

Исследование зависимости электропроводности и магнитосопротивления от температуры и от размеров частиц композитов на основе магнитных частиц и бентонита

С. Р. Иманова*, А. Р. Гасимова**

Гянджинский государственный университет,

г. Гянджа, AZ-2000, Азербайджан

*e-mail: sevinc_imanova81@mail.ru;

**e-mail: aynur_gasimova7@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.2025

После доработки 06.10.2025

Принята к публикации 09.10.2025

Изучена температурная зависимость электропроводности композитов на основе магнитных частиц и бентонита. В результате проведенных исследований температурной зависимости электропроводности было выявлено, что энергия активации для носителей заряда зависит от размеров частиц композитов на основе бентонита и магнитных частиц. Это объяснено квантово-размерными эффектами в частицах. Установлено влияние размера магнитных частиц на величину магнитосопротивления и на значение магнитной проницаемости в исследуемых образцах.

Ключевые слова: композит, бентонит, электропроводность, энергия активации, магнитные частицы-ферриты

УДК 537

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.5.28>

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие электроники ставит перед учеными различные задачи, такие как поиск новых композитных материалов, которые бы обладали улучшенными свойствами. Изучение материалов с магнитоэлектрическими свойствами является основной задачей в электрорадиотехнике. Оксидные ферромагнетики – ферриты (соединения на основе оксидов железа) получили широкое распространение в электротехнике и являются полупроводниковыми магнитными материалами. Из-за хорошо известных электрических и магнитных свойств частиц феррита их применение в высокочастотной электронике в качестве компонентов композита получило широкое применение [1].

Таким образом, композиты на основе полупроводниковых частиц являются объектом интенсивных исследований. Это связано с возможностью изменения физико-химических свойств материалов с помощью изменения соотношения диэлектрик–полупроводник [2]. Изучение электрических свойств названных материалов позволит оценить физико-химические процессы, протекающие в этих системах, и выяснить перспективы их применения. На физико-химические свойства композита могут влиять различные факторы: межчастичное расстояние, межфазное взаимо-

действие, характер молекулярной структуры матрицы, способ формирования композита и т.д.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве компонентов использованы модифицированный бентонит (МБТ) и ферритовые частицы (отожженный сидерит) (Fe_2O_3). Модифицирование компонентов было проведено следующим образом:

1. Бентонит (БТ) в определенном количестве был модифицирован при обороте 6000 об/мин в течение 30 минут.

2. Ферритовые частицы были модифицированы в двух режимах: а) 3000 об/мин; б) 6000 об/мин в течение 10 минут.

Модифицирование компонентов было проведено в планетарной мельнице FRITSCH. Путем смешивания порошков компонентов были спрессованы диски размерами: высота каждого диска – 16 мм, диаметр – 7 мм.

Состав исследуемых композитов:

– 60% (3000) Fe_2O_3 +40% МБТ – образец №1;

– 70% (6000) Fe_2O_3 +30% МБТ – образец №2.

На рис. 3 представлены электронные изображения распределения магнитных частиц в образцах: для образца № 1 с размером частиц $d_{3000} = 1,35$ мм и образца № 2 с размером частиц $d_{6000} = 0,68$ мм, что позволяет наглядно сравнить их морфологические особенности.

Измеряемый образец помещался в держатель для температурных исследований. Для измерения температуры использована дифференциальная медь – константановая термопара. Измерение электропроводности проведено в интервале температур (300К–500К). Модифицированные магнитными частицами бентонитовые композиты могут быть широко использованы в различных областях электротехники в качестве полупроводниковых и диэлектрических материалов [1]: для создания датчиков электрических и магнитных полей дросселей, трансформаторных, антенных сердечников и радиопоглощающих материалов. Дисперсность ферритов Fe_2O_3 позволяет рассматривать эти вещества как эффективные сорбенты.

Перспективным путем создания датчиков с широким диапазоном частот, устойчивых к воздействиям электрических полей и высоких температур, является использование композитов на основе слоистых минералов в виде бентонита, модифицированного магнитными частицами (Fe_2O_3). Под действием внешнего магнитного поля может формироваться структура и происходить распределение наночастиц ферритов Fe_2O_3 .

