

10;11;12

Метод контроля наноразмерной толщины бислойных пленочных наноструктур

© А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, О.М. Стукалов

УП „Завод Транзистор“ НПО „Интеграл“, Минск, Беларусь
Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск
E-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

Поступило в Редакцию 16 сентября 2002 г.

Описан экспресс-метод определения при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) наноразмерной толщины ультратонких одно- и бислойных пленок, осажденных на пористую, с гладкими участками между порами стеклянную подложку при наклонном угле падения потока напыляемого материала. При осаждении бислойных пленок вторая мишень устанавливается под углом на $10 \dots 15^\circ$ больше относительно подложки, чем первая. На АСМ-изображениях поверхности таких пленок отчетливо фиксируется положение границ кромка поры–пленка и верхний слой пленки–нижний слой пленки, что дает возможность оценить толщину пленки в целом, и каждого слоя в отдельности по высотам ступенек между кромкой поры и поверхностями слоев пленки на поперечном сечении рельефа поверхности.

Толщина является основным параметром тонких пленок. Стандартные методы прямого измерения толщины заключаются в определении разности высот между границами пленка–подложка и пленка–поверхность или пленка–пленка в случае многослойных структур. Для этого различными способами (например, раскалывания, царапания или травления) получают поперечное сечение пленочной структуры и анализируют при помощи микроскопов его изображение [1,2]. Такой подход сложно реализовать в случае слоев наноразмерной толщины, так как кроме определения положения границ на сечении требуется дополнительно учитывать влияние шероховатостей переходных областей на точность измерений [3]. С другой стороны, неравномерность заполнения впадин и выступов исходного рельефа на начальном этапе осаждения пленки вносит неопределенность в расчет наноразмерной толщины косвенными методами, например, по кривой зависимости толщины от времени, полученной для более толстых пленок [4]. В то же время известно, что для анализа нано- и субнаноразмерных неоднородностей

на рельефе поверхности успешно применяются методы атомно-силовой микроскопии [5]. В настоящей статье показано, что атомно-силовой микроскоп (АСМ) позволяет получить характерное поперечное сечение как однослойной, так и бислойной пленочной структур, которые осаждаются на поверхность, содержащую поры с резкими кромками и гладкие участки, свободные от пор. Контроль толщины слоев осуществляется по внешнему виду и высоте ступенек на сечении рельефа поверхности в области пор.

АСМ „Фемтоскан-001“ (Центр перспективных технологий, МГУ, Москва) с полем сканирования до $5 \times 5 \mu\text{m}$, работающий в контактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов, имеющих радиус закругления острия 10 nm , угол расхождения конуса 20° и длину $50 \mu\text{m}$ изготовления фирмы MicroMash (www.spmtips.com), использовался для анализа пленочных структур. Образцы получали на установке ионно-лучевого осаждения–распыления, описанной в [4,6]. При нанесении слоев металлов устанавливались соответствующие металлические мишени, а в качестве рабочего газа применялся аргон. Вторая мишень в случае осаждения бислойных структур устанавливалась относительно подложки под углом на $10 \dots 15^\circ$ больше, чем первая. Стеклопластинки типа „Плmglas“ размером $22 \times 22 \times 0.2 \text{ mm}$ использовались в качестве подложек. Характерный вид исходной поверхности пластинок показан на АСМ-изображении на рис. 1, *a* вместе с поперечным сечением рельефа вдоль линии. Видно, что поверхность является сплошной, а размах высот вдоль сечения на отдельных выступах достигает 16 nm . Далее поверхность пластинок планаризовалась перед осаждением пленок посредством облучения пучком ионов кислорода с плотностью тока 0.4 mA/cm^2 и энергией 0.6 keV в течение 40 min . В результате этого поверхность подложек приобретает характерный вид, показанный на рис. 1, *b*. Поверхность содержит определенное количество пор, отличающихся друг от друга по размерам и форме, и более гладкие, чем исходная поверхность, большие по площади участки, свободные от пор. Перепад высот на гладких участках поверхности не превышает 3 nm на пути длиной порядка $1 \mu\text{m}$ согласно сечению рельефа 1 вдоль прямой 1. Глубокие поры имеют резкую кромку, что видно на АСМ-изображении пор и подтверждается соответствующими изломами в окрестности пор на сечении рельефа вдоль линии 2. Формирование внешнего вида поверхности во время облучения происходит под действием двух факторов. Первый — распыление поверхностного слоя, в результате чего вскрываются места локального выхода на поверхность

