

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

© 2000 г. П. А. Арутюнов, А. Л. Толстихина

Московский государственный институт электроники и математики

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

Поступила в редакцию 07.06.99 г.

Дан аналитический обзор последних достижений в области атомно-силовой микроскопии (АСМ) и ее практического применения при создании элементной базы микро- и нанoeлектроники. Рассмотрены новые конструкции кантилеверов и сенсоров (избирательно-чувствительных элементов). Проведена оценка достижений и тенденций развития в области нанолитографии с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ).

1. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ КАНТИЛЕВЕРОВ

Прогресс в атомно-силовой микроскопии в значительной мере определяется разработками в области конструирования и технологии изготовления кантилеверов [1]. Разновидности конструкций и технология изготовления кантилеверов рассмотрены в обзорах [2, 3]. Рядом фирм Park Scientific Instruments, Olympus [[http:// www.olympus.co.jp/](http://www.olympus.co.jp/)], NT-MDT [[http:// www.ntmdt.ru/](http://www.ntmdt.ru/)] освоено производство кантилеверов, изготовленных из Si и Si₃N₄, для контактного и динамического режимов работы. Их конструктивные параметры: $l = 90\text{--}320$ мкм, $w = 18\text{--}60$ мкм, $d = 0.5\text{--}2.1$ мкм, $f = 0.01\text{--}410$ кГц, $k = 0.1\text{--}102$ Н/м. В последние годы номенклатура коммерческих кантилеверов расширилась: появились кантилеверы с калибровкой по силе, с остриями, покрытыми алмазными пленками, пьезокантилеверы.

Появление новых конструкций кантилеверов обусловлено самыми различными потребностями. В методе атомно-силовой микроскопии есть два основных краеугольных камня – это пространственное разрешение и разрешение по силе. На минимально измеряемую силу влияют следующие факторы: 1 – конструкция кантилевера; 2 – техника измерения отклонения кантилевера (оптическая или с помощью пьезокантилеверов); 3 – условия работы (температура, среда, измеряемая частота). Пространственное же разрешение определяется совершенством острия. Очевидно, что кантилевер играет ключевую роль в развитии атомно-силовой микроскопии.

Для обеспечения работ в резонансном режиме в условиях сверхвысокого вакуума для получения “истинного” атомного разрешения возникла необходимость в сравнительно жестких высокочастотных кантилеверах. Известно, что первая гармоника резонансной частоты связана с эффективной константой упругости соотношением $f_1 = A\{(k - F)/(m_c + 0.24m_1)\}^{1/2}$. Первый множитель включает эффективную константу упругости k_{eff} и градиент силы, направленный по нормали к поверхности $F = dF/dz$, а второй – эффективную массу m_{eff} , где m_c – масса иглы и m_1 – масса пластинки. Если судить по последним работам, то собственная резонансная частота кантилеверов возросла 0.2–0.5 мГц и даже до 10 мГц. Разработан ультратонкий монокристаллический кантилевер, способный при 4.8 К в вакууме детектировать силы величиной в несколько аттоньютон (5 × 10⁻¹⁸ Н) в полосе частот 1 Гц [4]. Его чрезвычайно малая механическая жесткость (6.5 Н/м) и значительная добротность (6700) обеспечивают указанную выше чувствительность по силе $S_F = -A(k_{\text{eff}}/m_{\text{eff}})^{1/2}$. Уменьшение минимально регистрируемой силы требует уменьшения параметра k . Следовательно, миниатюризация кантилеверов должна сопровождаться существенным уменьшением параметра d .

1.1. Пьезорезистивные и пьезоэлектрические кантилеверы

В обычной резонансной атомно-силовой микроскопии отклонение кантилевера при сканировании поверхности регистрируется внешними устройствами (чаще это оптическая схема детектиро-

