и контактно-модуляционных режимах. СТМ/САМ-столик, в дополнение к СС-1, позволяет, используя проводящий кантилевер, работать в режиме туннельного микроскопа. Он оснащен СТМ-преусилителем. Столик резонансной микроскопии (СРМ) дополняет возможности СС-1 работой в резонансной и бесконтактной моде. Он содержит пьезовибратор для возбуждения колебаний

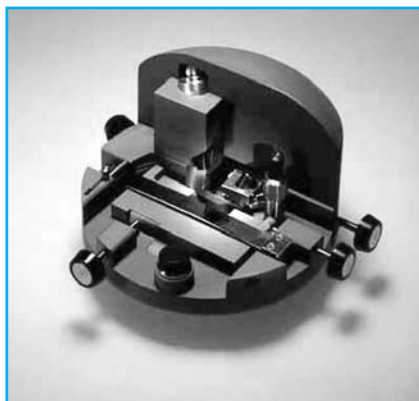


Рис. 21. Мультиголовочная головка *SF002* прибора *СОЛВЕР-Р4*

кантилевера. Универсальный мультиголовочный столик сочетает в себе возможности трех предыдущих.

Головка SN001 используют для работы в режимах ближнепольного оптического микроскопа (рис. 22). Она снабжена оптической системой регистрации колебаний заостренного световолокна. Электронный блок микроскопа регистрирует амплитуду и фазу колебания зонда. Обратная связь поддерживается или только по амплитуде колебаний, или по проекции амплитуды на вектор возбуждающего колебания. Оптический сигнал исследуют, регистрируя синхронно со сканированием свет из оптоволоконка посредством ФЭУ или фотодиода.

Головка ST001 обеспечивает режимы туннельной микроскопии и туннельной спектроскопии, позволяет производить электрически индуцированную модификацию поверхности.

Рабочий диапазон по току – от 10 пА до 10 нА. Шум преусилителя ~ 5 пА в полосе частот 12 кГц.

Головка ST002 аналогична ST001, но содержит прецизионный преусилитель с уровнем шума менее 1,5 пА в полосе 5,5 кГц, позволяющий работать при малых токах.

Приборы корпорации МДТ комплектуются кантилеверами собственного производства. Их основные характеристики: радиус кривизны – меньше 10нМ; высота – 7 мкм; угол при вершине – 22°; проводящие. Отражающая поверхность кантилеверов покрыта слоем алюминия. Толщина кантилеверов задается технологическим процессом формирования стоп-слоя при травлении кремния и может составлять от 0,5 до 5 мкм, длина – до 400 мкм. Типовые кристаллы имеют длину кантилеверов 80 мкм и 200мкм, толщину – около 2мкм и резонансные частоты – соответственно 350±50 и 50±10кГц при силовых константах 30±6 и 3±1 Н/м.

В ближайшее время корпорация выпускает на рынок новый прибор – **СОЛВЕР-Р7**.

Он также относится к СЗМ третьего поколения, но оснащен гораздо более мощной электроникой, чем СОЛВЕР-Р4. Электронный модуль позволяет реализовать все известные режимы работы сканирующих зондовых микроскопов и, кроме того, двухзондовую резонансную моду.



Рис. 22. Головка *SN001*

СОЛВЕР-Р7 может оснащаться различными механическими блоками. Помимо блоков СОЛВЕР-Р4, это специализированный блок высокого разрешения для исследования образцов малых размеров, вакуумный модуль, механические блоки с рабочим полем до 100x100x8 мкм для неразрушающих исследований центральных областей пластин диаметром до 4 дюймов.

