

УДК 537.534

## ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ Si–O–Al-СТРУКТУР МЕТОДАМИ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ И РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

© 2019 г. В. И. Бачурин<sup>1</sup>, \*, Н. С. Мелесов<sup>1</sup>, А. А. Мироненко<sup>1</sup>,  
Е. О. Паршин<sup>1</sup>, А. С. Рудый<sup>1</sup>, С. Г. Симакин<sup>1</sup>, А. Б. Чурилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института РАН, 150007 Ярославль, Россия

\*E-mail: vibachurin@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 04.07.2018 г.

Принята к публикации 04.07.2018 г.

Представлены результаты послойного анализа четырехслойной Si–O–Al-пленки с различным содержанием элементов в слоях. Вторично-ионная масс-спектрометрия и метод резерфордовского обратного рассеяния применены для получения профилей распределения плотности элементов по глубине. Данные анализа, полученные методом вторично-ионной масс-спектрометрии, использовались в качестве исходных концентрационных профилей при обработке спектров резерфордовского обратного рассеяния с помощью программы SIMNRA. В результате построена модельная структура пленки, которая описывает спектры резерфордовского обратного рассеяния, полученные при различных экспериментальных условиях измерений, уточняет результаты анализа методом вторично-ионной масс-спектрометрии и позволяет получить количественные распределения по глубине концентрации элементов и плотности пленки.

**Ключевые слова:** послойный анализ, вторично-ионная масс-спектрометрия, резерфордовское обратное рассеяние.

**DOI:** 10.1134/S0207352819040024

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в коммерческих литий-ионных аккумуляторах графит используется в качестве отрицательного электрода. Теоретическая максимальная специфическая емкость таких электродов составляет  $372 \text{ мА} \cdot \text{ч/г}$ . Замена графита на кремний позволила бы увеличить емкость до  $4200 \text{ мА} \cdot \text{ч/г}$  [1]. Кристаллический кремний не может быть использован в качестве материала электрода, поскольку при циклических перезарядках происходит внедрение Li в кристаллическую решетку Si, приводящее к быстрому разрушению батареи [2]. Пленки аморфного Si толщиной 50–300 нм показывают хорошую устойчивость при циклических перезарядках [3, 4], но дальнейшее увеличение толщины приводит к их быстрой деградации и отслаиванию от подложки. В последнее время ведутся работы по использованию композитных пленок на основе аморфного кремния с добавлением других материалов. Как правило, такие пленки имеют слоистую структуру, в которой слои с повышенным содержанием Si чередуются со слоями с Si, содержащими C [5], Fe [6], Ge [7], и др. Пленки Si–O–Al рассматриваются (как альтернатива углеродным) в качестве

электродов в литий-ионных аккумуляторах. В работе [8] приведены результаты изучения физико-химических свойств Si–O–Al-композитных слоистых пленок, полученных магнетронным распылением Si и Al мишеней в атмосфере Ar с незначительным содержанием кислорода, и их связи с электрохимическими характеристиками при использовании таких структур в качестве отрицательного электрода. Установлено, что емкость полученных Si–O–Al-композитных структур близка к теоретическому значению  $3240 \text{ мА} \cdot \text{ч/г}$  и она практически не изменяется при ста циклах перезарядки. Исследование морфологии пленок после циклических испытаний показало, что происходит увеличение шероховатости поверхности и появление на ней трещин, а также значительное увеличение толщины пленок за счет образования пор. Кроме того, состав пленок обогащается элементами твердого электролита. Интегральный состав пленок определялся методом рентгеновского энергодисперсионного анализа. Эти факторы ведут к снижению емкости электрода. По мнению авторов работы, протекание указанных процессов может во многом определяться послойным распределением элементов исходной пленки, их

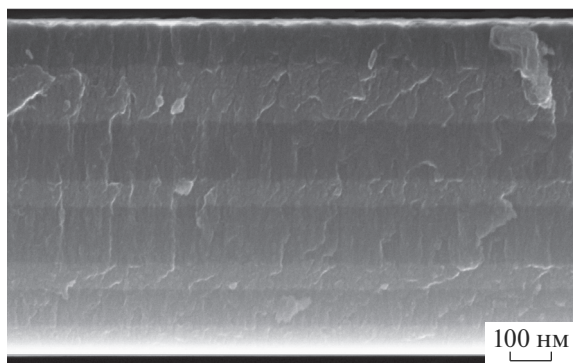


Рис. 1. Микроскопическое изображение поперечного скола слоистого образца Si–O–Al.