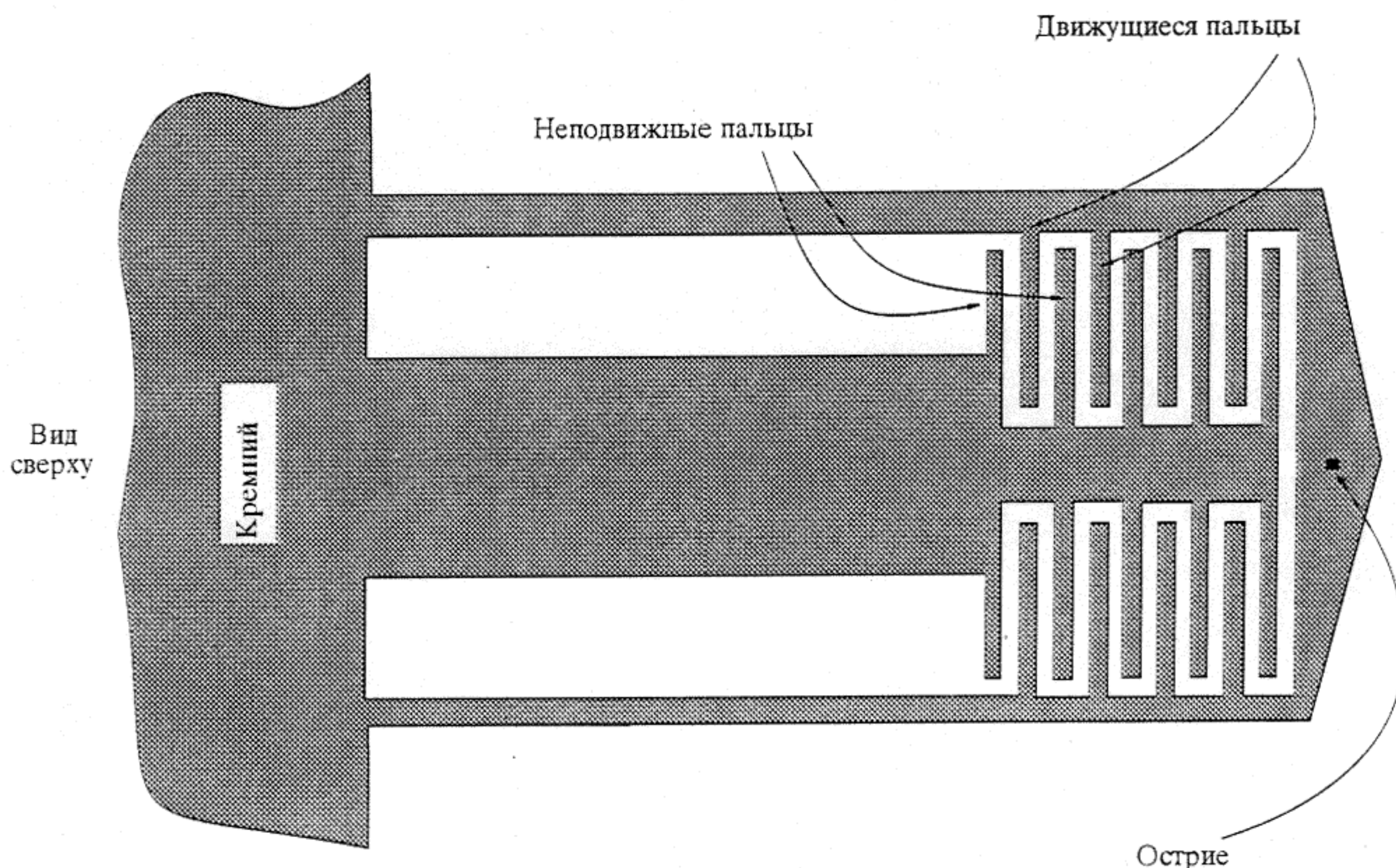


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ID-кантилевера [20].

вания), все элементы которых должны быть тщательно выверены по отношению к кантилеверу. В условиях вакуума это сделать сложно, к тому же лазерный пучок нагревает кончик кантилевера, создавая дополнительный шум. Пьезорезистивные [5] и пьезоэлектрические [6] кантилеверы не требуют дополнительных внешних устройств, измеряющих их изгиб или возбуждающих резонансные колебания, так как чувствительные элементы интегрированы в него. Для стандартного пьезокантилевера чувствительность по силе составляет $0.3 \times 10^{-6} \text{ нН}^{-1}$. К их дополнительным достоинствам следует отнести возможность интегрирования в параллельные ряды кантилеверов, которые обеспечивают высокую скорость сканирования поверхности [7–10]. Основная причина интенсификации разработок пьезокантилеверов, объединенных в ряды, заключается в их потенциальном применении для записи и считывания информации [11], а также как физических, химических и биологических сенсоров [12].

Для сверхвысоковакуумного микроскопа на основе слоев $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ толщиной 1.0 мкм и SiO_2 разработан пьезоэлектрический кантилевер, показывающий добротность 300 на воздухе и 807 в вакууме [13, 14]. Пьезокантилевер обеспечивает

также исследование топографии поверхности образцов с высоким разрешением в жидкости [15].

Авторы работы [16] усовершенствовали технологию изготовления пьезорезистивного кремниевых кантилевера. Изгиб кантилевера обнаруживается интегрированным пьезорезистором, являющимся частью электрического моста. Рассчитанная чувствительность по силе составила $1.0\text{--}3.1 \times 10^{-10} \text{ Н}$ в полосе пропускания 10 Гц–1 кГц. Минимальное измеряемое отклонение дало с. к. о. шероховатость 0.29–1.40 Å. В работе [17] сообщается о разработке кантилевера с уменьшенной массой и конструктивными параметрами $l = 12 \text{ мкм}$, $k = 2 \text{ Н/м}$, $f_1 = 4.6 \text{ МГц}$ с пьезорезистивным датчиком изгиба, регистрирующим перемещения на уровне $3 \times 10^{-3} \text{ Å/Гц}^{1/2}$. Этот кантилевер с временем механического отклика 90 нс предполагается использовать в устройствах записи и считывания информации.

Новый пьезорезистивный кантилевер, который может быть использован в контактной и резонансной атомно-силовой микроскопии, микроскопии боковых сил, электростатической и емкостной силовой микроскопии, содержит 4 пьезорезистора, соединенные в мостовую схему. Проводящее острие, изолированное от кремниевого кантилевера оксидным слоем, имеет радиус кривизны

