

УДК 537.622.4

Магнитооптический эффект Фарадея в пленках Ni-Ge: зависимость от толщины слоев Ge и режима отжига

Ангелина В.Черниченко

Дмитрий А.Марущенко

Игорь А.Турпанов*

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

Академгородок 50, Красноярск, 660036

Россия

Юлия Э.Гребенькова

Павел Н.Мельников

Институт инженерной физики и радиоэлектроники,

Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный 79, Красноярск, 660041

Россия

Получена 18.03.2009, окончательный вариант 20.05.2009, принята к печати 10.06.2009

Экспериментально исследованы магнитооптический эффект Фарадея (ЭФ) в двухслойных и многослойных пленках Ni-Ge и его изменения при ступенчатом отжиге, а также морфология поверхности пленок. Обнаружены обратно пропорциональная линейная зависимость ЭФ от толщины промежуточного слоя Ge в многослойных пленках и резкое уменьшение поля магнитного насыщения в них по сравнению с двухслойными пленками Ni-Ge. Возрастание ЭФ при первом отжиге и постепенное уменьшение при последующих связывается со взаимной диффузией компонент пленок.

Ключевые слова: Ni-Ge пленки, эффект Фарадея, интерфейс магнитного металла-полупроводника.

Введение

Пленочные структуры, состоящие из слоев 3d ферромагнитного металла и полупроводника, вызывают особый интерес как исследователей, так и разработчиков новых технологий и устройств. Большое внимание уделяется структурам на основе Si, в то время как довольно мало работ посвящено пленкам Ge-3d металл, которые могут проявлять новые неожиданные свойства, в частности, из-за высоких скоростей взаимной диффузии этих материалов [1]. В [2] продемонстрировано существенное различие характера магнитной анизотропии в пленках Fe/Si и Fe/Ge. В [3, 4] обнаружено необычное температурное поведение намагниченности в пленках Co/Ge/Co, зависящее от величины приложенного поля, что было объяснено влиянием Ge на структуру слоев Co. В [5] выявлено необычное поведение Ni-Ge пленок при охлаждении, которое связывалось с образованием в структуре относительно широкого промежуточного слоя, обусловленного взаимной диффузией Ni и Ge. Поэтому представляет интерес изготовление многослойных структур, в которых влияние диффузии проявляется

*e-mail: ise@iph.krasn.ru

более отчетливо. Кроме того, технологические условия изготовления пленок могут приводить к возникновению в них различных дефектов, в частности, зернистой структуры, что также влияет на их свойства. Настоящая работа посвящена изучению магнитооптических свойств и структуры пленок Ge-Ni, Ge-Ni-Ge-Ni-Ge в сравнении с пленками Ni и влиянию на эти свойства термических обработок.

1. Образцы и методики измерений

Серия Ni-Ge и Ge-Ni-Ge-Ni-Ge пленок получена методом ионно-плазменного распыления из отдельных источников в вакуумной камере при базовом давлении 10^{-6} мм рт. ст. в атмосфере аргона. В качестве подложек использовались покровные стекла, температура которых при напылении составляла 373 К. В случае двухслойных пленок на стеклянную подложку наносился слой Ni, а затем Ge — образцы 1, 3, 6 в табл.1, либо сначала наносился слой Ge, а затем Ni — образцы 4, 7, 10 в табл.1. В случае многослойных пленок на стеклянную подложку наносился толстый слой Ge, а затем осаждались последовательно Ni и Ge, последним слоем всегда был Ge. Толщина каждого слоя регулировалась временем подачи тока на распыляемую мишень.

Толщины составляющих слоев в двухслойных пленках представлены в табл. 1, в многослойных — в табл. 2. Кроме того, была изготовлена пленка без промежуточного слоя Ge, но с выдержкой по времени после нанесения первого слоя Ni (образец 20), а также пленки Ni толщиной: 13,5 нм, 14 нм, 17,5 нм.

Таблица 1. Толщины составляющих слоев в пленках Ni-Ge

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d Ni, нм	8,5	8,9	9,7	10,6	11	11,5	14	15	18	20	20,2
d Ge, нм	12	13,7	9,6	12,8	14,5	16	13,5	15,25	13,2	12,7	13

Таблица 2. Толщины составляющих слоев в пятислойных образцах

№ образца	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
d Ge, нм	20	20	20	20	15,9	17,7	17,6	22,8	22,7	22,9
d Ni, нм	18	16,3	15,5	16	20,7	9,5	9,7	11,5	11,5	20
d Ge, нм	10	2	3,5	7,6	9,2	0,85	1,7	4,3	-	8,8
d Ni, нм	18	16,3	15,5	16	20,7	9,5	9,7	11,5	11,5	20
d Ge, нм	20	20	20	20	15,9	17,7	17,6	22,8	22,7	22,9

Образцы подвергались многократным отжигам при $T = 150^{\circ}\text{C}$ в атмосфере, каждый длительностью 6 или 10 мин.

