

12,13

Особенности локальной атомной структуры металлических слоев многослойных наноструктур $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками

© Э.П. Домашевская¹, А.А. Гуда², А.В. Чернышев¹, В.Г. Ситников³

¹ Воронежский государственный университет,
Воронеж, Россия

² Южный федеральный университет,
Ростов-на-Дону, Россия

³ Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия

E-mail: ftt@phys.vsu.ru

(Поступила в Редакцию 13 июля 2016 г.)

Многослойные наноструктуры (МНС) получали путем ионно-лучевого напыления в атмосфере аргона на поверхность вращающейся ситалловой подложки последовательно из двух мишеней, одна из которых была металлическая пластина сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, а второй мишенью была пластина из кварца (SiO_2) или кремния. Тонкая структура рентгеновских спектров поглощения XANES вблизи K -краев Co и Fe в образце $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ с оксидными прослойками подобна XANES металлической фольги Fe . Это указывает на наличие в металлических слоях МНС нанокристаллов CoFeZr с локальным окружением, аналогичным локальному окружению атомов в твердых растворах на основе ОЦК структуры Fe , что подтверждается также данными XRD. XANES вблизи K -краев поглощения Co и Fe в другой МНС с кремниевыми прослойками $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ отличается от XANES МНС с диэлектрической прослойкой SiO_2 , что свидетельствует о преобладающем влиянии связей Fe-Si и Co-Si в локальном окружении $3d$ -металлов Co и Fe при образовании ими силицидных фаз типа CoFeSi в более тонких бислоях этой МНС.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2014–2016 годы. Проект № 757 и Задание № 3.1868.2014/К, а также в рамках гранта Президента РФ для молодых ученых МК-7300.2016.2 А.А. Гуда.

DOI: 10.21883/FTT.2017.02.44065.296

1. Введение

Многослойные наноструктуры из слоев магнитных переходных металлов, чередующихся с немагнитными прослойками, привлекают большое внимание исследователей вследствие их новых и необычных магнитных свойств [1–9]. В частности, в многослойных структурах ферромагнетиков с прослойками немагнитного материала наблюдается периодическое изменение магнитного взаимодействия от ферромагнитного к антиферромагнитному между металлическими слоями при изменении толщины прослойки [1].

Комплексное магнитное поведение многослойных наноструктур (МНС) обусловлено несколькими конкурирующими межатомными взаимодействиями, в том числе обменными взаимодействиями d -электронов переходных металлов магнитных слоев, взаимодействиями атомов магнитных слоев и немагнитных прослоек. В частности, в работе [9] при исследовании МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si})_{100}$ с различными толщинами металлических слоев 2.5–3.5 нм и прослоек из аморфного кремния от 0.7 до 3.5 нм было обнаружено отрицательное магнетосопротивление, величина которого достигает максимума при толщине прослойки аморфного кремния ~ 1 нм. Этот факт не противоречил данным, получен-

ным ранее в структурах $\text{Fe}/a\text{-Si}$, в которых при таких же толщинах наблюдался максимум антиферромагнитного взаимодействия [5]. В силу гранулированного характера металлической прослойки $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, наблюдаемое отрицательное магнетосопротивление, проявляющееся при малом значении толщины $a\text{-Si}$, может быть связано не только со спин-зависимыми эффектами при туннелировании (или рассеянии) электронов между гранулами соседних металлических слоев, но и существенными межатомными взаимодействиями на интерфейсах.

В наших предыдущих работах [10,11] с помощью исследований методами XPS (X -ray photoelectron spectroscopy) и XANES (X -ray absorption near edge structure) были получены полуколичественные оценки участия кислорода в межатомном взаимодействии МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si})_{40}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$, свидетельствующие о большой вероятности образования в поверхностных слоях МНС толщиной 1–10 нм сложных „наноферритов“ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2(\text{CoO})$ и существовании четырехзарядных ионов циркония Zr^{4+} , которые наряду с двух- и трехзарядными ионами железа Fe^{2+} и Fe^{3+} , и частично Co^{2+} , участвуют в обменном взаимодействии металлических слоев МНС и обуславливают анизотропное магнетосопротивление. Кроме того, полученные данные свидетельствовали о частичном перемешивании

атомов металлического (Me) слоя и неметаллической прослойки, поскольку были одновременно зарегистрированы спектры атомов металлического слоя и прослойки. Это явление перемешивания способствует понижению порога перколяции и переходу к трехмерной проводимости, в результате чего температурная зависимость проводимости МНС оказывается сходной с аналогичной зависимостью для металл–диэлектрических наноконкомпозитов $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ [12,13].

