

УДК 539.234

© 1993

## ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В МАГНИТНЫХ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ FeCu, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

*С. Г. Овчинников, В. П. Кононов, В. М. Попел, А. Е. Худяков,  
Е. П. Васильева, В. Н. Заблуда, И. С. Эдельман, И. В. Староверова,  
Б. Е. Блехер, А. С. Паршин*

Получена мультислойная структура из 10 слоев Fe по 25 Å, разделенная 9 слоями Cu по 50 Å. Обнаружено резонансное усиление эффекта Фарадея в области длин волн  $\lambda = 700$  нм, отсутствующее в пленках и объемном железе.

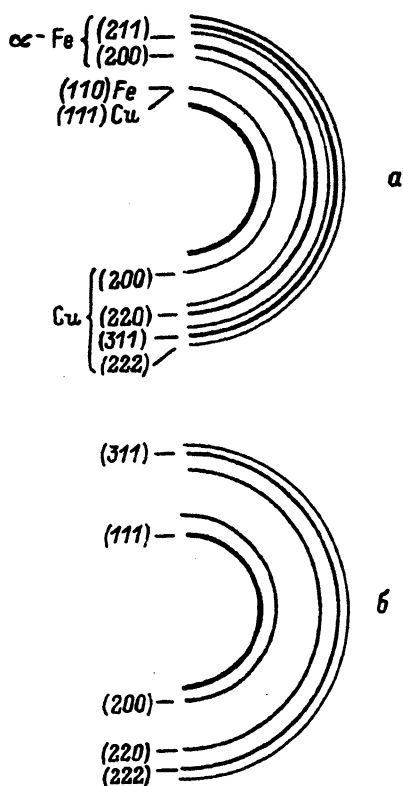
Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) тонких пленок и мультислойных структур в сверхвысоком вакууме дает новые возможности конструирования новых материалов и в последние годы широко применяется для создания ультратонких магнитных пленок и слоистых структур на их основе. В настоящей работе сообщается о создании мультислойных структур FeCu методом МЛЭ и об обнаружении усиления эффекта Фарадея (ЭФ) в этих структурах в области длин волн  $\lambda = 700$  нм.

Ранее были исследованы двухслойные системы ферромагнитный металл/благородный металл, в которых обнаружено резонансное усиление магнитооптического эффекта Керра [1-6]. Для объяснения этого эффекта привлекались различные механизмы: плазменный резонанс свободных носителей в ферромагнитном [2] или в благородном [3] слоях, резкое изменение эффективных оптических констант в слоистой системе [4]. Теоретический анализ с учетом вкладов границ металл-неметалл [7] показал, что наблюдаемый резонанс удовлетворительно описывается с помощью изменений эффективных оптических констант двухслойной системы. ЭФ позволяет в большей степени, чем эффект Керра, использовать саму мультислойность системы, а также более прост для анализа.

Напыление пленок проводилось в установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара» (предварительный вакуум  $10^{-10}$  мм рт. ст.) [8]. Испаряемые материалы Fe и Cu загружались в тигли из нитрида бора и распылялись поочередно на стеклянные подложки. Температура подложек комнатная. Расстояние тигль—подложка ~200 мм. Рабочий вакуум  $10^{-9}$  мм рт. ст. Скорость роста пленки  $\sim 1 \text{ Å} \cdot \text{с}^{-1}$ . В том же цикле получалась пленка железа толщиной, эквивалентной суммарной толщине слоев Fe в слоистой пленке. Слоистая пленка Fe/Cu состояла из 10 слоев Fe каждый толщиной 25 Å и 9 слоев Cu по 50 Å, пленка железа имела толщину 200 Å. В определенном цикле была напылена пленка Fe—Cu с соотношением компонент Fe : Cu = 17:50 толщиной 630 Å, т. е. содержание Fe в этой пленке составляло 0.7—0.8 от пленки Fe, полученной в предыдущем цикле.

Структуру пленки и их фазовый состав исследовали на просвечивающем электронном микроскопе ПРЭМ-200 методом дифракции электронов (ускоряющее напряжение 125 кВ).

Рис. 1. Схема электронограмм мультислойной пленки Fe/Cu (а) и однородной пленки Fe—Cu (б).



Расчет показал, что электронограмма мультислойной пленки Fe/Cu содержит набор линий  $\alpha$ -железа и меди, т. е. представляет собой наложение двух электронограмм  $\alpha$ -Fe (ОЦК-решетка) и Cu (ГЦК-решетка).

В однородной пленке Fe—Cu, полученной при одновременном напылении из двух источников, сформировался твердый раствор FeCu на основе ГЦК-решетки (рис. 1).

Профили концентраций элементов Fe, Cu, C, O исследованы методом электронной оже-спектроскопии (ЭОС) на сканирующем оже-микрондрозде РН1-660 фирмы Perkin Elmer (США). Послойный анализ проводили последовательным стравливанием поверхностных слоев пленки ионами аргона при ускоряющем напряжении 3.0 кВ. Атомные концентрации элементов определяли из амплитуд оже-пиков элементов по стандартной методике с использованием коэффициентов элементной чувствительности.

