

02;10;11

©1995

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ АЗОТА, ИМПЛАНТИРОВАННОГО В НИОБИЙ, НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

*В. П. Афанасьев, А. В. Лубенченко, С. Д. Федорович*

Задача измерения послойных профилей одного материала в другом возникает во множестве материаловедческих приложений. В настоящее время существует целый ряд методик, из которых наиболее подробную качественную информацию можно получить на основе вторично-ионной масс-спектрологии (SIMS) или Оже-спектрологии с послойным распылением. Одной из наиболее популярных количественных методик является обратное резерфордовское рассеяние (RBS). Предлагаемый в настоящей работе количественный метод основан на анализе энергетических спектров отраженных электронов (СОЭ) и обладает рядом преимуществ по сравнению с RBS. Спектры RBS по сравнению с энергетическими СОЭ обладают большей наглядностью потому, что определяются как атомными номерами компонент мишени, так и соотношениями масс образца и зонда, их интерпретация допустима в рамках относительно простой модели одного отклонения [1,2]. Однако глубина зондирования в RBS ограничена, не превышает нескольких тысяч ангстрем, пространственное разрешение составляет несколько десятков ангстрем, сигнал RBS практически не замечает наличия легкой примеси в тяжелой матрице. Метод, представляемый в настоящей работе, лишен отмеченных недостатков. Его реализация стала возможной с появлением адекватной теоретической интерпретации энергетических СОЭ [3-5] и надежных экспериментальных данных [3-5].

Как показано [3-5], энергетические СОЭ определяются параметром

$$\sigma^{**} = l_{in}/l_{tr}, \quad (1)$$

где  $l_{in} = (n\sigma_{in})^{-1}$ ,  $n$  — концентрация атомов мишени,  $\sigma_{in}$  — полное сечение однократного неупругого рассеяния,  $l_{tr} = (n\sigma_{tr})^{-1}$  — транспортный пробег.

В случае  $\sigma^{**} \ll 1$  происходит переход спектра в "купольный" режим и становится допустимым описание спектра в

терминах параметра  $\sigma^*$  [4,5].

$$\sigma^* = R_0/l_{tr}, \quad (2)$$

где  $R_0$  — полный пробег электрона [6].

Параметры  $\sigma^*$  и  $\sigma^{**}$  (1), (2) определяются энергией электрона и атомным номером мишени. Для однородных многокомпонентных стехиометрических мишеней установлено [7,8], что энергетический СОЭ в случае  $\sigma^{**} \ll 1$  однозначно связан со значением эффективного атомного номера мишени  $Z_{eff}$ , который определяется параметром  $\sigma^*$  и зависит от стехиометрии мишени [7,8].

На рис. 1 представлены энергетические СОЭ ниобиевой мишени, имплантированной азотом с дозой  $7 \times 10^{17}$  (пучек использованного для имплантации азота состоял из 33% атомарных и 67% молекулярных ионов, прошедших ускоряющее напряжение 35 кэВ). Для масштаба приведены спектры Cu и исходной Nb мишени, а также "сетка" спектров с  $29 < Z < 41$ , вычисленная на основе параметра  $\sigma^*$  (2)

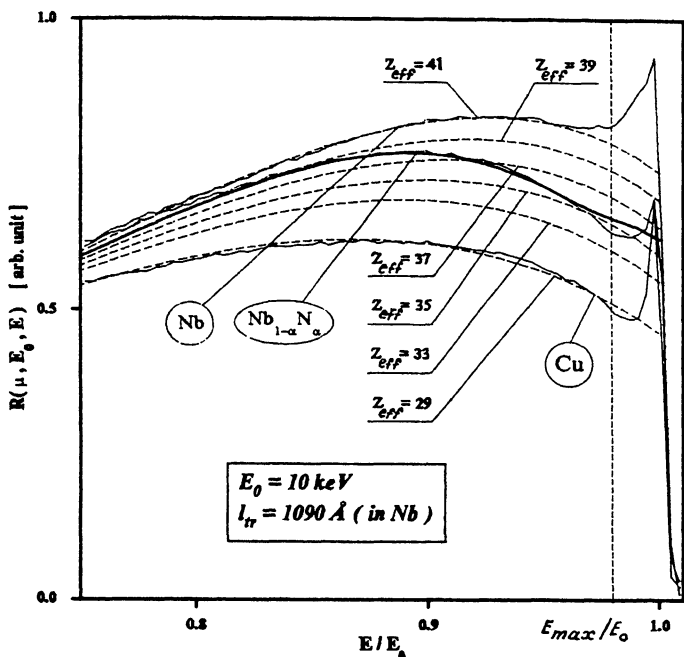


Рис. 1. Энергетические спектры отраженных электронов в случае нормального падения зондирующего отраженного пучка на мишень, угол отражения  $45^\circ$ . Сплошные тонкие кривые — эксперимент, пунктир — расчет на основе теории [9], жирная сплошная кривая — расчет для неоднородной мишени N в Nb на основе теории [10].