На основе полученных результатов исследования МНС было сделано предположение о том, что наблюдаемое в МНС отрицательное магнетосопротивление может быть обусловлено антиферромагнитным взаимодействием гранул соседних металлических слоев в области низкоомных контактов. Либо соседние гранулы слоя слабо взаимодействуют, и система оказывается в суперпарамагнитном состоянии, при котором также может проявляться отрицательное магнетосопротивление. Величина отрицательного магнетосопротивления является достаточной для формирования планарного эффекта Холла, природа которого напрямую связана с изменением магнитного момента металлических гранул МНС [9].

Для выяснения роли различных межслоевых взаимодействий в работе [14] мы исследовали взаимодействие и фазообразование на межфазных границах (интерфейсах) между металлическими слоями $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и неметаллическими прослойками в МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si})_{40}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$ с вариацией толщин металлических слоев 1.4–15.0 nm и прослоек из аморфного кремния 0.5–4.0 nm и оксида кремния 0.5–13.0 nm, с помощью неразрушающего метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) [15] и дифрактометрии.

В интерфейсных слоях МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$ между металлическими слоями и оксидными прослойками были обнаружены силицидные фазы 3d-металлов Co и Fe толщиной около 0.1 nm. Однако в центральных слоях оксидных прослоек кремний сохраняет связи с кислородом в виде диоксида и субоксидов, и электромагнитные свойства таких МНС должны проявлять анизотропные свойства.

Другая ситуация наблюдается в МНС с прослойками из аморфного кремния $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si})_{40}$, практически весь кремний которых расходуется на образование немагнитных силицидных фаз [14]. И когда толщина такой прослойки превосходит толщину металлического слоя, то МНС становятся немагнитными [8].

Целью настоящей работы является исследование локальной атомной структуры 3d-металлов Co и Fe металлических слоев в двух МНС $(\text{CoFeZr}/\text{SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками и различными толщинами слоев 12/3 и 2/2 nm соответственно, методом рентгеновской спектроскопии поглощения с помощью регистрации и анализа тонкой структуры спектров XANES вблизи K-краев поглощения Fe и Co.

2. Способ получения МНС и методики их исследования

Многослойные наноструктуры $(\text{CoFeZr}/\text{SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками: диэлектрической SiO_2 и полупроводниковой из аморфного кремния *a*-Si, были получены путем ионно-лучевого напыления из двух мишеней на поверхность вращающейся ситалловой подложки [9,14]. Одной из мишеней была металлическая пластина сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, второй мишенью была пластина из кварца (SiO_2) или кремния. Распыление проводили в атмосфере аргона при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Толщины металлических слоев в двух разных МНС составляли 12 и 2 nm при сопоставимых толщинах неметаллических прослоек 3 и 2 nm. В результате общая толщина МНС с оксидными прослойками составляла 480 nm, в то время как общая толщина МНС образца с кремниевыми прослойками 180 nm.

Рентгеновские K-спектры поглощения XANES Fe и Co были получены на спектрометре Rigaku R-XAS в ЮФУ. Измерения проводились в режиме выхода флуоресценции, при котором в образовании спектров участвовали все слои МНС. Для выполнения сканирования по энергии с разрешением 1.4 eV для Fe и 1.9 eV для Co был использован монокристалл Ge (311). Следует отметить, что сигнал с образца с прослойками SiO_2 был примерно в 5 раз сильнее, что свидетельствует о большей суммарной толщине металлических слоев.

3. Рентгеновские K-спектры поглощения XANES Fe и Co в МНС $(\text{CoFeZr}/\text{SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками

В работах [16,17] было показано, что коэффициент рентгеновского поглощения может быть определен как отношение интенсивности флуоресценции I_f к интенсивности возбуждающего излучения I_0 :

$$\mu(E) = I_f/I_0.$$

За счет более низкого уровня фонового излучения чувствительность методики измерения поглощения по выходу флуоресценции на порядки выше к состоянию и окружению возбуждаемых атомов, чем методика на поглощение. Это особенно актуально для образцов тонких пленок и низкой концентрации исследуемого элемента в веществе. Для регистрации сигнала флуоресценции обычно используются полупроводниковые детекторы, энергетическое разрешение которых позволяет отсекай упругое рассеяние от образца.

