

Коэрцитивные свойства многослойной пленки Gd/Si/Co с точкой компенсации

Д.Н. Меренков, С.Л. Гнатченко, А.Б. Чижик, Ю.А. Шахаева

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: merenkov@ilt.kharkov.ua*

M. Baran and R. Szymczak

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland

В.О. Васьковский, А.В. Свалов

Уральский государственный университет, пр. Ленина, 51, г. Екатеринбург, 620083, Россия

Статья поступила в редакцию 2 июля 2003 г., после переработки 29 августа 2003 г.

Определена температурная зависимость поля коэрцитивности H_c многослойной пленки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$ с ферримагнитным упорядочением магнитных моментов слоев кобальта и гадолиния. Максимальное значение H_c наблюдается при температуре около 118 К, соответствующей точке компенсации пленки. Установлено, что на всем исследуемом температурном интервале изменение поля коэрцитивности вызвано изменением спонтанной намагниченности.

Визначено температурну залежність поля коерцитивності H_c багат шарової плівки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$ з ферримагнітним упорядкуванням магнітних моментів шарів кобальту і гадолінію. Максимальне значення H_c спостерігається при температурі близько 118 К, що відповідає точці компенсації плівки. Установлено, що на всьому дослідженому температурному інтервалі зміна поля коерцитивності викликана зміною спонтанної намагніченості.

PACS: 75.70.Kw, 75.50.Gg

Многослойные пленки, полученные на основе чередующихся наноскопических слоев редкоземельного (РЗМ) и 3d-переходного (ПМ) металлов, привлекают внимание в первую очередь как модельные объекты для изучения фундаментальных физических явлений. Их исследование позволяет получать информацию о природе обменного взаимодействия между магнитными металлами различных типов. Установлено, что в многослойных пленках происходит формирование поверхностных неколлинеарных фаз, индуцируемых внешним полем [1,2]. С другой стороны, эти пленки могут найти применение в устройствах магнитооптической записи, а также в качестве «закрепляющих» слоев в так называемых спин-вентильных структурах с гигантским магнитосопротивлением (ГМС) [3]. Известно, что необходимым условием проявления эффекта ГМС в таких структурах является послойное перемагничивание, обусловлен-

ное различной коэрцитивной силой составляющих эти структуры компонент. Работающие на основе эффекта ГМС устройства применяются, например, в качестве чувствительных датчиков или головок для систем магнитной записи.

В многослойных пленках РЗМ/ПМ магнитные моменты соседних слоев лежат в плоскости пленки и упорядочены антипараллельно благодаря антиферромагнитному обменному взаимодействию на поверхности раздела слоев. Поэтому в таких пленках могут наблюдаться характерные для ферримагнетиков явления, в частности, компенсация намагниченности. Однако свойства искусственных магнитных сверхрешеток, полученных на основе наноскопических слоев РЗМ и ПМ, могут заметно отличаться от свойств традиционных ферримагнетиков. Период сверхрешетки обычно намного превышает параметр элементарной ячейки любого из известных ферримагнетиков. В то

же время антиферромагнитный обмен в многослойных пленках локализован в узких областях, прилегающих к границам раздела слоев, а магнитный порядок в остальной части пленки поддерживается ферромагнитным внутрислойным обменным взаимодействием. Поэтому снижение антиферромагнитного обмена, увеличение периода сверхрешетки, а также различия структурных свойств слоев пленки могут способствовать ее раздельному перемагничиванию по слоям редкоземельной и переходно-металлической подсистем. В этом случае коэрцитивные свойства пленки будут значительно отличаться от коэрцитивных свойств обычных ферромагнетиков.

