

Ферромагнетизм при комнатной температуре в двухслойной структуре $Du_{1-x}Ni_x/Ni$: магнитооптические измерения *in situ*

Н. Н. Косырев⁺¹⁾, С. Г. Овчинников^{+*}

⁺ Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отд. РАН, 660036 Красноярск, Россия

^{*} Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 30 апреля 2008 г.

После переработки 17 июня 2008 г.

Исследованы *in situ* двухслойные структуры $Du_{1-x}Ni_x/Ni$ непосредственно в сверхвысоковакуумной камере в процессе напыления с помощью поверхностного меридионального эффекта Керра по оригинальной методике. Показано ферромагнитное упорядочение в слое сплава $Du_{1-x}Ni_x$ при комнатной температуре.

PACS: 75.70.Ak, 78.20.Ls, 78.66.Bz

1. Диспрозий давно привлекает внимание в связи с чрезвычайно большой величиной магнитного момента и возможностями прикладного применения наноструктур, включающих диспрозий в сочетании с другими металлами, полупроводниками или диэлектриками. Однако отсутствие магнитного порядка в металлическом диспрозии при комнатных температурах требует охлаждения ниже 100 К, что сужает возможности его применения. Недавно [1] было обнаружено магнитное упорядочение диспрозия при комнатной температуре в двухслойных пленках $Du_{1-x}Ni_x/Ni$ при величине $x \approx 0.05$. Измерения магнитных свойств двухслойных структур $Du_{1-x}Ni_x/Ni$ в [1] проводился *ex situ*, на открытом воздухе. Из-за высокой склонности к окислению Du изготавливался толстый (более 60 нм) слой, по меньшей мере половина которого окислялась.

В объемном Du известны спиральная антиферромагнитная фаза при $T_c < T < T_N$, $T_c = 85$ К, $T_N = 175$ К, а также ферромагнитная фаза при $T < T_c$. Сигнал магнитооптического эффекта Керра пропорционален намагниченности кристалла и отсутствует в антиферромагнитной фазе, являясь характеристикой ферромагнитной фазы. В пленочных образцах $Du_{1-x}Ni_x/Ni$ мы наблюдали ферромагнитную фазу *ex situ*, непосредственно измеряя магнитные петли гистерезиса с помощью меридионального эффекта Керра [1] и полярного эффекта Керра [2] при комнатной температуре.

В настоящей работе мы сообщаем результаты первых *in situ* измерений магнитных свойств методом SMOKE (surface magneto-optical Kerr effect), что поз-

волило исследовать тонкие слои без влияния окислов и непосредственно продемонстрировать наличие магнитного порядка в слое $Du_{1-x}Ni_x$ при комнатной температуре.

2. Пленки изготавливались методом термического испарения в вакууме на модернизированной установке молекулярно-лучевой эпитаксии “Ангара” [3]. Напыление производилось на стеклянные подложки при температуре 500 К. Предварительный вакуум составлял 10^{-6} Па, рабочий вакуум 10^{-5} Па. Скорости роста пленок и толщина определялись *in situ* с помощью лазерного эллипсометра и составляли 0.003 нм/с для никеля и 0.126 нм/с для диспрозия. В качестве инструмента исследования магнитного состояния пленок использовался меридиональный эффект Керра. Луч гелий-неонового лазера ($\lambda = 630$ нм), линейно поляризованный с помощью призмы Глана, через специальное окно в камере попадал на подложку с напыляемой пленкой под углом 70° , отраженный луч анализировался с помощью статического фотометрического эллипсометра [4]. Магнитное поле, равномерно вращающееся в плоскости образца, создавалось с помощью постоянного магнита. Величина поля на поверхности магнита составляла 42 мТл. Сигнал с эллипсометра записывался в функции угловой координаты направления магнитного поля по отношению к произвольному направлению в плоскости образца.

3. Сначала исследуем сигнал SMOKE от слоя Ni , на который затем наносится сплав $Du_{1-x}Ni_x$ (далее по тексту $DuNi$). На рис.1 показано изменение угла поворота плоскости поляризации (керровский поворот) при вращении магнита относительно исследуемого образца – 8 нм пленки Ni при $T = 300$ К. Начальное положение магнитного поля составляет угол

