

06.1

**Оптические и магнитные свойства трехслойных систем  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Pu$** © Н.Н. Косырев<sup>1,2</sup>, В.Ю. Яковчук<sup>1</sup>, Г.С. Патрин<sup>1,3</sup>, В.А. Комаров<sup>1,3</sup>, Е.Н. Волченко<sup>3</sup>, И.А. Тарасов<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия<sup>2</sup> Ачинский филиал Красноярского государственного аграрного университета, Ачинск, Россия<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

E-mail: kosyrev@inbox.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2020 г.

В окончательной редакции 29 сентября 2020 г.

Принято к публикации 16 октября 2020 г.

Представлены результаты исследования оптических и магнитооптических свойств трехслойных систем  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Pu$  ( $Pu$  — пермаллой). Для изучения температурной зависимости намагниченности использовали магнитооптический эффект Керра, а для измерения оптических показателей преломления и поглощения — метод спектральной эллипсометрии. Показано, что толщина прослойки висмута влияет на обменное взаимодействие между слоями пермаллоя и  $DuCo$ , что проявляется в изменении температуры компенсации намагниченности, а также в изменении характера обменного взаимодействия.

**Ключевые слова:** обменное взаимодействие, магнитные пружины, эллипсометрия, магнитооптический эффект Керра.

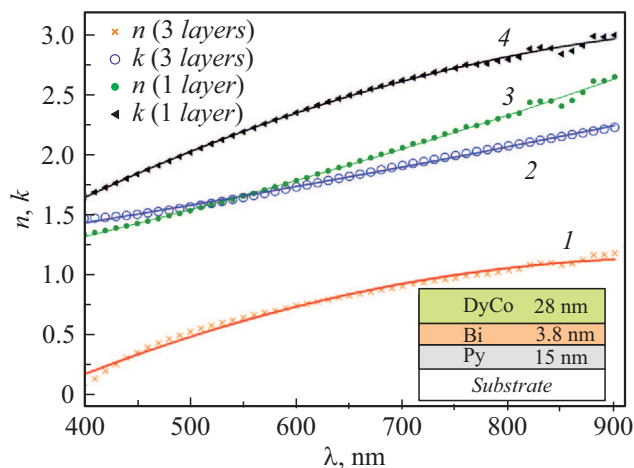
DOI: 10.21883/PJTF.2021.03.50566.18429

Сплавы и соединения редкоземельный металл (Re)/переходный металл (ТМ) уже много лет привлекают пристальное внимание исследователей в связи с перспективой использования этих материалов в новых типах магниторезистивной памяти, носителях записи, высокочувствительных датчиках магнитного поля и т. д., которые характеризуются надежностью и низким энергопотреблением [1,2]. Необычные свойства таких сплавов являются следствием различной степени термического размагничивания в подрешетках  $Du$  и  $Co$  [3]. При комнатной температуре сплав  $Du_xCo_{1-x}$  ведет себя как магнитомягкий ферромагнетик с довольно малой коэрцитивной силой и перпендикулярной магнитной анизотропией. С другой стороны, такие сплавы в составе многослойных гетероструктур проявляют необычные магнитные свойства. Например, интерес представляет эффект обменной пружины, возникающий в многослойных магнитных структурах, состоящих из чередующихся магнитомягких и магнито жестких слоев, связанных обменным взаимодействием [4,5]. Для контроля межслоевого взаимодействия в качестве определяющего параметра при создании структуры обменной пружины с заданными характеристиками предпринимаются попытки введения дополнительных „управляющих“ немагнитных слоев между магнитными слоями. Кроме того, использование в магнитной структуре полупроводниковых или полуметаллических материалов в качестве немагнитного слоя расширяет функциональные возможности. Такой подход позволяет интегрировать в одной структуре как магнитные, так и полупроводниковые свойства исходных материалов [6] и индуцировать новые, не присущие им ранее. В ряду полупроводниковых и полуметаллических элементов висмут выделяется тем, что практически не имеет химических соединений с переходными металлами

[7], что делает его удобным материалом при создании слоистых структур с резкими границами раздела.