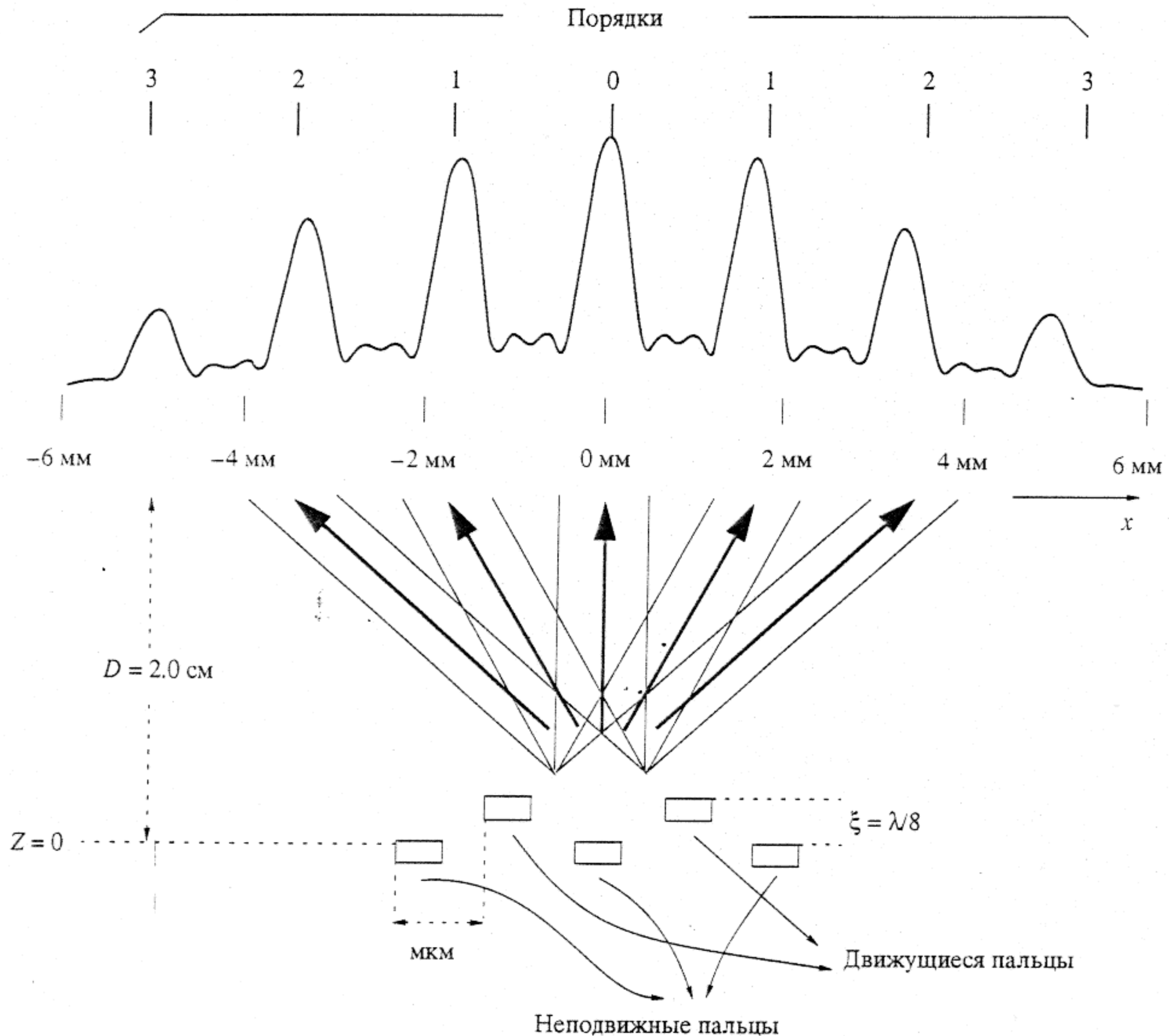


Рис. 2. Образование дифракционной картины при смещении подвижных пальцев ID-кантилевера относительно неподвижных при оптической регистрации. Ширина пальцев составляет 2 мкм [20].

30 нм [18]. Новый сенсор позволил измерить электрические силы в диапазоне от 2 до 8 нН (в полосе пропускания 3 Гц). Этой же группой авторов разработан пьезокантилевер, работающий как фемтокалориметр и измеряющий потоки тепла с чувствительностью 50 пДж. За счет уменьшения толщины пьезорезистивного кантилевера до 100 нм была достигнута высокая чувствительность по силе (70% от теоретической величины) – 9 фН [19].

1.2. ID – кантилевер на основе интерференционной дифракционной решетки

В работе [20] описана новая оригинальная конструкция ID (interdigital) взаимосвязанного кантилевера (рис. 1), имеющего форму оптической ди-

фракционной решетки, с двумя видами “гребенок”: одна группа из 4-х подвижных пальцев и вторая – из 4-х пальцев как независимая (базовая) гребенка.

В основе ее создания лежит использование для регистрации отклонения кантилевера принципов интерферометрического детектирования. Если на плоскую дифракционную решетку падает параллельный пучок света, ось которого лежит в плоскости, перпендикулярной к пальцам решетки, то (как показывает расчет) получающееся в результате интерференции когерентных пучков от всех N пальцев гребенки пространственное угловое распределение интенсивности света (в той же плоскости) может быть представлено в виде произведения двух функций: $J_N \times J_g$. Функция J_g определя-

ется дифракцией света на отдельном пальце гребенки, функция J_N обусловлена интерференцией N когерентных пучков, идущих от пальцев гребенки, и связана с периодической структурой гребенки. Функция J_N для данной длины волны λ определяется периодом решетки (расстоянием между пальцами d), полным числом пальцев гребенки N и углами, образованными падающим (угол ϕ) и дифрагированным (угол ϕ) пучками с нормалью к решетке (рис. 2), но не зависит от формы пальцев. Для амплитудной щелевой решетки она имеет вид

