

УДК 537.62

©1993

## ПОВЕДЕНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ В ОКРЕСТНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ МАГНИТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

*Г.В.Арзамасцева, Ф.В.Лисовский, Е.С.Чижик*

В области температур магнитной компенсации в одноосных пленках ферритов-гранатов обнаружены особенности на температурных зависимостях статической магнитной восприимчивости. Экспериментально установлено, что эти особенности связаны с движением компенсационной границы в слоях пленки (т.е. с неоднородным распределением состава по толщине). Предложена модель, качественно объясняющая все наблюдаемые особенности восприимчивости для пленок с различным типом компенсационной поверхности.

Физические свойства магнетиков вблизи температуры магнитной компенсации  $T_k$  активно исследуются в течение последних двадцати лет. В окрестности  $T_k$  в объемных монокристаллах ферритов-гранатов обнаружены разнообразные аномалии физических свойств (в том числе — восприимчивости), которые обусловлены возникновением неколлинеарной фазы [1]. Неоднородность параметров по толщине (плавная или ступенчатая) в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов приводит к дополнительным особенностям, например к «уширению» сквозной вертикальной межфазной границы, разделяющей высокотемпературную и низкотемпературную коллинеарные фазы, и появлению в пленке ступенчатой или наклонной компенсационной границы (КГ), которая с увеличением внешнего магнитного поля асимптотически приближается к компенсационной поверхности (КП) [2]. Однако вопрос о том, как влияет неоднородность параметров по толщине пленок на поведение статической магнитной восприимчивости вблизи  $T_k$ , вплоть до настоящего времени практически не исследовался. Между тем изучение особенностей магнитной восприимчивости при различных фазовых переходах дает важную информацию о критическом поведении магнетиков [3].

В данной работе проведено экспериментальное исследование поведения магнитной восприимчивости неоднородных по толщине квазиодноосных пленок ферритов-гранатов в окрестности температуры магнитной компенсации. На температурных зависимостях восприимчивости обнаружены ярко выраженные особенности и установлена их связь с изменением состава по толщине. Предложена модель, качественно объясняющая все наблюдаемые особенности восприимчивости для пленок с различным характером распределения параметров по толщине (двухслойных, многослойных и с плавным изменением параметров).

Эксперименты проводились на квазиодноосных пленках ферритов-гранатов состава  $(\text{YGdYbBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках из гадолиний-галлиевого граната с ориентацией (111) и (110). Исследовались зависимости обратимой магнитной восприимчивости  $\chi_{zz} = \partial M_z / \partial \tilde{h}_z$  от температуры  $T$  в области температур компенсации  $\Delta T_K$  в постоянном магнитном поле  $H_z$ .<sup>1</sup> Здесь  $M_z$  — проекция намагниченности на ось  $z$ , нормальную к поверхности пленки, а  $H_z$  и  $\tilde{h}_z$  — соответственно постоянное и слабое низкочастотное магнитные поля вдоль той же оси. Магнитное поле  $H_z$  напряженностью до 350 Э создавалось катушкой без сердечника. Для измерения восприимчивости  $\chi_{zz}$  в схеме была предусмотрена модулирующая катушка, реализующая переменное магнитное поле  $\tilde{h}_z$  с напряженностью от 0.1 до 10 Э на частоте  $\sim 1.7$  кГц, и магнитооптическая схема регистрации отклика на длине волны  $\lambda = 0.63$  мкм, подробно описанная в работе [3]. Для проведения температурных измерений пленка размещалась на нагревателе. Измерение температуры осуществлялось хромель-алюмелевой термопарой, один спай которого помещался в дьюар с азотом, а второй приклеивался к пленке в непосредственной близости от зондируемого участка. Для записи температурных зависимостей  $\chi_{zz}(T)$  использовался двухкоординатный самописец. Для исследований отбирались пленки, в которых среднее (по толщине) значение температуры компенсации  $\overline{T_K(z)}$  лежало выше комнатной температуры, при этом все критические значения поля подмагничивания (например, поле «уширения» сквозной межфазной границы) были относительно невелики ( $\sim 10^2$  Э). В этих пленках с помощью стандартной магнитооптической методики [2] определялись диаграмма состояния на плоскости  $H_z - T$  и структура, т.е. профиль компенсационной поверхности  $T_K(z)$  в выбранной для наблюдения точке образца.