Для каждого материала, используемого для изготовления различных электронных устройств, одной из важных электрофизических характеристик является удельное электрическое сопротивление ρ , которое определяет электропроводность данного материала.

Электропроводность σ измерялась при постоянном токе 0,5–1 мА так как в этом интервале выполнялся закон Ома. По измеренным значениям электрического тока I и падения напряжения электропроводность σ образцов вычислялась по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{U} \times \frac{I}{S}, \quad (1)$$

где I – ток через образец (А); U – падение напряжения на образце (В); l – длина образца (м); S – поперечное сечение образца (м²).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 и 2 для исследуемых образцов приведены зависимости $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$, из которых видно, что зависимости $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ для обоих образцов носят одинаковый характер, а именно: с ростом температуры величина

проводимости уменьшается и доходит до минимального значения для образца №1: ($-14,3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), для образца №2: ($-16,57 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$). С дальнейшим ростом температуры величина σ растет. В области высоких температур наклоны зависимостей $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$

различаются. Установлено, что величина электропроводности на образце №1 больше, чем на образце №2. Зависимости $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ указывают на полупроводниковый характер для исследуемых образцов.

Учитывая, что $\sigma = en(p)\mu$, полученную температурную зависимость проводимости можно объяснить следующим образом.

Уменьшение $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ в интервале температур (370–434) К для образца №1 и (360–413) К для образца №2, вероятнее всего, связано с уменьшением концентраций носителей зарядов, которое связано с истощением примесей в материале с ростом температуры. В то же время, известно, что с ростом температуры подвижность носителей зарядов уменьшается по закону $T^{-3/2}$ [2] (в идеальном случае). Дальнейший рост $\ln \sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$

указывает на собственную электропроводность в исследуемых образцах. Согласно [2], собственная проводимость характеризуется равенством электронов и дырок [3]. Для этой области:

$$\sigma = e(\mu_n + \mu_p) \times (n(p)).$$

По наклону прямых на участке собственной проводимости была определена энергия активации ΔE по формуле [3]:

$$\Delta E = 0,23 \text{ tg} \alpha, \text{ эВ}. \quad (2)$$

Расчеты энергии активаций и электропроводностей (рис. 1 и 2) показали, что они зависят от степени модификации, а именно: с ростом степени модификации энергия активации увеличивается, а электропроводность уменьшается. Величина энергии активации для образца №1 – $E_a = 1,1 \text{ эВ}$, а для образца №2 – $E_a = 2,4 \text{ эВ}$ соответственно. Отметим, что размер магнитных частиц при 3000 об/мин больше, чем при 6000 об/мин ($d_{3000} = 1,35 \text{ мкм}$, $d_{6000} = 0,68 \text{ мкм}$).

Микрофотография образцов снята с помощью микроскопа Альтами.

Уменьшение энергии активации на образце №1 можно объяснить квантово-размерными эффектами, учитывая, что:

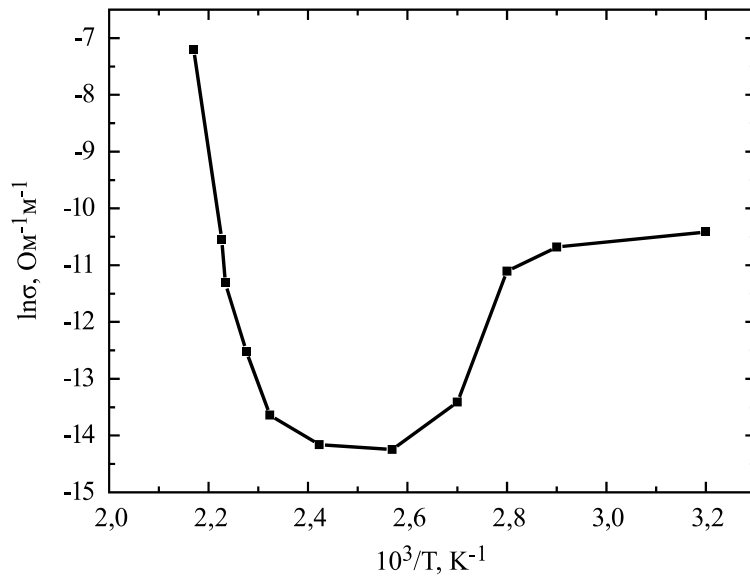


Рис. 1. Зависимость электропроводности от температуры для композита №1. 60% (3000) Fe₂O₃+40% МБТ.

