

- сплошных сред» им. А.Г.Горшкова, Москва, МАИ, 2007.
4. Рауз Х. Механика жидкости, Изд-во литературы по строительству, М, 1967.
  5. Ляв А. Математическая теория упругости. М – Л, 1935.
  6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М, Издательство «Наука», 1980.
  7. Бабаков А.А. Численное моделирование пространственно-нестационарных течений сжимаемого газа на вычислительных комплексах параллельной архитектуры. Сборник «Фрагменты истории и достижения ИАП РАН 1986 – 2011». Изд-во ООО «Полиграфическая компания «ЭксПресс», М, 2011.
  8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика, М, 1980.
  9. Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ, М, 1986.

### **Радиоспектроскопия магнитных материалов**

д.ф.-м.н. Козлов В.И.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23 доб.13-78, [kozlov1937@mail.ru](mailto:kozlov1937@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального и теоретического исследования магнитных материалов, синтезированных для их использования в создании функциональных устройств радиоэлектроники. Наблюдался электронный парамагнитный резонанс, ферромагнитный резонанс, резонанс магнитостатических спиновых волн, нерезонансное поглощение электромагнитных волн при квазистатическом перемагничивании объектов исследования. По результатам измерения характеристик наблюдаемого физического явления вычислялись характеристики исследуемых магнитных материалов; намагниченность, константы анизотропии и др.

**Ключевые слова:** резонанс, намагниченность, анизотропия, пленка, спектр.

#### **Введение**

Магнитные материалы уже давно используются в радиотехнике. В последние десятилетия благодаря открытию большого количества новых физических эффектов в магнитных материалах их использование резко расширилось. Помимо классического ферромагнитного резонанса (ФМР), открытого Аркадьевым в 1912 г., физической основой работы функциональных радиотехнических устройств стали служить такие эффекты, как спин-волновой резонанс (СВР), резонанс магнитостатических волн (МСВ) и другие. Образцы, в которых они наблюдаются, удобно брать в виде тонких пленок, в которых скин-эффектом можно пренебречь.

В настоящей работе рассмотрены основные физические эффекты, происходящие в магнитных материалах при воздействии на них, помимо постоянного (квазистатического) магнитного поля также переменного магнитного поля, и представлены результаты их экспериментального исследования.

#### **1. Электронный парамагнитный резонанс**

В парамагнитном образце, находящемся в постоянном магнитном поле  $H_0$ , имеет место прецессия магнитных моментов атомов. Частота  $\omega_0$  этой прецессии определяется соотношением [1]

$$\omega_0 = \gamma H_0, \quad (1)$$

где:  $\gamma = ge/2mc = 2,8$  МГц/Э – магнетомеханическое отношение электрона.

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света,  $g$  – фактор (для свободного электрона равен 2). Если на образец наложить еще малое переменное поле частоты  $\omega$ , перпендикулярное постоянному полю  $H_0$ , то при приближении частоты  $\omega$  к частоте  $\omega_0$  будет иметь место резонансное изменение угла прецессии магнитных моментов атомов. В экс-

перименте обычно частота переменного поля неизменна, а меняют частоту собственной прецессии электронов  $\omega_0$ , меняя квазистатически медленно напряженность внешнего поля  $H_0$ . При обычно используемой частоте переменного поля  $f_0 = \omega_0/2\pi = 9,3$  ГГц сигнал парамагнитного резонанса наблюдается в магнитном поле  $H_0 = 3300$  Э. Радиоспектроскопия ЭПР состоит в изучении сдвигов этого сигнала или даже его расщепления вследствие особенностей структуры электронных оболочек атомов и их взаимодействия между собой. Эти эффекты слабы, сдвиги и расщепления составляют величины порядка единиц эрстед или даже долей эрстеда, но регистрируются уверенно.

## 2. Ферромагнитный резонанс

Ферромагнитный резонанс, т.е. резонанс, наблюдаемый в образцах, обладающих спонтанной намагниченностью, в качестве метода исследования магнитных пленок является исключительно информативным. Это определяется связью параметров ФМР как явления со многими самыми различными свойствами объекта исследования. Так, величина магнитного поля, при котором имеет место ФМР, сильно зависит от намагниченности образца, его анизотропии, механических напряжений в нем. Заметно проявляется неоднородность образца и др.