Известно, что вблизи точки компенсации типичных ферромагнетиков, в частности сплавов РЗМ–ПМ, резко увеличивается поле коэрцитивности H_c [4,5] — одна из важнейших характеристик магнитных материалов. Тем не менее наблюдаемые в многослойных пленках температурные зависимости H_c носят различный характер. Так, в пленках Gd/Co [6] H_c не изменяется с температурой; в пленках Dy/Co [7] нагревание вызывает слабый рост H_c при $T > T_{\text{comp}}$ (где T_{comp} — температура компенсации исследуемой пленки), в то время как при $T < T_{\text{comp}}$ поле коэрцитивности фактически не зависит от температуры. В пленках Gd/Co с различным соотношением толщин слоев и не имеющих точки компенсации при температурах 5–300 К [8] наблюдается связь между полем коэрцитивности и величиной спонтанной намагниченности M_s . Вследствие этого несомненный интерес представляют дальнейшие исследования коэрцитивных свойств и возможностей управления ими в многослойных пленках РЗМ/ПМ. Необходимо также отметить, что свойства пленок РЗМ/ПМ с напыленными между магнитными слоями немагнитными прослойками слабо изучены, хотя известно, что вариация толщины таких прослоек приводит к смещению температуры компенсации [9]. Немагнитная прослойка кремния ослабляет антиферромагнитный межслойный обмен в исследуемой пленке более чем на порядок [10].

В представляемой работе приведены результаты исследований температурной зависимости поля коэрцитивности многослойной пленки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$. Пленка была получена методом ионного высокочастотного распыления на стеклянной подложке при базовом давлении 10^{-6} торр и давлении рабочего газа (Ar) 10^{-4} торр. Процесс напыления происходил при температуре не более 100°C . Скорость осаждения Gd, Co и Si, по результатам предварительной градуировки, составляла соответственно 1; 0,4 и 0,3 $\text{\AA}/\text{с}$.

В работе использован магнитооптический метод исследований, основанный на применении меридио-

нального эффекта Керра. Магнитное поле было ориентировано в плоскости падения луча He–Ne лазера (длина волны 633 нм) параллельно пленке. Угол Φ поворота плоскости поляризации отраженного света измерялся в зависимости от внешнего поля. В данной геометрии керровское вращение плоскости поляризации пропорционально компоненте намагниченности, лежащей в плоскости пленки параллельно плоскости падения света. В экспериментах использован гелиевый криостат. Образец помещали на хладопровод, находящийся в вакууме внутри сверхпроводящего соленоида. В работе также проводилось измерение намагниченности пленки на СКВИД-магнитометре MPMS-5 Quantum Design.

Представленная на рис. 1 зависимость спонтанной намагниченности M_s пленки от температуры, измеренная на СКВИД-магнитометре, имеет четкий минимум при $T \simeq 118$ К, связанный с компенсацией магнитных моментов слоев Gd и Co. Наблюдаемое отличие от нуля минимального значения намагниченности может быть вызвано некоторой неоднородностью пленки, а также возникновением вблизи T_{comp} неколлинеарной фазы в поле $H = 500$ Э, в котором проводилось измерение намагниченности [10]. Нагревание пленки от 5 К до температуры компенсации приводит к падению спонтанной намагниченности, а при $T > T_{\text{comp}}$ спонтанная намагниченность пленки увеличивается. Наиболее резкое изменение величины M_s происходит вблизи T_{comp} .

На рис. 2 показаны полевые зависимости керровского вращения $\Phi(H)$, полученные для исследуемой пленки при различных температурах. Представленные магнитооптические кривые дают информацию о пере-

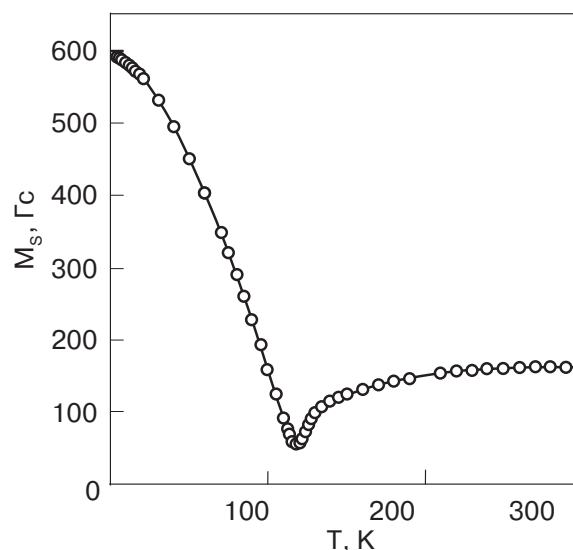


Рис. 1. Температурная зависимость спонтанной намагниченности пленки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$, измеренная во внешнем поле $H = 500$ Э. Температура компенсации исследуемой пленки $T_{\text{comp}} \simeq 118$ К.