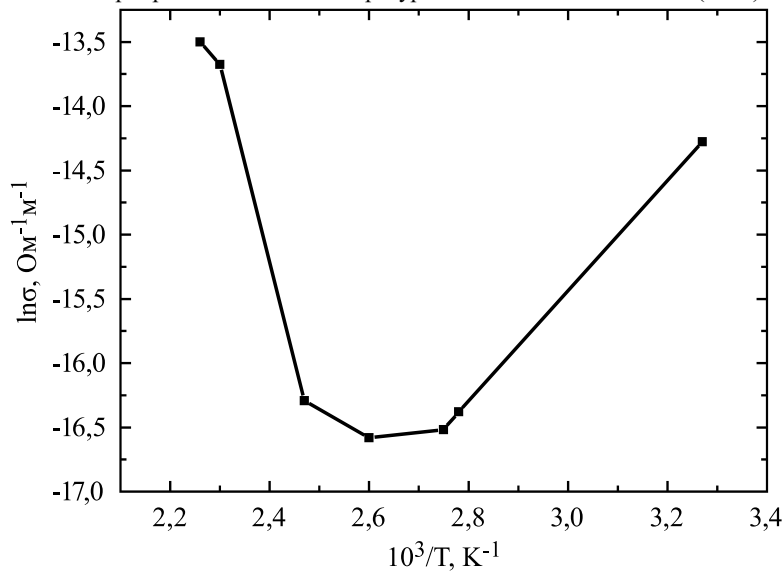


Рис. 2. Зависимость электропроводности от температуры для композита №2. 70% (6000) Fe₂O₃+30%МБТ.

$$\Delta E_g = h\pi^2 / 2m_r a^2, \quad (3)$$

где E_g – изменение ширины запрещенной зоны в магнитных частицах; m – приведенная эффективная масса носителей заряда; h – постоянная Планка, a – радиус магнитных частиц.

Как видно из формулы (3), увеличение размеров частиц приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны.

Вследствие увеличения размеров частиц уменьшается энергетическое расстояние между примесным уровнем и зоной проводимости, согласно формуле (3). Образование дефектных уровней может быть обусловлено различными факторами. По нашему мнению, при этом преобладающим является взаимодействие магнитных частиц с матрицей. Предполагается, что уменьшение проводимости с ростом числа оборотов связано с перераспределением магнитных частиц по толщине матрицы [4, 5]. В результате перераспределения концентрация магнитных

