

Частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения в магнитной жидкости

© К.Г. Гареев, В.В. Лучинин, Е.Н. Севостьянов, И.О. Тестов, О.А. Тестов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kggareev@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2018 г.

В окончательной редакции 12 ноября 2018 г.

Принято к публикации 21 декабря 2018 г.

Получены образцы магнитной жидкости на водной основе, содержащие частицы $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--SiO}_2$ сферической формы размерами менее 100 nm. Методом, основанным на использовании линии передачи, проведены измерения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.1–18.0 GHz с использованием измерительного стенда на основе рупорных антенн и ячейки на основе копланарной линии передачи. Установлена возможность использования магнитных жидкостей для создания электромагнитных экранов и поглотителей электромагнитных волн, а также как средства для проведения локальной гипертермии при частотах электромагнитного излучения свыше 7 GHz.

DOI: 10.21883/JTF.2019.06.47645.331-18

Введение

Магнитные жидкости на водной основе используются в качестве средства тераностики — направления медицины, сочетающего в себе диагностику и терапию. Для тераностики актуальна задача повышения контраста при диагностике (например, методом магниторезонансной томографии). Одно из решений связано с использованием магнитных наночастиц, имеющих низкую токсичность, например, частиц магнетита–кремнезема ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--SiO}_2$), повышающих контраст [1] за счет наличия суперпарамагнитных свойств [2,3] и обеспечивающих высокую агрегативную устойчивость [4] и возможность локального изменения их концентрации при воздействии внешнего магнитного поля [5]. Биосовместимость частиц $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--SiO}_2$ подтверждена испытаниями, проведенными на культурах клеток [6] и на лабораторных животных [7]. На основании полученных результатов и патентных исследований предложенный способ получения магнитной жидкости был защищен патентом [8].

Другое актуальное применение магнитных жидкостей в медицине относится к их использованию в качестве средства локальной гипертермии. Эффективность локального разогрева биологических тканей магнитными частицами зависит от коэффициента поглощения ими электромагнитного излучения.

Взаимодействие магнитных жидкостей с электромагнитным излучением может использоваться при создании высокоэффективных электромагнитных экранов и поглотителей электромагнитных волн, предназначенных для защиты биологических и технических объектов [9], что объясняется высокими значениями магнитных потерь [10].

Настоящая работа посвящена исследованию частотных зависимостей коэффициента поглощения электро-

магнитного излучения в диапазоне 0.1–18.0 GHz магнитной жидкостью на основе частиц $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--SiO}_2$.

Материал и методы исследования

Измерения частотных зависимостей коэффициента поглощения проводились на образцах магнитной жидкости, полученных в соответствии со способом, описанным в патенте [8]. Магнитная жидкость изготавливалась на водной основе при массовой концентрации магнитных частиц 30 g/l (3 wt.%).

Форма и размеры частиц $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--SiO}_2$ исследовались методами атомно-силовой микроскопии при помощи сканирующего зондового микроскопа Veeco Dimension 3100 (Veeco Instruments Inc., США) и динамического рассеяния света с использованием прибора Фотокор Мини (ООО „Фотокор“, Россия).

Коэффициент поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 0.1–18.0 GHz измерялся методом, основанным на использовании линии передачи [11]. Такой метод характеризуется погрешностью порядка 10% [12].

Генерация и детектирование электромагнитных волн осуществлялись векторным анализатором цепей ZVB-20 (Rhode & Schwarz, Германия) с рабочим частотным диапазоном от 10 MHz до 20 GHz.

Измерения коэффициента поглощения в частотном диапазоне 2.0–18.0 GHz проводились при помощи поративного закрытого измерительного стенда на основе рупорных антенн П6-124 (ЗАО „СКАРД-Электроникс“, Россия), принцип действия которого описан в [13]. На рис. 1 приведены изображения общего вида стенда и положение образца размерами $170 \times 170 \times 6$ mm (объем магнитной жидкости 200 ml) при выполнении измерений.

