

## ПОЛУЧЕНИЕ КАРТ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАТРИЦЫ PMMA НА Si С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

С.Д. АЛЕКПЕРОВ<sup>1</sup>, С.П. МОЛЧАНОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт Физики им. академика Г.М. Абдуллаева  
Национальной Академии наук Азербайджана,  
AZ-1143, Баку, пр.Г.Джавида,33*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
химический факультет,  
119992, Москва, Ленинские горы*

<sup>3</sup>*Институт физической химии и электрохимии Российской Академии наук,  
119071, Москва, Ленинский пр., 31*

Atom-qüvvə mikroskopiya metodu köməyi ilə Si səthin üstündə olan PMMA matrisanın relyefi və elektrik keçiricisinin xəritəsi təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, çoxparametrlı metod nəyinki səth topoqrafiyasında müxtəlif fazaların lokallaşmasına, həmçinin müxtəlif dərəcəli polyarizasiyası olan, səthdə olan obyekt və mater

С помощью метода атомно-силовой микроскопии получены рельеф поверхности и карта электропроводности матрицы PMMA на Si. Показано, что многопараметровый режим “MD-AFM” позволяет не только выделять различные фазы на топографии поверхности, но и идентифицировать объекты и материалы поверхности с разной степенью поляризуемости.

By means of a method of atomic-force microscopy the relief of a surface and a map conductivity matrix PMMA on Si are received. It is shown, that the multiparameter method “MD-AFM” allows not only to localize various phases on topography of a surface, but also to identify objects and materials of a surface with a different degree of polarizability.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что современные атомно-силовые микроскопы оснащены достаточно большим набором измерительных режимов, их практическое применение выявило ряд недостатков, ограничивающих возможности их эффективного использования [1,2]. Не все режимы обладают высокой разрешающей способностью (например, “tapping mode”, “non-contact mode”). Некоторые режимы эффективны только на “идеальных”, со структурно-морфологической точки зрения, образцах (например, “contact mode”). Предоставляемая информация не всегда достаточна из-за малого числа одновременно получаемых данных и часто трудно интерпретируема из-за зависимости результатов сразу от нескольких свойств образца. Необходимость многократного сканирования, обусловленная различными аппаратными реализациями разных режимов и использованием ими разных зондов, приводит к несовместимости данных друг с другом с точки зрения привязки к одной и той же точке поверхности и одного и того же времени измерения [3,4].

Разнообразие материалов, применяемых в различных новых технологиях и/или являющихся результатом этих технологий, ставит задачу по созданию универсальных методов исследования, обладающих широким практическим применением, высокой разрешающей способностью и позволяющих при этом достоверно определять различные локальные свойства исследуемых объектов [5-7]. С этой точки зрения, весьма перспективной является многопараметрическая методика “MD-AFM” исследования поверхности твердых тел различной природы, фазового состава и дисперсности, позволяющая одновременно картировать исследуемую поверхность по целому ряду характеризующих ее параметров [8-10]. Данная методика расширяет область применения атомно-силовой микроскопии, обеспечивая

при этом возможность получения многогранной информации о морфологии и характеристиках поверхности исследуемых объектов с высоким пространственным разрешением.

### 2. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА “MD-AFM”

Методика проведения атомно-силового эксперимента, позволяющая получать комплексную многопараметрическую информацию о состоянии поверхности исследуемого объекта, должна удовлетворять следующим основным требованиям: высокая разрешающая способность топографии поверхности; высокая стабильность процесса сканирования и воспроизводимость данных; исключение артефактов, обусловленных работой системы слежения и латеральным взаимным влиянием зонда и поверхности; регистрация в каждой точке поверхности образца максимально полного объема информации в разных условиях измерения и обеспечение сопоставимости всех получаемых параметров по времени и координатам; получение двумерных и трехмерных изображений (карт) различных параметров взаимодействия зонда с образцом и параметров образца; обеспечение простоты настройки параметров процесса измерения. Все перечисленные выше требования удается выполнить, если реализовать П-образную траекторию перемещения зонда в процессе сканирования. Это позволяет минимизировать латеральные силы, обеспечить измерения в контакте с поверхностью и регистрировать силовую кривую в каждой точке сканирования, выделяя ее характерные точки.

