

05;07;11;12

©1995 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЖНЕГО АТОМНОГО ПОРЯДКА ПЛЕНОК Fe МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ПОЛНОГО ВНЕШНЕГО ОТРАЖЕНИЯ

А.Б.Палкин, Ю.В.Пономарев, А.Б.Савельев, Н.Н.Салащенко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Международный учебно-научный лазерный центр,
119899, Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 5 мая 1994 г.)

Для двух систем Sc/Fe/Sc и Fe/Sc/Fe экспериментально исследованы тонкая структура рентгеновских спектров отражения за краем Fe и зависимость коэффициента отражения от угла скольжения. Проведен модельный расчет тонкой структуры и коэффициента отражения, получены оценки параметров систем (толщины и плотности отдельных слоев) и информация о ближнем атомном порядке в слое Fe. Проанализированы возможности спектроскопии тонкой структуры рентгеновских спектров отражения для анализа ближнего атомного порядка в пленках толщиной менее 10 Å.

Введение

В современных технологиях все большее значение приобретают ультратонкие слои и пленки. Толщины слоев в сверхрешетках, многослойных интерференционных зеркалах, изделиях микроэлектроники приближаются к моноатомным. Очевидно, что структура таких слоев как в дальнем, так и ближнем атомном порядке может существенно отличаться от объемного случая. Межслоевая диффузия и шероховатость границ раздела становятся решающими факторами, определяющими качество структур и их технологические параметры. Существенную информацию о структуре отдельного слоя и взаимодиффузии между слоями можно получить при исследовании ближнего атомного порядка атомов.

Спектроскопия тонкой структуры рентгеновских спектров полного внешнего отражения (ТС PCO или ReflEXAFS) является одним из немногих методов, позволяющих получать информацию о ближнем атомном порядке в тонких слоях [1-4]. В ряде работ была продемонстрирована чувствительность метода к исследованию тонких слоев на поверх-

ности [1-5], развит и апробирован способ количественной интерпретации спектров ТС РСО с извлечением информации о ближнем, атомном порядке аналогично методу спектроскопии дальней тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (ДТС РСП или EXAFS). В то же время экспериментальные исследования выполнялись для слоев, толщина которых была порядка глубины проникновения рентгеновского излучения в вещество при полном внешнем отражении либо превышала его. В такой ситуации влияние отражения от подложки на коэффициент полного внешнего отражения мало и им, как правило, пренебрегают.

Целью нашей работы являлись исследование ближнего атомного порядка (методом ТС РСО) тонких пленок на поверхности в условиях сильного отражения на подложке и оценка применимости ранее развитых подходов к извлечению структурной информации из ТС РСО [4] в такой ситуации.

В разделе 1 представлены результаты экспериментов по регистрации тонкой структуры спектров отражения и зависимости коэффициента отражения от угла скольжения рентгеновских лучей. Последнее позволило обоснованно выбрать углы скольжения для записи спектров отражения. Раздел 2 содержит результаты моделирования тонкой структуры и коэффициента отражения для многослойных систем, позволившие получить оценку параметров используемых объектов и провести анализ результатов экспериментов, приведенный в разделе 3.

