

10;11;12

О возможности неразрушающего послойного анализа многослойных структур из сверхтонких пленок с помощью ионов водорода низких энергий

© В.А. Курнаев, Н.Н. Трифонов, М.Н. Дроздов, Н.Н. Салащенко

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.

С помощью анализа энергетических спектров рассеянных ионов водорода экспериментально исследована возможность проведения неразрушающего контроля распределения состава многослойных структур.

Прогресс в области микро- и нанотехнологии характеризуется возрастающей важностью контроля параметров тонких и ультратонких слоев различного состава. Наиболее широко распространенным методом исследования их состава и профиля по глубине является послойный анализ различными методами (Оже-спектроскопия, ВИМС, спектроскопия рассеяния и атомов отдачи и другие) при распылении ионным пучком [1]. Однако разрешение по глубине при таком анализе не превышает 3 nm, при этом анализируемая область разрушается в принципе. Резерфордское обратное рассеяние может быть использовано для неразрушающего послойного анализа, однако необходимо применять дорогостоящие установки при невысоком разрешении по глубине. Использование легких ионов с энергиями в сотни keV позволяет повысить разрешение до 1 nm [2]. В данной работе мы представляем результаты исследования возможности применения для этих целей ионов водорода с энергиями в единицы keV.

Геометрия эксперимента показана на рис. 1. Использовался пучок молекулярных ионов дейтерия с энергией в диапазоне 9–15 keV и током 50–150 nA, степень моноэнергетичности пучка составляла 0.03, угловая расходимость 0.01 rad. Энергетические спектры рассеянных ионов регистрировались автоматизированным электростатическим анализатором.

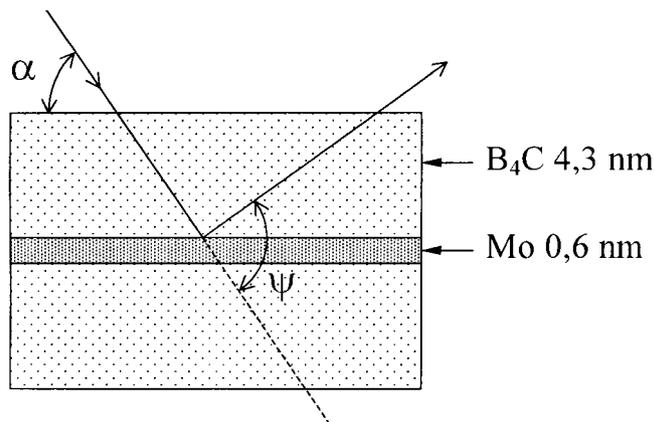


Рис. 1. Схема эксперимента.

ром секторного типа с разрешением по энергии 0.004 и светосилой $7.4 \cdot 10^{-4}$ sr. Анализатор можно было поворачивать на угол ψ относительно направления первичного пучка, остальные условия эксперимента соответствуют [3]. Мишень состояла из десяти чередующихся слоев В₄С и Мо толщиной соответственно 4.3 и 0.6 nm [4], результаты ее исследования методом послойного Оже-анализа приведены в работе [5].

На рис. 2 приведена высокоэнергетическая часть спектра дейтронов, рассеянных на угол 60° при облучении мишени пучком ионов с энергией 12 keV. Естественно предположить, что пик при энергии 3.3 keV соответствует частицам, отраженным от первого слоя Мо под поверхностью мишени. Для сравнения с результатами эксперимента и оптимизации возможных значений характерных углов и параметров пучка зондирующих частиц использовался компьютерный код SCATTER [3], качественно соответствующий известному коду парных соударений TRIM [6]. В качестве потенциала взаимодействия выбирался КгС-потенциал, неупругие потери энергии рассчитывались по формуле Оена–Робинсона с использованием правила Брегга для многокомпонентных мишеней [6]. Для моделирования каждого спектра рассчитывалось 10^7 траекторий. Приведенные на рис. 2 результаты расчетов показывают, что компьютерный код с хорошей точностью предсказывает положение пика на шкале

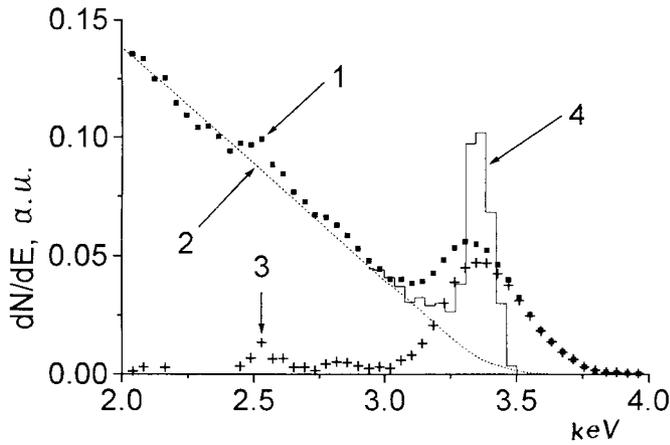


Рис. 2. Высокоэнергетическая часть спектра дейтронов, отраженных от многослойной V_4C/Mo мишени при облучении ионами D_3^+ с энергией 12 keV (угол скольжения 60° , угол рассеяния 60°): 1 — эксперимент, 2 — компьютерное моделирование для мишени из V_4C , 3 — разность спектров 1 и 2, 4 — компьютерное моделирование мишени из V_4C с одним слоем Mo толщиной 0.6 nm на глубине 4.3 nm.