$$J_N = (\sin N\theta / \sin \theta)^2,$$

где

$$\theta = \pi \Delta / \lambda, \quad \Delta = d(\sin \phi + \sin \phi)$$

– разность хода между когерентными параллельными пучками, идущими под углом ϕ от соседних пальцев гребенки (уравнение решетки). Функция J_N – периодическая функция с резкими интенсивными главными максимумами и небольшими вторичными максимумами. Между соседними главными максимумами расположено $N-2$ вторичных и $N-1$ минимумов, где интенсивность равна нулю. Положение главных максимумов определяется из условия $\sin \theta_{\text{макс}} = 0$ или $\theta_{\text{макс}} = \pm m\pi$, где $m = 0, 1, 2, \dots$ – целое число. Уравнение решетки будет $\Delta = d(\sin \phi + \sin \phi_{\text{макс}}) = \pm m\lambda$ (где d – расстояние между пальцами, m определяет порядок спектра), то есть главные максимумы образуются в направлениях, когда разность хода между соседними когерентными пучками равна целому числу длин волн. Интенсивность всех главных максимумов одинакова и равна $J_{N_{\text{макс}}} = N^2$, интенсивность же вторичных максимумов мала и не превышает $1/23$ от $J_{N_{\text{макс}}}$. Это уравнение показывает, что при заданном угле падения ϕ направление на главный максимум $\phi_{\text{макс}}$ зависит от длины волны λ , т.е. $\phi_{\text{макс}} = f(\lambda)$; следовательно, дифракционная решетка пространственно (по углам) разлагает излучение различных длин волн. Если дифрагированное излучение, идущее от решетки, направить в приемник излучения, то в его фокальной плоскости образуется спектр. При этом величина m определяет порядок спектра (рис. 2). При $m = 0$ (нулевой порядок спектра) спектр не образуется, так как условие $d(\sin \phi + \sin \phi_{\text{макс}}) = 0$ выполняется для всех длин волн. Из последнего условия при $m = 0$ также следует, что $\phi_0 = -\phi$, т.е. направление на максимум нулевого порядка определяется зеркальным отражением от плоскости решетки: падающий и дифрагированный пучки нулевого порядка расположены симметрично относительно нормали к решетке. По обе стороны от направления на максимум нулевого порядка расположены максимумы и спектры $m = \pm 1$, $m = \pm 2$ и т.д. порядков.

Вторая функция J_g , влияющая на результирующее распределение интенсивности в спектре, обусловлена дифракцией света на отдельном пальце гребенки: она зависит от величин d , λ , ϕ и ϕ , а также от формы пальца – его профиля. Максимальное значение произведения функций $J_N \times J_g$, а потому и максимальная интенсивность будут в спектре нулевого порядка. Отраженные пучки от движущихся пальцев в точках $\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4 \dots$ сдвигают максимумы интенсивности, что регистрируется оптической системой. В работе [20] показано, что ID-кантилевер компенсирует шумы лазера и поэтому он менее чувствителен к посторонним вибрациям. Этот кантилевер имеет уникальное свойство: чувствительность не зависит от его длины. Достигнута разрешающая способность $0.01 \text{ \AA}$.

1.3. Острия

Основные требования к зондирующим остриям – малый радиус кривизны (для получения высокого латерального разрешения и препятствия возникновению артефактов), стабильность к износу и высокое аспектное соотношение (для измерения глубоких рельефных структур). Всем этим требованиям отвечают углеродные нанотрубки. Подобные структуры обладают чрезвычайно высоким модулем упругости (10^5 ГПа) и резонансной частотой (более 200 кГц). Многостенные нанотрубки с диаметром $5\text{--}20 \text{ нм}$ и длиной $1\text{--}2 \text{ мкм}$, будучи прикреплены к концу острия обычного кремниевого кантилевера, были использованы авторами [21] для получения в резонансном режиме атомно-силовой микроскопии топографических изображений поверхности. Углеродные нанотрубки могут быть получены на конце коммерческих кремниевых острий осаждением из газовой фазы [22].

Первые результаты показали, что такие острия перспективны для измерения и контроля линейных размеров и формы рельефных структур материалов микро- и наноэлектроники. Они позволяют измерять микрорельеф углубленных структур, например, таких как решетки, с высоким латеральным разрешением и устраняют артефакты, присущие обычным коммерчески изготовленным иглам [21, 23, 24]. Так, были обнаружены тонкие детали (размером менее 100 нм) микрорельефа GaAs, образовавшиеся после литографии и травления, невидимые в растровом электронном микроскопе и обычном АСМ и стандартными нитридными кантилеверами [24]. По отношению к остриям из кремния нанотрубки улучшали изображение наноструктур Au на 70% [23].

В то время, как обычные кремниевые острия воздействуют на поверхность с силой более 100 нН, максимальная сила, производимая нанотрубкой, ограничена Эйлеровой силой изгиба и составляет менее 10 нН. Это важно для исследования мягких объектов, таких как биомолекулы. Недавние исследования биологических наноструктур (в частности ДНК) показали, что острия в виде многостенных нанотрубок улучшают латеральное разрешение на 10–30% [23]. Малый диаметр одностенной нанотрубки (около 1 нм) потенциально обеспечит значительное улучшение разрешения. Концы углеродных нанотрубок, как показано в [25, 26], будучи химически модифицированы (с кислотной или гидрофобной функциональностью) и использованы как острия в атомно-силовой микроскопии, позволяют получать изображения, в основе которых лежат молекулярные взаимодействия, и измерять силы связи. Такие функциональные концы нанотрубок могут служить молекулярными зондами, используемыми в различных областях химии и биологии. В пределе острие, на конце которого находится один или несколько атомов углерода, может быть использовано для распознавания отдельных молекул.

Куйт К.Ф. [27], один из изобретателей атомно-силовой микроскопии, назвал в 1999 году последним впечатляющим достижением в области СЗМ использование углеродных нанотрубок в качестве зондирующих острий. Благодаря замечательным механическим свойствам они найдут применение в устройствах для считывания и записи информации, а также в нанолитографии. Недавно острия из углеродных нанотрубок были использованы в атомно-силовой микроскопии нанолитографии [28]. При приложении к острию импульсного напряжения -9 В со скоростью записи 10 мкм/с на поверхности кремния были получены решетки с периодом 100 нм из полос оксида кремния высотой 2 нм и шириной 10 нм.