В ферромагнитном образце, обладающем спонтанной намагниченностью  $M$ , появляются внутренние поля, величины которых могут достигать многих тысяч эрстед.

Если образец – однородный и изотропный, имеет форму эллипсоида, то резонансное условие можно представить в виде (формула Киттеля):

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2 = [H + (N_{xx} - N_{zz})M][H + (N_{yy} - N_{zz})M]. \quad (2)$$

Здесь  $N_{xx}$ ,  $N_{yy}$ ,  $N_{zz}$  – размагничивающие факторы образца вдоль главных осей. В случае тонкой пленки размагничивающими факторами в ее плоскости, как правило, пренебрегают ввиду их малости, и тогда резонансное условие при ориентации внешнего поля в плоскости пленки («параллельная» конфигурация) приобретает вид:

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2 = H_{\parallel} (H_{\parallel} + 4\pi M), \quad (3)$$

а при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки («перпендикулярная» конфигурация):

$$\frac{\omega_0}{\gamma} = H_{\perp} - 4\pi M \quad (4)$$

Последние два соотношения представляют собой систему уравнений с двумя неизвестными,  $\gamma$  и  $M$ , на основании которых по экспериментально измеренным значениям резонансных полей  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$  можно вычислить намагниченность насыщения  $4\pi M$ .

## 3. Анизотропия

Если пленка обладает одноосной анизотропией в своей плоскости, то резонансное условие при ориентации магнитного поля в плоскости пленки имеет вид:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{\parallel} (H_{\parallel} + 4\pi M_s + H_{\text{жс}} \cos 2\varphi). \quad (5)$$

Здесь  $H_K = 2K/M_s$  – эффективное поле этой анизотропии.

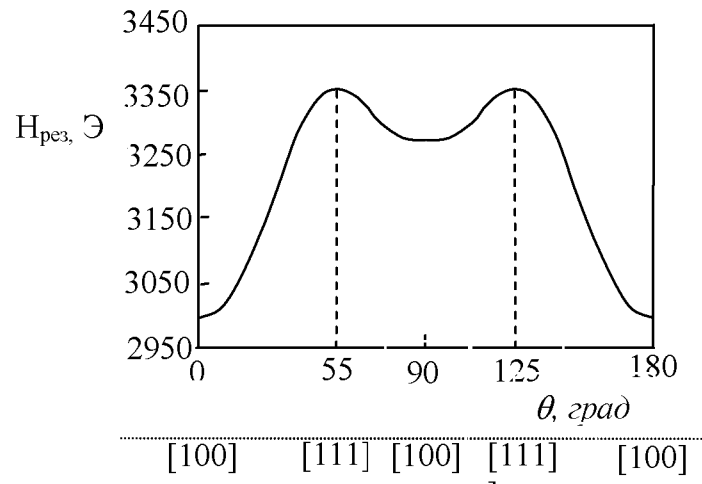
На рисунке 1 показаны угловые вариации резонансного поля в плоскости (110) для монокристаллов смешанного марганец-кобальтового феррита на частоте 9150 МГц.

В случае одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости пленки, резонансные условия принимают вид:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{\parallel} (H_{\parallel} + 4\pi M_s - H_{K_u}), \quad (6)$$

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_{\perp} - 4\pi M_s + H_{K_u}. \quad (7)$$

Здесь  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$  – магнитные поля в плоскости пленки ( $\theta = 90^\circ$ ) и перпендикулярно ей ( $\theta = 0$ ).



**Рисунок 1 – Зависимость резонансного поля от его ориентации в плоскости (100) ферритового монокристалла**

У феррито-гранатовых пленок одновременно может быть анизотропия нескольких типов: анизотропия формы, анизотропия кристаллографическая, анизотропия одноосная с осью легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости пленки и так называемая орторомбическая анизотропия.

Измерения в ходе эксперимента частоты переменного магнитного поля и резонансных полей для определенных ориентаций постоянного магнитного поля позволяют определить константы всех анизотропий, характерных для исследуемого образца. Например, для случая, когда внешнее магнитное поле  $\vec{H} \parallel [110]$  – вдоль нормали к пленке, резонансное условие имеет вид:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left(H_{110} + \frac{2K_u}{M_s} - 4\pi M_s + \frac{K_1}{M_s}\right) \left(H_{110} + \frac{2(K_u + \Delta)}{M_s} - \frac{2K_1}{M_s} - 4\pi M_s\right) \quad (8)$$

Здесь  $\vec{H}_{ijk}$  – внешнее магнитное поле,  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $K_1$  – константа кристаллографической анизотропии,  $K_u$  – константа “перпендикулярной” анизотропии,  $\Delta$  константа орторомбической анизотропии.