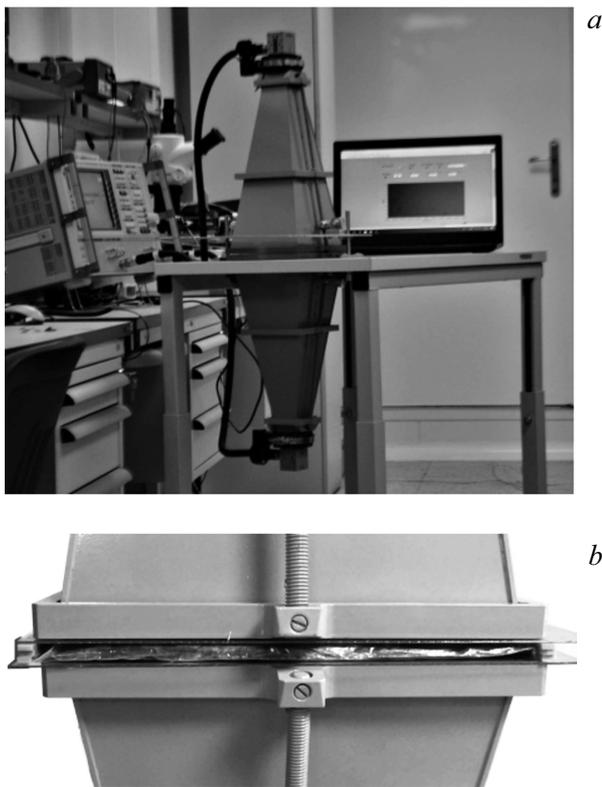


Рис. 1. Измерительный стенд на основе рупорных антенн: *a* — общий вид; *b* — положение образца при проведении измерений.

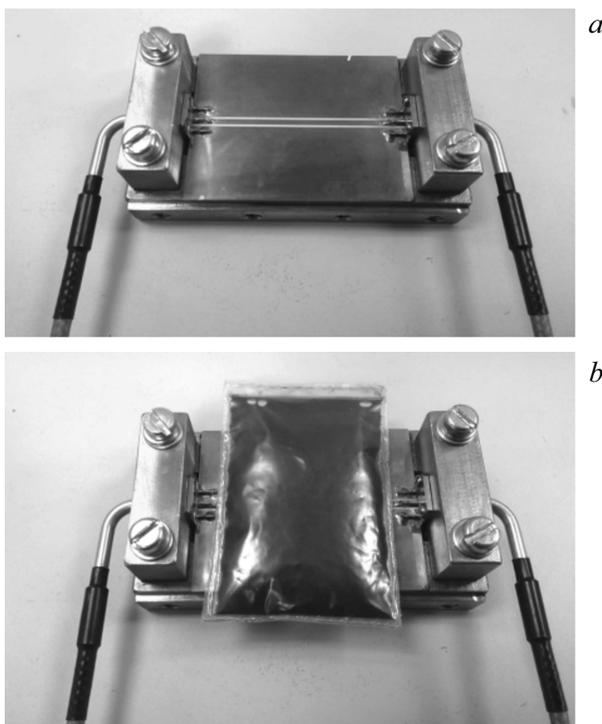


Рис. 2. Внешний вид ячейки на основе копланарной линии передачи: *a* — без образца; *b* — с образцом.

