

УДК 620.187.539.25

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ. ЧАСТЬ I

© 1999 г. П. А. Арутюнов, А. Л. Толстихина*

Московский государственный институт электроники и математики

**Институт кристаллографии Российской АН им. А.В. Шубникова*

Поступила в редакцию 15.06.99 г.

Дан аналитический обзор последних достижений в области атомно-силовой микроскопии (АСМ) и ее практического применения при создании элементной базы микро- и нанoeлектроники. Материалы представлены двумя направлениями использования метода: панорамный анализ изображений поверхности и инструментальное средство для модификации поверхности. Сделан акцент на метрологические аспекты использования метода АСМ. Рассмотрены новые конструкции кантилеверов и сенсоров (избирательно-чувствительных элементов). Проведена оценка достижений и тенденций развития в области нанолитографии с использованием АСМ.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] освещены основные тенденции технологии микроэлектроники в приложении к развитию элементной базы высокопроизводительных ЭВМ. Утверждается доминирующая роль КМОП-технологии после 2000 года. Основным материалом в производстве массовых коммерческих УБИС будет оставаться кремний. Перспективы развития технологии полупроводниковой микроэлектроники США на период 1995–2010 гг. представлены в [2, 3]. Основным процессом формирования микрорельефа на полупроводниковой пластине УБИС, получаемого в результате химического или плазмохимического локального травления материала соответствующего конструкционного слоя через резистивную маску, остается литография. Мнение большинства ведущих специалистов по литографии сводится к тому [1], что вплоть до минимального размера 100 нм доминирующей остается оптическая литография, обеспечивающая высокую производительность и разрешающую способность процесса на больших кристаллах.

Для размеров, меньших 100 нм, в качестве альтернативы рассматриваются электронная, ионная и рентгеновская литографии. В связи с развитием исследований в области нанoeлектроники в литературе большое внимание уделяется новой разновидности электронной литографии с использованием сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ)–сканирующей зондовой литографии (СЗЛ). Исследовательские проекты в этой области достаточно интенсивно финансируются, поскольку СЗМ является незаменимой в ряду средств изготовления и исследования наноструктур.

В данном обзоре обсуждаются наиболее интересные (с точки зрения перспектив использования в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники) достижения последних 3–4 лет в атомно-силовой микроскопии или сканирующей силовой микроскопии (ССМ), отраженные в материалах двух международных конференций STM'97 и Seattle'99 [4], Всероссийских совещаний СЗМ'97–СЗМ'99 и оригинальных публикациях. Общей тенденцией этих конференций является постоянное снижение доли докладов непосредственно по сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и сканирующей туннельной спектроскопии в возрастающем потоке работ по АСМ, значительно изменившейся со времени своего открытия [5]. Сегодня атомно-силовой микроскоп, превратившийся в многофункциональный аналитический инструмент для изучения и модификации поверхности, стал нужен всем: физикам, химикам, биологам, медикам, технологам.

В обзоре мы постарались осветить настоящий этап развития АСМ, ни в коей мере не претендуя на полноту изложения материала из-за огромного объема работ в этой области и многообразия затрагиваемых вопросов. Можно выделить две основные области применения АСМ. Первая представлена панорамным анализом изображений поверхности, по своей сути традиционным для оптической и электронной микроскопии. Вторая область применения, выходящая за рамки обычного микроскопического анализа, связана с использованием АСМ как инструментального средства в технологии. В раздел 1 обзора вошли достижения, связанные с применением этого метода для анализа топографии поверхности материалов микро- и нанoeлектроники и для изучения пространственного распределения полей. Обсуж-

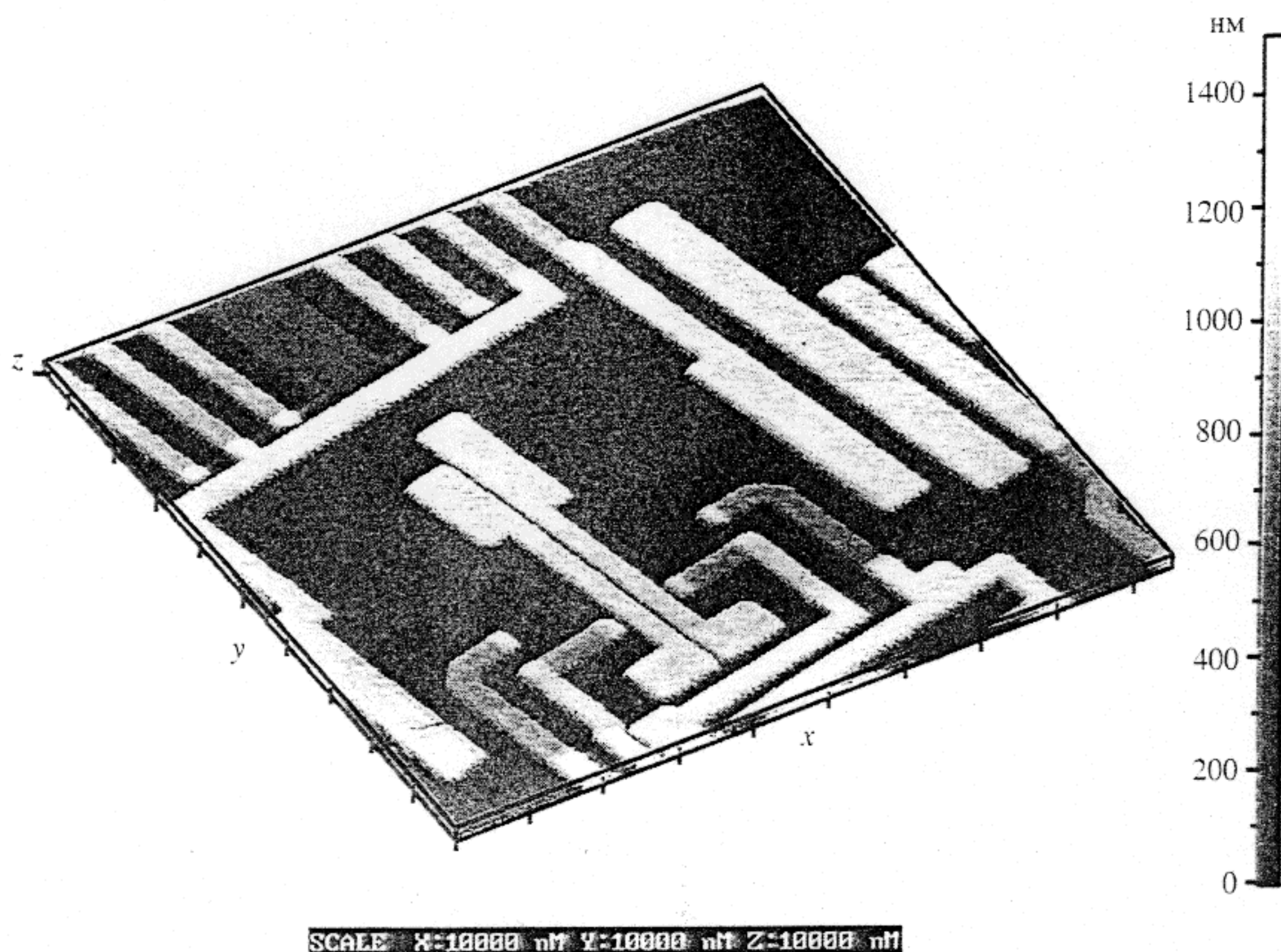


Рис. 1. Топографическое изображение интегральной схемы, полученное на микроскопе SOLVER P7-SPMLS-MDT. Область сканирования составляет 100 мкм × 100 мкм.

