

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Кафедра нелинейной физики

**Волновые процессы в антиферромагнетиках с лёгкой осью анизотропии
при различных направлениях постоянного магнитного поля**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса магистратуры 214 группы

направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

Факультета Нелинейных Процессов

Шевченко Елизаветы Дмитриевны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор кафедры

нелинейной физики _____ Ю. П. Шараевский

Зав. кафедрой нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент _____ Е.Н Бегинин

Саратов 2020 г.

Введение.

Исследование антиферромагнитных материалов в последнее время активно развивается[1-8]. Антиферромагнетики являются важнейшим классом в магнитоупорядоченных веществах. Магнитный порядок в АФМ позволяет рассмотреть вместе в одном устройстве преимущества и электроники(производительность, простота в обращении), и спинтроники (высокая чувствительность, низкое потребление энергии)[8]. По сравнению с ферромагнетиками, у которых обменное взаимодействие вызывает параллельную ориентацию магнитных моментов, антиферромагнетики – вещества, у которых при наличии магнитного упорядочения (в отсутствие магнитного поля) спонтанный магнитный момент очень мал[9].

Одной из интересных тем в настоящее время является создание «магнитной памяти» на основе антиферромагнетиков, которое происходит за счёт чередования магнитных моментов. В этом случае общий магнитный момент может «занулиться» и благодаря этому можно кодировать и шифровать[1].

Антиферромагнитные (АФМ) материалы представляют особый интерес ещё и тем, что волны возбуждаются при небольших полях в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот, в отличие от ферромагнитных (ФМ) материалов, в которых волны возбуждаются в гигагерцовом (ГГц) диапазоне частот. На основе АФМ материалов можно создать устройства, работающие в терагерцовом диапазоне, что на несколько порядков выше, чем частотный диапазон ФМ материалов [2,4,6,8].

Целью данной работы является исследование особенностей дисперсионных характеристик магнитоэлектрических волн (МСВ) в слое антиферромагнетика (АФМ) с лёгкой осью анизотропии при различных направлениях постоянного магнитного поля.

Работа состоит из трёх основных разделов, введения и заключения. Список использованных источников включает в себя 15 наименований.

В **первом** разделе приводится краткий обзор основных свойств ферромагнетиков; рассматривается основная модель, описывающая механизм перехода парамагнетика в состояние антиферромагнетика (АФМ), а также первые экспериментальные результаты, подтверждающие существование антиферромагнитного состояния.

Второй раздел посвящён основным уравнениям магнитостатики для АФМ и рассматривается тензор намагниченности $\vec{\mu}$.

В **третьем** разделе описаны особенности дисперсионных характеристик магнитостатических волн (МСВ) в плоском слое АФМ при различных направлениях постоянного магнитного поля.

В **заключении** приводятся выводы и основные результаты работы.

Основное содержание работы.

1. Антиферромагнетики и их магнитные свойства.

Антиферромагнетики – это вещества, в которых упорядочение элементарных магнитных моментов носит такой характер, что спонтанный (возникающий в отсутствие внешнего магнитного поля) магнитный момент элементарной ячейки и, следовательно, любой макроскопической области равен нулю или имеет небольшую, по сравнению с суммой элементарных моментов, величину. Антиферромагнетизм – это одно из магнитных состояний вещества, при котором магнитные моменты соседних частиц вещества ориентированы навстречу друг другу, то есть антипараллельно, и поэтому намагниченность тела в целом очень мала. Этим антиферромагнетики отличаются от ферромагнетиков, в которых одинаковая ориентация элементарных магнитных моментов приводит к высокой намагниченности тела. [12,13]

1.1 Переход парамагнетиков в состояние антиферромагнетиков.

В начале 30-х гг. 20 в. по магнитным свойствам все вещества делили на 3 группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Антиферромагнетик был открыт при изучении свойств парамагнетиков при низких температурах. Парамагнетики в магнитном поле намагничиваются так, что направление намагниченности совпадает с направлением поля. Намагниченность I пропорциональна напряжённости H магнитного поля: $I = \chi * H$. Коэффициент пропорциональности χ - магнитная восприимчивость. По закону Кюри: $\chi = C/T$ — где T — абсолютная температура, C — константа вещества (константа Кюри). У парамагнетиков χ весьма мал — от 10^{-5} до 10^{-6} единиц СГС.

1.2 Модель Ландау и Нееля.