Структура подложек и осажденных пленок исследовалась с помощью атомного силового микроскопа Veeco MultiMode AFM (АСМ). Эффект Фарадея (ЭФ) измерен при комнатной температуре в поле до 5 кЭ, направленном нормально к поверхности пленки вдоль светового луча, в спектральном интервале 500-1100 нм. Точность измерения ЭФ составляла $\pm 0,2$ мин.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Морфология подложек и пленок Ni-Ge

На рис. 1 показана поверхность подложки. Видно, что поверхность неоднородна, причем наблюдаются неоднородности двух масштабов: крупные пики высотой до 20 нм, расположенные на расстояниях, в среднем, несколько сотен нанометров (рис. 1а), и мелкозернистые высотой ~ 5 нм и линейными размерами в плоскости ~ 50 нм. Обратим внимание на различие масштабов в плоскости и по нормали к плоскости пленок. С учетом этого обстоятельства можно утверждать, что за исключением отдельных пиков поверхность подложки изменяется плавно. Это видно из рис. 1с, на котором масштаб по вертикали увеличен в 5 раз по отношению к рис. 1а.

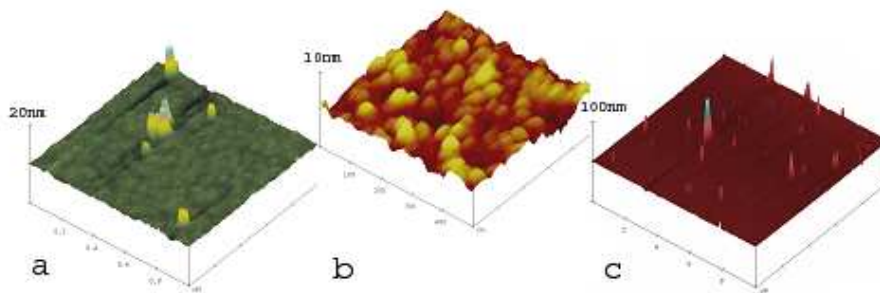


Рис. 1. Структура поверхности подложки при наблюдении под углом 45° , в трех различных масштабах



Рис. 2. Изображение пленки Ni толщиной 17,5 нм при наблюдении под углом 45° : а — до отжига; б — после отжига

На рис. 2 показана поверхность пленки Ni 17,5 нм. Видно, что поверхность пленки практически повторяет структуру поверхности подложки без нарушения целостности на масштабах ~ 500 нм. Отжиг пленки (рис. 2b) приводит к упорядочению мелкозернистой структуры, уменьшению линейных размеров зерна до ~ 40 нм в плоскости и до ~ 3 нм по высоте. Аналогичная картина наблюдается и на слоистых структурах, при этом нанесение нескольких слоев, например четырех, не приводит к существенному изменению картины.

На рис. 3a показан вид сверху образца 20. На рис. 3b показан спектр неоднородностей в поверхности пленки вдоль черной линии (рис. 3a). Видно, что преобладающими являются неоднородности линейного размера по высоте 1–2 нм, а в плоскости 0,1 мкм. Порядок нанесения слоев не отражается заметно на структуре пленок.

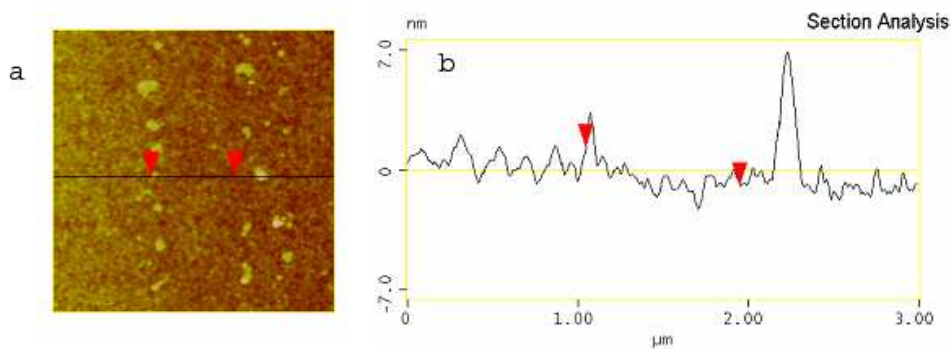


Рис. 3. Образец 20: а — вид сверху на поверхность образца 20; b — распределение размеров неоднородностей в плоскости по линии, указанной черным цветом