В настоящей работе впервые синтезированы трехслойные системы, состоящие из пленок ферромагнитного пермаллоя ( $NiFe$ , далее  $Pu$ ) и ферримагнитного сплава  $Re$  ( $Du_xCo_{1-x}$ ), разделенных немагнитной полуметаллической прослойкой  $Bi$ . В данных структурах сплав  $Du_xCo_{1-x}$  играет роль магнито жесткого слоя, а  $Pu$  — магнитомягкого. Синтез структур  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Pu$  проводился методом термического испарения в вакууме (базовый вакуум составил  $\sim 10^{-6}$  mbar) на стеклянную подложку. Рост слоя  $DuCo$  происходил при температуре подложки около комнатной, а слоя пермаллоя — при температуре подложки  $100^\circ C$ . Толщина и химический состав полученных пленок контролировались с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Толщины слоев  $Pu$  и  $DuCo$  оставались постоянными и составляли  $d_{Pu} = 15$  nm,  $d_{DuCo} = 30$  nm. Толщина прослойки висмута варьировалась в пределах от 0 до 4 nm. Магнитооптические исследования проводились на установке NanoMOKE2 в конфигурации меридионального эффекта Керра при угле падения  $45^\circ$  с оптическим криостатом Oxford Instruments в интервале температур  $T = 4.2-300$  K. Магнитное поле прикладывалось в плоскости образца вдоль зондирующего светового пучка. Оптические постоянные преломления и поглощения измерялись с помощью спектрального эллипсометра „Спектроскан“ [8].

Для контроля состава сплава  $Du_xCo_{1-x}$  были синтезированы однослойные пленки, которые также исследовались с помощью методов, описанных выше. Результаты спектральных эллипсометрических измерений представлены на рис. 1. Качественно спектры напоминают зависимости, характерные для  $3d$ - и  $4f$ -металлов.



**Рис. 1.** Оптические постоянные преломления  $n$  (1,3) и поглощения  $k$  (2,4), полученные для структуры  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Py$  (1,2) и для однослойной реперной пленки  $Du_xCo_{1-x}$  (3,4). В правом нижнем углу показаны параметры структуры, используемые в многослойной модели при решении обратной задачи эллипсометрии. Сплошные линии — результаты расчетов, символы — экспериментальные данные.

Однако для однослойной пленки  $DuCo$  значения показателя преломления получились ниже, чем следовало ожидать для сплава  $Du_{21}Co_{79}$ . Введение шероховатости на поверхности в модель при решении обратной задачи эллипсометрии позволило объяснить это расхождение. В случае трехслойных систем (кривые 1 и 2 на рис. 1) подобные геометрические неоднородности, по всей видимости, имеют место на каждой границе раздела, что также было учтено при аппроксимации эллипсометрических спектров. Эффективные значения оптических констант для трехслойных систем в этом случае получаются существенно ниже, чем для однослойных. Также в результате решения обратной задачи эллипсометрии [9] с использованием модели эффективной среды [10] были получены следующие значения состава для сплава  $DuCo_5$ :  $Du$  — 21%,  $Co$  — 79%, что хорошо согласуется с данными рентгеноспектрального флуоресцентного анализа.

