

Структура, проводящие и отражающие свойства аморфных наногранулированных композитов $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$

© И.В. Антонец, Р.И. Королев, Л.Н. Котов

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
Сыктывкар, Россия

E-mail: aiv@mail.ru

Поступила в Редакцию 26 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 1 октября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований структуры, проводящих и СВЧ отражающих свойств в диапазонах частот 8–12 GHz и 25–36 GHz аморфных наногранулированных композитов $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$, $32.79 < x < 52.00$ at.% толщиной 1.11–2.54 μm , напыленных на подложку из лавсана толщиной около 20 μm . Оценено влияние содержания ферромагнитного сплава CoFeB на проводящие и отражающие свойства пленок. Представлены результаты экспериментального воздействия магнитных полей с индукцией до 0.3 Т на коэффициент отражения СВЧ-волн композитных пленок.

Ключевые слова: композитные пленки, коэффициент отражения, проводимость.

DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56721.4889k

Наноструктурированные композиты, содержащие металлические и диэлектрические частицы и области, активно исследуются в последние десятилетия в связи с разработкой новейших малогабаритных устройств СВЧ [1–3]. Аморфные композиты, содержащие в составе сплава металлические гранулы, обладают рядом уникальных свойств. Ферромагнитный металл в таких композитах обуславливает гигантское магнитосопротивление [4] и высокий уровень поглощения СВЧ-излучения [5]. Цирконийсодержащие композиты могут обладать СВЧ-проводимостью на два-четыре порядка превышающие статическую на постоянном токе задолго до порога перколяции [6]. Подобные композиты обладают высокой удельной проводимостью $10^2 - 10^5$ S/m и изменяющимся в широком диапазоне коэффициентом отражения СВЧ-волн 0.01–0.96 при содержании металлической фазы 30–70 at.% и толщиной сотни нанометров — единицы микрометров [7–9].

В настоящей работе исследованы аморфные наногранулированные композиты $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$, в которых в составе сплава наряду с металлическими гранулами (железа и кобальта) присутствуют гранулы полуметалла (бора). На основе мягкого ферромагнитного сплава $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ с перпендикулярной анизотропией широким спросом в электронике пользуются спиновые вентили [10,11]. Островковые пленки магнитных нанокompозитов, содержащие наночастицы $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ в матрице SiO_2 , обладают гигантским магнитосопротивлением [12], при этом магнитные свойства нанокompозита определяются концентрацией ферромагнитных гранул x [11].

В работе исследовались композитные пленки $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$ толщиной 1.11–2.54 μm . Пленки изготовлены в Воронежском государственном техническом университете методом ионно-лучевого напыления

в атмосфере азота при неглубоком вакууме 10^{-5} Torr на подложках из лавсана толщиной около 20 μm с содержанием ферромагнитного сплава ниже порога перколяции ($32.79 < x < 52.00$ at.%). При таких концентрациях ферромагнетика гранулы связаны между собой значительным обменным взаимодействием, обеспечивая вклад в эффективную анизотропию композита [11].

Элементный состав и толщина пленок определялись с помощью электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN SEM. Топография поверхности исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Интегра Prima (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме. СВЧ-коэффициент отражения при нормальном падении волны определялся в диапазонах частот 8–12 GHz и 25–36 GHz по методике измерений коэффициента стоячих волн (КСВН) в прямоугольном волноводе, описанной в работе [7]. Зависимость КСВН от частоты снималась с индикатора не менее чем в 300 точках и заносилась в память компьютера. Далее рассчитывался коэффициент отражения СВЧ-волн по мощности. Для оценки воздействия магнитного поля на коэффициент отражения, часть волновода с композитной пленкой помещалась в зазор электромагнита с индукцией магнитного поля до 0.3 Т. Удельная проводимость вычислялась по обратной величине электрического сопротивления, измеряемого на постоянном токе двухзондовым методом с использованием потенциометрической методики замещения и учетом геометрических размеров образцов. Основные характеристики композитных пленок представлены в таблице. Подробнее методики напыления и измерений описаны в работе [7].

На рис. 1 приведена морфология поверхности пленки 4. Как видно из рис. 1 на поверхности присутствуют разнообразные по формам обособленные островки ферромагнитного сплава (наиболее светлые зерна) раз-

Содержание ферромагнитной компоненты сплава, толщина слоя, электрическое сопротивление и удельная проводимость композитных пленок $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$