даются отдельные разновидности сканирующей силовой микроскопии, такие как химическая и термическая. В разделе 2 проведена оценка достижений и тенденций развития в области нанометровой модификации поверхности с использованием АСМ.

1. ПАНОРАМНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Под панорамным анализом мы понимаем получение и исследование изображений поверхности в различных режимах работы АСМ. Здесь наблюдается общая тенденция использования АСМ как универсального средства прецизионных измерений не только топографии поверхности, но и различных физических величин и полей. В последние годы СЗМ (SPM) начали обозначать также аббревиатурой SXM, где X – термин, определяющий практически любой физический параметр: силу, магнитное, электрическое и электромагнитные (в частности, световое) поля, температуру, ионный ток. Атомно-силовые микроскопы превратились в сложные аналитические инструменты для исследования топографии, пространственного распределения приповерхностных силовых полей; электрических, магнитных, механических, адгезионных свойств поверхности; исследования процессов наноиндентации. Зондирование поверхности образ-

цов может происходить на воздухе или в условиях сверхвысокого вакуума, на границах раздела газ/жидкость при комнатной температуре или в условиях охлаждения и нагрева.

Существенное продвижение вперед в развитии АСМ произошло после разработки резонансного режима [6]. В полуконтактном или резонансном модуляционном режиме (Tapping mode, AC или ResonantMode) сканирование поверхности производится кантилевером, колеблющимся на частоте резонансных или вынужденных колебаний (амплитуда составляет десятки нанометров). Сила воздействия на образец составляет $\sim 10^{-12}$ Н в отличие от контактного режима $\sim 10^{-9}$ – 10^{-6} Н. При этом обратной связью может поддерживаться постоянная амплитуда или фазы колебания, а регистрироваться профиль, фаза, сигнал ошибки, сигнал на кратных гармониках. Именно в этом режиме работы АСМ в условиях сверхвысокого вакуума было достигнуто “истинное” атомное разрешение [6], в результате чего была нарушена монополия СТМ в этой области. Убедительные успехи были продемонстрированы при исследовании реконструкции поверхностей $\text{InP}(110)1 \times 1$, $\text{Si}(111)7 \times 7$ [6–8], отдельных адсорбированных молекул на поверхности $\text{TiO}_2(110)$ [9] и поверхностей ряда ионных кристаллов с контролируемым примесным составом [10].

1.1. Топографическое изображение поверхности

Измерение и контроль линейных размеров и формы рельефных структур материалов микро- и нанoeлектроники являются одними из основных технологических операций. АСМ выступает здесь как метрологическое средство измерения микрорельефа и шероховатости поверхности. Например, на рис. 1 приведено топографическое изображение элементов интегральной схемы, полученное на микроскопе SOLVER P7-SPMLS-MDT (НТ-МДТ), которое может быть использовано для визуального и метрического контроля. Размер исследуемых образцов может составлять от долей миллиметра до 30 см в диаметре, а область сканирования – достигать 100 мкм × 100 мкм и более.

Наноструктуры, квантовые точки

Анализ топографических изображений поверхности остается важным и наиболее часто используемым в исследованиях морфологии полупроводниковых структур. АСМ нашёл широкое применение для изучения низкоразмерных квантовых наноструктур, образующихся при гетероэпитаксиальном росте напряженных полупроводников методами молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и гидридов. Квантовые точки являются сейчас одним из наиболее интересных объектов изучения в физике полупроводников как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для разнообразных практических приложений (создание новых одноэлектронных приборов – транзисторов, диодов, п/п лазеров и т.д.). Получены данные о процессах образования и роста квантовых точек в различных системах: InAs/GaAs (001) [11–17], InGaAs/GaAs (001) [18–20], AlGaAs/GaAs [21], InAs/InP [22], GaN/AlN [23], ZnSe/GaP [24], ZnSe/GaAs (110) [25], CdSe/GaAs (001) [26], PbSe/PbTe (111) [27], InP/InGaP [28], InSb/AlGaSb (100) [29], InSb/InP (001) [30], InP/GaAs (001) [31], SiGe/Si (100) [32], Ge–Si(001) [33]. В этих работах наглядно продемонстрированы высокие возможности применения АСМ в легкодоступных комнатных условиях для исследования различных полупроводниковых квантоворазмерных структур с нанометровым пространственным разрешением. Метод позволяет определить размеры квантовых точек: диаметр и высоту, тонкие детали их формы, плотность на единицу площади и распределение по размерам. Все эти характеристики принципиально важны для контролируемого роста квантовых точек с малым разбросом по размерам и оценки их нестабильности при выдержке на воздухе. Метод АСМ также был использован для изучения морфологии поверхностей с квантовыми ямами, например в системе InGaAs/GaN [34], и квантовыми нитями [35].

Исследования *in situ* в жидкости

Принципиально новые возможности открываются при исследовании методом АСМ физико-химических процессов на границе жидкость–твёрдое тело. Например, путем последовательного получения *in situ* топографических изображений одного и того же участка поверхности было проведено изучение кинетики травления в водных растворах HF слоя SiO₂ после ионной имплантации [36] и наноструктурированных материалов [37]. До сих пор микроскопические исследования подобных явлений можно было проводить только *ex situ*.

