

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.13>

УДК: 537.874; 537.624

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТЕЙ ПОДРЕШЕТОК
ДВУХПОДРЕШЕТОЧНОГО ФЕРРИМАГНЕТИКА
С ТОЧКОЙ КОМПЕНСАЦИИ.
ПРИБЛИЖЕНИЕ ФУНКЦИЕЙ БРИЛЛЮЭНА**

Д.А. Суслов, В.Г. Шавров, В.И. Щеглов

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11 к.7**

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024 г.

Аннотация. Предложен алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. Для выражения аналитической зависимости намагниченности от температуры в явном виде использовано приближение функцией Бриллюэна. Приведена схема определения намагниченностей подрешеток на основе использования значений по температуре четырех характерных точек нижней ветви фазовой диаграммы. Получена система уравнений, связывающая параметры характерных точек со значениями намагниченностей в начальной точке и в точке максимума диаграммы при температуре выше компенсации. Путем решения приведенной системы уравнений получены достаточно простые аналитические выражения, определяющие значения намагниченностей насыщения той и другой подрешеток через параметры характерных точек нижней ветви фазовой диаграммы. Предложенная методика применена к определению намагниченностей подрешеток в экспериментах по измерению суммарной намагниченности, выполненных на пленках двух различных составов с помощью вибрационного

магнетометра. Для проверки полученных значений было выполнено сравнение с данными, полученными в эксперименте, которое показало хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными.

Ключевые слова: смешанные ферриты гранаты, температура компенсации, намагниченности подрешеток.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: : Суслов Дмитрий Алексеевич, sda_53@mail.ru

Введение

В данной работе используется тот же логический подход что и [1-2], на основе экспериментальных данных, изложенных в [3-4].

Сегодня ферриты гранаты находят все более широкое применение в различных областях техники. На их основе могут быть построены устройств для обработки аналоговой информации в СВЧ диапазоне [5-9], устройства обработки и хранения цифровой информации в виде интегральных схем на цилиндрических магнитных доменах [10-12], а также с устройства использованием магниторезистивной памяти [13-14]. Значительный интерес для увеличения быстродействия устройств памяти представляет исследование сверхбыстрой динамики намагниченности пленок ферритов под действием мощных импульсов света от фемтосекундного лазера [15-20].

Весьма перспективным материалом для таких применений можно считать пленки смешанных ферритов-гранатов [21-25], обладающие двумя магнитными подрешетками. Особо следует отметить материалы, обладающие температурной компенсацией, при которой суммарная намагниченность двух подрешеток обращается в нуль. Значительный интерес здесь представляют особенности спиновой динамики подобных материалов [26], открывающие возможности применения в спинтронике [27], сенсорике [28] и сверхбыстром перемагничивании [29].

Для успешного применения таких материалов необходимо знать их магнитные параметры, в первую очередь намагниченности их подрешеток. Однако в большинстве работ [30-31] основным предметом рассмотрения является температурная зависимость суммарной намагниченности обеих подрешеток. Однако можно полагать, что представление магнитной структуры вещества в виде двухподрешеточной модели позволит из анализа температурной зависимости получить намагниченности каждой из подрешеток по отдельности.

Ввиду сложного характера зависимости намагниченности ферромагнетика от температуры [32,33], математическая трактовка двухподрешеточной модели получается довольно сложной [31], так что встает вопрос о построении достаточно простого модельного представления, удобного для повседневного практического применения.

Настоящая работа посвящена описанию алгоритма определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации, с использованием приближения температурной зависимости намагниченности функцией Бриллюэна.