Получение данных о поверхности образца методом “MD-AFM” происходит следующим образом. Как обычно, зонд с заданным шагом сканирует выбранный участок поверхности. Но траектория зонда вертикальной

плоскости сильно отличается от траекторий в традиционных режимах атомно-силовой микроскопии [11]. Вначале острие зонда находится достаточно высоко над поверхностью, чтобы исключить любые взаимодействия зонда с поверхностью. Затем зонд начинает двигаться из этой позиции вниз к поверхности и останавливается после достижения контакта с ней. В этой стадии измеряются координаты топографии поверхности. Измерения проводятся при полном контакте с поверхностью, их разрешение сравнимо с разрешением режима “contact mode”. После завершения измерений зонд отодвигается от поверхности обратно на стартовую позицию. В конце цикла зонд перемещают в латеральном направлении к следующей точке. Отметим, что в данном случае нет трения, возникающего при латеральном движении, т.к. отсутствует контакт между зондом и поверхностью. Данные снимаются только когда зонд движется строго перпендикулярно к поверхности вниз-вверх, при этом исключается стирание и застревание зонда [12]. В целом, траектория движения зонда атомно-силового микроскопа в режиме “MD-AFM” очень напоминает траекторию движения иглы швейной машинки. Таким образом получаем информацию о топографии исследуемой поверхности.

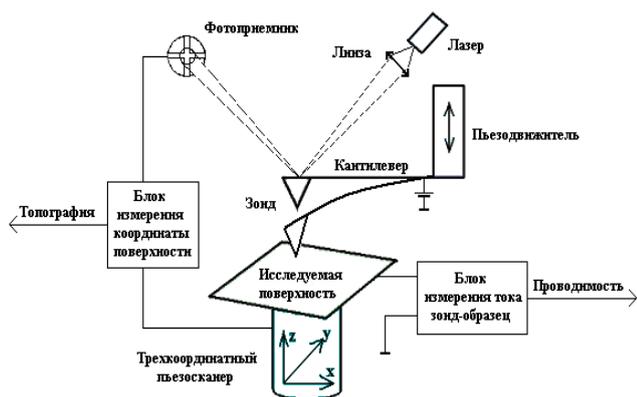


Рис. 1. Схема атомно-силового микроскопа для синхронного получения карт топографии и локальной электропроводности исследуемой поверхности.

Получение карт электропроводности является одним из режимов многопараметрической методики и совмещает в себе возможность измерения локальной проводимости поверхности с высоким разрешением атомно-силового микроскопа. Фактически это режим сканирующей резистивной микроскопии, обладающий по сравнению с другими методами измерения электропроводности следующими преимуществами [13]. Так, в режиме сканирующей резистивной микроскопии обеспечивается низкое давление на поверхность в месте контакта, точно контролируется сила взаимодействия зонда с поверхностью, а также обеспечивается высокое горизонтальное разрешение вдоль исследуемой поверхности, что позволяет измерять распределение локальной проводимости с разрешением атомно-силового микроскопа. Получение данных о локальной проводимости происходит синхронно с получением данных о топографии поверхности (все – в режиме “MD-

