

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 539.213(045)+681.2.08(045)

✉ : . edk\ , доктор технических наук, профессор;
Ижевский государственный технический университет, Россия
✉ < ;kh\gh\ , кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
В. G. KdlhphZ , аспирант;
Институт прикладной механики Уральского отделения РАН, Россия
bñhēZ ħ Bk cZ, кандидат технических наук, доцент;
BkkZ FmkkZ, кандидат технических наук, профессор
Дамасский университет, Сирия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СИТАЛЛА МЕТОДОМ ПОЛУКОНТАКТНОЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ*

Цитируемые источники: jamevlZlu bkkehZgby lñihēhñb ihjoghklb kblZeēhñc ihēhñb KL-50-1
ihke_ hačklby gZ g_ KH₂-eZajghñ baemqgby. Ihemqgu ljofigu_ bahJZgby k ihfhsvx
kdZgbjmxsñ ahghññ fbdjhkdhiZ Solver P47 Pro \ jbf_ ihemdñglZdlghc Zlhfgñ -kbehñc fbdjh -
kdhibb. ljhñ ZgZebaihemqgguo bahJZgbc .

Ключевые слова: ситалл, сканирующая зондовая микроскопия, топология поверхности

Современные технологии, нанотехнологии, лазерные технологии требуют оценки качества поверхности изделий. Под термином «качество» может пониматься шероховатость поверхности, ее профиль, твердость, однородность и другие характеристики, оцениваемые по различным методам и методикам. Шероховатость поверхности влияет как на прочностные, так и на различные процессы, связанные с дальнейшей обработкой материалов в машиностроении и микроэлектронике (например, производство микросхем, электроннолучевая и лазерная сварка металлов).

В настоящее время для исследования поверхности широкое распространение получает сканирующая зондовая микроскопия, имеющая большое количество методик. Топологию поверхности эффективно исследуют одной из методик зондовой микроскопии – атомно-силовой микроскопией. Такими исследованиями занимаются западные страны, имеющие большой потенциал в области лазерных и нанотехнологий. Но многие страны (Сирия, Китай, Чехия) эти методы используют незначительно ввиду отсутствия квалифицированных специалистов и приборов. Стажировка, подготовка специалистов, в том числе и зарубежных, в области сканирующей зондовой микроскопии ведется в Ижевском государственном техническом университете в центре коллективного пользования «Исследование наноматериалов» [1].

Методы получения информации о рельефе и свойствах поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) условно делят на две группы – контактные квазистатические и бесконтактные колебательные. Контактные АСМ-методики производятся при непосредственном механическом взаимодействии зонда с поверхностью, что часто приводит к поломке зондов и разрушению поверхности образцов в процессе сканирования. Чтобы избежать этого, используют колебательные

© Алексеев В. А., Бесогонов В. В., Скворцова И. Н., Або Исса Н., Мусса И., 2011

* Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт П2513).

АСМ-методики, существенно уменьшающие механическое воздействие зонда на поверхность в процессе сканирования. На рис. 1 приведен график зависимости силы взаимодействия кантилевера с поверхностью в зависимости от расстояния кантилевер – поверхность (линия 1) и колебаний кантилевера относительно точки z_0 (линия 2).

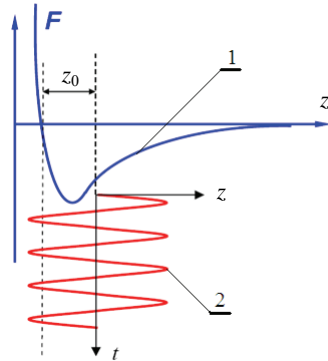


Рис. 1. Выбор рабочей точки при «полуконтактном» режиме колебаний кантилевера [2]

z_0 – расстояние между положением равновесия колеблющегося кантилевера и поверхностью. При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10–100 нм. Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца.

Кантилевер представим в виде упругой консоли (с жесткостью k) с сосредоточенной массой m на одном конце (рис. 2). Другой конец консоли закреплен на пьезовибраторе ПВ.