№	Содержание ферромагнитной компоненты x , at.%	Толщина слоя d (μm), толщина подложки $20 \mu\text{m}$	Электрическое сопротивление r (Ω)	Удельная проводимость σ (S/m)
1	32.79	1.73	$8.08 \cdot 10^6$	$3.73 \cdot 10^{-8}$
2	34.02	1.86	$5.50 \cdot 10^6$	$5.03 \cdot 10^{-8}$
3	36.84	1.73	$5.35 \cdot 10^5$	$4.74 \cdot 10^{-7}$
4	41.13	1.83	$1.45 \cdot 10^5$	$1.17 \cdot 10^{-6}$
5	44.42	1.11	$1.17 \cdot 10^4$	$1.13 \cdot 10^{-5}$
6	47.88	2.54	6503	$5.72 \cdot 10^{-5}$
7	49.42	1.73	2864	$7.55 \cdot 10^{-5}$
8	49.84	2.24	2436	$1.18 \cdot 10^{-4}$
9	51.56	2.20	1991	$1.06 \cdot 10^{-4}$
10	52.00	1.59	1659	$2.07 \cdot 10^{-4}$

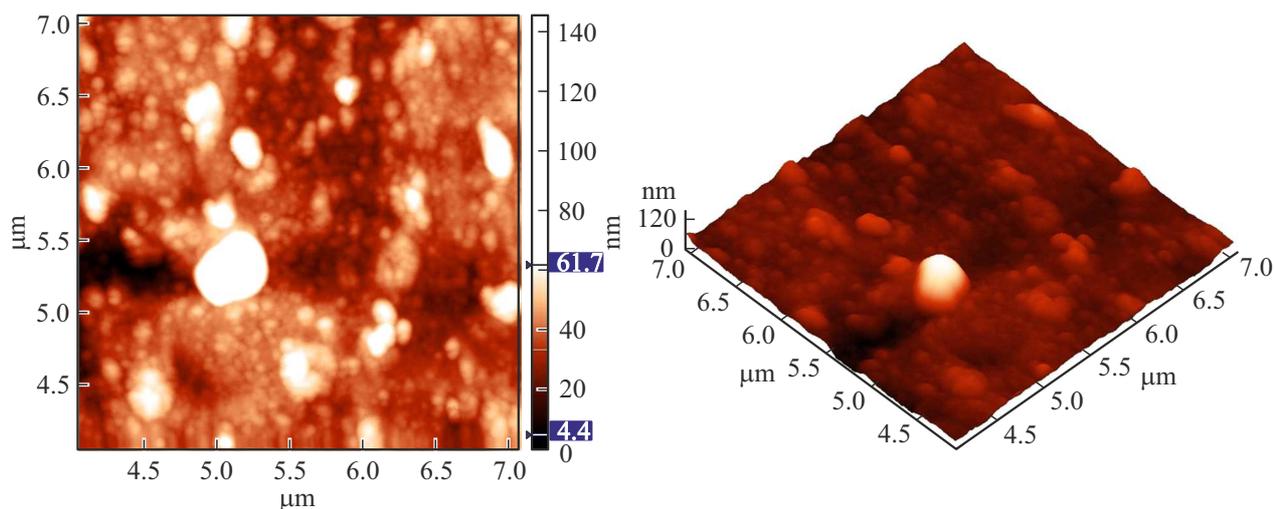


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности пленки 4 ($x = 41.13$ at.%, $d = 1.83 \mu\text{m}$).

мерами сотни (реже — десятки) нанометров, наряду с которыми имеются многочисленные зерна размерами несколько десятков нанометров матрицы SiO_2 , равномерно покрывающие поверхность. Зерна металлического сплава расположены преимущественно одиночно, расстояния между ними часто сопоставимы или больше их размеров. Метод микроскопии сопротивления растекания не позволил найти значимых проводящих участков на поверхности пленок. Точечные наноразмерные участки проводимости локализованы на верхушках наиболее крупных частиц ферромагнитного сплава. Этими особенностями структуры обусловлена малая проводимость пленок (таблица).

На рис. 2 приведены зависимости СВЧ-коэффициента отражения в диапазонах 8–12 GHz и 25–36 GHz от

частоты для наиболее проводящих пленок с $x > 41$ at.%. Как видно из рис. 2 пленки в исследуемых диапазонах частот отражают не более 7–8% падающего излучения. Зависимости в диапазоне частот 8–12 GHz (рис. 2, *a*) достаточно плавные, по сравнению с диапазоном 25–36 GHz (рис. 2, *b*), без ярко выраженных экстремумов отражения вплоть до $x > 49$ at.%. В диапазоне частот 25–36 GHz (рис. 2, *b*) перепады коэффициента отражения более резкие, а экстремумы присутствуют при любом содержании металлического сплава.