1. Экспериментальные результаты

Исследования проводились с парой материалов Fe/Sc, хорошо зарекомендовавшей себя при создании многослойных дисперсионных элементов на диапазон длин волн 31-40 Å, применяемых для рентгенофлуоресцентного анализа и рентгеновской диагностики высокотемпературной плазмы в этом диапазоне [6], для создания многослойных фильтров ядерного излучения [7,8]. Использовались два образца: в одном из них пленка Fe была помещена между пленками Sc, в другом пленка Sc располагалась между пленками Fe. Образцы были изготовлены методом магнетронного напыления на стеклянную подложку в ИПФ РАН (Нижний Новгород). По технологическим оценкам толщина каждого слоя составляла около 10 Å. Однако толщины и плотности сверхтонких (толщиной менее 10 Å) пленок достаточно хорошо определяются только в многослойных периодических структурах [9], в которых довольно трудно говорить что-то определенное о параметрах верхних слоев и слоев, находящихся вблизи подложки.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента отражения от угла скольжения для образцов Fe/Sc/Fe, Sc/Fe/Sc и от подложки. Измерения проводились на характеристической линии излучения Cu K_{α} , угловое разрешение составило 0.3 угл. мин. Наличие трехслойной структуры со средней плотностью, превышающей плотность подложки (за счет плотности железа), приводит к появлению затянутого "хвоста" отражения в области за критическим углом полного внешнего отражения φ_c для стекла. Структура, содержащая два слоя железа, дает большее отражение за критическим углом стекла.

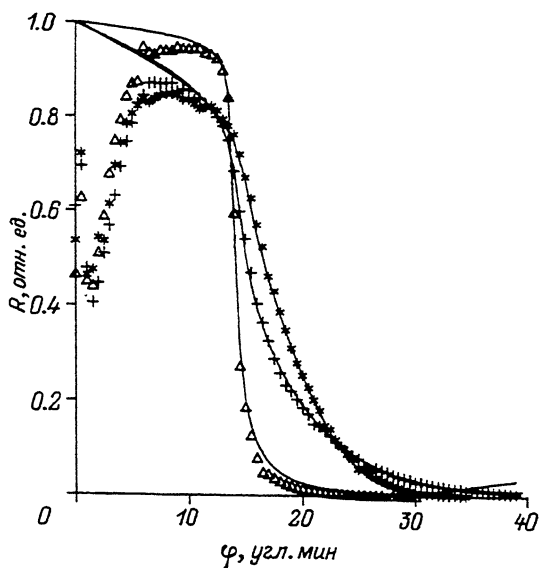


Рис. 1. Зависимость коэффициента полного внешнего отражения R от угла скольжения φ . * — структура Fe/Sc/Fe, + — структура Sc/Fe/Sc, Δ — чистая подложка. Сплошные линии — результат подгонки по трехслойной модели с параметрами табл. 1.

Таблица 1. Параметры трехслойной модели (подгонка)

Образец	Fe-Sc-Fe	Sc-Fe-Sc
$d_1, \text{Å}$	26 ± 5	35 ± 5
$d_2, \text{Å}$	31 ± 5	28 ± 5
$d_3, \text{Å}$	20 ± 5	30 ± 5
$\chi^2_{\text{подложки}} \cdot 10^6$	19.0	18.6
$\chi^2_{\text{подложки}} \cdot 10^6$	1.27	1.27

На рис. 2, а-в представлены фурье-спектры ТС РСО для двух образцов. Спектры рис. 2, а, б измерялись вблизи критического угла для стекла ($\varphi \sim 1.1\varphi_c$), а спектр рис. 2, в при меньшем угле скольжения ($\varphi \sim 0.8\varphi_c$). Измерения проводились на фокусирующем спектрометре [5] вблизи края поглощения железа ($E = 7.011$ кэВ). Время измерения одного спектра составляло около 8 ч при интенсивности регистрируемого сигнала до 2000 имп./с (анод Ag, $I = 40$ мА, $U = 21$ кВ) и разрешении по спектру не хуже 3 эВ. Контроль разрешения проводился по величине “провала” между линиями $\text{Cu } K_{\alpha 1}$ и $\text{Cu } K_{\alpha 2}$.

Спектры обрабатывались по стандартным методикам (см., например, [10]), включающим сплайн-аппроксимацию монотонной части коэффициента отражения, учет амплитудных и фазовых поправок на рассеяние фотоэлектрона и прямое и обратное фурье-преобразование из пространства волновых векторов фотоэлектронов в пространство радиусов. Горизонтальная часть на всех спектрах характеризует оценку уровня пуассоновского шума, проведенную согласно [1].

