



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.5>

УДК: 537.874; 537.624

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ ДВУХПОДРЕШЕТОЧНОГО ФЕРРИМАГНЕТИКА С ТОЧКОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Д.А. Суслов, В.И. Щеглов

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

Статья поступила в редакцию 23 июня 2026 г.

Аннотация. Рассмотрена динамика вынужденных колебаний намагниченности в пределах фазовой диаграммы двухподрешеточного ферритмагнетика с точкой компенсации. Построена фазовая диаграмма как зависимость ориентационных переходов по полю от температуры. По полю выделены три области: ниже, выше и в пределах диаграммы. Построены амплитудно-частотные характеристики в областях выше и ниже диаграммы. Установлен их сходный характер, подобный резонансному. Построены амплитудно-частотные характеристики внутри диаграммы. Показано, что эти характеристики имеют сильно изрезанный характер. Для интерпретации изрезанности предложена модель структуры из двух колебательных систем, связанных обменным взаимодействием. Установлено, что причиной изрезанности является интерференция между возбуждением от внешнего поля и от другой подрешетки. Выполнена вариация обменного взаимодействия и показана его роль в формировании изрезанности. Приведены некоторые рекомендации для возможного развития работы.

Ключевые слова: фазовая диаграмма, двухподрешеточный ферритмагнетик, амплитудно-частотная характеристика.

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

Автор для переписки: Щеглов Владимир Игнатьевич, vshcheg@cplire.ru

Введение

Магнитодиэлектрические материалы, в первую очередь ферриты, находят широкое применение в устройствах обработки аналоговой информации в диапазоне СВЧ [1-10], в схемах магниторезистивной памяти [11], доменных запоминающих устройствах [12, 13], магнитострикционных преобразователях [14-16], в том числе для возбуждения магнитных и упругих колебаний под действием мощных импульсов света от фемтосекундного лазера [17-19].

Значительный интерес представляют редкоземельные ферриты-гранаты, обладающие двумя магнитными подрешетками с точкой температурной компенсации [20, 21].

Для успешного использования подобных материалов необходима информация об их параметрах, таких как намагниченности подрешеток и фазовая диаграмма, определяющая температурно-полевою зависимость ориентационных переходов.

Классическая схема построения типичной фазовой диаграммы приведена в работе [22] (Кларк-Каллен), В работах [23-27] предложено определение намагниченностей и построение фазовой диаграммы методом двукратного поиска нуля с минимизацией плотности энергии материала.

Весьма удобный инструмент для расчета фазовой диаграммы предложен в работе [28], использующей алгоритм динамического установления [8, стр.216-217], [29-31]. Дальнейшее развитие этот алгоритм получил в работах [32, 33]. Было выявлено влияние анизотропии и обменного взаимодействия на фазовую диаграмму тонкой пленки из двухподрешеточного ферритмагнетика с точкой компенсации.

Настоящая работа является продолжением работ [28, 32, 33]. Основное внимание уделяется исследованию динамики прецессии намагниченностей подрешеток в том числе в режиме вынужденных колебаний.

1. Геометрия задачи

Общая геометрия задачи показана на рис. 1.

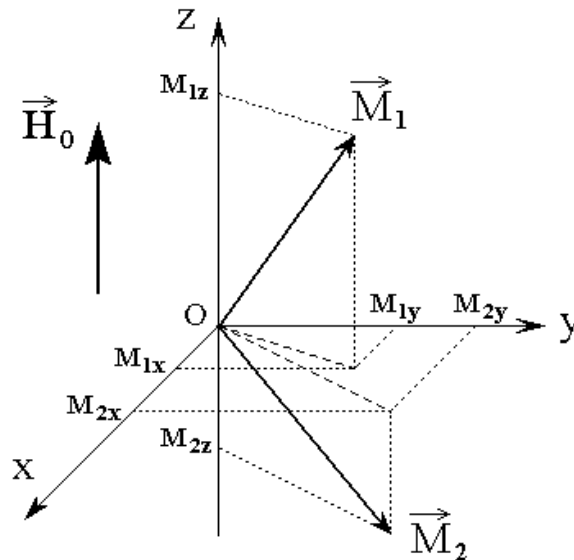


Рис. 1. Общая геометрия задачи.

Задача решается в декартовой системе координат $Oxyz$, постоянное поле $\vec{H}_0$ в которой направлено вдоль оси Oz . Ферримагнетик имеет две магнитных подрешетки, векторы намагниченностей которых обозначены как $\vec{M}_1$ и $\vec{M}_2$. Координатные составляющие этих векторов равны соответственно M_{1x} , M_{1y} , M_{1z} и M_{2x} , M_{2y} , M_{2z} .

2. Классическое построение фазовой диаграммы

Подобно [24-26] полагаем, что намагниченности M_1 и M_2 зависят от температуры T в виде:

$$M_1 = M_{10} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c1}} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$M_2 = M_{20} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c2}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где M_{10} , M_{20} – намагниченности той и другой подрешеток при абсолютном нуле температуры, T_{c1} , T_{c2} – температуры Кюри для тех же подрешеток.

Следуя [24-26], рассмотрение проведем с использованием набора нормированных или «относительных» параметров: $M_{10} = 5$; $M_{20} = 3$; $T_{c1} = 4$; $T_{c2} = 7$. Параметр обменного взаимодействия между намагниченностями подрешеток Λ положим равным нормированной единице $\Lambda = 1$.

На рис. 2 приведены температурные зависимости намагниченностей подрешеток, построенные по формулам (1) и (2).

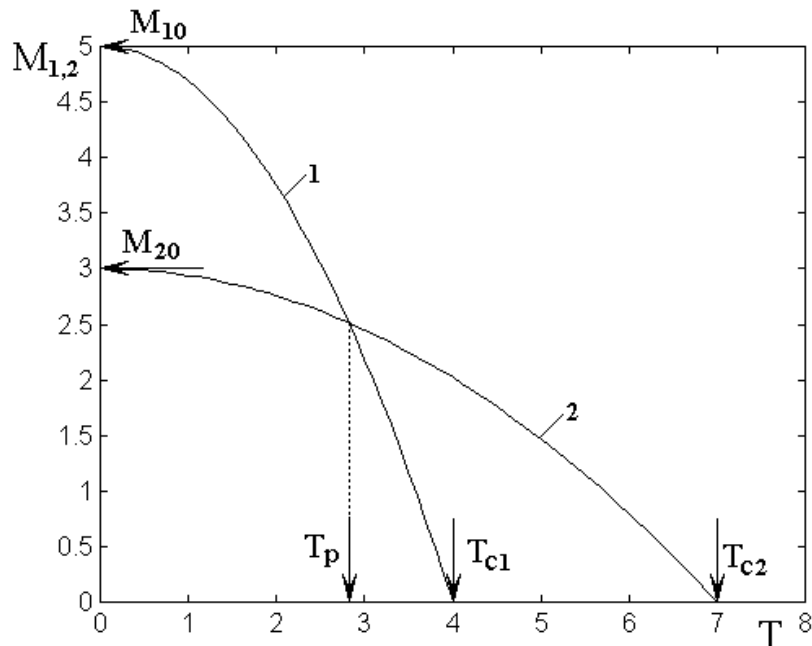


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченностей подрешеток:

1 – намагниченность первой подрешетки, формула (1);

2 – намагниченность второй подрешетки, формула (2).

Параметры указаны в тексте.

Условие компенсации соответствует равенству обеих намагниченностей, что происходит при температуре $T_p = 2,8$ отн.ед. В этом случае при взаимно противоположной ориентации намагниченностей суммарная намагниченность равна нулю, что и представляет собой компенсацию в целом.

Приведем краткую схему построения фазовой диаграммы классическим способом, состоящим в минимизации плотности энергии двухподрешеточной структуры в целом. Ограничимся наиболее простым вариантом без учета размагничивания и анизотропии, то есть положим плотность энергии в виде [2, стр.206, форм.(4.4.1)]:

$$U = -\vec{H}_0 \vec{M}_1 - \vec{H}_0 \vec{M}_2 + \Lambda \vec{M}_1 \vec{M}_2, \quad (3)$$

где первые два слагаемых определяются взаимодействием намагниченностей подрешеток с полем, а третье – обменным взаимодействием намагниченностей между собой, величина которого определяется параметром Λ , при антиферромагнитном характере взаимодействия являющимся положительным.

В традиционно выбираемой сферической системе координат [2, стр.206, рис. 4.4.3] выражение (3А) принимает вид [2, стр.206, форм.(4.4.3)]:

$$U = -H_0 M_1 \cos \theta_1 - H_0 M_2 \cos \theta_2 + \Lambda M_1 M_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2), \quad (4)$$

где θ_1 и θ_2 – углы между намагниченностями и полем, а угол между $\vec{M}_1$ и $\vec{M}_2$ равен разности углов $\theta_1 - \theta_2$.

Выполняя минимизацию плотности энергии, то есть приравнивая к нулю первые производные (4) по θ_1 и θ_2 , получаем систему двух уравнений для определения этих углов:

$$H_0 \sin \theta_1 - \Lambda M_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \Lambda M_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 = 0; \quad (5)$$

$$H_0 \sin \theta_2 - \Lambda M_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \Lambda M_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 = 0. \quad (6)$$

Аналитическое решение этих уравнений имеет вид:

$$\cos \theta_1 = \frac{H_0^2 + \Lambda^2 (M_1^2 - M_2^2)}{2 \Lambda H_0 M_1}; \quad (7)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{H_0^2 - \Lambda^2 (M_1^2 - M_2^2)}{2 \Lambda H_0 M_2}. \quad (8)$$

Для построения диаграммы учитываем, что ее ветви формируются как значения полей, при которых ориентации намагниченностей меняются в максимально допустимых пределах изменения $\cos \theta_1$ и $\cos \theta_2$ от -1 до $+1$. Подставляя эти

значения в (5), (6), получаем два квадратных уравнения для поля H_0 , решение которых дает две зависимости, определяющие граничные значения полей, выраженные через намагниченности подрешеток:

$$(H_0)^{(+)} = \Lambda(M_1 + M_2); \quad (9)$$

$$(H_0)^{(-)} = \Lambda(M_1 - M_2). \quad (10)$$

Эти выражения с учетом температурных зависимостей намагниченностей (1), (2) определяют фазовую диаграмму в виде, приведенном на рис. 3 (подобном рис. 6 в работе [24] или рис. 2 в работе [26]).