Уменьшение коэффициента отражения с ростом частоты, наблюдаемое для обоих частотных диапазонов (рис. 2), может быть связано с ростом потерь, вызванных гранулярными токами в плоскости проводящих композитных пленок. Наличие глубоких минимумов на

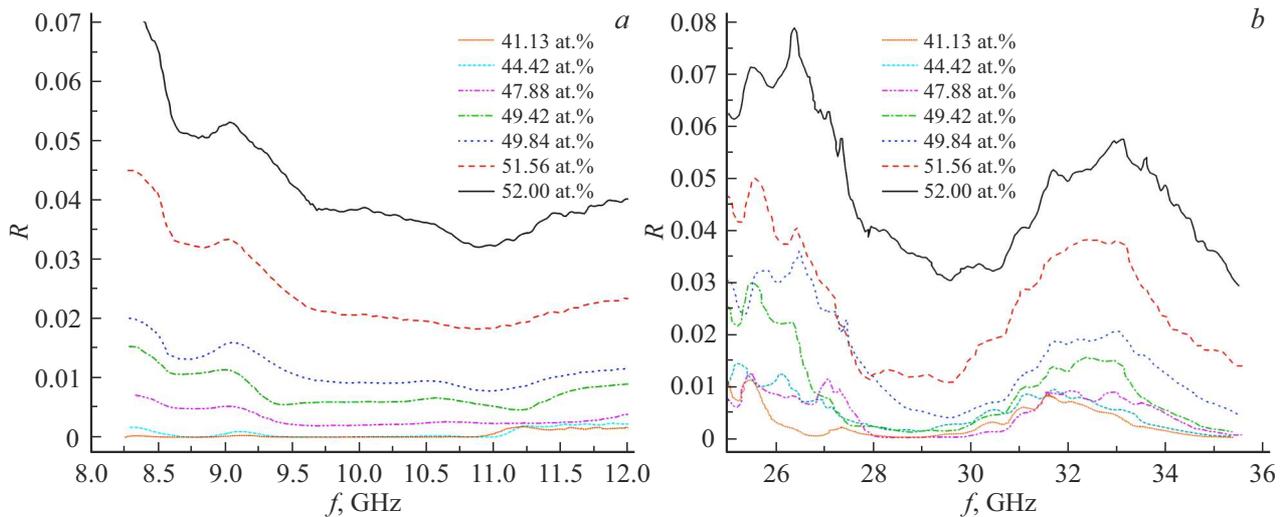


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от частоты: а) 8–12 GHz, б) 25–36 GHz.

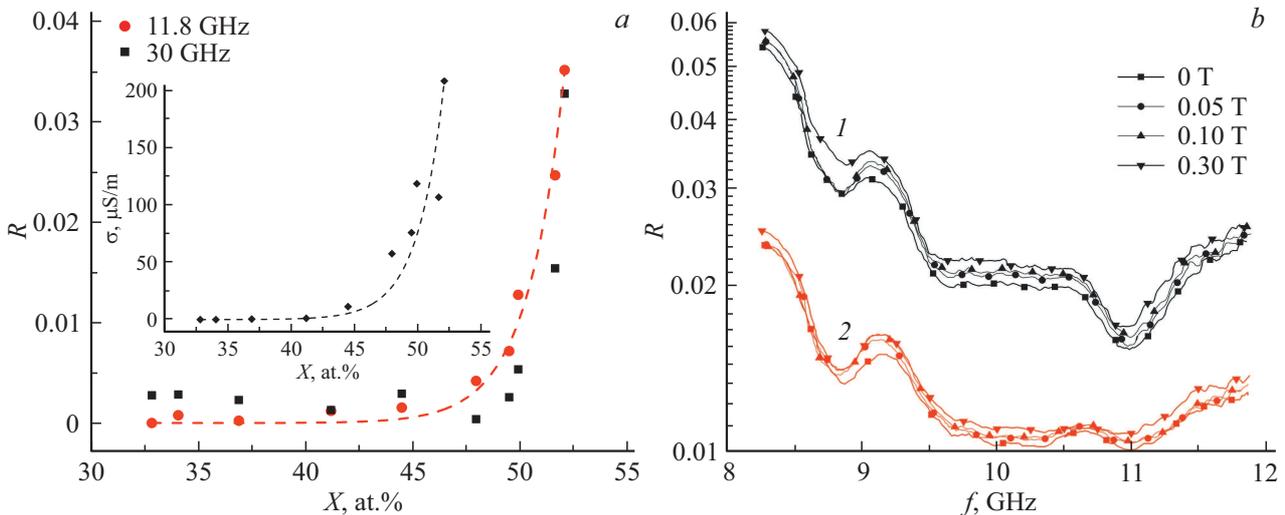


Рис. 3. Зависимости коэффициента отражения от содержания сплава (на вставке — удельной проводимости от содержания сплава) и от частоты в диапазоне 8–12 GHz при воздействии магнитного поля с индукцией до 0.3 T на пленки 9 (кривые 1) и 8 (кривые 2).