В области энергий, соответствующих интервалу околопорогового поглощения XANES (50–100 eV от главного края поглощения), фотоэлектрон обладает небольшой кинетической энергией [18]. Это позволяет вовлекать в процесс рассеяния достаточно большое количество атомов окружения, находящихся на значительных

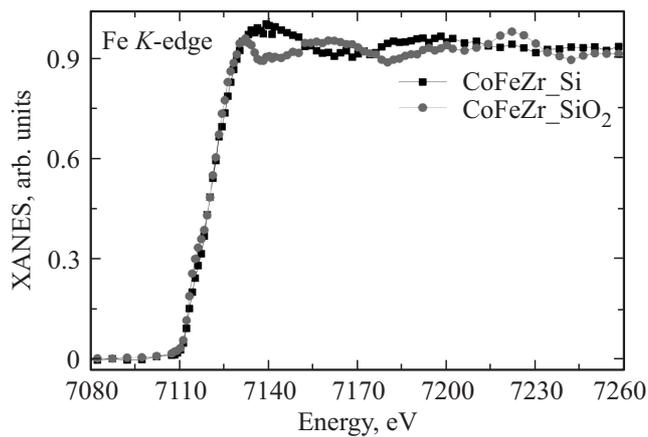


Рис. 1. XANES Fe K -края поглощения МНС $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками.

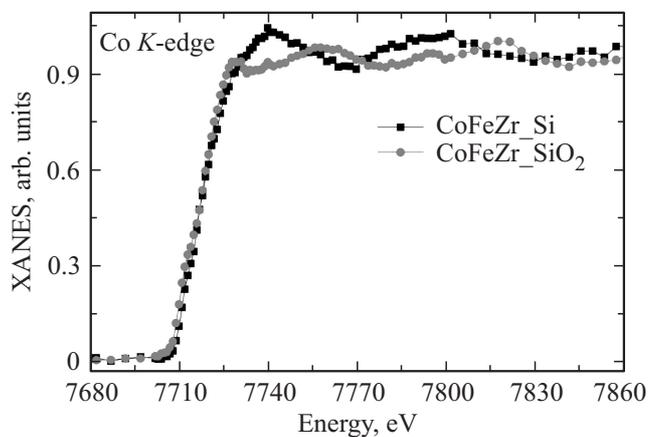


Рис. 2. XANES Co K -края поглощения МНС $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками.

расстояниях от поглощающего. Поэтому тонкая структура спектров XANES является результатом интерференции первичной фотоэлектронной волны, выходящей из поглощающего атома, и вторичных, многократно отраженных от соседних атомов. В результате интерференционные эффекты взаимодействия первичной и отраженной волн зависят от взаимного расположения поглощающего атома и атомов окружения. И несмотря на трудности интерпретации, тонкая структура спектров XANES и ее качественное изменение при переходе от одного соединения к другому используются для изучения ближайшего окружения поглощающего атома. В дипольном приближении тонкая структура рентгеновских K -краев поглощения отражает распределение локальной (на атомах данного элемента) парциальной плотности свободных p -состояний в зоне проводимости сплава, твердого раствора и/или соединения в составе любого композита сложного состава.

На рис. 1 приведены полученные нами Fe K -края поглощения XANES от двух МНС $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{30}$ и $(\text{CoFeZr}/a\text{-Si})_{40}$ с различными прослойками, и на рис. 2

приведены Co K -края поглощения XANES от тех же двух МНС. Очевидным результатом сравнения спектров от двух МНС на каждом из этих рисунков является тот факт, что тонкая структура K -спектров поглощения XANES и Co, и Fe в МНС с различными прослойками существенно отличаются одна от другой. Из этого следует, что локальное окружение одних и тех же металлов Co и Fe в металлических слоях с номинальным атомным составом $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ является существенно различным в двух МНС с различными прослойками и зависит от состава и физико-химических свойств прослойки SiO_2 или $a\text{-Si}$, и ее взаимодействия с металлическим слоем. На возможное различие фазового состава металлических слоев показывали, однако, менее однозначно, данные рентгенодифракционных исследований этих же МНС, полученные нами в предыдущей работе [14]. Одновременно с этим бросается в глаза подобие ТСКП спектров XANES обоих металлов, Co и Fe, в каждой из этих МНС.