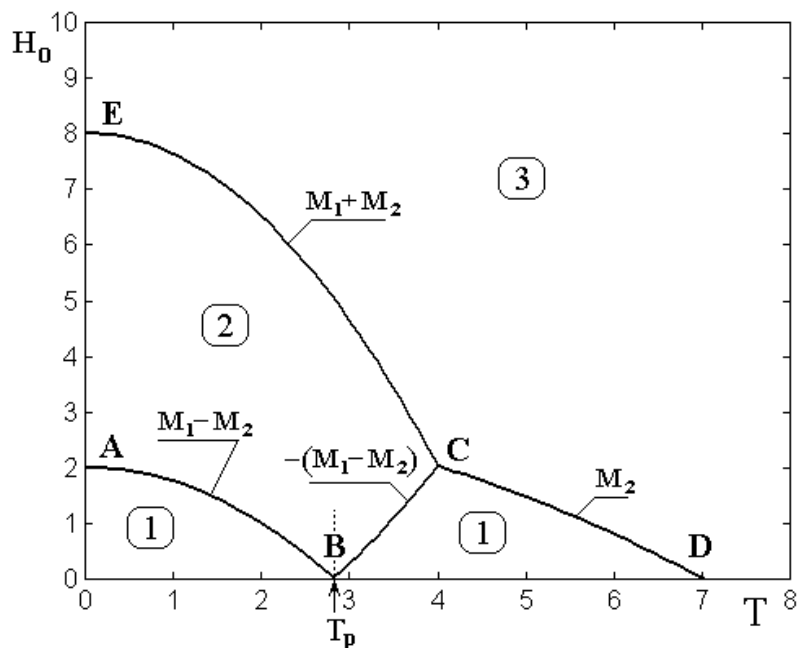


Рис. 3. Схема фазовой диаграммы, построенной классическим методом. Цифры в рамках – номера областей. Параметры – те же, что на рис. 2.

Из рисунка видно, что по величине поля в полном интервале изменения температуры на диаграмме можно выделить три характерные области:

Область №1 – лежит ниже нижней ветви диаграммы, то есть ниже кривых AB , BC , CD . В этой области намагниченности обеих подрешеток ориентированы параллельно и направлены в противоположные стороны (угол между намагниченностями равен 180 градусам).

Область №2 – лежит между нижней и верхней ветвями диаграммы, то есть между кривыми ABC и EC . В этой области намагниченности подрешеток составляют друг с другом угол, меньший 180 градусов, причем на нижней

границе этой области этот угол составляет 180 градусов, а на верхней – равен нулю.

Область №3 – лежит выше верхней ветви диаграммы, то есть выше кривой *ECD*. В этой области намагниченности обеих подрешеток параллельны друг другу и ориентированы в одном направлении (угол между намагниченностями равен нулю).

Границы между областями, то есть ветви диаграммы, представляют собой фазовые переходы второго рода, а внутри области №2 происходит ориентационный переход.

Замечание. Следует заметить, что приведенный здесь способ построения фазовой диаграммы удобен только при самом простом выражении для плотности энергии вида (3). При введении размагничивания или анизотропии уравнения типа (5), (6) в аналитическом виде не разрешаются или приводят к высоким степеням. Ряд попыток преодоления этой трудности состоит в применении метода двукратного поиска нуля с минимизацией плотности энергии материала [23-27]. Однако этот метод также довольно громоздок и не лишен ограничений, так что авторы настоящей работы полагают метод установления для решения подобных задач наиболее удобным.

3. Компоненты намагниченностей подрешеток при изменении поля

Фазовая диаграмма представляет собой зависимости начальной и конечной границ ориентационного перехода по полю от температуры. При постоянном значении температуры по мере увеличения поля ориентации намагниченностей подрешеток последовательно проходят три стадии:

- первая – поле малое, обе намагниченности ориентированы вдоль поля навстречу друг другу (область №1 на рис. 3);
- вторая – поле среднее, намагниченности отклонены от направления поля и по мере увеличения поля постепенно поворачиваются к его

направлению, то есть происходит ориентационный переход, поле начала которого обозначим через H_A , а поле окончания – через H_B (область №2 на рис. 3);

- третья – поле большое, обе намагниченности ориентированы вдоль поля в одном направлении, положительном относительно поля (область №3 на рис. 3).

Таким образом, первая стадия соответствует полю $H_0 < H_A$ (область №1), вторая – интервалу по полю $H_A < H_0 < H_B$ (область №2), третья – полю $H_0 > H_B$ (область №3).

Метод установления позволяет удобно рассмотреть зависимости компонент намагниченностей подрешеток от поля при постоянной температуре.

Для удобства дальнейшего обращения компоненты намагниченностей вдоль поля, то есть вдоль оси Oz (рис. 1), такие как M_{1z} и M_{2z} , будем называть «продольными». Введем в рассмотрение проекции намагниченностей на плоскость, перпендикулярную направлению поля, то есть на плоскость Oxy (рис. 1):

$$M_{1n} = \sqrt{M_{1x}^2 + M_{1y}^2}; \quad (11)$$

$$M_{2n} = \sqrt{M_{2x}^2 + M_{2y}^2}. \quad (12)$$

Эти компоненты будем называть «поперечными».

На данном этапе ограничимся рассмотрением температуры ниже компенсации.

Обратимся к рис. 4, где показаны такие зависимости при температуре $T = 1$, величина которой, как можно видеть из рис. 3, ниже температуры компенсации.

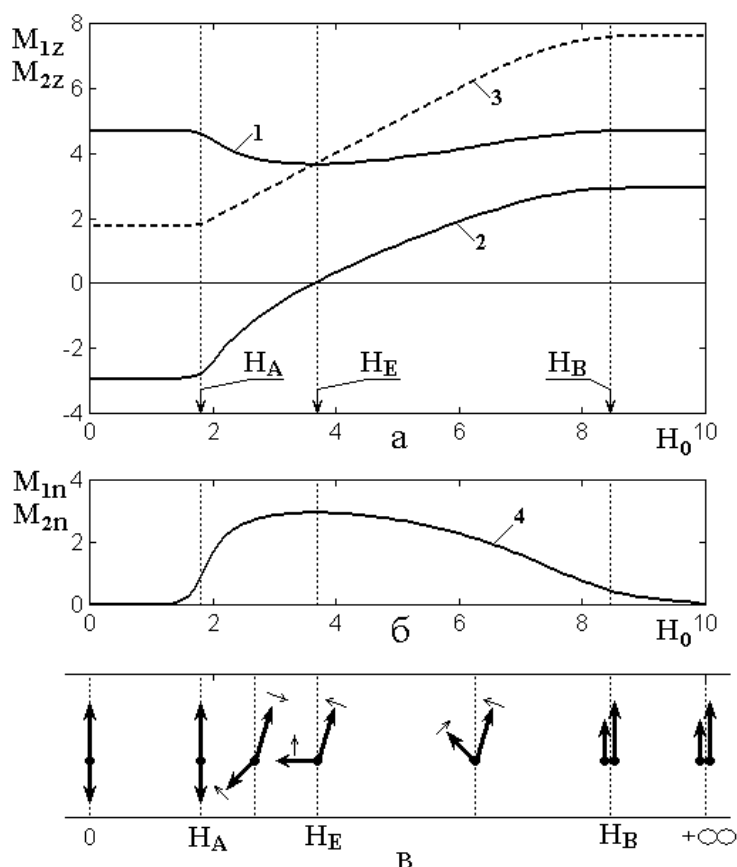


Рис. 4. Зависимости компонент намагниченностей подрешеток от поля при постоянной температуре $T = 1$. меньшей температуры компенсации:

а – компоненты продольные; б – компоненты поперечные;
 в – схема ориентации намагниченностей подрешеток; 1 – первая подрешетка;
 2 – вторая подрешетки; 3 – сумма продольных компонент обеих подрешеток;
 4 – обе подрешетки (кривые совпадают). Поля H_A и H_B соответствуют
 полевым границам ориентационного перехода, поле H_E соответствует
 максимальному значению поперечных компонент намагниченности.

Параметры – те же, что на рис. 2-3.

Из рис. 4а видно, что при поле $H_0 < H_A$, то есть до начала ориентационного перехода (область №1), намагниченности обеих подрешеток выстроены вдоль поля, так что их продольные компоненты равны абсолютной величине с соответствующим знаком: $M_{1z} = 5$ (кривая 1), $M_{2z} = -3$ (кривая 2), а их сумма (кривая 3) равна: $M_{1z} + M_{2z} = 2$. Поперечные компоненты M_{1n} и M_{2n} (рис. 4в, кривая 4) при этом равны нулю.

При увеличении поля выше H_A начинается ориентационный переход (начало области №2), то есть намагниченности отклоняются от направления поля. При этом продольная компонента первой подрешетки (кривая 1)

уменьшается, а второй подрешетки (кривая 2) – увеличивается. Такое их изменение сопровождается выходом из оси Oz , так что поперечная компонента (кривая 4) увеличивается. Поперечная компонента (кривая 4) сначала увеличивается, но когда поле достигает величины H_E начинает уменьшаться. Точка H_E соответствует прохождению кривой 2 через нуль (то есть при этом $M_{2z} = 0$). При этом ориентация намагниченности второй подрешетки параллельна плоскости пластины (рис. 1), как это видно из рис. 4в при $H_0 = H_E$.

При увеличении поля выше H_E намагниченности подрешеток стремятся друг к другу, так что их полное схлопывание происходит при поле H_B , где ориентационные переход заканчивается (окончание области №2). Намагниченности пребывают в одинаковой фазе и при дальнейшем увеличении поля ориентации той и другой намагниченностей на меняются (область №3), будучи выстроенными вдоль постоянного поля (оси Oz на рис. 1).

4. Общий математический аппарат решения задачи

В рамках настоящей работы решаются две задачи. Первая задача – нахождение равновесного состояния намагниченностей подрешеток. Эта задача решается методом установления. Вторая задача – нахождение нелинейных колебаний намагниченности в условиях равновесия.

В рамках первой задачи строится фазовая диаграмма, после чего на ней выбираются условия, представляющие наибольший интерес с точки зрения динамики намагниченности, что и рассматривается далее в рамках второй задачи.