#### 4. Неоднородность по объему (слоистость)

Тонкие магнитные пленки с самого их появления как в качестве объектов физических исследований, так и элементов технических устройств старались получить однородными по объему. Однако тогда же пришлось столкнуться с большими трудностями получения достаточно однородных пленок.

Слоистость пленок иногда создается умышленно, поскольку именно это обстоятельство необходимо для работы функционального устройства, в состав которых они входят. На рисунке 2 показан сигнал ФМР плёнки, содержащий два пика. Характеристики этих пиков содержат информацию о магнитных свойствах слоев, с которыми можно связать эти пики [2].

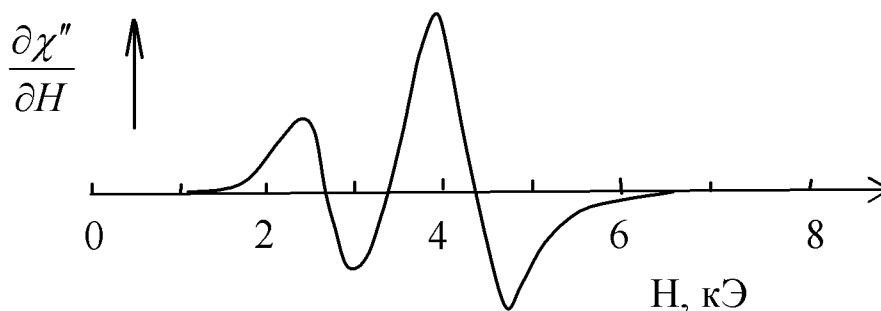


Рисунок 2 – Спектр ФМР пленки, содержащий два пика

### 5. Неоднородность по площади

Пленки больших размеров (при диаметре свыше 6 мм) невозможно поместить внутрь резонатора и их прикладывают к резонатору снаружи – к специальному отверстию в его задней или боковой стенке. При этом обеспечивается возможность необходимых манипуляций с пленками – их смещения, вращения и т.д. Удобно располагать набором резонаторов, различающихся типом, величиной отверстия и некоторыми другими рабочими параметрами.

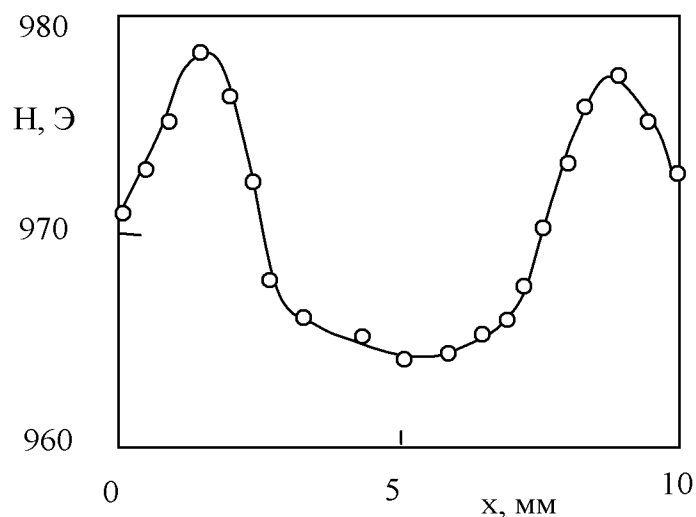


Рисунок 3 – Зависимость резонансного поля от координаты локального участка пленки