¹⁾ e-mail: kosyrev@inbox.ru

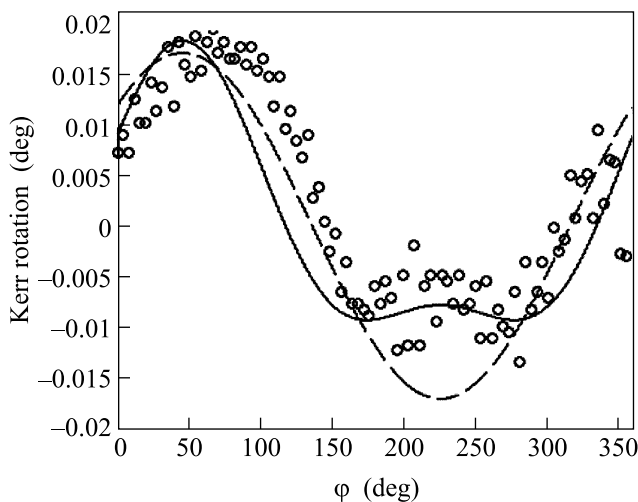


Рис.1. Зависимость поворота плоскости поляризации (сигнал Керр-эффекта) от угла поворота магнитного поля для пленки Ni толщиной 8 нм

45° относительно плоскости падения света. Экспериментальные данные представлены как функция угла поворота магнитного поля относительно начального положения. Так как величина поворота плоскости поляризации пропорциональна проекции намагниченности на плоскость падения света, она должна быть максимальна при ориентации намагниченности в плоскости падения и равняться нулю при нормальной ориентации. Экспериментальные точки на рис.1 отражают именно такую ситуацию. Представленные данные можно описать косинусоидой (штриховая кривая на рис.1). При этом оказалось, что максимальное значение $\cos(\varphi)$ приблизительно соответствует направлению магнитного поля в плоскости падения, то есть магнитный момент следует за полем, и можно было бы говорить об отсутствии анизотропии в пленке, однако более точно экспериментальные точки описываются с помощью сплошной кривой, которая является суммой двух косинусоид с разными периодами и амплитудами:

$$\alpha = A_1 \cos(\varphi + \varphi_0) + A_2 \cos 2(\varphi + \varphi_0). \quad (1)$$

Параметры аппроксимации кривых даны в таблице. Из таблицы видно, что амплитуда $\cos(2\varphi)$ примерно в два раза меньше амплитуды $\cos(\varphi)$. Таким образом, можно предположить наличие в пленке слабой двухосной анизотропии.

4. На рис.2 показано изменение сигнала эффекта Керра в той же геометрии, что и на рис.1. Свет отражается от слоя DyNi двухслойной структуры Ni[8 нм]/DyNi[5 нм]. Прежде всего обращает на себя внимание изменение знака эффекта, которое можно

Параметры аппроксимации экспериментальных данных для пленок Ni (толщина 8 нм) и сплава DyNi (толщины 5 и 20 нм)

| | φ_1 | A_1 | φ_2 | A_2 |
|-------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| α_{Ni} | -0.8 | 1 | 0.8 | 0.4 |
| α_{NiDy5} | 1.5 | 1 | 0 | 0 |
| α_{NiDy20} | 2.1 | 0.9 | 1 | -0.4 |

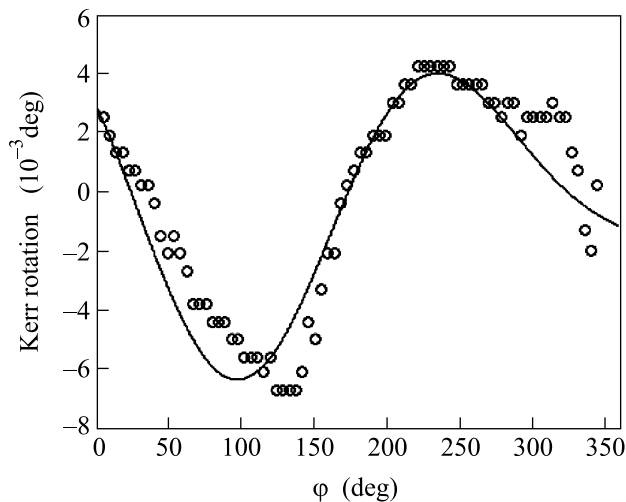


Рис.2. Эффект Керра в двухслойной структуре Ni[8 нм]/DyNi[5 нм]