Для образца Sc/Fe/Sc (рис. 2, а) общий вид фурье-спектра, положения максимумов и их относительные амплитуды соответствуют параметрам спектра α -Fe, измеренного по методике “на поглощение” в лаборатории рентгеновской спектроскопии НИИ физики при РГУ. Спек-

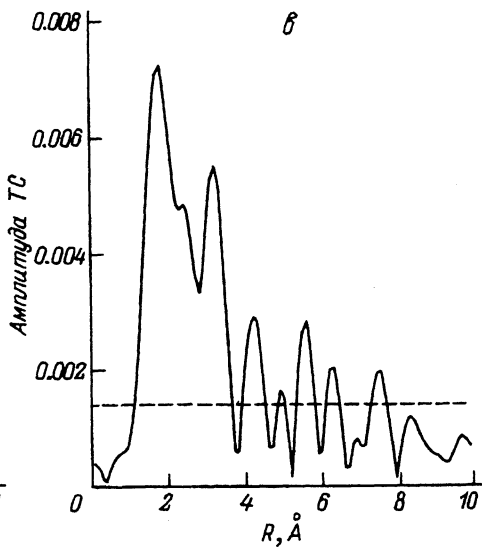
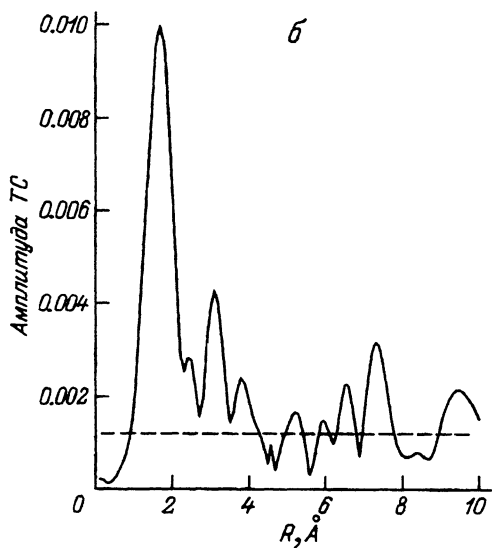
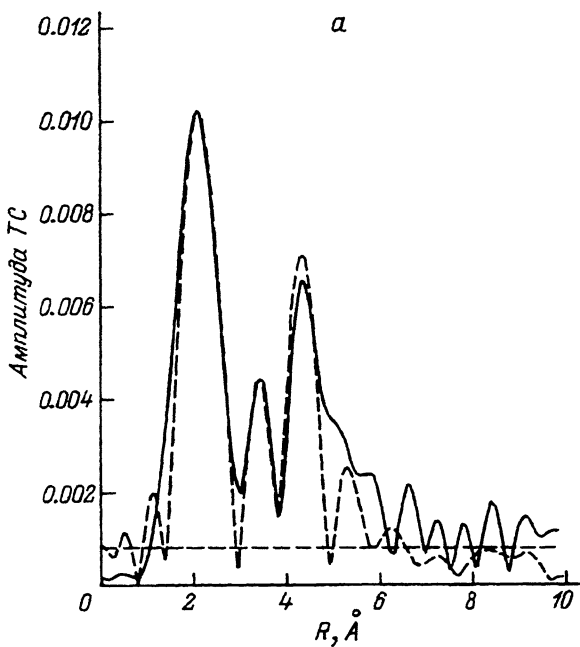


Рис. 2. Фурье-спектры ТС РСО.

a — образец Sc/Fe/Sc, сплошная линия — экспериментальный спектр ТС РСО, угол скольжения $\varphi \approx 18$ угл. мин, штриховая — экспериментальный спектр для Fe “на поглощение”; *б* — образец Fe/Sc/Fe, угол скольжения $\varphi \approx 13$ угл. мин; *в* — образец Fe/Sc/Fe, угол скольжения $\varphi \approx 18$ угл. мин. Горизонтальная черта на всех спектрах — уровень шума.

тры образца Fe/Sc/Fe имеют существенно отличающийся вид. Так, для спектра рис. 2,б, измеренного при малом угле скольжения (для малой глубины проникновения $t \sim 20 \text{ \AA}$), наибольшую амплитуду имеет максимум вблизи $r \sim 2 \text{ \AA}$, характерный для связи Fe-O в окислах железа. Максимум в районе $r \sim 2.4 \text{ \AA}$, характерный для связи Fe-Fe в α -Fe (ср. рис. 2,а,в), по крайней мере не превышает уровня шума. Качественный анализ рис. 2,а,б позволяет сделать вывод о том, что в формировании ТС PCO принимают участие как верхний, так и нижний слой железа, имеющие различные фазовый состав и ближний атомный порядок. Подтверждением этого служит сравнение фурье-спектров для различных углов скольжения рис. 2. Увеличение угла скольжения (рис. 2,б,е) приводит к увеличению глубины проникновения (до 50 \AA) и, как следствие, перераспределению амплитуд максимумов спектра рис. 2,б. В то же время спектр рис. 2,в также не содержит структурных максимумов, соответствующих α -Fe. Таким образом, если для образца Sc/Fe/Sc верхний слой Sc служит буфером, препятствующим диффузии кислорода и окислению слоя железа, то в образце Fe/Sc/Fe верхний слой железа оказывается сильно окисленным. Более детальный анализ экспериментальных спектров может быть проведен на основе моделирования ТС PCO.

2. Моделирование угловых и энергетических спектров отражения

Основной задачей моделирования зависимости коэффициента отражения от угла скольжения являлось получение оценок параметров слоев (толщина, плотность) с последующим их использованием при моделировании ТС PCO.

Расчет коэффициента отражения для обоих образцов проводился с использованием двух моделей: трехслойной модели с варьируемыми плотностью и толщиной каждого слоя и однослойной с варьируемыми в больших пределах эффективной плотностью и толщиной. Последняя модель соответствовала большой взаимодиффузии между слоями с существенно размытыми границами. Результаты подгонки по однослойной модели показали, что согласие расчетной и экспериментальной зависимостей достигается лишь при изменении плотности слоя до величин, не согласующихся с химическим составом образца (соответствующих очень малому содержанию железа). Следовательно, на формирование отраженной волны существенное влияние оказывают границы раздела между слоями и дальнейшая обработка результатов проводилась по трехслойной модели.

Результаты подгонки представлены на рис. 1 и отражены в табл. 1. Отметим несколько существенных особенностей полученных данных. Толщины слоев оказались в три раза выше технологических оценок, которые были получены по положению брэгговского максимума отражения от образца с большим числом слоев.

Лучшее согласие расчета с экспериментом достигалось при увеличенной плотности подложки, что может быть связано с наличием заметного количества тяжелых атомов в приповерхностном слое (подложки изготавливались методом литья стекла на расплавленное олово). Отметим также наличие интерференционного максимума в расчетной зависимости для образца Fe/Sc/Fe в области углов $\varphi \sim 40$ угл. мин,

не проявляющегося в экспериментальной зависимости рис. 1. Отсутствие заметной интерференции может быть в первую очередь связано с нерезкими границами раздела между слоями (наличием переходных слоев). Оценки плотности каждого слоя находятся в удовлетворительном согласии с известными из литературы для железа и скандия. Полученные оценки параметров структур использовались в дальнейшем при анализе спектров ТС РСО.

Ключевым элементом для моделирования ТС РСО является тот факт, что в области существования тонкой структуры ($2 \leq k \leq 15 \text{ \AA}^{-1}$, k — волновой вектор фотоэлектрона) имеет место простая связь между модуляцией действительной и мнимой частей атомного фактора рассеяния за K -краем поглощения [2]

$$\delta f'_k = -i\delta f''_k. \quad (1)$$

Использование этого соотношения позволяет связать ТС в спектрах отражения (χ_R) и спектрах поглощения (χ_μ) [4]. В случае однофазной системы эту связь можно представить в виде

$$\chi_R(k) = \left(\frac{dR}{df''_k} - i \frac{dR}{df'_k} \right) \frac{f''_k}{R} \chi_\mu(k) = V(k, \varphi) \chi_\mu(k). \quad (2)$$

Если известна модель границы раздела, то на основании решения уравнения Гельмгольца возможен расчет зависимости коэффициента отражения от энергии и угла скольжения рентгеновских лучей и, следовательно, амплитудно-фазовой функции $V(k, \varphi)$, характеризующей отличие ТС РСО от ДТС РСП. На основе такого подхода, в частности, было проанализировано влияние таких факторов, как шероховатость границы раздела, наличие на поверхности пленки и т.п. и продемонстрирована возможность количественного учета этих факторов при анализе экспериментальных спектров ТС РСО [4]. Расчет показывает, что зависимость функции V от волнового числа фотоэлектрона k слабая (изменение не более чем на 30% на интервале $\Delta k \simeq 15 \text{ \AA}^{-1}$).

Рассмотренный подход легко обобщается на многослойные и многокомпонентные системы. Так, в случае многослойной системы из n пленок различного фазового состава последняя может быть записана в виде

$$\dot{\chi}_R(k) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dR}{df''_{ki}} - i \frac{dR}{df'_{ki}} \right) \frac{f''_{ki}}{R} \chi_{\mu i}(k) = \sum_{i=1}^n V_i(k, \varphi) \chi_{\mu i}(k), \quad (3)$$

где суммирование производится по слоям, в которых присутствует тип атомов, вблизи края поглощения которого происходят измерение и анализ ТС РСО.

В методе “на поглощение” тонкие структуры отдельных компонент суммируются с весом, пропорциональным их атомной концентрации. Вклад отдельного слоя (компоненты) в ТС при исследовании “на отражение” определяется распределением поля по глубине и суммируется с весом, зависящим от угла скольжения рентгеновского излучения, глубины залегания компоненты и структуры слоев, лежащих как выше, так и ниже исследуемого слоя. Существенным здесь является и возможное изменение фазы ТС РСО в зависимости от этих факторов.

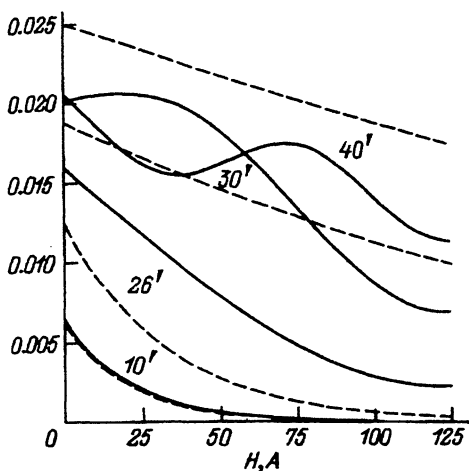


Рис. 3. Расчетная зависимость амплитуды ТС РСО V для слоя Fe толщиной 1 Å, лежащего на глубине H от поверхности слоя Fe толщиной 200 Å (сплошные линии), 1 мкм — (штриховые).

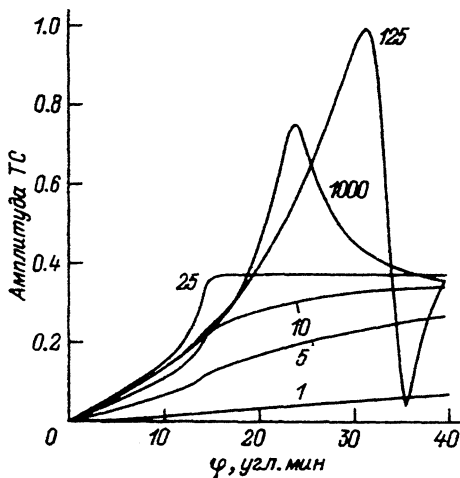


Рис. 4. Зависимость амплитуды ТС РСО V от угла скольжения φ для пленки Fe различной толщины (Å).

Для интерпретации полученных спектров ТС РСО нами был проведен ряд модельных расчетов (с использованием параметров многослойной системы, приведенных в табл. 1). В первую очередь нас интересовало изменение ТС РСО в зависимости от таких параметров, как толщина пленок, глубина их залегания, угол скольжения рентгеновского излучения.

На рис. 3 представлен расчет вклада тонкого слоя 1 Å от его глубины залегания для пленки Fe толщиной 200 Å и 1 мкм на стеклянной подложке. Немонотонное поведение амплитуды ТС РСО для углов скольжения, близких к критическому углу либо превышающему его (для пленки толщиной 200 Å), показывает, что на глубине порядка 100 Å формируется максимум поля, приводящий к увеличению вклада слоев железа, лежащих в этой области глубин в общую ТС РСО пленки. Сравнение двух зависимостей рис. 3 подтверждает вывод о существенном влиянии интерференционных эффектов на ТС РСО. Расчет также показывает, что изменение вклада тонкого слоя в интегральную по глубине ТС РСО определяется не только изменением амплитуды, но и фазы ТС РСО. Характер изменения фазы вклада тонкого слоя зависит от угла скольжения φ : для малых φ зависимость слабая и фаза близка к 0, что означает преобладание вклада, связанного с f'' . При углах скольжения порядка и больше критического угла фаза претерпевает изменение на $\pi/2$, т.е. для больших глубин вклад определяется f' .

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды V от различных толщин пленки Fe, находящейся на стеклянной подложке. Существенное влияние как на амплитуду, так и на фазу ТС РСО оказывает интерференция рентгеновского излучения. Для пленки толщиной порядка 100–300 Å максимум амплитуды ТС РСО сдвигается в область углов

скольжения $\varphi \geq \varphi_c$, возрастая в 1.5 раз. В области больших углов скольжения также наблюдается ряд интерференционных биений. Исходя из наших расчетов, можно оценить толщину слоя, дающего подавляющий вклад в ТС РСО: 20 Å для $\varphi = 0.5\varphi_c$ и 200 Å для $\varphi \simeq \varphi_c$.

Метод ТС РСО позволяет за счет интерференционных эффектов получать информацию о локальном атомном порядке и со слоев, лежащих на глубинах, больших глубины проникновения рентгеновского излучения в вещество. При углах скольжения, превышающих критический, интегральный вклад в ТС РСО слоев, лежащих на глубине 80–150 Å сравним с вкладом верхнего слоя толщиной 50 Å (рис. 3).

Минимальная толщина пленки t , доступная для анализа методом ТС РСО, может быть оценена исходя из минимально допустимого соотношения сигнал/шум в фурье-спектре ТС РСО [10]. Проведенные нами оценки показывают, что в лабораторных условиях (точность измерения коэффициента отражения R не хуже 0.1%) величина t составляет 5–7 Å, а при измерении ТС РСО на источнике СИ (точность измерения 0.01%) величина t уменьшается еще на порядок.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Изложенный выше подход позволил рассчитать амплитуду и фазу ТС РСО для трехслойной модели Fe/Sc/Fe и Sc/Fe/Sc в соответствии с параметрами, полученными из угловых спектров и сведенными в табл. 1, и провести количественный анализ экспериментальных спектров.

