

МАГНИТНЫЕ, ПРОВОДЯЩИЕ И МАГНИТОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК (CoFeB+SiO₂+N₂) В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 2–400 К И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 0, 1 И 5 Тл

Л.Н. Котов¹, А.А. Уткин¹, Ю.Е. Калинин², А.В. Ситников²

¹ Сыктывкарский государственный университет, г. Сыктывкар, Российская Федерация

² Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация

E-mail: kotovln@mail.ru

Аннотация. Композитные плёнки с составами [(CoFeB)_x+(SiO₂)_(1-x)+N₂], $x = 0,33–0,52$ были получены методом ионно-лучевого напыления с использованием мишеней металлического сплава и диэлектрика в атмосфере азота. Определены толщины и содержание атомных элементов, концентрации металлического сплава x композитных плёнок при помощи электронного микроскопа TESCAN MIRA3. Получены изображения магнитного фазового контраста поверхности композитных плёнок с помощью метода магнитосилового микроскопии с использованием атомно-силового микроскопа Интегра Prima (NT-MDT, Россия) с кантилевером MFM10. Для всех композитных плёнок с $x = 0,33–0,52$ характерна гранулированная структура, а для плёнок с большой концентрацией $x > 0,48$ наблюдались и протяжённые области скопления металлических гранул. Были исследованы температурные зависимости магнитной восприимчивости, удельной проводимости и удельной магнитной проводимости композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂) с разными $x = 0,33–0,52$ в широком интервале температур 2–400 К и в магнитных полях 0, 1 и 5 Тл. Было обнаружено, что в композитных плёнках с концентрацией металлического сплава $x = 0,46–0,52$ в некоторых интервалах температур наблюдаются положительная магнитная проводимость, а в других интервалах температур - отрицательная магнитная проводимость. Соотношение положительной и отрицательной магнитной проводимости определяется температурой и концентрацией металлического сплава x в композитных плёнках. Наибольшая положительная магнитная проводимость (около 1,2) характерна для гранулированных композитных металл-диэлектрических плёнок с $x = 0,46$ с малыми размерами гранул. Наибольшая отрицательная магнитная проводимость (около -0,2) возникает в композитных плёнках с наибольшей концентрацией металлического сплава $x = 0,52$, которые имеют протяжённые (более нескольких микрон) металлические области скопления металлических гранул.

Ключевые слова: композитные металл-диэлектрические плёнки; гранулированная структура; магнитная восприимчивость; электрическое сопротивление; магнитная проводимость.

Введение

Наногранулированные композитные плёнки металл-диэлектрик – это гетерогенные материалы, в которых металлические и диэлектрические гранулы нанометровых размеров (2–100 нм) хаотически распределены в объёме плёнки. Наноразмерное фрагментирование существенно разнородных по своим электрическим свойствам фаз, обуславливает уникальные квантовые свойства нанокompозитов [1–4]. К этим свойствам можно отнести гигантское магнитосопротивление, аномальный эффект Холла, аномально высокие значения эффекта Керра, высокие значения коэффициента поглощения СВЧ-излучения. Перспективными материалами для СВЧ магнитоэлектроники также являются композитные металл-диэлектрические плёнки, сопротивление которых может сильно изменяться под действием постоянных, переменных и импульсных магнитных полей [5]. Интерес для исследований представляют собой электрические и магнитные свойства композитных плёнок, а также изменения этих свойств при действии на них магнитного поля [5–7]. Наногранулированные магнитные композитные пленки типа металл-диэлектрик обладают как положительной проводимостью, так и отрицательной магнитной проводимостью [6]. Выполнено множество исследований по магнитосопротивлению композитных плёнок, но до сих пор не-

ясно, какие механизмы отвечают за положительную и отрицательную магнитную проводимость в композитных плёнках, и как добиться гигантских значений отрицательного магнитосопротивления. С целью выявления механизма магнитосопротивления композитных плёнок были проведены исследования проводящих, магнитных и магнито-проводящих свойств композитных плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2$) в широком интервале температур 2–400 К при намагничивании плёнок постоянным магнитным полем с индукцией 1 и 5 Тл.

