

02;05;11;12

Особенности анализа слоистых структур с использованием ионного распыления

© А.А. Дорожкин, А.В. Филимонов, А.П. Коварский, Ю.А. Кудрявцев, Н.Н. Петров

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 18 апреля 1996 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования слоистых структур, образованных элементами с сильно различающимися атомными массами. Использовано ионное распыление с постиионизацией вторичных нейтралей в плазме газового разряда. Отмечено аномальное возрастание сигнала на границе раздела слоев. Высказано предположение о роли явления селективности распыления при измерении профилей выхода вторичных частиц.

Одной из наиболее распространенных методик послойного анализа материалов является ионное распыление с контролем состава дна кратера травления одним из известных методов элементного анализа поверхности: вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС), масс-спектрометрия ионизованных нейтральных частиц (ВНМС), электронная оже-спектроскопия (ЭОС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (ЭНХА) и т.д. [1]. Чаще используются первые два метода, поскольку состав распыляемых частиц в этих случаях независимо от возможности селективного распыления отражает объемные концентрации соответствующих элементов в приповерхностном слое твердого тела. При наличии селективного распыления состав поверхности изменяется таким образом, что скорость распыления различных компонентов оказывается пропорциональна их объемной концентрации [2].

Нами проводились систематические анализы слоистых структур методом постиионизации распыленных нейтралей (ВНМС). При этом на границе раздела слоев, состоящих из элементов с заметно различающимися массами, был обнаружен ряд нестандартных эффектов. В работе представлены результаты таких измерений, дается их интерпретация и оцениваются возможные проявления при анализе.

Измерения проводились по методике с постиионизацией распыленной нейтрали в плазме газового ВЧ разряда на установке INA-3 фирмы Leibold-Heagues. Исследуемые образцы облучались ионами Ar^+ с энергией 0.2–2 кэВ (размер пучка на мишени ≈ 1 мм). Распыленные нейтральные частицы после выхода из мишени попадали в область, где создавался ВЧ газовой разряд в аргоне, и там частично ионизовались, затем ускорялись и поступали в квадрупольный масс-анализатор ($M/\Delta M \approx 500$). Таким образом, измерялись масс-спектры вторичных нейтралей. Для измерения профилей распределения по глубине того или ионного элемента измерялись зависимости тока соответствующих ионов от времени облучения образца ионным пучком (время распыления). Обычно в наших условиях скорость распыления $\approx 3 \text{ \AA} \cdot \text{с}^{-1}$. Измерения могли вестись

одновременно по 6 элементам. В наших измерениях регистрировался выход одноатомных ионов элементов, образующих слоистую структуру. В качестве образцов использовались слоистые структуры, применяемые при изготовлении контактов в полупроводниковой электронике (Si/Pt, Au/Mo/Au/GaAs и др.). Известно, что для повышения качества контактов их готовят в виде слоистых структур. Образцы изготавливались термическим напылением металлических пленок на поверхность полупроводников и подвергались последующей обработке. Послойный анализ таких структур с целью установления особенностей распыления и был задачей работы.

На рис. 1 приведены результаты измерений для образца Si/Pt (первичные ионы Ar^+ с энергией 400 эВ). Для ионов Pt^+ наблюдается характерная для пленочных систем зависимость от времени: в начале сигнал Pt^+ практически не зависит от t , а на границе пленки резко падает практически до фонового уровня. Время спада определяется возможной диффузией Pt в Si и