Для мониторинга быстропротекающих процессов, к которым можно отнести травление или рост кристаллов, необходима высокая скорость записи топографических изображений поверхности. Обычно сканирование поверхности образца происходит в течение 2–4 мин. Минимальное время сканирования зависит от топографии поверхности образца. В последние годы достигнута ускоренная запись топографического изображения. Всего за 6 с может быть получено изображение размером 100 мкм × 100 мкм. Проблема повышения скорости записи затрагивает целый комплекс вопросов, связанных с приборной базой микроскопа, а именно с разработкой коротких кантилеверов и оптимизацией системы измерения их отклонения [38], контролем обратной связи и нелинейностью пьезосканера, увеличением соотношения сигнал/шум. Однако ее решение открывает широкие перспективы для исследований *in situ* роста кристаллов и пленок. Например, для скоростной регистрации процесса роста кристалла кальцита в жидкости были использованы прямоугольные кантилеверы длиной (*l*) 26, шириной (*w*) 13, толщиной (*d*) 0.3 мкм, резонансной частотой (*f*) 303 (на воздухе) и 100 кГц (в воде), константой упругости (*k*) 0.66 Н/м [39]. Всего за 1.2 с было получено изображение (250 нм × 250 нм) ступеней, образующихся из винтовых дислокаций в процессе роста.

Первые опыты в 1989 г. супругов Хансма с коллегами показали, что процесс биополимеризации можно представить в форме видеоролика, последовательно объединив АСМ изображения [40]. Аналогичным образом можно представить изменение в реальном времени морфологии растущих кристаллов или пленок. Продвинутой технику представления топографических изображений в АСМ, включающую стереоскопию, видеоанимацию и голографию, недавно описал Распанти [41].

Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности

Морфология поверхности кристаллов и пленок, тесно связанная с механизмами роста и реальной структурой, является важнейшим диагностическим признаком. Так как для АСМ нет ограничений, связанных с проводимостью ис-

следуемых образцов, и полученные в режиме топографии изображения в отличие от СТМ отражают реальный микрорельеф, то этот метод сейчас стал наиболее широко используемым для характеристики морфологии поверхности кристаллов и пленок. Переход к нанометровому диапазону размеров сделал необходимым переосмысление системы параметров для характеристики поверхностей. Шероховатость поверхности уже рассматривается на атомном уровне [42].

В первые годы становления метода АСМ исследователи при оценке шероховатости поверхности довольствовались традиционными измерениями первых четырех двумерных моментов (двумерное среднее арифметическое и среднее квадратическое значение, двумерная асимметрия и эксцесс). Вычисление этих параметров обеспечивает программное обеспечение Solver (НТ-МДТ) [43]. Сегодня многие зарубежные фирмы для сертификации гладкости поверхности используют стандарты ISO 9000, включающие трехмерные параметры [44, 45]. Регистрируемые массивы данных сканирования в АСМ позволяют вычислить как интегральные, так и локальные трехмерные характеристики поверхности в соответствии с международными стандартами.

Для анализа шероховатости и локальной структуры поверхности различных материалов на основе топографических изображений была разработана система метрических и фрактальных параметров [46–53]. Параметры, многие из которых включены в международные стандарты, определены в терминах классической статистики, спектрального анализа и фрактальной геометрии и могут быть использованы для сертификации поверхностей.

Метрические параметры – можно разделить на три группы: *амплитудные, функциональные и пространственные*. Перечислим эти параметры и укажем соответствующие международные стандарты и единицы измерения.

К *амплитудным параметрам*, характеризующим шероховатость поверхности, относятся: S_y – размах высот (peak-peak height, ISO 4287/1), нм; S_a – средняя арифметическая шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), нм; S_q – средняя квадратическая шероховатость (root mean square roughness, ISO 4287/1), нм; S_z – десять точек по высоте (ten point height, ISO 4287/1), нм; S_{sk} – асимметрия (surface skewness, ISO 4287/1), нм; S_{ku} – эксцесс (surface kurtosis, ANSI B.46.1), нм; S_{kku} – контрэксцесс (function of kurtosis), 1/нм; S_{cs} – спектральная когерентность (coherent spectral); $FCR(r)$ – функция корреляционной шероховатости (correlate roughness function), нм; $ACF(r)$ – автокорреляционная функция (autocorrelation function), нм; $PSD(f)$ – спектральная функция шероховатости (power spectral density), 1/нм; $RKF(r)$ – функция кинети-

ческой шероховатости (kinetic function roughness), нм; $RHF(r)$ – функция иерархической шероховатости (hierarchy roughness function), нм.

К *функциональным параметрам*, которые в отличие от амплитудных характеризуют рельеф в локальной области и степень гладкости поверхности, относятся: S_{sc} – средняя кривизна вершины (mean summit curvature), 1/нм; S_{dq} – с.к.о. угла наклона вершины (root mean square slope, ISO 4287/1), 1/нм; S_{dr} – выделенный участок поверхности (surface area ratio), %; S_{bi} – индекс основной поверхности (surface bearing index); S_{ci} – индекс сохранения гладкости поверхности (core fluid retention index); S_{vi} – индекс сохранения гладкости впадины (valley fluid retention index); S_{pk} – приведенная высота вершины (reduced peak height, DIN 4776), нм; S_k – шероховатость глубины впадины (core roughness depth, DIN 776), нм; S_{vk} – приведенная высота впадины (reduced valley height, DIN 4776); S_{ds} – плотность вершин (density of summits), 1/мкм².

Пространственные параметры позволяют определить анизотропию поверхности и периодичность структуры. Эта группа параметров ориентирована на использование массива цифровых данных изображения поверхности, подвергнутых дискретному преобразованию Фурье. К ним относятся: S_{wi} – индекс направления радиальной длины волны (radial wavelength index); S_{td} – направление текстуры (texture direction), град; S_{tdi} – индекс направления текстуры (index texture direction); S_{rw} – радиальная длина волны (параметр периодичности структуры) (radial wavelength), нм.

Фрактальные параметры. Фрактальные измерения в отличие от физических и технических имеют своей целью количественно оценить структуру поверхности, определив масштабную инвариантность и самоподобие формы, меру хаотичности структуры и т.п. В настоящее время разработано несколько методов фрактального анализа изображений в СЗМ, это метод “область–периметр”, метод “вариаций” и метод “структурной функции” [54–56]. Общая идея, лежащая в основе этих методов, базируется либо на размерности Хаусдорфа–Безиковича D_F , либо на спектре фрактальных размерностей D_q .

1.2. Другие виды изображений поверхности

Модифицированные атомно-силовые микроскопы позволяют получать изображения, отражающие пространственное распределение приповерхностных силовых полей различной природы (магнитных, электрических), температуры, емкостных и адгезионных свойств поверхности. В контактном режиме сканирования острие находится в физическом контакте с поверхностью и взаимодействие с ней в основном контролируется

капиллярной силой и силой отталкивания. В бесконтактной АСМ могут быть измерены дальнот действующие силы. На этом основано действие таких разновидностей силовой микроскопии как магнитно-силовая микроскопия (Magnetic Force Microscopy), сканирующая емкостная микроскопия (Scanning Capacitance Microscopy), сканирующая электростатическая микроскопия (Electrostatic Force Microscopy) и другие. Остановимся на рассмотрении только двух разновидностей силовой микроскопии: химической и термической.