Составы, характеристики и структура плёнок

Композитные плёнки были получены в Воронежском государственном техническом университете [4]. Напыление плёнок осуществлялось на лавсановый лист формата А4 площадью $297 \times 210 \text{ мм}^2$ методом ионной бомбардировки мишеней в виде пластин из металлических сплавов $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ и диэлектрика SiO_2 [5]. Плёнки получались в атмосфере аргона и азота, а мишени бомбардировались в основном более лёгкими ионами аргона. Полёт выбитых из мишеней металлических и диэлектрических частиц в атмосфере азота приводил к тому, что поверхность частиц покрывалась шубой из молекул азота. Это приводило к созданию композитных плёнок с гранулированной структурой даже за областью перколяции (протекания металла). Содержание атомов азота в элементном составе плёнок составляло от 7,3 до 8,9 ат. %. Толщины и состав образцов определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3 и приведены в таблице, где использованы обозначения: d – толщина плёнки, Δd – погрешность измерения толщины плёнки, x – концентрация металлического сплава CoFeB , p – пористость плёнок. Концентрация металлического сплава x и атомных элементов приведена в атомных долях.

Толщины, пористость и составы плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2$)

Номер плёнки	d , мкм	Δd , нм	x	P	B	Co	Fe	N	O	Si
1	1,22	36	0,46	0,41	0,02	0,25	0,19	0,07	0,39	0,09
3	1,53	22	0,51	0,31	0,03	0,27	0,21	0,08	0,33	0,094
5	1,55	36	0,52	0,31	0,06	0,26	0,20	0,08	0,33	0,097
7	1,85	30	0,42	0,45	0,04	0,21	0,17	0,08	0,38	0,012
9	2,15	52	0,35	0,53	0,03	0,18	0,14	0,08	0,43	0,014
10	1,51	36	0,33	0,55	0,02	0,19	0,14	0,09	0,44	0,015

При подготовке плёнок для исследования лавсановый лист с напылённым слоем композита ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2$) разрезался на 11 полосок, толщиной по 2,7 см. Каждая полоска характеризовалась определённой концентрацией металлического сплава x (см. таблицу). Для измерения магнитной восприимчивости и электрического сопротивления с каждой полоски вырезался кусочек плёнки на лавсановой подложке с размерами 6 мм на 4 мм. Изображения магнитного фазового контраста поверхности плёнок проводилось с помощью атомно-силового микроскопа Интегра Prima (NT-MDT, Россия) с кантилевером MFM10. Силиконовый зонд был покрыт магнитным сплавом CoCr толщиной 40 нм. Радиус закругления кончика зонда составлял 20 нм. Частота колебаний внешней силы, действующей на кантилевер с зондом, подбирались в диапазоне частот $47 \div 90 \text{ кГц}$. В микроскопе регистрировалась разность фаз $\Delta\varphi$, которая изменялась в зависимости от силы магнитного взаимодействия зонда с поверхностью пленок. Притяжение и отталкивание зонда к участку поверхности магнитной плёнки соответствовало разным знакам $\Delta\varphi$. Полученная зависимость $\Delta\varphi$ от координат поверхности плёнок преобразовывалась в изображение магнитного фазового контраста, отображающее размеры и форму магнитных однородных областей с постоянным сдвигом фаз (рис. 1).

Методика и техника эксперимента

Все измерения магнитной восприимчивости и электрического сопротивления композитных плёнок в интервале температур 2–400 К и магнитных полей 0–5 Тл проводились в центре диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники научного парка Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ). Измерения магнитной

восприимчивости проводились с использованием комплекса для автоматизированных измерений, включающих в себя СКВИД (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – «сверхпроводящий квантовый интерферометр») и термостат 1,9–400 К. Измерения электрического сопротивления в интервале температур 2–400 К и магнитных полей 0–5 Тл проводились с использованием измерительного комплекса (ППМС-9 + EverCool-II) со сверхпроводящим магнитом ±9 Тл. Температурные зависимости магнитной восприимчивости измерялись в двух режимах: в режиме охлаждения в нулевом магнитном поле (нулевое поле охлаждения, или режим ZFC) и в режиме охлаждения в ненулевом магнитном поле (полевое охлаждение, или режим FC) (рис. 2, а). Измерения электрического сопротивления проводились при 4-контактном подключении. При измерениях магнитной восприимчивости плёнок магнитное поле было направлено параллельно поверхности плёнки, а при измерениях электрического сопротивления – перпендикулярно.