В основе математического аппарата решения обеих задач лежит система из двух связанных уравнений типа Ландау-Лифшица для обеих подрешеток.

Первая задача решается в отсутствие внешнего возбуждения при задании начального положения намагниченностей. Итогом является получение равновесных ориентаций намагниченностей в рамках полной фазовой

диаграммы. При этом после задания начального отклонения система отпускается в свободное движение, намагниченности подрешеток испытывают колебания, которые постепенно затухают в соответствии со временем релаксации. При этом конечное положение намагниченностей соответствует их равновесному положению

Вторая задача решается путем задания вынуждающего поля с рассмотрением развития колебаний во времени после окончания начального процесса релаксации. В этом случае начальное положение роли не играет, так как начальные колебания по прошествии времени релаксации затухают и далее в системе продолжаются только чисто вынужденные колебания.

Таким образом, различие задач состоит только в задании начальных условий и вынуждающего поля, поэтому математический аппарат расчета нелинейных колебаний намагниченности является единым.

Рассмотрим этот аппарат несколько более подробно.

Полагаем, что движение намагниченностей каждой из подрешеток описывается классическим уравнением Ландау-Лифшица [6, стр.37-41] с учетом затухания в форме Гильберта [2, стр.39, форм.(1.3.2), [9, стр.100-102]:

- для первой подрешетки:

$$\frac{\partial \vec{M}_1}{\partial t} = -\gamma [\vec{M}_1 \times \vec{H}_1] + \frac{\alpha_1}{M_{10}} \left[\vec{M}_1 \times \frac{\partial \vec{M}_1}{\partial t} \right]; \quad (13)$$

- для второй подрешетки:

$$\frac{\partial \vec{M}_2}{\partial t} = -\gamma [\vec{M}_2 \times \vec{H}_2] + \frac{\alpha_2}{M_{20}} \left[\vec{M}_2 \times \frac{\partial \vec{M}_2}{\partial t} \right], \quad (14)$$

где γ – гиромагнитное отношение для электрона (равное $2.8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ Э}^{-1}$), $\vec{M}_{1,2}$ – векторы намагниченностей подрешеток, $M_{10,20}$ – их абсолютные величины, $\alpha_{1,2}$ – параметры затухания, а $\vec{H}_{1,2}$ – эффективные поля, без учета неоднородного обмена имеющие вид: [2, стр.68, форм.(2.1.14), сноска 2)]:

- для первой подрешетки:

$$\vec{H}_1 = -\frac{\partial U}{\partial M_1} = -\vec{i} \frac{\partial U}{\partial M_{1x}} - \vec{j} \frac{\partial U}{\partial M_{1y}} - \vec{k} \frac{\partial U}{\partial M_{1z}}, \quad (15)$$

- для второй подрешетки:

$$\vec{H}_2 = -\frac{\partial U}{\partial M_2} = -\vec{i} \frac{\partial U}{\partial M_{2x}} - \vec{j} \frac{\partial U}{\partial M_{2y}} - \vec{k} \frac{\partial U}{\partial M_{2z}}, \quad (16)$$

где U – плотность энергии ферримагнетика в целом.

Уравнения движения, записанные в координатах для случая отсутствия нормировки, принимают вид [8, стр.54, форм.((2.97)-(2.99))]:

- для первой подрешетки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{1x}}{\partial t} = & -\frac{\gamma}{1+\alpha_1^2} \left\{ \left(M_{1y} + \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1x} M_{1z} \right) \cdot H_{1z} - \right. \\ & \left. - \left(M_{1z} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1x} M_{1y} \right) \cdot H_{1y} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} (M_{1y}^2 + M_{1z}^2) \cdot H_{1x} \right\}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{1y}}{\partial t} = & -\frac{\gamma}{1+\alpha_1^2} \left\{ \left(M_{1z} + \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1y} M_{1x} \right) \cdot H_{1x} - \right. \\ & \left. - \left(M_{1x} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1y} M_{1z} \right) \cdot H_{1z} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} (M_{1z}^2 + M_{1x}^2) \cdot H_{1y} \right\}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{1z}}{\partial t} = & -\frac{\gamma}{1+\alpha_1^2} \left\{ \left(M_{1x} + \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1z} M_{1y} \right) \cdot H_{1y} - \right. \\ & \left. - \left(M_{1y} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} M_{1z} M_{1x} \right) \cdot H_{1x} - \frac{\alpha_1}{M_{10}} (M_{1x}^2 + M_{1y}^2) \cdot H_{1z} \right\}; \end{aligned} \quad (19)$$

- для второй подрешетки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{2x}}{\partial t} = & -\frac{\gamma}{1+\alpha_2^2} \left\{ \left(M_{2y} + \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2x} M_{2z} \right) \cdot H_{2z} - \right. \\ & \left. - \left(M_{2z} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2x} M_{2y} \right) \cdot H_{2y} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} (M_{2y}^2 + M_{2z}^2) \cdot H_{2x} \right\}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial M_{2y}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1+\alpha_2^2} \left\{ \left(M_{2z} + \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2y} M_{2x} \right) \cdot H_{2x} - \right. \\ \left. - \left(M_{2x} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2y} M_{2z} \right) \cdot H_{2z} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} (M_{2z}^2 + M_{2x}^2) \cdot H_{2y} \right\}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial M_{2z}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1+\alpha_2^2} \left\{ \left(M_{2x} + \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2z} M_{2y} \right) \cdot H_{2y} - \right. \\ \left. - \left(M_{2y} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} M_{2z} M_{2x} \right) \cdot H_{2x} - \frac{\alpha_2}{M_{20}} (M_{2x}^2 + M_{2y}^2) \cdot H_{2z} \right\}. \quad (22)$$

Необходимую для вычисления эффективных полей (15), (16) плотность энергии подрешеток U положим в виде

$$U = -U_{h1} - U_{h2} + U_e, \quad (23)$$

где первое и второе слагаемые определяются взаимодействием той и другой намагниченностей с полем, третье – обменным взаимодействием намагниченностей между собой.

Плотность энергии взаимодействия намагниченностей с полем H полагаем в классическом виде [2, стр.65, форм. (2.1.1)]:

$$U_{h1} = -\vec{H}_1 \vec{M}_1 = -(H_{1x} M_{1x} + H_{1y} M_{1y} + H_{1z} M_{1z}); \quad (24)$$

$$U_{h2} = -\vec{H}_2 \vec{M}_2 = -(H_{2x} M_{2x} + H_{2y} M_{2y} + H_{2z} M_{2z}). \quad (25)$$

Поля $H_{1,2}$ полагаем единым равным сумме постоянной и переменной составляющих, причем постоянное поле полагаем направленным по оси Oz (рис. 1), равным H_0 :

$$H_{1,2x} \rightarrow H_x = h_0 \sin(2\pi f_p t); \quad (26)$$

$$H_{1,2y} \rightarrow H_y = -h_0 \cos(2\pi f_p t); \quad (27)$$

$$H_{1,2z} = H_0, \quad (28)$$

где f_p – частота переменного возбуждающего поля.

Плотность энергии междоузельного обменного взаимодействия положим в виде [2, стр.161, форм. (4.2.2)]:

$$U_e = \Lambda \vec{M}_1 \vec{M}_2 = \Lambda (M_{1x} M_{2x} + M_{1y} M_{2y} + M_{1z} M_{2z}), \quad (29)$$

где Λ – константа взаимодействия, причем $\Lambda > 0$, что соответствует антиферромагнитному упорядочению.

Подставляя (24)-(29) в (23) получаем полную плотность энергии в виде:

$$\begin{aligned} U = & - (H_x M_{1x} + H_y M_{1y} + H_z M_{1z}) - \\ & - (H_x M_{2x} + H_y M_{2y} + H_z M_{2z}) + \\ & + \Lambda \cdot (M_{1x} M_{2x} + M_{1y} M_{2y} + M_{1z} M_{2z}). \end{aligned} \quad (30)$$

Компоненты эффективных полей (15), (16) принимают вид:

- для первой подрешетки:

$$H_{1x} = H_x - \Lambda M_{2x}; \quad (31)$$

$$H_{1y} = H_y - \Lambda M_{2y}; \quad (32)$$

$$H_{1z} = H_z - \Lambda M_{2z}; \quad (33)$$

- для второй подрешетки:

$$H_{2x} = H_x - \Lambda M_{1x}; \quad (34)$$

$$H_{2y} = H_y - \Lambda M_{1y}; \quad (35)$$

$$H_{2z} = H_0 - \Lambda M_{1z}. \quad (36)$$

5. Колебания намагниченностей подрешеток при их параллельной ориентации

В разделе 3 отмечено, что относительно взаимной ориентации намагниченностей обеих подрешеток, в рамках фазовой диаграммы (рис. 3) принципиально различны три области:

- область №1 (ниже основной части диаграммы) – намагниченности обеих подрешеток выстроены параллельно в одном направлении; угол между намагниченностями равен 180 градусов;

- область №2 (внутри основной части диаграммы) – намагниченности подрешеток направлены под углом друг к другу; угол между намагниченностями меняется от нуля до 180 градусов в зависимости от величины внешнего поля.
- область №3 (выше основной части диаграммы) – намагниченности обеих подрешеток выстроены параллельно во взаимно противоположных направлениях; угол между намагниченностями равен нулю.

При этом в областях №1 и №3 обе намагниченности выстроены в одном направлении, так что общая намагниченность равна их сумме (область №3) или разности (область №1). В процессе движения обе намагниченности не разделяются, так что прецессируют как бы воедино. В области же №2 намагниченности едиными не являются, поэтому их движение может быть более сложным.

Начнем рассмотрение динамики намагниченности с более простых случаев, когда обе намагниченности параллельны друг другу, то есть с областей №1 и №3.

6. Колебания намагниченности в первой области диаграммы

Рассмотрим сначала вынужденные колебания намагниченности в первой области, когда обе намагниченности ориентированы во взаимно противоположных направлениях, а угол между ними сохраняется равным 180 градусам. На данном этапе для простоты рассмотрения ограничимся линейным режимом возбуждения.