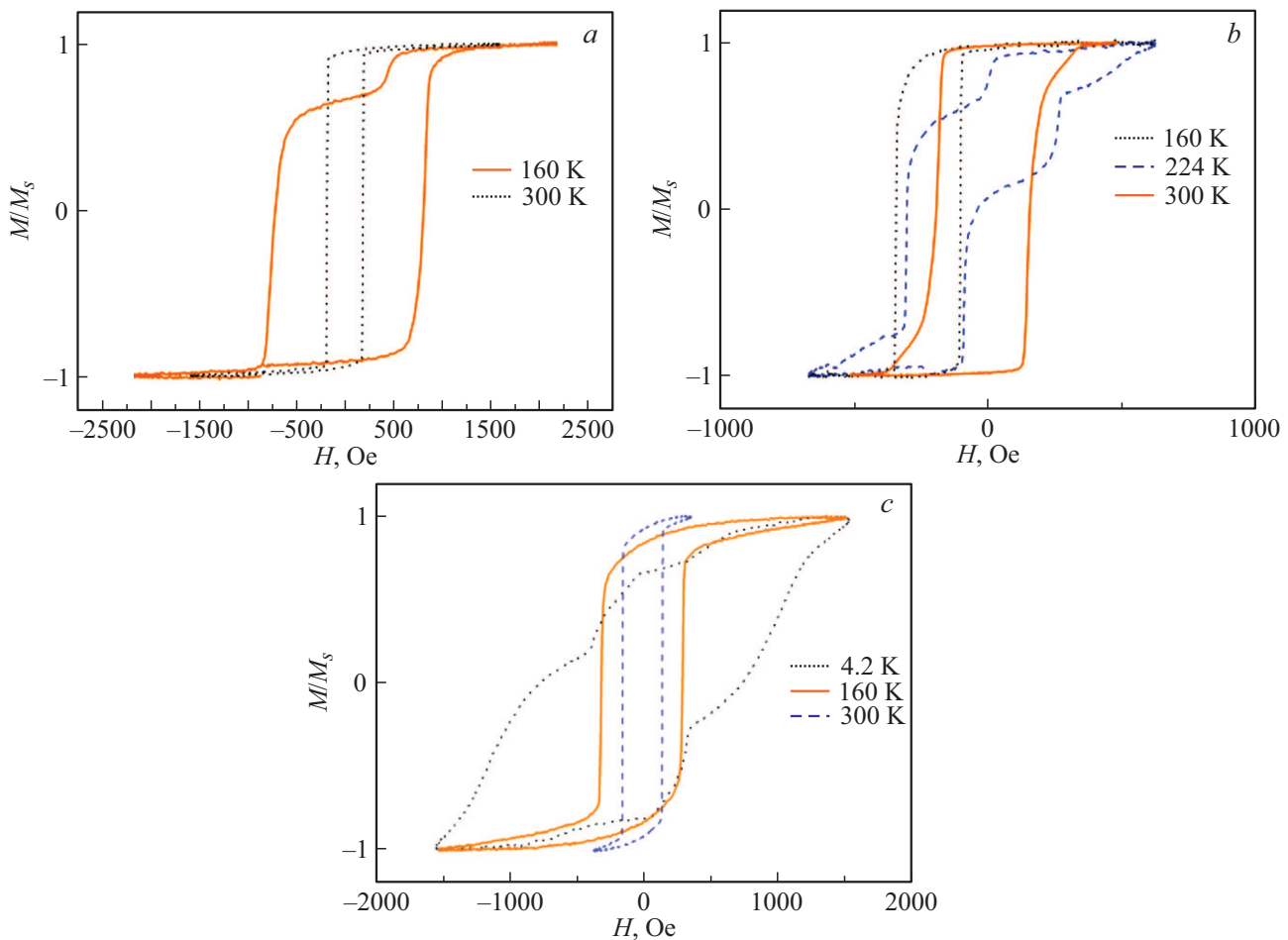
Измеренная температурная зависимость магнитооптического эффекта Керра в реперных однослойных пленках  $Du_xCo_{1-x}$  (рис. 2,а) показывает следующие особенности. При комнатной температуре  $T = 300$  К кривая намагничивания соответствует сигналу от ферромагнетика, однако при охлаждении (начиная с температуры  $T = 160$  К) имеет место изменение формы кривой намагничивания. Показанная на рис. 2,а петля гистерезиса для температуры  $T = 160$  К сохраняет такую форму при дальнейшем охлаждении вплоть до  $T = 120$  К (кривые намагничивания в диапазоне  $T = 120$ – $160$  К практически идентичны), что соответствует температуре компенсации намагниченности в сплаве  $DuCo_5$  [4]. Однако в трехслойных пленках температура данного перехода может отличаться. Отметим, что при малых

толщинах прослойки  $Bi$  ( $d \approx 1$  nm) характерные точки температурной зависимости намагниченности практически совпадают с данными для двухслойной структуры  $Du_xCo_{1-x}/Py$  ( $d_{Bi} = 0$ ) (рис. 2, б). В таких случаях кривая намагничивания начинает изменяться уже при температуре  $T \approx 224$  К. Ситуация существенно меняется с увеличением толщины прослойки  $Bi$  (рис. 2, в). Уже начиная с гелиевых температур наблюдается ступенчатый характер кривой намагничивания, чего не было ни в однослойной реперной пленке  $DuCo$ , ни в двухслойной  $Du_xCo_{1-x}/Py$ . При переходе через точку компенсации для состава  $Du_{21}Co_{79}$  петля гистерезиса начинает трансформироваться и при  $T \geq 160$  К приобретает форму, характерную для ферромагнетика.

С уменьшением толщины висмутовой прослойки влияние магнитомягкого слоя на магнито жесткий растет. Это означает, что растет обменное взаимодействие. Также уменьшается коэрцитивная сила, что мы связываем с тем, что магнитомягкий слой сильнее „подмагничивает“ магнито жесткий. Другой причиной уменьшения коэрцитивной силы может быть образование интерфейса. Как показано в работе [11], интерфейс висмут–пермаллой слабо влияет на магнитные свойства структуры. А в случае интерфейса  $DuCo$ –висмут могут образовываться соединения — пниктогениды ( $Du_5Bi_3$ ,  $Di_3Bi_2$  либо  $DuBi$ ), которые могут оказывать влияние на общее магнитное состояние. Данное предположение подтверждается результатами эллипсометрического исследования.

