

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

И-485

P10-87-926

Р.А.Ильхамов*, Д.Махайдик, Г.М.Осетинский

ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ
УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ПРИ АНАЛИЗЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

* НИИПФ ТашГУ

ВВЕДЕНИЕ

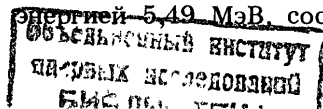
Развитие современных технологий изготовления электронных приборов требует совершенствования методов исследования многослойных структур. Одним из наиболее эффективных является метод резерфордовского обратного рассеяния. Он обладает рядом достоинств, главные из которых заключаются в возможности проведения анализа без разрушения образца, многоэлементного анализа на основе одного измерения и получения информации о глубинном распределении атомов исследуемого элемента. Метод основан на измерении энергетических спектров упруго рассеянных ионов. Информация об элементном составе слоев и структуре образца может быть получена путем расшифровки этих спектров.

Настоящая работа посвящена описанию обработки спектров упругого рассеяния, которая проводится путем моделирования энергетического спектра упруго рассеянных ионов и сравнения его с экспериментальным спектром. Окончательным результатом подгонки является тот вариант модели образца, который обеспечивает достаточно хорошее совпадение этих спектров. Расчеты выполнены с помощью специальной программы RBSM, подробно описанной в ^{1, 2/}. Моделирование осуществляется таким образом, чтобы последовательно для каждого слоя, начиная с ближайшего к поверхности образца, было достигнуто совпадение генерируемых спектров от каждого элемента данного слоя с соответствующими областями экспериментального спектра.

Особенности обработки продемонстрированы на спектрах, измеренных на пучке ионов гелия-4 от электростатического ускорителя ЭГ-5 ОИЯИ в интервале энергий 1,5—3,0 МэВ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

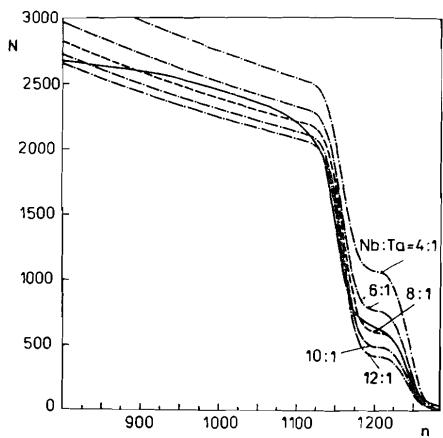
Ионный пучок от ускорителя коллимировался двумя диафрагмами диаметром 1,5 мм и попадал на мишень, установленную на многопозиционном держателе. Число падающих на мишень частиц определялось по измерению заряда, переносимого пучком на мишень, интегратором тока. Угол наклона мишени к оси пучка составлял 45° . Упругое рассеяние ионов измерялось с помощью кремниевого поверхностно-барьерного детектора, установленного под углом 135° по отношению к направлению пучка. Энергетическое разрешение детектора, измеренное на α -частицах с энергией 5,49 МэВ, составляло 25 кэВ. Спектры



записывались в памяти ЭВМ MERA-60/55, а последующая обработка проводилась на ЭВМ PDP-11/70.

ОБРАЗЕЦ NbTa

Задача исследования образца NbTa состоит в определении содержания тантала в ниобии, которое должно быть равно 0,1 атомного процента.



На рис. 1 представлен экспериментальный энергетический спектр упругого рассеяния ионов ^4He (сплошная линия). На этом же рисунке приведен ряд теоретических спектров, каждый из которых генерирован при разных соотношениях числа атомов Nb и Ta (Nb: Ta =

Рис. 1. Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (штрихпунктирные линии) спектры для образца NbTa. Пунктирная линия — наилучшая подгонка. N — счет в канале, n — номер канала анализатора импульсов.

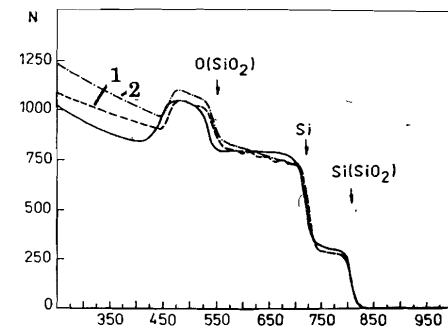
= 4:1, 6:1, 8:1, 10:1, 12:1). Как видно из рисунка, наилучшее согласие теоретического и экспериментального спектров имеет место при соотношении Nb: Ta = 8:1 (пунктирная линия), что соответствует содержанию тантала в ниобии, равному 11 атомным процентам. Этот результат был подтвержден при определении содержания тантала в исследуемом образце методом нейтроноактивационного анализа, который дал значение концентрации Ta в Nb около 10 атомных процентов. Отсюда можно сделать заключение, что содержание тантала в ниобии значительно отличается от ожидаемого.