Химическая силовая микроскопия (Chemical force microscopy) – это название появилось совсем недавно. Эта разновидность микроскопии хотя и использует разные режимы работы АСМ, но при этом имеет общую методологию. Объединяет все общая направленность на получение контраста на изображениях, который позволяет распознать химически различные участки поверхности. Такой контраст может быть получен при измерении боковых сил в контактом режиме сканирования, на котором базируется микроскопия боковых сил (Lateral Force Microscopy или Friction Force Microscopy), при использовании техник фазового контраста в условиях резонансного режима, а также в случае химического модифицирования острий [57–59]. То, что не может быть различимо на топографических изображениях, легко обнаруживается при контрастировании. Ярким примером является опыт, полученный при исследовании доменной структуры сегнетоэлектриков [60–62]. На наш взгляд следует обратить внимание на данный вид микроскопии, как перспективный для использования в микро- и нанoeлектронике. Так например, анализ химической карты поверхности с квантовыми точками, проведенный в [63], позволил обнаружить 10% изменение в составе $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ по In.

Сканирующая термическая микроскопия (Scanning Thermal Microscopy) использует температурно-чувствительный зонд для измерения температурного поля на поверхности или исследования транспорта энергии между зондом и образцом. История ее становления коротка. В 1993 г. модифицированный АСМ был приспособлен для получения термического изображения поверхности, благодаря использованию в качестве кантилевера заостренной термопары [64]. Принцип действия несложен: при контакте с поверхностью поток тепла через зонд изменяет его температуру, и вследствие различного нагрева двух материалов кантилевер изгибается. Теоретически чувствительность по температуре (в диапазоне $-543\text{--}3730\text{ K}$) сенсора на основе термопары составляет 0.05 мВ/К [65]. Одновременно можно получить топографическое и термическое изображения поверхности с субмикронным разрешением. В работе [64] было показано, что границы зерен поликристалли-

ческого сплава Al–Cu выглядят более холодными, чем сами зерна.

Авторы работы [66] использовали в качестве термического сенсора термопару из пленок Cr и Au (толщиной $100\text{--}200\text{ нм}$), нанесенных на тонкую стеклянную пластинку с размерами $15 \times 12.5 \times 0.13\text{ мм}^3$. Такой сенсор позволял измерять различие температур не ниже $6 \times 10^{-4}\text{ K}$. Накабеппу с соавторами [67] применили технику нанесения тонких пленок (Al или Au на буферный слой Ti) на стандартный кантилевер Si_3N_4 . Обычный АСМ – кантилевер становится термически чувствительным, если его покрыть пленкой из материала с большим, чем у подложки, коэффициентом теплового расширения. Подобно биметаллической пластине, такой кантилевер изгибается при изменении температуры. Теоретически микро-механический биметаллический сенсор способен измерять температуру, тепловые потоки и мощность с чувствительностью 10^{-5} K , 20 фДж и 10 пВт , соответственно, в полосе пропускания 100 Гц [65]. В работе [68] была описана технология изготовления термических сенсоров, у которых соединение термопары размещалось на конце острия нитридного кантилевера. Было показано, что нагрев острия от поверхности происходит через жидкую пленку, соединяющую острие с поверхностью.

Существенным недостатком вышеперечисленных термических сенсоров являлось то, что они изготавливались индивидуально. Это ограничивало развитие метода. Заметным продвижением вперед стало изготовление термических сенсоров с использованием планарной кремниевой технологии, которая обеспечивает получение одновременно большого количества кантилеверов [69–71]. Высокую чувствительность по температуре 0.7 мК и воспроизводимость показали изготовленные в [70] зонды. Технология изготовления термического сенсора была описана в работе [71], схематически она показана на рис. 2. Это тонкопленочная термопара, построенная на кончике зондирующего острия. Сам кантилевер характеризуется параметрами: длина $200\text{--}450\text{ мкм}$, ширина $20\text{--}40\text{ мкм}$, толщина $1.5\text{--}3\text{ мкм}$ и острие Au/Pd, находящееся на расстоянии $4\text{--}6\text{ мкм}$ от основания. Чувствительность такого термического сенсора составила 5.6 мВ/К [71]. В итоге были получены топографические и термические изображения микроконтакта из тонкой (3 мкм) пленки вольфрама размером $19 \times 9\text{ мкм}$ в процессе ее плавления под воздействием тока $4\text{--}8\text{ мА}$. Однако из-за больших размеров сенсора пространственное разрешение температурно-чувствительных консольных зондов пока ограничено в диапазоне $50\text{--}200\text{ нм}$ [68, 70, 71]. В перспективе пространственное разрешение и чувствительность по температуре термических сенсоров будут улучшены за