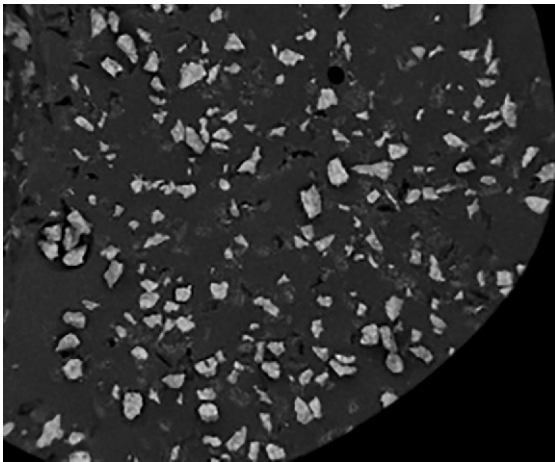
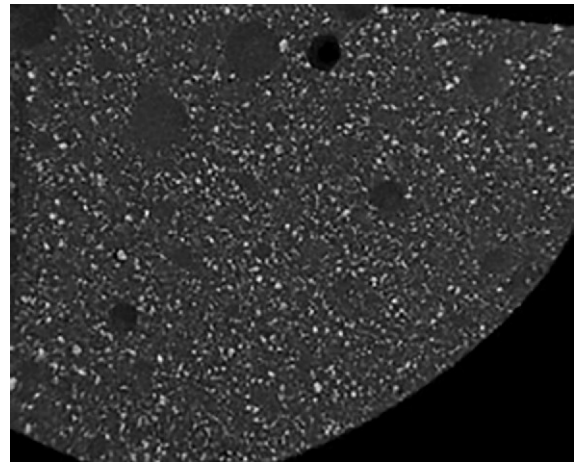
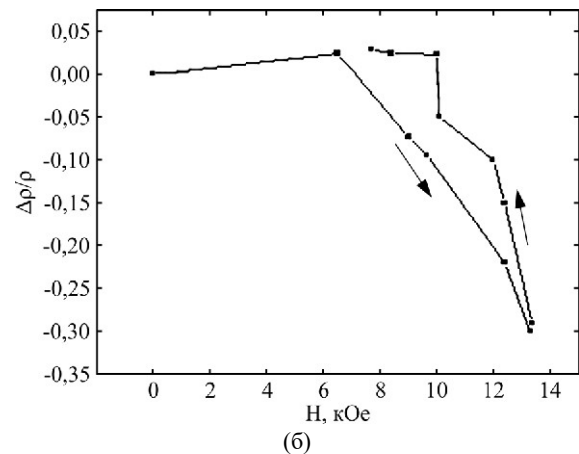
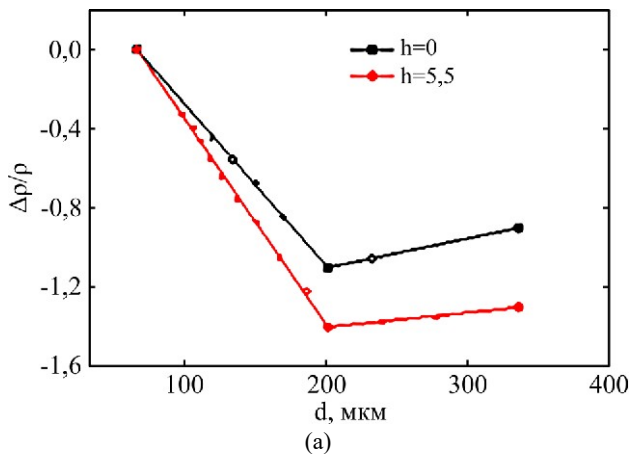
частиц увеличивается в приповерхностной области, из-за чего возрастает поперечное сопротивление образца.

На всех образцах были исследованы зависимости магнитосопротивления (МС) от напряженности магнитного поля, а также магнитная проницаемость.

Исследования проведены при $T = 300$ К. Величина магнитосопротивления измерена с помощью термометра В7-06. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Из рис. 4а видно, что:

- независимо от величины приложенного магнитного поля и размера частиц, наблюдается отрицательное магнитосопротивление (ОМС);
- величина отрицательного магнитосопротивления с ростом размера частиц уменьшается, доходит до минимального значения, а затем снова растет. При этом величина ОМС

Образец №1: 60% (3000) Fe_2O_3 +40% МБТОбразец №2: 70% (6000) Fe_2O_3 +30% МБТ**Рис. 3.** Электронное изображение образцов №1 с размером частиц $d_{3000} = 1,35$ мкм и № 2 с размером частиц $d_{6000} = 0,68$ мкм.**Рис. 4.** Зависимость магнитосопротивления от размера частиц (а) и величины магнитного поля (б) для композита 60% Fe_2O_3 +40% БТ.

составляет 140%. Другими словами, наблюдается гигантское отрицательное магнитосопротивление. Причиной уменьшения сопротивления с ростом размера частиц, скорее всего, является то, что с увеличением размера частиц повышается число проводящих частиц, тем самым возрастает проводимость и, как результат, уменьшается величина сопротивления.

Дальнейший рост магнитосопротивления, по всей вероятности, связан с тем, что с увеличением размера частиц из-за их агломерации число носителей тока уменьшается, соответственно, снижается проводимость и растет сопротивление [6].