концентрационного соотношения и плотности слоев. Целью данного исследования является разработка методики количественного послойного анализа тонкопленочных композитных слоистых структур Si–O–Al с различным содержанием элементов в слоях.

Основными методами послойного анализа тонкопленочных структур являются методы вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Количественный ВИМС-анализ (как правило) требует наличия стандартных образцов с известным содержанием элементов. Приготовление таких образцов в случае трех и более компонентов затруднено. Обработка спектров РОР, содержащих близкие по массам элементы и более того, имеющих массу меньшую, чем масса подложки также представляется не простой задачей. В данной работе предпринята попытка разработать методику количественного анализа слоистых структур Si–O–Al, используя возможности методов ВИМС и РОР. Успешность такого подхода была ранее показана в работах [9, 10].

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

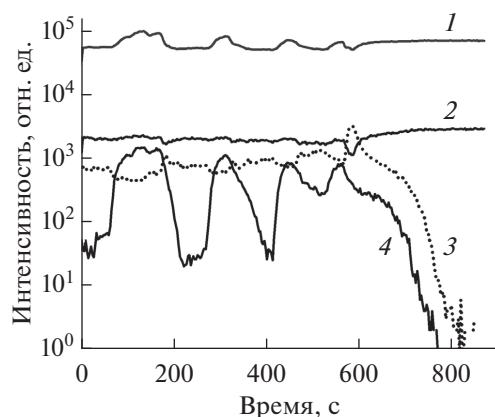
Для исследования использовались четырехслойные пленки Si–O–Al на подложке Si (100). Осаждение пленок проводилось магнетронным распылением двух мишеней Si и Al на установке Оратория 22. Плазмообразующий газ Ar. Процесс напыления состоял из четырех циклов. В каждом цикле (длительность цикла составляла 10 мин) в течение первых двух минут распыления мишеней на катоды с Si и Al подавались мощности 340 и 315 Вт соответственно. Затем мощность, подаваемая на Al, уменьшалась в три раза, и в рабочую камеру осуществлялся напуск кислорода. Базовое давление составляло  $10^{-4}$  Па, а при напылении – 1.1 Па. В результате были получены пленки толщиной 860 нм с повышенным содержанием Al в нечет-

ных от подложки слоях. На рис. 1 представлена микрофотография поперечного скола образца, полученная на сканирующем электронном микроскопе SUPRA 40. Светлые полосы соответствуют слоям с повышенным содержанием Al.

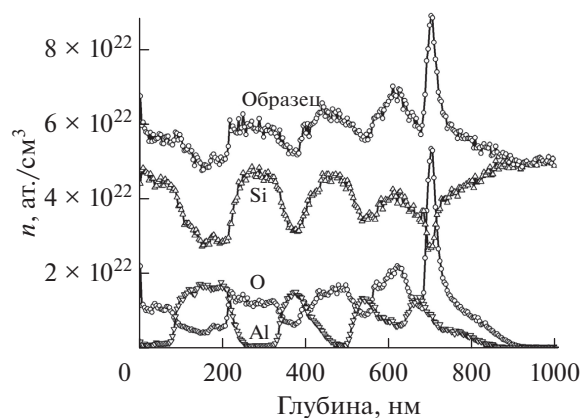
Послойный анализ (использовали метод ВИМС) проводился на времяпролетном масс-спектрометре TOF.SIMS 5. В качестве анализирующего использовался пучок ионов  $Bi_3^+$  с энергией 25 кэВ (плотность тока составляла  $4 \times 10^{-5}$  мА/см<sup>2</sup>), а для распыления при послойном анализе использовали пучок ионов 2 кэВ  $Cs^+$  (плотность тока –  $2.2 \times 10^{-1}$  мА/см<sup>2</sup>). Распыляющий пучок разворачивался в растр на поверхности образца размером  $200 \times 200$  мкм<sup>2</sup>. Сканирование зондирующего пучка осуществлялось в центральной области кратера ионного травления, производимого низкоэнергетичными ионами цезия. Размер области сканирования, и, соответственно, области сбора вторичных ионов, составлял  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup>.