1. Зависимость намагниченности от температуры в приближении функцией Бриллюэна

При определении намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации температурная зависимость намагниченности была предложена в виде степенной функции вида [1-2]:

$$M_1(T \leq T_{c1}) = M_{10} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c1}} \right)^6 \right]; \quad (1)$$

$$M_1(T \geq T_{c1}) = 0; \quad (2)$$

$$M_2(T \leq T_{c2}) = M_{20} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c2}} \right)^6 \right]; \quad (3)$$

$$M_2(T \geq T_{c2}) = 0. \quad (4)$$

Для температур Кюри этих двух подрешеток выполняется условие: $T_{c2} > T_{c1}$. А для значений намагниченностей подрешеток при нулевой температуре – $M_{10} > M_{20}$.

Как следует из анализа [2], именно 6-я степень, дает наилучшее приближение к экспериментальным данным.

В качестве приближения зависимости намагниченности ферритов гранатов от температуры также можно использовать функцию Бриллюэна. Если вместо степенной функции в качестве приближения использовать функцию Бриллюэна, тогда намагниченность j -й подрешетки, при условии, что J это суммарный спин соответствующей подрешетки, равна:

$$M_j(x) = M_{j0}(x)B_j(x), \text{ где } B_j(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{x}{2J}\right) \text{ и}$$

есть функция Бриллюэна, которая в общем случае имеет следующий вид (рис. 1):