Обратимся к рис. 5, где показаны развертки колебаний намагниченностей во времени и соответствующие прецессионные портреты. Соотношение между постоянным полем $h_0 = 1$ Э. (ниже нижней ветви диаграммы) и частотой возбуждения $f = 2,5$ МГц выбрано таким, чтобы выполнялись условия резонанса.

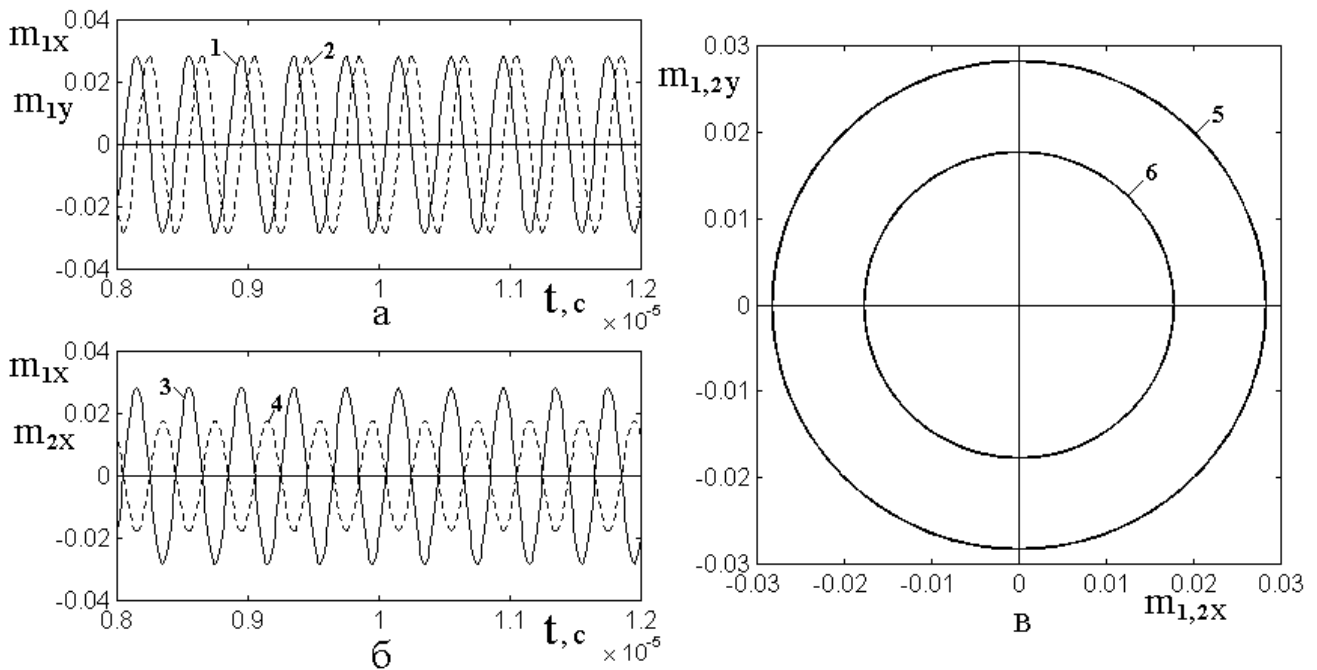


Рис. 5. Колебания во времени компонент намагниченностей подрешеток: для одной подрешетки (а); для двух подрешеток (б); а также соответствующий прецессионный протрет (в); 1 – компонента m_{1x} (сплошная линия); 2 – компонента m_{1y} (пунктир); 3 – компонента m_{1x} (сплошная линия); 4 – компонента m_{2x} (пунктир); 5 – прецессионный портрет для первой подрешетки; 6 – прецессионный портрет для второй подрешетки. Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $H_0 = 1$ Э; $h_0 = 10^{-3}$ Э; $f_p = 2,5$ МГц.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рис. 5а видно, что характер колебаний обеих компонент намагниченности первой подрешетки близок к синусоидальному, причем компоненты m_{1x} и m_{1y} сдвинуты по фазе на 90 градусов.

Из рис. 5б видно, что колебания намагниченности второй подрешетки имеют такой же характер, что первой, причем соответствующие компоненты прецессируют в противофазе. При этом амплитуда колебаний второй подрешетки меньше амплитуды колебаний первой подрешетки, что соответствует различию намагниченностей при заданной температуре.

Из рис. 5в видно, что прецессионные портреты для той и другой подрешеток представляют собой правильные окружности, диаметры которых определяются величинами намагниченностей подрешеток.

7. Колебания намагниченности в третьей области диаграммы

Рассмотрим теперь вынужденные колебания намагниченности в третьей области, когда обе намагниченности ориентированы в одном едином направлении, а угол между ними сохраняется равным нулю. На данном этапе для простоты рассмотрения ограничимся линейным режимом возбуждения.

Обратимся к рис. 6, где показаны развертки колебаний намагниченностей во времени и соответствующие прецессионные портреты. Соотношение между постоянным полем $h_0 = 9$ Э. (выше верхней ветви диаграммы) и частотой возбуждения $f = 25,2$ МГц выбрано таким, чтобы выполнялись условия резонанса.

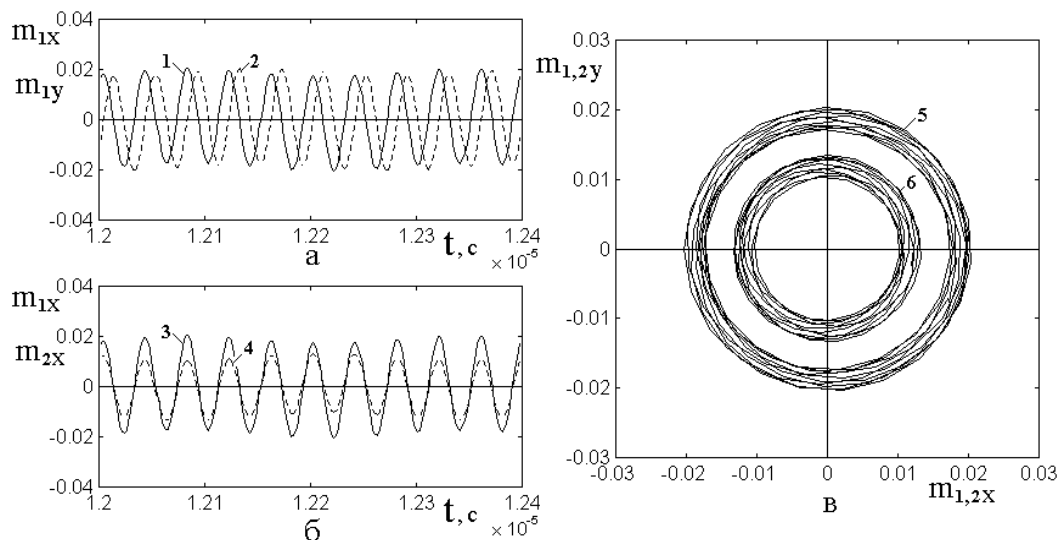


Рис. 6. Колебания во времени компонент намагниченностей подрешеток: для одной подрешетки (а); для двух подрешеток (б); а также соответствующий прецессионный протрет (в); 1 – компонента m_{1x} (сплошная линия); 2 – компонента m_{1y} (пунктир); 3 – компонента m_{1x} (сплошная линия); 4 – компонента m_{2x} (пунктир); 5 – прецессионный портрет для первой подрешетки; 6 – прецессионный портрет для второй подрешетки.

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $H_0 = 9$ Э; $h_0 = 10^{-3}$ Э; $f_p = 25,2$ МГц.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рис. 6а видно, что характер колебаний обеих компонент намагниченности первой подрешетки близок к синусоидальному, причем компоненты m_{1x} и m_{1y} сдвинуты по фазе на 90 градусов.

Из рис. 6б видно, что колебания намагниченности второй подрешетки имеют такой же характер, причем соответствующие компоненты прецессируют в фазе, одинаковой с фазой первой подрешетки. Заметим, что в предыдущем случае колебания намагниченностей подрешеток были противофазны, что обусловлено их взаимно противоположным направлением, здесь же такие колебания синфазны, так как направления намагниченностей обеих подрешеток между собой совпадают. При этом амплитуда колебаний второй подрешетки меньше амплитуды колебаний первой подрешетки, что соответствует различию намагниченностей при заданной температуре.

Из рис. 6в видно, что прецессионные портреты для той и другой подрешеток представляют собой правильные окружности, диаметры которых определяются величинами намагниченностей подрешеток. В отличие от предыдущего случая здесь прецессионные портреты несколько размазаны, что обусловлено небольшими флуктуациями колебаний намагниченностей обеих подрешеток.

Таким образом, можно сделать вывод, что колебания намагниченностей подрешеток в первой и третьей областях диаграммы происходят подобным образом с тем отличием, что в первой области намагниченности ориентированы противоположно друг к другу, а в третьей – выстроены в одном направлении. Такое различие в первой области вызывает противофазный характер колебаний подрешеток, а в третьей области – синфазный.

8. Амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности в областях №1 и №3

Рассмотрим теперь колебания намагниченности в более широких интервалах частоты и амплитуды переменного поля. В классической радиотехнике для выявления таких свойств колебательного процесса удобно использовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Практика показывает, что АЧХ колебаний обеих подрешеток подобны друг другу с

точностью до отношения величин намагниченностей при заданной температуре (рис. 2), поэтому ограничимся рассмотрением только первой подрешетки.

9. Амплитудно-частотные характеристики в области №1

Обратимся к рис. 7, где приведены амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №1 (ниже нижней ветви диаграммы) при различных уровнях возбуждения.