При регистрации вторичных положительных ионов реализована идеология катионного ВИМС-анализа [11], которая заключается в следующем. После выхода распыления образца на стационарный режим поверхность обогащается имплантированным цезием, который при дальнейшем распылении покидает приповерхностный слой в виде ионов  $Cs^+$ ,  $Cs_2^+$ . Вблизи поверхности ( $\sim 2$  Å) эти ионы образуют квазимолекулярные ионы  $CsM^+$ ,  $Cs_2M^+$  с распыленными нейтральными атомами мишени M. Анализ таких вторичных ионов позволяет в значительной мере избежать матричных эффектов. В данной работе регистрировались ионы  $Cs_2^+$ ,  $Cs_2Si^+$ ,  $Cs_2Al^+$ ,  $Cs_2O^+$  с масс-спектральным разрешением  $M/\Delta M = 5800$  в районе 294 а. е. м. ( $^{133}Cs_2^{28}Si^+$ ).

После нормировки ионных токов, характеризующих распределение основных элементов в пленке Si–O–Al, на интенсивность тока ионов  $Cs_2^+$  концентрационные профили строились как:  $n_{Si} = K_{Si} \times I_{Si}$ ,  $n_{Al} = K_{Al} \times I_{Al}$ ,  $n_O = K_O \times I_O$ , где  $I_{Si}$ ,  $I_{Al}$ ,  $I_O$  – соответствующие нормированные ионные токи. Калибровочная константа  $K_{Si}$  определялась плотностью атомов кремния  $n_{Si0} = 5 \times 10^{22}$  см<sup>-3</sup>, соответствующей кремниевой подложке:  $K_{Si} = n_{Si0}/I_{Si0}$ , где  $I_{Si0}$  – значение  $I_{Si}$  в подложке. Величина  $K_{Al}$  определялась значением плотности атомов алюминия  $n_{Al0} = 6.02 \times 10^{22}$  см<sup>-3</sup> и значением  $I_{Al0}$ , которое определялось в отдельном измерении, произведенном для образца чистого алюминия в идентичных условиях. Калибровочную константу  $K_O$  для кислорода находили, используя значение  $5.33 \times 10^{22}$  см<sup>-3</sup> в максимуме



**Рис. 2.** Зависимость тока вторичных ионов  $\text{Cs}_2^+$  (1),  $\text{Cs}_2\text{Si}^+$  (2),  $\text{Cs}_2\text{Al}^+$  (3),  $\text{Cs}_2\text{O}^+$  (4) от времени распыления поверхности.



**Рис. 3.** Зависимости распределения атомной плотности пленки Si–O–Al и ее основных элементов от глубины, полученные из данных ВИМС-анализа.

концентрации кислорода на профиле, предположительно соответствующему слою естественного окисла кремния на границе пленка/подложка, которая перед осаждением пленки специально не очищалась. Хотя это заведомо некорректное предположение, поскольку содержание кислорода в этой области может быть увеличено за счет диффузии и ионно-индуцированной диффузии при анализе не связанного в пленке кислорода.

Анализ методом резерфордовского обратного рассеяния проводился на установке K2MV. Спектры POP регистрировались с использованием ионов  $\text{He}^+$  с энергией  $E = 1.8$  МэВ. В силу неоднозначности интерпретации спектров POP, полученных на такой сложной многослойной структуре, и для предупреждения ориентационных артефактов было получено две серии спектров: одна в зависимости от ориентации образца (использовались углы падения ионного пучка  $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$  и  $11.2^\circ$  и углы выхода рассеянных ионов  $\beta = 25^\circ, 30^\circ$  и  $30.4^\circ$  при угле рассеяния  $\varphi = 160^\circ$ ) и вторая в зависимости от угла рассеяния зондирующих ионов (углы рассеяния  $\varphi = 165^\circ, 160^\circ$  и  $150^\circ$  и углы выхода  $\beta = 25.5^\circ, 30.4^\circ$  и  $40.3^\circ$  при угле падения  $\alpha = 11.2^\circ$ ). Расчет спектров POP-модельных мишеней производилась программой SIMNRA v7.01 [12]. Значения энергетических потерь ионов  $\text{He}^+$  при движении в образце рассчитывались программой SRIM-2013.