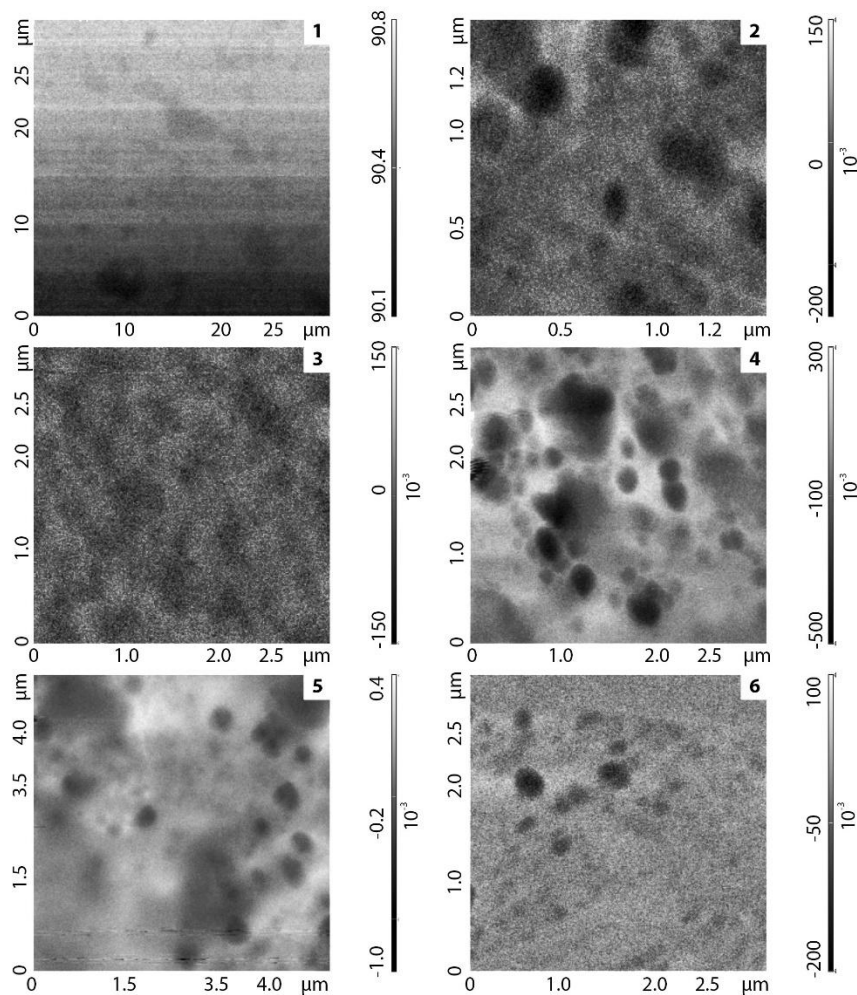


Рис. 1. Изображения магнитного фазового контраста композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂): 1 ($x = 0,46$), 2 ($0,48$), 3 ($0,51$), 4 ($0,52$), 5 ($0,42$), 6 ($0,35$). Справа от изображений приведены значения сдвига фаз

Результаты эксперимента и их обсуждение

Как видно из рис. 2, для всех композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂) с разной концентрацией металлического сплава x , находящихся в магнитном поле 50 Э, наблюдается сначала увеличение магнитной восприимчивости (МВ) с ростом температуры в интервале температур 2–80 К, а затем монотонное уменьшение МВ в интервале от 100 до 380 К. Максимум МВ плёнок при температурах $T = 70$ К обусловлен близкими значениями постоянного магнитного поля и коэрцитивного поля. При высоких температурах $T > 100$ К магнитное поле при 50 Э выстраивает магнитные моменты в металлических гранулах по полю, а ниже $T < 50$ К магнитное поле не упорядочивает магнитные моменты гранул по полю. Как видно из рис. 2, в для всех композитных плёнок с разными номерами № 1–10, находящихся в магнитном поле 50 кЭ, наблюдается монотонное уменьшение магнитной восприимчивости (МВ) с ростом температуры при $T = 2–380$ К. Наибольшее

значение МВ наблюдается для плёнок № 3 ($x = 0,52$) с максимальной концентрацией металлического сплава x . Отметим, что очень малое значение МВ и, следовательно, намагниченности в больших полях (рис. 2, в) свойственно плёнкам № 9, 10 с малой концентрацией x .