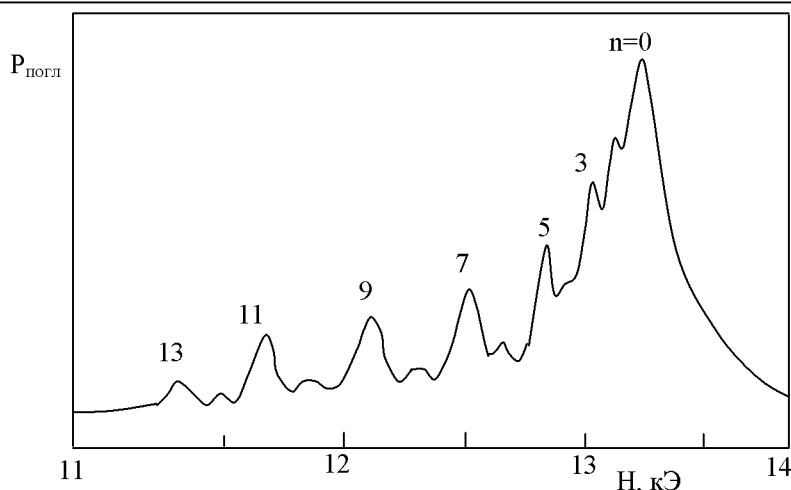
На рисунке 3 приведена зависимость резонансного поля от координаты локального участка вдоль диаметра для пленки пермаллоя толщиной 1510 ангстрем [3]. Эта пленка, как видно, весьма неоднородна: эффективное поле ООА меняется от 3.0 Э в центре до 9.0 Э на краях.

### 6. Спин волновой резонанс (СВР)

В пленках благодаря их геометрии можно наблюдать ряд специфических эффектов. Ярким их примером может служить один из гиромангнитных эффектов – резонанс стоячих спиновых волн между поверхностями пленки. Этот резонанс становится наблюдаемым, когда толщина пленки превосходит длину обменной спиновой волны, но не более чем в несколько десятков раз.

На рисунке 4 показан спин-волновой спектр пленки толщиной 3900 ангстрем при перпендикулярной ориентации постоянного магнитного поля относительно ее плоскости; числа у пиков – порядковые номера спиновых волн.

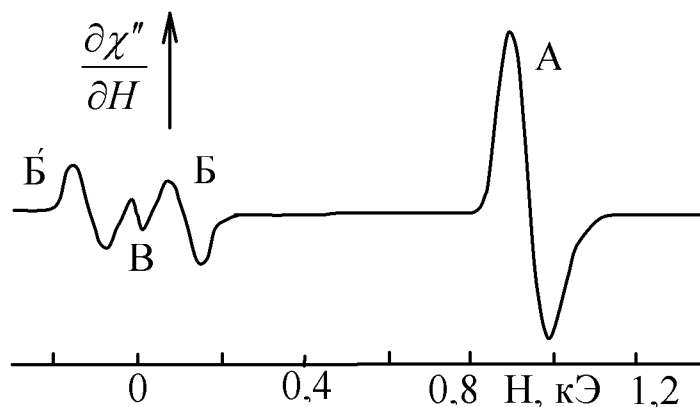
Так как в спектре видны пики, соответствующие четным значениям  $n$ , то можно утверждать, что закрепление поверхностных спинов не является полным. Об этом же свидетельствует и возбуждение однородной моды ( $n = 0$ ).



**Рисунок 4 – Спин-волновой спектр пермаллоевой пленки**

### 7. Радиочастотный сигнал при квазистатическом перемагничивании (КСП)

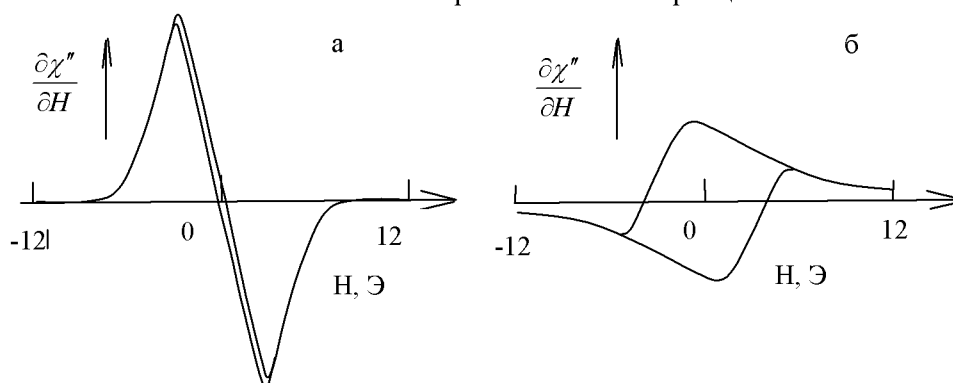
При исследовании СВР в пермалловых пленках на радиоспектрометре с двойной модуляцией поля в перпендикулярной конфигурации ( $\theta = 90^\circ$ ) были обнаружены резонансные пики, значительно удаленные от пика однородной прецессии (лежащего в поле  $\sim 1000$  Э): их резонансное поле составляло всего несколько десятков эрстед [4]. В процессе поиска таких пиков приходилось изменять магнитное поле в широких пределах, спускаясь в сторону малых полей от главного пика А вплоть до нулевого значения внешнего поля, а иногда даже переходить его (рисунок 5).