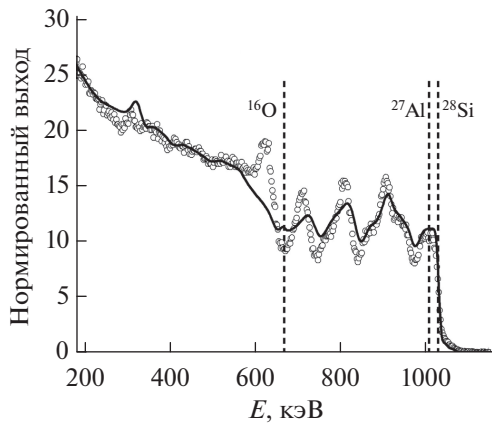
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен типичный послыйный профиль распределения элементов пленки. Показаны изменения токов вторичных ионов  $\text{Cs}_2^+$ ,  $\text{Cs}_2\text{Si}^+$ ,  $\text{Cs}_2\text{Al}^+$  и  $\text{Cs}_2\text{O}^+$  от времени распыления. Помимо основных элементов в пленке обнаружено незначительное присутствие углерода. Интен-

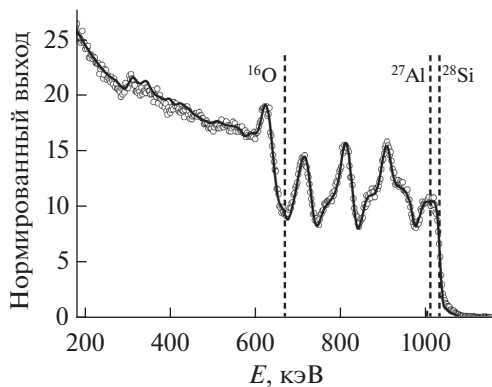
сивность вторичных ионов представлена в логарифмическом масштабе. После окончания анализа глубина кратеров травления измерялась на профилометре Talystep. Она составила около 860 нм, что совпадает с данными растровой электронной микроскопии. В предположении незначительных изменений скорости распыления слоев шкала времени переводилась в шкалу глубин.

По методике, описанной в предыдущем разделе, были построены профили распределения плотностей элементов Si, Al и O в пленке (рис. 3). Видно, что имеется по четыре максимума на кривых распределения Al и O, которые чередуются друг с другом, что соответствует технологическому процессу напыления пленки. В то же время исчез максимум концентрации Si вблизи границы пленка–подложка. Кроме того, наблюдается тенденция роста концентрации Si и Al от подложки к поверхности, в то время, как для O увеличение сигнала происходит в обратном направлении.

Как отмечалось выше, формирование квази-молекулярных ионов происходит вблизи поверхности объединением нейтральных распыленных атомов мишени с ионами перераспыленного Cs. Катионный ВИМС (как метод анализа поверхности) близок к вторично-нейтральной масс-спектрометрии (ВНМС), в которой распыленные нейтральные частицы ионизируются в вакууме электронным или лазерным пучком [13, 14]. Метод ВНМС позволяет делать количественные оценки состава поверхности, поскольку процесс распыления (в отличие от вторичной ионной эмиссии) практически не зависит от химического состояния приповерхностного слоя (матричных эффектов), и отношение концентраций элементов пропорционально отношению токов постиницированных частиц [15]. Поэтому можно считать, что полученные профили распределения элементов пленки близки к реальным значениям. На-



**Рис. 4.** Экспериментальный спектр РОР (точки)  $\varphi = 160^\circ$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\beta = 25^\circ$  и спектр, рассчитанный с помощью SIMNRA, с поверхности модельного образца, построенного по концентрационным профилям на основе данных ВИМС (сплошная линия).



**Рис. 5.** Экспериментальный (точки) и рассчитанный (сплошная линия) спектры по уточненной с помощью SIMNRA модели образца.

блюдаемые изменения максимумов и среднего содержания компонентов по глубине могут быть обусловлены рядом факторов: нестабильностью параметров установки при напылении пленки (мощность разряда, давление плазмообразующего газа, расход кислорода); диффузией элементов при осаждении и по окончании процесса. Из рис. 1 видно, что структура пленки имеет столбчатый характер, содержит поры, т.е. имеет большое количество дефектов. Но нельзя исключать, то обстоятельство, что ВИМС является разрушающим методом анализа поверхности. Взаимодействие ионного пучка  $\text{Cs}^+$ , приводит к перемещению атомов в области проективного пробега ионов ( $\sim 10$  нм в Si), ионно-индуцированной диффузии. Кроме того, имплантированные ионы  $\text{Cs}^+$  в Si и Al имеют различный профиль (в Al он гораздо шире) [9]. С учетом различного содержания Si, O и Al в слоях пленки можно ожидать внесение по-

грешностей в полученные результаты по измерению концентрационных профилей, вызванных ионной бомбардировкой при распылении образца.