## 1. Результаты эксперимента

Восприимчивость  $\chi_{zz}$  исследовалась как в квазиоднородных пленках, в которых область температур компенсации была небольшой ( $\Delta T_K \lesssim 5$  К), так и в существенно неоднородных по толщине пленках ( $\Delta T_K \sim 20 \div 50$  К) с плавным или скачкообразным изменением по толщине.

На рис. 1, а приведены зависимости  $\chi_{zz}(T)$ , полученные при различных значениях  $H_z$  (I —  $H_z = 350$ , II — 240, III — 190, IV — 170, V — 145 Э) для квазиоднородной пленки № 1. Ориентация подложки (110), толщина  $h = 4.66$  мкм, намагниченность насыщения  $M_0 = 8$  Гс, температура Кюри  $T_c = 429$  К, угол отклонения оси легкого намагничивания (ОЛН) от нормали  $\vartheta_u = 14.74^\circ$ , константы одноосной  $K_u$ , кубической  $K_c$  и ромбической  $K_r$  анизотропии равны соответственно 1030, 175 и 880 эрг/см<sup>3</sup>. Чтобы облегчить чтение этого рисунка, мы разнесли кривые  $\chi_{zz}(T)$  по высоте. Диаграмма состояния пленки на плоскости  $H_z - T$  в магнитном поле до 350 Э и положение КГ при  $H_z = 350$  Э показаны на рис. 1, б и в соответственно. Штрихом на рис. 1, в отмечено положение КГ в сильном магнитном поле  $\sim 10$  кЭ, при котором компенсационная граница практически совпадает с компенсационной поверхностью. Пленка № 1 состоит из

<sup>1</sup> Для неоднородных по толщине пленок следует говорить не о температуре магнитной компенсации  $T_K$ , а об интервале изменения  $\Delta T_K = T_K^{(\max)} - T_K^{(\min)}$ .

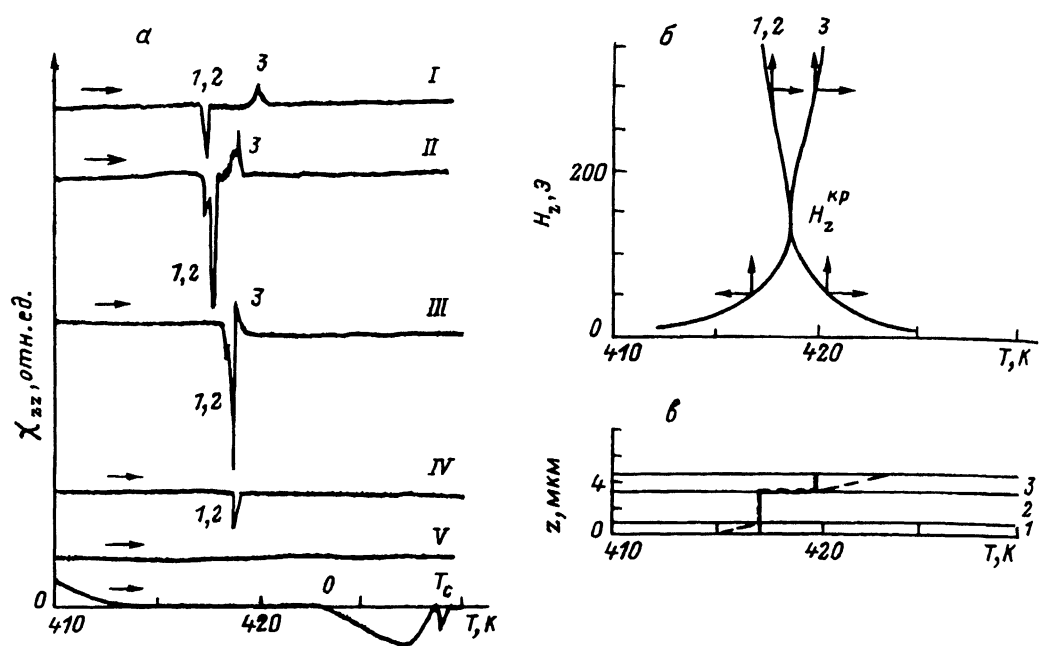


Рис. 1. Зависимости  $\chi_{zz}(T)$  (а), диаграмма состояния на плоскости  $H_z - T$  (б) и структура пленки № 1 (в).

в: штриховая линия — профиль КГ, сплошная линия — положение КГ при  $H_z = 350$  Э. Стрелками показано направление изменения температуры  $T$  или поля  $H_z$ .