В 1930-х гг. идея антиферромагнитного упорядочения элементарных магнитных моментов вещества была выдвинута независимо советским физиком Л. Д. Ландау и французским физиком Л. Неель. Неель выдвинул предположение существования «шахматной» структуры, в которой каждый момент имеет в качестве всех ближайших соседей моменты, направленные в противоположную сторону. Ландау предложил модель антиферромагнетика, в которой чередуются слои моментов, направленных в противоположные стороны[12].

1.3 Результаты экспериментального исследования.

Долгое время не существовало экспериментальных методов, которые могли бы непосредственно подтвердить существование антиферромагнитной структуры. В 1949 методом нейтронографии удалось более полно изучить антиферромагнитную структуру. Метод заключается в том, что нейтроны не имеют электрического заряда, но обладают магнитным моментом. Проходящий через антиферромагнетик пучок медленных нейтронов взаимодействует с магнитными ионами вещества и испытывает рассеяние. Экспериментально получаемая зависимость числа рассеянных нейтронов от угла рассеяния определяет расположение магнитных ионов и среднее значение их магнитных моментов в антиферромагнетике[13].

2. Основные уравнения магнитостатики. Тензор магнитной проницаемости для антиферромагнетиков.

Для вывода дисперсионных уравнений для магнитостатических волн (МСВ) используется система уравнений Максвелла для переменных

электрических и магнитных полей. В магнитоэлектростатическом приближении уравнения Максвелла для переменных частей векторов индукции \vec{b} , магнитного поля \vec{h} записываются в виде [10]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{b} &= \operatorname{div} \overline{\overline{\mu}} \vec{h} = 0, \\ \operatorname{rot} \vec{h} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{b} – вектор магнитной индукции, \vec{h} – вектор магнитного поля, $\vec{b} = \overline{\overline{\mu}} \vec{h}$, $\overline{\overline{\mu}}$ – тензор магнитной проницаемости.

Одним из главных отличий антиферромагнитных материалов от ферромагнитных, помимо диапазона частот, в которых они используются, является тензор магнитной проницаемости $\overline{\overline{\mu}}$. Для антиферромагнетиков тензор $\overline{\overline{\mu}}$ имеет вид [8]:

$$\overline{\overline{\mu}} = \begin{vmatrix} \mu(\omega) & i\mu_a(\omega) & 0 \\ -i\mu_a(\omega) & \mu(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

где компоненты тензора имеют вид:

$$\mu = 1 + 8\pi\gamma^2 M_0 H_a \frac{\omega_+ \omega_- - \omega^2}{(\omega_+^2 - \omega^2)(\omega_-^2 - \omega^2)}, \quad (3)$$

$$\mu_a = 8\pi\gamma^2 M_0 H_a \frac{\omega(\omega_- - \omega_+)}{(\omega_+^2 - \omega^2)(\omega_-^2 - \omega^2)}. \quad (4)$$

В соотношениях (3) и (4) γ – усреднённый g-фактор, M_0 – усреднённая статическая намагниченность подрешёток, H_a – поле анизотропии, $\omega_+ := \gamma(H_c + H_0)$, $\omega_- := \gamma(H_c - H_0)$ – резонансные частоты, $H_c = \sqrt{H_a(2H_e + H_a)}$ – поле «опрокидывания» подрешёток, H_e – поле однородного обменного взаимодействия между подрешётками.

Зависимости компонент тензора μ и μ_a от частоты на основе соотношений (3), (4) представлены на рис.2.