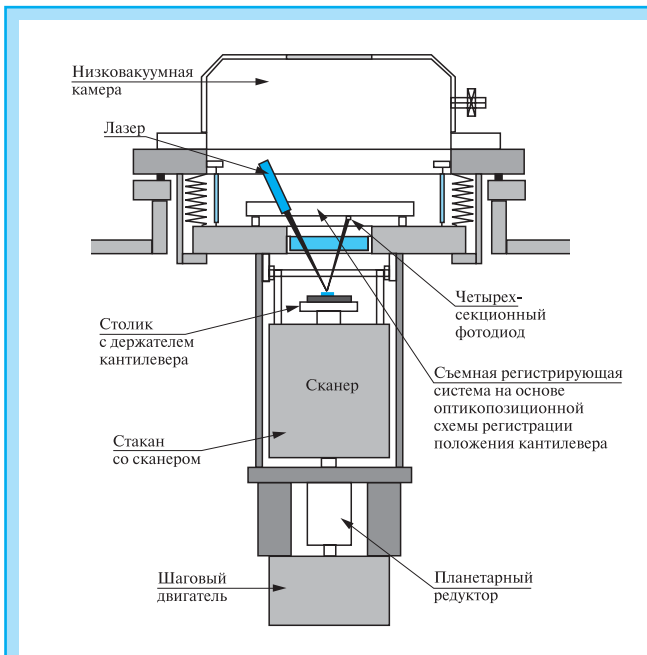


Рис.23. Механический блок сверхвысоковакуумного СЗМ СОЛВЕР-UHV-P7

Разработана новая модель **сверхвысоковакуумного микроскопа СОЛВЕР-P7UHV** (тендер Министерства науки и технической политики РФ) (рис. 23). Основной блок – это вертикальный фланцевый модуль. Прибор работает в различных режимах, включая режим ближнепольного оптического микроскопа и микроскопа–литографа с оптико-позиционной схемой определения положения зондов. Интервал рабочих температур – 100–500 К. Сверхвысокий вакуум в камере (лучше 10^{-10} торр) создают классические откачные средства (комбинация криоадсорбционного, магниторазрядного и сублимационного титанового насосов). Конструкция допускает смену образцов, замену кантилеверов, установку СТМ-иглы или световолокна без разгерметизации. Управление осуществляется стандартным электронным модулем СОЛВЕР-P7. Виброизоляция обеспечивается посредством вывески на трех пружинах модуля микроскопа, сочлененного с фланцем–носителем мягким сильфонным соединением. Для гашения колебаний применен магнитный демпфер (медь – кобальт/самарий).

Сближение образца и зонда производится сверхвысоковакуумным шаговым двигателем со специальным планетарным редуктором, исключающим заклинивание системы в условиях сверхвысокого вакуума. В конструкции применена оригинальная оптико-

позиционная регистрирующая схема с высокочастотной механической развязкой в системе «сканер–держатель кантилевера». Она резко снижает влияние асинхронных вибраций в системе «образец–кантилевер».

Сканирующие зондовые микроскопы – это высокоинтеллектуальные инструменты. Их развитие тесно связано с прогрессом в вычислительной технике. Программное обеспечение изделий линии СОЛВЕР – наиболее мощное

из известных. Так, управление прибором и обработка изображения осуществляются из одной программы. ПО включает высокоэффективные, простые в настройке алгоритмы коррекции неидеальности пьезокерамики сканера микроскопа, обеспечивающие точность коррекции по X и Y лучше 1%. Заложены большие возможности для обработки изображения. Наряду со встроенным графическим редактором двумерной графики имеется текстовый редактор для комментирования полученных результатов. Поля комментариев, автоматически включающие время и условия наблюдения, входят в формат файла изображения, что исключает возможность их «потери».

Метрология приборов немыслима без применения стандартных тестовых элементов. Корпорация МДТ производит несколько типов калибровочных решеток, позволяющих проводить калибровку с точностью, лучшей 1%, как в плоскости образца, так и по высоте. Кроме того, возможна прецизионная оценка игл кантилеверов (рис. 24).

Метрология приборов немыслима без применения стандартных тестовых элементов. Корпорация МДТ производит несколько типов калибровочных решеток, позволяющих проводить калибровку с точностью, лучшей 1%, как в плоскости образца, так и по высоте. Кроме того, возможна прецизионная оценка игл кантилеверов (рис. 24).