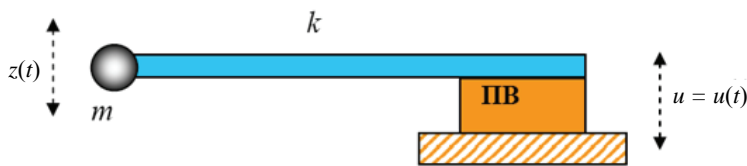


Рис. 2. Модель зондового датчика в виде упругой консоли с массой на конце [2]

При сканировании образца регистрируется изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера. Взаимодействие кантилевера с поверхностью в «полуконтактном» режиме состоит из ван-дер-ваальсового взаимодействия, к которому в момент касания добавляется упругая сила, действующая на кантилевер со стороны поверхности [2, 3]. При этих условиях уравнение движения кантилевера можно записать в следующем виде:

$$z + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \omega_0^2 (z(t) - z_0 - u_0 \cos(\omega t)) = \frac{\omega_0^2}{k} F_{PS}(z(t)), \quad [2]$$

где Q – параметр добротности системы $Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$, $F_{PS}(z(t))$ – (probe-sample) комбинированная сила взаимодействия кантилевера с поверхностью, координата z отсчитывается от поверхности, $u = u_0 \cos(\omega t)$ – гармонические колебания пьезовибратора с частотой ω , ω_0 – частота собственных колебаний кантилевера. «Полуконтактный» режим реализуется только тогда, когда расстояние z_0 меньше амплитуды колебаний кантилевера:

$$z_0 < Qu_0.$$

Амплитуда и фаза колебаний кантилевера зависят от степени взаимодействия поверхности и зонда в нижней точке колебаний кантилевера. Поскольку в нижней точке колебаний зонд механически взаимодействует с поверхностью, то на изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера в этом режиме существенное влияние оказывает локальная жесткость поверхности образцов.

Сдвиг по фазе между колебаниями возбуждающего пьезоэлектрического вибратора и установившимися колебаниями кантилевера можно оценить, если рассмотреть процесс диссипации энергии при взаимодействии зонда с образцом. При установившихся колебаниях энергия, приходящая в систему, в точности равна энергии, рассеиваемой системой. Энергия E_{EX} (external), поступающая в систему от пьезовибратора за период колебаний:

$$E_{EX} = \int_t^{\omega} k u_0 \cos(\omega t) \frac{dz}{dt} dt. \quad [2]$$

Она расходуется на восполнение потерь при взаимодействии кантилевера с атмосферой и образцом. Энергию E_{PA} (probe-atmosphere), рассеиваемую в атмосферу за период, можно вычислить следующим образом:

$$E_{PA} = \int_t^{\omega} \frac{m \omega_0}{Q} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 dt. \quad [2]$$

Энергия E_{PS} (probe-sample), идущая на восполнение потерь при диссипативном взаимодействии зонда с образцом, равна:

$$E_{PS} = \int_t^{\omega} F_{PS}(z) \frac{dz}{dt} dt. \quad [2]$$

Из условия баланса следует:

$$E_{EX} = E_{PA} + E_{PS}.$$

Предполагая, что установившиеся колебания кантилевера имеют вид $z = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, получаем:

$$E_{PS} = \frac{\pi k u_0 A}{Q} \sin \varphi - \frac{\pi k \omega A^2}{\omega_0 Q}.$$

Отсюда для фазового сдвига получается следующее выражение:

$$\sin \varphi = \frac{\omega A}{\omega_0 u_0} + \frac{QE_{ps}}{\pi k u_0 A}$$

Таким образом, фазовый сдвиг колебаний кантилевера в «полуконтактном» режиме определяется энергией диссипативного взаимодействия зонда с поверхностью образца.

Формирование АСМ изображения поверхности в режиме колебаний кантилевера происходит следующим образом. С помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте ω (близкой к резонансной частоте кантилевера) с амплитудой u_0 . При сканировании система обратной связи АСМ поддерживает постоянную амплитуду колебаний кантилевера на уровне A_0 , задаваемом оператором ($A_0 < u_0$). Напряжение в петле обратной связи (на z -электроде сканера) записывается в память компьютера в качестве АСМ изображения рельефа поверхности. Одновременно при сканировании образца в каждой точке регистрируется изменение фазы колебаний кантилевера, которое записывается в виде распределения фазового контраста.

В режиме полуконтактной АСМ микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Solver P47 PRO были исследованы ситалловые подложки СТ-50-1, обработанные лазерным излучением.

Аморфизация поверхности ситалла осуществлялась на лазере Trottec Speedy 100. Длина волны когерентного излучения $\lambda = 10,6$ мкм. Диаметр пучка в фокусе линзы 75 мкм, мощность пучка на образце 10 Вт, максимальное значение плотности мощности излучения на поверхности составляло $1,8 \times 10^9$ Вт/м². Интерфейс установки позволяет изменять плотность мощности и скорость перемещения пучка по поверхности от 0 до 100 %.