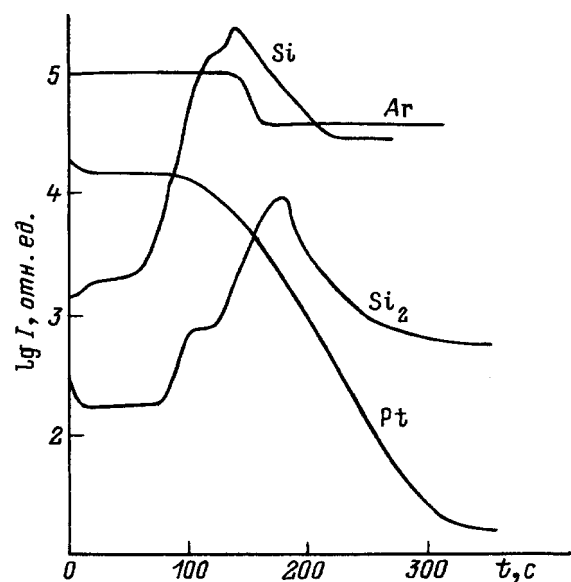


Рис. 1. Профиль распределения элементов в слоистой структуре Si/Pt. Первичные частицы — Ar^+ , $E_p = 400$ эВ.

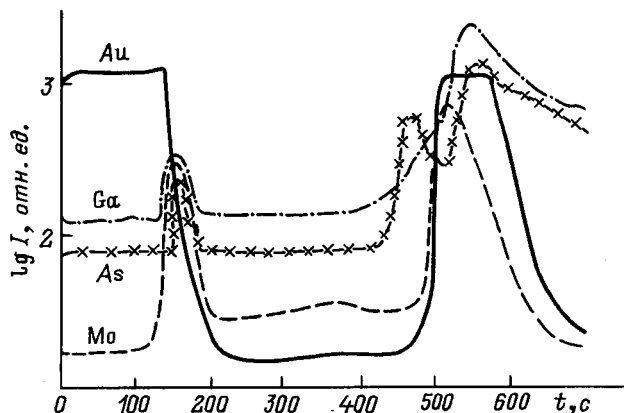


Рис. 2. Профиль распределения элементов в слоистой структуре Au/Mo/Au/GaAs. Первичные частицы — Ar⁺, E_p = 400 эВ.

разрешением метода по глубине. Для ионов Si⁺ и Si₂⁺ зависимость от времени оказалась несколько иной: в слое Pt сигналы невелики (на уровне фона), в слое Si они имеют постоянную величину, характерную для этого элемента. Но на границе раздела наблюдается максимум, в котором величина сигнала существенно выше, чем из Si, причем положение максимумов Si⁺ и Si₂⁺ не совпадает, а при внимательном рассмотрении на них можно выделить более тонкую структуру.

Аналогичные измерения были проведены для более сложной системы: на подложку GaAs напылялись пленки Mo и Au. Результат таких измерений представлен на рис. 2. Форма изменения сигнала Au⁺ от t соответствует профилю распределения этого элемента в структуре. Для Mo прослеживаются два максимума на границе с золотом, причем максимумы весьма значительные. Сходные аномалии наблюдаются для Ga⁺ и As⁺. Для этих элементов на границе с пленкой Au также наблюдаются максимумы, причем с той и другой стороны пленки золота.

На основании приведенных данных и результатов, полученных для ряда других образцов, можно выделить следующее общее правило. Измеряемые профили для более тяжелых элементов (Au, Pt) достаточно правильно отражают распределение этого элемента по глубине образца. Для легких элементов (Si, Ga, As, Mo) на границе раздела с тяжелыми наблюдаются максимумы, причем в ряде случаев величина аналитического сигнала в 5–8 раз выше, чем для соответствующего чистого элемента (Si, Ga, As, Mo). При увеличении энергии ионов до 2 кэВ отмеченный эффект ослабевал.

Очевидно, что наблюдаемый эффект невозможно объяснить аномально высокой концентрацией одного из элементов на границе раздела пленок. В отличие от ВИМС он не может быть связан с изменением степени ионизации вторичных частиц, поскольку последняя происходит в плазме, никоим образом не связанной с поверхностью. Поэтому единственным возможным объяснением оста-

ется увеличение скорости распыления легких элементов на границе раздела с тяжелыми элементами. Остается искать возможные причины в явлении селективного распыления.