2.2. Зависимость эффекта Фарадея от толщины слоев Ni и Ge

Спектральные зависимости ЭФ при комнатной температуре двухслойных и пятислойных образцов подобны друг другу, а также аналогичной зависимости для однослойной пленки Ni [5], они характеризуются плавным возрастанием величины ЭФ при увеличении длины световой волны с широким максимумом вблизи 1000 нм. Характер полевых зависимостей ЭФ при наложении магнитного поля вдоль нормали в плоскости образца также одинаков: плавное возрастание ЭФ в малых полях с насыщением в поле 1–4 кЭ в зависимости от толщин слоев. На рис. 4a представлена зависимость величины ЭФ в поле насыщения от толщины слоя Ni для всех исследованных двухслойных образцов. Видно, что, несмотря на некоторый разброс, эта зависимость линейна, ее экстраполяция к нулевому значению ЭФ соответствует толщине слоя Ni, не дающего вклада в ЭФ, она равна 5 нм. Таким образом, "мертвый" слой Ni в исследованных двухслойных образцах составляет 5 нм. Значения ЭФ в двух пленках Ni (треугольники на рис. 4a) близки к ЭФ двухслойных пленок, а для одной из пленок Ni значительно выше. Последнее может быть связано с неучтенными технологическими факторами. Не прослеживается зависимость ЭФ от порядка нанесения слоев.

Неожиданной оказалась зависимость ЭФ от толщины промежуточного слоя Ge, она изображена на рис. 4b для двух серий пятислойных образцов. В обеих сериях ЭФ обратно пропорционален толщине промежуточного слоя Ge: чем она меньше, тем ЭФ больше. По-видимому, это связано с диффузией Ge в Ni на значительную глубину. При малой толщине промежуточного слоя Ge немагнитный слой на границе между Ge и Ni тонкий, значительно

тоньше, чем это допускается глубиной диффузии, и большая часть Ni находится в ферромагнитном состоянии. По мере возрастания толщины слоя Ge увеличивается глубина его проникновения в Ni, то есть большая часть слоя Ni теряет магнитный порядок. Приблизительная оценка показывает, что толщина смешанного слоя Ge_xNi_y составляет 5 нм.

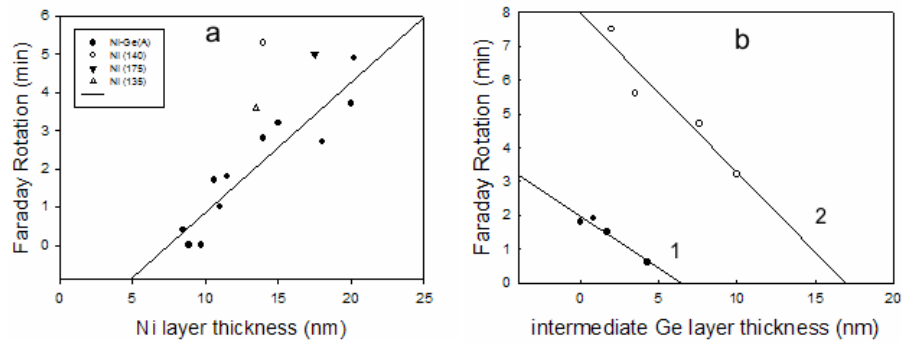


Рис. 4. Зависимость ЭФ: а — в двухслойных пленках Ni-Ge в поле насыщения от толщины слоя Ni (сплошные кружки). Пустой кружок, треугольник вверх и треугольник вниз соответствуют пленкам Ni толщиной 14; 13,5 и 17,5 нм. $\lambda = 800$ нм; б — в пятислойных пленках в поле насыщения от толщины промежуточного слоя Ge. 1 — образцы 17-20, 2 — образцы 12-15 (табл. 2). $\lambda = 900$ нм

2.3. Влияние отжига на магнитооптические свойства Ni-Ge пленок

На рис. 5а, 6а и 7а,б показаны полевые зависимости ЭФ исходных образцов (кривые 1 на каждом рисунке). Эти кривые различаются величиной поля насыщения H_s . На пленках Ni в использованных магнитных полях насыщение не достигается, в двухслойной пленке $H_s = 3$ кЭ. После первого отжига ЭФ каждого образца возрастает, что может свидетельствовать об улучшении степени однородности пленки в результате отжига. В случае пленки Ni последующие отжики практически ничего не изменяют (рис. 5б). Видно, что ЭФ для этой пленки вблизи поля насыщения увеличивается приблизительно на 40 %.