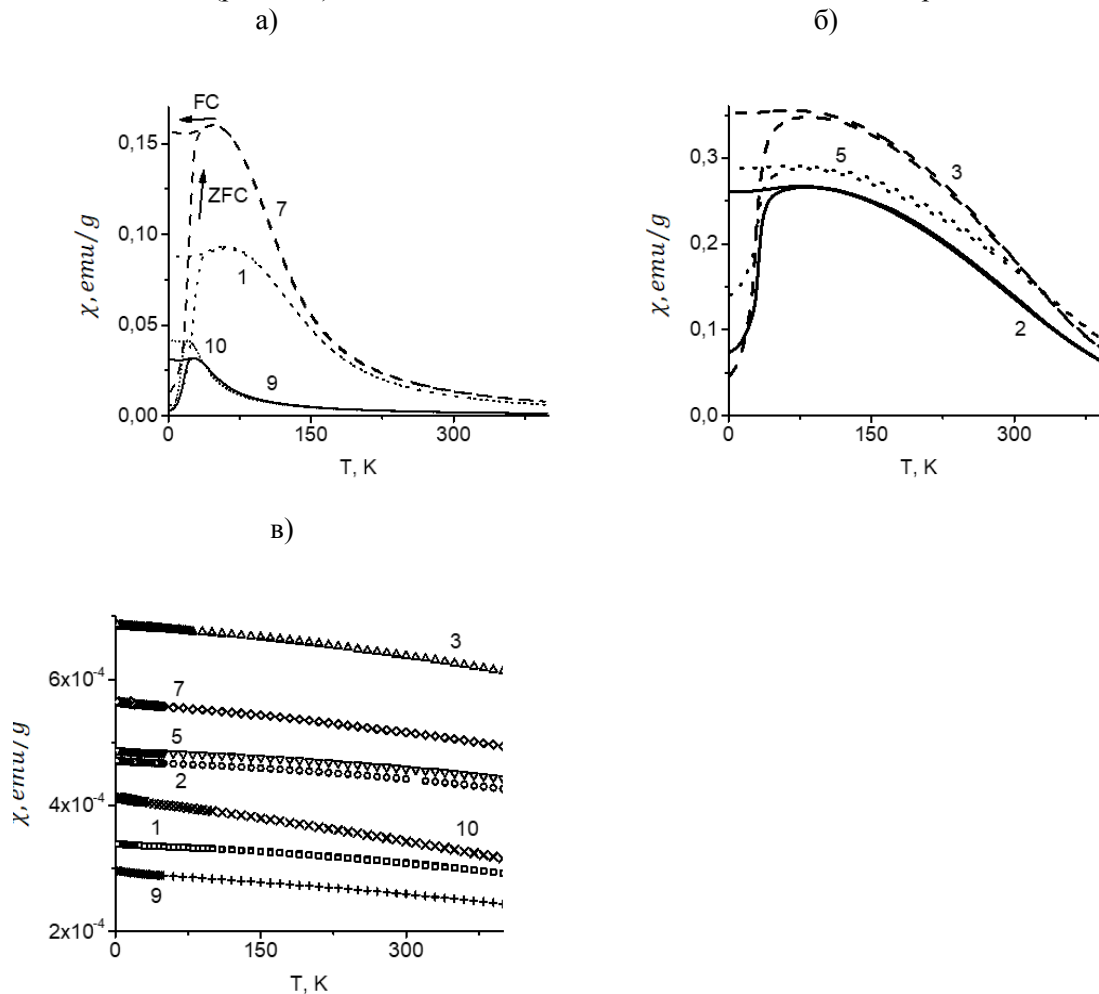


Рис. 2. Температурные зависимости магнитной восприимчивости композитных плёнок в магнитном поле 50 Э (а, б), и в магнитном поле 1 Тл (в): 1 – $x = 0,46$; 2 – 0,49; 3 – 0,51; 5 – 0,52; 7 – 0,42; 9 – 0,35; 10 – 0,33. Номера кривых и плёнок совпадают. Стрелками указано направление движения по температуре при измерениях плёнок