**Рисунок 5 – Спектр ФМР, записанный при изменении магнитного поля от -300 эрстед до +1300 эрстед**

При этом низкополевой пик СВР регистрировался дважды (при "положительном" и "отрицательном" значениях его резонансного поля) – пики Б и Б', а между этими его двумя "зеркальными" относительно точки  $H=0$  изображения наблюдался сильный сигнал В (рисунок 5). Этот сигнал естественно связывать с процессами перемагничивания пленки квазистатическим полем при одновременном воздействии на нее СВЧ поля  $\vec{h}_\omega$  и модулирующего поля  $\vec{h}_\Omega$ . Сигналы "перемагничивания" пленки показаны на рисунках ба и бб, где масштаб по магнитному полю значительно увеличен. Ясно видно резкое различие формы сигналов при изменении ориентации поля  $\vec{H}$  в плоскости пленки. Очевидно, что здесь мы имеем дело с нерезонансным взаимодействием пленки с модулирующим полем  $\vec{h}_\Omega$ , когда параметрическое воздействие на пленку СВЧ поля  $\vec{h}_\omega$  происходит не в условиях ФМР, а в условиях ее квазистатического перемагничивания. Из приведенных выше результатов теоретического анализа

следует, что наблюдаемый эффект может иметь место лишь в случае, когда в данной области изменения квазистатического поля СВЧ восприимчивость образца меняется.



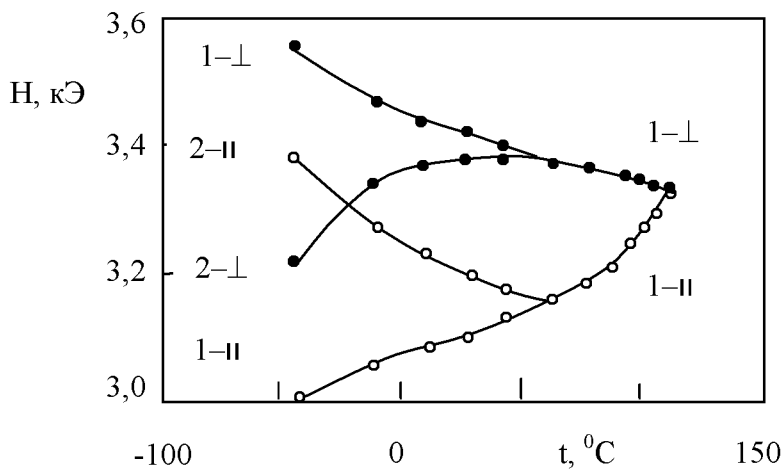
**Рисунок 6 – Сигналы, регистрируемые спектрометром при циклическом перемещении образца**

На рисунках 6а и 6б показаны сигналы, наблюдаемые на СВЧ при квазистатическом перемещении плёнки состава 79НМА толщиной 510 ангстрем на частоте 9.4 ГГц (а -  $\vec{H} \perp \text{ОЛН}$ , б -  $\vec{H} \parallel \text{ОЛН}$ )

### 8. Температурные исследования

При температурных исследованиях ЖИГ был обнаружен эффект, связанный с нарушением их гомогенности.

На рисунке 7 показана зависимость резонансных полей от температуры при ориентации внешнего поля параллельно плоскости пленки ( $\theta = 90^\circ$ ) и перпендикулярно к ней ( $\theta = 0$ ) [5].