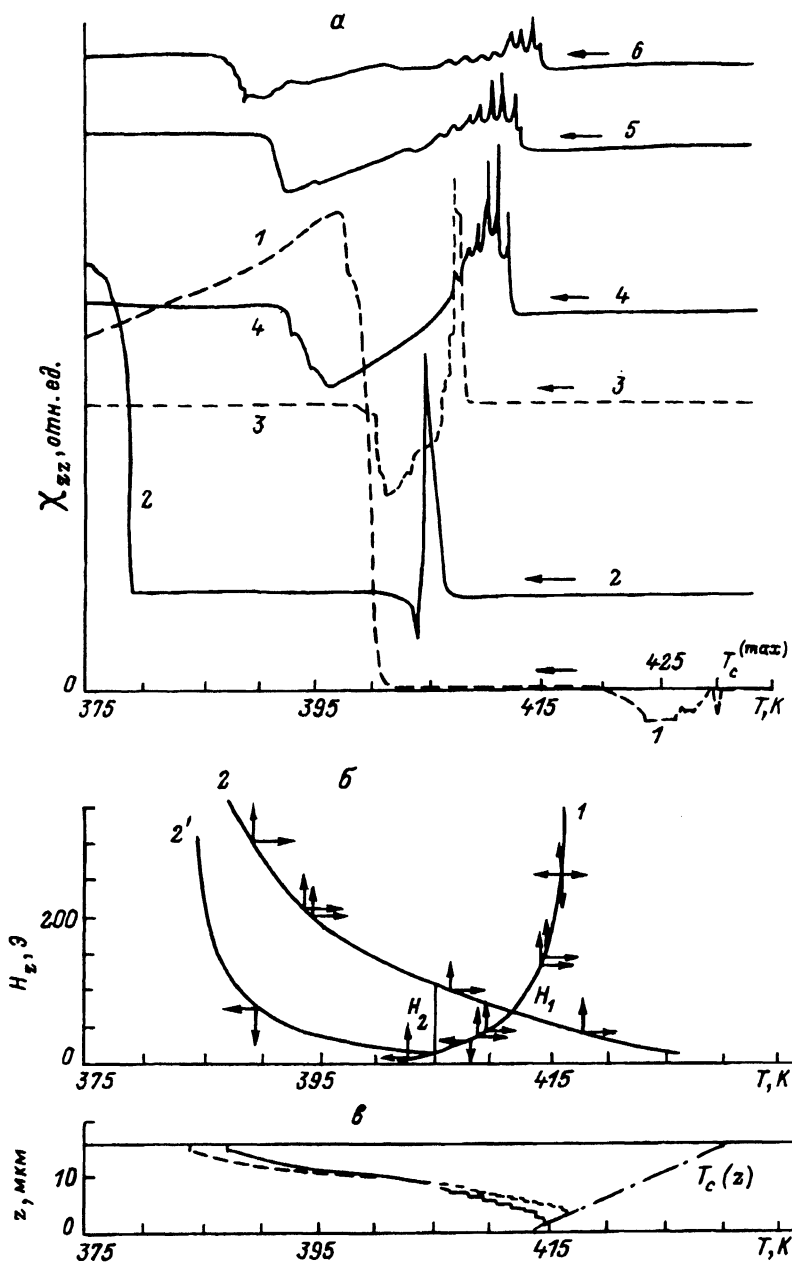
трех слоев: первый (приподложечный) и третий (приповерхностный) — с наклонными компенсационными поверхностями, второй — с вертикальной КГ (слои показаны горизонтальными линиями на рис. 1, в, нумерации слоев соответствует нумерация линий на рис. 1, б). Компенсационная поверхность существует в пленке в области температур  $415 \text{ K} \leq T \leq 422.5 \text{ K}$ .

В отсутствие внешнего магнитного поля восприимчивость  $\chi_{zz}$  меняет знак при проходе через область температур компенсации. В самой области температур компенсации  $\chi_{zz} = 0$  (рис. 1, а). В слабом магнитном поле ( $0 < H_z < 20$  Э) ниже «горла» диаграммы сквозное перемagnичивание носит случайный характер из-за большой коэрцитивности и малой намагниченности образца вблизи  $T_k$ . На зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  наблюдаются слабо выраженные максимумы, обусловленные модуляцией положения сквозной вертикальной межфазной границы. В интервале полей  $20 \text{ Э} < H_z < H_z^{KP} = 160 \text{ Э}$ , где  $H_z^{KP}$  — поле излома сквозной межфазной границы, эти максимумы исчезают и восприимчивость практически равна нулю (в пределах чувствительности схемы измерений) в широкой области температур вблизи  $T_k$  (рис. 1, а). При  $H_z = H_z^{KP}$  происходит «уширение» сквозной межфазной границы, при этом на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  возникает пик. При  $H_z > H_z^{KP}$  на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  видны два пика разной полярности. Величина их резко возрастает при небольшом превышении поля  $H_z^{KP}$ , затем медленно падает с ростом  $H_z$ . Визуальное наблюдение показало, что пики на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  связаны с движением компенсационных границ при изменении температуры в слоях пленки через зондируемый участок. Левый пик соответствует движению КГ