Как видно из рис. 3, для всех композитных плёнок с составами $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2)$ наблюдается линейное увеличение удельной проводимости с ростом температуры от 80 до 380 К. Это свидетельствует о том, что композитные плёнки с составами $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2)$ обладают полупроводниковым характером проводимости. Наибольшее значение проводимости $300 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ наблюдается для плёнок № 3 с максимальной концентрацией металлического сплава $x = 0,52$. При уменьшении концентрации x от 0,52 до 0,33 наблюдается уменьшение максимальной проводимости композитных плёнок. Для плёнок с малой концентрацией $x = 0,32-0,42$ проводимость на два порядка меньше, чем для плёнок при $x = 0,52$. Для пленок № 3 ($x = 0,46$) наблюдается промежуточное значение проводимости между плёнками с $x = 0,52$ и 0,42 и составляет 40 Ом. Кроме того, для плёнок № 10 с малой концентрацией $x = 0,33$ проводимость растёт намного быстрее, чем для других плёнок.

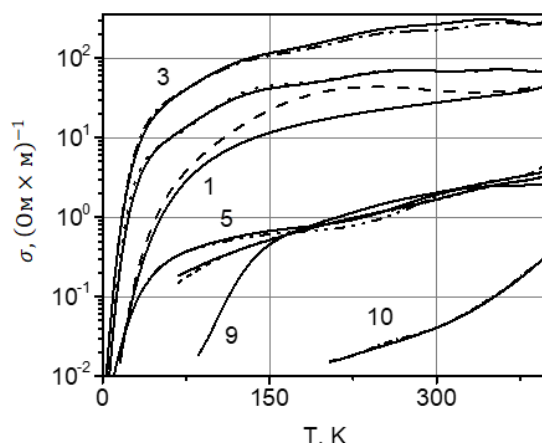


Рис. 3. Температурные зависимости удельной проводимости композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂) без магнитного поля (сплошная линия) и в поле 1 Тл (пунктир): 1 – $x = 0,46$; 2 – $0,49$; 3 – $0,52$; 5 – $0,52$; 7 – $0,42$; 9 – $0,35$; 10 – $0,33$

