

УДК.537.624.9;538.935

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Ge/Co

© 2014 г. Г. С. Патрин^{1,2}, И. А. Турпанов¹, К. Г. Патрин^{1,2},
Е. А. Алексейчик¹, В. И. Юшков^{1,2}, А. В. Кобяков^{1,2}

E-mail: patrin@iph.krasn.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований магнитных и электрических свойств двухслойных пленок в системе кобальт–германий. Обнаружено, что на границе раздела образуется промежуточный магнитный слой, который влияет на магнитное поведение и магниторезистивный эффект.

DOI: 10.7868/S0367676514010153

Заметный интерес к гетероструктурам на основе полупроводниковых и магнитных материалов обусловлен тем, что возникает возможность интегрирования магнетизма и полупроводниковых свойств [1]. Как правило, конечной целью создания структур ферромагнетик–полупроводник является управление электрическими свойствами путем изменения магнитных параметров. В этом случае на первый план выходит изучение магнитных и межслоевых взаимодействий и механизмов, ответственных за их формирование.

Ранее [2, 3] нами были получены трехслойные пленки Co/Ge/Co и исследованы их магнитные свойства в зависимости от условий получения и толщины полупроводниковой прослойки. Было установлено, что в зависимости от скорости осаждения и температуры подложки образуется двухфазная в магнитном отношении структура, когда в матрице кубического кобальта распределены гранулы гексагонального кобальта. Намагнитченность показывает термоактивационный характер, что удается описать в рамках модифицированной модели Stoner–Wolffarth [4]. При этом величина магниторезистивного эффекта оказалась порядка единицы процента.

С целью выяснения механизма формирования магнитной структуры и установления роли интерфейса мы синтезировали двухслойные пленки Ge/Co и исследовали магнитные и резистивные свойства. Пленки наносились на стеклянную подложку методом магнетронного напыления на сверхвысоковакуумной установке с четырьмя ис-

точниками фирмы “Omicron” (с системой определения толщины пленок в процессе роста) при базовом давлении $\sim 10^{-10}$ Торр. Температура подложки во время напыления первого слоя была 150°C , и подбиралась из соображения лучшей адгезии, затем подогрев выключался, чтобы не стимулировать диффузионные процессы. Толщины слоев также контролировались методом рентгеновской спектроскопии с точностью измерения ± 0.5 нм. Шероховатость поверхности проверялась на атомном силовом микроскопе “Veeco MultiMode NanoScope IIIa SPM System” (с разрешением до 0.2 нм) и была ± 1 нм по высоте в максимуме величины на базовой длине 20 нм. Измерения магнитных и электрических свойств проводились на СКВИД-установке “Magnetic Properties Measurement System” (MPMS-XL) фирмы “Quantum Design” (температурный диапазон $T = 2\text{--}400$ К, область магнитных полей $H = 0\text{--}4000$ кА · м⁻¹). Проведены исследования двухслойных пленочных структур при фиксированной толщине германия ($t_{\text{Ge}} = 8$ нм) с различными толщинами ферромагнитного слоя кобальта ($t_{\text{Co}} = 2\text{--}11$ нм). Сверху и снизу исследуемой Co/Ge-структуры напылялись защитные слои меди толщиной $t_{\text{Cu}} \sim 50$ нм, которые выполняли и роль контактных площадок.

Электронно-микроскопические исследования поперечного сечения полученных пленок (выполненные на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 фирмы “JEOL”) показали, что в пленках с большими толщинами кобальта ($t_{\text{Co}} > 4$ нм) на границе раздела материалов образуется переходный слой толщиной около 4 нм. При меньших толщинах кобальта образуется слой из перемешанных исходных элементов. Из данных электронной микродифракции также получено, что слой кобальта представляет собой гекса-

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск.

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Сибирский федеральный университет”, Красноярск.