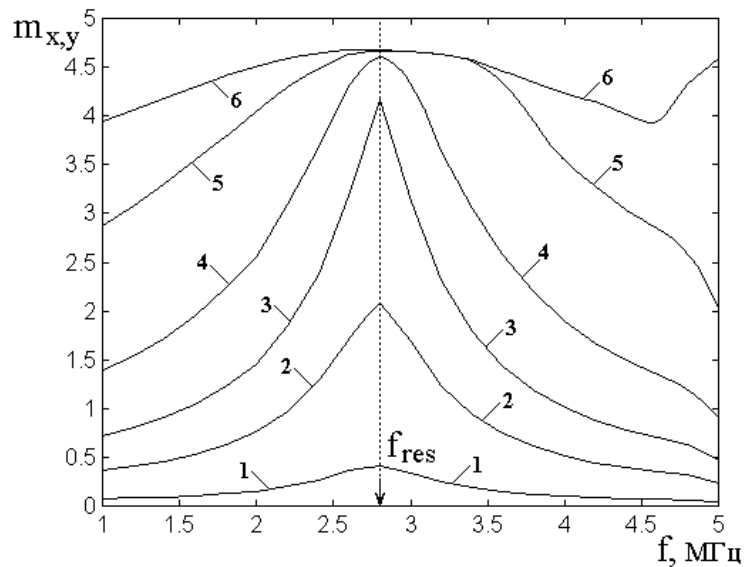


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №1 при различных уровнях переменного поля h_0 :
1 – 0,01 Э; 2 – 0,05 Э; 3 – 0,10 Э; 4 – 0,20 Э; 5 – 0,50 Э; 6 – 1,00 Э.

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $H_0 = 1$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что все характеристики имеют типичный резонансный вид с частотой резонанса $f = 2,8$ МГц. Видно также, что все кривые относительно этой частоты являются симметричными. Характеристики 1-3 можно считать полностью линейными, характеристика 4 является промежуточной, а характеристики 5 и 6 являются сильно нелинейными.

Характерный для расстроенного механизма наклон нелинейных кривых в сторону высоких частот заметно не проявляется, однако уровень насыщения, соответствующий 4,6 отн.ед., выражен достаточно сильно. Из сравнения с рис. 2 можно видеть, что эта величина соответствует максимальной длине намагниченности первой подрешетки при заданной температуре $T = 1$ отн.ед.

Небольшой подъем кривой 6 в области частот выше 4,5 МГц обусловлен склонностью колебаний намагниченности к хаотизации и требует отдельного рассмотрения.

10. Амплитудно-частотные характеристики в области №3

Рассмотрим теперь такие же колебания намагниченностей в области №1 (выше верхней ветви диаграммы).

Обратимся к рис. 8, где приведены амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №3 при различных уровнях возбуждения.

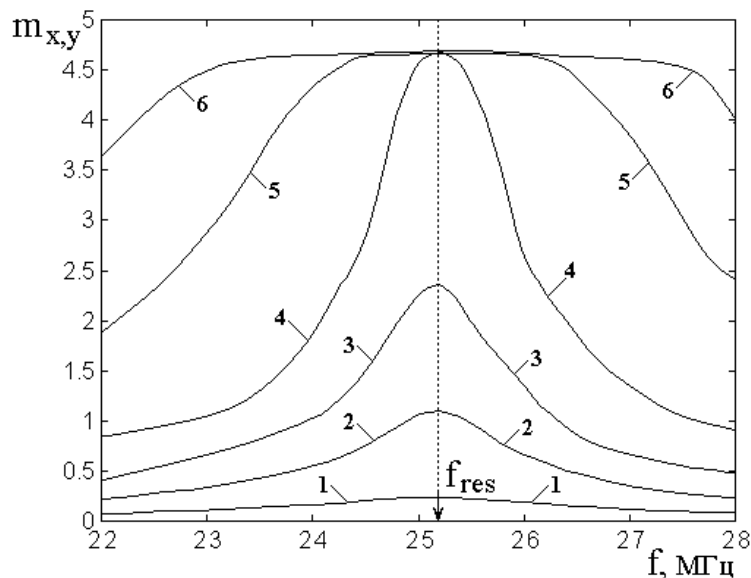


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №3 при различных уровнях переменного поля h_0 : 1 – 0,01 Э; 2 – 0,05 Э; 3 – 0,10 Э; 4 – 0,20 Э; 5 – 0,50 Э; 6 – 1,00 Э.

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $H_0 = 9$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что все характеристики имеют типичный резонансный вид с частотой резонанса $f_{res} = 25,2$ МГц. Видно также, что все кривые относительно этой частоты являются симметричными. Следует отметить, что частота резонанса здесь выше частоты предыдущего случая в такое же число раз, как и значение постоянного поля, то есть частота может быть связана с полем в виде эмпирической формулы:

$$f_{res} = 2.8 \cdot H_0, \quad (37)$$

где f_{res} выражено в МГц, а H_0 выражено в отн.ед.

Более подробное рассмотрение показывает, что и ширина линии АЧХ на половине высоты подчиняется тому же соотношению.

Замечание. Можно видеть, что коэффициент в этом выражении совпадает с традиционным значением гиромагнитной постоянной, входящей в уравнение Ландау-Лифшица – 2,8 МГц/Э, так что можно считать, что поле выражается в Э, а намагниченность в Гс. Заметим однако, что формула (37) получена чисто эмпирическим путем, так что ее обоснование требует более подробного рассмотрения.

Из рис. 8 далее видно, что характеристики 1-3 можно считать полностью линейными, характеристика 4 является промежуточной, а характеристики 5 и 6 являются сильно нелинейными.

Характерный для расстрочного механизма наклон нелинейных кривых в сторону высоких частот заметно не проявляется, однако уровень насыщения, соответствующий 4,6 отн.ед. выражен достаточно сильно. Заметим, что, как и в предыдущем случае, этот уровень соответствует максимальной длине намагниченности первой подрешетки при заданной температуре $T = 1$ отн.ед.

Таким образом, можно сделать вывод, что амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности в областях №1 и №3 в линейном и нелинейном режимах ведут себя подобным образом с учетом линейной зависимости резонансной частоты от постоянного поля.

11. Амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности в области №2

Рассмотрим теперь колебания намагниченности в области №2, то есть внутри фазовой диаграммы (рис. 3). Температура – как и выше $T = 1$ отн.ед. Остальные параметры – те же, что приведены в разделе 2.

В разделе 3 отмечены три характерных значения поля: H_A – поле начала ориентационного перехода, H_B – поле окончания ориентационного перехода, H_E – поле, при котором равновесная компонент намагниченности второй подрешетки ориентируется в плоскости пластины. Для простоты терминологии будем далее называть это поле – «центром» ориентационного перехода.

Относительно внешнего поля H_0 выделить три характерные области: первая: $H_A < H_0 < H_E$, вторая: $H_0 = H_E$, третья: $H_E < H_0 < H_B$. При принятых параметрах задачи (раздел 2) в случае температуры $T = 1$ эти поля имеют значения (рис. 4): $H_A = 1,9$ Э, $H_E = 3,8$ Э, $H_B = 8,4$ Э.

Располагая значения поля в пределах этих интервалов, получаем три значения поля, которых будем придерживаться в дальнейшем: $H_{01} = 2,8$ Э, $H_{02} = 3,8$ Э, $H_{03} = 7,5$ Э.,

Рассмотрим сначала заведомо линейный случай, когда амплитуда переменного поля равна $h_0 = 0,05$ Э.

Обратимся к рис. 9, где представлены амплитудно-частотные характеристики прецессии x -компоненты намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных значениях постоянного поля H_0 .

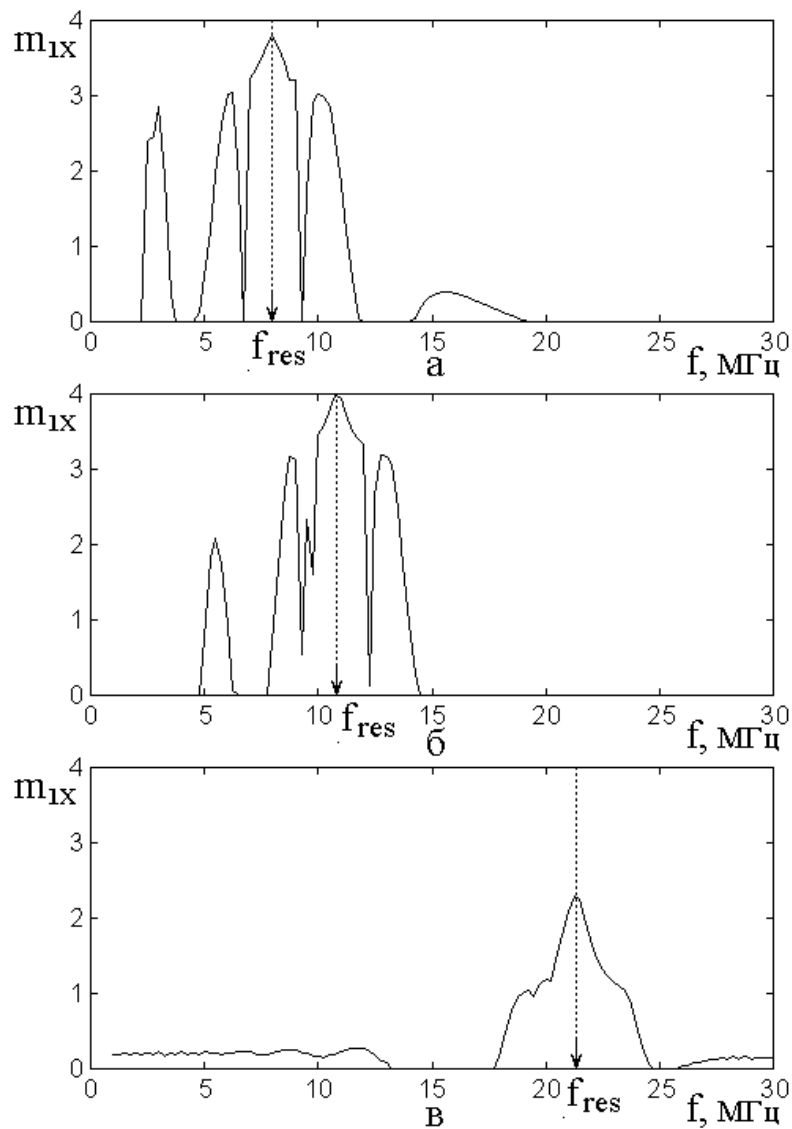


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики прецессии x -компоненты намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных значениях постоянного поля H_0 : а – 2,8 Э; б – 3,8 Э; в – 7,5 Э.

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $h_0 = 0,05$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что характер расщепления вблизи нижней границы допустимого интервала поля (рис. 9а) и на его середине (рис. 9б) примерно одинаков, однако расщепление характеристики вблизи верхней границы интервала поля (рис. 9в) почти полностью сглаживается.