Результаты послойного анализа одного из образцов представлены на рис. 2. Первоначальное уменьшение концентрации углерода связано с удалением слоя поверхностных углеводородных загрязнений, всегда присутствующих на поверхности образцов. Одновременно с удалением углерода с поверхности возрастает амплитуда сигнала меди от верхнего слоя мультислойной структуры. Содержание железа в этой области структуры незначительно. По мере дальнейшего стравливания структуры отчетливо наблюдаются осцилляции концентраций Cu и Fe, причем минимальному содержанию меди на данной глубине соответствует максимальное содержание железа, и наоборот. Эти осцилляции концентраций Cu и Fe при послойном стравливании подтверждают чередование слоев Fe и Cu. Полному разрешению слоистой структуры препятствуют характерные для данного метода анализа эффекты неравномерного ионного травления, атомного смешивания и диффузии элементов пленки под действием ионного пучка.

Содержание углерода в глубине структуры незначительно. Атомная концентрация кислорода на поверхности приблизительно 3%, а в глубине образца не превышает 2%.

ЭФ измерялся нулевым методом с использованием модуляции плоскости поляризации световой волны. Точность  $\pm 0.2$  мин. Полевая зависимость ЭФ в поле до 10 кЭ измерялась в двух геометриях: а) нормальной, когда внешнее магнитное поле и направление светового луча нормальны плоскости пленки; б) продольной, когда магнитное поле направлено в плоскости пленки, а световой луч распространяется под углом к ней. В первом случае измеряемый ЭФ пропорционален нормальной к плоскости пленки компоненте намагниченности, во втором — продольной.

Спектры ЭФ снимались в нормальной геометрии в поле 10 кЭ в спектральном интервале 400—800 нм. Измерения проводились непосредственно после получения пленок, после недельной выдержки в атмосфере, а также после повторяющихся отжигов в вакууме  $10^{-6}$  мм рт. ст. в течение 30 мин при температурах от 150 до 250 °С.

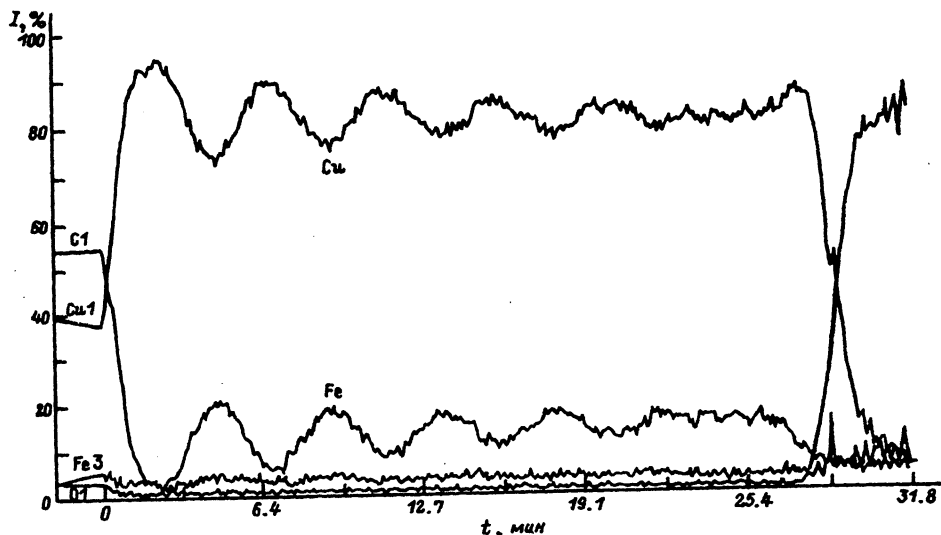


Рис. 2. Послойный оже-анализ мультислойной пленки Fe/Cu.

На рис. 3 показаны полевые зависимости ЭФ во всех трех исследованных типах пленок для  $\lambda = 550$  нм в нормальной геометрии. Абсолютная величина ЭФ свидетельствует о том, что во всех случаях, включая и смесь Fe—Cu, он связан с ферромагнитным материалом. Для пленки Fe величина ЭФ соответствует литературным данным [9]. В продольной геометрии в пленках Fe и Fe/Cu наблюдаются прямоугольные петли гистерезиса, что вместе с данными рис. 1 говорит о наличии плоскостной магнитной анизотропии в этих пленках. При этом в мультислойной пленке Fe/Cu коэрцитивная сила  $H_c$  приблизительно на порядок превышает  $H_c$  пленки Fe, что, по-видимому, объясняется размерным эффектом.