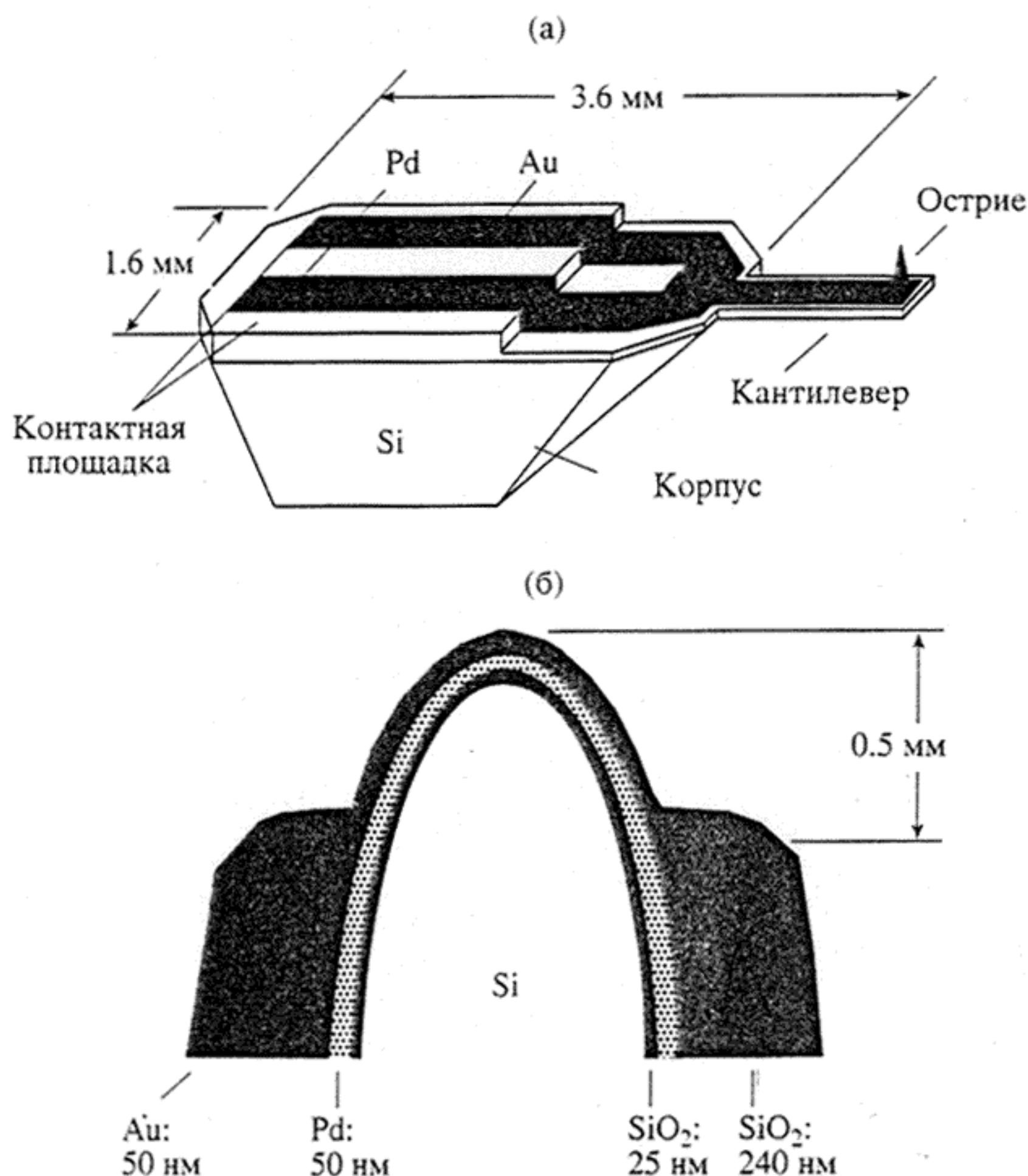


Рис. 2. Схематическое изображение термического кантилевера (а) и острия с тонкопленочной термопарой Au/Pd (б) [71].

счет: 1) повышения аспектного соотношения ширины и высоты зондирующего острия, 2) уменьшения толщины металлических слоев на конце острия, которое уменьшает радиус его кривизны, 3) уменьшения электрического шума в сигнале.

Данный вид микроскопии сейчас привлекает повышенное внимание. Об этом свидетельствует факт, что две ведущие фирмы, производители СЗМ, Park Scientific Instruments [<http://www.park.com>] и TopoMetrix [<http://www.topometrix.com>] объединили свои усилия для выпуска в 2000 г. сканирующего термического микроскопа [<http://www.thermomic.com>]. При существующей тенденции в микроэлектронике к микроминиатюризации устройств субмикронного уровня потеря мощности и высокая температура в чипах с высокой плотностью становятся очень важными выходными данными. В этом плане термические микроскопы с пространственным разрешением субмикронного уровня имеют многообещающее будущее. Например, они позволят измерять температуру в так называемых "горячих точках" и контролировать изделие в процессе его разработки.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСМ КАК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Сразу после изобретения СТМ и АСМ стало ясно, что зондирующее острие может быть использовано для модификации поверхности. В течение 10 последующих лет появилось более 500 статей, в которых исследователи пытались тем или иным образом модифицировать различные поверхности. Это был период становления совершенно новой области, в результате которого были определены границы возможного. В обстоятельном обзоре [72] проведена систематизация работ по модификации различных поверхностей методами СТМ и АСМ за этот период времени в аспекте технологического приложения. Сейчас работа в области СЗЛ охватывает огромную область от манипуляции одним атомом или молекулой до рисования линий протяженностью 100 мкм [73]. Отметим, что под СЗЛ далее мы будем понимать всякую контролируемую и достаточно стабильную модификацию поверхности.

Кратко подведем итоги периода становления СЗЛ. Механизмы СЗЛ могут быть классифици-

рованы как механическая и электрическая модификация поверхности. Можно выделить две схемы механической модификации: царапание, при котором острие используется для механического перемещения материала с поверхности образца, и перенос, когда слабо связанные с поверхностью частицы сначала прилипают, а затем отлипают от острия в другой области. При электрической модификации материал поверхности испытывает химические или физические изменения при приложении коротких импульсов напряжения. Если при механической модификации желательно работать с твердыми остриями, например покрытыми алмазными пленками [74], то при электрической — необходимы проводящие острия. Электрическая модификация поверхности предпочтительна, так как позволяет работать с технически важным материалом — кремнием и зачастую не производит глубоких изменений в топографии образцов.

Электрическая модификация поверхности проводилась на различных материалах: пассивированном n - и p -Si, SiO_2 , пористом кремнии, аморфном углероде, пленках Ti и Cr, халькогенидах, органических резистах, тонких органических пленках, полученных по методу Ленгмюра-Блоджетт и самосборки [72]. Наиболее важным и изученным среди них является селективное окисление поверхности пассивированного кремния, выполняемое в различных условиях. Итоговые результаты по скорости записи и разрешению для различных материалов и способов СЗЛ представлены в таблице. Наименьший размер при СЗЛ, как правило, составляет 10 нм. Стал очевиден факт, что основное ограничение этого метода связано с его малой производительностью: обычное сканирование одним острием со скоростью 10–100 мкм/с занимает длительное время для получения одного рисунка.

Ясно, что жизнеспособность СЗЛ, как метода, определяется четырьмя факторами: производительностью, надежностью, разрешением и точностью рисунка. Производительность может быть увеличена за счет увеличения числа острей и скорости сканирования [73, 75]. Пионерские работы ученых [76, 77] показали, что с помощью параллельных рядов пьезорезистивных кантилеверов, используемых для литографии и получения изображений, можно решить проблему производительности СЗЛ. Так, в работе [77] сообщается о разработке рядов параллельных кантилеверов 50×1 (гребенка размером в 1 см) с интегрированными пьезорезистивными сенсорами на основе ZnO. Последние обеспечивают разрешение 3.5 нм в полосе пропускания 20 кГц. Приведен пример формирования рисунка на кремнии посредством его окисления с помощью 50 острей, к которым было приложено напряжение 15 В. Рисунок размером в 1 см был сделан за один проход при скорости сканирования 1 мкм/с. Изображение полос,

Скорость записи и разрешение для различных способов СЗЛ и материалов

Способ модификации поверхности	Материал	Скорость записи, мкм/с	Разрешение, нм
Электрическая модификация	Si : H	10	10–60
	SiO_2/Si	23	10–40
	Металлические пленки	10	30–50
	Органические резисты	30000	15–150
	Пленки Ленгмюра-Блоджетт	25	6–25
	Пленки, полученные по методу самосборки	3000	15–70
Механическая модификация		1	100–200

полученных методом СЗЛ, было перенесено на кремний с помощью травления в KOH. Таким образом, СЗЛ перспективен как простой и недорогой метод для записи линий, шириной менее 0.1 мкм. Этот вид литографии использует обычные маски и технологические операции, как при изготовлении интегральных микросхем.