Согласно теории Тояцавы, ОМС должно наблюдаться при низких температурах, за счет упорядоченности среды. В наших экспериментах оно наблюдается при $T = 300$ К, а также при меньших значениях магнитного поля. По теории Тояцавы, зависимость отрицательного $\Delta\rho/\rho$ от напряженности магнитного поля и температуры выражается формулой:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -f\left(\frac{H}{T-\theta}\right).$$

При $T = 300$ К положительное магнитосопротивление имеет квадратичную зависимость от напряжения магнитного поля до $H \leq 23$ кЭ, а при $T = 5-100$ К – до $H = 10$ кЭ. При $T = 780$ К магнитосопротивление также положительно, а при $H > 12$ кЭ наблюдается более слабая, чем квадратичная, зависимость. Отрицательное магнитосопротивление квадратично зависит от напряжения магнитного поля до 1–2 кЭ, в области более высоких полей стремится к насыщению или, пройдя через максимум, становится положительным. В наших экспериментах зависимость МС от магнитного поля носит сложный характер, а именно:

- МС растет до определенного значения магнитного поля, а затем с ростом магнитного поля уменьшается и становится отрицательным (ОМС) (рис. 4б);

- с ростом магнитного поля МС сразу становится отрицательным и с дальнейшим ростом магнитного поля увеличивается в сторону положительного значения (60% сидерит Fe_2O_3) (см. рис. 4б);

- представленная на рис. 5 зависимость магнитосопротивления от температуры при

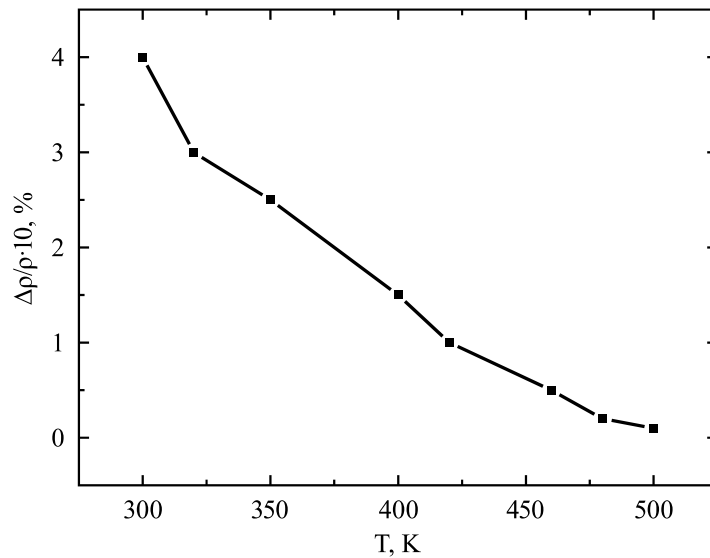


Рис. 5. Зависимость магнитосопротивления от температуры для композита 60% Fe_2O_3 +40% БТ.

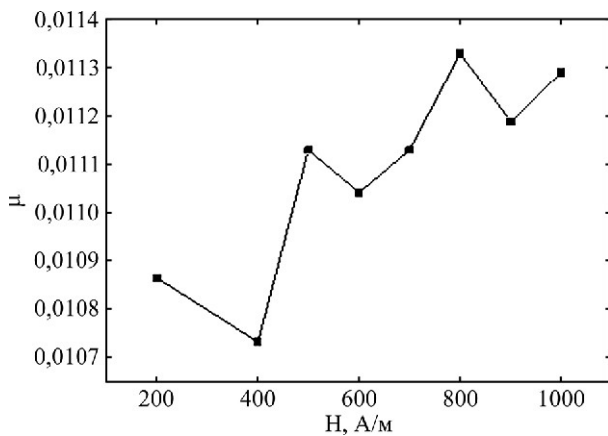


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости от величины магнитного поля для композита 60% Fe_2O_3 +40% БТ ($d_{3000} = 1, 35$ мм).