в первом и втором слоях, правый — в третьем приповерхностном слое. Движение КГ отдельно в первом (приподложечном) слое наблюдалось в полях  $H_z > 400$  Э. Координаты пиков ( $H_z, T$ ) полностью отвечают точкам на линиях диаграммы состояния пленки на плоскости  $H_z - T$ , полученной на основании визуального наблюдения по эффекту Фарадея. Для данной пленки (и для всех других) характерным было то, что амплитуда пика, связанного с движением КГ в приподложечном слое (слоях), всегда намного превышала аналогичную величину для приповерхностного слоя. Кроме того, пики, соответствующие движению КГ в приповерхностных слоях, уширяются из-за большей коэрцитивности этих слоев и наличия микродефектов на поверхности.

Были исследованы пленки с широкой областью температур компенсации  $\Delta T_k$  и плавным или ступенчатым характером распределения  $T_k$  по толщине, полученные в режиме плавного изменения температуры роста  $T_p$  во время синтеза [4]. В этих пленках распределение параметров по толщине (таких как  $M_0, K_u, K_p, K_c, \nu_u, T_k$  и  $T_c$ ) является крайне неоднородным. На рис. 2, а приведены зависимости  $\chi_{zz}(T)$  при  $H_z = \text{const}$  для пленки № 2 (ориентация подложки (110), толщина  $h = 16$  мкм). Температура Кюри  $T_c$  (показана штрихпунктирной линией на рис. 2, в) изменяется от 413 К у подложки до 430 К у свободной поверхности. Профиль  $T_c(z)$  был рассчитан с помощью зависимости  $T_c(T_p)$  в тонких квазиоднородных пленках, выращенных из того же расплава при различных фиксированных температурах роста  $T_p$ . Максимальное значение  $T_c^{(\text{max})}$  определялось визуально по эффекту Фарадея и по зависимости  $\chi_{zz}(T)$ .

Температура компенсации  $T_k$  изменяется от 384 К у свободной поверхности до 416.5 К у подложки. Компенсационная поверхность в пленке имеет вид наклонной поверхности с несколькими ступеньками вблизи границы раздела пленка-подложка (отмечена штрихом на рис. 2, в). Сплошной линией на рис. 2, в показано положение КГ в поле  $H_z = 130$  Э. Поле  $H_1$ , соответствующее началу «излома» сквозной вертикальной межфазной границы с образованием КГ, составляло 60 Э при увеличении  $H_z$ , а поле  $H_2$ , соответствующее «схлопыванию» КГ в вертикальную границу при уменьшении поля подмагничивания, составляло 15 Э. На рис. 2, б приведена диаграмма состояния пленки № 2 на плоскости  $H_z - T$  в полях до 350 Э, полученная на основании визуального наблюдения за процессами перемещения. На диаграмме показаны только линии, соответствующие движению компенсационных границ в приподложечном и приповерхностном слоях (линии 1 и 2 соответственно), ограничивающие область температур компенсации  $\Delta T_k$ . Линии, отвечающие за движение КГ во внутренних слоях, для простоты на диаграмме не показаны. Стрелками отмечено направление изменения поля  $H_z$  при  $T = \text{const}$  ( $\uparrow$  или  $\downarrow$ ) либо температуры  $T$  при  $H_z = \text{const}$  ( $\rightarrow$  или  $\leftarrow$ ). Одиночными стрелками показаны линии, которые получены при изменении температуры от  $T > T_c^{(\text{max})}$  до  $T < T_k^{(\text{min})}$  ( $H_z = \text{const}$ ) либо при циклическом перемещении от больших отрицательных значений  $H_z$  до положительных (и наоборот) при  $T = \text{const}$ . Линии, полученные при повторном намагничивании полем той же полярности от значения  $H_z = 0$ , отмечены двойными стрелками (аналогично при  $H_z = \text{const}$  это соответствует изменению температуры в пределах области, ограниченной линиями 1 и 2').