Спектры ЭФ исследованных пленок показаны на рис. 4. Для пленки Fe спектр ЭФ соответствует литературным данным [9]. Спектр ЭФ смешанной пленки Fe—Cu практически повторяет спектр ЭФ железной пленки, а различие в величине ЭФ примерно соответствует разнице в содержании железа в этих двух случаях. Совершенно иная картина наблюдается для мультислойной пленки Fe/Cu: вблизи 700 нм появляется довольно широкий максимум, при этом максимальная величина ЭФ вдвое превышает ЭФ на соответствующей длине волны в пленке Fe. Из сравнения кривых 2 и 3 (рис. 4) следует, что такой эффект не может быть связан с наличием границ между слоями железа и меди и, возможно, с их многократным чередованием.

Выдержка в атмосфере и вакуумный отжиг при температурах до 300 °C не привели к существенным изменениям спектров железной и смешанной пленок, но вызвали немонотонные изменения амплитуды и ширины спектрального максимума в мультислойной пленке (рис. 2). Наиболее вероятными процессами при таких температурах являются межслоевая диффузия атомов и их агрегация, т. е. процессы, приводящие к некоторому изменению характера межслоевых границ.

Кривые 4—6 на рис. 4 свидетельствуют о том, что такого рода процессы имеют место, но резонансный характер спектра ЭФ при этом сохраняется, т. е. сохраняется слоистая структура пленки.

Резонансное изменение спектра ЭФ, по-видимому, можно связывать с резким изменением оптических характеристик слоев меди вблизи  $\lambda = 700$  нм, как это было сделано для случая эффекта Керра [7]. Действительно, величина ЭФ пропорциональна разности комплексных коэффициентов преломления ферромагнитного материала для волн, поляризованных по правому и левому кругу по отношению к направлению намагниченности

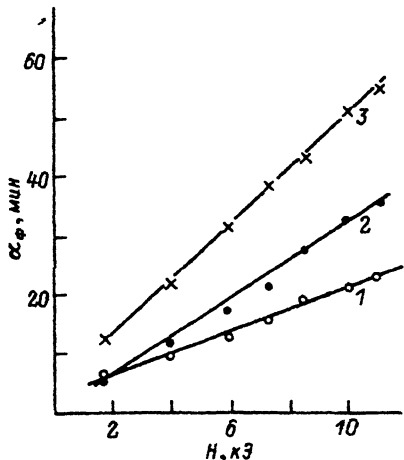


Рис. 3. Полевые зависимости ЭФ при комнатной температуре на длине волны 550 нм для пленок Fe—Cu (1), Fe (2), Fe/Cu (3).

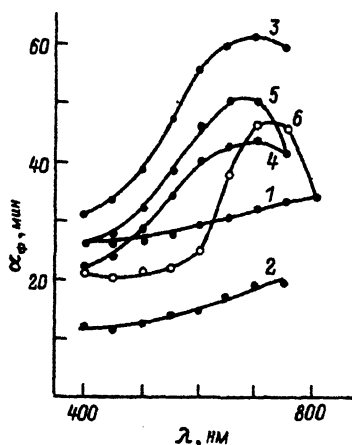


Рис. 4. Спектральные зависимости ЭФ для пленок Fe (1), Fe—Cu (2), Fe/Cu (3—6).

3 — через час после получения пленки, 4 — после 7 суток выдержки в атмосфере, 5 — после отжига в вакууме в течение 30 мин при температуре 250 °С, 6 — после отжига при 310 °С. Поле измерения 8.5 кЭ.

$$\alpha_{\text{Ф}} \sim (n_+^* - n_-^*), \quad (1)$$

где  $n_+^* = (n_+ - ik_+)$ ,  $n_-^* = (n_- - ik_-)$ .

При учете комплексного показателя преломления  $n^* = (n - ik)$  немагнитного металла, граничащего с ферромагнитным, в выражении для ЭФ появляются члены, содержащиеся в знаменателе разность  $(n^2 - k^2)$ . В случае сильного изменения  $n$  и  $k$  в определенном спектральном интервале, что как раз имеет место в случае Cu вблизи 600 нм, это может привести к резонансному возрастанию ЭФ.

Исследование влияния количества слоев, их параметров и материала немагнитного слоя на характер спектра ЭФ должно помочь в объяснении обнаруженного резонансного усиления ЭФ в мультислойной пленочной системе.

#### Список литературы

- [1] Katayama T et al. // IEEE Trans. Magn. 1987. V. MAG-23. N 5. P. 2949—2951.
- [2] Feil H., Haas G. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 1. P. 65—68.
- [3] Katayama T. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 14. P. 1426—1429.
- [4] Reim W., Weller D. // Appl. Phys. Lett. (USA). 1988. V. 53. N 24. P. 2453—2454.
- [5] Liang-Yao Chen et al. // Proc MRS Symp. 1989. V. 150. P. 109.
- [6] McGahan W. A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. P. 2479.
- [7] Liang-Yao Chen et al. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 12. P. 7547—7555.
- [8] Установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Новосибирск, 1986. 21 с.
- [9] Clemens K. H., Jaumann J. // Z. Phys. 1963. V. 173. N 1. P. 135—148.

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
4 августа 1992 г.