На рис. 4 приведены графики температурной зависимости относительной магнитной проводимости композитных плёнок $\Delta\sigma/\sigma_0$, где $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_B$, σ_0 и σ_B – проводимость плёнок без поля и в магнитном поле с индукцией 1 Тл. Как видно из рис. 4, максимальная относительная положительная магнитная проводимость (ПМП) характерна для плёнок № 1 ($x = 0,46$), то есть для плёнок с тонкой гранулированной структурой (см. рис. 1) и составляет 1,2, то есть 120 %. По-видимому, такое большое значение ПМП может быть связано с наличием обменного взаимодействия между металлическими гранулами, которое возрастает в больших постоянных магнитных полях. В больших постоянных магнитных полях происходит выстраивание магнитных моментов в металлических гранулах и магнитные границы между гранулами исчезают. Кроме того, для магнитной проводимости плёнки № 1 с $x = 0,46$ наблюдается максимум при температуре $T = 220$ К. Наличие максимума может быть связано с конкуренцией двух процессов, которые дают вклад в магнитную проводимость и зависят от температуры. Это суммарный магнитный момент (намагниченность) и концентрация свободных носителей заряда в металлических гранулах плёнки. Поскольку концентрация свободных носителей заряда определяется удельной проводимостью, которая линейно растёт с температурой (см. рис. 3), то и она линейно должна увеличиваться с ростом температуры. С другой стороны, намагниченность плёнки уменьшается с ростом температуры как $T^{-0,7}$ (см. рис. 2, в). Если считать, что магнитная проводимость определяется противоположными температурными зависимостями намагниченности и концентрацией свободных носителей заряда, то на температурной зависимости магнитной проводимости должен наблюдаться максимум. Для плёнки № 2 ($x = 0,51$), наблюдаются очень малые значения ПМП (около 0,1) в широком интервале температур 50–380 К. Это связано с тем, что в плёнках № 2 ($x = 0,51$) имеются большие области скопления металлических гранул (см. рис. 1), которые дают вклад в отрицательную магнитную проводимость (ОМП) и тем самым уменьшают значение ПМП плёнки. Для плёнки с максимальной $x = 0,52$ наблюдается увеличение ПМП при росте температуры от 320 до 380 К (кривая 5, рис. 4, а). ПМП достигает максимального значения 0,8 при $T = 380$ К. В остальном интервале температур 2–270 К плёнка № 5 ($x = 0,52$) (см. рис. 4, а) наблюдаются малые значения ОМП со значением $-0,2$ при температуре 220 К. Для плёнок № 7 ($x = 0,42$, кривая 7, рис. 4, б) наблюдается незначительная ПМП (около 0,08) при температурах 100–200 К, а в интервале температур 10–80 К наблюдается рост ОМП с понижением температуры от 70 до 40 К. Это свидетельствует о наличии в структуре плёнки № 7 двух областей с наногранулированной и перколяционной структурой (см. рис. 1). Для всех остальных плёнок с номерами № 7, 9, 10 в плёнках имеется наногранулированная и перколяционная структура (см. рис. 1) и для них наблюдаются очень малые значения ПМП и ОМП в широком интервале температур. Все температурные зависимости магнитной проводимости, показанные на рис. 4, свидетельствует о том, что в композитных плёнках с составами (CoFeB+SiO₂+N₂), имеются гранулированные и перколяционные структуры, которые занимают разные объёмы плёнок.

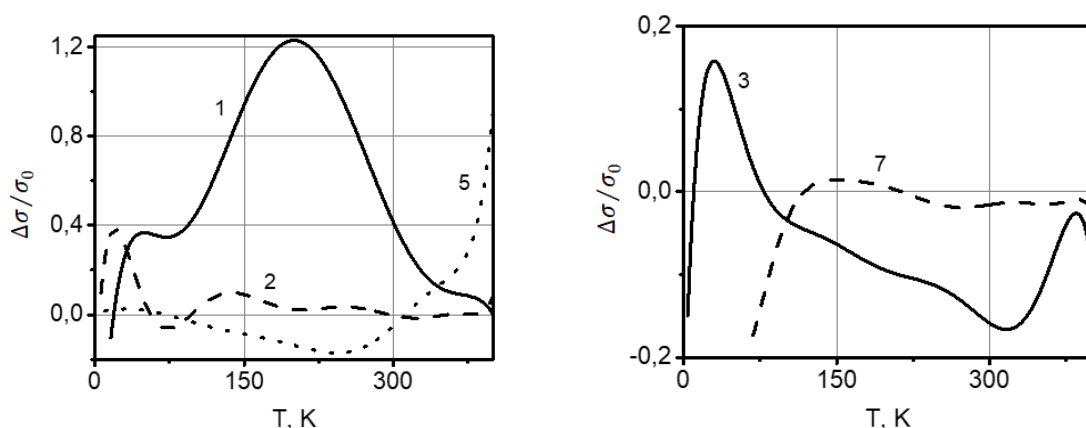


Рис. 4. Температурные зависимости удельной магнитной проводимости композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂):
1 – $x = 0,46$; 2 – $0,49$; 3 – $0,52$; 5 – $0,52$; 7 – $0,42$