**Рис. 2.** Зависимости  $\chi_{zz}(T)$  (а) для  $H_z = 0(1)$ , 20 (2), 26 (3), 52 (4), 78 (5) и 130 Э (6), диаграмма состояния на плоскости  $H_z - T$  (б), структура пленки №2 (в). в: штриховая линия — профиль КП, сплошная линия — положение КГ при  $H_z = 130$  Э, штрихпунктирная линия — профиль  $T_c(z)$ .

Зависимости  $\chi_{zz}(T)$  на рис. 2, а даны для случая уменьшения температуры от значений  $T > T_c^{(\max)}$ . В отсутствие внешнего магнитного поля с уменьшением температуры при проходе через область температур компенсации  $\Delta T_k$  величина  $\chi_{zz}$  изменяет знак, как и в пленке № 1. Резкий рост  $\chi_{zz}$  при  $T \sim 400$  К связан с зарождением решетчатых несквозных ЦМД, локализованных у границы раздела пленка-подложка, где намагниченность  $M$  максимальна при этой температуре [4].

С увеличением поля  $H_z$  этот пик смещается в сторону более низких температур. В магнитном поле  $0 < H_z < H_2$  значение  $\chi_{zz} = 0$  в широкой области температур вблизи  $\Delta T_k$  — как при уменьшении, так и при уве-

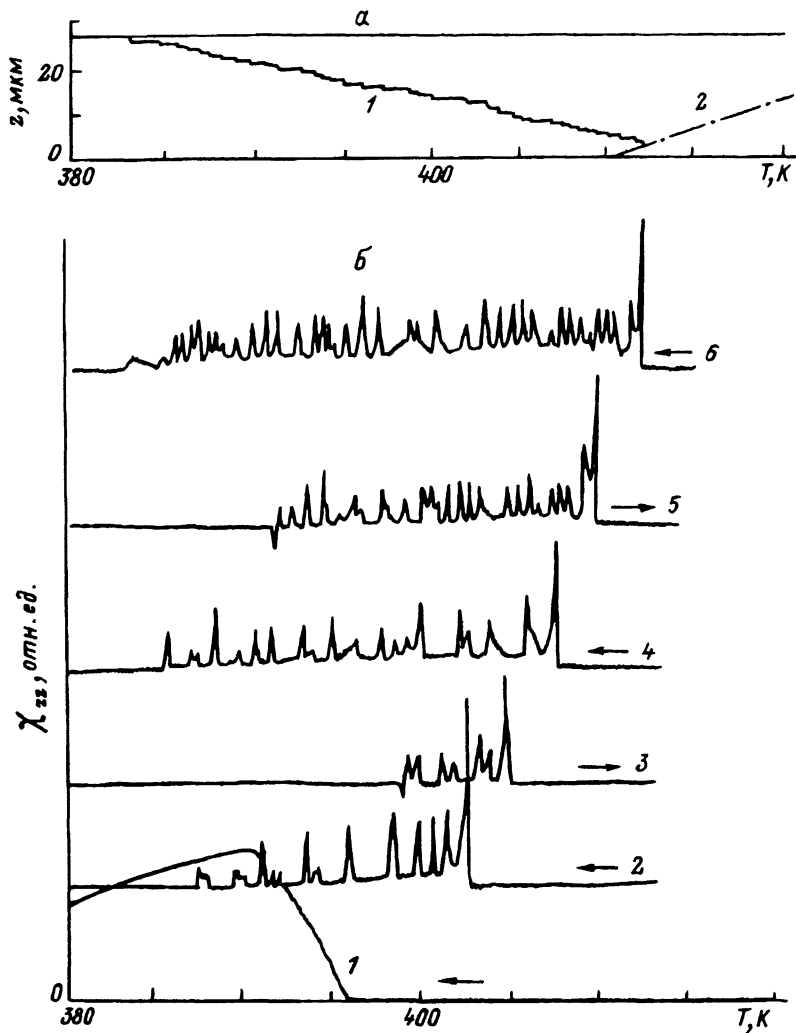


Рис. 3. а) Профиль компенсационной границы при  $H_z = 240$  Э (1) и зависимость  $T_c(z)$  (2). б) Зависимости  $\chi_{zz}(T)$  в пленке №3 при  $H_z = 0$  (1), 24 (2), 72 (3, 4) и 240 Э (5, 6).

Стрелками показано направление изменения температуры.