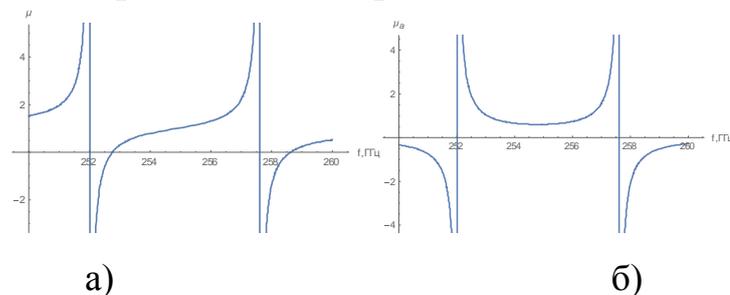


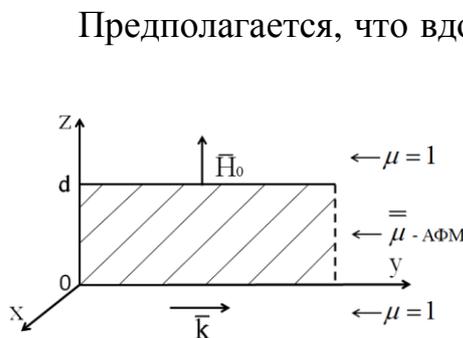
Рис.2. а) компонента тензора μ , б) компонента тензора μ_a : $M_0 = 0.560$ кГс, $H_0 = 1$ кЭ; $H_E = 515$ кЭ; $H_A = 8$ кЭ; $H_c = 91$ кЭ; $\gamma = 2.8$ ГГц/кЭ.

Как видно из Рис.2 в компонентах тензора μ и μ_a существуют две резонансные частоты ω_+ и ω_- , в которых значения μ и μ_a стремятся к бесконечности.

3.Спектр волн в антиферромагнитной структуре. Расчет дисперсионных характеристик.

3.1.Магнитное поле направлено по нормали к поверхности слоя.

В данном разделе рассматривается структура, представляющая собой антиферромагнитный слой (АФМ) толщиной d , безграничный в направлениях x и y , постоянное магнитное поле \vec{H}_0 направлено вдоль оси z (см. Рис. 3).



Предполагается, что вдоль оси- y распространяется магнитостатическая волна с волновым вектором \vec{k} . Считаем, что антиферромагнетик с легкой осью анизотропии намагничен до насыщения внешним постоянным магнитным полем \vec{H}_0 .

Рис.3. Схема структуры АФМ.

Для решения поставленной задачи используется система уравнений Максвелла в магнитостатическом приближении (1) и магнитная проницаемость описывается тензором $\vec{\mu}$ (2).

Результаты расчетов дисперсионных кривых для случая, когда магнитное поле направлено по нормали к поверхности слоя, представлены на рис.4.

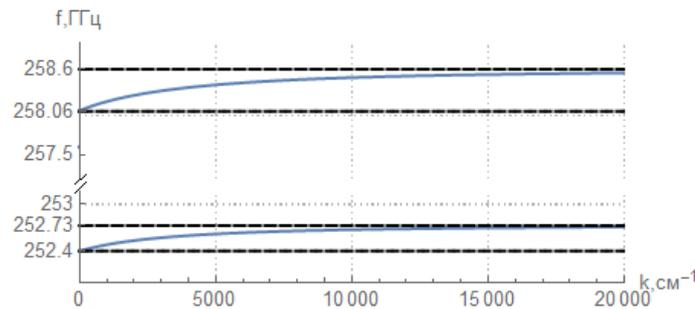


Рис. 4. Дисперсионные характеристики; $M_0 = 0.560$ кГс, $H_0 = 1$ кЭ; $H_E = 515$ кЭ; $H_A = 8$ кЭ; $H_c = 91$ кЭ; $\gamma = 2.8$ ГГц/кЭ, $d = 3$ мкм.

Из рис. 4 видно, что МСВ обладает нормальной дисперсией в низкочастотном диапазоне (от 252,4 ГГц до 252,73 ГГц) и в высокочастотном диапазоне (258.06 ГГц до 258,6 ГГц).

В рассматриваемом случае в дисперсионное уравнение входит одна компонента μ и поведение этой компоненты (рис.2) одинаково и в высокочастотном и в низкочастотном диапазоне, что приводит к существованию двух объёмных МСВ с нормальной дисперсией.

3.2 Магнитное поле направлено параллельно волновому вектору.

В данном разделе рассматривается антиферромагнитная структура, приведенная на рис.5.

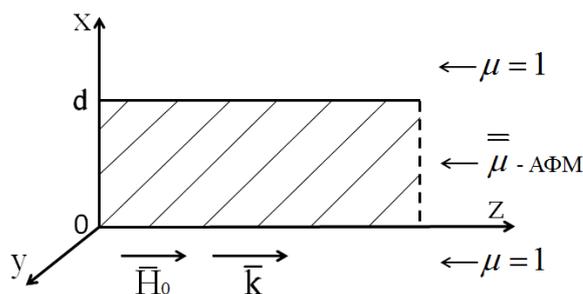


Рис. 5. Схема структуры АФМ: постоянное магнитное поле \vec{H}_0 направлено вдоль волнового вектора \vec{k} ; d – толщина слоя; волна распространяется вдоль направления z .