Для исследования температурного хода намагниченности были построены кривые на основе анализа зависимости сигнала магнитооптического эффекта Керра от температуры по следующей методике. Опираясь на тот факт, что намагниченность  $M_s$  пропорциональна углу поворота плоскости поляризации [12], который обусловлен эффектом Керра при отражении линейно поляризованного светового пучка, будем считать что  $M_s \sim (I_{max} - I_{min})/2$ , где  $I_{max}$  и  $I_{min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение интенсивности отраженного поляризованного света при противоположных направлениях внешнего магнитного поля. Следует отметить, что абсолютное значение намагниченности образца в данном случае получить невозможно. Однако существует возможность зафиксировать ее относительные изменения в рамках одного эксперимента. В результате такого анализа обнаружено нетривиальное поведение намагниченности системы  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Py$  (рис. 3), которое обусловлено прежде всего наличием слоя ферромагнитного сплава  $Du_xCo_{1-x}$ , где результирующая намагниченность определяется степенью доминирования взаимодействия  $Du$ – $Co$  над взаимодействием  $Du$ – $Du$  [4].

В области низких температур ниже точки компенсации магнитная подрешетка  $Du$ , параллельная внешнему магнитному полю, является доминирующей. При увеличении температуры разные степени размагничивания подрешеток  $Du$  и  $Co$  приводят к полной компенсации намагниченности. Именно такую ситуацию мы

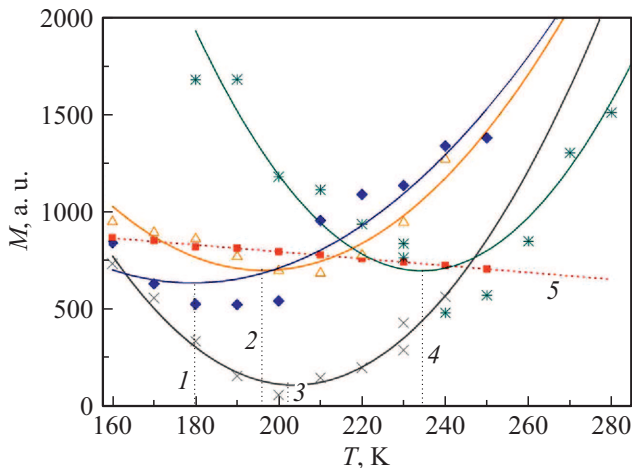


**Рис. 2.** Кривые намагничивания реперной однослойной пленки  $Dy_xCo_{1-x}$  (a), двухслойной структуры  $Dy_xCo_{1-x}/Py$  (b) и трехслойной структуры  $Dy_xCo_{1-x}/Bi/Py$  при толщине прослойки Bi  $d_{Bi} = 4$  nm (c).

можем наблюдать при исследовании намагниченности однослойной реперной пленки  $Dy_xCo_{1-x}$  (кривая 1 на рис. 3).

Что же касается поведения намагниченности в системе  $Dy_xCo_{1-x}/Bi/Py$ , то здесь можно выделить две принципиально различные ситуации. В первом случае точка компенсации существует, ее положение может изменяться (семейство кривых 2–4 на рис. 3, соответствующих различной толщине прослойки висмута) — мы имеем дело с антиферромагнитным взаимодействием между слоями  $DyCo$  и  $Py$ . Во втором случае имеет место ситуация, когда точка компенсации пропадает (кривая 5 на рис. 3), в то же время происходит уменьшение намагниченности при увеличении температуры. В таком случае взаимодействие между слоями носит ферромагнитный характер. Чтобы понять природу изменения или исчезновения точки компенсации, обратимся к работе [13], где на основе *ab initio* расчетов оцениваются значения температуры данного перехода путем варьирования параметров  $J_{TM-TM}$  и  $J_{Re-TM}$  — констант обменного взаимодействия  $TM-TM$  и  $Re-TM$  соответственно. Установлено, что точка компенсации