личении температуры. В поле  $H_z \gtrsim H_2$  при уменьшении температуры в пленке присутствуют несквозные КГ и на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  появляются особенности, связанные с их движением (рис. 2, а). При  $H_z \gtrsim H_1$  эти особенности видны как при уменьшении, так и при увеличении температуры. Резкий провал в левой части кривой  $\chi_{zz}(T)$  связан с движением КГ в приповерхностном слое с наклонной КП. Сильный гистерезис при перематывании (линии 2 и 2' на рис. 2, б) отражает большую коэрцитивность этого слоя. В отличие от пленки № 1 в пленке № 2 с увеличением температуры восприимчивость  $\chi_{zz}$  изменяется плавно от отрицательных значений до положительных. На фоне плавного изменения  $\chi_{zz}$  в правой части кривой видны резкие пики, связанные с движением КГ в приподложечных слоях.

Описанная дифференциальная методика позволяет обнаруживать большее число слоев, чем при визуальном наблюдении. На рис. 3 показаны положение КГ в поле  $H_z = 240$  Э и профиль  $T_c(z)$  (а), а также зави-

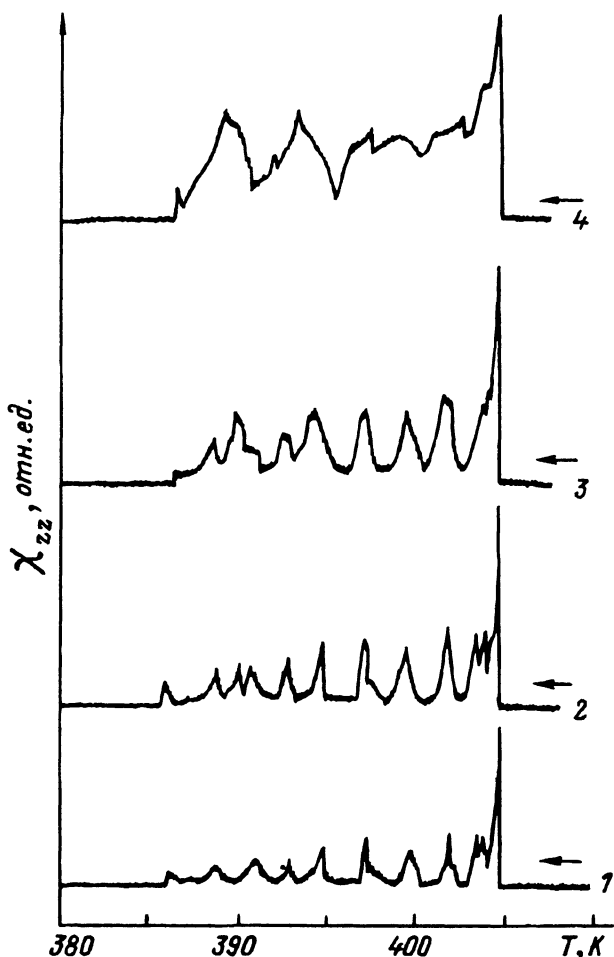


Рис. 4. Зависимости  $\chi_{zz}(T)$  для  $H_z = 36$  Э в пленке № 3 при  $\bar{h}_z = 0.8$  (1), 1.5 (2), 3 (3), 6 Э (4).

симости  $\chi_{zz}(T)$  (б) для пленки № 3 (ориентация подложки (111), толщина  $h = 28$  мкм). Температурные зависимости  $\chi_{zz}(T)$ , приведенные для различных значений  $H_z$  и разных направлений изменения  $T$ , при  $H_z > 15$  Э обладают множественными максимумами, связанными с прохождением компенсационной границы через точку зондирования, число которых растет с увеличением  $H_z$ . Однако если визуально можно было различить  $\sim 10$  слоев, то дифференциальная методика позволила обнаружить до  $\sim 40$  мелких слоев в данной пленке.

Количество разрешаемых максимумов зависит и от амплитуды модулирующего поля. На рис. 4 приведены зависимости  $\chi_{zz}(T)$  при  $H_z = 36$  Э для пленки № 3, полученные при различных значениях амплитуды модулирующего поля  $\dot{h}_z$ . Видно, что, хотя при увеличении  $\dot{h}_z$  амплитуда пиков увеличивается, они сильно уширяются, а затем сливаются (при  $H_z = 36$  Э оптимальная амплитуда  $\dot{h}_z$  составляет  $\sim 1.5$  Э). С ростом  $H_z$  оптимальная амплитуда переменного поля  $\dot{h}_z$  растет, причем отношение  $\dot{h}_z/H_z$  остается почти постоянным.