Сравнение спектров позволяет оценить верхнюю границу погрешности метода. Хорошо видно, что имеется значительное отклонение теоретических спектров, рассчитанных при атомных соотношениях Nb: Ta = 6:1 и 10:1, от наилучшей подгонки. Следовательно, область возможных атомных соотношений Nb и Ta не выходит за пределы соотношений 7:1 и 9:1, которым соответствуют концентрации тантала в ниобии, равные 12,5 и 10 атомным процентам соответственно. Таким образом, результатом измерения состава исследуемого образца можно считать концентрацию Ta в Nb $11 \pm 1,3$ атомных процента.

ОБРАЗЕЦ Si/SiO₂/

Задача исследования образца Si/SiO₂/ состоит в определении толщины и стехиометрии окисного слоя на поверхности кремния. На рис. 2 представлен экспериментальный энергетический спектр (сплошная линия). На этом же рисунке приведены два теоретических спектра. Кривая 1, полученная в результате разбиения всей анализируемой глубины в кремнии на 20 слоев толщиной по 2000 Å, отвечает наилучшей подгонке. Кривая 2 соответствует моделированию, когда подложка кремния представляется в модели как один слой толщиной 40000 Å. При проведении расчетов в пределах задаваемого слоя тормозные способности считаются постоянными. Как видно из рисунка, выше 450-го канала спектра (т.е. при глубине в кремнии меньше 19000 Å) согласие теоретического спектра с экспериментальным вполне удовлетворительное, для больших глубин оно хуже. Это можно объяснить влиянием на форму спектра многократного рассеяния ионов, которое в программе не учитывается. Измерения показали, что толщина окисного слоя составляет 5000 Å. Атомное соотношение Si: O в поверхностном окисном слое равно 1:2.

Рис. 2. Экспериментальный спектр и его подгонка для образца Si/SiO₂/. На рисунке использованы следующие обозначения: Si(SiO₂) — Si из слоя SiO₂, Si — массивный кремний, O(SiO₂) — O из слоя SiO₂. Стрелками указываются высокоэнергетические края спектров от соответствующих элементов и слоев. N — счет в канале, n — номер канала анализатора импульсов.



ОДНОРОДНЫЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ОБРАЗЕЦ СТЕКЛА

Задача исследования состоит в определении стехиометрии данного образца, содержащего элементы O, Si, K, Zr, Te и имеющего на поверхности напыленный слой Ti. При моделировании образец разделялся на один слой Ti и на 24 слоя с пятью элементами, определяющими состав матрицы стекла, каждый толщиной 1800 Å. На рис. 3 приведен результат подгонки, где сплошной и пунктирной линиями обозначены экспериментальный и теоретический спектры соответственно. Как видно из рисунка, выше 600-го канала было достигнуто достаточ-

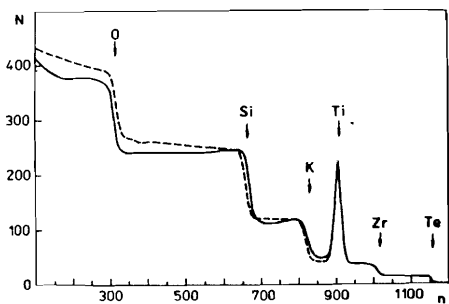
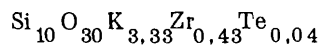


Рис. 3. Экспериментальный спектр и его подгонка для исследуемого образца стекла $\text{Si}_{10}\text{O}_{30}\text{K}_{3,33}\text{Zr}_{0,43}\text{Te}_{0,04}/\text{Ti}$. N – счет в канале, n – номер канала анализатора импульсов.

но хорошее согласие спектров. Для более низких энергий согласие хуже вследствие неучета многократного рассеяния. В результате подгонки

найдена следующая стехиометрия образца



с напыленным слоем Ti толщиной 155 Å.

МНОГОСЛОЙНАЯ СТРУКТУРА Si/Cr/Ni/Au/

О данном образце до начала эксперимента было известно, что он представляет собой массивный кремний, на который последовательно нанесены слои Sb, Cr, Ni, Au и толщина l каждого слоя ориентировочно составляет 1000 Å. Задача исследования этого образца заключается в проверке очередности и толщины нанесенных слоев.