На рис. 4 представлен один из спектров РОР-анализа (отмечен точками). Вертикальные пунктирные линии показывают расчетные положения сигналов от элементов, расположенных на поверхности образца. Видно, что спектр отражает четырехслойную структуру пленки. С помощью инструментов SIMNRA возможно подобрать такую модель пленки, что спектр РОР, рассчитанный с ее использованием, дает хорошее согласие с экспериментом. Однако решение для многослойной структуры, содержащей близкие по массе элементы и элементы легче подложки, имеет неоднозначный характер. Можно получить множество соотношений концентраций компонентов пленки, которые достаточно хорошо описывают один экспериментальный спектр, но плохо – другие, полученные при разных экспериментальных условиях анализа.

При построении начальной мишени для расчета модельного спектра РОР в данной работе использовались профили атомной плотности элементов, полученные из результатов анализа ВИМС. Для создания модели образца производился перевод шкалы глубин из нанометров в единицы поверхностной плотности, дифференциальным перемножением глубины на плотность на этой глубине:  $t_j = \sum_{i=1}^j n_i(x_i - x_{i-1})$ . Абсолютное значение атомной плотности переводилось в относительную концентрацию элементов, и полученные зависимости разбивались на 70 равных по толщине слоев, в пределах которых концентрации считались постоянными. Эти значения вносились в качестве исходных в программу по обработке спектров SIMNRA. Рассчитанный по данной мишени спектр РОР приведен на рис. 4 (сплошная линия) в сравнении с экспериментальными данными. У смоделированного спектра наблюдается сильное сглаживание экстремумов, а также завышение пиков спектра в области 1000 и 300 кэВ, что говорит о переизбытке тяжелых элементов (Al и Si) в приповерхностной области модельной мишени и переизбытке кислорода ближе к подложке. Это может быть обусловлено артефактами анализа ВИМС. По этой причине было произведено уточнение параметров модельной мишени (толщина слоев, относительные концентрации элементов в них) при помощи внутренних инструментов SIMNRA. Результат такого уточнения представлен на рис. 5 (сравнение производится с тем же экспериментальным спектром РОР). Такое же хорошее согласие уточненная модельная мишень дала и для других полученных в работе спектров РОР.

На рис. 6 приводятся результаты сравнения уточненной при помощи SIMNRA-модели с ре-

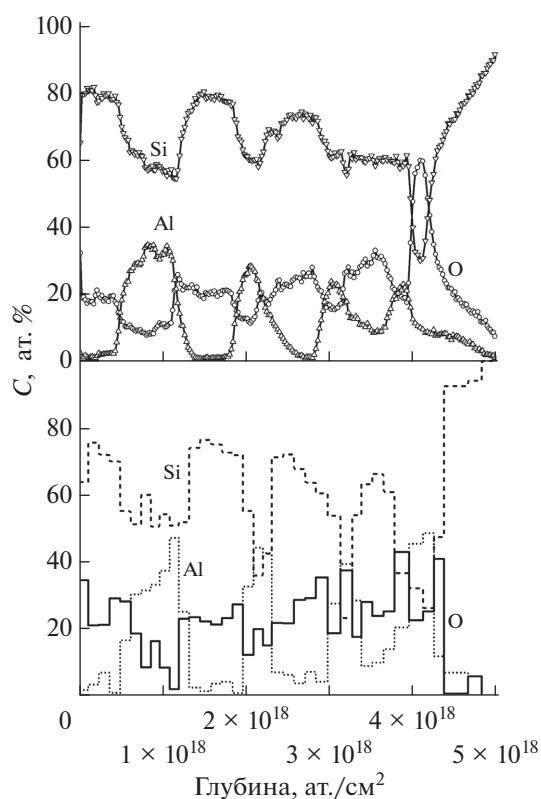


Рис. 6. Концентрационные профили элементов образца по данным ВИМС (вверху) и рассчитанные с помощью SIMNRA по уточненной модели (внизу).