Нанолитография на пассивированном кремнии и пленках титана в резонансном режиме АСМ, по воспроизводимости результатов, пространственному разрешению, скорости, превосходит режимы контактной АСМ и СТМ [78, 79]. К тому же работа в резонансном режиме решает проблему износа иглы. Использование для литографии проводящего острия в АСМ вместо иглы СТМ позволило увеличить толщину слоя оксида, сделав его надежно изолирующим. Линии оксида кремния, сформированные АСМ литографией, могут быть уже 10 нм, что позволяет изготавливать с помощью этих процессов устройства нанoeлектроники. В настоящее время идет детальное исследование кинетики и механизма процессов локального окисления пассивированного кремния на воздухе под действием электрического поля, приложенного к острию [80–82]. Показано, что скорость роста оксида падала по мере увеличения его толщины, а при уменьшении относительной влажности уменьшалась ширина линий оксида [80]. В резонансном режиме с помощью мостиков из адсорбированной воды было выполнено локальное анодное окисление поверхности кремния, позволившее нарисовать ряды 5000 точек с периодичностью 40 нм и средним размером 10 нм [83].

В последнее время было показано, что АСМ, действующий на воздухе в резонансном режиме, может быть использован для формирования уз-

ких (около 30 нм) деталей рисунка в резисте толщиной 65 нм [84]. Для модификации поверхности был разработан сканирующий силовой микроскоп, с помощью которого на тонких пленках золота, полученных на слюде, были нарисованы не только линии, но и круги [85].

Активно продвигается работа по использованию АСМ для прямого формирования квантовых наноструктур в системах InAs/AlSb [86, 87], Ga(Al)As [88] и создания отдельных элементов микросхем, например, биполярного транзистора [89] или одноэлектронного транзистора на основе GaAs [90]. Все это дает основание заключить, что АСМ, действующий в резонансном режиме в сочетании с *in situ* электрическими измерениями, является надежным инструментальным средством нанолитографии для изготовления устройств нанoeлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев К.А., Орликовский А.А. Развитие элементной базы высокопроизводительных ЭВМ. // Информационные технологии и вычислительные системы. 1996. № 2. С. 26–47.
2. The National technology roadmap semiconductors // SIA-San Jose, California (USA). 1994.
3. Новиков Ю.А., Раков А.В. Метрология критических размеров элементов СБИС // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14–18.
4. <http://polymer.physics.bristol.ac.uk/spm/Seattle99>.
5. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930–933.
6. Giessble F.J. Atomic force microscopy in ultrahigh vacuum // Jpn. J. Appl. Phys. 1994. V. 33. Pt. 1. № 6B. P. 3726–3734.
7. Sugawara Y., Ueyama H., Uchihashi T. et al. True atomic resolution imaging with noncontact atomic force microscopy // Applied Surface Sci. 1997. V. 113/114. P. 364–370.
8. Nakagiri N., Suzuki M., Okiguchi K., Sugimura H. Site discrimination of adatoms in Si(111) 7 × 7 by noncontact atomic force microscopy // Surface Sci. 1997. V. 373. № 1. L. 329–L 332.
9. Fukui K., Onishi H., Iwasawa Y. Imaging of individual formate ions adsorbed on TiO₂ (110) surface by noncontact atomic force microscopy // Chem. Phys. Letters. 1997. V. 280. № 3–4. P. 296–301.
10. Володин А.П. Новое в сканирующей микроскопии (обзор материалов международной конференции STM'97) // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 6. С. 3–42.
11. Evtikhiev V.P., Tokranov V.E., Kryzhanovskii A.K. et al. Growth of InAs quantum dots on vicinal GaAs (001) surfaces misoriented in the [010] direction // Semiconductors. 1998. V. 32. № 7. P. 765–769.
12. Тутков А.Н. Исследования закономерностей роста и испарения квантовых точек InAs на вицинальных поверхностях GaAs (001), разориентированных в направлении [001], методом атомно-силовой микроскопии // Поверхность. 1998. № 2. С. 64–68.
13. Bosacchi A., Frigeri P., Franchi S. et al. InAs/GaAs self-assembled quantum dots grown by AlMBE and MBE // J. Crystal Growth. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 771–776.
14. Solomon G.S., Komarov S., Harris J.S., Jr., Yamamoto Y. Increased size uniformity through vertical quantum dot columns // J. Crystal Growth. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 707–712.
15. Nakata Y., Sugiyama Y., Futatsugi T., Yokoyama N. Self-assembled structures of closely stacked InAs islands grown on GaAs by molecular beam epitaxy // J. Crystal Growth. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 713–719.
16. Chun Y.J., Nakajima Sh., Okada Y., Kawabe M. The role of atomic hydrogen for formation of quantum dots by self-organizing process in MBE // Physica B. 1996. V. 227. P. 299–302.
17. Ishikawa T., Kohmoto Sh., Asakawa K. Site control of self-organized InAs dots on GaAs substrates by *in situ* electron-beam lithography and molecular-beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 12. P. 1712–1714.
18. Востоков Н.В., Данильцев В.М., Дроздов Ю.Н. и др. Исследование процессов формирования и заравнивания квантовых точек InAs в условиях металлоорганической газовой эпитаксии с помощью зондовой микроскопии // Материалы Всероссийского совещания “Зондовая микроскопия-99”. Нижний Новгород: Ин-т физики микроструктур РАН. 1999. С. 50–62.
19. Chyi J.-I., Nee T.-E., Lee Ch.-T. et al. Formation of self-organized In_{0.5}Ga_{0.5}As quantum dots on GaAs by molecular beam epitaxy // J. Crystal Growth. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 777–781.
20. Lee J.-S., Ren H.-W., Sugou Sh., Masumoto Y. In_{0.5}Ga_{0.5}As quantum dots intermixing and evaporation in GaAs capping layer growth // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 84. № 12. P. 6686–6688.
21. Hartmann A., Loubies L., Renhardt F., Kapon E. Self-limiting growth of quantum dot heterostructures on nonplanar {111} B substrates // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 10. P. 1314–1316.
22. Nishi K., Yamada M., Anan T. et al. Long-wavelength lasing from InAs self-assembled quantum dots on (311) B InP // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 4. P. 526–528.
23. Widmann F., Daudin B., Feuillet G. et al. Growth kinetics and optical properties of self-organized GaN quantum dots // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 12. P. 7618–7624.
24. Ma Z.H., Sun W.D., Sou I.K., Wong G.K.L. Atomic force microscopy studies of ZnSe self-organized dots fabricated on ZnS / GaP // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 10. P. 1340–1342.
25. Zhang B.P., Wang W.X., Yasuda T., Segawa Y. Spontaneous formation and photoluminescence of ZnSe dot arrays // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 23. P. 3370–3372.
26. Suemune I., Tawara T., Saitoh T., Uesugi K. Stability of CdSe and ZnSe dots self-organized on semiconductor surfaces // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 26. P. 3886–3888.
27. Pinczolis M., Springholz G., Bauer G. Direct formation of self-assembled quantum dots under tensile strain by hereepitaxy of PbSe on PbTe (111) // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 2. P. 250–252.
28. Kwon Y.-H., Cho Y.-H., Choe B.-D. et al. Effects of substrates misorientation on the formation and characteris-