Образец Sc/Fe/Sc. Для образца Sc/Fe/Sc были, согласно формуле (3), рассчитаны амплитудная и фазовая поправки к спектру “на поглощение”. Параметры, заложенные в расчет, а также полученные из экспериментального спектра, сведены в табл. 2. Удовлетворительное количественное согласие первых трех структурных максимумов по положению и амплитуде (при примерно равном энергетическом разрешении) подтверждает эффективность используемой методики расчета спектров ТС РСО. Кристаллическая структура слоя железа в этом образце соответствует структуре α -Fe с размером микрокристаллитов не менее 50 Å. Оценка размера микрокристаллитов проведена нами исходя из соотношения максимумов, соответствующих первой и третьей координационным сферам железа по аналогии с проводившимися ранее методами ТС РСО и дифракции электронов исследованиями по формированию силицидов никеля при ионной имплантации [12]. Соот-

Таблица 2. Сравнение экспериментальных ТС РСО данных о локальном атомном порядке в образце Sc-Fe-Sc с данными, полученными для образца Fe методом EXAFS

Номер максимума	$R_{jEXAFS}, \text{Å}$	A_{jEXAFS}/A_{1EXAFS}	$R_{j\text{эксп.}} (\text{Å})$	$A_{j\text{эксп.}}/A_{jEXAFS}$
1	2.48	1.0	2.49	0.9
2	2.87	0.52	—	—
3	4.05	0.52	4.01	0.9
4	4.75	0.74	4.76	0.9
5	4.96	0.36	5.03	1.1

ношение размеров микрокристаллитов с толщиной пленки железа указывается на формирование "плоских" микрокристаллитов.

Образец Fe/Sc/Fe. Как уже отмечалось ранее, общий вид фурье-спектров ТС РСО для образца Fe/Sc/Fe (рис. 2,б,в) коррелирует со структурой окислов железа. Амплитуда и положение максимума, соответствующего координационной связи Fe-O ($R \sim 2.0\text{\AA}$), при изменении угла скольжения меняется слабо, а амплитуды максимумов, лежащих в области 3-5 \AA , возрастают при увеличении угла скольжения. Поэтому при моделировании в первую очередь необходимо было оценить изменение вкладов верхнего и нижнего слоя железа в ТС при изменении угла скольжения. Анализ показывает, что для углов скольжения φ , характерных для нашего эксперимента, вклад нижнего слоя железа мал. Так, для $\varphi \sim 13$ угл. мин отношение амплитуд вкладов верхнего и нижнего слоев составляет 5, а для $\varphi \sim 18$ угл. мин — 2 (при отношении сигнал/шум по первой координационной сфере порядка 5).

Изменение в ТС РСО при увеличении глубины зондирования может быть связано с неоднородностью по глубине фазового состава верхнего слоя железа. Для проверки этого предположения ТС РСО была рассчитана для пятислойной модели (трехслойная модель с разбиением верхнего слоя на три субслоя толщиной по 10 \AA). Вклад нижнего слоя 10 \AA растет с увеличением угла скольжения быстрее, чем верхнего. Так, при $\varphi \sim 13$ угл. мин соотношение вкладов верхнего и нижнего слоев порядка 2²; для $\varphi \sim 18$ угл. мин — порядка 1.2. Следовательно, возрастание амплитуд максимумов в области 3-5 \AA приблизительно в два раза при изменении угла скольжения от 13 до 18 угл. мин может быть связано с неоднородностью фазового состава верхнего слоя по глубине и наличием в нижней части этого слоя слабо окисленного железа.

Отметим, однако, что наши расчеты предсказывают существенное (приблизительно в два раза) увеличение амплитуды ТС РСО и слабое изменение фазы максимумов, не способное привести к интерференционному уменьшению амплитуд максимумов. В экспериментальных спектрах увеличение амплитуды происходит лишь для максимумов, лежащих в области 3-5 \AA . Окончательная интерпретация спектров ТС РСО для этого образца является предметом дальнейших исследований.

Кроме измерения ТС РСО вблизи края поглощения Fe нами была предпринята попытка измерения ТС РСО вблизи края поглощения Sc для обоих образцов ($E = 4.489$ кэВ). Предварительные оценки показали, что скачок края поглощения в коэффициенте отражения и амплитуда ТС РСО для Sc должны быть примерно в два раза больше, чем для Fe. Однако при проведении эксперимента не удалось обнаружить даже следов края поглощения. Этот факт также требует проведения дальнейших исследований.

