

## 08 Влияние магнитных полей на отражающие свойства аморфных наногранулированных композитов

© И.В. Антонец

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,  
Сыктывкар, Россия  
E-mail: aiv@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2024 г.  
В окончательной редакции 28 октября 2024 г.  
Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследований экспериментального воздействия магнитных полей с индукцией до 0.3 Т на коэффициент отражения СВЧ-волн аморфных наногранулированных композитов  $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$ ,  $27.38 \leq x \leq 84.14$  at.%, толщиной 493–862 nm, напыленных на подложку из лавсана толщиной 0.02 mm, в диапазоне частот 26–37 GHz. Приведены частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ-волн. Оценено влияние содержания ферромагнитного сплава на СВЧ-отражающие свойства пленок при воздействии магнитного поля. Определено отношение максимального значения коэффициента отражения СВЧ-волн к минимальному в первых экстремумах. Показано, что магнитные поля могут изменять значения коэффициента отражения композитов в 1.43–1.92 раза.

**Ключевые слова:** композитные пленки, коэффициент отражения, магнитное поле.

DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59575.6372PA

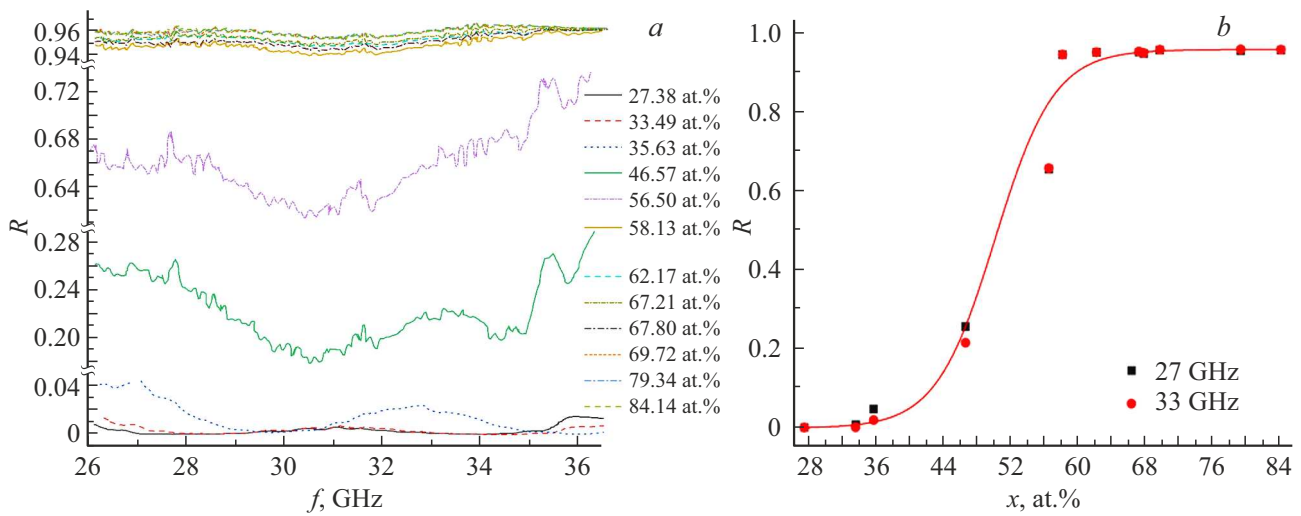
В связи с разработкой новейших малогабаритных СВЧ-устройств в последние десятилетия активно исследуются аморфные наноструктурированные материалы, содержащие металлические и диэлектрические гранулы [1,2]. Особый интерес представляет случай, когда в качестве металлической фазы материала для наногранул используются элементы или сплавы из ферромагнитных металлов [3–6], которые обеспечивают гигантское магнитосопротивление в композитах [3] и высокий уровень поглощения СВЧ-излучения [4]. Ферромагнитные пленки и композиты благодаря малым потерям широко используются в устройствах обработки микроволновых сигналов, резонаторах, фильтрах и фазовращателях [5–7]. Для работы таких устройств и для настройки на требуемую частоту в широком диапазоне часто необходимо смещающее магнитное поле. Благодаря воздействию внешнего магнитного поля возможно изменение экранирующих свойств материалов, в частности, высокочастотных свойств композитов с магнитными частицами [8,9]. Так, в работе [9] анализируются экспериментальные зависимости коэффициентов отражения и прохождения от величины магнитного поля на частотах 12–38 GHz. Существуют также механизмы, позволяющие управлять магнитным состоянием системы с помощью электрического поля [10].