Известно и нами также было показано [2], что при распылении смеси или соединения легких и тяжелых элементов, как правило, имеет место преимущественное распыление атомов более легкого элемента. Однако в результате изменения состава поверхности скорости распыления различных элементов устанавливаются пропорциональными их объемным концентрациям [3]. Этот процесс в принципе требует некоторого конечного времени установления и описывается уравнением типа

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j_0 S}{e N_0} n_{об} - \frac{j_0}{e} s_1 n,$$

решением которого является

$$n = \frac{S}{N_0} \frac{n_{об}}{s_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{j_0}{e} s_1 t\right) \right],$$

где

$$\tau = \left(\frac{j_0}{e} s_1\right)^{-1}$$

— характерное время установления равновесного состояния: j₀ — плотность тока первичного пучка; s₁ — вероятность распыления более легких атомов, находящегося непосредственно на поверхности.

Можно приближенно оценить эту величину, приняв σ ≈ 10⁻¹⁶ см². Соответственно τ ≈ 0.2–0.5 с. В случае обычного анализа элементного состава материала время начала измерений после включения ионного пучка заведомо превосходит τ, поэтому при таких измерениях селективного распыления и его вклада мы практически

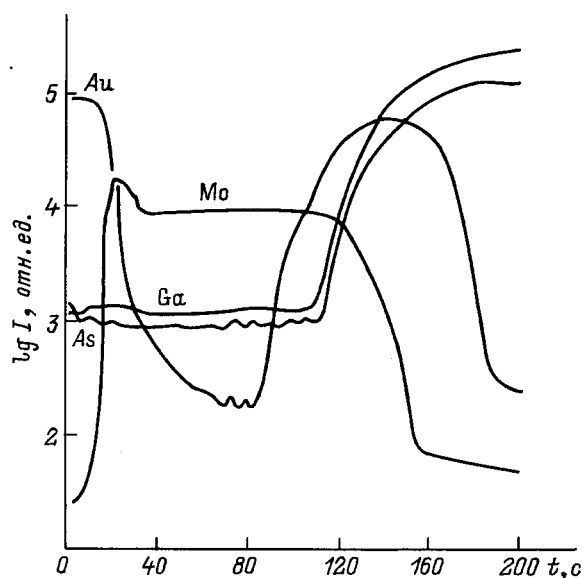


Рис. 3. Профиль распределения элементов в слоистой структуре Au/Mo/Au/GaAs. Первичные частицы — Ar⁺, E_p = 400 эВ. Скорость распыления уменьшена в 7 раз.

не замечаем. Иная ситуация возникает при анализе слоистых структур. Обычно на границе слоев в пределах сравнительно тонкого слоя ($\approx 10 \text{ \AA}$) происходит перемешивание компонентов из-за взаимной диффузии в ходе изготовления структуры и ее последующей обработки. Такие слои смешанного состава при распылении переходят сравнительно быстро и равновесные состояния установиться не успевают. Поэтому на границах слоев проявляется селективность распыления более легкой компоненты. Как показывает эксперимент, эта селективность может быть весьма значительной.

Зависимость от энергии ионов E_0 в определенной мере подтверждает это предположение: с ростом E_0 селективность распыления должна уменьшаться [3]. Кроме этого, нами были проведены измерения при уменьшении скорости распыления. Результаты для одного из образцов Au/Mo/Au/GaAs приведены на рис. 3 (скорость распыления уменьшена в 7 раз). В этом случае рассмотренный эффект почти исчезает.

Наблюдаемые эффекты должны проявляться и при использовании метода ВИМС. Однако в этом случае они налагаются на изменение аналитического сигнала, связанное с изменением коэффициента ионизации распыляемых частиц (которое может быть значительно выше), но учитывать это необходимо и в этом случае. Для обнаружения артефактов подобного рода можно использовать измерения при различных значениях j_0 .

Список литературы

- [1] Зандерна А. Методы анализа поверхностей. М.: Мир, 1979.
- [2] Dorozhkin A.A., Kovarsky A.P., Kudriavtsev Y., Yagodkina M. // Abstracts of SIMS IX. Yokohama, 1993.
- [3] Benninghoven A., Rudenauer F.G., Werner W. Secondary Ion Mass-spectrometry. J. Willey a.s., 1987.