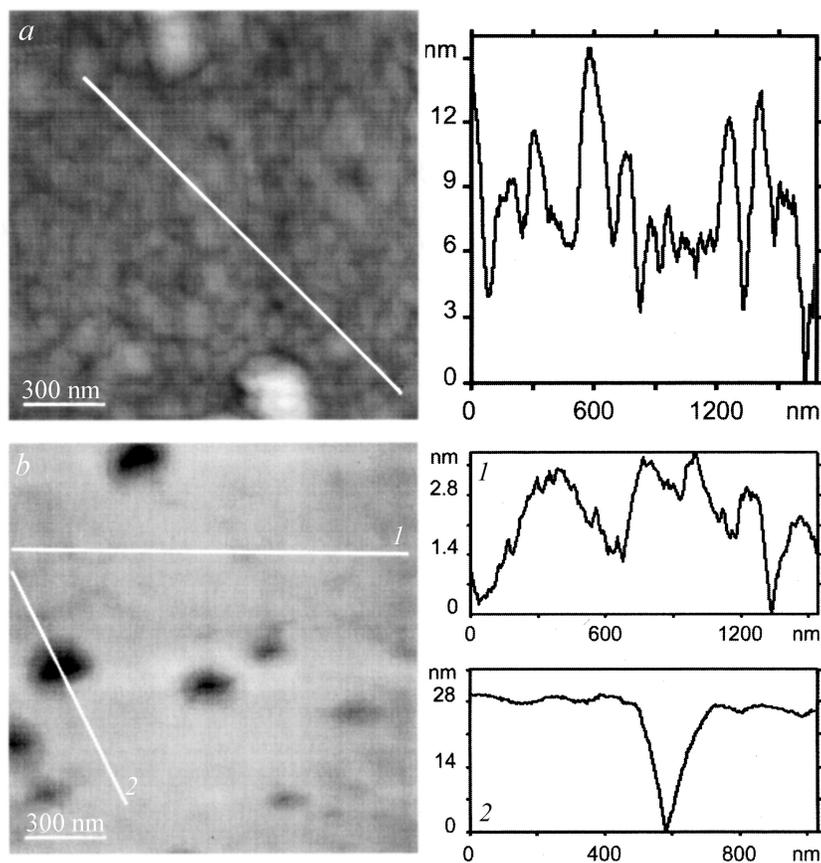


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности исходной стеклянной подложки (*a*) и пористой поверхности после ионно-лучевого распыления кислородом (*b*) и сечения рельефа поверхности, построенные вдоль соответствующих линий.

пузырей, которые естественным образом возникают в стекле на стадии изготовления, и образуются поры [7]. Исходная поверхность не содержит пор, так как в процессе предварительной обработки пластинок принимаются специальные меры для их „залечивания“ [7]. Вторым фактором — сглаживание исходного рельефа поверхности при длительном облучении пучком низкоэнергетических ионов кислорода [4,6].

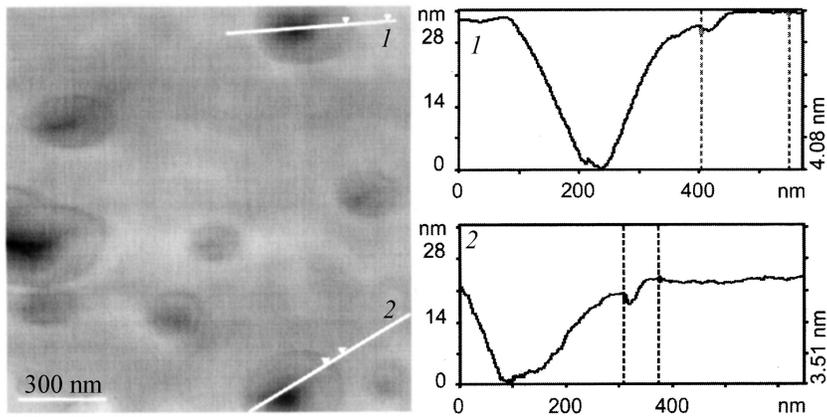


Рис. 2. АСМ-изображение пористой поверхности подложки вместе с анализируемой пленкой золота и сечения рельефа поверхности, построенные вдоль соответствующих линий.