Заключение

Получены экспериментальные графики температурных зависимостей магнитной восприимчивости, удельной проводимости и удельной магнитной проводимости композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂) с концентрациями металлического сплава $x = 0,33–0,52$ в широком интервале температур 2–400 К и магнитных полей 0–5 Тл. В композитных пленках с разной концентрацией металлического сплава $x = 0,33–0,52$ одновременно наблюдается положительная и отрицательная магнитная проводимость (МП). Соотношение положительной и отрицательной магнитной проводимости зависит от исследуемого интервала температур и от концентрации металлического сплава x в композитных плёнках. Концентрация металлического сплава выбрана такой, что для плёнок характерна околосуперколлационная структура, которая не возникает из-за напыления плёнок в атмосфере азота. Проведённые расчёты толщины азотных прослоек (около 1–3 нм) между металлическими гранулами в композитных плёнках (CoFeB+SiO₂+N₂) показывают, что большая относительная положительная магнитная проводимость (около 1,2) характерна для наногранулированных композитных метал-диэлектрических плёнок с тонкой (единицы нанометров) толщиной диэлектрических азотных прослоек между металлическими гранулами. Гигантская отрицательная магнитная проводимость возникает в композитных метал-диэлектрических плёнках, имеющих протяжённые (более нескольких микрометров) металлические области скопления металлических гранул.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

Литература

1. Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур (к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН) / П.Г. Баранов, А.М. Калашников, В.И. Козуб, и др. // УФН. – 2019. – Т. 189, № 8. – С. 849–880.
2. Ларионов, К.В. Исследование плёнок многоатомной толщины / К.В. Ларионов, П.Б. Сорокин // УФН. – 2021. – Т. 191, № 1. – С. 30–51.
3. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films / L.N. Kotov, V.S. Vlasov, V.K. Turkov *et al.* // J. of Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – Vol. 12, no. 2. – P. 1696–1699.
4. Влияние магнитного поля на СВЧ импеданс композитных пленок (FeCoB + SiO₂) / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.С. Власов и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 5. – С. 705–709.
5. Magnetic Conductivity of Composite Films (CoFeB+SiO₂+N₂) in Temperature Range 2–400 K / L.N. Kotov, A.A. Utkin, V.S. Vlasov *et al.* // VIII Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”. *Book abstracts*, Russian, Kazan – 2022. – Vol. 1. – P. 127–128.

6. Магнитная проводимость композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂), напылённых в атмосфере азота / А.А. Уткин, Л.Н. Котов, М.П. Ласёк и др. // ИТ АРКТИКА. – 2023. – № 3. – С. 35–48.

7. Особенности гранулированной структуры и магнитные свойства композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂), напылённых в атмосфере азота / А.А. Уткин, В.А. Устюгов, Л.Н. Котов и др. // ИТ АРКТИКА. – 2023. – № 3. – С. 27–34.

Поступила в редакцию 12 октября 2023 г.

Сведения об авторах

Котов Леонид Нафанаилович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра радиофизики и электроники, Сыктывкарский государственный университет, г. Сыктывкар, Российская Федерация, e-mail: kotovln@mail.ru.

Уткин Александр Андреевич – старший преподаватель, кафедра радиофизики и электроники, Сыктывкарский государственный университет, г. Сыктывкар, Российская Федерация, e-mail: utychg@gmail.com.

Калинин Юрий Егорович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра физики твёрдого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: kalinin48@mail.ru.

Ситников Александр Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики твёрдого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: sitnikov04@mail.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2023, vol. 15, no. 4, pp. 85–92

DOI: 10.14529/mmph230410

MAGNETIC, CONDUCTING, AND MAGNETIC CONDUCTING PROPERTIES OF COMPOSITE FILMS (CoFeB+SiO₂+N₂) IN THE TEMPERATURE RANGE 2–400 K AND MAGNETIC FIELDS OF 0, 1, AND 5 T