Заключение

Таким образом, нами исследованы образцы Fe/Sc/Fe и Sc/Fe/Sc с толщиной слоя порядка 30 \AA . Методом рентгеновской рефлектометрии получены оценки параметров слоев (толщина, плотность). Продемонстрировано, что привлечение информации о структуре отражающей границы раздела позволяет провести полный количественный анализ

ТС РСО. Выявлена существенная роль верхнего слоя Sc, предотвращающего окисление лежащих под ним слоев железа. Показано, что в этой ситуации формируется тонкая пленка железа со структурой α -Fe и радиусом корреляции (размером кристаллитов), превышающим толщину пленки. В случае, когда верхней является пленка железа, происходит сильное и неоднородное по глубине окисление этой пленки.

Основной интерес при проведении исследований безусловно представляло изучение взаимного влияния слоев Fe и Sc (образование химических связей на границе, межслоевая диффузия и т.п.). Отсутствие в экспериментальных спектрах отражения скачка края поглощения Sc не позволило в рамках настоящей работы провести подобные исследования.

Проведенные модельные расчеты позволили оценить максимальную (около 200 Å) и минимальную (менее 1 Å) глубины зондирования. Показана возможность интерференционного усиления (ослабления) ТС РСО и, как следствие, управления глубиной зондирования. Возможность анализа методом ТС РСО сверхтонких пленок (вплоть до монокристаллических в лабораторных условиях и субатомных на источниках СИ) позволяет рассматривать метод ТС РСО в качестве конкурента методики Surface EXAFS [10] при решении задач, связанных с реконструкцией атомарно-чистой поверхности, адсорбции молекул и т.д. Наряду с зеркально отраженной волной измерения в такого рода экспериментах могут проводиться в аномально рассеянной волне (эффект Ионеды, поверхностной рентгеновской волне и т.д., формирующихся на неоднородностях вблизи границы раздела [13]).

Список литературы

- [1] *Martens G., Rabe P.* // Phys. Stat. Sol. a. 1980. Vol. 58. N 1. P. 415-424.
- [2] *Пономарев Ю.В., Турутин Ю.А.* // ЖТФ. 1984. Т. 53. Вып. 12. С. 2398-2402.
- [3] *Heald S.M., Chen H., Tranquada J.M.* // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 38. N 2. P. 1016-1026.
- [4] *Пономарев Ю.В., Савельев А.Б.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. N 8. С. 94-102.
- [5] *Пономарев Ю.В., Савельев А.Б., Турутин Ю.А.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. N 8. С. 62-64.
- [6] *Andreev S.S., Mullet B.R., Platonov Yu. Ya. et al.* // SPIE Proc. 1991. Vol. 1800. P. 195-208.
- [7] *Чумаков А.И., Смирнов Г.В., Андреев С.С. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. С. 495-499.
- [8] *Chumakov A.I., Smirnov G.V., Baron A.Q.R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. N 15. P. 2489-2492.
- [9] *Akhsakhalyan A.D., Fraerman A.A., Polushkin N.I. et al.* // Thin Solid Films. 1991. Vol. 203. P. 317-326.
- [10] *Кочубей Д.И., Бабанов Ю.А., Замараев К.И. и др.* // Рентгено-спектральный метод изучения структуры аморфных тел. Новосибирск: Наука, 1988. 306 с.
- [11] *Пономарев Ю.В., Савельев А.Б.* // Вестн. МГУ: Сер. 3. Физика и астрономия. 1989. Т. 30. № 5. С. 89.
- [12] *Ponomarev Yu.V., Savel'ev A.B.* // Twelfth European Crystallographic Meeting. Abstracts. Moscow, 1989. Vol. 1. P. 37.
- [13] *Андреев А.В.* // УФН. 1985. Т. 145. № 1. С. 113-136.