

12

Атомно-силовой/туннельный микроскоп и его применение для исследования диэлектрического пробоя алмазной пленки на кремнии

© А.В. Ермаков, В.К. Адамчук

Научно-исследовательский институт физики
С.-Петербургского государственного университета, Петродворец

Поступило в Редакцию 12 августа 1997 г.
В окончательной редакции 12 октября 1998 г.

Реализована простая конструкция атомно-силового микроскопа, где сила взаимодействия острия с поверхностью образца регистрируется непосредственно с помощью пьезокерамики X, Y, Z-манипулятора. Сигнал силы используется в качестве сигнала обратной связи при поддержании постоянным промежутка острие-поверхность, при этом одновременно регистрируется его электропроводность.

Приводятся результаты модификации электропроводности тонкой алмазной пленки после электрического пробоя.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) [1] и атомно-силовой микроскоп (АСМ) [2] в настоящее время получили признание как высокоэффективные средства для исследования поверхностных дефектов атомарного масштаба, однако каждый из них имеет свою, строго определенную сферу применения.

Туннельные микроскопы, обладающие пространственным разрешением порядка 1 \AA в плоскости образца и порядка 0.05 \AA по нормали к поверхности, показывают исключительно высокую чувствительность к точечным дефектам на поверхности [3,4]. Однако в основе принципа работы СТМ лежит условие электропроводности поверхности и наличие диэлектрических участков на поверхности полностью исключает возможность использования этого прибора.

Силовые микроскопы работают как на проводящих, так и на диэлектрических поверхностях, но чувствительны только к дефектам

существенно большего размера, чем точечные, например, таким как ступеньки и многоатомные вакансии [5,6].

В последние годы для решения конкретных задач физики, химии и техники реализовано большое количество различных конструкций СТМ и АСМ. В настоящей работе предложен принцип прибора, который может работать в режимах АСМ и СТМ, а также при сканировании в режиме АСМ позволяет производить регистрацию туннельного тока. Сила, возникающая между острием и поверхностью, регистрируется тем же пьезоманипулятором, который отслеживает Z , Y , X координаты. В реализованной на практике конструкции прибора острие закреплено непосредственно на пьезоманипуляторе и для регистрации малых сил взаимодействия острия с поверхностью используется электрический сигнал, возникающий в пьезоманипуляторе в результате воздействия силы.

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. В режиме АСМ прибор работает следующим образом. На пьезокерамическую пластину (ПП), на которой закреплен образец (О), с помощью генератора переменного напряжения (ГПН) подается частота основного механического резонанса пьезоманипулятора (ПМ), что вызывает малые колебания образца по оси Z . Вследствие колебаний величины зазора острие-образец возникает осциллирующая сила взаимодействия острия с поверхностью образца, причем чем меньше зазор образец-острие, тем больше сила взаимодействия и амплитуда осцилляции силы. Поскольку острие жестко закреплено на пьезоманипуляторе, осцилляция силы взаимодействия острие-образец вызывает механические колебания на резонансной частоте и электрический сигнал в пьезоманипуляторе (ПМ). Возникающий электрический сигнал далее выделяется трансформатором (Т) и передается в блок управления перемещением острия по оси Z (БУ). Блок управления в зависимости от поступающего сигнала вырабатывает и подает на ПМ напряжение низкой частоты (U_z), управляющее зазором острие-образец таким образом, что амплитуда колебаний переменного напряжения поддерживается постоянной при сканировании острия вдоль поверхности. В этом случае величина сигнала U_z отображает топографию поверхности. Поскольку сигнал, вырабатываемый пьезокерамикой (ПМ) на ее резонансной частоте, измеряется в цепи сигнала U_z , необходимо исключить частоты, близкие к резонансной частоте из сигнала U_z . С этой целью дополнительно к обычным компонентам типичной схемы обратной связи АСМ/СТМ (вычитание заданного уровня, интегратор