- tics of self-assembled InP/InGaP quantum dots // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. Pt. 2. № 4A. P. L 366–L 368.
29. Yano M., Seki Y., Ohkawa H. et al. Characteristics of self-assembled InSb dots grown on (100) AlGaSb by molecular beam epitaxy // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. Pt.1. N5A. P. 2455–2459.
 30. Utzmeier T., Tamayo J., Postigo P.A. et al. Growth and characterization of self-organized InSb quantum dots and quantum dashes // *J. Crystal Growth*. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 725–729.
 31. Seifert W., Carlsson N., Castrillo P. et al. Quantum dots grown in-situ by MOVPE: sizes, densities and optical properties // *Brazilian J. Physics*. 1997. V. 27/A. № 4. P. 3–11.
 32. Schittenhelm P., Abstreiter G., Darhuber A. et al. Growth of self-assembled homogeneous SiGe-dots on Si (100) // *Thin Solid Films*. 1997. V. 294. P. 291–295.
 33. Востоков Н.В., Красильник З.Ф., Лобанов Д.Н. и др. АСМ исследования роста самоорганизующихся nanoостровков Ge на Si(001) // *Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия-99"*. Нижний Новгород: Ин-т физики микро-структур РАН. 1999. С. 30–36.
 34. Uchida K., Kawata M., Yang T. et al. Increased size of open hexagonally shaped pits due to growth interruption and its influence on InGaN/GaN quantum-well structures grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. Pt. 2. № 5B. P. L 571–L 573.
 35. Koshiha S., Tanaka I., Nakamura Y. et al. UHV-AFM study of MBE-grown 10 nm scale ridge quantum wires // *J. Crystal Growth*. 1997. V. 175/176. Pt. 2. P. 804–808.
 36. Бухараев А.А., Можанова А.А., Нургагизов Н.И. Изучение in situ фотохимических процессов на границе жидкость–полупроводник с помощью атомно-силового микроскопа // *Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия-99"*. Нижний Новгород: Ин-т физики микро-структур РАН. 1999. С. 85–90.
 37. Бухараев А.А., Можанова А.А., Нургагизов Н.И., Овчинников Д.В. Атомно-силовая микроскопия наноструктурированных материалов при селективном химическом травлении // *Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия-99"*. Нижний Новгород: Ин-т физики микро-структур РАН. 1999. С. 91–97.
 38. Schäffer T.E., Hansma P.K. Characterization and optimization of the detection sensitivity of an atomic force microscope for small cantilevers // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 84. № 9. P. 4661–4666.
 39. Paloczi G.T., Smith B.L., Hansma P.K., Walters D.A. Rapid imaging of calcite crystal growth using atomic force microscopy with small cantilevers // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 12. P. 1658–1660.
 40. Amato I. Candid cameras for the nanoworld // *Science*. 1997. V. 276. P. 1982–1985.
 41. Raspanti M. Advanced visualization techniques for scanning probe microscopy // *Microscopy*. 1999. № 57. P. 19–21.
 42. Yu J., Namba Y. Atomic surface roughness // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 24. P. 3607–3609.
 43. Руководство пользователя Р4-SPM-MDT // М.: Гос. НИИ физ. проблем. 1996. 58 с.
 44. Jorgensen J.F., Carneiro K., Madsen L.L. The scanning tunneling microscope and surface characterization // *Nanotechnology*. 1993. V. 4. P. 152–158.
 45. Carneiro K., Jensen C.P., Jorgensen J.F., Garnoes J. Roughness parameters of surfaces by atomic force microscopy // *Annals of the CIRP*. 1995. V. 44. P. 517–522.
 46. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Сканирующая зондовая микроскопия (туннельная и силовая) в задачах метрологии наноэлектроники // *Микроэлектроника*. 1997. Т. 26. № 6. С. 426–439.
 47. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Феноменологическое описание характеристик поверхности, измеряемых методом атомно-силовой микроскопии // *Кристаллография*. 1998. Т. 43. № 3. С. 524–534.
 48. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Система параметров для анализа шероховатости материалов в сканирующей зондовой микроскопии // XVII Российская конференция по электронной микроскопии. Черноголовка, 1998. С. 31.
 49. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Параметры для анализа шероховатости поверхности материалов методом сканирующей зондовой микроскопии // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и наноэлектроника-98"*. 1999. Т. 2. С. Р2–47.
 50. Толстихина А.Л., Арутюнов П.А. Исследование морфологии пленок TiO₂ методом АСМ // *Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия-99"*. Нижний Новгород: Ин-т физики микро-структур РАН. 1999. С. 250–255.
 51. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Параметры шероховатости по данным измерений атомно-силового микроскопа // *Микроэлектроника*. 1998. Т. 27. № 6. С. 431–439.
 52. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Алгоритмы вычисления шероховатости, корреляционной функции и спектральной плотности мощности по данным измерений АСМ. 30 июня–3 июля 1998. Москва. 1-я Международная Конференция. Цифровая обработка сигналов и ее применение. Москва. 1998. Том IV. С. 31.
 53. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Система параметров для анализа шероховатости поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // *Законодательная и прикладная метрология*. 1998. Выпуск 5. С. 14–20.
 54. Almqvist N. Fractal analysis of scanning probe microscopy images // *Surface Sci.* 1996. V. 355. № 1/3. P. 221–228.
 55. Iwasaki H., Iwamoto A., Yoshinobu T. Fractal analysis of interface roughness by atomic force microscopy // *Mem. Inst. Sci. Res., Osaka Univ.* 1994. V. 51. P. 35–43.
 56. Spanos L., Irene E.A. Investigation of roughened silicon surfaces using fractal analysis. 1. Two-dimensional variation method // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1994. V. 12. № 5. P. 2646.
 57. Fujihira M., Ohzono T. Basis of chemical force microscopy by friction force microscopy // *Seattl'99. Abstracts booklet*. P. 10–11.
 58. Fujihira M., Okabe Y., Tani Y., Akiba U. Chemical modification of atomic force microscope tips for chemical force microscopy // *Seattl'99. Abstracts booklet*. P. 10.
 59. Okabe Y., Furugoori M., Akiba U., Fujihira M. Chemical force microscopy of microcontact-printed self-as-