3.1. Локальная атомная структура металлических слоев многослойной наноструктуры $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ с оксидными прослойками. Для определения локального состояния d -металлов Co и Fe и атомной структуры ближнего порядка в металлических слоях МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$ с оксидными прослойками сначала наложим друг на друга XANES K -спектры двух металлов Co и Fe от этой МНС в шкале Co K -края (рис. 3), чтобы убедиться в фактическом совпадении ТСКП спектров XANES этих металлов. Это происходит потому, что два металла Co и Fe вместе с цирконием образуют нанокристаллы твердого раствора CoFeZr на основе структуры железа $\alpha\text{-Fe}$ с кубической объемноцентрированной решеткой Бравэ. В последнем нас убеждает прекрасное соответствие XANES K -спектров МНС и эталонного спектра металлической фольги $\alpha\text{-Fe}$, приведенных на рис. 4.

Таким образом, металлические слои МНС $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$ с оксидными прослойками имеют

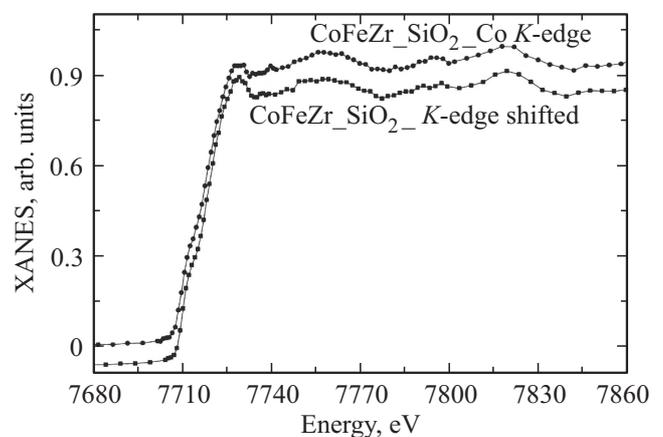


Рис. 3. Наложенные друг на друга XANES спектры поглощения Co K -края и Fe K -края (сдвинут в шкалу Co K -края) от образца МНС $(\text{CoFeZr/SiO}_2)_{32}$ с оксидными прослойками.

локальную структуру, аналогичную кубической структуре ОЦК-решетки α -Fe с координационным числом 8. Аналогичная форма двух K -спектров Co и Fe указывает на подобную симметрию расположения атомов этих металлов в твердых растворах $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ на основе ОЦК-структуры железа в металлических слоях МНС ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2$)₃₂ с оксидными прослойками, соотношение толщин которых в нанометрах составляет 12/3.

Характерное отличие Co K -спектра твердого раствора металлических слоев МНС от спектра металлической фольги Co, приведенное на рис. 5, подтверждает различие ближних порядков ОЦК-структуры твердого раствора $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ металлических слоев МНС с координационным числом 8 и гексагональной плотноупакованной структуры α -Co фольги с координационным числом 12. Полученные результаты о локальной атомной структуре металлических слоев МНС ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2$)₃₂ согласуются с нашими рентгенодифракционными данными [14] о нанокристаллической структуре сплавов $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в металлических слоях этой МНС, близких к половинному составу $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$.

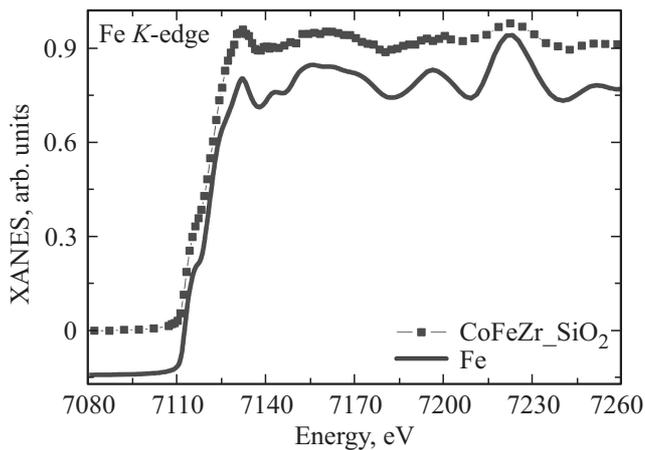


Рис. 4. XANES Fe K -края поглощения МНС ($\text{CoFeZr}/\text{SiO}_2$)₃₂ с оксидными прослойками и металлической фольги α -Fe.