появляется только при низких значениях  $J_{Re-TM}$ . С увеличением обмена  $J_{TM-TM}$  диапазон параметров  $J_{Re-TM}$ , для которых существует точка компенсации, становится шире. Например, для случая  $TM = Fe$ ,  $Re = Tb$  показано, что точка компенсации может варьироваться в широком диапазоне температур от 220 до 950 K. Следовательно, для рассматриваемых в настоящей работе систем  $Dy_xCo_{1-x}/Bi/Py$  мы можем предположить, что прослойка Bi оказывает влияние на магнитное состояние слоя  $DyCo$  путем изменения обменных констант  $J_{Dy-Dy}$  и  $J_{Dy-Co}$ . Здесь следует отметить, что даже чистый интерфейс  $DyCo_5/Bi$  (без образования каких-либо соединений) может оказывать существенное влияние на анизотропию в пленке  $DyCo_5$  вследствие того, что Bi является тяжелым элементом и имеет довольно сильное спин-орбитальное взаимодействие. Данный факт будет проявляться в существенной анизотропии магнитной восприимчивости даже в отсутствие *d*-состояний в зоне проводимости. Поэтому даже небольшое обменное подмагничивание *p*-состояний Bi со стороны  $DyCo_5$  может приводить к сильному изменению энергии магнитной анизотропии. Ситуация может быть аналогичной встре-



**Рис. 3.** Температурная зависимость намагниченности для образцов  $Du_xCo_{1-x}$  (ромб и кривая 1),  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Pu$  при толщине прослойки Bi  $d_{Bi} = 4$  nm (треугольник и кривая 2),  $d_{Bi} = 3$  nm (крестик и кривая 3),  $d_{Bi} = 2$  nm (звездочка и кривая 4) и  $Du_xCo_{1-x}/Pu$  (квадрат и кривая 5). Вертикальными линиями обозначены соответствующие температуры компенсации для каждого образца.

чающейся в функциональных ферромагнитных (FePt, MnBi) и антиферромагнитных (MnIr) сплавах с немагнитным тяжелым элементом [14].

Таким образом, в работе установлено, что наличие полуметаллической прослойки Bi в составе трехслойной структуры  $Du_xCo_{1-x}/Bi/Pu$  приводит к изменению магнитного состояния, а именно:

- изменяется характер межслоевого обменного взаимодействия с антиферромагнитного на ферромагнитный;
- температурный ход намагниченности для образцов с различной толщиной Bi заметно различается, магнитный переход, соответствующий температуре компенсации сплава  $Du_xCo_{1-x}$  смещается по оси температур либо вовсе отсутствует.

### Финансирование работы

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00161-а).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Novel magnetic nanostructures: unique properties and applications*, ed. by N. Domracheva, M. Caporali, E. Rentschler (Elsevier, Amsterdam, 2018).
- [2] A.A. Unal, S. Valencia, F. Radu, D. Marchenko, K.J. Merazzo, M. Vázquez, J. Sánchez-Barriga, *Phys. Rev. Appl.*, **5**, 064007 (2016).

- [3] A. Donges, S. Khmelevskiy, R.-M. Deak, D. Abrudan, I. Schmitz, F. Radu, L. Szunyogh, U. Nowak, *Phys. Rev. B*, **96**, 024412 (2017).
- [4] M. Labrune, M. Carbuticchio, *J. Magn. Magn. Mater.*, **269**, 203 (2004).
- [5] D. Wang, C.G. Morrison, A.R. Buckingham, G.J. Bowden, R.C.C. Ward, P.A.J. de Groot, *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 586 (2009).
- [6] Б.П. Захарченя, В.Л. Корнев, *УФН*, **175** (6), 629 (2005).
- [7] В.М. Денисов, Н.В. Белоусова, Г.К. Моисеев, *Висмутсодержащие материалы: строение и физико-химические свойства* (Ин-т металлургии УрО РАН, Екатеринбург, 2000).
- [8] В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий, *Оптика и спектроскопия*, **97** (3), 514 (2004).
- [9] H. Fujiwara, *Spectroscopic ellipsometry: principles and application* (Wiley, 2007).
- [10] D.E. Aspnes, J.B. Theeten, F. Hottier, *Phys. Rev. B*, **20**, 3292 (1979).
- [11] Г.С. Патрин, В.Ю. Яковчук, С.А. Яриков, Я.Г. Шиян, В.П. Фурдык, *Письма в ЖТФ*, **45** (10), 34 (2019).
- [12] S.D. Bader, *J. Magn. Magn. Mater.*, **100**, 440 (1991).
- [13] R. Moreno, S. Khmelevskiy, O. Chubykalo-Fesenko, *Phys. Rev. B*, **99**, 184401 (2019).
- [14] S.V. Grigoriev, E.V. Moskvina, V.A. Dyadkin, D. Lamago, T. Wolf, H. Eckerlebe, S.V. Maleyev, *Phys. Rev. B*, **83**, 224411 (2011).