спектрах коэффициента отражения (рис. 2, б) свидетельствует об интерференции двух электромагнитных волн в противофазе, отраженных от композитной пленки и от лавсановой подложки. Это подтверждается и тем, что наибольшие минимумы наблюдаются для композитных пленок с максимальным содержанием металлического сплава (таблица).

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента отражения от содержания металлического сплава (рис. 3, а, на вставке — удельной проводимости от содержания металлического сплава) и от частоты (рис. 3, б) при воздействии магнитных полей на пленки 9 и 8.

Из рис. 3, а видно, что σ и R от содержания сплава x качественно описываются одним и тем же законом: $y = y_0 + A \exp(x/b)$, где y_0 характеризует минимальное значение проводимости и коэффициента отраже-

ния соответственно. Для зависимости удельной проводимости: $A = 2.88 \cdot 10^{-15}$, $b = 2.08$, для зависимости СВЧ-коэффициента отражения на частоте 11.8 GHz: $A = 3.02 \cdot 10^{-15}$, $b = 1.73$.

Значительный рост удельной проводимости и коэффициента отражения в области концентраций металлического сплава 47–52 at.% может быть объяснено процессом перколяции (или протеканием металла), который сопровождается резким возрастанием размеров металлических областей [7,9].

Из рис. 3, б видно, что, воздействуя на коэффициент отражения СВЧ-волн магнитным полем, R в целом растет при увеличении B от 0 до 0.3 T во всем исследуемом частотном диапазоне. Рост коэффициента отражения может быть связан с уменьшением сопротивления при увеличении магнитного поля для композитных пленок

данного состава. При этом максимальный рост R (до 13% для пленки 9 и до 9% для пленки 8) проявляется на частотах первых экстремумов (около 9 GHz) при $B = 0.3$ Т. В дальнейшем при увеличении частоты влияние магнитного поля на коэффициент отражения становится менее заметным, и максимальный рост R не превосходит 10% и 7%, соответственно (наблюдается в минимуме отражения на частоте 11 GHz при индукции поля 0.3 Т).

В работе исследованы проводящие и отражающие свойства аморфных наногранулированных композитов $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$. Обнаружено влияние магнитного поля на СВЧ отражение волн. Для практического применения этого эффекта необходимо проведение дальнейших исследований по СВЧ-отражению композитных пленок при больших магнитных полях с индукцией вплоть до 1 Т и с другими магнитными металлическими сплавами.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 21-72-20048).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.Б. Вендик, О.Г. Вендик. ЖТФ **83**, 1, 3 (2013).
- [2] Yu.E. Kalinin, A.T. Ponomarenko, V.G. Shevchenko, A.V. Sitenkov, O.V. Stognei, O. Figovsky, I.V. Zolotukhin. Nanostruct. Polymers Nanocomp. **2**, 1, 23 (2006).
- [3] Ю.Е. Калинин, А.Н. Ремизов, А.В. Ситников. ФТТ **46**, 11, 2076 (2004).
- [4] A. Gerber, A. Milner, B. Groisman, M. Karpovsky, A. Gladkikh, A. Sulpice. Phys. Rev. B **55**, 10, 6446 (1997).
- [5] Н.Е. Казанцева, А.Т. Пономаренко, В.Г. Шевченко, И.А. Чмутин, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. Физика и химия обработки материалов **1**, 5 (2002).
- [6] И.В. Антонец, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичева, Е.А. Голубев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.Г. Шавров, В.И. Щеглов. РЭ **60**, 8, 839 (2015).
- [7] I.V. Antonets, L.N. Kotov, Ye.A. Golubev. Mater. Chem. Phys. **240**, 122097 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122097>.
- [8] И.В. Антонец, Л.Н. Котов, Е.А. Голубев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. ЖТФ **87**, 2, 234 (2017).
- [9] И.В. Антонец, Е.А. Голубев, Л.Н. Котов, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. ЖТФ **86**, 3, 98 (2016).
- [10] В.В. Рыльков, С.Н. Николаев, В.А. Демин, А.В. Емельянов, А.В. Ситников, К.Э. Никируй, В.А. Леванов, М.Ю. Пресняков, А.Н. Талденков, А.Л. Васильев, К.Ю. Черноглазов, А.С. Веденеев, Ю.Е. Калинин, А.Б. Грановский, В.В. Тугушев, А.С. Бугаев. ЖЭТФ **153**, 424 (2018).
- [11] А.И. Безверхний, А.Д. Таланцев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.А. Никитенко, О.В. Коплак, О.С. Дмитриев, Р.Б. Моргунов. ФТТ **61**, 2, 266 (2019).
- [12] Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, В.П. Пискорский, Д.В. Королев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Е.И. Куницына, А.Д. Таланцев, В.Л. Бердинский, Р.Б. Моргунов. ФТТ **58**, 6, 1086 (2016).

Редактор Д.В. Жуманов