Эксперименты показывают, что острие иглы атомно-силовой микроскопии, образованное нанотрубкой, способно обеспечить атомарный уровень разрешения [21]. Авторы [29] провели теоретическое исследование разрешения атомно-силовой микроскопии на основе расчета сил взаимодействия одно- и многослойных нанотрубок (разных длин и диаметров) с поверхностью твердого тела. На основании расчетов сделаны оценки минимального расстояния сближения нанотрубки с поверхностью и режимов работы атомно-силовой микроскопии. В контактном режиме устойчивая работа атомно-силовой микроскопии возможна, если сила взаимодействия не превышает критического значения Эйлера

$F_{кр} = EJ\pi^2/\mu z^2$, где E – модуль упругости, J – момент инерции поперечного сечения (для круглого сечения $J = \pi R^4/4$), $\mu = 0.7$ (величина этого параметра зависит от способа закрепления нанотрубки). Для изучения разрешающей способности нанотрубок в качестве зондов атомно-силовой микроскопии проводилось компьютерное моделирование изображений нескольких поверхностей, учитывающее их атомарную структуру. В расчетах использовался потенциал “нанотрубка–атом поверхности” $U_i(h, \rho)$, где ρ – расстояние от точки проекции оси нанотрубки до атома поверхности.

Для проведения количественных спектроскопических исследований с помощью атомно-силовой микроскопии разработан способ приготовления острий с заданным радиусом кривизны от 7–120 нм и сферической формой верхушки, образующейся в результате осаждения аморфного углерода в электронном микроскопе [30]. Соответствие условий реального эксперимента с теоретической моделью сфера–плоскость позволило авторам [30] получить зависимости силы трения от нагружающей силы. Для увеличения чувствительности к градиенту дальнедействующих сил в условиях резонансного режима был предложен метод изготовления кантилевера с острием в виде механически колеблющегося шарика [31]. Теоретически модель подобного нанокантилевера с резонансной частотой в ГГц-диапазоне была разработана ранее в [32]. Из-за малой массы осциллирующего шарика (10^{-14} г) и короткой длины (20 нм) такой кантилевер имеет резонансную частоту 300 МГц. Метод изготовления основан на локальном электрохимическом травлении кремния в очень тонком (около 1 мкм) слое электролита, позволяющем формировать острие в виде сферы, цилиндра, конуса и др.

1.4. Альтернативное использование кантилеверов:

физические, химические и биологические сенсоры

Сенсоризация производственной деятельности, т.е. замена органов чувств человека на датчики, сегодня рассматривается в качестве третьей промышленной революции вслед за первыми двумя: машинно-энергетической и информационно-компьютерной. Потребность в высоко чувствительных сенсорах быстро растет, особенно в связи с освоением мезоскопического и атомарного диапазона длин. Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надежностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации. Этим требованиям отве-

чает новый вид прецизионной измерительной аппаратуры, создаваемой на основе атомно-силовой микроскопии. Микрокантилеверы могут быть использованы как чрезвычайно чувствительные сенсоры в различных физических, химических и биологических процессах [33–42].

Опыт показывает, что кантилевер изгибается не только под действием на его острие силы, но и при других воздействиях, изменяющих распределение в нем механических напряжений. Такими воздействиями являются различные физико-химические процессы, происходящие на поверхности кантилевера, термические воздействия, магнитные воздействия и др. Локальное силовое взаимодействие острия АСМ с поверхностью практически ни в каком случае нельзя свести к действию лишь одной определенной силы. Оно всегда имеет комплексный характер и многократно усложняется в динамическом режиме, который является стандартным в неконтактной АСМ. Оказывается, что “побочные” локальные взаимодействия можно использовать как основной измеряемый параметр.

Физические сенсоры

В настоящее время показано, что сенсоры позволяют измерять относительную влажность, температуру, давление, потоки, вязкость, УФ- и ИК-излучение [33–41]. К их преимуществам можно отнести высокую чувствительность, малые размеры и массу, использование кремниевой планарной технологии изготовления, быстрый отклик, возможность интегрирования в параллельные ряды.

Современный уровень технологии микроэлектроники позволяет интегрировать в кантилевере, и даже в его острие, не только пассивные, но и активные электронные компоненты. Разработан кремниевый кантилевер с диодом Шоттки в зондирующем острие, который может реагировать на изменение различных физических параметров, таких как температура, интенсивность светового излучения или напряжение [2]. Сообщается о создании активного зонда в виде одноэлектронного транзистора, сформированного на острие [43]. Такой транзистор имеет удлиненный электрод шириной 30 нм с двумя туннельными переходами и представляет собой сенсор, весьма чувствительный к электрическому потенциалу (способен регистрировать заряд, меньший одной тысячной заряда электрона на расстоянии 100 нм). Для работы одноэлектронного транзистора, действие которого основано на блокировании тока через туннельные переходы электрическим потенциалом островка и затвора, требуются низкие темпе-

ратуры порядка 1 К. Возможное применение – это измерение распределения потенциала в переходах Джозефсона или в двумерном электронном газе в условиях сильных магнитных полей.

Химические сенсоры

Номенклатура химических сенсоров для исследования кинетики химических, каталитических и биохимических реакций, диффузии и других явлений массопереноса, контроля комплексообразования, ассоциации ионов, изучения изменения ионного состава, термодинамики растворов электролитов весьма обширна [44]. Главное требование к химическим сенсорам – это обратимость к большому числу катионов и анионов, газовых молекул и радикалов, окислителей и восстановителей на поверхности.