Можно полагать, что основное расщепление обусловлено довольно большими значениями углов между намагниченностями подрешеток порядка 70-170 градусов, когда намагниченности каждой подрешетки прецессируют по отдельности. В то же время, при малых значениях этого угла намагниченности

подрешеток близки друг к другу, так что прецессируют как целое, в результате чего расщепление значительно сглаживается.

Проведенное рассмотрение касается только одной x -компоненты намагниченности первой подрешетки. Рассмотрим теперь векторную сумму x и y компонент намагниченности той же подрешетки, имеющую вид:

$$m_{1s} = \sqrt{m_{1x}^2 + m_{1y}^2}, \quad (38)$$

для чего обратимся к рис. 10.

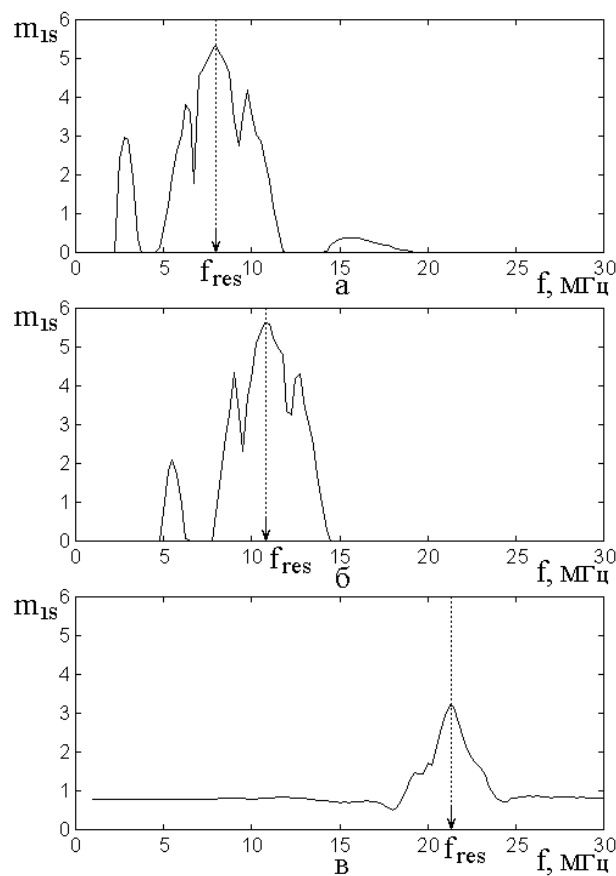


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики прецессии векторной суммы m_{1s} намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных значениях постоянного поля H_0 : а – 2,8 Э; б – 3,8 Э; в – 7,5 Э.

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $h_0 = 0,05$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что здесь изрезанность АЧХ значительно сгладилась. Так на рис. 10 провалы до нуля, наблюдаемый на рис. 9а отсутствуют, то же видно и на других рисунках. То есть здесь можно считать, что вторая

компонента намагниченности m_{1y} как бы дополняет провалы, образуемый первой компонентой намагниченности m_{1x} , характерные для рис. 9.

Более подробно можно видеть такое «дополнение» из рис. 11, где приведены амплитудно-частотные характеристики прецессии всех трех компонент намагниченности первой подрешетки при значении постоянного поля $H_0 = 3,8$ Э. Кривая 1 совпадает с кривой на рис. 9а и здесь приведена в несколько более крупном масштабе.

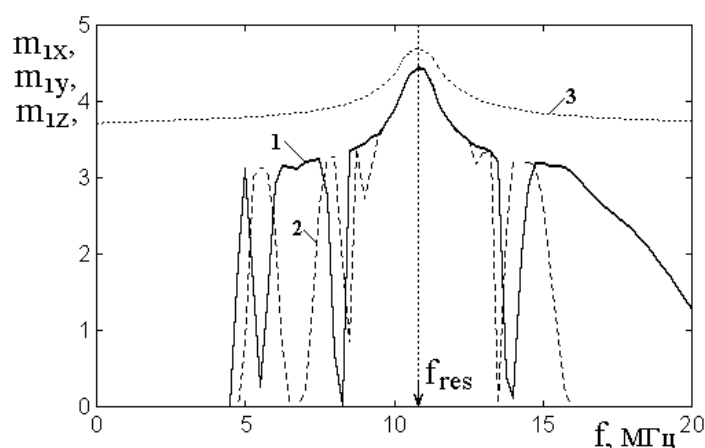


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики прецессии компонент намагниченности первой подрешетки при значении постоянного поля $H_0 = 3,8$ Э: 1 – компонента m_{1x} (сплошная линия); 2 – компонента m_{1y} (пунктир); 3 – компонента m_{1z} (точечная линия).

Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $h_0 = 0,05$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что максимумы кривой 2 в значительной степени перекрывают минимумы кривой 1, что и объясняет сглаживание кривых на рис. 10 в сравнении с рис. 9. Огибающие той и другой кривых почти совпадают, что обеспечивается единством намагниченности в целом рассматриваемой подрешетки. Примечательно отметить, что компонента m_z (кривая 3), кроме небольшого максимума на частоте резонанса, по обе стороны от этого максимума от частоты не зависит. Можно полагать, что такая независимость обеспечивается постоянством отклонения равновесного положения намагниченности от оси Oz , которое задается значением приложенного постоянного поля.

12. Замечание о роли обменного взаимодействия

Проведенное рассмотрение показывает, что амплитудно-частотные характеристики колебаний первой подрешетки в области №2 имеют значительно изрезанный характер. Проверка показывает, что характер колебаний второй подрешетки также имеет сильную изрезанность.

Такое поведение в классической теории колебаний, по-видимому, достаточно простой интерпретации не имеет. В то же время, система в целом, по-существу, являет собой совокупность двух колебательных систем – первой и второй подрешеток, связанных между собой обменным взаимодействием. При этом на колебания первой подрешетки оказывает сильное влияние присутствие второй подрешетки, представляющей собой как бы возбуждающую силу. В таком же отношении вторая подрешетка находится относительно первой. В то же время, кроме этих взаимных возбуждающих сил на обе подрешетки действует общее возбуждающее переменное поле. То есть имеется как бы несколько возбуждений, действующих на ту и другую части системы.

Можно полагать, что одновременное воздействие нескольких возбуждений приводит к их сложению интерференционного характера. При этом совпадение по фазе нескольких возбуждений приводит к увеличению воздействия, а их противофазный характер – к подавлению суммарного воздействия. При этом такое противофазное воздействие приводит к провалам амплитудно-частотных характеристик, наблюдаемым на предыдущих рисунках.

Таким образом, в качестве возбуждения присутствует не только внешнее переменное поле, но и независимый фактор обменного характера, то есть одна подрешетка действует на другую через посредство обменного взаимодействия. Можно полагать, что уменьшение такого взаимодействия должно привести к колебаниям каждой из подсистем по отдельности, а увеличение – к еще более сильному обобщению колебаний единой системы. Для подтверждения или опровержения такого предположения рассмотрим далее вид АЧХ обеих подрешеток при изменении обменного взаимодействия между ними.

13. Вариация обменного взаимодействия

Обратимся к рис. 12, где приведены амплитудно-частотные характеристики прецессии x и y -компонент намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных значениях параметра обменного взаимодействия Λ

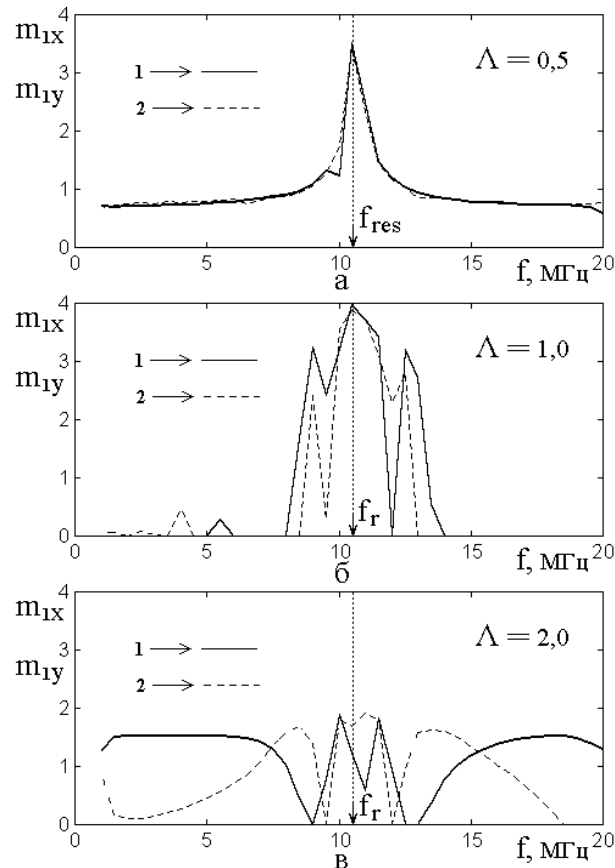


Рис. 12. Амплитудно-частотные характеристики прецессии x , y -компонент намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных значениях параметра обменного взаимодействия Λ : а – 0,5; б – 1,0 в – 2,0.

Параметры: $H_0 = 3,8$ Э; $T = 1$ отн.ед.; $h_0 = 0,05$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рис. 12а видно, что при малом обменном взаимодействии первая подрешетка колеблется точно на частоте резонанса, причем ее АЧХ представляет собой одну единственную достаточно узкую резонансную линию без заметных следов расщепления (небольшой зигзаг слева – незначителен, так что им можно пренебречь). Таким образом, можно считать, что здесь колебания первой подрешетки возбуждаются только переменным полем, а влияние второй

подрешетки незначительно, То есть здесь первая подрешетка колеблется как бы независимо от второй и ее АЧХ определяется только ее собственными свойствами без заметного влияния связи со второй подрешеткой.

Из рис. 12б видно, что увеличение параметра обменного взаимодействия приводит к значительному расширению АЧХ, в том числе, к появлению нескольких глубоких провалов. То есть здесь влияние второй подрешетки сказывается весьма значительно, а появление провалов можно интерпретировать на основе механизма интерференционного характера. Система колеблется как целое, причем характер колебаний определяется взаимным влиянием обеих подрешеток.