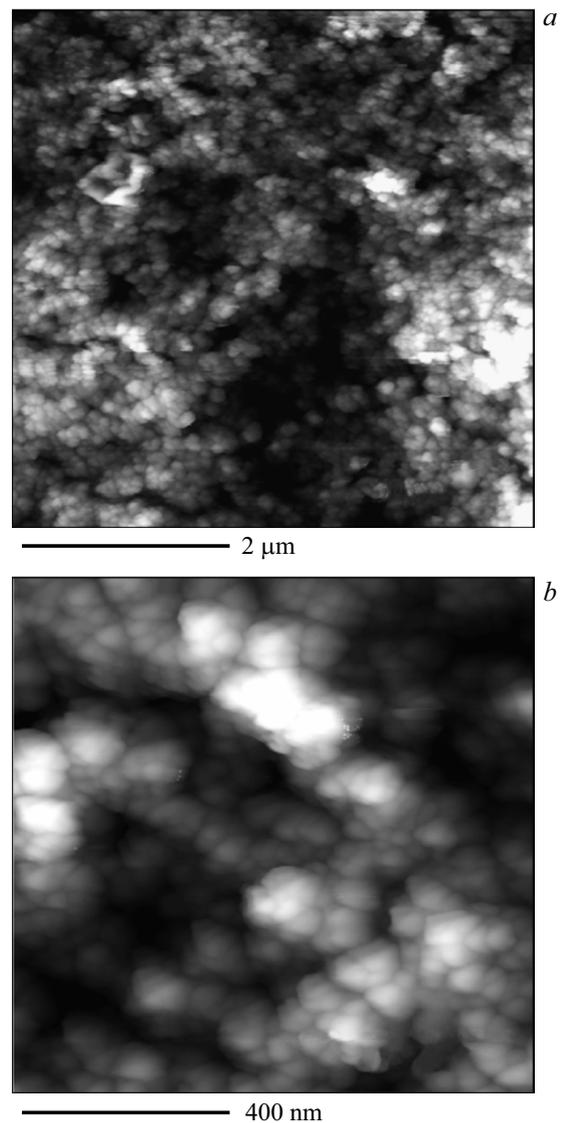


Рис. 3. Атомно-силовые изображения осадка, полученного высушиванием магнитной жидкости: *a* — размер изображения $5 \times 5 \mu\text{m}$; *b* — размер изображения $1 \times 1 \mu\text{m}$.

В диапазоне частот порядка 0.1 GHz рупорные антенны применять нецелесообразно в связи с их большими геометрическими размерами, требующими значительного расхода материала при подготовке образцов. В связи с этим коэффициент поглощения в диапазоне частот 0.1–2.0 GHz измерялся при помощи ячейки на основе копланарной линии передачи (рис. 2, *a*) с волновым сопротивлением 50 Ω. Образец магнитной жидкости в объеме 10 ml герметизировался в оболочке из полиэтилена размерами 60 × 40 mm (рис. 2, *b*).

Коэффициент поглощения L в процентах рассчитывался по формуле

$$L = (1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2) \cdot 100, \quad (1)$$

где $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ — модули комплексных коэффициентов рассеяния.

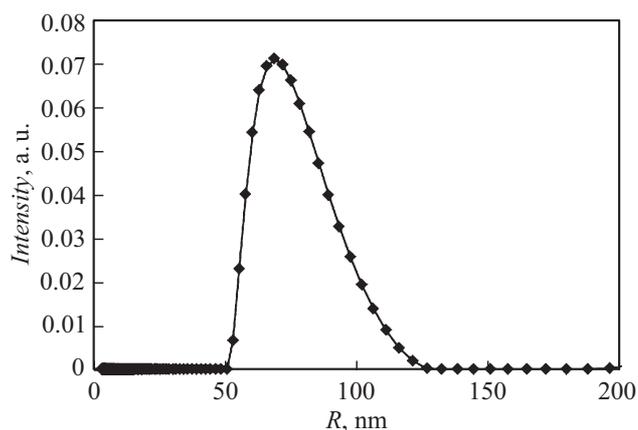


Рис. 4. Распределение частиц магнитной жидкости по радиусу, полученное методом динамического рассеяния света.