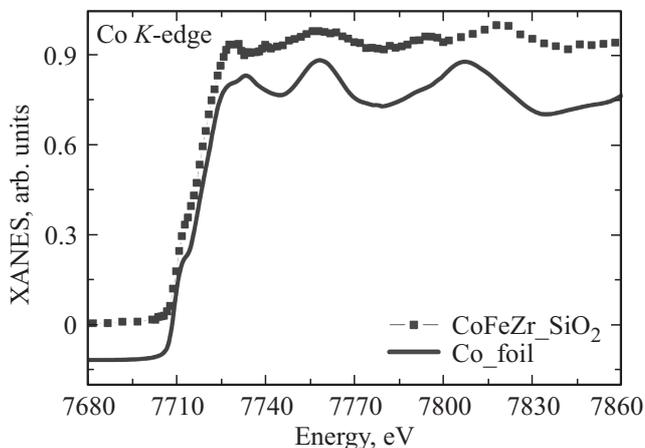


Рис. 5. XANES Co K -края поглощения МНС ($\text{CoFeZr}/\text{SiO}_2$)₃₂ с оксидными прослойками и металлической фольги Co.

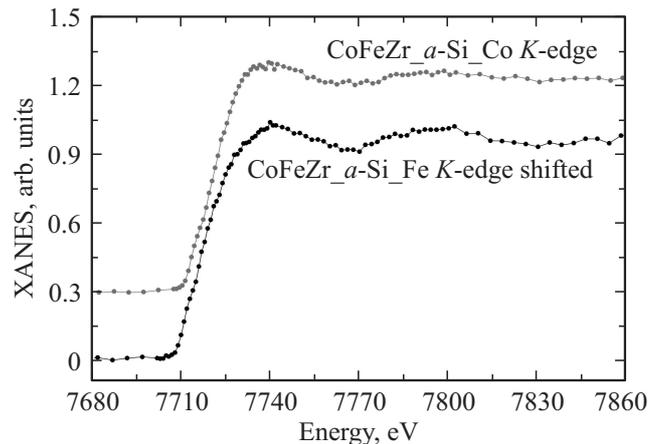


Рис. 6. Наложенные друг на друга спектры поглощения Co K -края и Fe K -края (сдвинут в шкалу Co K -края) от образца МНС ($\text{CoFeZr}/a\text{-Si}$)₄₀ с прослойками из аморфного кремния.

3.2. Локальная атомная структура металлических слоев многослойной наноструктуры ($\text{CoFeZr}/a\text{-Si}$)₃₀ с прослойками из аморфного кремния. Для определения локального состояния Co и Fe в металлических слоях МНС ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si}$)₄₀ с номинальными прослойками аморфного кремния, оказавшимися в основном силицидами $3d$ -металлов Co и Fe [14], в том числе $\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}\text{Si}$, сначала наложим друг на друга XANES K -спектры двух металлов Co и Fe в шкале Co K -края (рис. 6), чтобы убедиться в фактическом совпадении их ТСКП (тонкая структура K -спектров поглощения) между собой. Совпадение ТСКП K -краев XANES Co и Fe от исследуемой МНС свидетельствует о принадлежности обоих металлов одной фазе, скорее всего, силицидной фазе $\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}\text{Si}$, в которой оба металла имеют одинаковый ближний порядок, и прежде всего координационное число. Аналогичное совпадение ТСКП K -краев XANES двух металлов Co и Fe получили авторы в работе [19] при исследовании дихроизма K -краев поглощения в силицидах $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ при $x = 0.2-0.5$ с ТСКП, близкой к ТСКП K -краев МНС ($\text{CoFeZr}/a\text{-Si}$)₄₀, приведенной на рис. 6. Следует отметить, что энергетическое положение первых главных максимумов поглощения K -краев обоих металлов Co и Fe наших спектров и спектров работы [19] совпадают в соответствующей шкале энергий.