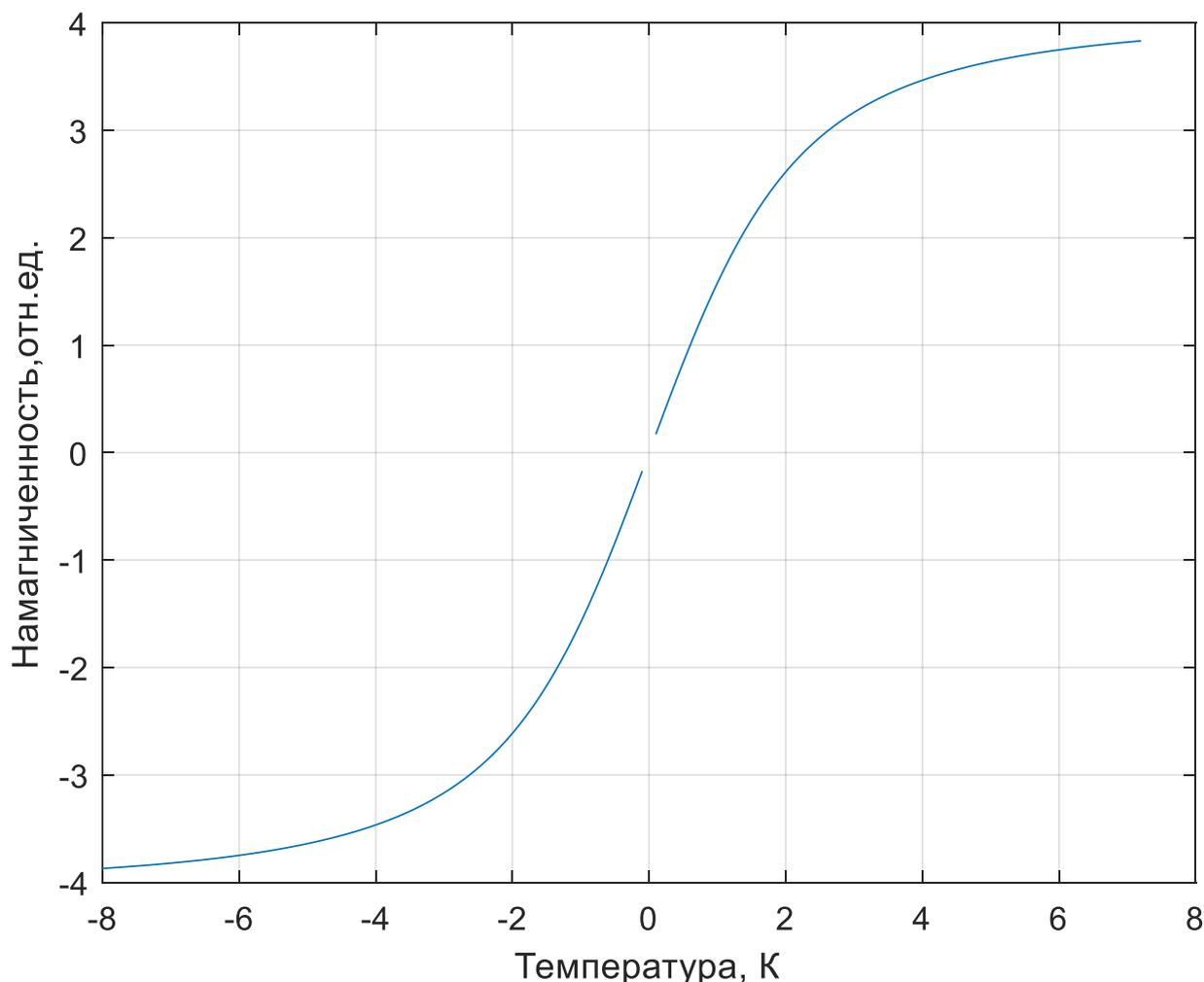


Рис. 1. Общий вид функции Бриллюэна.

Чтобы такое приближение стало похоже на ход реальной намагниченности, снижающейся с ростом температуры, надо чтобы аргумент функции Бриллюэна имел вид:

$$X = 1/(T - T_c). \quad (5)$$

Для случаев, когда T равно T_{c1} и T_{c2} аргумент соответствующей функции Бриллюэна не определен. Однако, так как T_{c1} и T_{c2} это точки Кюри соответствующих подрешеток, намагниченность при этих значениях аргумента, по определению температуры Кюри, просто принимается равной нулю.

Тогда зависимость намагниченности подрешеток от температуры принимает вид, для первой подрешетки:

$$M_1(T < T_{c1}) = M_{10} \left[\frac{2J_1 + 1}{2J_1} \coth \left(\frac{2J_1 + 1}{2J_1} (1/(T - T_{c1})) \right) - \frac{1}{2J_1} \coth \left(\frac{1}{2J_1} (1/(T - T_{c1})) \right) \right] \quad (6)$$

$$M_1(T \geq T_{c1}) = 0,$$

и для второй:

$$M_2(T < T_{c2}) = M_{20} \left[\frac{2J_1 + 1}{2J_1} \coth \left(\frac{2J_1 + 1}{2J_1} (1/(T - T_{c2})) \right) - \frac{1}{2J_1} \coth \left(\frac{1}{2J_1} (1/(T - T_{c2})) \right) \right] \quad (7)$$

$$M_2(T \geq T_{c2}) = 0.$$

Для дальнейших рассуждений используем те же параметры намагниченности, что и в [1-2].

$$M_{10} = 5, M_{20} = 3, T_{c1} = 4, T_{c2} = 7, \Lambda = 1, \text{ а также } M_A = 2; M_c = 2.2. \quad (8)$$

Изменим вид функций Бриллюэна так чтобы ход кривых намагниченностей подрешеток проходил примерно в тех же диапазонах что и при степенном приближении. Тогда выражения для намагниченностей примут вид:

$$M_{B1} = M_{10} \left[\left(\frac{2J_1 + 1}{2J_1} \right) \coth \left(\frac{2J_1 + 1}{2J_1} X_1 \right) - \frac{1}{2J_1} \coth \left(\frac{X_1}{2J_1} \right) + 1.1 \right] \quad (9)$$

$X_1 = 1/(T_1 - T_{c1})$, где T_1 изменяется от 0 до T_{c1} . При $T_1 \geq T_{c1}$ $M_{B1} = 0$ – для одной подрешетки, и

$$M_{B2} = M_{20} \left[\left(\frac{2J_2 + 1}{2J_2} \right) \coth \left(\frac{2J_2 + 1}{2J_1} X_2 \right) - \frac{1}{2J_2} \coth \left(\frac{X_1}{2J_2} \right) + 0.83 \right]. \quad (10)$$

$X_2 = 1/(T_2 - T_{c2})$, где T_2 изменяется от 0 до T_{c2} . При $T_2 \geq T_{c2}$ $M_{B2} = 0$ – для другой.