Дальнейшее увеличение обменного взаимодействия иллюстрируется рис. 12в. Здесь основная часть АЧХ несколько сужается, причем в обе стороны от центра появляются большие «крылья», которые соответствуют положению намагниченности первой подрешетки вблизи равновесного положения относительно плоскости пластины (около 45 градусов). Таким образом, здесь система становится настолько жесткой, что колебания в целом определяются только первой подрешеткой, которая как бы «водит» за собой вторую. При этом вторая подрешетка является как бы «балластом» для первой, теряет свою индивидуальность и АЧХ определяется колебаниями именно первой подрешетки.

Проверка показывает, что дальнейшее увеличение параметра обменного взаимодействия приводит к еще большему сужению АЧХ первой подрешетки, так что ее АЧХ сливается в единую линию, подобную приведенной на рис. 12а.

Рассмотрим теперь в тех же условиях формирование АЧХ колебаний второй подрешетки. Обратимся к рис. 13, где приведены амплитудно-частотные характеристики прецессии x , y -компонент намагниченности второй подрешетки в области №2 при различных значениях параметра обменного взаимодействия Λ

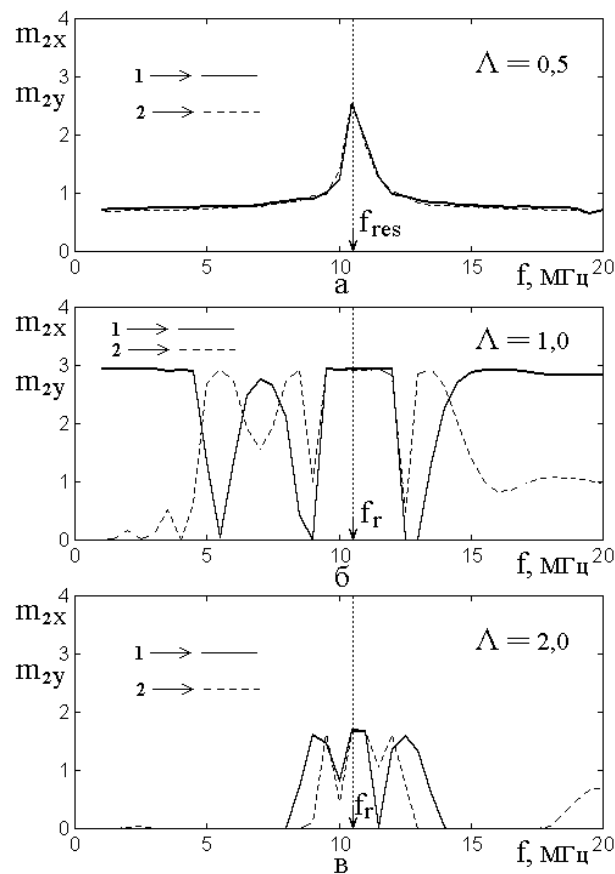


Рис. 13. Амплитудно-частотные характеристики прецессии x , y -компонент намагниченности второй подрешетки в области №2 при различных значениях параметра обменного взаимодействия Λ : а – 0,5; б – 1,0; в – 2,0.

Параметры: $H_0 = 3,8$ Э; $T = 1$ отн.ед.; $h_0 = 0,05$ Э.

Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка в целом можно видеть, что характер АЧХ, в основном, подобен таковому для первой подрешетки (рис. 12).

Из рис. 13а видно, что при малом обменном взаимодействии АЧХ имеет вид единственной линии такого же вида, как на рис. 12а. Положение по частоте этой линии определяется тем, что частота резонанса задается значением приложенного поля, которое для обеих подрешеток одно и то же ($H_0 = 3,8$ Э). Единство линии означает, что вторая подрешетка колеблется здесь независимо от первой.

При среднем обменном взаимодействии (рис. 13б) АЧХ значительно расширяется, приобретая множество провалов, то есть ее поведение подобно таковому для первой подрешетки (рис. 12б).

При сильном обменном взаимодействии (рис. 13в) АЧХ значительно сужается, концентрируясь в окрестности основной линии, причем здесь сужение выражено даже сильнее, чем на рис. 12в, что говорит о потере индивидуальности второй подрешетки почти полностью.

Проверка показывает, что при дальнейшем увеличении параметра обмена АЧХ второй подрешетки еще более сужается, обращаясь в единую линию, подобную таковой на рис. 13а.

Таким образом, можно видеть, что наиболее сильное влияние решеток друг на друга через обменное взаимодействие происходит при среднем значении параметра обмена $\Lambda = 1,0$, когда обе подрешетки взаимодействуют наравне друг с другом, обеспечивая формирование широкой АЧХ со множеством провалов интерференционного характера.

При меньшем (в два раза и менее) значении параметра обмена обе подрешетки колеблются почти независимо друг от друга, а при большем (в два раза и более) обе подрешетки колеблются как единое целое, в обоих случаях обеспечивая формирование АЧХ в стремлении к единой узкой линии.

14. Высокий уровень возбуждения

Проведенное в разделах 11-13 рассмотрение выполнено при сравнительно невысоком уровне возбуждения ($h_0 = 0,05 \text{ Э}$), когда колебания намагниченностей обеих подрешеток можно было считать близкими к линейным. Рассмотрим теперь формирование АЧХ при высоком уровне возбуждения. Проверка показывает, что основные характеристики АЧХ обеих подрешеток в этом случае являются сходными, поэтому ограничится рассмотрением колебаний x -компоненты намагниченности первой подрешетки.

Обратимся к рис. 14, где показаны амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных уровнях переменного поля h_0 .

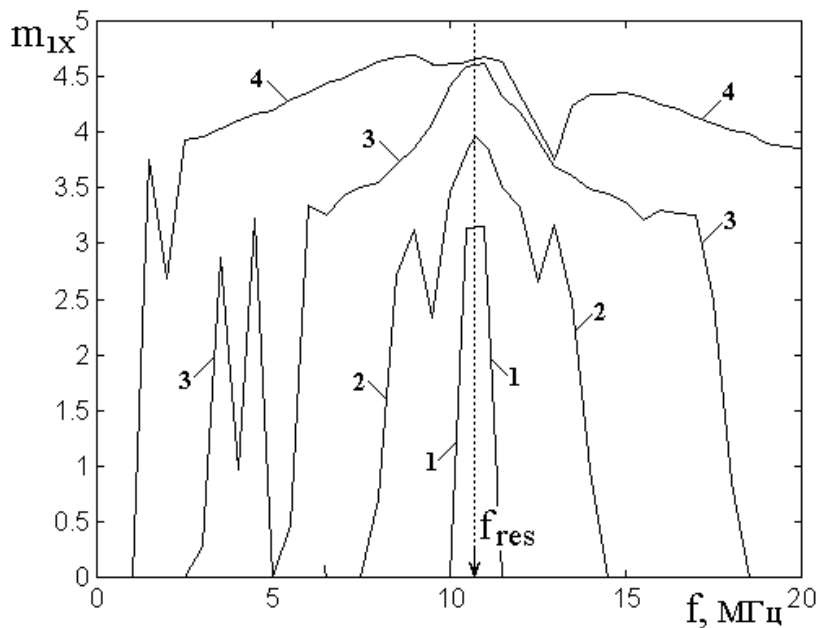


Рис. 14. Амплитудно-частотные характеристики прецессии намагниченности первой подрешетки в области №2 при различных уровнях переменного поля h_0 :
 1 – 0,01 Э; 2 – 0,05 Э; 3 – 0,20 Э; 4 – 1,00 Э.
 Параметры: $T = 1$ отн.ед.; $H_0 = 3,8$ Э.
 Остальные параметры приведены в разделе 2.

Из рисунка видно, что все АЧХ имеют довольно симметричный вид относительно основной резонансной частоты $f_{res} = 10,64$ МГц, определяемой внешним полем в соответствии с формулой (37).

При низком уровне возбуждения ($h_0 = 0,01$ Э, кривая 1) ФЧХ представляет собой единственную узкую линию шириной около 1 МГц. При увеличении уровня возбуждения в пять раз ($h_0 = 0,05$ Э, кривая 2) ширина линии увеличивается также в пять раз до 5 МГц, а амплитуда кривой возрастет на 20 %. Линия остается достаточно цельной, однако по краям появляются небольшие отщепления, минимумы которых остаются на довольно высоком уровне, так что уменьшение амплитуды составляет не более 20 %).

Дальнейшее увеличение уровня возбуждения в четыре раза ($h_0 = 0,20$ Э, кривая 3) приводит также к расширению АЧХ, однако теперь без учета отщепления только в два раза, а при учете отщепления – в три раза, то есть расширение в любом случае замедляется. Максимум АЧХ возрастает еще на 20 %, достигая максимального уровня 4,6, определяемого максимальным

(при $T = 1$) значением намагниченности первой подрешетки. Здесь однако расщепление проявляется очень сильно, так что слева отщепляется значительная часть АЧХ шириной около 2 МГц, в свою очередь расщепленную надвое, причем провал на частоте около 5 МГц происходит до нуля.

Увеличение уровня возбуждения еще в два раза ($h_0 = 1,0$ Э, кривая 4) приводит к дальнейшему расширению АЧХ почти в два раза, амплитуда остается на максимуме, однако расщепление почти полностью исчезает (за правым краем рисунка кривая 4 спадает до нуля на частоте около 22 МГц).

Таким образом, в целом, увеличение уровня возбуждения приводит к значительному, близкому к пропорциональному расширению АЧХ, а также к увеличению амплитуды колебаний до максимума, определяемого максимальным значением намагниченности при заданной температуре. При этом тенденция к расщеплению сначала возрастает, а пройдя через максимум, убывает, приводя к полному его отсутствию.

15. Некоторые замечания о возможном развитии работы

Приведем некоторые замечания о возможном развитии работы. В настоящей работе выполнено предварительное рассмотрение вынужденной динамики намагниченностей двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. Исследование выполнено в ограниченных рамках, только при температуре ниже компенсации. Важной задачей является проверка полученных данных в более широком интервале температур, в том числе равной и выше температуры компенсации.

Характер работы, в основном, отражает наблюдаемые факты без подробной их количественной интерпретации. В этом плане важнейшей задачей можно считать построение векторной модели, описывающей на геометрическом уровне поведение векторов намагниченностей обеих подрешеток как в линейном, так и в нелинейном режимах.