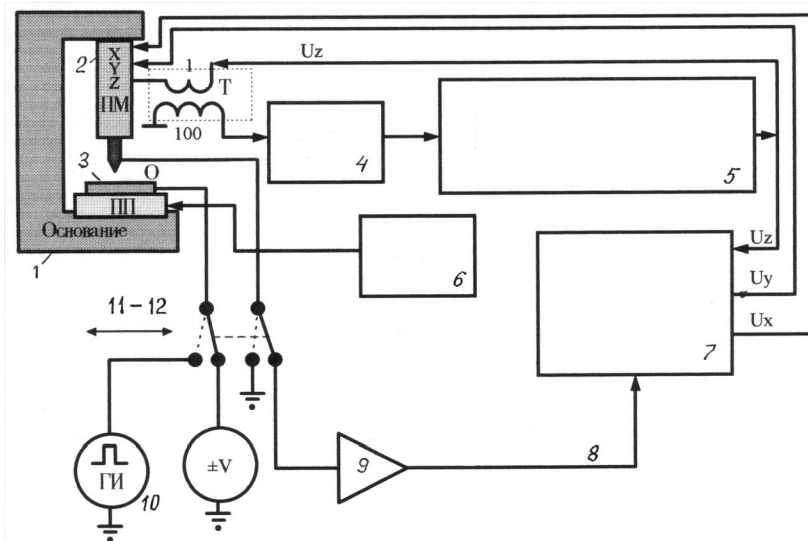


Рис. 1. Блок-схема прибора: 1 — основание, 2 — пьезоманипулятор, 3 — пьезокерамическая пластина, 4 — малозумящий селективный усилитель, 5 — блок управления перемещением Z, 6 — генератор переменного напряжения, 7 — компьютер, 8 — туннельный ток, 9 — усилитель туннельного тока, 10 — генератор импульсов, 11 — пробой, 12 — сканирующий туннельный микроскоп.

и высоковольтный усилитель). Блок управления (рис. 2) содержит фильтр нижних частот восьмого порядка с частотой среза 2 kHz, а также использован двухполупериодный амплитудный детектор, который позволяет подавить на несколько порядков выходной сигнал на резонансной частоте. С целью выделения сигнала резонансной частоты на фоне низкочастотного сигнала U_z полоса пропускания МСУ ограничена полосовым фильтром шестого порядка в пределах 20–30 kHz.

Перемещение острия по координатам X и Y осуществляется по программе с помощью компьютера. Одновременно со сканированием в режиме АСМ можно производить регистрацию туннельного тока. Для этого на образец подается напряжение с источника (V). При прохождении острия над электропроводными участками возникает туннельный ток, который передается в компьютер, и на основе этого вырабатывается

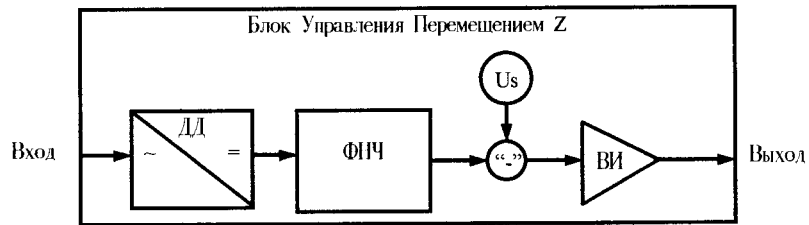


Рис. 2. Блок-схема блока управления: ДД — двухполупериодный детектор, ФНЧ — фильтр нижних частот, U_s — источник образцового напряжения, “-” — схема вычитания, ВИ — высоковольтный интегратор.

изображение. Следует заметить, что данное изображение будет отличаться от изображения, полученного в традиционной конструкции СТМ, так как в обратной связи использован не сигнал туннельного тока, а сигнал силы. Это позволяет одновременно регистрировать поверхности (через сигнал силы) и неоднородности электропроводности. Если сигнал туннельного тока подать в блок управления перемещением по Z , который будет поддерживать зазор острие-образец таким образом, что туннельный ток остается постоянным, прибор будет работать как СТМ.

Пьезокерамическая пластина ПП, на которой закреплен образец, изготовлена из пьезокерамики ПКР-6. Она имеет толщину 2 mm и ее пьезомодуль составляет 2.5 \AA/V . В качестве пьезоманипулятора ПМ использован стержень крестообразного сечения длиной 90 mm, изготовленный из пьезокерамики ПКР-7М. Частота основного продольного резонанса равна 25 kHz. Согласно спецификации пьезокерамики марки ПКР-7М, чувствительность к силе на резонансной частоте составляет 2 V/N . Напряжение электрических шумов, приведенное ко входу трансформатора Т, не превышает 5 nV, что соответствует амплитуде колебаний силы $2.5 \cdot 10^{-9} \text{ N}$. Максимальное поле сканирования составляет $200 \times 200 \text{ \mu m}$.

Прибор был использован для модификации тонкой алмазной пленки посредством диэлектрического пробоя и исследования полученной поверхностной структуры. В данном эксперименте нами были использованы кремниевые пластины толщиной 0.2 mm с нанесенной на их поверхность алмазной пленкой толщиной 200 \AA . Проводимость исходной пленки по всей сканируемой площади отсутствовала.