результатами анализа ВИМС. В верхней части рисунка представлены профили плотностей элементов пленки по данным ВИМС, а в нижней эти же профили, рассчитанные по результатам обработки спектров РОР. Из характерных отличий можно отметить присутствие на уточненной мишени всех четырех пиков кремния, в то время как на спектре ВИМС пик у подложки практически отсутствует. Примерно одинаковый уровень максимумов кислорода, тогда как по результатам ВИМС их уровень возрастает от поверхности к подложке. Отсутствие значительного пика кислорода непосредственно возле подложки, более высокие и резко очерченные пики алюминия. Результаты анализа РОР, полученные с учетом данных ВИМС, в большей степени соответствуют технологическим режимам напыления пленок.

Наряду с послойным распределением концентраций элементов в образце, определено среднее значение плотности образца. Суммарное содержание кислорода в уточненной мишени составило  $1.054 \times 10^{18}$  ат./см<sup>2</sup>, алюминия —  $8.47 \times 10^{17}$  ат./см<sup>2</sup>, кремния —  $2.932 \times 10^{18}$  ат./см<sup>2</sup>, что при толщине образца 860 нм дает атомную плотность  $5.624 \times 10^{22}$  ат./см<sup>3</sup> и массовую плотность  $2.359$  г/см<sup>3</sup>. Для сравнения средние значения, рассчитанные

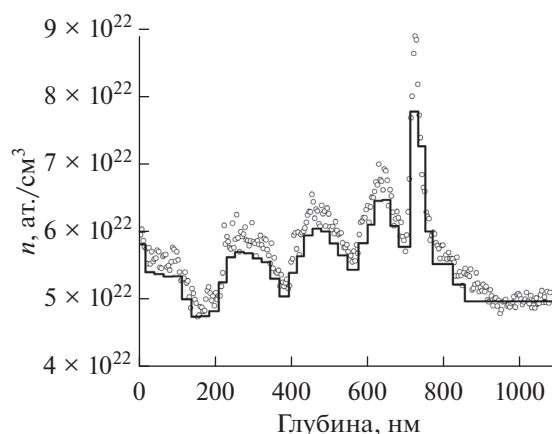


Рис. 7. Профили плотности пленки по глубине по данным ВИМС (точки) и РОР (сплошная линия).

по профилям ВИМС (рис. 3), составляют  $5.862 \times 10^{22}$  ат./см<sup>3</sup> (атомная плотность) и  $2.476$  г/см<sup>3</sup> (массовая плотность).

Обратный перевод из единиц поверхностной плотности в нм затруднен, так как требуется восстановить сразу две неизвестные функции — атомную плотность в каждой точке и собственно координаты каждой точки. Задача имеет множество решений, ввиду того, что определена только координата последней точки (толщина образца) и среднее значение атомной плотности, а границы между слоями можно перемещать произвольно (при сохранении интеграла под графиком). Но можно сделать это преобразование, используя некоторые приближения. Если посчитать, что профиль плотности в модельной мишени подобен профилю плотности, полученному анализом ВИМС, то получается картина, изображенная на рис. 7. Здесь толщина каждого слоя определялась из предположения, что атомная плотность в этом слое равна средней плотности профиля ВИМС на том же участке помноженной на отношение интегральных плотностей  $n_{\text{РОР}}/n_{\text{ВИМС}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика количественного послойного анализа слоистых Si—O—Al-пленок с различным содержанием элементов в слоях. Такие пленки используются в качестве отрицательного электрода в литий-ионных аккумуляторах и их электрофизические свойства могут зависеть от толщины и плотности слоев. Методы вторично-ионной масс-спектрометрии и резерфордовского обратного рассеяния применялись для получения послойных профилей распределения элементов в пленке. Регистрация положительных квазимолекулярных ионов  $\text{Cs}_2\text{Si}^+$ ,  $\text{Cs}_2\text{Al}^+$  и  $\text{Cs}_2\text{O}^+$  позволяет получать практически количественные данные