Экспериментальный и теоретический спектры показаны на рис. 4. Наилучшее согласие теоретического спектра с экспериментальным получено после 10 итераций при следующих параметрах: $l_{\text{Cr}} = 150 \text{ Å}$,

$l_{\text{Ni}} = 1255 \text{ Å}$, $l_{\text{Au}} = 930 \text{ Å}$. Как

видно из рисунка, пик Sb на экспериментальном спектре не наблюдается. Это, возможно, объясняется либо тем, что количество сурьмы, нанесенной при напылении, намного меньше ожидаемого, либо диффузией атомов Sb в низлежащие и вышележащие слои, либо совместным воздействием

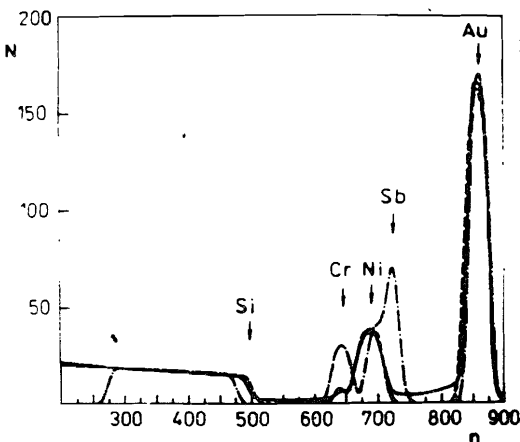


Рис. 4. Экспериментальный спектр (сплошная линия), построенный на исходных предположениях теоретический спектр (штрихпунктирная линия) и наилучшая подгонка (пунктирная линия) для образца Si/Cr/Ni/Au/.

этих двух факторов на формирование спектра. В итоге сурьма не проявляется в виде отдельного слоя.

Граница спектра для каждого элемента определяется с погрешностью ± 2 канала. Учитывая соотношение между энергией рассеянных ионов и глубиной в образце, на которой произошло рассеяние, для каждого элемента, можно найти погрешность в определении толщины слоев: 50, 40 и 35 Å для слоев Cr, Ni и Au соответственно. Окончательно имеем:

$$l_{\text{Cr}} = 150 \pm 50 \text{ Å}, \quad l_{\text{Ni}} = 1255 \pm 40 \text{ Å}, \quad l_{\text{Au}} = 930 \pm 35 \text{ Å}.$$

МНОГОСЛОЙНАЯ СТРУКТУРА Si/SiO₂/Si₂N/CvSiON/W₈Ti/Al/

Образец представляет собой массивный кремний, на который последовательно нанесены слои SiO₂, Si₂N, CrSiON, W₈Ti, Al. Исследование такой структуры позволяет продемонстрировать возможности обратного рассеяния при анализе многослойных образцов. Предварительные технологические сведения о структуре образца (последовательность, стехиометрия и толщина слоев) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер слоя	1	2	3	4	5
Стехиометрия	Al	W ₈ Ti	CrSiO _x N _y	Si ₃ N ₄	SiO ₂
Толщина (Å)	500	500	160	500	4900

Таблица 2

Номер слоя	1	2	3	4	5
Стехиометрия	Al	W ₈ Ti	CrSiON	Si ₂ N	SiO ₂
Толщина (Å)	730 ± 40	400 ± 15	160 ± 45	500 ± 60	5500 ± 50

В табл. 2 представлены параметры слоев, с помощью которых после 14 итераций было получено наилучшее согласие теоретического спектра с экспериментальным. На рис. 5а показаны экспериментальный и теоретический спектры для данного образца. Опишем процедуру обработки спектра в той последовательности, в которой она проводилась.

Слой Al. Толщина слоя определялась в результате подгонки пика Al (спектр 6 на рис. 5б), а также положения высокоэнергетического

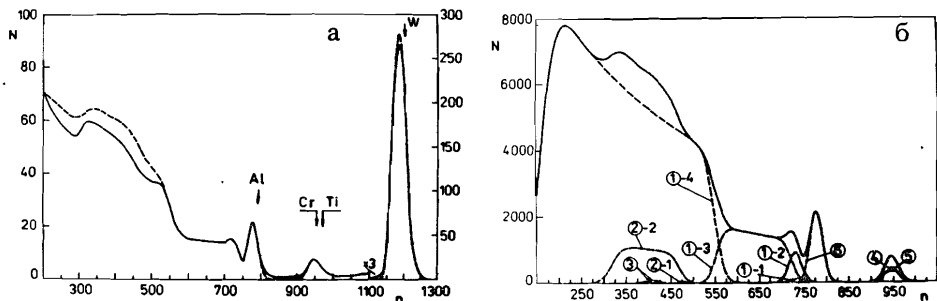


Рис. 5. а. Экспериментальный спектр (сплошная линия) и наилучшая подгонка (пунктирная линия) для образца Si/SiO₂/Si₂N/CrSiON/W₈Ti/Al. Правая шкала ординат относится только к пику вольфрама. б. Разложение суммарного теоретического спектра без пика W (сплошная линия) на парциальные спектры (пунктирные линии) от элементов в слоях образца. 1-1 – вклад Si из слоя CrSiON, 1-2 – вклад Si из слоя Si₂N, 1-3 – вклад Si из слоя SiO₂, 1-4 – вклад кремниевой подложки, 2-1 – вклад O из слоя CrSiON, 2-2 – вклад O из слоя SiO₂, 3 – вклад N из слоев CrSiON и Si₂N, 4 – вклад Cr из слоя CrSiON, 5 – вклад Ti из слоя W₈Ti, 6 – вклад Al из поверхностного слоя. N – счет в канале, n – номер канала анализатора импульсов.