объяснить вкладом именно пленки сплава DyNi. Изменение знака соответствует противоположному знаку меридионального эффекта Керра в Dy по сравнению со знаком этого эффекта в Ni. Таким образом, можно утверждать, что основная часть сигнала связана именно со сплавом DyNi и, следовательно, в этом слое возникает магнитный порядок. Видно, что максимум модуля измеряемого эффекта не соответствует положению магнитного поля в плоскости падения, то есть магнитный момент в обсуждаемом слое DyNi отстает от магнитного поля, что свидетельствует о наличии анизотропии в плоскости слоя. Аппроксимация экспериментальных значений показала, что они удовлетворительно описываются выражением $\alpha = \frac{1}{2}\alpha_{Ni} + \alpha_{DyNi}$, в котором α_{Ni} и α_{DyNi} рассчитываются согласно (1) и таблице. Слагаемое α_{Ni} отражает вклад нижележащего слоя Ni, который появляется из-за малого поглощения тонкого слоя сплава DyNi (слагаемое α_{DyNi}). Член A_2 в таблице показывает, что в слое сплава DyNi наблюдается двухосная анизотропия, как и в слое Ni, однако ее вклад в случае пленки Ni значительно больше. Возможно, это связано с различными углами падения молекулярного пучка на подложку.

На рис. 3 показаны результаты исследования эффекта Керра при отражении светового луча от слоя DyNi в структуре Ni[8 нм]/DyNi[20 нм]. Знак эффекта сохранился как в предыдущем случае. Отставание магнитного момента от поля точно такое же, как в предыдущем случае. Разность между максимальным и минимальным значениями возросла в 1.5 раза. Кривую на рис.3 удалось описать суммой двух

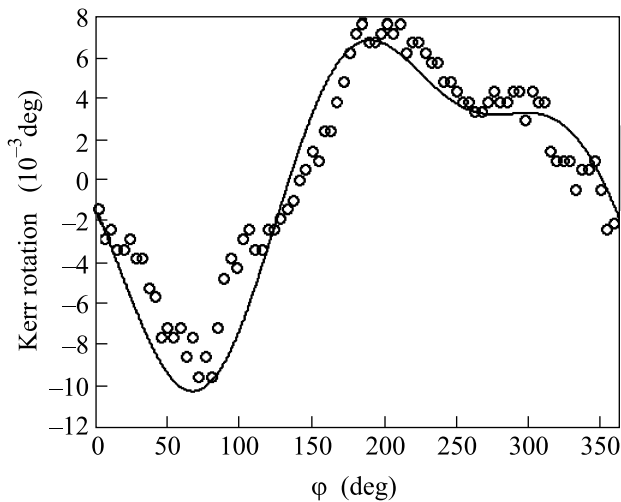


Рис.3. Эффект Керра в двухслойной структуре Ni[8 нм]/DyNi[20 нм]

косинусоид аналогично вкладу DyNi в предыдущем случае согласно (1) и таблице. Таким образом, при толщине DyNi $d = 20$ нм вклад нижнего слоя Ni становится пренебрежимо малым и мы наблюдаем намагниченность именно слоя DyNi при $T = 300$ К.

5. Полученные данные свидетельствуют о том, что Dy, допированный никелем с концентрацией выше порогового значения ≈ 0.05 , при контакте с од-

нородным слоем Ni является магнитоупорядоченным непосредственно после изготовления в вакууме. При этом для возникновения магнитного порядка необходим контакт с магнитоупорядоченным слоем Ni так и включение атомов Ni в слой Dy. Измерения на образцах DyNi на стеклянной подложке или двухслойной структуры Dy/Ni без добавления Ni как компоненты сплава показывают магнитное упорядочение Dy при $T \approx 100$ К [1]. Из измерений полярного эффекта Керра, проведенных нами в работе [2] известно, что структура Dy_{1-x}Ni_x/Ni не достигает насыщения при поле 14 кЭ. Это соответствует намагниченности насыщения $M_s > 1100$ Гс. Для сравнения укажем, что в массивном кристалле Dy при $T = 0$ К $M_s = 3000$ Гс, для железа $M_s = 1720$ Гс, для никеля $M_s = 560$ Гс.

Авторы выражают благодарность Ирине Самсоновне Эдельман за ценные методические указания и помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН 2.4.2 "Спинтроника", комплексного интеграционного проекта СО РАН 3.5, а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 07-03-00320.

1. С. Г. Овчинников, И. С. Эдельман, В. В. Марков, В. А. Середкин, ФТТ **49**, 854 (2007).
2. I. Edelman, S. Ovchinnikov, V. Markov et al., Physica B: Physics of Condensed Matter, (2008) DOI 10.1016/j.physb.2008.04.018.
3. С. Н. Варнаков, А. А. Лепешев, С. Г. Овчинников и др., ПТЭ **6**, 252 (2004).
4. В. А. Швец, Е. В. Слесивцев, С. В. Рыхлицкий, Оптика и Спектроскопия **97**, 514 (2004).