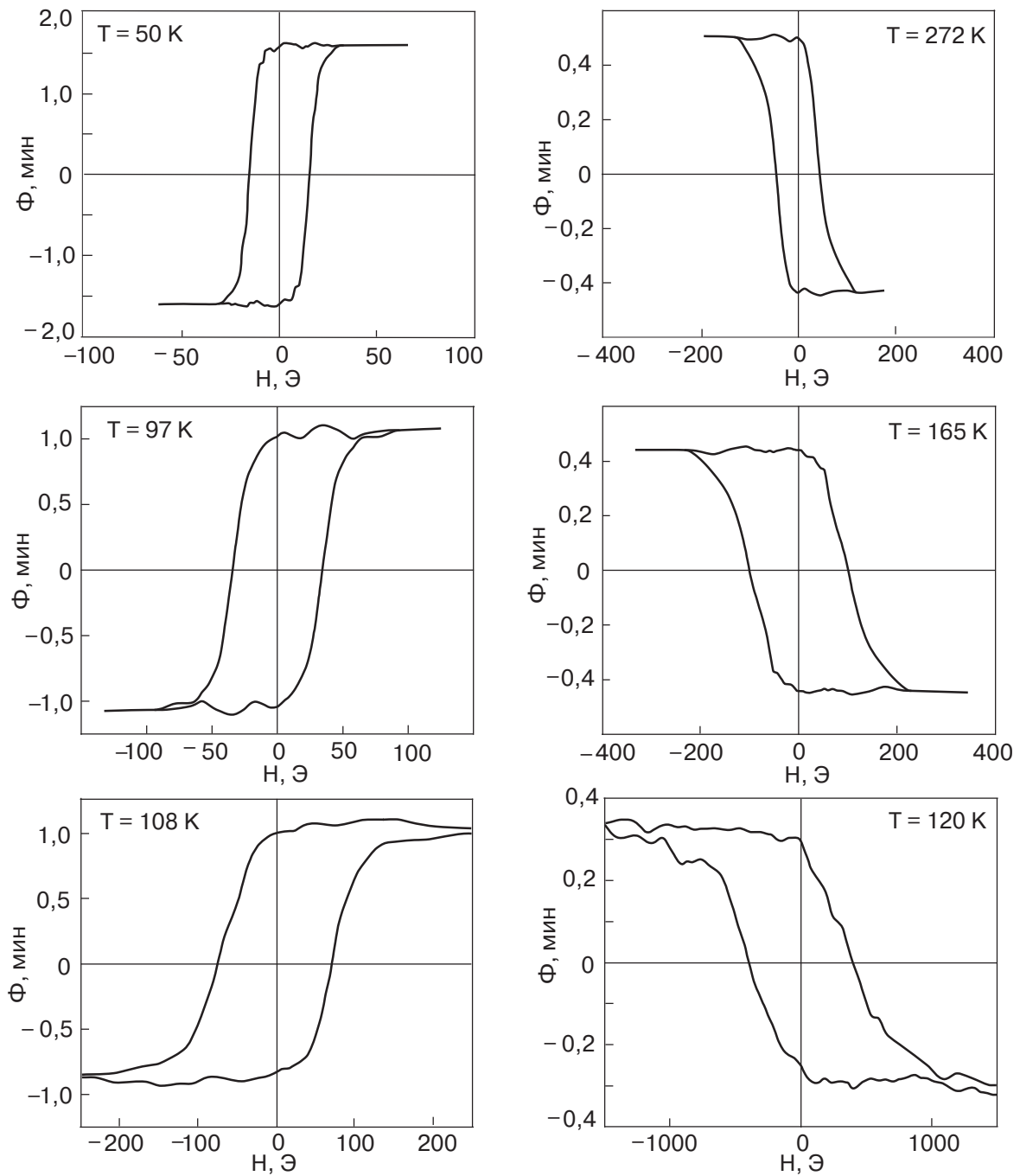


Рис. 2. Петли гистерезиса, измеренные магнитооптическим методом в плёнке $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$ при различных температурах.

магничивании в нескольких приповерхностных слоях. Однако они практически не отличаются от кривых $M(H)$, измеренных на СКВИД-магнитометре и отражающих процесс перемагничивания во всем образце. Довольно простой вид петель $M(H)$ и $\Phi(H)$ свидетельствует о том, что слои кобальта и гадолиния, образующие магнитную структуру плёнки, не являются независимыми при перемагничивании. При фиксированной температуре эти петли близки по форме и практически одинаковы по ширине в пределах погрешности измере-

ний. Следует заключить, что перемагничивание происходит однородно по всей толщине плёнки, включая ее поверхностные слои. Таким образом, величину поля коэрцитивности плёнки вполне корректно определять по полуширине магнитооптической петли гистерезиса при $\Phi = 0$.

Следует отметить различие знака керровского вращения при температурах ниже и выше 118 К. Оно вызвано преобладанием вклада переходного металла в эффект Керра. При температурах ниже

компенсационной магнитный момент слоя кобальта m_{Co} меньше магнитного момента слоя гадолиния m_{Gd} . Вследствие этого он направлен против внешнего поля. При $T > T_{\text{comp}}$ ситуация обратная: m_{Co} превышает