Возможной задачей является построение потенциальной модели колебаний намагниченностей обеих подрешеток на основе эквивалентной

системы двух связанных осцилляторов, подобной рассмотренной в монографии [34]. Можно полагать, что такое рассмотрение позволит не только интерпретировать наблюдаемые явления на более простой математической основе, но и стимулировать поиск новых явлений, в том числе нестационарного и хаотического характера.

Рассматриваемая здесь задача выполнена с использованием модельных параметров намагниченностей подрешеток, принятых в работах [28,32]. В качестве важного шага можно считать обращение к конкретным параметрам материалов, наблюдаемым в экспериментах [33]. Такое рассмотрение может не только интерпретировать ряд наблюдаемых фактов, но и стимулировать постановку дополнительных экспериментов с целью поиска новых физических закономерностей.

Заключение

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему.

1) Главным предметом рассмотрения в настоящей работе является динамика вынужденных колебаний намагниченности в пределах фазовой диаграммы двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации, причем основными результатами являются амплитудно-частотные характеристики рассматриваемых процессов. Выполнен краткий обзор предшествующих работ, сформулирована постановка задачи и приведены основные алгоритмы исследования. Особое внимание уделено методу динамического установления и решению системы уравнений динамики намагниченности двухподрешеточного ферримагнетика.

2) Приведена общая геометрия задачи, представляющая собой нормально намагниченную тонкую пластину. Приведены зависимости намагниченностей подрешеток от температуры. На их основе построена фазовая диаграмма, связывающая постоянные поля ориентационных переходов намагниченностей с их температурой.

3) В рамках фазовой диаграммы при заданной температуре отмечены три характерные области значений поля. Область №1 – лежит ниже нижней ветви диаграммы. В этой области намагниченности обеих подрешеток ориентированы параллельно и направлены в противоположные стороны под углом в 180 градусов. Область №2 – лежит между нижней и верхней ветвями диаграммы. В этой области намагниченности подрешеток составляют друг с другом угол, меньший 180 градусов. Область №3 – лежит выше верхней ветви диаграммы. В этой области намагниченности обеих подрешеток параллельны друг другу и ориентированы в одном направлении, угол между намагниченностями равен нулю.

4) Рассмотрены зависимости компонент намагниченностей подрешеток от поля при постоянной температуре, меньшей температуры компенсации. Показано, что при увеличении поля ориентации намагниченностей подрешеток последовательно проходят три стадии, соответствующие областям диаграммы №1-№3: встречная ориентация вдоль поля, угловая ориентация относительно друг друга и однонаправленная ориентация вдоль поля.

5) Приведен общий математический аппарат решения задачи. Отмечено, что в рамках настоящей работы решаются две задачи. Первая задача – нахождение равновесного состояния намагниченностей подрешеток. Эта задача решается методом установления. Вторая задача – нахождение нелинейных колебаний намагниченности в условиях равновесия, решаемая методом Рунге-Кутты. Отмечено, что для решения обеих этих задач используется система связанных уравнений движения намагниченности в режиме установления, а также в режиме вынужденных колебаний.

6) Рассмотрены колебания намагниченностей подрешеток при их параллельной ориентации, соответствующие областям №1 и №3 фазовой диаграммы. Получены соответствующие развертки колебаний по времени, построены прецессионные портреты, а также приведены амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченностей той и другой подрешеток. Показано, что в обоих этих случаях колебания намагниченностей подрешеток

происходят подобным образом, причем в первой области колебания противофазны, а в третьей – синфазны. Показано, что амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности в областях №1 и №3 в линейном и нелинейном режимах ведут себя подобным образом с учетом линейной зависимости резонансной частоты от постоянного поля.

7) Рассмотрены амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченностей подрешеток в области №2 фазовой диаграммы. Установлено, что основные области подъемов характеристик по огибающей имеют характер, близкий к резонансному, причем частоты главных максимумов, в основном, подчиняются линейной прямо пропорциональной зависимости от поля. Показано, что резонансные характеристики, в отличие от таковых в областях №1 и №3, сильно дискретизированы, то есть расщеплены на несколько более узких линий.

8) Отмечено, что в формировании амплитудно-частотных характеристик важнейшую роль играет обменное взаимодействие между намагниченностями подрешеток. Показано, что систему в целом можно рассматривать как совокупность двух колебательных систем, связанных обменным взаимодействием. При этом на каждую подсистему действуют две возбуждающие силы – первая – от внешнего переменного поля и вторая – от поля, создаваемого другой подрешеткой через обменное взаимодействие. Таким образом, амплитудно-частотная характеристика для каждой подрешетки формируется под действием двух возбуждающих воздействий, интерференционное взаимодействие между которыми приводит к изрезанности амплитудно-частотной характеристики в целом.

9) Выполнена вариация обменного взаимодействия между намагниченностями обеих подрешеток. Показано, что при малом значении параметра обменного взаимодействия обе подрешетки колеблются почти независимым образом, так что амплитудно-частотная характеристика состоит из единственной линии, отвечающей резонансу той или другой подрешетки. При среднем значении параметра обменного взаимодействия колебания обеих

подрешеток в значительной степени зависят друг от друга, что и приводит к формированию общей характеристики, имеющей изрезанный характер. При большом значении параметра обменного взаимодействия намагниченности обеих подрешеток жестко связаны друг с другом, так что амплитудно-частотная характеристика формируется их общим движением и имеет вид единой довольно узкой линии, по мере увеличения обмена, имеющей тенденцию к сужению.

10) Рассмотрено формирование амплитудно-частотных характеристик при увеличении уровня возбуждения. Показано, что увеличение возбуждения приводит к значительному, близкому к пропорциональному расширению характеристик, а также к увеличению амплитуды колебаний до максимума, определяемого максимальным значением намагниченности при заданной температуре. При этом тенденция к расщеплению сначала возрастает, а пройдя через максимум, убывает, приводя к полному его отсутствию.

11) Приведены некоторые замечания о возможном развитии работы. В качестве возможных задач отмечены следующие: формирование амплитудно-частотных характеристик при температуре выше компенсации; разработка векторной и потенциальной моделей, а также модели из двух связанных осцилляторов; рассмотрение задачи при параметрах реальных материалов.

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

Литература

1. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики. – М.: Мир. 1965.
2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука. 1973.
3. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. – М.: Физматлит. 1994.
4. Курушин Е.П., Нефедов Е.И. Применение тонких монокристаллических пленок ферритов в устройствах СВЧ микроэлектроники. // Микроэлектроника. 1977. Т.6. №6. С.549-561.
5. Гласс Х.Л. Ферритовые пленки для СВЧ-устройств. // ТИИЭР. 1988. Т.76. №2. С.64-72,
6. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Магнитостатические волны в неоднородных полях. – М.: Физматлит. 2016.
7. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Магнитостатические и электромагнитные волны в сложных структурах. – М.: Физматлит. 2017.
8. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Ферромагнитный резонанс в условиях ориентационного перехода. – М.: Физматлит. 2018.
9. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамика намагниченности в условиях изменения ее ориентации. – М.: Физматлит. 2019.
10. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Спиновые волны в средах с обменом и диссипацией. – М.: Физматлит. 2021.
11. Романова И. Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies. // Электроника НТБ. 2014. №8.
12. Лисовский Ф.В. Физика цилиндрических магнитных доменов. – М.: Сов.Радио. 1979.
13. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. – М.: Мир. 1982.
14. Kikuchi E. The ultra-sound converters. – М.: Mir. 1972.

15. Голямина И.П. Магнитострикционный преобразователь // В кн: Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Гл. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия. 1979. С.196-200.
16. Голямина И.П. // Магнитострикционные излучатели из ферритов. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Кн.1. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука. 1967.
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. Власов В.С., Голов А.В., Котов Л.Н., Щеглов В.И., Ломоносов А.М., Темнов В.В. Современные проблемы сверхбыстрой магнитоакустики. // АЖ (Акустический журнал). 2022. Т.68. №1. С.22-56.
20. 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.
21. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. – М.: Наука. 1979.
22. Clark A.E., Callen E. Neel ferromagnets in large magnetic fields. // J. Appl. Phys. 1968. V.39. №13. P.5972-5082.
23. Горанский Б.П., Звездин А.К. О развороте подрешеток ферримагнетика в магнитном поле. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т.10. С.196-200.
24. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. Часть 1. Фазовая диаграмма. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.2>
25. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Алгоритм определения намагниченностей подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. Часть 2. Степенное приближение. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.3>

26. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Фазовая диаграмма двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации в присутствии одноосной анизотропии. // Журнал радиоэлектроники. 2025. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.1>
27. Коледов В.В., Суслов Д.А., Щеглов В.И. Влияние анизотропии на фазовую диаграмму двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. // Журнал радиоэлектроники. 2025. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.4>
28. Суслов Д.А., Щеглов В.И. Применение метода динамического установления для построения фазовой диаграммы двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. // Журнал радиоэлектроники. 2025. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.11>
29. Антонов Л.И., Терновский В.В., Хапаев М.М. О расчете периодических доменных структур в ферромагнитных материалах. // ФММ. 1989. Т.67. №1. С.57-61.
30. Антонов Л.И., Лукашева Е.В., Миронова Г.А., Скачков Д.Г. Динамическое установление равновесного периода в структуре намагниченности ферромагнитных пленок. // ФММ. 2000. Т.90. №3. С.5-11.
31. Антонов Л.И., Жукарев А.С., Поляков П.А., Скачков Д.Г. Поле вектора намагниченности одноосной ферромагнитной пленки. // ЖТФ. 2004. Т.74. №3. С.83-84.
32. Суслов Д.А., Щеглов В.И. Фазовая диаграмма двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации в присутствии анизотропии, размагничивания и неоднородного обмена. // Журнал радиоэлектроники. 2026. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.6>
33. Суслов Д.А., Щеглов В.И. Влияние анизотропии и обменного взаимодействия на фазовую диаграмму тонкой пленки из двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации. // Журнал радиоэлектроники. 2026. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.7>

34. Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамический хаос в системе из двух связанных осцилляторов. – М.: Физматлит. 2025.

Для цитирования:

Суслов Д.А., Щеглов В.И. Амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний намагниченности в пределах фазовой диаграммы двухподрешеточного ферримагнетика с точкой компенсации // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.5>