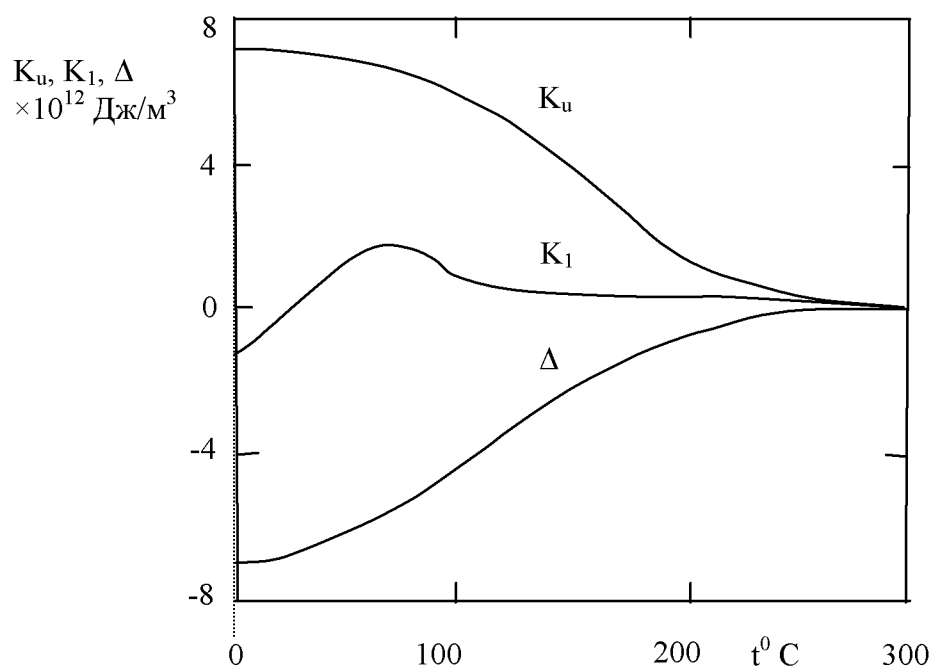
**Рисунок 7 – Температурная зависимость резонансных полей при параллельной ( $\parallel$ ) и перпендикулярной ( $\perp$ ) ориентациях внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки**

При комнатной температуре и в параллельной и в перпендикулярной конфигурациях спектр ФМР содержит единственный пик, положение которого соответствует намагниченности  $4\pi M_{\text{эфф}} = 160$  Гс. При повышении температуры намагниченность уменьшается и при  $T \approx 125^\circ\text{C}$  обращается в нуль – образец переходит в парамагнитное состояние. При понижении температуры картина существенно иная: каждый из названных пиков (при  $\theta=0$  и  $\theta=90^\circ$ ) раздваивается. Пик, имеющий большую амплитуду, ведет себя так, что это соответствует возрастанию намагниченности, а смещение малого пика, возникшего при  $T=20^\circ\text{C}$ , соответствует уменьшению эффективной намагниченности. При этом, достигнув положения, для ко-

торого  $4\pi M_{\text{эфф}} = 0$  при  $T = -45^\circ\text{C}$ , дополнительные пики, имея достаточно большую амплитуду, при дальнейшем понижении температуры продолжают сдвигаться в спектре в прежних направлениях.

Отсюда следует, что при  $T = -45^\circ\text{C}$  не достигается полная магнитная компенсация. Нулевой, очевидно, становится именно эффективная намагниченность  $4\pi M_{\text{эфф}} = 4\pi M - H_{K_u}$ , т.е. дополнительный пик связан с зарождением в образце фазы, обладающей ООА, причем связанная с нею ОЛН ориентирована вдоль нормали к пленке. Дальнейшее перемещение дополнительных пиков подтверждает эту интерпретацию: при  $T < -45^\circ\text{C}$  выполняется условие  $4\pi M < H_{K_u}$ .

Таким образом, в исследованном материале при температуре ниже  $20^\circ\text{C}$  возникает магнитная фаза, обладающая ООА. Причиной этого может быть перестройка атомной структуры ЖИГ.



**Рисунок 8 – Температурная зависимость констант одноосной  $K_u$ , ромбической  $\Delta$  и кристаллографической  $K_1$  анизотропии феррит-гранатовой плёнки**

Наблюдение ФМР в таких пленках в диапазоне температур позволяют получить информацию о температурном поведении анизотропии каждого типа (рисунок 8).