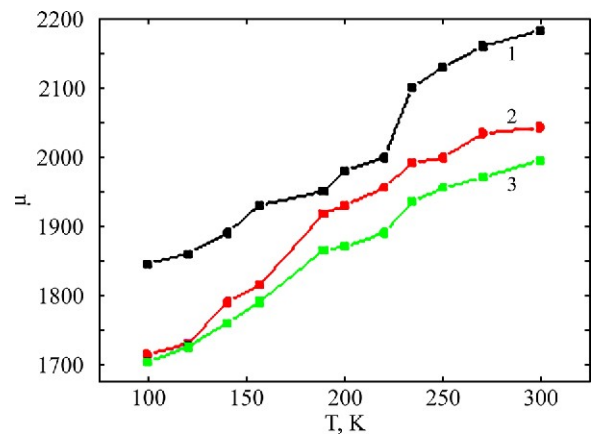


Рис. 7. Зависимость магнитной проницаемости от температуры для композита №1– (70%(3000) Fe_2O_3 +30%МБТ): 1 – $H = 602$ А/м; 2 – $H = 1200$ А/м; 3 – $H = 1800$ А/м.

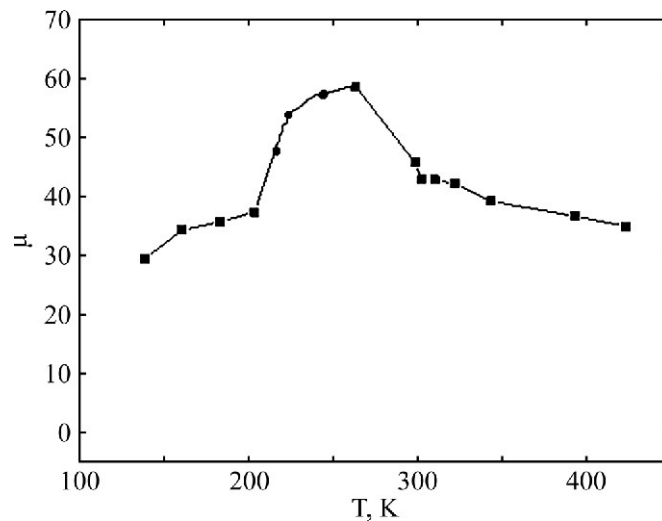


Рис. 8. Зависимость магнитной проницаемости от температуры для композита №2 – 70%(6000) Fe_2O_3 +30%БТ при $f = 2000$ Гц.

$T = 300\text{--}500$ К показывает, что с понижением температуры магнитосопротивление для композита 60% Fe_2O_3 +40% БТ растет.

Магнитосопротивление исследовалось при различной ориентации образца в магнитном

поле. При повороте образца вокруг линии тока как положительное так и отрицательное магнитосопротивление оставалось почти постоянным. Все измерения проводились в слабых электрических полях, и магнитосопротивление, как

положительное, так и отрицательное, не зависело от приложенного поля.

Отметим, что в работе [5] теоретически доказано, что причиной наблюдаемого эффекта является спин-зависимое туннелирование поляризованных электронов между магнитными гранулами. Кроме того, ОМС композитов является воспроизводимым, независимо от метода и технологических особенностей получения образцов, а механизм эффекта объяснен теоретически в работе [7].

И как видно из рис. 7, зависимость μ от T которая была измерена в сильных и слабых полях (ср. кривые 1–3 на рис. 7) имеет неодинаковый характер для μ .

Как было отмечено выше, при низком значении напряженности магнитного поля на кривой зависимости $\mu = f(T)$ обнаружен максимум при $T = 320$ К, а эта температура немного ниже температуры Кюри.

Следует подчеркнуть, что причиной возрастания μ является то, что при нагревании магнитных веществ ослабляется роль обменного взаимодействия, а именно уменьшаются константы магнитострикции, другими словами, при нагревании магнитных веществ ослабляются силы, которые препятствуют повороту магнитных моментов доменов и смещению доменных границ.

С дальнейшим повышением температуры происходит уменьшение спонтанной намагниченности и при некоторых температурах, за счет распада доменных структур, ее исчезновение, а это, в свою очередь, приводит к тому, что магнитный материал переходит в состояние парамагнитности.

Как известно, температуру, при которой магнитный материал переходит в парамагнитное состояние, то есть происходит фазовый переход, принято называть магнитной температурой (точкой) Кюри – T_K . Принято определять точку Кюри пересечением линейного продолжения наиболее крутого участка спада кривой намагниченности с осью температуры (рис. 7).