На рис. 2 показано в качестве примера АСМ-изображение пленки золота, осажденной на подготовленную поверхность подложки. Сравнение рис. 1 и 2 показывает, что поры на рис. 1, *b* имеют более симметричный вид, чем на рис. 2, независимо от выбора направления сканирования зонда микроскопа. Дополнительные ступеньки на сечении рельефа в окрестности пор на рис. 2 по сравнению с рис. 1, *b* появились в результате осаждения пленки золота. Размеры ступенек существенно больше характерных размеров шероховатостей на свободных от пор участках поверхностей осажденной пленки и подложки. Высота ступенек составляет 3.6 ± 0.5 nm и мало зависит от направления линии, вдоль которой проведено сечение рельефа поверхности в окрестности пор. Ширина ступенек, наоборот, зависит от направления линии. На рис. 2 наиболее широкие ступеньки наблюдаются вдоль направления, задаваемого углом между линиями 1 и 2. Анализ геометрии расположения распыляемого материала в предположении его ориентации вдоль направления, задаваемого условием, что угол падения пучка ионов равен углу преимущественного выхода потока распыляемого материала в виде рупора расходящейся формы [8], показывает, что направление, задаваемое линиями 1 и 2, коррелирует

с направлением падения потока распыляемого материала на подложку. Отмеченные факты позволяют предположить, что ширина ступенек зависит от направления падения потока распыляемого материала, определяемого ориентацией подложки относительно мишени, а высота ступенек соответствует толщине пленки. Пленка золота, осажденная в аналогичных условиях, использовалась ранее как пассивный слой при исследовании интерфейса структуры кобальт–медь [9], где ее толщина оценивалась по времени нанесения и имела завышенное до 6 нм значение по сравнению с толщиной, измеренной по высоте ступеньки. Конечное число пор на рис. 2 позволяет повысить достоверность сопоставления высоты ступеньки с толщиной пленки путем анализа окрестностей пор различной формы и размеров.

На рис. 3 показано АСМ-изображение бислойной структуры никель–золото и сечения пор вдоль соответствующих линий. Рост толщины пленочной структуры отражается на более асимметричном виде пор по сравнению с рис. 1 и 2. Кроме того, на сечениях пор вдоль прямых 1–3 на рис. 3 присутствуют теперь две ступеньки общей высотой до 21 нм. Верхняя ступенька имеет максимальную высоту 15.1 нм вдоль линии 4 и минимальную высоту 12.2 нм вдоль линии 2. Высота нижней ступеньки составляет от 6.4 до 7.1 нм. Сечение более мелкой поры вдоль линии 4 имеет только одну ступеньку, предположительно из-за частичного заполнения мелких пор в процессе осаждения более толстых пленок. Анализ АСМ-изображения на рис. 3 позволяет сделать оценку толщины бислойной структуры. Суммарная толщина бислойной структуры не превышает 22 нм, толщина верхней пленки золота составляет от 12 до 14 нм, нижний слой никеля имеет толщину от 5 до 7 нм. Аналогичная бислойная структура никель–золото с промежуточным окислением слоя никеля наносилась на слой легированного магнием нитрида галлия с проводимостью *p*-типа. В результате был получен омический контакт с поверхностным сопротивлением $5\Omega/\square$ и прозрачностью более 40% в видимой области длин волн. Характеристики омического контакта были сопоставимы с приведенными в [10,11] контактами.