[9]. Нулевое приближение строится на основе модели одного отклонения: устанавливается однозначная связь между потерей энергии и глубиной выхода электрона из мишени  $d$  согласно выражению  $E = [\varepsilon(Z_{ef}, E_0) + \varepsilon(Z_{ef}, E)/\mu]d$  [1] (рассматривается случай нормального падения электронов на мишень,  $\mu$ -косинус угла отражения), величина  $\Delta E$ , соответствующая данному  $Z_{ef}$ , определяется по точкам пересечения спектра исследуемой мишени с сеткой (см. рис. 1). Затем по значениям  $Z_{ef}$  определяется стехиометрия  $Nb_{1-\alpha}N_\alpha$  и строится график  $\alpha(d)$ . Уточнение формы  $\alpha(d)$  выполняется на основе фиттинга: энергетический спектр вычисляется на основе теории отражения от слоистых мишеней [10] и вариацией  $\alpha(d)$  достигается совпадение расчетных и экспериментальных точек (см. рис. 1). Зависимость  $\alpha(d)$ , при которой достигается минимум функционала  $\int_0^{E_{max}} (R_{exp}(E) - R_{calc}(E))dE$  (см. рис. 1), будем называть измеренным профилем азота в ниобии.

Спектры, подобные представленным на рис. 1, можно снять в широком интервале энергий  $E_0$ , например на используемой для выполнения данной работы установке в интервале  $4 \leq E_0 \leq 32$  кэВ. Эффективная глубина зондирования при этом будет меняться в пределах  $250 \leq d \leq 6700$  Å, что позволит после выполнения сканирования мишени по глубине повысить точность измерения компонентного состава исследуемого образца. На рис. 2 представлен глубинный профиль азота  $\alpha(d)$  в исследуемом образце.

Представленная методика базировалась на параметре  $\sigma^*$  и не затрагивала область малых потерь энергии, ис-

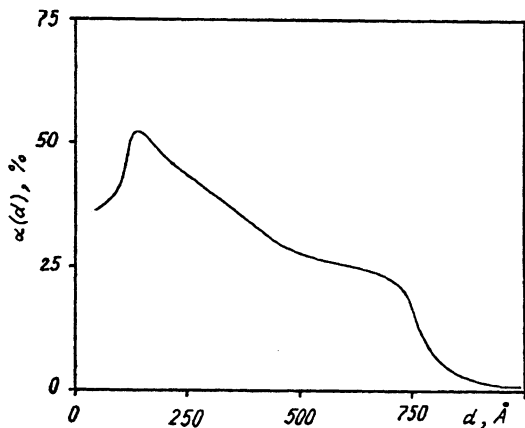


Рис. 2. Профиль концентрации N в Nb, расчет на основе измерений, представленных на рис. 1.

пользуемую в методе характеристических потерь энергии (ХПЭ). Использование информации, содержащейся в этой области спектра, даст возможность весьма детально определить компонентный состав мишени на глубинах порядка  $l_{in}$  на основе развития подхода, изложенного в работах [3-5]. Учитывая, что элементная база предлагаемого метода практически совпадает с установками, используемыми в Оже-спектроскопии, следует отметить, что их комбинация в одном стенде открывает широкие возможности для детального качественного и количественного исследования образцов.

### Список литературы

- [1] *Chi W.K., Mayer J.M., Nicolet M.A.* Backscattering spectroscopy. N. Y.: Academic Press, 1978. 384 p.
- [2] *Mashkova E.S., Molchanov V.A.* Medium-Energy Ion Reflection from Solids. Amsterdam: North Holland, 1985. 422 p.
- [3] *Афанасьев В.П., Федорович С.Д., Есимов М.С., Лубенченко А.В., Рыжов А.А.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. С. 180-184.
- [4] *Афанасьев В.П., Федорович С.Л., Рыжов А.А.* // Изв. АН. Сер. физ. 1994. Т. 58. С. 32-36.
- [5] *Afanas'ev V.P., Fedorovich S.D., Lubenchenko A.V., Ryjov A.A., Esimov M.S.* // Z. Phys. B. 1994. V. 96. P. 253-261.
- [6] *Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И.* Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах. М.: Атомиздат, 1980. 272 с.
- [7] *Тилинин И.С., Мамонов М.Н.* // Сб. научн. трудов № 153. М.: МЭИ, 1988. С. 70-74.
- [8] *Афанасьев В.П., Науекс Д., Федорович С.Д., Шеглов С.А.* Препринт МЭИ № 02-21. М., 1991. 20 с.
- [9] *Лубенченко А.В.* // Изв. АН Сер. физ. 1994. Т. 58. С. 28-31.
- [10] *Afanas'ev V.P., Naujoks D.* // Z. Phys. B. 1991. V. 84. P. 397-402.

Московский энергетический  
институт

Поступило в Редакцию  
27 января 1995 г.