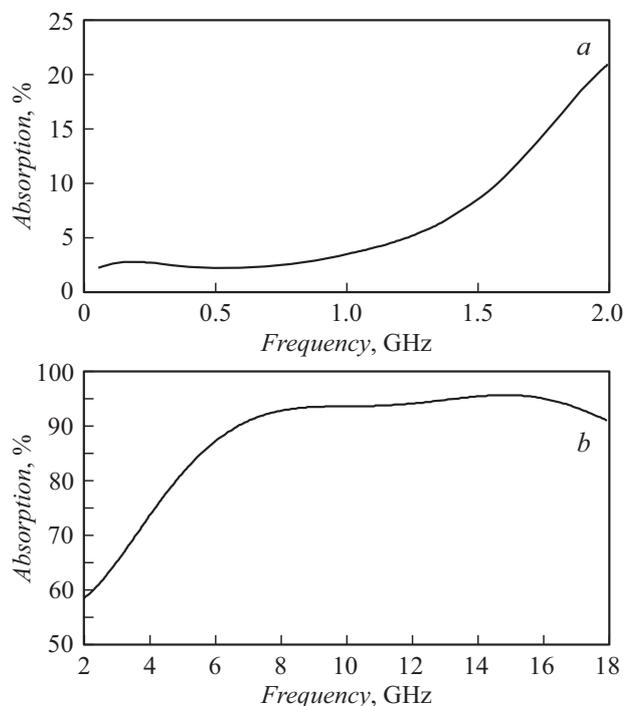


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента поглощения магнитной жидкости: *a* — полученные с использованием ячейки на основе копланарной линии передачи; *b* — полученные с использованием стенда на основе рупорных антенн.

Результаты исследования

Атомно-силовые изображения поверхностей, полученных при удалении (высушивании) дисперсионной среды, приведены на рис. 3. После разбавления магнитной жидкости в 200 раз методом динамического рассеяния света исследовалось распределение частиц по радиусу (рис. 4).

Рис. 3 и 4 показывают, что форма частиц в магнитной жидкости близка к сферической, а средний радиус частиц составляет менее 100 нм.

Частотные зависимости коэффициента поглощения, полученные с использованием ячейки на основе копланарной линии передачи и стенда на основе рупорных антенн, приведены на рис. 5, *a* и *b* соответственно. Как видно из полученных зависимостей, коэффициент поглощения электромагнитного излучения на частоте 2 GHz, полученный с использованием копланарной линии передачи, примерно втрое ниже значения, полученного при помощи стенда на основе рупорных антенн. Данное различие обусловлено наличием между магнитной жидкостью и поверхностью копланарной линии передачи двуслойной оболочки толщиной порядка 0.1 мм, не оказывающей влияние на затухание электромагнитной волны. Для выбранного метода измерений такая толщина существенно снижает значение коэффициента поглощения, что связано с тем, что возбуждаемая в линии передачи квази-Т электромагнитная волна распространяется внутрь образца на глубину менее 1 мм [14]. Тем не менее такой метод достаточно чувствителен, что позволяет использовать его для сравнительного анализа образцов различных материалов.

Исследования показали, что при толщине слоя магнитной жидкости, равной 6 мм, коэффициент поглощения электромагнитного излучения частотой свыше 7 GHz составляет не менее 90%, что актуально для использования при локальной гипертермии. Увеличение коэффициента поглощения с ростом частоты может быть объяснено возрастанием магнитных потерь (мнимой компоненты магнитной восприимчивости) в частицах магнетита [10].

Заключение

Установлено, что в диапазоне частот 0.1–18.0 GHz коэффициент поглощения электромагнитного излучения полученных материалов изменяется от 2 до 95%.

Результаты свидетельствуют о возможности применения магнитной жидкости на основе частиц $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ при производстве композитных экранов и поглотителей электромагнитных волн, обладающих конформными свойствами. Конструкции таких изделий могут быть реализованы на основе обработанных магнитной жидкостью текстильных материалов.

Финансирование работы

Работа частично поддержана грантом РФФИ, проект № 16-32-60010.