Следует отметить, что форма и разрешение ступенек определяется, прежде всего, углом между направлениями падения потока материала верхнего и нижнего слоев на подложку. Однако уже при анализе бислойной структуры материал верхнего слоя частично экранирует ступеньку от нижнего слоя на сечении поры из-за существования угла расхождения осаждаемого потока. Эта дополнительная погрешность

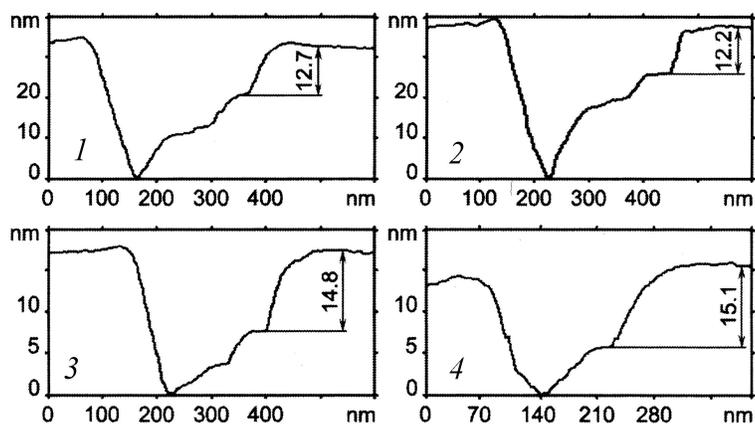
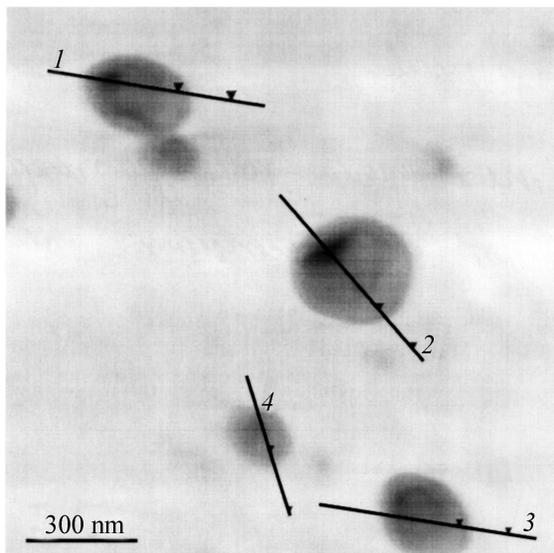


Рис. 3. АСМ-изображение пористой поверхности вместе с бислойной пленкой никель-золото и сечения рельефа поверхности, построенные вдоль соответствующих линий.

результата измерений может быть оценена при помощи анализа сечения вдоль разных направлений для бислойных структур различной толщины. Однако начиная с трехслойной структуры, верхний слой частично экранирует границы уже нескольких нижних слоев, из-за чего возникают проблемы с идентификацией положения границ слоев, если пользоваться только сечением рельефа пор.

Выражаем благодарность профессору К. Неиме — вице-президенту AIXTRON AG за предоставленные образцы нитрида галлия, профессору Г.П. Яблонскому и Е.В. Луценко из Института физики НАН Беларуси за дискуссии и результативную критику.

Работа получила частичную финансовую поддержку в рамках проекта В-176 ISTC.

Список литературы

- [1] *Feldman L.C., Mayer J.W.* Fundamentals of surface and thin films analysis. Elsevier Science Publishing, 1986.
- [2] *Wehner G.K.-B.* Methods of Surface Analysis / Ed. A.W. Czanderna, Elsevier, Amsterdam, 1975. (Методы анализа поверхности) / Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979.
- [3] *Smentkowski V.S.* // Progress in Surface Science. 2000. V. 64. P. 1–58.
- [4] *Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 1. С. 39–48.
- [5] *Bukharaev A.A., Nurgazizov N.I., Mozhanova A.A., Ovchinnikov D.Y.* // Surface Science. 2001. V. 482. N 5. P. 1319–1324.
- [6] *Стогний А.И., Свиринов В.Т., Тушина С.Д.* и др. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 151–154.
- [7] *Ходаков Г.С., Кудрявцева Н.Л.* Физико-химические основы полирования стекла. М.: Наука, 1985. 221 с.
- [8] *Thompson M.W.* // Nucl. Instr. And Methods in Phys. Res. 1987. В. 18. P. 411–429.
- [9] *Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.* // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. трудов XVIII Межд. школы-семинара. 24–28 июня 2002 г. Москва. С. 303–305.
- [10] *Sheu J.K., Su Y.K., Chi G.C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 16. P. 2340–2342.
- [11] *Jin-Kuo Ho, Chang-Shyang Jong, Chien C.Chiu* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 9. P. 1275–1277.