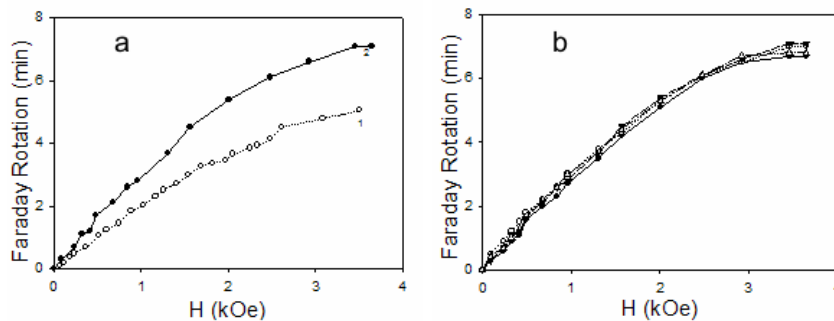


Рис. 5. Полевые зависимости ЭФ для пленки Ni 17,5 нм: а — исходная пленка (кривая 1) и после трехкратного отжига при $T = 150^\circ$ C в течение 6 мин (кривая 2); б — после

последовательных отжига при $T = 150^\circ\text{C}$ 3 раза по 6 мин и последнего отжига в течение 10 мин. $\lambda = 800\text{ нм}$

Для двухслойной пленки каждый последующий отжиг приводит к постепенному возрастанию ЭФ (исключение составляет второй отжиг, причина этого пока не ясна). Максимальное увеличение ЭФ равняется примерно 30 % (рис. 6b).

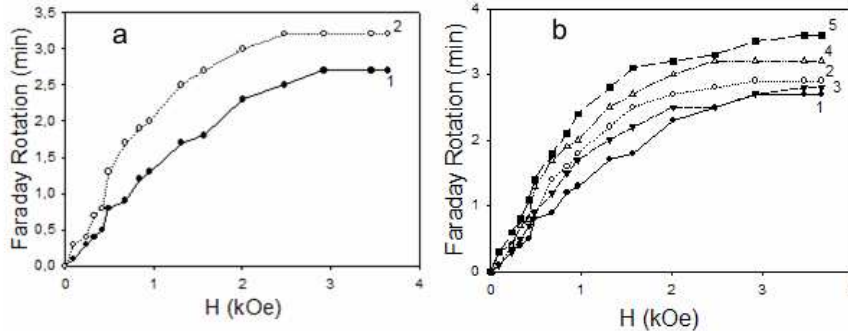


Рис. 6. Полевые зависимости ЭФ пленки Ni-Ge №9: а — исходная пленка (кривая 1) и после четырех кратного отжига при $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 6 мин каждый (кривая 2); б — после каждого отжига $T = 150^\circ\text{C}$ по 6 мин и последнего отжига в течение 10 мин. $\lambda = 900\text{ нм}$

В многослойных пленках при первом отжиге ЭФ возрастает, особенно заметно это для образца 20 (на $\sim 35\%$), что похоже на поведение пленки Ni, но последующие отжики вызывают уменьшение ЭФ. В образце с промежуточным слоем Ge (рис. 7b) после трех отжигов ЭФ уменьшается существенно по сравнению с исходным образцом.

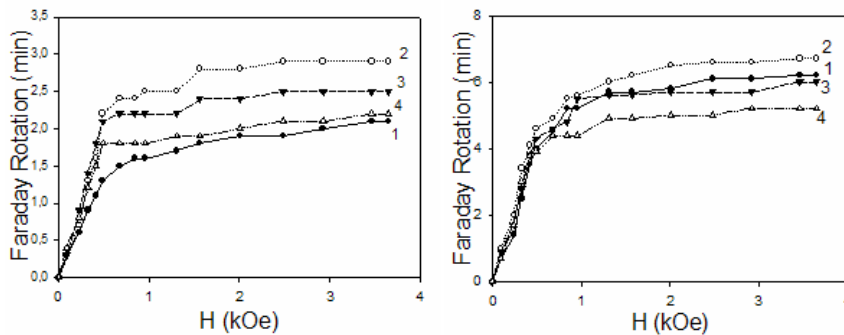


Рис. 7. Полевые зависимости ЭФ для пленок: а — №20, исходная пленка и после каждого отжига при $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 10 мин (кривые 1–4 соответственно); б — №21, исходная пленка и после каждого отжига при $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 10 мин (кривые 1–4 соответственно). $\lambda = 900\text{ нм}$