Сравнение же спектров МНС ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/a\text{-Si}$)₄₀ со спектрами эталонных образцов оксидных и металлических фаз Fe (рис. 7) и Co (рис. 8), убеждает в их существенном различии и позволяет исключить прежде всего фазу Co_3O_4 с резким пиком за главным K -краем поглощения из искомого состава металлических слоев анализируемой МНС. Влияние же других оксидных фаз железа FeO, Fe_2O_3 и кобальта CoO, обнаруженных нами в первых поверхностных слоях (толщиной менее 10 nm) при съемке синхротронных спектров XANES L_α Fe и Co и спектров XPS в более мягкой области рентгеновского спектра [10–11], при интегральном исследовании всей

толщи МНС себя не проявляет. Тем не менее при анализе ТСКП *K*-краев XANES Co и Fe от исследуемой МНС (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀/a-Si)₄₀ следует учитывать совпадение предкраевой структуры и положения главных краев в интервале около 20 eV с *K*-краем первой МНС (CoFeZr/SiO₂)₃₂, приведенное на рис. 1 и 2, с металлическими слоями из нанокристаллических твердых растворов CoFeZr на основе ОЦК-решетки α-Fe.

Таким образом, можно заключить, что XANES спектры Co *K*-края и Fe *K*-края поглощения МНС (CoFeZr/a-Si)₄₀, свидетельствуют о преобладающей силицидной фазе Co_{0.4}Fe_{0.6}Si, которая является результатом твердофазного взаимодействия аморфного кремния прослоек с металлическими слоями. Преобладание силицидной фазы в МНС (CoFeZr/a-Si)₄₀ мы обнаружили в предыдущей работе [14], исследуя тонкую структуру Si *L*_{2,3}-спектров кремния в этих МНС и рентгеновскую дифракцию. Однако дополнительные дифракционные измерения, приведенные в следующем разделе, указывают на присутствие небольшой доли металлической фазы твердого раствора CoFeZr на основе ОЦК-решетки Fe в металлосодержащих слоях МНС (CoFeZr/a-Si)₄₀.

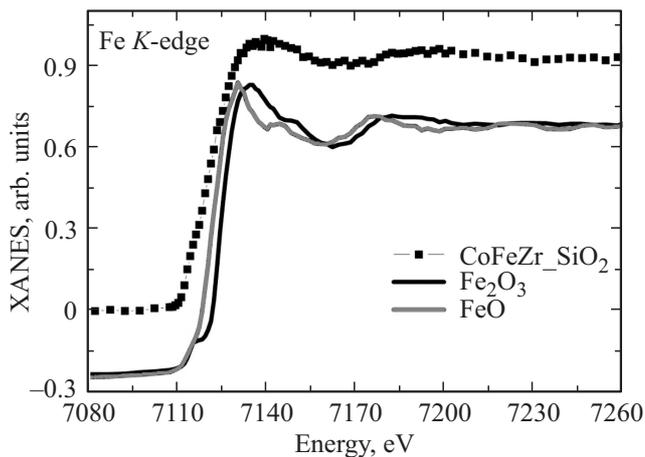


Рис. 7. XANES Fe *K*-края поглощения МНС (CoFeZr/a-Si)₄₀ с прослойками из аморфного кремния и оксидов Fe.

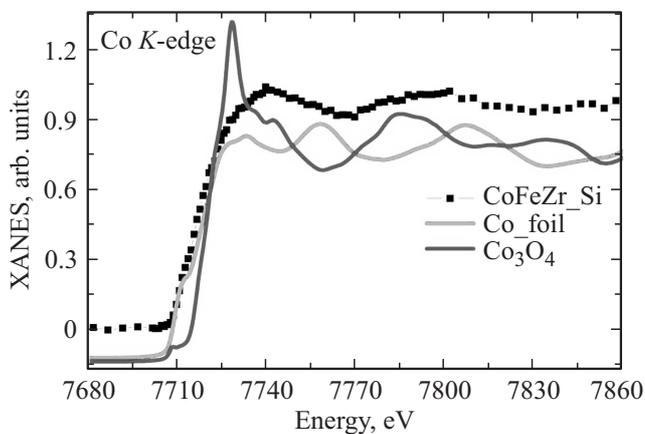


Рис. 8. XANES Co *K*-края поглощения МНС (CoFeZr/a-Si)₄₀, фольги Co и оксида кобальта Co₃O₄.