J_1, J_2 – суммарный спин соответствующей подрешетки. Может принимать значения $3/2, 5/2, 7/2 \dots$

Вид этих кривых представлен на рис. 2.

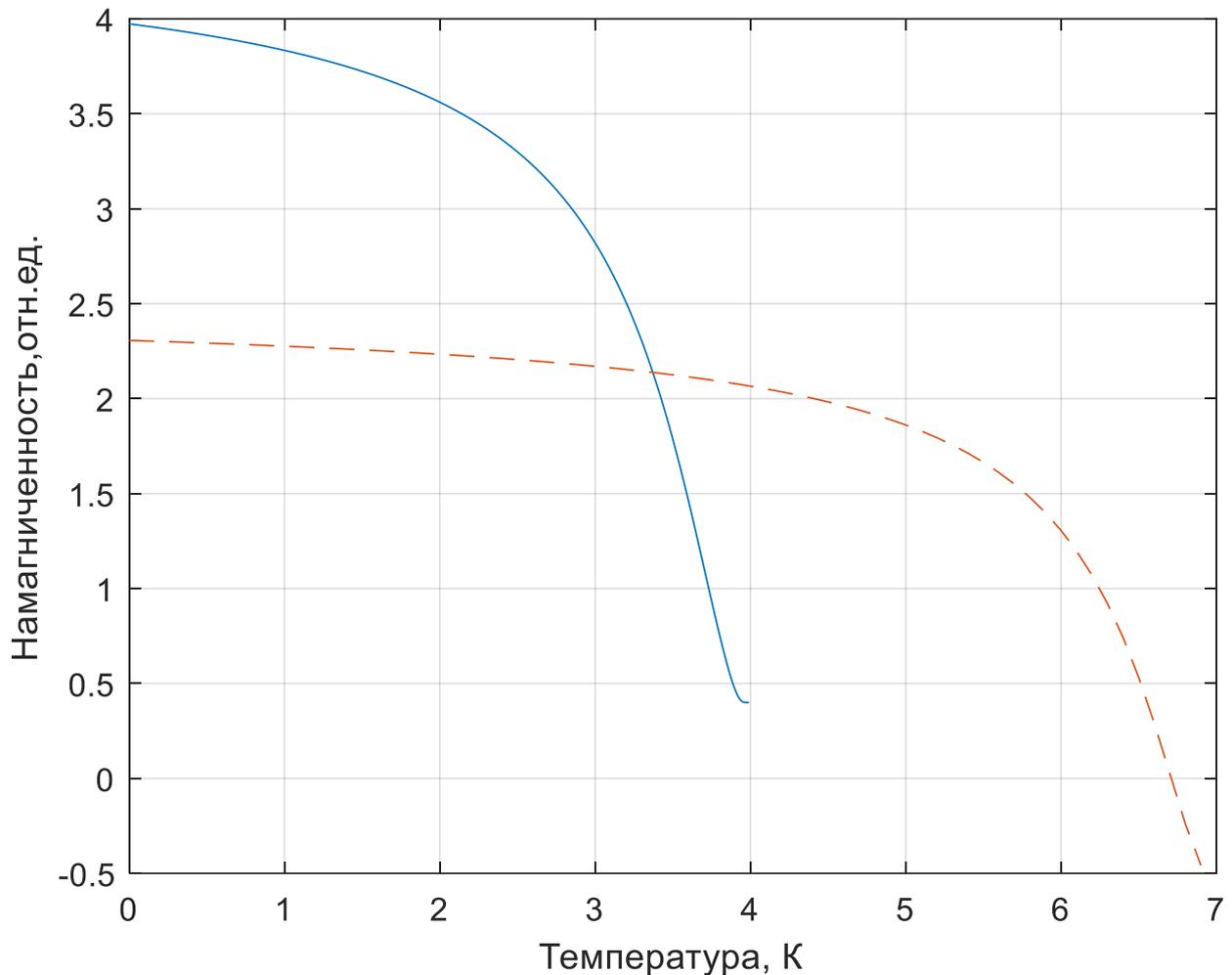


Рис. 2. Намагниченности подрешеток в приближении функцией Бриллюэна.