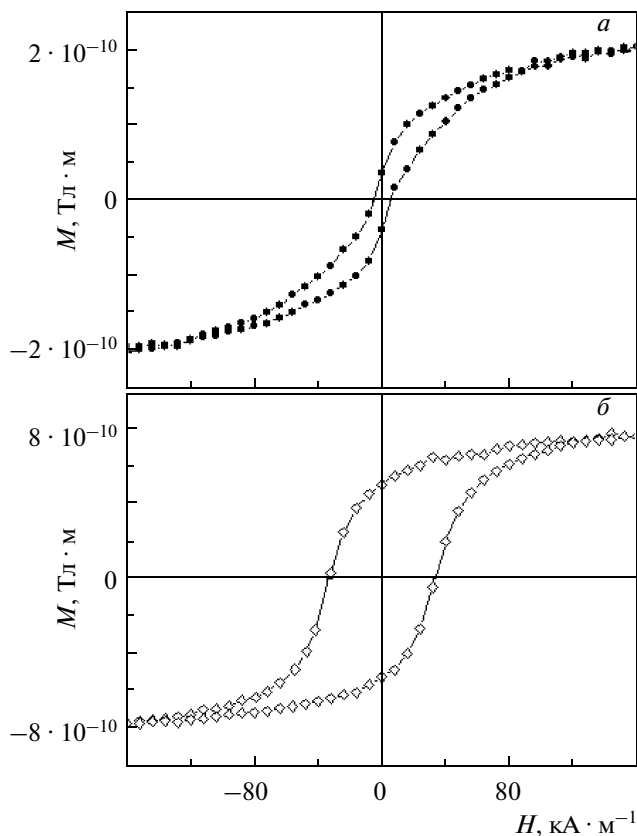


Рис. 1. Петли гистерезиса для пленок: *a* – Ge(8 нм)/Co(2 нм), *б* – Ge(8 нм)/Co(7 нм). $T = 300$ К.

гональную фазу ($P6_3/mmc$, $a = 0.250$ нм, $c = 0.406$ нм, отчетливо наблюдаются линии $d_{101} = 0.191$ нм, $d_{110} = 0.1252$ нм и размытый рефлекс $d_{110} = 0.2023$), а переходный слой, по-видимому, представляет собой сплав Co–Ge, хотя совсем исключить наличие другой фазы в малых количествах нельзя. Как известно [5], структура сплава Co–Ge остается гексагональной при содержании германия вплоть до концентраций ≤ 17 ат. %.

Ниже приведены магнитные данные для пленок с $t_{Co} = 2$ нм, $t_{Co} = 7$ нм, в полной мере иллюстрирующие изменения намагниченности, связанные с возникновением промежуточного слоя. Как видно из рис. 1 (по оси ординат представлена намагниченность с единицы площади пленки), имеет место существенная зависимость формы петли от толщины слоя ферромагнитного металла. В области низких температур при малых толщинах кобальта (≤ 4 нм), когда большой вклад дает промежуточный слой, петля носит смещенный вид. При больших толщинах кобальта ($t_{Co}^* > 10$ нм) петли являются симметричными и зависимость магнитных характеристик от температуры сильнее. На рис. 2 приведены температурные зависимости обменного поля и коэрцитивной сил, отку-

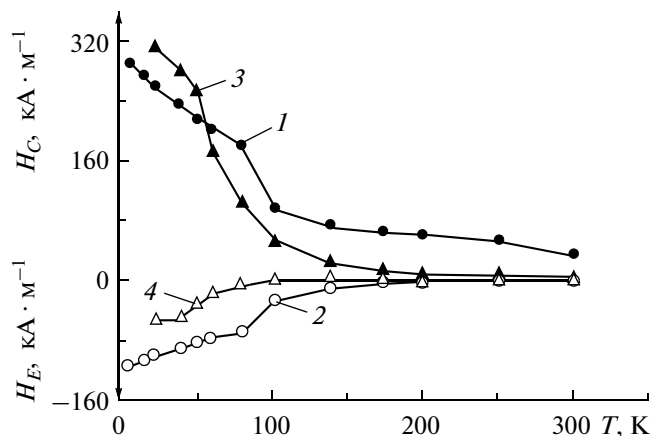


Рис. 2. Температурные зависимости коэрцитивной силы и поля обменного смещения для пленок Co/Ge: $t_{Ge} = 8$ нм; 1, 2 – $t_{Co} = 7$ нм; 3, 4 – $t_{Co} = 2$ нм.

да видно, что эти величины коррелируют между собой. Также видно, что имеет место уменьшение как коэрцитивной силы, так и величины поля обменного смещения при уменьшении слоя кобальта. Увеличение толщины магнитного слоя до величины t_{Co}^* увеличивает как коэрцитивную силу, так и поле обменного смещения.

Также были проведены исследования электрических свойств при протекании тока перпендикулярно плоскости пленочной структуры ($S = 3 \times 5$ мм²). Магнитное поле лежало в плоскости пленки. Получено, что в режиме охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) при повышении температуры электросопротивление сначала слабо уменьшается, а при $T_K \geq 70$ К возрастает, показывая металлический характер (при $T = 4.5$ К сопротивление структуры в “обратном” направлении тока равно $R = 5.1 \cdot 10^{-3}$ Ом). В области T_K на температурной зависимости электросопротивления наблюдается особенность типа “ступенька”. Наиболее сильно этот эффект проявляется при больших толщинах кобальтового слоя. Как видно на рис. 3, сопротивление для протекания тока в “прямом” и “обратном” направлениях отличается более чем на порядок во всем диапазоне исследованных температур. Это значит, что имеет место эффект выпрямления, связанный, вероятно, с барьером типа Шотки. Обнаружено, что при температурах $T > T_K$ имеет место заметная зависимость сопротивления от магнитного поля (см. рис. 3). Для протекания тока в прямом направлении влияние магнитного поля приводит только к смещению температуры аномалии в область более высоких температур. Для тока в обратном направлении в магнитном поле ступенька исчезает, и мы наблюдаем металлический характер зависимости сопротивления от температуры. Для электриче-

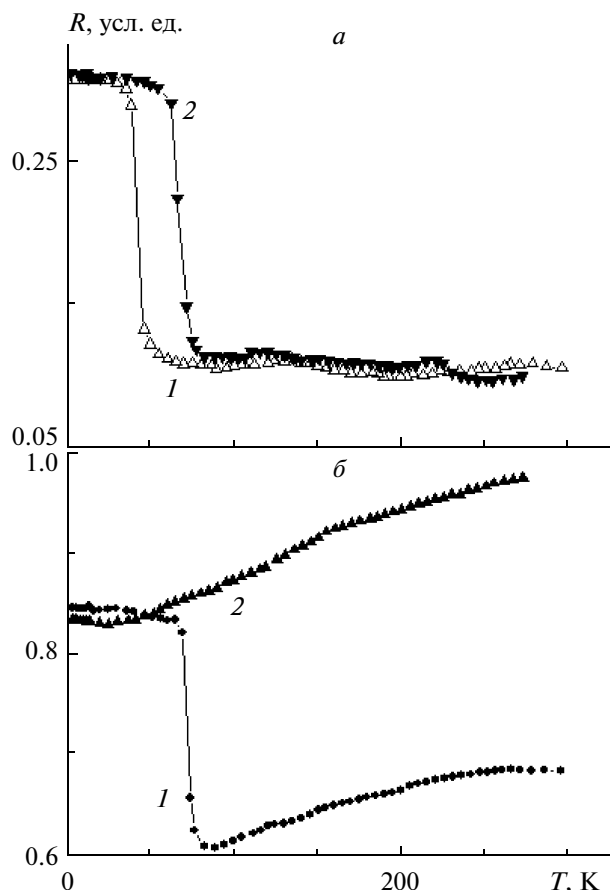


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления пленки Ge(8 нм)/Co(10 нм). Режим охлаждения – ZFC; *a* – ток в прямом направлении, *б* – ток в обратном направлении; 1 – без поля, 2 – в магнитном поле ($H = 1600 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$). Ток измерения $I_{dc} = 3 \text{ мА}$.

ского сопротивления также имеется зависимость от очередности нанесения слоев.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить при учете возникающего промежуточного слоя, принадлежащего другой магнитной фазе. В нашем случае магнитные характеристики двухслойных пленок отличаются от свойств чисто кобальтовых пленок. При увеличении толщины кобальта от минимально возможных величин толщина промежуточного слоя растет до толщины 4 нм. Далее ее рост прекра-

щается и растет чисто кобальтовый слой. Следует также учитывать, что в промежуточном слое распределение намагниченности не является однородным. Если считать [6], что коэрцитивная сила определяется магнитной анизотропией, то, как следует из рис. 1, наличие переходного слоя уменьшает магнитную анизотропию, т.е. имеет место конкуренция вкладов от переходного слоя и кобальтового слоя. Наблюдаемое поведение поля обменного смещения можно связать либо с поведением магнитной анизотропии переходного слоя, либо с особенностями межслоевого взаимодействия между переходным и кобальтовым слоями.

В поведении электрического сопротивления можно выделить два момента. Первый – это эффект выпрямления, что не является неожиданным для интерфейса металл–полупроводник. И второй момент – это существенная зависимость сопротивления от магнитного поля. По-видимому, такое поведение обусловлено взаимодействием на границе раздела слоев. Определение величины и знака взаимодействия между этими слоями будет ближайшей задачей.

Считаем необходимым заметить, что толщина переходного слоя и поведение намагниченности всей структуры зависят не только от толщины магнитного слоя, но и от очередности нанесения слоев: ферромагнетик или полупроводник. Но это будет предметом специального исследования.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00675-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарченя Б.П., Корнев В.Л. // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175. Вып. 5. С. 629.
2. Patrin G.S., Chan-Gyu Lee, Turpanov I.A. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2006. V. 306. P. 218.
3. Kobayakov A.V., Patrin G.S., Turpanov I.A. et al. // Sol. St. Phenom. 2011. V. 168–169. P. 273.
4. Patrin G.S., Chan-Gyu Lee, Bon-Heun Koo, Keesam Shin // Phys. Lett. A. 2006. V. 359. P. 149.
5. Денисов В.М., Истомин С.А., Подкопытов О.И. и др. Германий, его соединения и сплавы. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 598 с.
6. Sander D. // Phys.: Condens. Matter. 2004. V. 16. P. R603.