AFM”). Упрощенная схема эксперимента показана на Рис. 1. Здесь к атомно-силовому микроскопу добавляется система, обеспечивающая подачу на зонд постоянного потенциала и измеряющая протекающий при этом через контакт ток. При сканировании выбранного участка, после контакта острия зонда с поверхностью, измеряется координата поверхности в точке контакта, а также одновременно измеряется ток, протекающий через область контакта зонда с поверхностью. По току можно определить сопротивление контакта  $R$ , которое связано с удельным сопротивлением  $\rho$  и проводимостью  $\sigma$  исследуемой поверхности соотношением [14]  $R = \rho/4r$ , где  $R$  – сопротивление контакта,  $\rho$  – удельное сопротивление поверхности образца,  $r$  – радиус острия зонда. Поскольку радиус острия зонда во время сканирования не меняется, согласно этой формуле получаем распределение проводимости по поверхности материала. Важно отметить, что обе части микроскопа работают одновременно, осуществляя независимые измерения. Конечно, в этом случае необходимо использовать кантилеверы из проводящего материала, либо диэлектрические кантилеверы, но с проводящим покрытием. Таким образом, результатом являются два синхронно полученных изображения. На одном отображается рельеф поверхности исследуемого материала, на другом – карта распределения локальной проводимости поверхности.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве тестового образца была использована матрица РММА на Si, полученная следующим образом. На поверхности кремниевой пластины ( $\epsilon = 11$ ) был предварительно нанесен слой полиметилметакрилата (РММА) с  $\epsilon = 2$  и толщиной 100 нм. Затем производилась полимеризация РММА по шаблону методом электроннолучевой литографии и последующее травление неполимеризованной части РММА. В итоге на поверхности кремниевой пластины был создан рельеф из РММА в виде матрицы цилиндрических ячеек. После этого образец исследовался на атомно-силовом микроскопе, работающем в режиме “MD-AFM”. На Рис.2 показана топография поверхности, а рис. 3 изображает карту распределения электростатических сил. В эксперименте использовались стандартные зонды фирмы “Mikromasch” (серия NSC14) с проводящим покрытием из Cr-Au. Измерения проводились следующим образом. Во время сканирования в каждой точке исследуемой поверхности производилось снятие двух силовых кривых – в первом случае между зондом и кремниевой подложкой потенциал не подавался, а во втором случае на зонд подавался потенциал 1000 мВ. Фактически, в каждой точке измеряемого участка одновременно с определением координаты поверхности (т.е. топографии) определялись значения адгезионной силы. В случае отсутствия потенциала на зонде, сила адгезии обусловлена только силами Ван-дер-Ваальса и возможными капиллярными силами адсорбированных слоев воды (измерения проводились в нормальных условиях) [15]. При наличии потенциала на зонде, адгезионное взаимодействие, кроме этих сил также включает в себя и электростатические силы. Если теперь

из значения первого измерения вычесть значение второго измерения, то получим значение электростатической силы. В итоге, разность значений будет отражать только силу электростатического притяжения зонда и поверхности, вызванной подачей электрического потенциала. На карте электростатических сил (Рис. 3) явно видно значительно более сильное электростатическое взаимодействие зонда с кремнием, чем с РММА. Увеличение значения электростатической силы объясняется большей поляризационной способностью кремния в электрическом поле зонда по сравнению с полиметилметакрилатом. Следует отметить, что измеряемая электростатическая сила была обусловлена наведенными электростатическими зарядами, наличие которых создавалось путем подачи на зонд электрического потенциала и не зависела от его знака. Как известно, электростатическая сила, обусловленная так называемыми связанными электрическими зарядами, присутствующими на поверхности или внутри объема образца, зависит от знака потенциала на зонде и меняет направление при смене знака последнего, чего в данном эксперименте не наблюдалось.

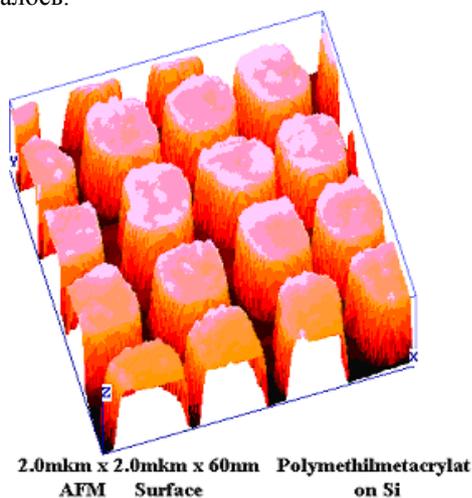


Рис. 2. Топография матрицы РММА на Si.