Для вычисления намагниченности подрешеток будем следовать логике принятой в [1]. Для выбора характеристических точек используем соответствующий рисунок из [1]. В нашем случае это будет рис. 3.

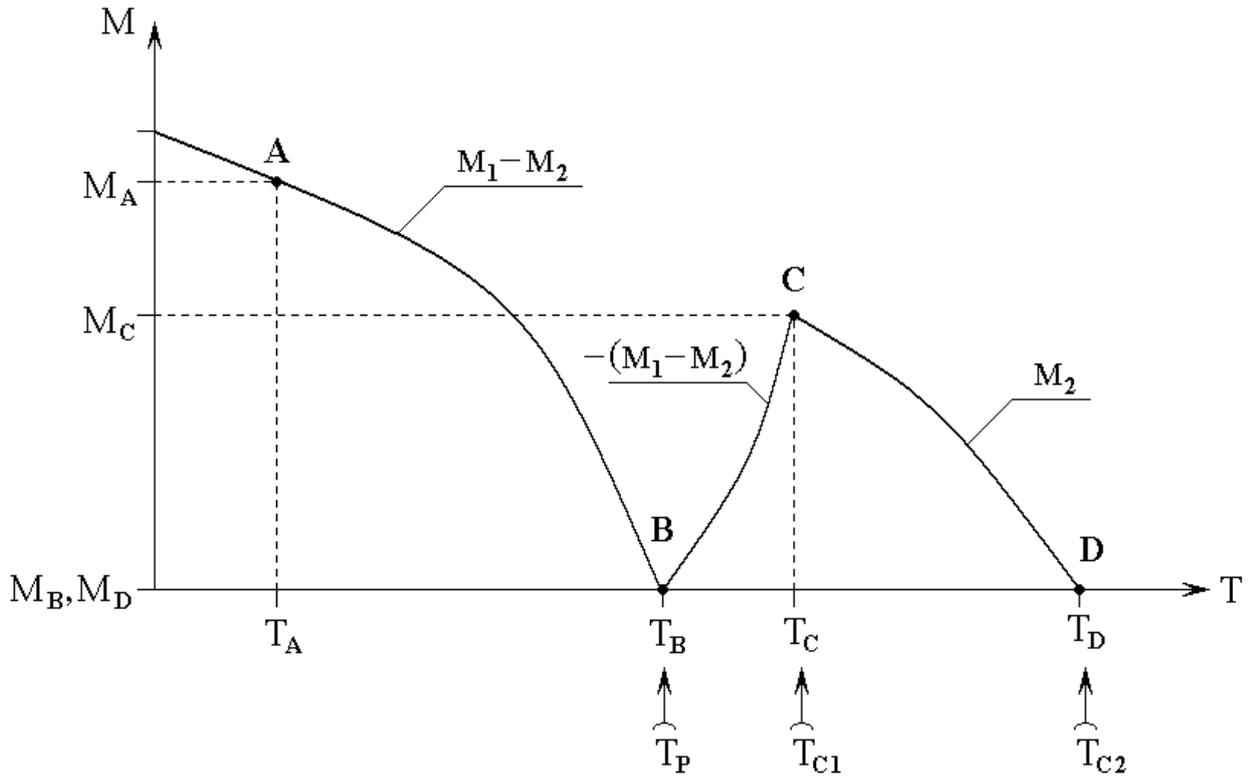


Рис. 3. Нижняя ветвь фазовой диаграммы зависимости намагниченности от температуры.