m_{Gd} и сонаправлен с внешним полем. В соответствии с этим происходит и изменение знака магнитооптического вращения при переходе через точку компенсации. Подобное изменение знака вращения наблюдалось в работе [1] для многослойных пленок Gd/Fe.

На рис. 3 представлена температурная зависимость поля коэрцитивности пленки, полученная из магнитооптических измерений. Величина H_c возрастает при приближении к точке компенсации со стороны как низких, так и высоких температур. Зависимость $H_c(T)$ имеет четко выраженный максимум вблизи 118 К.

Как известно, перемангничивание происходит путем зарождения доменов энергетически выгодной фазы и их распространения на весь объем образца. Коэрцитивность, соответственно, связана с процессом образования зародышей и пиннингом доменных стенок на дефектах. Выражение для поля коэрцитивности может быть представлено следующим образом [11,12]:

$$H_c = \frac{\alpha}{M_s} - NM_s, \quad (1)$$

где первый член связан с потерями энергии при формировании зародыша и движении доменной стенки, а второй — с полями размагничивания зародыша (N — размагничивающий фактор). Если доминирующим оказывается процесс зародышеобразования, то с точностью до численного коэффи-

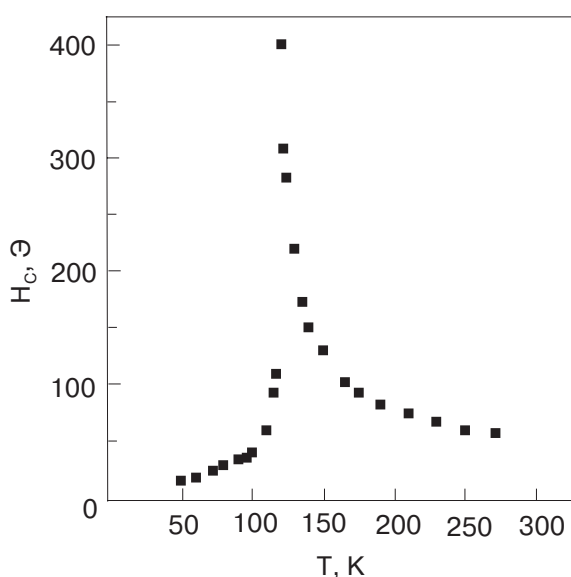


Рис. 3. Температурная зависимость поля коэрцитивности пленки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$.