Основу сенсорного устройства – NOSE (Nanomechanical Olfactory Sensor) составляет массив из восьми параллельных кремниевых кантилеверов, четыре из которых с одной стороны покрыты определенным материалом, вступающим в специфические химические реакции (или сорбционные процессы) с окружающим газом или жидкостью. Обычно используются покрытия на основе металлов, тонких органических пленок (полученных по методу самосборки) или полимеров. Непокрытые кантилеверы предназначены для реализации дифференциального метода измерений.

В результате действия такого устройства могут быть обнаружены: наличие паров ртути, 2-меркаптоэтанол и свинца в растворе, адсорбция водорода платиновой пленкой [12, 45]. Адсорбция водорода платиной приводила к изменению поверхностного механического напряжения (до 0.4 Н/м) и соответственно к изгибу кантилевера. На другие газы, например CO_2 , кантилеверы с Pt-пленкой не реагируют, что позволяет говорить об избирательности сенсора. АСМ зонды с интегрированными пьезорезисторами могут быть использованы в качестве биохимических сенсоров, работающих в жидкости или газовой среде и измеряющих концентрацию молекул алкоголя [46].

Биосенсоры

Биосенсоры, выполненные на базе атомно-силовой микроскопии кантилеверов (The force amplified biological sensor – FABS), способны детектировать такие биологические объекты как клетки, белки, токсины и ДНК с низкой концентрацией 10^{-18} М. Результаты по детектированию взаимодействия антитело–антиген представлены в работе [12].

2. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МЕТРОЛОГИИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Использование атомно-силовой микроскопии как инструментального средства измерения и модификации поверхности требует детального изучения источников погрешностей и ошибок. Поскольку в атомно-силовой микроскопии имеет место алгоритмическое измерение (физическое и цифровое), то источниками погрешностей и ошибок являются аппаратная часть прибора и его программное обеспечение. Главный источник погрешностей и ошибок – это нелинейность преобразований в аппаратной части прибора (игла-образец, пьезосканер, информационный канал) и нелинейность, заложенная в числовых алгоритмах программного обеспечения микроскопа. В литературе ранее рассматривались нелинейные электрические свойства пьезокерамики с ее гистерезисом, который приводит к заметным искажениям горизонтальных размеров измеряемых структур. Для коррекции нелинейности пьезосканера атомно-силовой микроскопии предложены программные и аппаратные способы [48, 49]. Приборы Dimension производства компании Digital Instruments (США) сейчас оснащены следящими системами по латеральным перемещениям, независимым датчиком измерения нормальных перемещений, и имеют уникальную для этого класса приборов линейность (0.05%) на больших площадях сканирования. Для оценки точности размеров в различных режимах работы и совершенства острия предложены коммерческие калибровочные решетки [50]. Заметим, что задача повышения точности преобразования сигнала электронным каналом может быть кардинально решена путем применения сигнальных микропроцессоров.

В некоторых работах формирование числовой матрицы изображений при сканировании рассматривают как последовательное и одномерное преобразование в виде аналоговой и цифровой свертки. В [51] отмечается важный аспект определения проксимальной точки кончика иглы (точки самой близкой к поверхности), а именно во всех режимах работы атомно-силовой микроскопии существуют несколько проксимальных (или контактных) точек на зонде. Причем в процессе измерения рельефа эти точки блуждают с одной стороны зонда к другой, что приводит к геометрическому наложению изображений одной и той же формы зонда. Это смещение, как отмечает Griffith, является нелинейным. Поэтому термин деконволюция в этом контексте неприменим, потому что свертка, по существу, является линейной операцией. Поэтому достоверность транс-

формант Фурье, используемых в программах деконволюции, является грубым приближением.

Другой принципиальный вопрос метрологии связан с тем, что при микроскопических измерениях действие шума преобладающее, и сигнальная часть замаскирована. Работающие в области микроскопии сталкиваются с проблемой – как разделить “перемешанные” данные (т.е. как реставрировать и улучшить данные сканирования, освободить их от смазывания, произвести псевдоинверсию свертки). Эта проблема общая и требует теоретического изучения. Ее решение осложняется явлением случайного шума, который неизбежно добавляется к данным в самом процессе измерения. Понятно, что шум является существенным компонентом, который искажает изображение. Однако если получаемые данные ограничены по полосе частот, идеальная реставрация в принципе не исключается. Количественно модель неразделимого линейного пространственно-инвариантного искажения была рассмотрена в работе [52].

Информационный канал атомно-силовой микроскопии включает ряд функциональных преобразований различных физических величин. Под информационным каналом понимается аналоговый канал, включающий датчик силы (кантилевер с иглой), сканер, канал обратной связи и цифровой канал, обеспечивающий передачу данных непосредственно в ЭВМ. В работе [53] была сделана попытка описания цифровой модели информационного канала в виде последовательного соединения цифровых фильтров (цифровых моделей аналоговых блоков микроскопа). При этом выделены звенья в структуре канала атомно-силовой микроскопии, вносящие максимальные погрешности и искажения. Осуществлено, также блочное моделирование аналогового и цифрового канала атомно-силовой микроскопии. Был проведен численный анализ точности и чувствительности канала, результаты которого могут быть использованы при модернизации микроскопа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отчетливо видна общая тенденция проектирования атомно-силовой микроскопии приборов и технологии в двух основных областях. Первая – представлена панорамным анализом изображений поверхности, а вторая – использованием атомно-силовой микроскопии как инструментального средства в технологии. Панорамный анализ поверхности – неотъемлемая часть проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. Приведенная в статье система параметров совместно с методами модификации поверхности позволяет провести эскизное проектирование при-

бора и технологии и может быть использована для сертификации поверхности в соответствии с действующими международными стандартами. В настоящее время в методе АСМ определяющее место занимает проблема разработки чувствительных элементов-сенсоров для зондов кантилеверов и разработка принципиально новых конструкций кантилеверов. Особенно мы хотели подчеркнуть разработку ID-кантилевера, функционирующего как интерференционная дифракционная решетка, в результате чего разрешающая способность микроскопа повышается на порядок до 0.01 Å. Последние достижения в области конструирования рядов параллельных пьезорезистивных кантилеверов позволяют надеяться, что в недалеком будущем в атомно-силовой микроскопии литографии будет решена проблема производительности для массового производства.