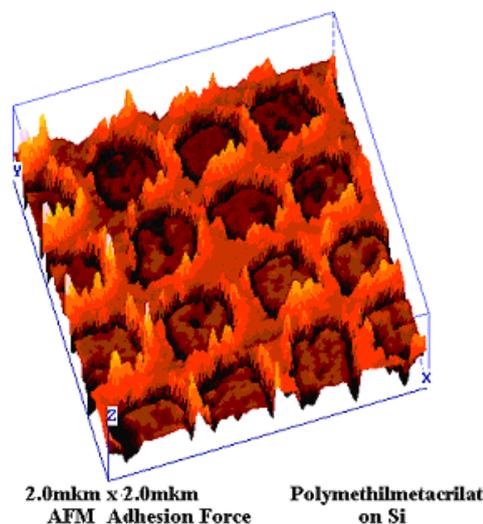


Рис. 3. Карта распределения электростатических сил.

Таким образом, эксперименты показали, что данная многопараметрическая методика “MD-AFM” особенно эффективна, когда исследуемая поверхность состоит из разных фаз, в частности, из электропроводной и диэлектрической. В этом случае, “MD-AFM” методика регистрирует наведенные электростатические силы, т.е. силы поляризации, зависящие от диэлектрической проницаемости материала поверхности и объектов на ней. А это позволяет, во-первых, получать топографию реальной поверхности, выделяя на ней разные фазы в соответствие с полученными картами характеристик (в данном случае – карта распределения электростатической силы), а, во-вторых, фиксируя разную степень поляризации, дает возможность идентифицировать различные материалы или объекты поверхности с разными электропроводящими свойствами.

- |   |   |
|---|---|
| <p>[1]. В.А. Быков. Микросистемная техника, 2000, № 1, с. 147-151.</p> <p>[2]. W.A. Lin, E.G. Karpov, H.S. Park. Nano mechanics and materials: theory, multiscale methods and applications, (Wiley), 2006.</p> <p>[3]. P. Grutter, W. Zimmermann-Edling, D. Brodbeck. Appl. Phys. Lett., 1992, v. 60, p. 2741-2746.</p> <p>[4]. Г.С. Батог, А.С. Батулин, В.С. Бормашов, Е.П. Шешин. Журнал технической физики, 2006, т. 76, вып. 8, с. 123-128.</p> <p>[5]. А.Л. Волынский, И.В. Яминский. Высокомолекулярные соединения, серия А, 2005, т. 47, № 6, с. 747-751.</p> <p>[6]. А.Я. Вуль, А.Г. Дидейкин и др. Письма в журнал технической физики, 2006, т. 32, вып. 13, с.12-15.</p> <p>[7]. К.Н. Романюк, С.А. Туйс, Б.З. Ольшанецкий. Физика твердого тела, 2006, т. 48, с. 1716-1720.</p> <p>[8]. С.П. Молчанов, В.В. Дремов, А.П. Кирпичников. Патент № 2145055, 2000, Российская Федерация.</p> | <p>[9]. S.P. Molchanov, V.V. Dremov, A.P. Kirpichnikov. US patent № 6776030 B1, 2007.</p> <p>[10]. С.П. Молчанов. Сборник статей НИИЖБ, 2003, с. 136-139.</p> <p>[11]. S.H. Abdullayeva, S.P. Molchanov, N.T. Mamedov, S.D. Alekperov. Physica Status Solidi (c), 2006, v. 3, no. 8, p. 2853-2857.</p> <p>[12]. S.P. Molchanov, I.A. Chernova-Kharaeva, S.H. Abdullayeva, S.D. Alekperov. Physica ANAS, 2005, v. XI, no.1-2, p. 56-58.</p> <p>[13]. Г.Б. Мешков, В.Ф. Иванов, И.В. Яминский. Высокомолекулярные соединения, серия Б, 2005, т. 47, № 11, с. 2060-2063.</p> <p>[14]. R.E. Thomson, J. Moreland. J. Vac. Sci. Technol. B, 1995, v. 13, № 3, p. 1123-1127.</p> <p>[15]. В.К. Кумыков, Х.М. Гукетлов, М.В. Гедгачова. Известия РАН, серия физическая, 2006, т. 70, с. 588-592.</p> |
|---|---|