- sembled monolayers by pulsed-force-mode atomic force microscopy // *Seattl'99. Abstracts booklet*. P. 34.
60. Толстихина А.Л., Белугина Н.В., Шикин С.А. Исследование доменной структуры сегнетоэлектрических кристаллов ТГС методом атомно-силовой микроскопии // *Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия-99"*. Нижний Новгород: Ин-т физики микроструктур РАН. 1999. С. 237–242.
 61. Correia A., Massanell J., Garcia N. et al. Friction force microscopy study of a cleaved ferroelectric surface: time and temperature dependence of the contrast, evidence of domain structure branching // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68. № 20. P. 2796–2798.
 62. Bluhm H., Schwarz U.D., Wiesendanger R. Origin of the ferroelectric domain contrast observed in lateral force microscopy // *Phys. Rev. B*. 1998. V. 57. № 1. P. 161–169.
 63. Garcia R., Tamayo J. Compositional mapping of quantum dots and multiquantum wells by friction force microscopy // *STM-97. Abstracts booklet*. P. 143.
 64. Majumdar A., Carrejo J.P., Lai J. Thermal imaging using the atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 62. № 20. P. 2501–2503.
 65. Moulin A.M., Stephenson R.J., Welland M.E. Micromechanical thermal sensors: Comparison of experimental results and simulations // *J. Vac. Sci. Technol.* 1997. V. 15B. № 3. P. 590–596.
 66. Xu J.B., Lauger K., Dransfeld K., Wilson I.H. Thermal sensors for investigation of heat transfer in scanning probe microscopy // *Rev. Sci. Instrum.* 1994. V. 65. № 7. P. 2262–2266.
 67. Nakabeppu O., Chandrachud M., Wu Y. et al. // *Appl. Phys. Lett.* V. 66. № 6. P. 694–696.
 68. Luo K., Shi Z., Majumdar A. Sensor nanofabrication, performance and conduction mechanisms in scanning thermal microscopy // *J. Vac. Sci. Technol.* 1997. V. 15B. № 2. P. 349–360.
 69. Zhou H., Midha A., Mills G. et al. Generic scanned probe microscope sensors fabricated by electron beam lithography and micromachining // *STM-97. Abstracts booklet*. P. 133.
 70. Mills G., Zhou H., Midha A. et al. Novel scanning thermal microscopy probes // *STM-97. Abstracts booklet*. P. 133.
 71. Zhang Y., Zhang Y., Blaser J. et al. A thermal microprobe fabricated with wafer-stage processing // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. V. 69. № 5. P. 2081–2084.
 72. Nyffenegger R.M., Penner R.M. Nanometer-scale surface modification using the scanning probe microscope: progress since 1991 // *Chem. Rev.* 1997. V. 97. P. 1195–1230.
 73. Niedermann Ph., Hanni W., Blanc N., Christoph R., Burger J. Chemical vapor deposition diamond for tips in nanoprobe experiments // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. V. A14. № 3. P. 1233–1236.
 74. Quate C.F. Scanning probes as a lithography tool for nanostructures // *Surface Sci.* 1997. V. 386. № 1/3. P. 259–264.
 75. Park S.W., Soh H.T., Quate C.F., Park S.-I. Nanometer scale lithography at high scanning speeds with atomic force microscope using spin on glass // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. № 16. P. 2415–2417.
 76. Minne S.C., Manalis S.R., Quate C.F. Parallel atomic force microscopy using cantilevers with integrated piezoresistive sensors and integrated piezoelectric actuators // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. № 26. P. 3918–3920.
 77. Minne S.C., Adams J.D., Yaralioglu G. et al. Centimeter scale atomic force microscope imaging and lithography // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 12. P. 1742–1744.
 78. Fontain P.A., Dubois E., Stievenard D. Characterization of scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy – based techniques for nanolithography on hydrogen – passivated silicon // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 84. № 4. P. 1776–1780.
 79. Irmer B., Kehrle M., Lorenz H., Kotthaus J.P. Fabrication of Ti/TiO_x tunneling barriers by tapping mode atomic force microscopy induced local oxidation // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. № 12. P. 1733–1735.
 80. Avouris Ph., Hertel T., Martel R. Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. № 2. P. 285–287.
 81. Dagata J.A., Inoue T., Itoh J., Yokoyama H. Understanding scanned probe oxidation of silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 2. P. 271–273.
 82. Dagata J.A., Inoue T., Itoh J. et al. Role of space charge in scanned probe oxidation // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 84. № 12. P. 6891–6900.
 83. Garcia R., Calleja M., Rohrer H. Nanometer-scale oxidation of silicon surfaces with a non-contact atomic force microscope: liquid bridge formation and nanofabrication // *Seattl'99. Abstracts booklet*. P. 12.
 84. Wilder K., Quate C.F., Adderton D. et al. Noncontact nanolithography using the atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 17. P. 2527–2529.
 85. Tegen S., Kracke B., Damaschke B. Surface modifications with a scanning force microscope // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68. № 3. P. 1458–1460.
 86. Guo H., Wang J. Wires, dots, and tunnel junctions at the atomic scale // *La Physique au Canada*. 1998. Mars a avril. P. 137–145.
 87. Cortes Rosa J., Wendel M., Lorenz H. et al. Direct patterning of surfaces quantum wells with an atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 18. P. 2684–2686.
 88. Held R., Vancura T., Heinzel T. et al. In-plane gates and nanostructures fabricated by direct oxidation of semiconductor heterostructures with an atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 2. P. 262–264.
 89. Richter Sh., Cahen D., Cohen S.R. et al. Fabrication of sub-μm bipolar transistor structures by scanning probe microscopy // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 13. P. 1868–1870.
 90. Okada Y., Amano Sh., Kawabe M. et al. Nanoscale oxidation of GaAs-based semiconductors using atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 83. № 4. P. 1844–1847.