Настоящая работа посвящена исследованиям СВЧ-отражающих свойств аморфных наногранулированных композитов  $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$  и является продолжением [11]. Магнитные свойства исследуемых пленок определяются в первую очередь концентрацией ферромагнитных гранул [12], а СВЧ-отражающие свойства —

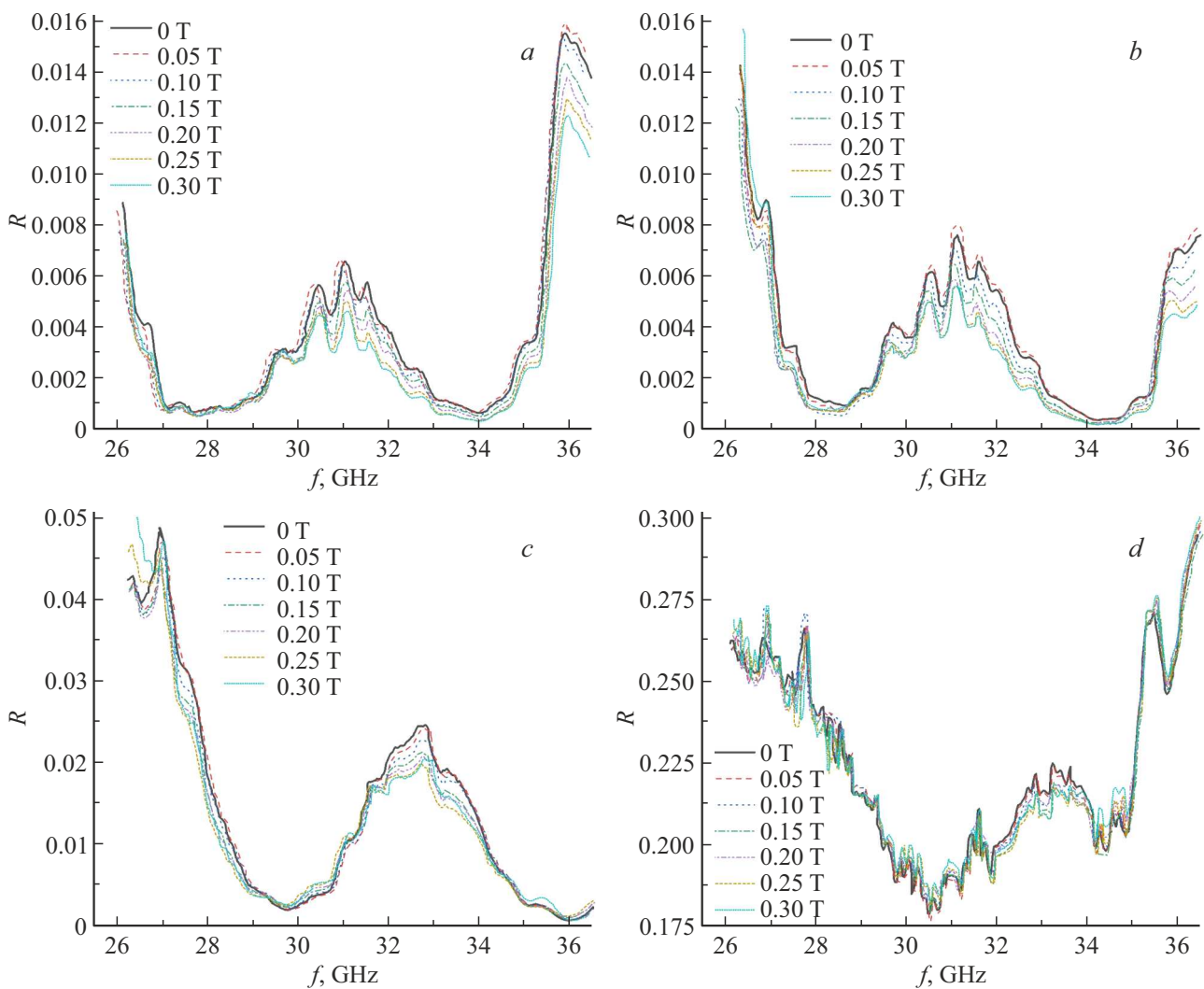
их размерами и промежутками между гранулами и обусловлены протеканием тока внутри гранул [11,13,14].