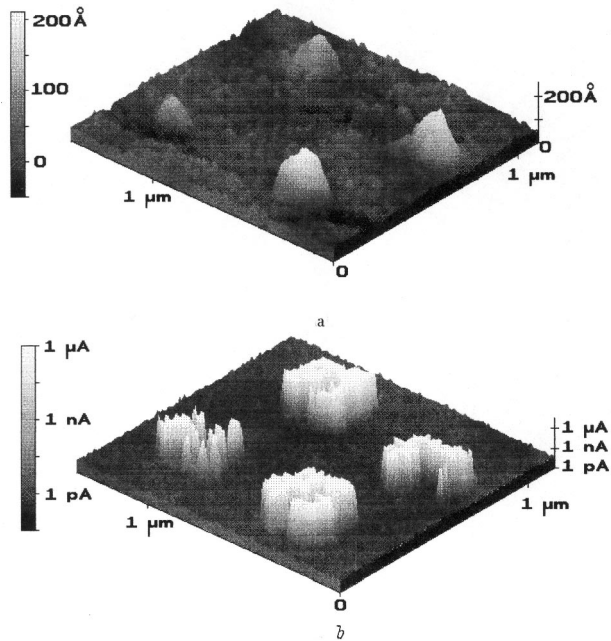


Рис. 3. Результат локального диэлектрического пробоя алмазной пленки.

Для осуществления диэлектрического пробоя образец подключался к генератору импульсов, а острие заземлялось. Мы использовали вольфрамовое острие, изготовленное с помощью электрохимического травления. Радиус острия, определенный с помощью электронного микроскопа, составлял $\sim 0.3 \mu\text{m}$. Зазор между образцом и острием соответствовал силе $\sim 10^{-8} \text{ N}$. Путем воздействия на образец электрическими импульсами различной амплитуды и длительности с последующим контролем проводимости алмазной пленки на данном участке было установлено, что пороговое напряжение пробоя составляет 60 V , что соответствует напряженности поля $3 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$. Длительность импульсов варьировалась в пределах $0.1\text{--}10 \mu\text{s}$.

С помощью электронного микроскопа было установлено, что форма острия практически не изменяется во время пробоя и оно может быть использовано впоследствии для сканирования образца.

На рис. 3, *a* приведено изображение, полученное в режиме атомно-силового сканирования участка с диэлектрическими пробоями в четырех местах. Более светлые участки изображения соответствуют большей высоте. Из рисунка видно, что в местах пробоя появились выпуклости высотой $\sim 100 \text{ \AA}$ и с максимальным размером $\sim 800 \text{ \AA}$ в плоскости $X-Y$.

На рис. 3, *b* приведено распределение туннельного тока, измеренного одновременно со сканированием профиля, показанного на рис. 3, *a*. Из рис. 3, *b* видно, что в местах пробоя появилась электропроводная фаза. Более светлые участки изображения соответствуют большей проводимости. Размер проводящих участков, как видно из рисунков, существенно больше размеров выпуклостей, образовавшихся в местах пробоя. Исследуемый участок образца многократно сканировался в течение 12 дней. Полученные изображения показали хорошую воспроизводимость, что говорит о том, что полученные структуры стабильны и процесс сканирования не разрушает поверхность исследуемого образца.

Предложенная конструкция прибора существенно проще традиционной конструкции АСМ, так как исключает необходимость использования микропружины и устройств для измерения ее отклонения. Кроме того, закрепление острия непосредственно на пьезоманипуляторе устраняет нестабильное поведение острия на пружине при определенных расстояниях острие–образец [7] и позволяет устанавливать любое заданное расстояние острие–образец, что делает возможным одновременную регистрацию туннельного тока.

Работа выполнена в рамках Российской государственной программы "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники" (проект № 039.04.223/57/2–3/1–95) и Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки" (проект № 32642).

Список литературы

- [1] *Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel* // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. N 1. P. 57–68.
- [2] *Binnig G., Quate S.F., Gerber Ch.* // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. N 9. P. 930–933.
- [3] *Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibe E.* // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 50. N 2. P. 120–123.
- [4] *Hahn J.R., Kang H.* // Phys. Rev. B. V. 53. N 4. P. R1725–1728.

- [5] *Binnig G., Gerber Ch., Stoll E., Albrecht T.R., Quate C.F.* // *Europhys. Lett.* 1987. V. 3. N 12. P. 1281–1286.
- [6] *Nickolayev O., Petrenko V.F.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1994. B12(4). P. 2443–2450.
- [7] *Sarid Dror, Ellings Virgil* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1991. B 9. N 2. P. 431–437.