

УДК 621.315

М. Г. Азарян, академик В. М. Арутюнян

О возможности создания режима ближнего поля для наноисследований в электронике

(Представлено 10/V 2006)

Ключевые слова: нанотехнология, зондовая микроскопия, ближнее поле, наномасштабный зазор

Нанотехнологиям и нанофизическим исследованиям сегодня уделяется большое внимание. Лидерами являются, как правило, высокоразвитые страны, имеющие большой экономический и научно-технический потенциал. Это связано со сложностью технологической оснастки, наличием и востребованностью специалистов высокой квалификации, большими инвестициями.

Нанотехнология определяется как "...совокупность способов и приемов создания функциональных элементов нанометровых размеров на поверхности подложек, в том числе из отдельных молекул и атомов, с возможностью одновременной их визуализации и контроля" [1]. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [2-4] в значительной степени удовлетворяет приведенному определению, и именно она предоставляет и другой путь участия в наноисследованиях. Этот путь предполагает привлечение более дешевой техники, не требующей специальных помещений для технологических операций и многочисленного высококвалифицированного персонала.

Принцип работы СЗМ позволяет манипулировать нано- и субнано объектами и создавать их, локально активизировать химические реакции, например, производить операции окисления или травления и организовывать атомномасштабную архитектуру на поверхности материалов твердотельной электроники [1- 3].

Физика наномасштабных элементов диктует специфику инструментов для наноисследований. Пример этого - СЗМ.

Принципы работы зондовой микроскопии требуют создания наномасштабного зазора игла-поверхность, в котором основную роль начинают играть и зависимости считываемого (конкретным видом микроскопа) сигнала от величины этого зазора. Эту ситуацию можно назвать режимом ближнего поля. В технике СЗМ такой зазор достигается применением специально сконструированных прецизионных двигателей. Кроме того, в микроскопии необходима организация X,Y-сканирования и одновременного поддержания устойчивого сигнала обратной связи, обеспечивающего этот "штатный режим" работы. Требуется и специальное программное обеспечение как для управления работой микроскопа, так и последующей обработки полученных данных.

В то же время из многих научных публикаций, посвященных зондово-микроскопическим исследованиям, следует, что научно-практический интерес могут представлять как сам зазор зонд-поверхность, являясь наномасштабной конфигурацией, так и отдельные узлы этих

устройств [5-7].

Несмотря на значительный прогресс в промышленном производстве СЗМ последние все еще остаются довольно дорогими приборами и далеко не каждая исследовательская организация имеет возможность его приобретения. Поэтому, как нам кажется, может быть востребовано предлагаемое простое и не дорогое устройство, легко реализующее режим "ближнего поля". Это позволит провести исследования как самого зазора, зависимости его поведения от разнообразных внешних факторов, так и предложить новые технические решения в зондовой микроскопии, адаптирующие прибор к конкретным исследовательским задачам.

Одним из возможных принципов для реализации подобного устройства - измерительного стенда наноразмерного зазора - является создание условия, при котором проявляется регистрируемый туннельный ток. Опыт создания лабораторного зондового микроскопа [8] и работы с ним подсказал, что использовать туннельный ток в качестве информативного сигнала в ближнеполевом режиме проще (нет необходимости в применении кантилевера и соответствующей техники измерения его отклонения) и зачастую нужнее (из-за появления возможности исследования и электрофизических свойств исследуемых объектов). Известно (например [2-4]), что туннельный ток (I_T) зависит от площади поперечного сечения S , "канала" для туннелирующих электронов, величины средней работы выхода материалов зонда и поверхности ($V_T = \phi_z + \phi_n/2$), напряжения зонд-поверхность U_{cm} и самого зазора между зондом и поверхностью H_T . Таким образом, комплекс этих измеряемых параметров такого туннельно-токового стенда может предоставить, например, информацию о качестве самого зонда, вольт-амперной характеристике H_T и ее отклика на процессы в нем. Сама система обратной связи, применяемая в технике поддержания режима ближнего поля, позволяет прямо измерять и размеры H_z [9].