В работе [11] в связи с особенностями наноструктуры и состава композитов  $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$  коэффициент отражения в диапазоне 26–38 GHz изменялся от  $10^{-6}$  до 0.08. Такая величина коэффициента отражения связана с содержанием в композите полуметалла бора (около 20% от всего состава ферромагнитного сплава, концентрация которого составляла 32.79–52.00 at.%). В настоящей работе исследовались образцы, у которых диапазон концентрации ферромагнитного сплава значительно шире — 27.38–84.14 at.%, содержание бора составляло от 3 до 5%, а толщины исследуемых образцов в 2.25–2.95 раз меньше чем в работе [11].

Композитные гранулированные пленки  $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$  получены в атмосфере аргона при неглубоком вакууме ( $10^{-5}$  Torr) методом ионно-лучевого напыления в Воронежском государственном техническом университете. Элементный анализ проведен с помощью энергодисперсионной приставки сканирующего электронного микроскопа Axia ChemiSEM ThermoFisher (Чехия). Толщина пленок оценивалась с использованием электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN SEM (Чехия). Коэффициент отражения (по мощности) в диапазоне частот 26–37 GHz измерялся в прямоугольном волноводе [15]. Регистрировалась зависимость коэффициента стоячих волн от частоты. При исследовании воздействия магнитного поля на коэффициент отражения СВЧ-волн часть волновода с исследуемым образцом помещалась в зазор электромагнита. Измерения проводились при изменении индукции магнитного поля от 0 до 0.30 Т с шагом 0.05 Т.



**Рис. 1.** Зависимости коэффициента отражения от частоты в диапазоне 26–37 GHz (*a*) и от содержания ферромагнитного сплава (*b*).



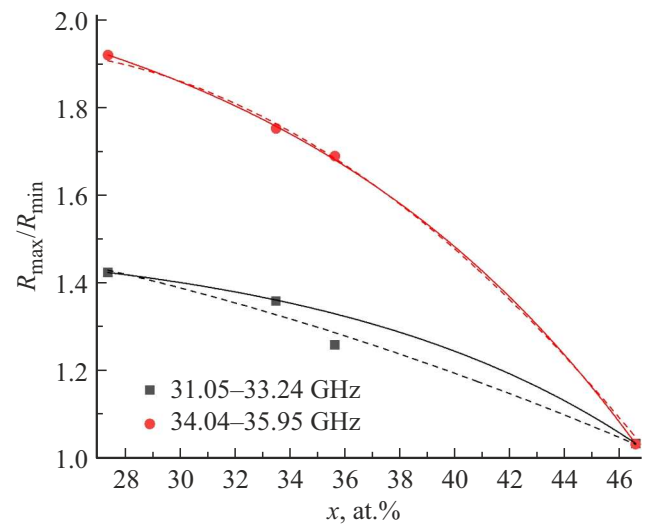
**Рис. 2.** Зависимости коэффициента отражения от частоты при воздействии магнитного поля с индукцией до 0.3 Т на композитные пленки с содержанием ферромагнитного сплава: *a* — 27.38 at.%, *b* — 33.49 at.%, *c* — 35.63 at.%, *d* — 46.57 at.%.