при послойном анализе образца. Но возможное перемешивание, ионно-индуцированная диффузия и другие эффекты, вызванные ионной бомбардировкой при распылении поверхности, могут исказить реальное распределение элементов по глубине. Полученные результаты ВИМС-анализа не совсем точно соответствовали технологическим режимам осаждения Si–O–Al. Интерпретация спектров РОР, полученных от многослойных структур, содержащих близкие по массе и легкие элементы, с помощью программы SIMNRA не позволяет получить однозначный результат. Предложено и реализовано использование данных ВИМС распределения концентраций элементов по глубине пленки в качестве исходных при построении модельной структуры в программе SIMNRA. Первоначальная модель качественно совпадала с экспериментальными спектрами РОР, а после уточнения параметров (концентрации элементов, толщины слоев) была получена улучшенная модель структуры, которая однозначно описала все спектры РОР, измеренные при различных экспериментальных условиях. Результатом совместного использования взаимодополняющих методов ВИМС и РОР для послойного анализа Si–O–Al-пленок стало построение количественных профилей распределения плотностей элементов и пленки в целом по глубине. Определена средняя плотность пленки, значения которой близки как по данным ВИМС, так и результатам РОР.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФАНО России на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием “Диагностика микро- и наноструктур”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sharma R.A., Seefurth R.N.* // J. Electrochem. Soc. 1976. V. 123. P. 1763. doi 10.1149/1.2132692
2. *Li H., Huang X., Chen L. et al.* // Electrochem. Solid State Lett. 1999. V. 2. P. 547. doi 10.1149/1.1390899
3. *Ohara S., Suzuki J., Sekine K. et al.* // J. Power Sources. 2003. V. 119–121. P. 591. doi 10.1016/s0378-7753(03)00301-x
4. *Lee K.-L., Jung J.-Y., Lee S.-W. et al.* // J. Power Sources. 2004. V. 129. P. 270. doi 10.1016/j.jpowsour.2003.10.013
5. *Li W., Yang R., Wang X., et al.* // J. Power Sources. 2013. V. 221. P. 242. doi 10.1016/j.jpowsour.2012.08.042
6. *Kim J.-B., Lim S.-H., Lee S.-M.* // J. Electrochem. Soc. 2006. V. 153. P. A455. doi 10.1149/1.2158567
7. *Hwang C.-M., Park J.-W.* // J. Power Sources. 2011. V. 196. P. 6772. doi 10.1016/j.jpowsour.2010.10.061
8. *Kulova T.L., Mironenko A.A., Skundin A.M. et al.* // Int. J. Electrochem. Sci. 2016. V. 11. P. 1370.
9. *Fuller L., Colligon J.S., Williams J.S.* // Surf. Sci. 1975. V. 54. P. 647. doi 10.1016/0039-6028(76)90211-9
10. *Grandin H.M., Tadayyon S.M., Lennard W.N. et al.* // Organic Electronics 2003. V. 4. P. 9. doi 10.1016/s1566-1199(03)00002-8
11. *Mootz T., Adriaens A., Adams F.* // Int. J. Mass Spectr. & Ion Proc. 1996. V. 156. Issues 1–2. P. 1. doi 10.1016/S0168-1176(96)04410-2
12. *Mayer M.* SIMNRA User's Guide. Garching, Germany: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik., 2011. 220 p.
13. *Lipinsky D., Jede R., Benninghoven A. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1985. V. A 3. Issue 5. P. 2007. doi 10.1116/1.572917
14. *Scichi H., Osabe S., Sugaya M. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2003. V. 203–204. P.228. doi 10.1016/S0169-4332(02)00632-3
15. *Бачурин В.И., Гаврилов Э.Л., Никитин А.М.* // Матер. 11 Межд. конф. ВИП. 1993. Москва. Т. 1. С. 153.

## Depth Profiling of Layered Si–O–Al Thin Films with Secondary Ion Mass Spectrometry and Rutherford Backscattering Spectrometry

V. I. Bachurin, N. S. Melesov, A. A. Mironenko, E. O. Parshin, A. S. Rudy,  
S. G. Simakin, A. B. Churilov

The results of depth profiling of four layered Si–O–Al thin films with different content of elements in layers are presented. SIMS and RBS facilities were used to obtain the depth distributions of element densities in the film. The data of the analysis by the method of secondary ion mass spectrometry were used as initial concentration profiles in the processing of Rutherford backscatter spectra using the SIMNRA program. As a result, a model of film structure is constructed that describes the spectra of Rutherford backscattering obtained under various experimental measurement conditions, refines the results of the analysis by the method of secondary ion mass spectrometry and allows obtaining quantitative distributions with respect to the depth of the element concentration and the film density

**Keywords:** depth profiling, secondary-ion mass spectrometry, Rutherford backscattering spectrometry.