Основными условиями для функционирования зондового микроскопа являются: организация прецизионного подвода (позиционирование) зонда к исследуемой поверхности (ИП) на столь малое расстояние, при котором начинают проявляться ближнеполевые эффекты; обеспечение отслеживающим позиционером поддержания ближнеполевого зазора - замыкающего звена в цепи обратной связи (ОС); X,Y-сканирование с устойчивым отслеживающим сигналом ОС; создание соответствующего программного обеспечения СЗМ.

Предлагаемое устройство не нуждается в сканировании, так как здесь отсутствует задача собственно микроскопирования, что значительно упрощает его техническое осуществление, а создание необходимого зазора достигается здесь отводом зонда, изначально находящегося в гальваническом контакте с проводящей поверхностью, на задаваемое расстояние (H_z). Востребованность в СЗМ технике специально разработанных микродвигателей позиционирования зонда (для достижения аналогичного рабочего зазора) в основном диктуется необходимостью сохранить латеральное (вдоль плоскости исследуемой поверхности) пространственное разрешение микроскопа, которое определяется также и радиусом кривизны кончика зонда-иглы (при соударении с исследуемым объектом (ИО) игла "притупляется"). Способом отвода значительно упрощается организация ближнеполевого режима, о создании которого информирует регистрируемое изменение природы тока контакта поверхность/зонд с проводящего ($I_{пр}$) на туннельный ток (I_T). Здесь применяется техника

отслеживания постоянства заданного порогового значения I_T , но с облегчением задачи стабилизации ОС (сканеры в стенде отсутствуют). На рис.1 представлена принципиальная блок-схема стенда, обеспечивающая туннельно-токовый контроль заданной величины зазора. При отводе поверхности ИО от зонда гальванический контакт зонд/поверхность обрывается, что приводит к крутому падению исходной величины тока, формируемого перестраиваемым напряжением $U_{см}$. Ток преобразуется в предварительном усилителе (ПУ) в напряжение U_T , поступающее на устройство отслеживания (УО). Оно измеряет спадающее U_T и, сравнивая с заданным пороговым $U_{п}$, выдает разностный сигнал Δ , формирующий управляющее ОС напряжение $U_{ОС}$ для исполнительного механизма (ИМ), корректирующего зазор H_T . ИМ представляет собой совмещение электромагнитного позиционера (ЭМП) с пьезокерамическим позиционером (ПКП). В используемом измерительном приборе одновременно наблюдается трансформация гальванического контакта в туннельный (поведение U_T) и формирование и изменение $U_{ОС}$. Помимо ручного, предусмотрено и компьютерное управление работой стенда (помимо регистрации U_T и $U_{ОС}$ задаются $U_{см}$ и пороговое напряжение - $U_{п}$).

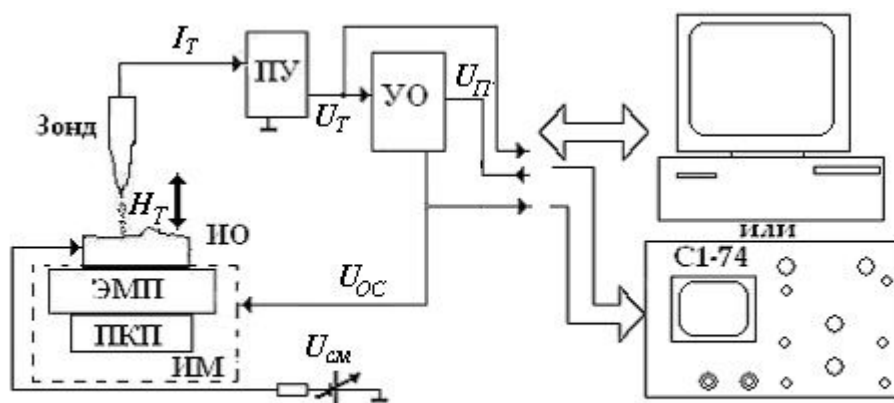


Рис. 1

На рис.2 приведена схема туннельно-токовой измерительной ячейки.

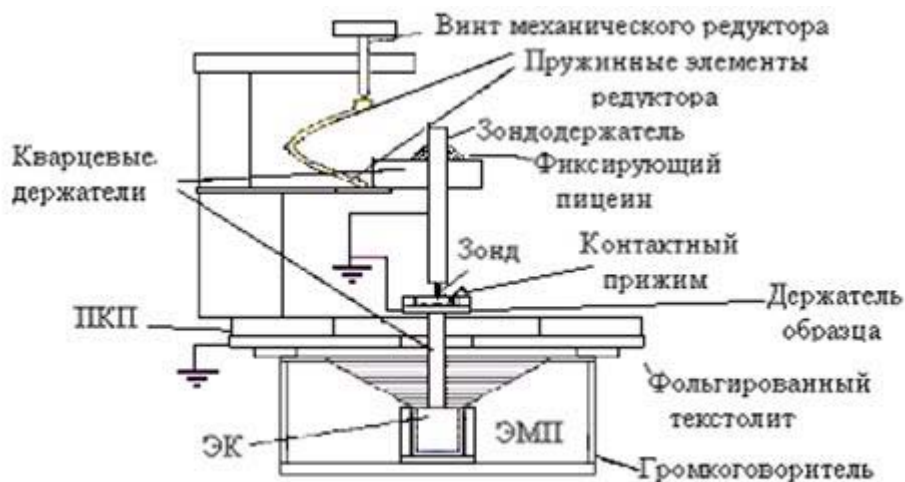


Рис. 2

Конструкция измерительной ячейки предполагает вертикальное расположение системы зонд/поверхность, что открывает возможности проведения исследований и в жидкой среде. Несущие детали конструкции изготовлены из кварцевого стекла (для сведения к минимуму теплового нарушения величины зазора). Корпус зондодержателя, снабженный микроразъемом на нижнем конце, может свободно перемещаться в отверстии кварцевого держателя. Зонд, будучи заземленным в никелевой трубочке, припаян к штырю. Штырь легко вставляется в микроразъем. В исходном положении зонд упирается в ИП. Этим же способом фиксируется и держатель образца. Такое простое крепление позволяет легко производить смену как зонда, так и ИО. Габариты ячейки разрешают при необходимости использовать и вибро- и звукоподавляющие системы.

Механизмы позиционирования - ЭМП, потребляющие относительно большие токи, проявляют тепловую нестабильность, но позволяют реализовать большой динамический диапазон перемещений. Не подверженный такому тепловому дрейфу ПКП имеет, однако, несравненно меньший диапазон перемещений и требует высоковольтное (до сотен вольт) управление. Использование ЭМ помимо расширения динамического диапазона Н-позиционирования позволяет исследовать особенности работы и самих исполнительных механизмов. Наличие независимого Н-привода предоставляет возможность и модуляции зазора в ближнеполевом режиме.

Для удобства и разносторонней проверки функционирования стенда в конструкции предусмотрен и механический редуктор, пружинные элементы которого изготовлены из полосок бериллиевой бронзы. Перемещающий винт редуктора вмонтирован в деталь из текстолита. Внешняя сторона держателя образца, изготовленного из фольгированного текстолита, заземлена. Прикладывание $U_{\text{см}}$ к ИП обеспечивается с помощью пружинящего контактного прижима.

В качестве ЭМП использован малогабаритный громкоговоритель. К его подвижной электрической катушке (ЭК) приклеена кварцевая трубочка, на которой крепится держатель образца. В конструкции держателя предусмотрена возможность погружения ИО в жидкую среду. Заземленный фольгированный текстолит призван экранировать от возможных помех от ЭМП чувствительный ПУ, подсоединенный к образцу.

ПУ стенда представляет собой стандартный преобразователь ток/напряжение, собранный на операционном усилителе TL081 и помещенный в экранирующий корпус. Управление ЭМП осуществляется через усилитель мощности (УМ) $U_{\text{ОС}}$ отслеживающего сигнала. Предусмотрена возможность суммирования с сигналом $U_{\text{ОС}}$ независимого регулируемого постоянного сигнала $U_{\text{р}}$, разрыва цепи ОС (перекл. I) и переключения направления действия ЭМП (перекл. II). В отдельный металлический корпус формирователя стендовых сигналов (ФСС) помещены ПУ, УМ и переключатель полярности с батареей (рис.3). ФСС подсоединяется к электронному блоку СТМ.

Он использовался нами для осуществления компьютерного управления U [10].

При необходимости Н-позиционирование может проводиться одновременно ЭМП и ПКП. Гальванический контакт зонда с ИП контролируется по величине входного тока при разомкнутой цепи ОС. Это положение зондодержателя в отверстии фиксируется пицеином. В качестве испытательного применялся зонд, электролитически сформированный из

этого не удавалось достичь только приложением сигнала ОС, зазор регулировался с помощью механического пружинного позиционера и U_p . Стенд снабжен разнообразными возможностями изменения конфигурации подключения электронных компонент измерительной схемы. Имеется достаточно широкое поле для дальнейших работ, как по усовершенствованию самого стенда, так и применению его непосредственно по назначению в исследованиях нанообъектов. Например, мы полагаем, что стенд может предоставить и возможность экспериментирования по контролируемому формированию в электролите (in situ) зондов СТМ.

Работа выполнена при поддержке Национальной программы по полупроводниковой наноэлектронике.

Ереванский государственный университет

Литература

1. *Неволин В. К.* Зондовые нанотехнологии в электронике. М. Мир. 2005. 152с.
2. *Эдельман В. С.* - ПТЭ. 1989. N5. С. 25-49.
3. *Быков В. А.* Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследований и модификации поверхностей. Докт. дис. М. 2000.
4. *Миронов В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. 110 с.
5. *Kuk Y., Sulverman P. J.* - Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60. N2. P. 165-180.
6. *Muralidharan G., Wig1 A., Pinnaduwege L. A., Hedden D. L., Datskos P. G., Thundat T., Lareau R. T.* - Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2002. V. 723. P. 681-685.
7. *Passiana A., Muralidharan G., Kouckekian S. K, Mehta A., Cherian S., Ferrell T. L. and Thundat T.* - Journal of Applied Puysics. 2002. V. 91. N71. April. P. 4693-4699.
8. *Azaryan M. H.* - Proc. of the third National Conf, Sevan. 2001. 10-12 September. P. 283-288.
9. *Васильев С. Ю., Денисов А. В.* - ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 1. С. 100-106.
10. *Azaryan M. H., Haroutyunyan V. M. et al.* - Proc. of conf. on "Educational, Scientific & Technological Appl. in LabVIEW Environments, and Technologies of National Instrum." Moscow. 2004.

Մ. Հ. Ազարյան, ակադեմիկոս Վ. Մ. Հարությունյան

**Էլեկտրոնիկայում նանոհետազոտություններ կատարելու նպատակով մոտիկ դաշտի ռեժիմ
ստեղծելու պարզ հնարավորության մասին**

Էքսպերիմենտալ նանոհետազոտություններ կատարելու համար առաջարկվում է թունել-լահոսանքային զոնդավորմամբ սարքավորման օգնությամբ մի պարզ և էժանագին մեթոդ, որտեղ իրագործվում է մոտիկ-կարգի դաշտերի ռեժիմ, երբ ի հայտ են գալիս զոնդ/հետազոտվող մակերևույթ նանոմասշտաբային բացակի օրինաչափությունները: Նախագծված և ստենդի տեսքով հավաքված սարքավորման նախնական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ դրանց օգնությամբ հնարավոր է լուծել ելակետային խնդիրը:

M. H. Azaryan, V. M. Haroutyunyan

**On the Simple Opportunity of Realizing Short-range Field Regime for
Nano-investigations in Electronics**

An idea of the simple and not expensive tunnel-current probe equipment is advanced. It offers the possibility of carrying out nano-investigations. The equipment realizes short-range field regime wherein the regularities of nanoscale probe/surface under study compliance come into play. The previous investigations of the developed-designed device in the desk form revealed that the initial goal can be attained using the advanced equipment.