Подробнее методики изготовления пленок и измерений описаны в работе [15]. Содержание ферромагнитного сплава, толщина, электрическое сопротивление и удельная проводимость пленок приведены в работе [16].

На рис. 1 показаны зависимости коэффициента отражения  $R$  от частоты  $f$  в диапазоне 26–37 GHz и от содержания ферромагнитного сплава  $x$ . Как видно из рисунка, с ростом  $x$  коэффициент отражения  $R$  растет в широком интервале от  $7 \cdot 10^{-4}$  до 0.97. Исследованные в работе [11] пленки в аналогичном диапазоне частот отражали не более 8% падающего излучения при значениях  $x$  вплоть до 52.00 at.%. Кроме того, на частотных зависимостях коэффициента отражения наблюдались глубокие минимумы, амплитуда которых увеличивалась с ростом содержания ферромагнитного сплава. Они связаны с интерференцией находящихся в противофазе электромагнитных волн, отраженных от композитной пленки и от лавсановой подложки [11]. В настоящих исследованиях с ростом  $x$  вклад в отражение от подложки становится не столь значительным, поэтому частотные зависимости  $R$  постепенно сглаживаются (рис. 1). При  $x = 46.57–58.13$  at.% коэффициент отражения резко возрастает. Этот диапазон концентрации может соответствовать области перколяции, в которой в композитах наряду с отдельными гранулами появляются скопления и цепочки гранул, формирующие токопроводящие каналы, способствующие значительному росту проводимости и коэффициента отражения. При  $x = 58.13$  at.% и выше в структуре пленок образуется металлическая матрица с диэлектрическими включениями. Коэффициент отражения СВЧ-волн для таких композитов слабо зависит как от частоты, так и от изменения содержания ферромагнитного сплава, что и демонстрирует рис. 1.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента отражения от частоты при воздействии магнитных полей с индукцией до 0.3 Т на пленки с различным содержанием ферромагнитного сплава.

Как видно из рис. 2, практически для всех представленных образцов воздействие магнитного поля наиболее заметно в экстремумах коэффициента отражения и проявляется тем сильнее, чем содержание ферромагнитного сплава меньше. Причем с увеличением  $x$  положение этих экстремумов сдвигается в сторону больших частот. Результаты экспериментального исследования не позволяют однозначно судить о том, каким образом магнитное поле изменяет величину коэффициента отражения. Для пленок с наименьшим содержанием ферромагнитного сплава (27.38–33.49 at.%) при увеличении магнитного поля коэффициент отражения в основном уменьшается, однако при  $B = 0.05$  Т проявляется некоторый рост  $R$ , особенно в максимумах (рис. 2, *a, b*). В пленках с большим содержанием ферромагнитного сплава (рис. 2, *c, d*) при увеличении магнитного поля коэффициент отражения падает в максимумах и возрастает в минимумах отражения, тем самым уменьшается амплитуда колебаний  $R(f)$ .



**Рис. 3.** Зависимости  $R_{\max}/R_{\min}$  в экстремумах (квадраты — максимум на частотах 31.05–33.24 GHz, кружки — минимум на частотах 34.04–35.95 GHz) от содержания ферромагнитного сплава при воздействии магнитного поля. Аппроксимация выполнена экспоненциальной зависимостью (сплошные кривые) и полиномом второй степени (пунктиры).

Такое поведение коэффициента отражения можно объяснить высокой степенью магнитной неоднородности композитной пленки из-за разброса величины анизотропии индивидуальных гранул. При малом содержании ферромагнитного сплава гранулы композита находятся достаточно далеко друг от друга, и их взаимодействие весьма незначительно, поэтому в целом композитные пленки намагничиваются как суперпарамагнетики, а воздействие магнитного поля на композит приводит к существенному разбросу значений коэффициента отражения. Результаты численной оценки показывают, что в композитах с наименьшим содержанием ферромагнитного сплава (рис. 2, *a*) в максимуме на частоте 31.05 GHz отношение максимального значения коэффициента отражения  $R_{\max}$  к минимальному  $R_{\min}$  составляет 1.43, а в следующем минимуме на частоте 34.04 GHz — 1.92. С ростом содержания ферромагнитного сплава за счет увеличения размеров гранул и уменьшения промежутков между ними взаимодействие между гранулами возрастает и при намагничивании разброс величин коэффициента отражения снижается, в исследуемых экстремумах соотношение  $R_{\max}/R_{\min}$  монотонно падает (рис. 3). При формировании цепочек из гранул, приводящих к появлению токопроводящих каналов, значения коэффициентов отражения практически выравниваются.