### 9. Случай каскада гиромангнитных эффектов

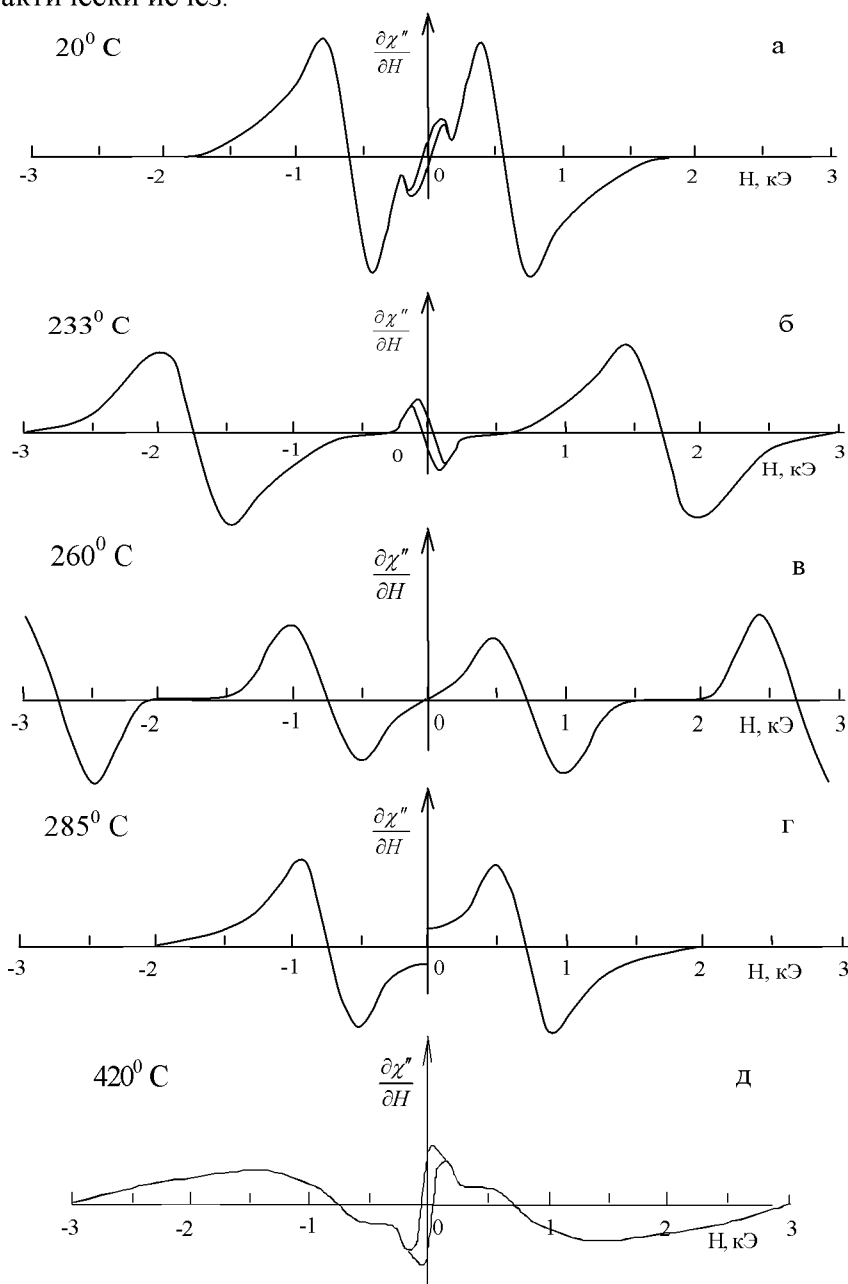
Выше уже упоминались случаи наблюдения гиромангнитных эффектов, сменяющих друг друга по мере изменения температуры образца.

В аморфных лентах системы Fe-B возникновение таких каскадов оказалось выраженным особенно сильно. Наиболее характерные явления наблюдались в лентах состава  $\text{Fe}_{87}\text{B}_{13}$  [6]. При комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ), кроме обычного сигнала ФМР в поле 730 Э (далее этот сигнал будем именовать "сигнал ФМР-1"), был виден сигнал нерезонансного взаимодействия при квазистатическом перемагничивании ("сигнал КСП-1") (рисунок 9а).

При повышении температуры до  $233^\circ\text{C}$  (рисунок 9б) сигнал ФМР-1 сдвигается в сторону больших полей (в сторону поля 3300 Э, при котором намагниченность образца должна обратиться в нуль). При этом кардинально меняется форма сигнала перемагничивания (КСП-2).