Настоящая работа выполнялась в рамках Государственной научно-технической программы "Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники".

Авторы выражают благодарность профессору А.А. Орликовскому за постановку задачи и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarid D. Exploring Scanning Probe Microscopy with Mathematica // New York: John Wiley & Sons, 1997, 262 p.
2. Володин А.П. Новое в сканирующей микроскопии (обзор материалов международной конференции STM'97) // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 6. С. 3–42.
3. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Конструктивные и электрофизические характеристики датчиков силы в атомно-силовой микроскопии // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 4. С. 304–316.
4. Stowe T.D., Yasumura K., Kenny T.W., Botkin D., Wago K., Rugar D. Attonewton force detection using ultrathin silicon cantilevers // Appl. Phys. 1997. V. 71. № 2. P. 288–290.
5. Tortorese M., Barrett R.C., Quate C.F. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection // Appl. Phys. 1993. V. 62. № 8. P. 834–836.
6. Itoh T., Suga T. Scanning force microscope using a piezoelectric microcantilever // J. Vac. Sci. Technol. 1994. V. 12B. № 3. P. 1581–1585.
7. 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.
8. Minne S.C., Adams J.D., Yaralioglu G., Manalis S.R., Atalar A., Quate C.F. Centimeter scale atomic force microscope imaging and lithography // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 12. P. 1742–1744.
9. Indermühle P.-F., Schürmann G., Racine G.-A., de Rooij N.F. Fabrication and characterization of cantilevers with integrated sharp tips and piezoelectric elements for actuation and detection for parallel AFM applications // Sensors and Actuators. A. 1997. V. 60. № 1/3. P. 186–190.
10. Indermühle P.-F., Schürmann G., Racine G.-A., de Rooij N.F. Sharpening tip integrated on micro cantilevers with self-exciting piezoelectric sensor for parallel atomic force microscopy // Appl. Phys. 1997. V. 70. № 17. P. 2318–2320.
11. Hosaka S., Kokukawa A., Koyanagi H., Miyamoto M., Nakamura K., Etoh K. Challenge for SPM based ultrahigh density recording // STM-97. Abstracts booklet. P. 458.
12. Oden P.I., Thundat T., Warmack R.J. Chemical, physical and biological sensing: An alternative use of scanning probe microscopy cantilevers // STM'97. Abstracts booklet. P. 129.
13. Chu J., Itoh T., Lee Ch., Suga T. Novel high vacuum scanning force microscope using a piezoelectric cantilever and phase detection method // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15B. № 4. P. 1551.
14. Chu J., Itoh T., Lee Ch., Suga T., Watanabe K. Frequency modulation detection high vacuum scanning force microscope with self-oscillating piezoelectric cantilever // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15B. № 4. P. 1647–1651.
15. Lee Ch., Itoh T., Ohashi T., Maeda R., Suga T. Development of a piezoelectric self-excitation and self-detection mechanism in PZT microcantilevers for dynamic scanning force microscope in liquid // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15B. № 4. P. 1559–1563.
16. Su Y., Evans A.G.R., Brunnschweiler A., Ensell G., Koch M. Fabrication of improved piezoresistive silicon cantilever probes for the atomic force microscope // Sensors and Actuators. A. 1997. V. 60. № 1/3. P. 163–167.
17. Ried R.P., Mamin H.J., Terris B.D., Fan L.S., Rugar D. 5 MHz Piezoresistive cantilevers with in-plane tips for AFM data storage // STM-97. Abstracts booklet. P. 458.
18. Gotszalk T., Grabiec P., Rangelow I. Piezoresistive sensor for scanning probe microscopy // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 13–14.
19. Harley J.A., Kenny T.W. Noise and sensitivity in ultrathin piezoresistive cantilevers // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 15.
20. Yaralioglu G.G., Atalar A., Manalis S.R., Quate C.F. Analysis and of an interdigital cantilever as a displacement sensor // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 12. P. 7405–7415.
21. Dai H., Hafner J.H., Rinzler A.G., Colbert D.T., Smalley R.E. Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy // Nature. 1996. V. 384. P. 147–150.

22. Hafner J.H., Cheung Ch.L., Lieber Ch.M. Growth of carbon nanotube AFM tips by chemical vapor deposition // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 14–15.
23. Wong S.S., Woolley A., Odom T.W., Cheung Ch.L., Liebel Ch.M. Single-walled carbon nanotube probes for high-resolution nanostructure imaging // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 23. P. 3465–3467.
24. Nagy G., Lewy M., Scarmozzino R., Osgood R.M., Dai H., Smalley R.E., Michaels C.A., Flynn G.W., McLane G.F. Carbon nanotube tipped atomic force microscopy for measurement of < 100 nm etch morphology on semiconductors // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 4. P. 529–531.
25. Wong S.S., Joselevich E., Woolley A., Odom T.W., Huang J.-L., Kim Ph., Vezenov D.V., Lieber Ch.M. Covalently functionalized nanotubes as nanometer-sized probes in chemistry and biology // Nature. 1998. V. 394. P. 52–55.
26. Wong S.S., Woolley A., Joselevich E., Cheung Ch.L., Lieber Ch.M. The power of carbon nanotube tips as novel AFM probes in chemistry and biology // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 48.
27. Quate C.F. The scanning probe microscopes: the first decade and future projections // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 34–35.
28. Dai H., Franklin N., Han J. Exploiting the properties of carbon nanotubes for nanolithography // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. № 11. P. 1508–1510.
29. Дедков Г.В., Рехвиашвили С.Ш. О формировании изображений в атомно-силовом микроскопе с зондом в виде нанотрубки // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Материалы докладов межд. Научно-техн. Семинара. М.: МЭИ. 1999. С. 117–122.
30. Shwarz U.D., Zwörner O., Köster P., Wiesendanger R. Preparation of probe tips with well-defined spherical apexes for quantitative scanning force spectroscopy // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15B. № 4. P. 1527–1530.
31. Hoummady M., Farnault E., Fujita H., Kawakatsu H., Masuzawa T. New technique for nanocantilever fabrication based on local electrochemical etching: Applications to scanning force microscopy // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15B. № 4. P. 1556–1558.
32. Garcia N., Levanyuk A.P., Minukov S.A., Binh V.T. Estimations of the characteristics of GHz range nanocantilevers: eigenfrequencies and quality factors // Surface Sci. 1995. V. 328. P. 337–342.
33. Thundat T., Oden P.I., Warmack R.J. Microcantilever Sensors // Microscale Thermophysical Engineering. 1997. V. 1. № 3. P. 185–199.
34. Oden P.I., Chen G.Y., Steele R.A. et al. Viscous drag measurement utilizing microfabricated cantilevers // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 26. P. 3814–3816.
35. Datskos P.G., Oden P.I., Thundat T. et al. Remote infrared radiation using piezoresistive cantilevers // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 20. P. 2986–2988.
36. Oden P.I., Datskos P.G., Thundat T., Warmack R.J. Uncooled infrared imaging a piezoresistive microcantilever // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 21. P. 3277–3279.
37. Datskos P.G., Rajlic S., Datskou I. Detection of photons using the electronic stress in metal semiconductor interfaces in MEMS devices // Seattl'99. Abstracts booklet. P. 7.
38. Thundat T., Sharp S.L., Fisher W.G., Warmack R.J., Wachter E.A. Micromechanical radiation dosimeter // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 12. P. 1563–1565.
39. Thundat T., Chen G.Y., Warmack R.J. et al. Vapor detection using resonating microcantilevers // Anal. Chem. 1995. V. 67. № 3. P. 519–521.
40. Wachter E.A., Thundat T. Micromechanical sensors for chemical and physical measurements // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 3662–3667.
41. Chen G.Y., Thundat T., Wachter E.A., Warmack R.J. Adsorption-induced surface stress and its effects on resonance frequency // Appl. Phys. 1995. V. 77. № 8. P. 3818.
42. Thundat T., Wachter E.A., Sharp S.L., Warmack R.J. Detection of mercury vapor using resonating cantilevers // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 13. P. 1695–1697.
43. Gurevich L., Canali L., Wildöer J., de Wit H., van Oudenarden A., Geerligs L., Kouwenhoven L. Mapping of electrostatic potential landscape using low-temperature scanning probes // STM'97. Abstracts booklet. P. 454.
44. Арутюнян В.М. Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. № 4. С. 337–355.
45. Baller M.K., Langa H.P., Battiston F.M., Fritz J., Berger R., Ramseyer J.-P., Fornaro P., Meyer E., Gunterodt H.-J., Drechsler U., Rothuizen H., Despont M., Vettiger P., Gerber Ch., Gimzewski J.K. A micromechanical artificial NOSE // Siettle'99. Abstracts booklet. P. 2–3.
46. Boisen A., Jensenius H., Thaysen J., Hansen O. Biochemical sensors based on micromachined cantilevers with integrated readout. // Siettle'99. Abstracts booklet. P. 5.
47. Baselt D.R., Lee G.U., Colton R.J. Biosensor based on force microscope technology // J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. 14B. № 2. P. 789–793.
48. Cidade G.A.G., Weissmüller G., Bisch M. A microcontroller-based system for piezoscanner nonlinearity correction: Atomic force microscope // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 69. № 10. P. 3593–3597.
49. Быков В.А., Иконников А.В., Кацур С.Н., Саунин С.А. Электроника и программное обеспечение универсальных сканирующих зондовых микроскопов НТ-МДТ // Материалы Всероссийского совещания “Зондовая микроскопия-99”. Нижний Новгород: Ин-т физики микроструктур РАН. 1999. С. 327–333.

50. Bykov V., Gologanov A., Shevyakov V. Test structure for SPM tip shape deconvolution // Appl. Phys. A. 1998. V. 66. № 5. P. 499–502.
51. Griffith J.E., Grigg D.A. Dimensional metrology with scanning probe microscopes // J. Appl. Phys. 1993. V. 79. № 9. P. R83–R109.
52. Гайнутдинов Р.В., Арутюнов П.А. Алгоритмическое представление методов восстановления изображений в АСМ. // LIV Научная сессия, посвященная дню радио. Москва, 1999. С. 34.
53. Шикин С.А., Щеглов Е.Г. Анализ точности информационного канала АСМ // LIV Научная сессия, посвященная дню радио. Москва, 1999. С. 35–36.