Можно предположить, что исследуемые композиты до порога перколяции будут проявлять суперпарамагнитные свойства, а после порога перколяции они приобретут ферромагнитные свойства. Такие особенности гранулированной системы ферромагнетик-диэлектрик в области низких и высоких содержаний металлической

фазы подтверждают магнитооптические исследования композитов с ферромагнитными гранулами [17,18].

В работе исследованы отражающие свойства аморфных наногранулированных композитов  $(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{1-x}$ . Показано, что магнитные поля могут существенно (в 1.43–1.92 раз) изменять отражающие свойства композитов в диапазоне частот 26–37 GHz, что значительно выше, чем было получено для образцов того же состава в работе [11] в диапазоне частот 8–12 GHz (около 13%). Для практического применения этого эффекта необходимо значительно расширить исследования СВЧ-отражающих свойств композитов с применением магнитных полей с индукцией до 1 Т и различных температурных воздействий.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] И.Б. Вендик, О.Г. Вендик. ЖТФ **83**, 1, 3 (2013).
- [2] H. Gleiter. Acta Mater. **48**, 1, 1 (2000).
- [3] A. Gerber, A. Milner, B. Groisman, M. Karpovsky, A. Gladkikh, A. Sulpice. Phys. Rev. B **55**, 10, 6446 (1997).
- [4] 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).
- [5] J.D. Adam, L.E. Davis, G.F. Dionne, E.F. Schloemann, S.N. Stitzer. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **50**, 721 (2002).
- [6] C.S. Tsai, J. Su. Appl. Phys. Lett. **74**, 2079 (1999).
- [7] A.A. Semenov, S.F. Karmanenko, V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, G. Srinivasan, A.N. Slavin, J.V. Mantese. Appl. Phys. Lett. **88**, 033503 (2006).
- [8] A.N. Lagarkov, K.N. Rozanov. J. Magn. Magn. Mater. **321**, 14, 2082 (2009).
- [9] А.Б. Ринкевич, Ю.И. Рябков, Д.В. Перов, Я.А. Пахомов, Е.А. Кузнецов. ФММ **122**, 4, 351 (2021).
- [10] O.G. Udalov, I.S. Beloborodov. AIP Adv. **8**, 055810 (2018).
- [11] И.В. Антонец, Р.И. Королев, Л.Н. Котов. ФТТ **65**, 12, 2055 (2023).
- [12] 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).
- [13] I.V. Antonets, Ye.A. Golubev. J. Phys. Chem. Solids **184**, 111674 (2024).
- [14] I.V. Antonets, Ye.A. Golubev, V.I. Shcheglov. Mater. Chem. Phys. **290**, 126533 (2022).
- [15] I.V. Antonets, L.N. Kotov, Ye.A. Golubev. Mater. Chem. Phys. **240**, 122097 (2020).
- [16] И.В. Антонец, Р.И. Королев, Л.Н. Котов. ФТТ **66**, 12 (2024).
- [17] V.E. Buravtsova, V.S. Guschin, Yu.E. Kalinin, S.A. Kirov, Eu.V. Lebedeva, S. Phonghirun, A.V. Sitnikov, N.E. Syr'ev, I.T. Trofimenko. Cent. Eur. J. Phys. **2**, 4, 566 (2004).
- [18] S. Bedanta, T. Eimüller, W. Kleemann, J. Rhensius, F. Stromberg, E. Amaladass, S. Cardoso, P.P. Freitas. Phys. Rev. Lett. **98**, 176601 (2007).

Редактор Е.Ю. Флегонтова