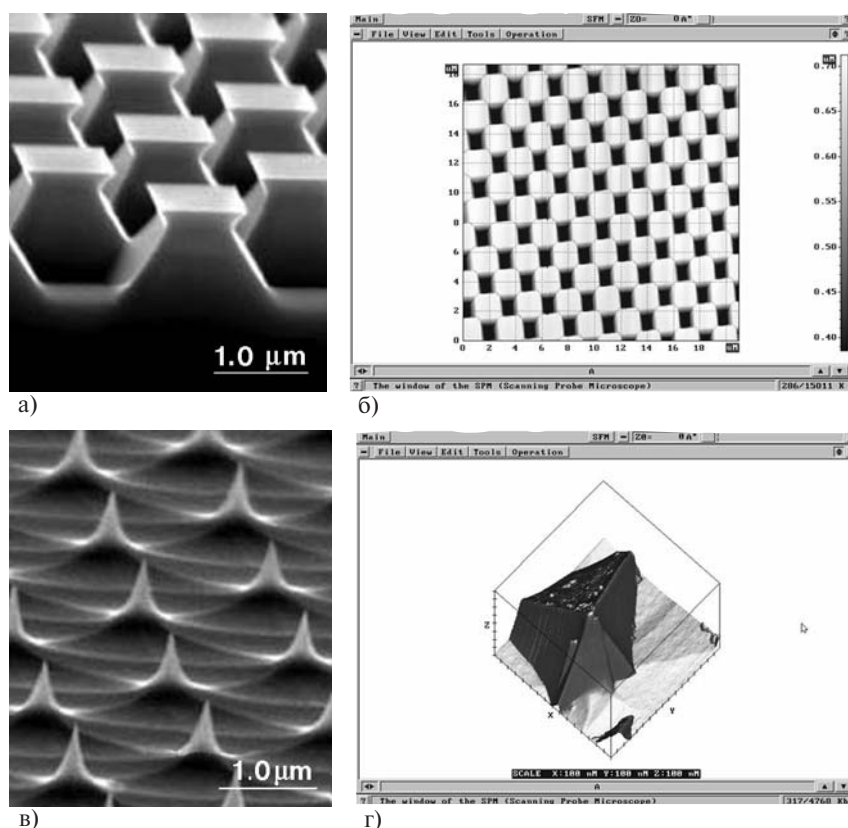


Рис.24. Электронно-микроскопические изображения тестовых решеток TGX01 (а) и TGT01 (в), производства компании МДТ; б – СЗМ-изображение тестовой решетки, полученное при программной коррекции нелинейности, лучшей 1%; г – изображение иглы Si_3N_4 кантилевера, полученное с помощью решетки TGT01. Прибор СОЛВЕР-P4 компании ИТ–МДТ

Как уже отмечалось, промышленное использование сканирующих зондовых микроскопов быстро расширяется. Во многих областях сегодня им нет альтернативы. Одна из таких областей – контроль поверхности глазных контактных линз, даже мельчайшие трещины на ко-

нечное на зондовом микроскопе СОЛВЕР-LS, специализированном для оперативного контроля видеодисков. В процессе производства участки поверхности матрицы контролируются в выборочных точках, оценивается пригодность штампа и производится выбороч-

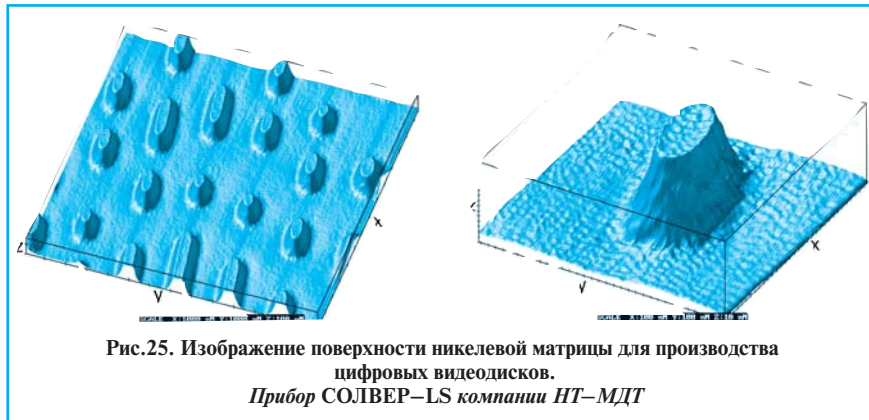


Рис.25. Изображение поверхности никелевой матрицы для производства цифровых видеодисков.

Прибор СОЛВЕР-LS компании НТ-МДТ

торой создают благоприятные условия для размножения микроорганизмов, вызывающих раздражение и воспалительные заболевания глаз. Контролировать поверхность линз весьма сложно – для оптики они должны быть прозрачными. К тому же наблюдать их следует в водном растворе. Поэтому единственный метод их неразрушающего контроля – СЗМ. На рис. 25 показано изображение поверхности глазной линзы производства компании Jonson&Jonson. При исследовании с помощью приборов компании НТ-МДТ в специальной жидкостной ячейке трещины на поверхности линзы отчетливо видны.

Другая безальтернативная область применения СЗМ – производство цифровых видеодисков. Они изготавливаются штамповкой со специальных матриц из никеля, качество которых в основном и определяет качество дисков. Существенной характеристикой матрицы является качество края бита – именно он портится в процессе штамповки. Размер бита на современном штампе – 0,4 мкм. Поскольку штамп изготовлен из ферромагнетика, методы электронной микроскопии не позволяют контролировать поверхность с достаточным разрешением. На рис.25 приведено изображение поверхности матрицы, полу-

ченный контроль самих видеодисков. Применение СЗМ ускоряет технологический цикл запуска партии видеодисков, существенно снижает риск брака, позволяет оценить подлинность и качество штампа, его реальную стоимость.

Являясь не только измерительными приборами, но и инструментами, с помощью которых можно формировать и исследовать наноструктуры [14–16], зондовые микроскопы призваны стать базовыми физическими и метрологическими инструментами следующего столетия.

В заключение авторы выражают благодарность Министрству науки и технологий, а также Министрству экономики РФ, Фонду поддержки малых форм предпринимательства в области высоких технологий, финансовая поддержка которых позволила разработать и организовать производство зондовых микроскопов, конкурентоспособных на мировом рынке. Авторы благодарны всему коллективу корпорации МДТ и предприятия НТ-МДТ, усилиями которых была выполнена эта работа, а также научному совету и дирекции предприятия ГосНИИФП им.Ф.В. Лукина за организационную, моральную поддержку и полезное обсуждение результатов.