Таким образом, возникают следующие вопросы. Почему ЭФ возрастает в результате отжига? Если ЭФ связан с Ni, то почему поведение пленок при отжиге зависит от наличия слоя Ge? Почему поведение пленки с промежуточным слоем Ge отличается от всех остальных? Можно было бы предположить, что на свойства исследуемых пленок влияет

их окисление. Однако окисление в процессе нагревания во всех случаях должно приводить к уменьшению ЭФ, в действительности наблюдается противоположная картина. По-видимому, уменьшение зерна в структуре пленок в результате отжига приводит к устранению некоторых дефектов, улучшению степени однородности пленки и соответствующему возрастанию намагниченности. В случае пленки Ni этот процесс завершается уже при первом отжиге. В двухслойной пленке он постепенный, а из-за значительной толщины слоя Ni диффузия Ge не проявляется. При наличии Ge с обеих сторон слоя Ni, приблизительно вдвое более тонкого по сравнению с двухслойной пленкой, а особенно при включении промежуточного слоя Ge влияние его диффузии в слой Ni на ЭФ начинает проявляться уже при втором отжиге. При первом же отжиге, однако, превалирует увеличение однородности структуры образца.

Выводы

Исследованы морфология и полевые зависимости эффекта Фарадея в пленочных структурах Ni-Ge в зависимости от количества слоев, их толщины и отжигов различной длительности. Выявлено, что поверхность пленки практически повторяет структуру поверхности подложки без нарушения целостности на масштабах ~ 500 нм. Показано, что в пятислойных образцах поле насыщения ЭФ при намагничивании пленок в направлении, нормальном их плоскости, резко уменьшается по сравнению с пленками Ni и двухслойными пленками Ni-Ge. Отжиг пленок приводит к упорядочению слоев, поверхность становится более однородной, а величина ЭФ в насыщении возрастает, при этом поле насыщения несколько уменьшается. Обнаружена зависимость ЭФ от толщины промежуточного слоя Ge в пятислойных образцах, которая объяснена диффузией Ge в слой Ni.

Работа поддержана Аналитической ведомственной целевой программой "Развитие научного потенциала высшей школы", проект №2.1.1/6038, и грантом РФФИ, проект №08-02-00397-а.

Список литературы

- [1] P.Clauws, E.Simoen, Metals in germanium, *Materials science in semiconductor processing*, **9**(2006), 546-553.
- [2] N.A.Morley, M.R.J.Gibbs, K.Fronk, R.Zuberek, *J. Phys, Condens. Matter.*, **16**(2004), 4121-4126.
- [3] G.S.Patrin, C.-G.Lee, I.A.Turpanov, et.al., *J. Magn, Magn. Matter.*, **306**(2006), 218-221.
- [4] G.S.Patrin, C.-G.Lee, B.-H.Coo, K.Shin, *Phys. Lett. A*, **359**(2006), 149-152.
- [5] И.С.Эдельман, Г.С.Патрин, Д.А.Великанов, А.В.Черниченко, И.А.Турпанов, Г.В.Бондаренко, Особенности магнитных свойств Ni-Ge пленок, *Письма в ЖЭТФ*, **87**(2008), 311-314.

The Magneto-optical Faraday Effect in Ni-Ge Films: the Dependence on the Ge Layers Thickness and the Annealing Regime

Angelina V.Chernichenko
Dmitry A.Marushchenko
Igor A.Turpanov
Yulia E.Greben'kova
Pavel N.Mel'nikov

The Faraday magneto-optical effect (FE) of bi-layer and multilayer Ni-Ge films and its changes at stepped annealing, as well as the films surface morphology were experimentally investigated. Inverse linear dependence of FE on the intermediate Ge layer thickness in multilayer films, and strong decrease of the saturation field in these films were revealed. The FE increase at the first annealing and gradual decrease at the next annealing were explained by mutual diffusion of the film components.

Keywords: Ni-Ge films, the Faraday effect, the interface of a magnetic metal and a semiconductor.