При рассмотрении этого случая так же используем запись уравнений Максвелла в магнитоэстатическом приближении (ф.1) и вид тензора магнитной проницаемости (ф.2).

Результаты расчетов дисперсионных кривых для этого случая, когда магнитное поле направлено параллельно волновому вектору, представлены на рис. 6.

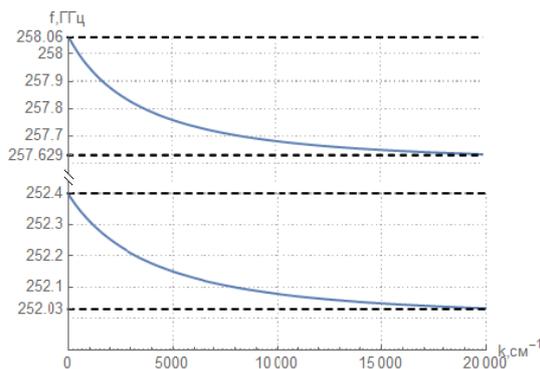


Рис. 6. Дисперсионные характеристики. ($M_0 = 0.560$ кГс, $H_0 = 1$ кЭ; $H_E = 515$ кЭ; $H_A = 8$ кЭ; $H_C = 91$ кЭ; $\gamma = 2.8$ ГГц/кЭ, $d = 3$ мкм).

В отличие от результатов, полученных в разделе 3.1, в данном случае МСВ обладает аномальной дисперсией и в низкочастотном, и в высокочастотном диапазонах. Первая ветвь, соответствующая низкочастотному диапазону, лежит в диапазоне частот от 252,04 ГГц до 252,4 ГГц. Вторая

ветвь, соответствующая высокочастотному диапазону, лежит в диапазоне частот от 257.64 ГГц до 258,06 ГГц.

Так же, как и в предыдущем случае (раздел 3.1) в дисперсионное уравнение входит одна компонента μ и поведение этой компоненты (см.рис.2) приводит к существованию двух обратных объёмных МСВ с аномальной дисперсией.

3.3 Магнитное поле направлено по касательной к поверхности слоя и по нормали относительно волнового вектора.

В данном разделе рассматривается антиферромагнитная структура, схема которой приведена на рис.7.

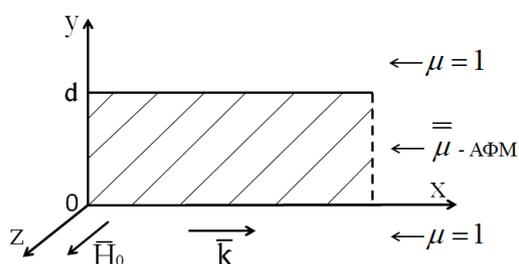


Рис. 7. Схема структуры АФМ, где \bar{k} - постоянная распространения волны; \bar{H}_0 - внешнее постоянное магнитное поле направлено по касательной к поверхности слоя и по нормали к направлению распространения волны; d - толщина слоя; волна распространяется вдоль направления x .

– толщина слоя; волна распространяется вдоль направления x .

При рассмотрении этого случая используем запись уравнений Максвелла в магнитоэстатическом приближении (ф.1) и вид тензора магнитной проницаемости (ф.2).

Результаты расчетов дисперсионных кривых в случае, когда магнитное поле направлено по касательной к поверхности слоя и по нормали относительно волнового вектора представлены на рис.8.

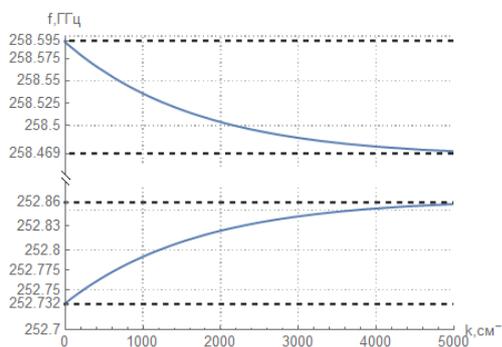


Рис. 8. Дисперсионные характеристики. ($M_0 = 0.560$ кГс, $H_0 = 1$ кЭ; $H_E = 515$ кЭ; $H_A = 8$ кЭ; $H_C = 91$ кЭ; $\gamma = 2.8$ ГГц/кЭ, $d = 3$ мкм).