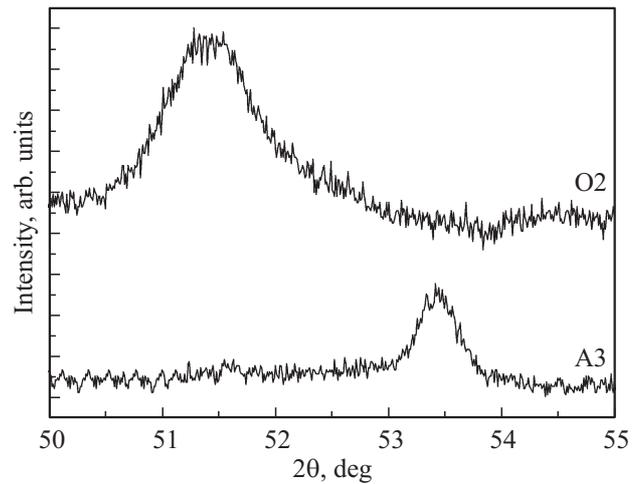


Рис. 9. Дифракционные линии (110) в интервале углов $2\theta = 51-54^\circ$ образцов МНС с прослойками из диоксида кремния (CoFeZr/SiO₂)₃₂ (O2) и аморфного кремния (CoFeZr/a-Si)₄₀ (A3) (Co *K*α-излучение).

4. Рентгеновская дифракция МНС (CoFeZr/SiO₂)₃₂ и (CoFeZr/a-Si)₄₀ с различными прослойками

В подтверждение приведенных выше результатов приводим на рис. 9 картину рентгеновской дифракции в интервале углов $2\theta = 51-54^\circ$ (Co *K*-излучение дифрактометра ДРОН-4.07) с единственной дифракционной линией (110) от МНС с прослойками из диоксида кремния (O2) и аморфного кремния (A3). Главный максимум дифракционной линии МНС с прослойкой a-Si ($d = 1.99 \text{ \AA}$ (53.5°)) соответствует фазе Co_{0.4}Fe_{0.6}Si [20], в то время как слабый подъем интенсивности в области от $2\theta = 53.5^\circ$ и до главного максимума соответствует самым интенсивным линиям сплавов CoFe разного состава [21–23].

Противоположная ситуация наблюдается в МНС (CoFeZr/SiO₂)₃₂ с прослойками из диоксида кремния (O2). В этой МНС главный максимум дифракционной линии соответствует сплавам Co_{0.5}Fe_{0.5} [21], Co_{0.72}Fe_{0.28} [22] и Co_{0.3}Fe_{0.7} [23]. Поэтому отдельные нанокристаллы металлических слоев МНС (CoFeZr/SiO₂)₃₂ могут иметь несколько различающийся атомный состав в пределах от Co_{0.3}Fe_{0.7} (Zr) до Co_{0.7}Fe_{0.3} (Zr), что в среднем соответствует твердому раствору половинного состава Co_{0.5}Fe_{0.5} (Zr).

5. Заключение

Подобие тонкой структуры *K*-спектров поглощения XANES двух 3*d*-металлов Co и Fe в образце (CoFeZr/SiO₂)₃₂ с оксидными прослойками и спектра XANES металлической фольги Fe указывает на наличие в металлических слоях этой МНС нанокристаллов

твердых растворов CoFeZr с локальным окружением, аналогичным локальному окружению атомов в твердых растворах на основе ОЦК-структуры Fe. Это подтверждается также данными XRD. И поскольку в центральных слоях оксидных прослоек кремний сохраняет связи с кислородом в виде диоксида и субоксидов [14], то электромагнитные свойства таких МНС должны проявлять анизотропные свойства.

Анализ такого же совпадения между собой тонкой структуры *K*-спектров XANES двух металлов Co и Fe в другой МНС с кремниевыми прослойками (CoFeZr/*a*-Si)₄₀ и их отличие от XANES МНС с диэлектрической прослойкой SiO₂, указывает на преобладающее влияние связей Fe–Si и Co–Si в локальном окружении 3*d*-металлов Co и Fe при образовании ими силицидных фаз типа CoFeSi в более тонких бислоях этой МНС. Это также подтверждается данными XRD.