Размер области воздействия лазерного излучения на поверхности 3×10 мм и задавался в программе CogelDRAW. Образец помещался в фокусе линзы, и обработка поверхности производилась при перемещении лазерного пучка по поверхности с заданными значениями скорости перемещения пучка и его мощности. При этом максимальная скорость перемещения равна 280 см/сек.

При получении аморфной пленки на поверхности подложки поверхностный слой находится в напряженном состоянии. Причиной появления напряжений является различие объемов аморфной и поликристаллической части подложки, не подвергающейся воздействию излучения. Напряжения приводят к отслаиванию аморфизированного слоя от подложки. С целью релаксации напряжений в поверхностном слое и, как следствие, ликвидации отслаивания полученной пленки отработан процесс аморфизации при повышенной температуре. Подложка помещалась в специальный резистивный нагреватель и обрабатывалась лазерным излучением в нагретом состоянии.

На рис. 3–4 представлены сканы необработанной подложки и подложки, обработанной на CO₂-лазерной установке Speedy 100 при температуре 530 °С, 50 % мощности, 10 % от максимального значения скорости перемещения луча по поверхности, угол падения луча на поверхность равен 25°.

Работы по сканированию образцов в режиме атомно-силовой микроскопии выполнены совместно с сирийскими коллегами в рамках договора о сотрудничестве между ИжГТУ и Дамасским университетом.

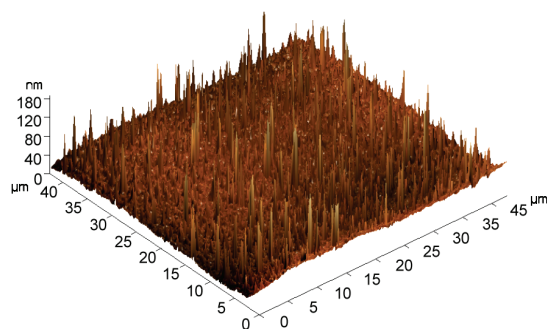


Рис. 3. Поверхность ситалла до воздействия лазерного излучения

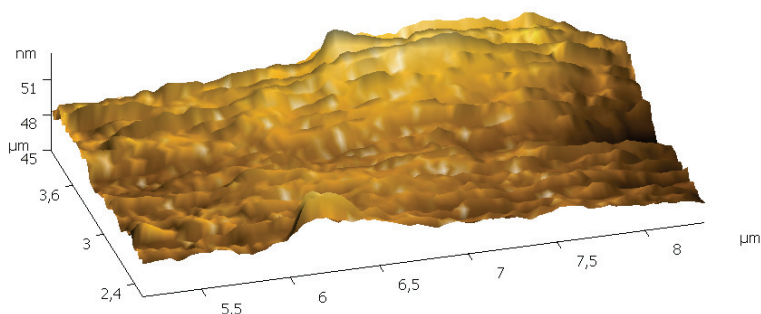


Рис. 4. Поверхность ситалла после воздействия лазерного излучения

Выводы

- Показано, что лазерное излучение позволяет изменить топологию поверхности ситалловой подложки таким образом, что величина выступов уменьшается до 6 нм.
- Экспериментально показано, что сканирующий зондовый микроскоп Solver P47 PRO позволяет исследовать топологию поверхностей, обработанных лазерным излучением, и оценивать ее шероховатость, что важно в задачах исследования воздействия лазерного излучения на материалы, а также выявления микротрещин и оценки применимости конструкций в изделиях, работающих в экстремальных условиях.

Список литературы

1. Ковалевский С. С., Ковалевский В. Г. Прецизионный контроль топологии поверхности ситалловых подложек СТ 50-1 // Измерит. техника. – 2010. – № 3. – С. 68–70.
2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие для вузов / Ин-т физики микроструктур РАН (Нижегород). – М. : Техносфера, 2004. – 144 с. – (Мир физики и техники). URL: <http://depositfiles.com/ru/files/26d6aiis0> (дата обращения: 29.04.2011).
3. Завьялов А. А., Завьялов В. В. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие. – Уфа : РИО БашГУ, 2003. – 82 с.

V. A. Alekseev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University
 V. V. Besogonov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, Institute of Applied Mechanics UB RAS