Представляем авторов статьи

ЛАЗАРЕВ Михаил Иванович, кандидат физико-математических наук, президент корпорации МДТ. Окончил МФТИ в 1970 году. Автор 40 статей и трех изобретений. Сфера научных интересов – математическая физика.

БЫКОВ Виктор Александрович, директор компании НТ-МДТ, начальник отдела НИИФП. Автор 120 статей и 30 изобретений. Окончил МФТИ в 1973 году. Сфера научных интересов: нанотехнология, зондовая микроскопия, молекулярная электроника.

САУНИН Сергей Алексеевич, директор компании НТ-МДТ, начальник лаборатории НИИФП. Окончил МФТИ в 1978 году. Автор 30 статей и шести изобретений. Сфера научных интересов: нанотехнология, зондовая микроскопия, программирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.Binnig, H.Rohrer. Scanning Tunneling Microscopy. – Helv.Phys.Acta, 55, 726 (1982).
2. Gymez-Rodriguez, J.J. Sbenz, A.M. Bary, J.-Y. Veullen and R.C. Cinti. Diffusion of Single Pb Atoms on Si(111)7x7 – Phys. Rev. Lett. 76, 799 (1996).
3. G.Binnig, C.F.Quate, Ch.Gerber. The Atomic Force Microscope. – Phys.Rev.Lett., 1986, 56, 930.
4. A Practical Guide to scanning probe microscope. Ed. Christy Symanski. – Park Scientific Instruments. CA USA, 1996.
5. In book by eds. R.Wiesendanger, H.–J. Guntherodt. Scanning tunneling Microscopy III. Theory of STM and Related Scanning Probe Method. S.Ciraci. Theory of Tip-Sample Interactions. – Springer –Verlag, Springer Series in Surface Science, 1993, vol.20, p. 179–188.
6. Белугина Н.В., Толстихина А.Л. Исследование микрорельефа поверхности кристаллов сегнетоэлектриков ТГС и Rb_2ZnCl_2 методом атомно-силовой микроскопии. – Кристаллография, 1996, т. 41, №6, с. 1–5.
7. Hansma P.K., et al. Tapping mode atomic force microscopy in liquids. – Appl.Phys.Lett. 1994; 64, 1738–1740.
8. V.A.Выков. Lyotropic Liquid Crystal Tecnology as New Method of Structure Forming of Molecular Electronics. – Second International Conference “Moleclar Electronics and Biocomputers”, UNESCO, AS of the USSR, Moscow, USSR, September 11–18, 1989, p. 22–23.
9. Александров А.И., Быков В.А., Пашкова Т.В. Дифракционные исследования структуры пленок, сформированных из лиотропных жидкокристаллических фаз некоторых красителей. – Известия Академии наук. Сер. Физика, 1995, №59, с. 37–44.
10. A.N.Erickson, L.Sadwick, G.Neubauer, J.Kopanski, D.Adderton, M.Rodgers. Quantitative Scanning Capacitance Microscopy Analysis of Two-Dimensional Dopant Concentrations at Nanoscale Dimensions. – J.of Elec.Mat. 1996, 25(2), 301.
11. Быков В.А., Беляев А.В., Еремченко М.Д., Жижимонтов В.В., Иконников А.В., Капур С.Ф., Редченко В.В., Саунин С.А. Новый сканирующий туннельный микроскоп и его применение при исследовании молекулярных пленок. – Электронная промышленность, 1994, № 7–8, с. 168–172.
12. Быков В.А., Еремченко М.Д., Иконников А.В., Капур С.Ф., Саунин С.А., Шикин С.А. Сканирующий туннельный микроскоп и головка для него (варианты). – Патент РФ №2069056, приоритет от 18 апреля 1994 г.
13. Быков В.А., Еремченко М.Д., Иконников А.В., Капур С.Ф., Саунин С.А., Шикин С.А. Сканирующий зондовый микроскоп (варианты), его чувствительный элемент и способ юстировки кантилевера. – Патент РФ №2072735, приоритет от 25 мая 1995 г.
14. Быков В.А., Емельянов А.В., Полторацкий Э.А., Самсонов Н.С. Нанозлектроника как перспектива развития микроэлектроники. – Электронная промышленность, 1993, № 11–12, с. 42–46.
15. Быков В.А. Методы формирования и исследования пленок Ленгмюра – Блэдкетт и молекулярная нанотехнология. – Электронная промышленность, 1994, № 7–8, с.59–63.
16. V.A. Выков. Langmuir-Blodgett films and nanotechnology. – Biosensor & Bioelectronics, 1996, vol. 11, № 9, p. 923–932.