L.N. Kotov¹, A.A. Utkin¹, Yu.E. Kalinin², A.V. Sitnikov²

¹ Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

E-mail: kotovln@mail.ru

Abstract. Composite films with compositions [(CoFeB)_x(SiO₂)_(1-x)+N₂], $x = 0,33–0,52$] were obtained by ion-beam sputtering using metal alloy and dielectric targets in a nitrogen atmosphere. The thickness and content of atomic elements, and the concentration of metal alloy x composite films were found using a TESCAN MIRA3 electron microscope. Images of the magnetic phase contrast of the surface of composite films were obtained using magnetic force microscopy (Integra Prima atomic force microscope NT-MDT, Russia) with an MFM10 cantilever. Magnetic phase contrast images of $x = 0,48–0,52$ films were studied. All the composite films have granular and percolation structures, the volume ratio of these structures varies depending on x . The percolation structure of films with high concentrations $x > 0,48$ manifested in the presence of extended isolated areas (more than 1 μm) of the accumulation of metal granules. The temperature dependences of magnetic susceptibility, specific conductivity, and specific magnetic conductivity of the composite films with metal alloy concentrations $x = 0,33–0,52$ were studied in a temperature range of 2–400 K and in magnetic fields of 0 T, 1 T, and 5 T. All measurements of magnetic susceptibility and electrical resistance of the composite films in this temperature and magnetic field range were carried out at the center for diagnostics of functional materials for medicine, pharmacology, and nanoelectronics at St. Petersburg State University. In composite film No. 1 ($x = 0,46$) in the temperature range 100–300 K, the highest positive magnetic conductivity had a value of 1,2 at 200 K. The highest positive magnetic conductivity (about 1,2) was observed in composite granular films with small granule sizes. The results of temperature studies of the magnetic conductivity of the

composites show that the ratio of positive and negative magnetic conductivity depends on the temperature of the film and on the concentration of the metal alloy x , which sets the ratio of the granular and percolation structures. Large negative magnetic conductivity (about $-0,2$) occurs in composite films No. 3 and 5, the structure of which, along with the granular structure, includes extended (more than several micrometers) metallic areas of metal granules.

Keywords: composite metal-dielectric films; granular structure; magnetic susceptibility; electrical resistance; magnetic conductivity.

References

1. Baranov P.G., Kalashnikova A.M., Kozub V.I., Korenev V.L., Kusrayev Yu.G., Pisarev R.V., Sapega V.F., Akimov I.A., Bayer M., Scherbakov A.V., Yakovlev D.R. Spintronics of Semiconductor, Metallic, Dielectric, and Hybrid Structures (100th Anniversary of the Ioffe Institute). *Phys. Usp.*, 2019, Vol. 62, pp. 795–822. DOI: 10.3367/UFNe.2018.11.038486
2. Larionov K.V., Sorokin P.B. Investigation of Atomically thin Elms: State of the Art. *Physics–Uspekhi*, 2021, Vol. 64, № 1, pp. 28–47. DOI: 10.3367/UFNe.2020.03.038745
3. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films. *J. of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, Vol. 12, no. 2, pp. 1696–1699. DOI: 10.1166/jnn.2012.4701
4. Kotov L.N., Lasek M.P., Vlasov V.S., Utkin A.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Temnov V.V. Effect of Magnetic Fields on the Microwave Impedance of FeCoB + SiO₂ Composite Films. *Bulletin of the RAS: Physics*, 2022, Vol. 86, no. 5, pp. 588–591. DOI: 10.3103/S1062873822050136
5. Kotov L.N., Utkin A.A., Vlasov V.S., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E. Magnetic conductivity of composite films (CoFeB+SiO₂+N₂) in temperature range 2–400 K. *Proc. VIII Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”*, Russian, Kazan, 2022, Vol. 1, pp. 127–128.
6. Utkin A.A., Kotov L.N., Lasek M.P., Kovalev P.D., Zavarin D.V. *Magnetic Conductivity of Composite Films Sprayed in a Nitrogen Atmosphere. IT ARCTICA*, 2023, no. 3, pp. 35–48.
7. Utkin A.A., Ustyugov V.A., Kotov L.N., Kovalev P.D., Turkov V.K., Blinov Z.N. *Features of Granulated Structure and Magnetic Properties of Composite Films [CoFeB+SiO₂+N₂] Sprayed in a Nitrogen Atmosphere. IT ARCTICA*, 2023, no. 3, pp. 27–34.

Received October 12, 2023

Information about the authors

Kotov Leonid Nafanailovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Radiophysics and Electronics Department, Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russian Federation, e-mail: kotovln@mail.ru.

Utkin Alexander Andreevich is Senior Lecturer, Radiophysics and Electronics Department, Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russian Federation, e-mail: utychg@gmail.com.

Kalinin Yuri Egorovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Solid State Physics Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalinin48@mail.ru.

Sitnikov Alexander Viktorovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Solid State Physics Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru.