

УДК 537.9

## ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$

© 2019 г. А. В. Кобяков<sup>1,2,\*</sup>, И. А. Турпанов<sup>2</sup>, Г. С. Патрин<sup>1,2</sup>,  
Р. Ю. Руденко<sup>1,2</sup>, В. И. Юшков<sup>1,2</sup>, Н. Н. Косырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Сибирский федеральный университет”, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики имени Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

\*E-mail: [nanoauka@mail.ru](mailto:nanoauka@mail.ru)

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

В работе представлены экспериментальные результаты структурных и магнитных измерений для пленочной системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ . Структура получена методом ионно-плазменного напыления и перспективна в качестве туннельной гетероструктуры. Выявлена зависимость магнитных свойств кобальта от скорости его напыления и скорости напыления предшествующих слоев.

DOI: 10.1134/S0367676519070226

В последнее время актуальной проблемой остается исследование механизмов, ответственных за формирование физических свойств тонкопленочных структур в системах ферромагнитный металл/диэлектрик/полупроводник (ФММ/Д/ПП). Для получения таких структур с требуемыми свойствами довольно сложной задачей является получение качественных границ раздела (интерфейсов) между слоями. Поэтому изучение влияния границ раздела слоев на формирование структуры, ее физические свойства, в частности, на магнитные свойства, и, как следствие, на спин-зависимый транспорт, является довольно актуальной задачей [1–3]. Для исследования выбрана образцы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ .

Структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  были получены методом ионно-плазменного напыления при базовом давлении  $p = 10^{-6}$  Тор в атмосфере аргона. В качестве материала подложки использовался кремний (001), предварительно очищенный методом ионно-плазменного травления в рабочей камере непосредственно перед процессом напыления. В работе синтезированы серии образцов, которые можно разделить по скоростям осаждения на два типа пленок. Скорость осаждения для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  отличается в 10 раз, а для Ge-p и Co в 5 раз. Также получены пленки чистого кобальта на аналогичную подложку, предварительно очищенную методом ионно-плазменного травления с теми же скоростями напыления.

1 тип пленок:

1)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.5 Å/мин/33 nm)/Ge-p (24 Å/мин/54 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0.5 Å/мин/4.7 nm)/Co (12 Å/мин/104.7 nm).

2) Co (12 Å/мин/1000Å).

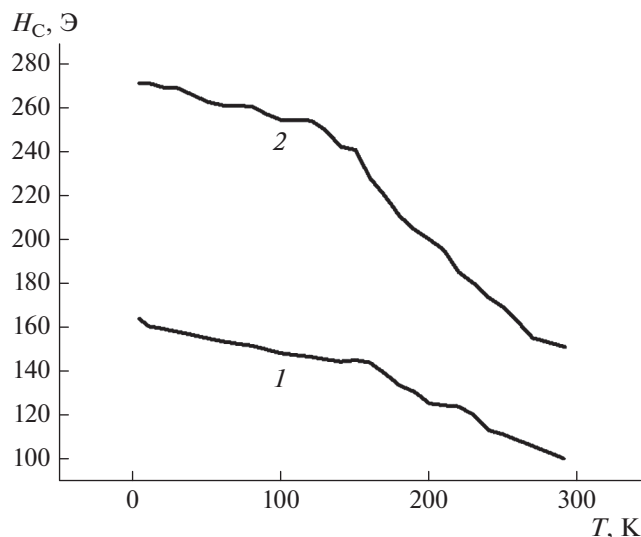
2 тип пленок:

1)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5.5 Å/мин/220 nm)/Ge-p (144 Å/мин/31 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ (5.5 Å/мин/16 nm)/Co (72 Å/мин/106 nm).

2) Co (72 Å/мин/1000 Å).

ТЕМ-изображение поперечного сечения структуры получены на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi HT7700. Исследована структура поверхности пленок на атомном силовом микроскопе Veeco Multi Mode. Проведены магнитные измерения методом магнитооптического эффекта Керра (NanoMOKE-2) и на СКВИД-магнетометре (MPMS\_XL фирмы “Quantum Design”).

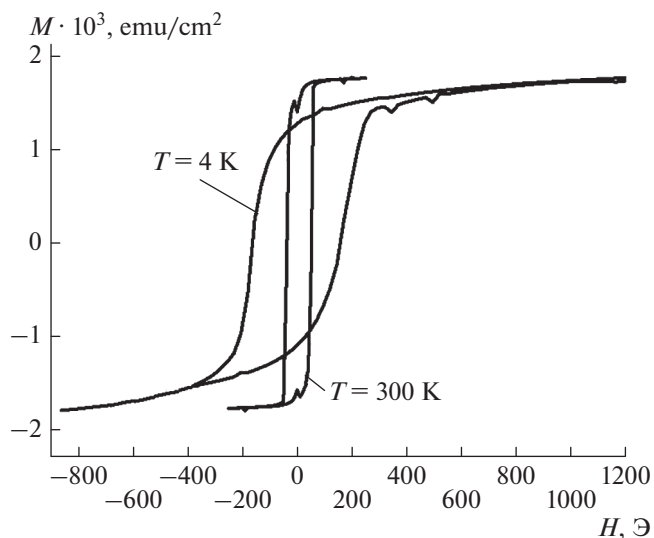
Из ТЕМ-изображений поперечного сечения структуры видно, что после обработки подложки ионно-плазменным травлением сформировались сплошные и гладкие межслоевые границы между подложкой и слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для пленок обоих типов с шероховатостью около 1–2 нанометров. Но далее для пленок 1-го типа шероховатость на границах между последующими слоями изменяется слабо, а для пленок 2-го типа увеличивается более резко.



**Рис. 1.** Зависимость коэрцитивной силы от температуры для образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  со скоростями осаждения 1-го типа (медленные); и 2-го типа (быстрые).

Также были получены параметры шероховатости верхнего слоя кобальта для всех образцов чистого кобальта и многослойных пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  методом атомно-силовой микроскопии. Из анализа шероховатостей определено, что для пленки чистого кобальта при уменьшении его скорости напыления шероховатость уменьшается в 2 раза. Но для многослойной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  при снижении скорости осаждения каждого слоя шероховатость верхнего слоя кобальта уменьшается в 3–5 раз. Так, для 1 типа образцов шероховатость кобальта  $R_a$  для системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  уменьшается до 3–4 Å. Таким образом, существует влияние скорости осаждения промежуточных слоев на шероховатость верхнего слоя.

Из магнитных измерений выяснено, что для системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  при малых скоростях осаждения (1 тип) коэрцитивная сила при комнатной температуре равна 100 Э, при понижении температуры до 4 К, увеличивается до 160 Э. Для больших скоростей осаждения (2 тип) коэрцитивная сила при комнатной температуре порядка 160 Э, и при понижении температуры до 4 К увеличивается до 280 Э. При одной и той же скорости напыления кобальта чистого и в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  (рис. 1 – кривая 1, рис. 2) его коэрцитивная сила различается в два и более раз в зависимости от температуры. Как известно [4], при уменьшении скорости осаждения кобальта доля гексагональной фазы уменьшается, и появляются дополнительные фазы. Таким образом, различие коэрцитивных сил об-



**Рис. 2.** Петли гистерезиса для чистого слоя кобальта при  $T = 300$  и  $T = 4$  К, 1-й тип образцов (“медленные”).

разцов и крутизна их температурных зависимостей может быть связана со скоростью осаждения подслоев кобальта в системе, так как рельеф поверхности зависит от скорости осаждения предыдущего слоя и соответственно влияет на структуру последующих слоев. Таким образом, изменение коэрцитивной силы в системах  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  связано с анизотропией на интерфейсе.

В результате исследований системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge-p}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  выявлена зависимость магнитных свойств кобальта от скорости его распыления ионно-плазменным методом и скорости напыления предшествующих слоев данному слою кобальта. Снижение скорости осаждения слоев в многослойной структуре позволяет уменьшить шероховатость границ соседних слоев, средний размер зерна; снизить и стабилизировать коэрцитивную силу. Это может иметь большое значение при создании устройств спинтроники, например, магнитных датчиков.

Более детальное описание магнитной анизотропии в системе ферромагнитный металл–полупроводник требует учета реальной электронной структуры и структуры интерфейса [5], поскольку толщина интерфейса составляет единицы нанометров и в нем формируются новые фазы.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00161-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xuan Y., Wu Y.Q., Lin H.C. et al. // IEEE Electron. Dev. Lett. 2007. V. 28. P. 935.

2. Середин П.В., Голощанов Д.Л., Лукин А.Н. и др. // Физ. тех. полупроводн. 2014. Т. 48. № 11. С. 1564; Seredin P.V., Goloscharov D.L., Lukin A.N. et al. // Semiconductors. 2014. V. 48. № 11. P. 1527.
3. Крушинская Л.А., Стельмах Я.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые матер., сверхпроводники. 2011. № 19. С. 92.
4. Патрин Г.С., Турпанов И.А., Кобяков А.В. и др. // ФТТ. 2014. Т. 56. № 2. С. 301; Patrin G.S., Turpanov I.A., Kobayakov A.V. et al. // Phys. Sol. St. 2014. V. 56. № 2. P. 302.
5. Патрин Г.С., Кобяков А.В., Турпанов И.А. и др. // ФТТ. 2016. Т. 58. № 5. С. 1000; Patrin G.S., Kobayakov A.V., Turpanov I.A. et al. // Phys. Sol. St. 2016. V. 58. № 5. P. 1034.