края пика W (рис. 5а), которое зависит от толщины слоя Al. Отклонение от ожидаемого значения составляет ~ 50%, что значительно больше погрешности определения толщины слоя Al.

Слой W₈Ti. Толщина и стехиометрия слоя W-Ti определялась путем подгонки положения низкоэнергетического края и высоты пика W соответственно. Кроме того, следует учитывать, что при изменении стехиометрии и толщины слоя W₈Ti смещаются все те части спектра, которые соответствуют слоям, лежащим под слоем W₈Ti. Определение параметров слоя по пику W дало возможность однозначно моделировать пик Ti (спектр 5), который перекрывается с пиком Cr из слоя CrSiON.

Слой CrSiON. При определении параметров этого слоя встретились определенные трудности – малая толщина и присутствие легких составляющих элементов (O, N). Поэтому для O и N в стехиометрической формуле слоя были заданы значения, равные 1, которые в процессе подгонки не менялись. Толщина слоя и количество атомов Cr определены в результате подгонки пика Cr-Ti с учетом найденной ранее добавки Ti в этот пик. Одновременно количество атомов Si в этом слое было определено путем подгонки спектра по глубине провала в области 750-гq канала (спектр 1-1). Толщина и стехиометрия этого слоя были определены с относительно большой погрешностью. Источником ошибок является наличие нескольких факторов: малая толщина слоя; большое количество элементов в составе слоя; присутствие в нем легких элементов (O, N); все спектры от элементов данного слоя накладываются на спектры от других слоев.

Слой Si₂N. Толщина и стехиометрия слоя определялись в результате подгонки пика Si (спектр 1-2), который являлся чувствительным индикатором обоих параметров. Предполагаемая толщина слоя подтвердилась, но стехиометрия оказалась несколько отличной от заданной. Использование исходной стехиометрии слоя приводило к слишком большому отклонению расчетного спектра от экспериментального, чтобы это отклонение можно было отнести на счет точности подгонки.

Слой SiO₂. Определение данных для этого слоя не представлялось сложной задачей, поскольку добавки от составляющих его элементов хорошо выделяются на спектре. Стехиометрия слоя определялась по высоте спектра Si в области каналов 600-700 (спектр 1-3), а его толщина – по положению края спектра от массивного кремния (спектр 1-4). Одновременно эти параметры слоя проверялись по спектру кислорода (спектр 2-2).

Несмотря на расхождение в стехиометрии слоя 4 (см. табл. 1 и 2), в целом наблюдается удовлетворительное совпадение результатов исследования структуры образца с предварительными технологическими данными о ней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании рассмотренных примеров можно сделать заключение, что моделирование энергетических спектров упруго рассеянных ионов позволяет исследовать последовательность, стехиометрию и толщину слоев в многослойных структурах.

Однако интерпретация спектра не всегда однозначна. В этих случаях могут оказаться полезными предварительные технологические сведения об образце, которые позволяют сократить число возможных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильхамов Р.А., Махайдик Д. Сообщение ОИЯИ P10-87-249, Дубна, 1987.
2. Ильхамов Р.А., Махайдик Д. Сообщение ОИЯИ P10-87-535, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1.2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3.4.17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1.2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Ильхамов Р.А., Махайдик Д., **Осетинский Г.М.**

P10-87-926

Обработка спектров упругого рассеяния при анализе многослойных структур

Приводится описание обработки энергетических спектров упруго рассеянных ионов, измеренных на многослойных структурах. Обработка проводится путем моделирования на ЭВМ спектра упругого рассеяния и сравнения его с экспериментальным спектром. Приведены результаты исследования структуры пяти многослойных образцов, изготовленных из металлических и полупроводниковых материалов. Измерение спектров было выполнено на пучке ионов ^4He от электростатического ускорителя ЭГ-5 ОИЯИ в интервале энергий 1,5-3,0 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

P'khamov R.A., Machajdik D., **Osetinskij G.M.**

P10-87-926

The Backscattering Spectra Processing for the Structure of Multilayer Samples

The results of the structure analysis of five multilayer samples prepared from metallic and semiconductor materials are presented. The method of Rutherford backscattering spectrometry (RBS) using 1,5-3,0 MeV ^4He ion beam from Van de Graaf generator was applied. The processing of measured RBS spectrum was carried out by the computer modelling of the spectrum and comparing it with the experimental one.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987