## 2. Обсуждение результатов

Наблюдаемые в области температур компенсации особенности  $\chi_{zz}$  можно довольно просто объяснить, предполагая, что основной вклад в  $\chi_{zz}$  дает движение компенсационной границы (это подтверждают прямые визуальные наблюдения), а вкладом от монодоменных областей можно пренебречь.

На рис. 5 схематически показаны двухслойная пленка с вертикальными участками компенсационной поверхности (а) и пленка с наклонной КП (б).<sup>2</sup> В слабых магнитных полях в обеих пленках реализуется сквозная вертикальная компромиссная граница, разделяющая низкотемпературную и высокотемпературную коллинеарные фазы (штриховые линии на рис. 5, а, б). При  $H_z > H_z^{KP}$  и  $T = \bar{T}_k$  происходит либо «излом» этой границы (рис. 5, а), либо ее наклон (рис. 5, б); с увеличением поля  $H_z$  КП асимптотически приближается к КП.

В слабом низкочастотном поле КГ колеблется около положения равновесия, определяемого полем подмагничивания  $H_z$  и температурой. Модуляция положения вертикальных участков КГ приводит к резким особенностям  $\chi_{zz}$  при  $T = T_1$  и  $T = T_2$ . В пленке с наклонной КП в  $\chi_{zz}$  дает вклад и модуляция положения наклонного участка КГ, что приводит дополнительно к плавному изменению  $\chi_{zz}$  в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ . При  $T = T_1$  и  $T = T_2$  смещение КГ увеличивает (или уменьшает) объем фаз с противоположным направлением однотипных подрешеток, поэтому знак  $\chi_{zz}(T_1)$  противоположен знаку  $\chi_{zz}(T_2)$  (напомним, что в эксперименте  $\chi_{zz}$  измерялось магнитооптическим методом по эффекту Фарадея). Аналогично в случае пленки с наклонной КП знак  $\chi_{zz}$  при  $T_1 \leq T \leq \bar{T}_k$  противоположен таковому при  $\bar{T}_k \leq T \leq T_2$ . Отметим, что разным знакам восприимчивости соответствует противоположный наклон линий на диаграмме состояния пленки (на плоскости  $H_z - T$ ), отражающих движение КГ при увеличении поля  $H_z$  (рис. 5, в).

<sup>2</sup> В работах [2,5] подробно исследовано перемагничивание таких пленок в области температур компенсации.



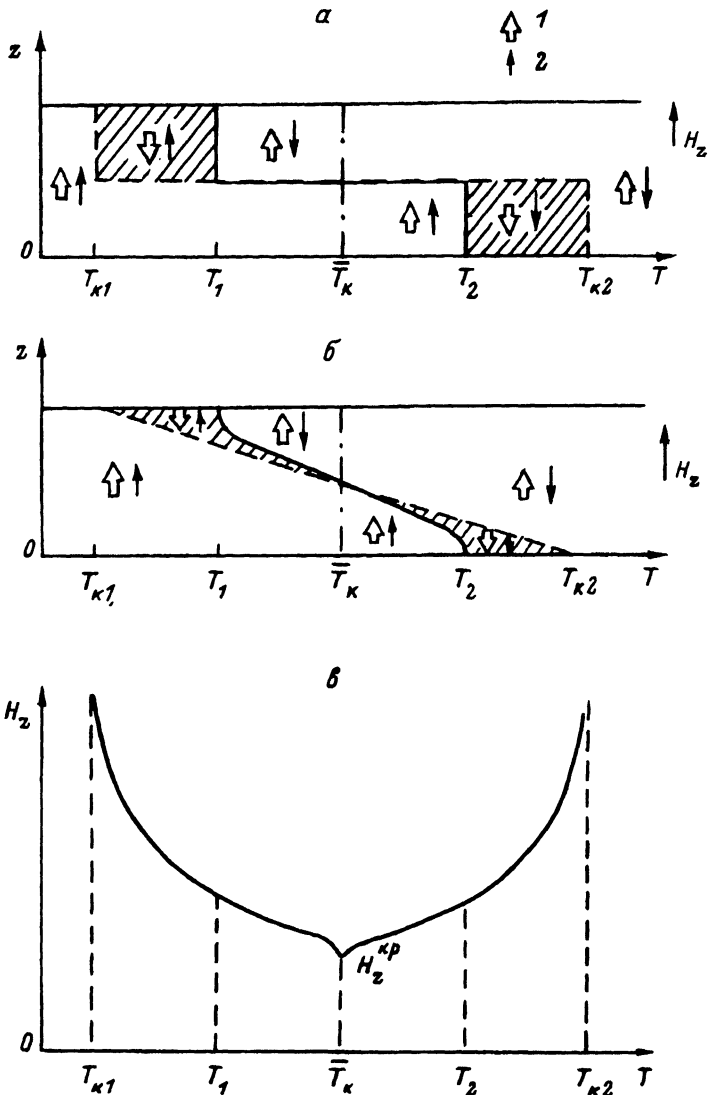


Рис. 5. Схематическое изображение процесса перестройки КГ во внешнем магнитном поле  $H_z$  для двухслойной пленки (а) и пленки с наклонной КГ (б). Диаграмма состояния двухслойной пленки и пленки с наклонной КГ на плоскости  $H_z - T$  (в).