циента можно считать, что $\alpha = \sigma/v^{1/3}$, где σ — энергия доменной стенки, v — критический объем зародыша. Если же основной вклад в коэрцитивность вносит пиннинг доменных стенок на дефектах структуры, то поле коэрцитивности также описывается формулой (1), в которой α — энергетический барьер, преодолеваемый доменной стенкой в процессе движения.

Ранее было показано [8], что температурные зависимости поля коэрцитивности двух тонких многослойных пленок $[\text{Gd}30\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}]_{20}$ и $[\text{Gd}30\text{\AA}/\text{Co}38\text{\AA}]_{10}$, не имеющих точки компенсации, определяются изменением их спонтанной намагниченности. Построенные с использованием экспериментальных данных зависимости H_c/M_s от $1/M_s^2$ представляли собой прямые линии, наклон которых определялся коэффициентом α_1 (для первой пленки) и α_2 (для второй). Значения α_1 и α_2 оставались постоянными на всем исследуемом интервале температур от 25 до 300 К и были равны: $\alpha_1 \approx 0,7 \cdot 10^4$ эрг/см³, $\alpha_2 \approx 8,2 \cdot 10^4$ эрг/см³.

На рис. 4 показана зависимость H_c/M_s от $1/M_s^2$ для пленки Gd/Si/Co. Как видно на рисунке, все представленные на графике точки хорошо аппроксимируются двумя прямыми. Таким образом, по обе стороны от температуры компенсации наблюдается линейная зависимость H_c/M_s от $1/M_s^2$. Это позволяет сделать выводы: 1) изменение поля коэрцитивности этой пленки, имеющей точку компенсации, определяется в основном изменением величины спонтанной намагниченности; 2) величина α меняется только при переходе через точку компенсации, а по обе стороны от нее остается постоянной: $\alpha_{T < 118\text{K}} \approx 0,6 \cdot 10^4$ эрг/см³, $\alpha_{T > 118\text{K}} \approx 3,5 \cdot 10^4$ эрг/см³. Отметим совпадение порядка величин α_1 и $\alpha_{T < 118\text{K}}$, с од-

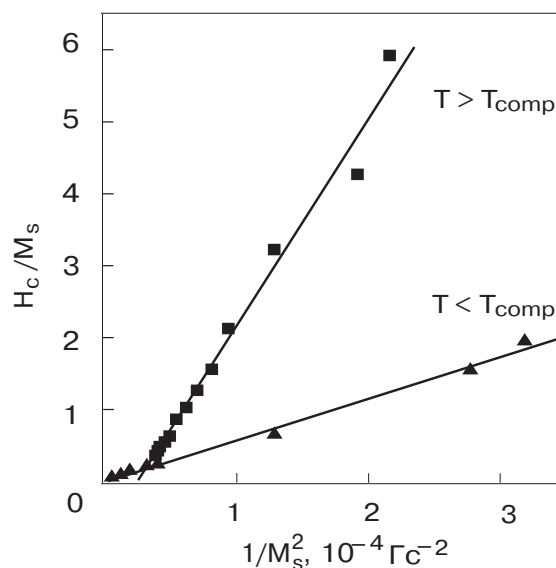


Рис. 4. Зависимости H_c/M_s от $1/M_s^2$ для пленки $[\text{Gd}75\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}/\text{Co}30\text{\AA}/\text{Si}5\text{\AA}]_{20}$, экспериментально полученные при $T < T_{\text{comp}}$ и $T > T_{\text{comp}}$.

ной стороны, и α_2 и $\alpha_{T>118\text{K}}$, с другой. В первом случае в обеих пленках магнитный момент слоя гадолиния m_{Gd} превышает магнитный момент слоя кобальта m_{Co} , а во втором $m_{\text{Gd}} < m_{\text{Co}}$.

