

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ**

УДК 537.6/8

DOI: 10.17223/00213411/68/4/4

**Расчет микроволнового спектра коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости с добавлением МУНТ\***А.А. Павлова<sup>1</sup>, В.И. Суслев<sup>1</sup>, Е.Ю. Коровин<sup>1</sup>, Д.А. Мазилев<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Методом математического моделирования исследуется возможность применения магнитных жидкостей (МЖ) для экранирования электромагнитного излучения на высоких частотах. Основанием для моделирования коэффициента отражения от плоского слоя МЖ являются частотные характеристики комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), измеренные в частотном диапазоне 1 кГц – 2 МГц. Исследованы спектры КДП магнитных жидкостей состава: синтетическое масло + тонер Н1010 (магнетит) + многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) с концентрациями 0,5 и 0,75 вес.%. Спектры коэффициента отражения рассчитаны для плоских образцов различной толщины с концентрацией МУНТ в микроволновой области частот. Для расчета использовано плосковолновое приближение. Получены новые результаты, доказывающие перспективность использования МЖ для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности жизнедеятельности при использовании современных высокочастотных радиоэлектронных устройств. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнетит, МУНТ, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, импедансный метод, математическое моделирование, электромагнитный отклик, экранирование.

**Введение**

Исследование фундаментальных физических процессов, определяющих макроскопические свойства гетерогенных сред, дает необходимую информацию для использования таких материалов в практических применениях. В последнее время большой интерес вызывают магнитные жидкости (МЖ), сочетающие текучесть с особенностями нанодисперсных систем, интенсивность изучения физико-химических свойств которых нарастает во всем мире [1–4]. Дисперсионная среда из магнитных масел существенно снижает трение между металлическими поверхностями при соответствующем выборе размера частиц и концентрации их в МЖ [5]. Повышение вязкости МЖ в магнитном поле используется в демпфирующих устройствах [6]. В медицине МЖ используют для адресной доставки лекарственных препаратов и в гипертермической методике борьбы со злокачественными образованиями [7]. Обнаружен эффект управления теплопроводностью МЖ путем воздействия магнитным полем [4]. Магнитная жидкость с электродинамической позиции относится к классу магнитодиэлектрических материалов с переменной сквозной проводимостью, поэтому интересным современным направлением исследования МЖ является изучение ее взаимодействия с электромагнитным излучением высоких частот. Очевидно, эффективность такого взаимодействия во многом определяется свойствами малых частиц, их диполь-дипольным взаимодействием и связанным с ним структурным состоянием системы [1]. В большей степени исследовались магнитные эффекты, например, проверка выполнения в МЖ закона Кюри [8], определение угла поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) в намагниченной МЖ [9], который используется для создания невзаимных устройств и фазовращателей. Эффект ферромагнитного резонанса в МЖ использован для создания магнитных поглотителей [10] с управляемым положением частотной области с максимальным поглощением. Диэлектрические свойства МЖ неоднократно обсуждались в литературных источниках [4, 11–14]. Показано, что диэлектрическая проницаемость возрастает при параллельной ориентации силовых линий магнитного и электрического полей [11] за счет формирования цепочных структур из магнитных частиц [12]. Управление величинами комплексной диэлектрической проницаемости можно использовать для целенаправленного создания экранирующих устройств высокочастотного диапазона. Эффективность экранирования магнитными жидкостями можно повысить, добавив в МЖ поглощающие углеродные материалы [15]. Предпоч-

\* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 23-29-00686.