

Применение XRR и USXES для анализа тонких пленок Fe-Si

Я.А. Пешков¹, К.А. Барков¹, Е.И. Гайворонская¹, А.В. Ситников², С.А. Ивков¹

¹ Воронежский государственный университет, 394018 Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

² Воронежский государственный технический университет, 394026 Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14

Главным ограничением для развития магниторезистивных устройств остается отсутствие эффективного источника спин-поляризованного тока. Широко используемый аморфный сплав $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ обладает спиновой поляризацией лишь около 65% [1], а структурные дефекты в кристаллических сплавах Гейслера не позволяют достичь теоретически предсказанной полуметалличности. Перспективной альтернативой являются аморфные сплавы псевдо-Гейслера $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, для которых при $x = 0.65$ достигнута спиновая поляризация около 70% [2], что значительно выше, чем у поликристаллического Fe_3Si (45±5%). В данной работе мы исследуем влияние морфологии на электронное строение тонкой пленки $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$.

Тонкая плёнка $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ была изготовлена ионно-лучевым распылением составной мишени Fe-Si при давлении в рабочей камере $\sim 5 \times 10^{-4}$ Торр. В качестве подложки использовалась пластина монокристалла Si (100) с буферным слоем SiO_2 . Слой SiO_2 предназначался для дополнительной аморфизации тонкой пленки и предотвращения межфазных взаимодействий на интерфейсе пленка-подложка. Для предотвращения окисления компонентов пленки был нанесен поверхностный слой Al толщиной ~ 9 нм. Кристаллическую структуру образца исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-07 (CuK_α). Атомный состав исследовался рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS). Толщина и массовая плотность определялись путём моделирования экспериментальной кривой рентгеновской рефлектометрии (XRR), полученной на дифрактометре ДРОН-8Т. Электронная структура изучалась ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопией (USXES) на установке РСМ-500. Si $L_{2,3}$ спектр позволяет получить информацию о локальной парциальной плотности состояний валентной зоны кремния.

Данные рентгеновской дифракции демонстрируют аморфное состояние тонкой пленки сплава $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$, что является необходимым условием для высокого значения спиновой поляризации на уровне Ферми. Анализ XPS данных пленки показал содержание Fe около 50.3 ат.%, что практически соответствует стехиометрическому моносилциду FeSi. Моделирование XRR кривой (рис. 1а) с помощью программы GenX позволило вычислить толщину пленки (134 нм) и массовую плотность аморфного сплава $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ (6.23 г/см^3). Такое значение плотности тонкой пленки близко к объёмному поликристаллическому FeSi $\sim 6.2 \text{ г/см}^3$ [3], в то время как плотность высшего силицида FeSi_2 существенно ниже $\sim 5.1 \text{ г/см}^3$. Это дает основание полагать, что в образце сформировалась единственная фаза аморфного FeSi.

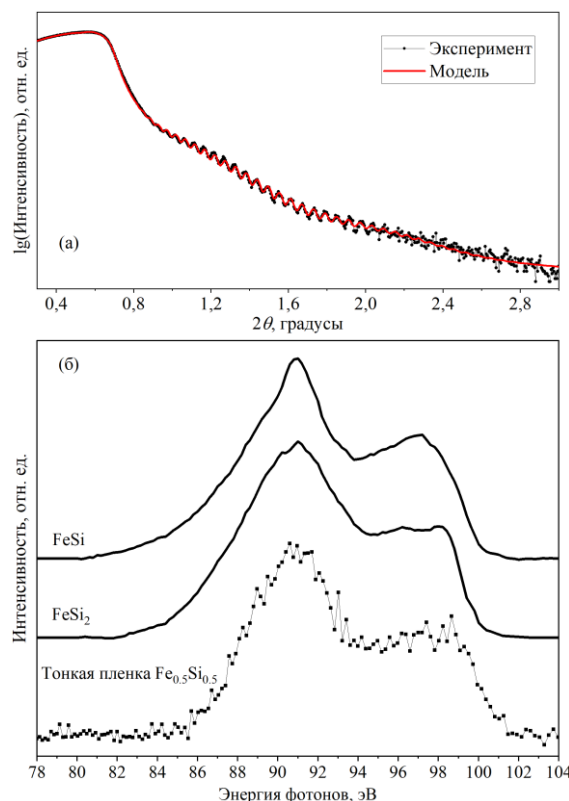


Рис. 1. а – XRR-кривая тонкой пленки $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ (чёрные точки – экспериментальные данные, красная линия – модельная кривая). б – экспериментальный Si $L_{2,3}$ спектр образца и эталонные спектры соединений Fe-Si.

На рис. 1б представлен экспериментальный Si $L_{2,3}$ тонкой пленки аморфного сплава $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ наряду с эталонными спектрами соединений FeSi и FeSi_2 [4]. Спектр пленки можно разделить на две области: область основного максимума, расположенного на 88-93 эВ и относящегося к негибридизованным 3s состояниям Si, и область плеча на 94-100 эВ, простирающуюся до потолка валентной зоны. Сравнение спектров FeSi, FeSi_2 и тонкой пленки демонстрирует, что аморфная структура сплава $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ сильно влияет на плотность состояний. Самым существенным изменением является уширение основного максимума, говорящее об уменьшении расстояния между соседними атомами Si в аморфной фазе по сравнению с кристаллическим FeSi.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-29-20055, <https://rscf.ru/project/26-29-20055>.

1. S.X. Huang, T.Y. Chen, and C.L. Chien. Appl. Phys. Lett., 2008, 92, 242509.
2. J. Karel, et al. Phys. Rev. Materials, 2018, 2, 064411.
3. Y.V. Kudryavtsev, et al. J. Appl. Phys., 2001, 90, 2903.
4. J.J. Jia, et al. Phys. Rev. B, 1992, 46, 9446.