Тогда для выделенных точек на графике (рис. 3) намагниченности имеем:

$$T_{c1} \rightarrow T_C, T_{c2} \rightarrow T_D, T_p \rightarrow T_B.$$

Точка T_A выбирается относительно произвольно, однако лучше выбирать ту, которая как можно дальше от точки компенсации:

$$\text{при } T = T_A \text{ имеем: } M_1 - M_2 = M_A; \quad (11)$$

$$\text{при } T = T_B \text{ имеем: } M_1 - M_2 = M_B = 0 \text{ точка компенсации}; \quad (12)$$

$$\text{при } T = T_C \text{ имеем: } M_1 + M_2 = M_C; \quad (13)$$

$$\text{при } T = T_D \text{ имеем: } M_1 + M_2 = M_D = 0; \quad (14)$$

Пусть для одной подрешетки $J_1 = 5/2$, а для другой $J_2 = 7/2$. Введем обозначения:

$$m_1 = (2J_1 + 1) / 2J_1; \quad (15)$$

$$m_2 = 1 / 2J_1; \quad (16)$$

$$m_3 = (2J_2 + 1) / 2J_2; \quad (17)$$

$$m_4 = 1 / 2J_2. \quad (18)$$

Тогда (11-14) с учетом (15-18) и (9-10) переписывается так:

$$\begin{aligned} \text{для } T = T_A \quad X_{a1} = 1 / (T_A - T_{c1}), \quad X_{a2} = 1 / (T_A - T_{c2}) \\ M_{10} [m_1 \coth(m_1 X_{a1}) - m_2 \coth(m_2 X_{a1})] - \\ - M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{a2}) - m_4 \coth(m_4 X_{a2})] = M_A \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{для } T = T_B \quad X_{a1} = 1 / (T_A - T_{c1}), \quad X_{a2} = 1 / (T_A - T_{c2}) \\ M_{10} [m_1 \coth(m_1 X_{b1}) - m_2 \coth(m_2 X_{b1})] - \\ - M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{b2}) - m_4 \coth(m_4 X_{b2})] = M_B = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{для } T = T_c = T_{c1}, \quad X_{c1} = 1 / (T_c - T_{C1}), \quad X_{c2} = 1 / (T_c - T_{C2}) \\ M_{10} [m_1 \coth(m_1 X_{c1}) - m_2 \coth(m_2 X_{c1})] + \\ + M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{c2}) - m_4 \coth(m_4 X_{c2})] = M_c \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{для } T = T_D = T_{c2}, \quad X_{d1} = 1 / (T_D - T_{C1}), \quad X_{d2} = 1 / (T_D - T_{C2}) \\ M_{10} [m_1 \coth(m_1 X_{d1}) - m_2 \coth(m_2 X_{d1})] + \\ + M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{d2}) - m_4 \coth(m_4 X_{d2})] = M_D = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Видно, что (22) это тождественный ноль, как и первое слагаемое в (21) в силу того, что температура превышает соответствующие точки Кюри.

Тогда из (21)

$$M_{20} = M_c / [m_3 \coth(m_3 X_{c2}) - m_4 \coth(m_4 X_{c2})]. \quad (23)$$

Из (19) имеем:

$$M_{10}^{(1)} = \frac{M_A + M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{a2}) - m_4 \coth(m_4 X_{a2})]}{[m_1 \coth(m_1 X_{a1}) - m_2 \coth(m_2 X_{a1})]}. \quad (24)$$

Из (20) получим второе значение для M_{10}

$$M_{10}^{(2)} = \frac{M_{20} [m_3 \coth(m_3 X_{b2}) - m_4 \coth(m_4 X_{b2})]}{[m_1 \coth(m_1 X_{b1}) - m_2 \coth(m_2 X_{b1})]}. \quad (25)$$