В пленке Gd/Si/Co присутствует немагнитная кремниевая прослойка, значительно понижающая антиферромагнитный обмен, локализованный на границах слоев. Однако нами не было установлено каких-либо экспериментальных фактов, свидетельствующих о послонном перемагничивании пленки. Температурная зависимость поля коэрцитивности исследованной многослойной пленки с точкой компенсации обусловлена изменением ее спонтанной намагниченности. Поле коэрцитивности достигает максимального значения в районе точки компенсации. В этом отношении исследованная нами пленка принципиально не отличается от обычных ферримагнетиков. Поэтому одним из способов эффективного воздействия на коэрцитивные свойства тонких многослойных пленок РЗМ/ПМ является напыление немагнитных прослоек между магнитными слоями, а также, в некоторых пределах, вариация толщины этих прослоек, приводящая к изменению температурной зависимости спонтанной намагниченности пленки и температуры компенсации.

В.О. Васьковский и А.В. Свалов выражают благодарность Министерству образования РФ за частичную поддержку работы в рамках гранта Т02-05.1-3153.

1. W. Hahn, M. Loewenhaupt, Y.Y. Huang, G.P. Felcher, and S.S.P. Parkin, *Phys. Rev.* **B52**, 16041 (1995).
2. S.L. Gnatchenko, A.B. Chizhik, D.N. Merenkov, V.V. Eremenko, H. Szymczak, R. Szymczak, K. Fronc, and R. Zuberek, *J. Magn. Mater.* **186**, 139 (1998).
3. А.В. Свалов, П.А. Савин, Г.В. Курляндская, И. Гутиеррес, В.О. Васьковский, *ЖТФ* **72**, № 8, 54 (2002).

4. P. Chaudhari, J.J. Cuomo, and R.J. Gambino, *Appl. Phys. Lett.* **22**, 337 (1973).
5. R.C. Taylor, *J. Appl. Phys.* **47**, 1164 (1976).
6. D.J. Webb, R.G. Wamsley, K. Parvin, P.H. Dickinson, T.H. Geballe, and R.M. White, *Phys. Rev.* **B32**, 4667 (1985).
7. Z.S. Shahn and P. Sellmyer, *Phys. Rev.* **B42**, 10433 (1990).
8. S.L. Gnatchenko, A.B. Chizhik, D.N. Merenkov, H. Szymczak, L.T. Baczewski, A. Wawro, and H. Garmari-Seale, *J. Appl. Phys.* **84**, 5105 (1998).
9. K. Takanashi, H. Fujimori, and H. Kurokawa, *J. Magn. Mater.* **126**, 242 (1993).
10. Д.Н. Меренков, А.Б. Чижик, С.Л. Гнатченко, М. Баран, Р. Шимчак, В.О. Васьковский, А.В. Свалов, *ФНТ* **27**, 188 (2001).
11. D. Givord, P. Teneaud, and T. Viadeu, *IEEE Trans. Magn.* **24**, 1921 (1988).
12. D.W. Taylor, V. Villas-Boas, Q. Lu, M.F. Rossignol, F.P. Missell, D. Givord, and S. Hirokawa, *J. Magn. Mater.* **130**, 225 (1994).

Coercive properties of the multilayered Gd/Si/Co film with the compensation point

D.N. Merenkov, A.B. Chizhik, S.L. Gnatchenko, Yu.A. Shakhaeva, M. Baran, R. Szymczak, V.O. Vas'kovskiy, and A.V. Svalov

The temperature dependence of coercive field H_c of the multilayered [Gd75Å/Si5Å/Co30Å/Si5Å]₂₀ film with a ferrimagnetic ordering of the magnetic moments of cobalt and gadolinium layers has been determined. The maximal value of H_c was observed at a temperature about the compensation point of 118 K. A strong correlation between the changes in coercive field and spontaneous magnetization in the studying temperature range is established.