Из рис.8 видно, что существует два диапазона распространения волн, дисперсионные зависимости которых соответствуют аномальной и

нормальной дисперсии. Первая ветвь лежит в диапазоне частот от 252,73 ГГц до 252,86 ГГц и имеет вид нормальной дисперсии. Вторая ветвь лежит в диапазоне частот от 258,47 ГГц до 258,59 ГГц и имеет вид аномальной дисперсии.

Вид дисперсии на дисперсионных характеристиках зависит от компонент тензора μ и μ_a , входящих в дисперсионное уравнение. Нормальной дисперсии, находящейся в низкочастотной ветке, соответствует случай, когда μ будет иметь положительные значения (рис.2), а μ_a имеет отрицательные значения (рис.2). Аномальной дисперсии, находящейся в высокочастотной ветке, соответствует случай, когда μ (рис.2) и μ_a (рис.2) имеют положительные значения. Это приводит к существованию двух поверхностных МСВ с аномальной и нормальной дисперсией.

4. Заключение

На основе системы уравнений Максвелла в магнитоэлектродинамическом приближении рассмотрены задачи, направленные на исследование особенностей волновых процессов в терагерцовом диапазоне длин волн в структурах на основе антиферромагнитного слоя при различных направлениях постоянного магнитного поля.

Получено дисперсионное уравнение и основные особенности дисперсионных характеристик магнитоэлектродинамических волн (МСВ) в структуре АФМ, когда постоянное магнитное поле направлено по нормали к поверхности слоя. Показано, что в такой структуре существует два диапазона частот при распространения волн, в которых дисперсионные зависимости соответствуют нормальной дисперсии. В этом случае в структуре распространяются прямые объёмные МСВ.

Рассмотрены особенности волновых процессов в антиферромагнитной структуре для случая, когда магнитное поле направлено параллельно волновому вектору в антиферромагнитной структуре. Показано, что в этом случае существует также два диапазона частот, в которых могут распространяться магнитоэлектродинамические волны с аномальной дисперсией, которая характерна для обратных объёмных МСВ.

Получено дисперсионное уравнение и исследованы дисперсионные характеристики для волновых процессов в антиферромагнитной структуре, когда магнитное поле направлено по касательной к поверхности слоя и по нормали относительно волнового вектора. Показано, что в этом случае в

структуре могут распространяться поверхностные МСВ с разной дисперсией: в высокочастотной полосе волновому процессу соответствует аномальная дисперсия, а в низкочастотной полосе - нормальная дисперсия.

Список использованной литературы

1. Jungwirth T., Marti X., Wadley P., Wunderlich J. // Nature Nanotechnology. 2016. V. 11. № 3. P. 231.
2. Гомонай Е.В., Локтев В.М. // Физика низких тем-ператур. 2014. Т. 40. № 17. С. 22.
3. Scholl A., Liberati M., Arenholz E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. № 24. P. 247201.
4. Khymyn R., Lisenkov I., Tiberkevich V. et al. // Sci. Reports. 2017. V. 7. P. 43705.
5. Osokin S.A., Safin A.R., Barabanenkov Y.N., Nikitov S.A. // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 465. P. 519.
6. Slavin A., Tiberkevich V. // IEEE Trans. 2009. V. MAG-45. № 4. P. 31875.
7. Yang Y., Xu Y., Zhang X.Y. et al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. № 9. P. 094402.
8. А. Ю. Шараевская, С. А. Никитов, Е. Н. Бегинин, Д. В. Калябин.
«Особенности дисперсионных характеристик поверхностных спиновых волн в связанных антиферромагнитных пленках с легкой осью анизотропии». Радиотехника и электроника. 2018.
9. Гуревич А. Г. «Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках». М.: наука. 1973.
10. Вашковский А. В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю. П.
«Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот». Издательство Саратовского университета. 1993.
11. <https://catalogmineralov.ru/cont/sign.html>
12. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. «Магнитные колебания и волны». 1994.
13. Киренский Л. В., Магнетизм, 2 изд., М., 1967; Боровик-Романов А. С., Антиферромагнетизм, в сборнике: Антиферромагнетизм и ферриты, М., 1962 (Итоги науки. Физ.-мат. науки, т. 4); Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики, М., 1965.
14. Изюмов Ю. А., Озеров Р. П., Магнитная нейтронография. М., 1966: Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971; Копчик В. А., Шубниковские группы, М., 1966.
15. Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971, с. 758.