Список литературы

- [1] Bogachev Yu.V., Chernenco Ju.S., Gareev K.G., Kononova I.E., Matyushkin L.B., Moshnikov V.A., Nalimova S.S. // Appl. Magn. Reson. 2014. Vol. 45. N 3. P. 329–337. DOI: 10.1007/s00723-014-0525-7
- [2] Kharitonskii P.V., Gareev K.G., Ionin S.A., Ryzhov V.A., Bogachev Yu.V., Klimenkov B.D., Kononova I.E., Moshnikov V.A. // J. Magnetism. 2015. Vol. 20. N 3. P. 221–228. DOI: 10.4283/JMAG.2015.20.3.221

- [3] *Kharitonskii P., Kamzin A., Gareev K., Valiullin A., Vezo O., Sergienko E., Korolev D., Kosterov A., Lebedev S., Gurylev A., Reinyuk A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2018. Vol. 461. P. 30–36. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.04.044
- [4] *Vezo O.S., Gareev K.G., Korolev D.V., Kuryshev I.A., Lebedev S.V., Moshnikov V.A., Sergienko E.S., Kharitonskii P.V.* // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 5. С. 980–985. [*Vezo O.S., Gareev K.G., Korolev D.V., Kuryshev I.A., Lebedev S.V., Moshnikov V.A., Sergienko E.S., Kharitonskii P.V.* // Phys. Sol. State. 2017. Vol. 59. N 5. P. 1008–1013.] DOI: 10.1134/S1063783417050304
- [5] *Кононова И.Е., Гареев К.Г., Мошников В.А., Альмяшев В.И., Кучерова О.В.* // Неорган. материалы. 2014. Т. 50. Вып. 1. С. 75–81. [*Кoнoнoвa И.Е., Гареев К.Г., Moshnikov V.A., Al'myashev V.I., Kucherova O.V.* // Inorg. Mater. 2014. Vol. 50. N 1. P. 68–74.] DOI: 10.1134/S0020168514010117
- [6] *Toropova Y.G., Golovkin A.S., Malashicheva A.B., Korolev D.V., Gorshkov A.N., Gareev K.G., Afonin M.V., Galagudza M.M.* // Int. J. Nanomed. 2017. Vol. 12. P. 593–603. DOI: 10.2147/IJN.S122580
- [7] *Торопова Я.Г., Зелинская И.А., Маркитантова А.С., Печникова Н.А., Чефу С.Г., Королев Д.В., Гареев К.Г., Поволоцкая А.В., Маньшина А.А.* // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2017. Т. 103. Вып. 12. С. 1416–1424.
- [8] *Гареев К.Г., Рейнюк А.В., Тестов Д.О., Лучинин В.В., Мошников В.А.* Патент РФ № 2639709. 2017. БИ. № 36.
- [9] *Alam J., Riaz U., Ahmad S.* // J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 314. N 2. P. 93–99. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.02.195
- [10] *Oda S., Kitamoto Y.* // AIP Adv. 2017. Vol. 7. P. 056729. DOI: 10.1063/1.4977973
- [11] *Харвей А.Ф.* Техника сверхвысоких частот / Под ред. В.И. Сушкевича. М.: Сов. радио, 1965. С. 312.
- [12] *Ritzmann D., Wright P.S., Holderbaum W., Potter B.* // IEEE Tr. Instrum. Meas. 2016. Vol. 65. P. 2204–2213. DOI: 10.1109/TIM.2016.2556920
- [13] *Андрющенко М.С., Гусаковский В.Е., Штагер Е.А., Штагер Д.Е., Щесняк С.С.* Методы расчета средств защиты радиоэлектронных систем от электромагнитного излучения / Под ред. С.С. Щесняка. СПб: ВВМ, 2016. С. 271–273.
- [14] *Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н., Мамонова Н.М., Муравцов А.Д., Саркисянц А.Г., Силин Р.А., Славинский О.К., Ширяев Д.Д.* Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. / Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. С. 81.