На рис. 8 представлена температурная зависимость магнитной проницаемости (μ) композита № 2, содержащего 70% (6000)Fe₂O₃ и 30% бентонита, при частоте $f = 2000$ Гц. Из графика видно, что с увеличением температуры от 150 К до примерно 250–270 К магнитная проницаемость возрастает, достигая максимального значения около 60. При дальнейшем повышении температуры наблюдается постепенное снижение μ .

Рост магнитной проницаемости на начальном участке можно объяснить повышением подвижности доменных стенок и уменьшением внут-

ренних дефектов, препятствующих их перемещению. Снижение μ при температурах выше 270 К, вероятно, связано с усилением тепловых флуктуаций и частичным размагничиванием материала, что приводит к ослаблению междоменных взаимодействий и снижению общей намагниченности композита.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что магнитная проницаемость композита определяется балансом между термоактивируемыми процессами перемещения доменных стенок и тепловыми флуктуациями, приводящими к размагничиванию. Наличие выраженного максимума при $T_m \approx 260$ К указывает на оптимальное соотношение этих эффектов и может быть связано с переходом части магнитных частиц из многодоменного в однодоменное состояние. Таким образом, исследованный композит демонстрирует термочувствительное поведение, что делает его перспективным для применения в устройствах, работающих в ограниченном диапазоне температур.

ВЫВОДЫ

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что механизм проводимости в исследуемых композитах носит зонный характер. Кроме того, установлено, что степень модификации влияет на величину проводимости композитов, а именно: для образца №1 – $\sigma = 3 \times 10^{-5}$ Ом⁻¹м⁻¹, для образца №2 – $\sigma = 6 \times 10^{-7}$ Ом⁻¹м⁻¹. Из температурной зависимости определено, что энергия активации для носителей заряда зависит от размеров частиц. Это объяснено квантово-размерными эффектами в частицах.

В исследованных образцах обнаружено отрицательное магнитосопротивление. Полученный результат объясняется предположительно тем, что в композитах одновременно существуют как кластеры, так и изолированные гранулы магнитных частиц. При этом они характеризуются различными величинами магнитной анизотропии и наличием диполь–дипольного взаимодействия между кластерами и ближайшими к ним гранулами.

Показано, что, независимо от размера частиц, с ростом магнитного поля МС монотонно уменьшается. В зависимости $\mu = f(T)$ – магнитной проницаемости от температуры, наблюдается смещение максимума, связанное на наш взгляд, с инертностью магнитных частиц.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sukhleen, Bindra, Narang, Kunal, Pubby, Nickel spinel ferrites: A review, *J. Magn. Magn. Mater.*, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167163>
2. Парфенов, В.В., Закиров, Р.Х., *Физика полупроводников*. Казань: КазГУ, 2001. 60 с.
3. Цидильковский, И.М., *Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика*. М.: Наука, 1972. 640 с.
4. Фоменко, Л.А., Магнитные спектры ферро-магнетиков, *УФН*, 1958, т. 64, вып. 4. 669 с.
5. Чечерников, В.И., *Магнитные измерения*. М.: Изд. МГУ, 1969. 196 с.
6. Кесаманлы, Ф.П., Наследов, Д.Н., Арсенид галлия: Получение, свойства и применение. Сер. *Физика полупроводников и полупроводниковых приборов*. М.: Наука, 1973. 471 с.
7. Поклонский, Н.А., Шпаковский, С.В., Горбачук, Н.И., Ластовский, С.Б., Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p+-n-переходов, облученных быстрыми электронами, *Физика и техника полупроводников*, 2006, т. 40, вып. 7, 824 с.

Summary

The temperature dependence of the electrical conductivity of composites based on magnetic particles and bentonite has been systematically investigated. The results indicate that the activation energy of charge carriers is strongly dependent on the particle size of the bentonite-magnetic particle composites. That behavior is attributed to quantum size effects within the particles. Furthermore, the influence of the magnetic particle size on the magnitude of magnetoresistance and the value of magnetic permeability in the studied samples has been established.

Keywords: composite, bentonite, electrical conductivity, activation energy, magnetic ferrite particles