При температуре  $260^\circ\text{C}$  (рисунок 9в) сигнал ФМР-1 еще дальше сдвинулся в сторону

больших полей, но в поле  $H=700$  Э появился сигнал новой фазы (сигнал ФМР-2). При этом сигнал КСП практически исчез.



**Рисунок 9 – Сигналы, обусловленные изменением динамической восприимчивости на частоте 9.24 ГГц, при квазистатическом изменении поля в пределах  $\pm 3$  кЭ при различных температурах; образец  $\text{Fe}_{87}\text{B}_{13}$**

При температуре  $285^\circ\text{C}$  (рисунок 9г) сигнал ФМР-1 исчез, что указывает на исчезновение и магнитной фазы, с которой он был связан. Сигнал ФМР-2 практически не изменился, хотя сигнал КСП изменился весьма заметно: он стал выражать скачкообразное изменение ориентации намагниченности при перемagnetивании.

При температуре  $420^\circ\text{C}$  (рисунок 9д) сигнал ФМР-2 сильно расширился, что указывает на нарушение порядка в фазе, которой он соответствует. При этом появился сигнал КСП-3 весьма четкой формы.

#### 10. Форма резонансной линии

Информативной оказывается и форма резонансной линии. Если образец однороден по объему и эксперимент выполняется в однородных постоянном и переменном магнитных по-



лях, то резонансная линия, формально выражаемая зависимостью мнимой части комплексной магнитной восприимчивости от поляризующего магнитного поля (квазистатически «проходящего» резонансную область)  $\chi''(H)$ , должна быть лоренцевой. Ее полуширина  $\Delta H$  дает возможность определить время поперечной релаксации магнитного момента

$$T = \frac{2\pi}{\gamma \cdot \Delta H}, \quad (12)$$

а значит, и константу затухания прецессии магнитного момента

$$\alpha = \frac{\gamma \cdot \Delta H}{\omega_0}. \quad (13)$$

В некоторых материалах наблюдается асимметричная резонансная линия, и эта асимметрия содержит информацию о структуре образца.

### Заключение

Магнитные материалы широко применяются в радиотехнике. Радиоспектроскопические методы их исследования не только дают богатую информацию об их свойствах, но, наряду с этим, позволяют обнаруживать в них новые физические эффекты, которые, в свою очередь, служат физической основой создания новых функциональных устройств.

### Литература

1. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.-Наука.- 1973.- 591 с.
2. Козлов В.И. Ферромагнитный резонанс в аморфных Co-Gd пленках. II Семинар по аморфному магнетизму.-Красноярск.-1980.-Тезисы докл.-С. 80.
3. Телеснин Р.В., Козлов В.И. Локальное исследование тонких ферромагнитных пленок при параллельном намагничивании. Изв. АН СССР. Серия физ.-1966, т. 30, № 1.-С. 112-115.
4. Телеснин Р.В., Козлов В.И. Квазистатическое перемагничивание тонких ферромагнитных пленок при воздействии на них СВЧ поля. Изв. АН СССР. Серия физ.-1966, т. 30, № 1.-С. 116-119.
5. Козлов В.И., Бажажин Г.А. Температурная стабильность феррит-гранатовых пластин. Всесоюзная научно-техн. конф. "Проблемы интегральной электроники СВЧ". Лен.-д.-1984.-Тез. докл.-С. 118.
6. Kozlov V.I. Cascade of Gyromagnetic Effects in Fe-B Films.-Proceedings of Russian-Japanese Joint Seminar "The Physics and Modeling of Intelligent Materials and their Applications (PRIMA)".-Moscow.-1996.-S. 133-136.

### Наблюдаемость в задачах математической физики

к.ф.-м.н. доц. Корнейчук Л.Г., к.т.н. доц. Вискребцов В.Г.  
*Университет машиностроения*  
 (495) 223-05-23, доб. 1318

*Аннотация.* Обращается внимание на важность принципа наблюдаемости в физических науках, который означает, что гипотезы и теории должны формулироваться в терминах наблюдаемых в природе величин. Эксперимент и практика, а не мнения авторитетов являются критериями истины. Забвение этого приводит к большому, но бесплодному материальному расходу.

*Ключевые слова:* наблюдаемость, задачи математической физики, гидромеханика, виртуальность, темная энергия.

Математику уже потому учить должно,  
 что она ум в порядок приводит.  
 М.В.Ломоносов.