И поскольку практически весь кремний прослойек расходуется на образование немагнитных силицидных фаз 3*d*-металлов Co и Fe, как показывают наши предыдущие исследования неметаллических прослоек и интерфейсов методом УМРЭС в этих МНС [14], то когда толщины таких прослоек сопоставимы или превосходят толщины металлических слоев, такие МНС становятся немагнитными.

Список литературы

- [1] В.О. Васьяковский, Г.С. Патрин, Д.А. Великанов, А.В. Свалов, П.А. Савин, А.А. Юрченко, Н.Н. Щеголева. ФТТ **49**, 291 (2007).
- [2] Л.А. Чеботкевич, А.В. Огнев, Ю.П. Иванов, К. Lenz, А.И. Ильин, К.С. Ермаков. ФТТ **51**, 1761 (2009).
- [3] R.S. Iskhakov, S.V. Stolyar, V.Yu. Yakovchuk, M.V. Chizhik. Solid State Phenomena **168–169**, 69 (2011).
- [4] A.V. Pakhomov, X. Yan. Solid State Commun. **99**, 139 (1996).
- [5] Б.А. Аронзон, Д.Ю. Ковалев, А.Н. Лагарьков, Е.З. Мейлихов, В.В. Рыльков, М.А. Седова, Н. Негре, М. Гойран, Дж. Леотин. Письма в ЖЭТФ **2**, 87 (1999).
- [6] И.В. Быков, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, В.С. Гушин, А.А. Козлов, Т. Масумото, С. Онума. ФТТ **2**, 268 (2005).
- [7] A.M. Kadigrobov, M.V. Fistul, K.V. Efetov. Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. **73**, 235 (2006).
- [8] Ju. Chekrygina, A. Devizenko, Yu. Kalinin, E. Lebedeva, I. Shipkova, A. Sitnikov, N. Syr'ev, S. Vyzulin. Solid State Phenomena **190**, 605 (2012).
- [9] Б.А. Аронзон, А.Б. Грановский, А.Б. Давыдов, М.Е. Докукин, Ю.Е. Калинин, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков, А.В. Ситников, В.В. Тугушев. ЖЭТФ **130**, 127 (2006).
- [10] Э.П. Домашевская, А.В. Чернышев, С.Ю. Турищев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Д.Е. Марченко. ФТТ **55**, 1202 (2013).
- [11] Э.П. Домашевская, А.В. Чернышев, С.Ю. Турищев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Д.Е. Марченко. ФТТ **56**, 2219 (2014).
- [12] Э.П. Домашевская, С.А. Сторожилов, С.Ю. Турищев, В.М. Кашкаров, В.А. Терехов, О.В. Стогней, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, С.Л. Молодцов. Изв. РАН. Сер. физ. **72**, 4, 479 (2008).
- [13] С.А. Сторожилов. Дис. канд. физ.-мат. наук. ВГУ, Воронеж (2008). 145 с.
- [14] Э.П. Домашевская, В.А. Терехов, С.Ю. Турищев, Д.Е. Спирин, А.В. Чернышев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. ФТТ **58**, 991 (2016).
- [15] Т.М. Зимкина, В.А. Фомичев. Ультратонкая рентгеновская спектроскопия. Изд-во ЛГУ, Л. (1971). 132 с.
- [16] P.A. Lee, P.H. Citrin, P. Eisenberger, B.M. Kincaid. Rev. Mod. Phys. **53**, 769 (1981).
- [17] M. Newville. Fundamentals of XAFS. Consortium for Advanced radiation sources. Univ. of Chicago, Chicago, IL. USA. Revision 1.4. (2003). 36 p.
- [18] J.E. Muller, O. Jepsen, J.W. Wilkins. Solid State Commun **42**, 365 (1982).
- [19] G.R. Hearne, G. Diguët, F. Baudalet, J.P. Itié, N. Manyala. J. Appl. Phys. **17**, 117 (2015).
- [20] JCPDS — Int. Centre for Diffraction. Data. 2012. № 01-074-5667.
- [21] JCPDS — Int. Centre for Diffraction. Data. 2001. № 51-0740.
- [22] JCPDS — Int. Centre for Diffraction. Data. 2001. № 49-1588.
- [23] JCPDS — Int. Centre for Diffraction. Data. 2001. № 48-1817.