Так как оба значения для M_{10} равноправны, то их среднее значение и есть M_{10} :

$$M_{10} = \frac{1}{2} (M_{10}^{(1)} + M_{10}^{(2)}). \quad (26)$$

Вычисления, проведенные формулам (23) – (26) программой, подготовленной в пакете MatLab, дают следующие значения величин намагниченностей подрешеток:

$$M_{10}^1 = 4.64; \quad (27)$$

$$M_{10}^2 = 5.08; \quad (28)$$

$$M_{10} = 4.86; \quad (29)$$

$$M_{20} = 3.65. \quad (30)$$

Измерения на вибрационном магнитометре, выполненные в условиях работ [3-4], при температуре $T = T_C$, проводились в относительных единицах (EMU или arb.un) и дали значение восприимчивости образца $\chi(V) = 2 \cdot 10^{-5}$ отн.ед. Толщина образца составляла 5 мкм, площадь пленки 10^{-1} см², то есть объем – $V = 5 \cdot 10^{-5}$ см³. Полагаем, что полная восприимчивость равна отношению измеренной величины к объему образца, то есть:

$$\chi = \chi(V) / V = 0.4. \quad (31)$$

Измерения проводились в поле $H = 100$ Э, так что намагниченность определяем по формуле:

$$M = \chi H = 40 \text{ Гс}. \quad (32)$$

Эта намагниченность соответствует единице $M_C = 1$ в принятых относительных единицах. Тогда переходя от нормировки к абсолютным величинам получим: $M_{10} = 185.6$ Гс, $M_{20} = 130$ Гс. Параметры температурные (в градусах): $T_A = 200$; $T_B = 340$; $T_C = 375$; $T_D = 390$.

Эти значения по порядку вполне соответствуют типичным величинам, например для железиттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ при комнатной температуре $M_0 = 140$ Гс [5-9]. Другие ферриты-гранаты имеют намагниченности того же порядка [10-12].

Заключение

В настоящей работе, следуя логике анализа, предложенной в [1, 2], поставлена задача об определении на основе фазовой диаграммы намагниченностей подрешеток по отдельности, в применении к экспериментальным результатам. Рассматривая магнетик как совокупность спинов двух ориентаций, получена зависимость намагниченности от температуры в общем виде.

Введено модельное представление зависимости намагниченности каждой подрешетки от температуры, включающее в себя зависимость отношения температуры ферромагнетика в целом к температуре Кюри для данной подрешетки по отдельности в приближении с помощью функции Бриллюэна.

Предложена методика определения намагниченностей подрешеток по отдельности на основе характерных значений температур и соответствующих суммарных намагниченностей, измеряемых в эксперименте. На основе фазовой диаграммы, с использованием четырех температур и двух намагниченностей, приведен пример определения намагниченностей обеих подрешеток по отдельности. Предложенная методика позволяет определить намагниченности с точностью около 10%.

Авторы признательны С.В. Таскаеву, А.Н. Васильеву, А.В. Маширову за помощь в проведении экспериментов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферромагнетика с точкой компенсации. Часть 1. Фазовая диаграмма. // Журнал Радиоэлектроники. 2024. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.2>
2. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферромагнетика с точкой компенсации. Часть 2. Степенное приближение. // Журнал Радиоэлектроники. 2024. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.3>
3. Ветошко П.М., и др. Магнитооптическая визуализация магнитных фаз в эпитаксиальной пленке феррита-граната вблизи точки компенсации. // РЭ. 2023. Т.68. №4. С.391-395. <https://doi.org/10.31857/S0033849423040149>
4. Suslov D.A., et al. Non-collinear phase in rare-earth iron garnet films near compensation temperature. // Crystals. 2023. V.13. №9. P.1297(11). <https://doi.org/10.3390/cryst13091297>
5. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. – М.: Гос.Изд.физ.-мат.лит. – 1960.
6. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука. – 1973.
7. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. – М.: Физматлит. – 1994.
8. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Магнитостатические волны в неоднородных полях. – М.: Физматлит. – 2016.
9. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Магнитостатические и электромагнитные волны в сложных структурах. – М.: Физматлит. – 2017.
10. Лисовский Ф.В. Физика цилиндрических магнитных доменов. – М.: Сов.Радио. – 1979.
11. О’Делл Т. Ферромагнитодинамика. Динамика ЦМД, доменов и доменных стенок. – М.: Мир. – 1983.

12. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. – М.: Мир. – 1982.
13. Магниторезистивная оперативная память. URL: [Магниторезистивная оперативная память – Википедия](#).
14. Романова И. Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies. // Электроника НТБ. 2014. №8.
15. Logunov M., et al. Domain wall motion across magnetic and spin compensation points in magnetic garnets. // Phys. Rev. Appl. 2021. V.15. P.064024.
16. Gerasimov M.V., et al. Experimental observation of domain wall motion induced by laser pump-pulse. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). Moscow. 2017. Published by “Изд-во Физ.фак. МГУ». Moscow. P.36.
17. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order. // Rev. Mod. Phys. 2010. V.82. №3. P.2731.
18. Bigot J.V., Vomir M. Ultrafast magnetization dynamics of nanostructures. // Ann. Phys. (Berlin). 2013. V.525. №1-2. P.2.
19. Jäger J.V., et al. Picosecond inverse magnetostriction in garfenol thin films. // Appl. Phys. Lett. 2013. V.103. №3. P.032409(5).
20. Walowski J., Münzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics. // J. Appl. Phys. 2016. V.120. №14. P.140901(16).
21. Власов В.С., et al. Современные проблемы сверхбыстрой магнитоакустики. // АЖ (Акустический журнал). 2022. Т.68. №1. С.22-56.
22. Белов К.П., Зайцева М.А. Редкоземельные магнитные материалы. // УФН. 1972. Т.106. №2. С.365-369.
23. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Переходы спиновой переориентации в редкоземельных магнетиках. // УФН. 1976. Т.119. №3. С.447-486.
24. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. – М.: Наука. – 1979.

25. Zvezdin A.K. Field induced phase transitions in ferromagnets. //Handbook of Magnetic Materials. V.9. Elsevier Science. – 1995.
26. Davydova M.D., Zvezdin K.A., Kimel A.V., Zvezdin A.K. Ultrafast spin dynamics in ferromagnets with compensation point. // J. Phys. Cond. Matt. 2020. V.32. №1. Article No. 01LT01. DOI: 10.1088/1361-648X/ab42fa.
27. Geprags S., Kehlberger A., Coletta F.D. et al. Origin of the spin Seebeck effects in compensated ferromagnets. // Nat. Commun. 2016. V.7. Article No. 10452. DOI: 10.1038/ncomms10452.
28. Gonzales J.A., Andres J.P., Anton R.L. Applied trends in magnetic rare earth / transition metal alloys and multilayers. // Sensors. 2021. V.21. №16. P.5615. DOI: 10.3390/s21165615.
29. Medapalli R., Razdolski I., Savoini M et al. The role of magnetization compensation point for efficient ultrafast control of magnetization in Gd₂₄Fe_{66.5}Co_{9.5} alloy //Europ. Phys. J. B. 2013. V.86. №4. Article No. 183. DOI: 10.1140/epjb/e2013-30682-6.
30. Белов К.П. Ферримагнетики со «слабой» магнитной подрешеткой. // УФН. 1996. Т.166. №6. С.660-681.
31. Clark A.E., Callen E. Neel ferromagnets in large magnetic fields. // J. Appl. Phys. 1968. V.39. №13. P.5972-5082.
32. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферримагнетики. – М.: Мир. – 1965.
33. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. – М.: ОГИЗ Гостехиздат. – 1948.

Для цитирования:

Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. Приближение функцией Бриллюэна // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.13>