энергий, но не его формы. (Следует отметить, что учет возможного влияния зависимости вероятности образования положительных ионов от энергии дает разницу в значении энергии пика не более 1 %).

Положение пика, определяемое наиболее вероятной потерей энергии ΔE , может быть также оценено из простой модели одного отклонения, обычно применяемой при анализе рассеяния ионов высоких энергий [6]:

$$\Delta E \approx kL \left\{ 1/\sin \alpha + 1/\sin(\psi - \alpha) \right\} E^{1/2} + \Delta E_{el}, \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности в зависимости неупругих потерь энергии от корня из энергии, L — толщина слоя V_4C , ΔE_{el} — потеря энергии при упругом соударении частицы с атомом Mo . Расчеты по этой простой формуле описывают, в частности, измеренную зависимость ΔE от угла рассеяния с относительной точностью на хуже 0.15.

Ошибку определения положения пика из экспериментального спектра можно оценить величиной ± 40 keV. Относительная точность в опре-

делении потерь энергии при этом составляет 0.07, что соответствует точности определения толщины слоя $V_4C \sim 0.3$ nm.

Положение пика на энергетической шкале, равно как и его относительная амплитуда, зависят от значения углов α и ψ , но влияние угла рассеяния ψ более существенно: с ростом ψ относительная высота пика над значением минимума в спектре возрастает, в то время как наиболее вероятная потеря энергии уменьшается, выходя на насыщение при $\psi > 90^\circ$. Изменение начальной энергии в указанных выше пределах существенным образом не влияет на точность определения параметров пика. Измерение положения пика для углов рассеяния $\psi < 50^\circ$ позволяет с большой точностью находить значение kL , а следовательно, определять толщину слоя, либо, при ее независимом измерении, находить тормозную способность вещества. Превышение ширины измеренного пика над расчетным может быть объяснено факторами, которые не учитывались при компьютерном моделировании, а именно: флуктуациями толщины слоя V_4C , а также возможным влиянием на энергетическое распределение частиц диссоциации первичных молекулярных ионов. Так как потери энергии частицами, отраженными от слоя молибдена, а также ширина сформированного ими пика оказываются малыми по сравнению с начальной энергией пучка, то, в принципе, возможно применить для анализа неоднородности по толщине первого слоя V_4C результаты работы [3], в которой решена задача определения ширины энергетического распределения частиц при прохождении тонкой свободной фольги в зависимости от различных факторов, включая флуктуации ее толщины.

Таким образом, в работе показано, что ионы водорода низких энергий могут быть успешно использованы для послойного анализа многослойных структур из сверхтонких пленок. Оценки возможного размытия слоя Mo за счет ионного перемешивания при ионной бомбардировке, выполненные при помощи той же программы SCATTER, подтвержденные также в экспериментах с большими дозами облучения, показывают, что необходимая для измерений доза 10^{14} cm $^{-2}$ практически не влияет на параметры слоя Mo. Простота реализации и дешевизна используемого оборудования позволяет предположить, что данный метод с успехом может быть использован и непосредственно в технологических установках для контроля процессов *in situ*.

Работа проводилась при частичной поддержке РФФИ (проект 96–02–19283).

Список литературы

- [1] Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 564 с.
- [2] Feurstein A., Grahmann H., Kabitzer S., Oestzman H. // Ion Beam Surface Layer Analysis / Eds. O. Meyer, G. Linker, F. Kappeler (Plenum Press. New York, 1975). P. 471.
- [3] Koborov N.N., Kuzovlev A.I., Kurnaev V.A., Remizovich V.S., Trifonov N.N. // Nucl. Instr. and Meth. 1977. В 129. P. 5.
- [4] Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Drozdov M.N., Polushkin N.I., Salashenko N.N. // Thin Solid Films. 1995. V. 263. P. 169.
- [5] Дроздов М.Н., Андреев С.С., Мастеров Д.В., Салащенко Н.Н., Шамов Е.А. // Поверхность. 1997. В. 11. С. 57.
- [6] Экишайн В. Компьютерное моделирование взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела. М.: Мир, 1995. 321 с.
- [7] Курнаев В.А., Машкова Е.С., Молчанов В.А. Рассеяние легких ионов поверхностью твердого тела. М.: Энергоатомиздат, 1985. 192 с.