а, б: 1 — результирующая намагниченность, 2 — намагниченность одной из подрешеток, штриховая линия — КГ, сплошная линия — КГ, заштрихованы области с  $M \uparrow H_z$ .

Для многослойной пленки с большим числом вертикальных или наклонных участков КГ аналогичные рассуждения приводят к выводу о том, что знак  $\chi_{zz}$  и в этом случае будет определяться наклоном соответствующих линий на диаграмме состояния, т.е. тем, что при увеличении или уменьшении температуры компенсационная граница в данном слое приближается к компенсационной поверхности. Абсолютная величина  $\chi_{zz}$  зависит от плотности микродефектов и коэрцитивности, а также от

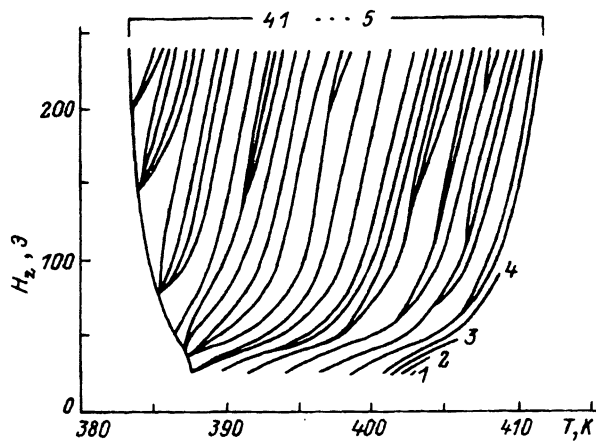


Рис. 6. Диаграмма состояния пленки № 3 на плоскости  $H_z - T$  с учетом всех внутренних линий.

толщины слоев. Чем больше наклон линии на диаграмме состояния, тем больше смещение КГ (при постоянной амплитуде  $\bar{h}_z$ ) и соответственно больше амплитуда пика  $\chi_{zz}$  (при прочих равных условиях). Более толстые слои дают пики  $\chi_{zz}$  с большей амплитудой.

Предложенная модель качественно объясняет все особенности  $\chi_{zz}$ , наблюдаемые в области температур компенсации. В пленке № 1 в полях до 350 Э «раскрываются» два слоя с вертикальными участками КГ, дающие две линии с противоположным наклоном на диаграмме состояния (рис. 1, б), которым соответствуют два пика противоположной полярности на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  (рис. 1, а). В пленке № 2 на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  проявляется в основном наклонный характер КП (плавное изменение  $\chi_{zz}$  в области  $\Delta T_k$ ; рис. 2, а), а в пленке № 3 — ступенчатый (многочисленные пики; рис. 3, б). Число пиков при фиксированном поле  $H_z$  соответствует числу ступенек на КГ, появившихся в данном поле.

Для пленки № 3 по зависимостям  $\chi_{zz}(T)$  при  $H_z = \text{const}$  была построена диаграмма состояния на плоскости  $H_z - T$  в интервале полей от 24 до 240 Э с учетом всех внутренних линий для случая уменьшения температуры (рис. 6). Все линии на диаграмме, кроме крайней левой (соответствующей поверхностному слою), наклонены в одну сторону, т.е. компенсационная граница в этих слоях приближается к компенсационной поверхности со стороны более низких температур. Все соответствующие этим линиям пики восприимчивости имеют одинаковую полярность. Противоположный знак крайнего левого пика отчетливо проявляется на зависимостях  $\chi_{zz}(T)$  при увеличении температуры (рис. 3, б). При уменьшении  $T$  этот пик размывается, по-видимому, из-за большой коэрцитивности поверхностного слоя и полярность его трудно определить. Такой характер перемагничивания пленки в области  $\Delta T_k$ , т.е. наклон большинства линий в одну сторону, как мы полагаем, связан с большой коэрцитивностью поверхностного слоя и близостью температуры Кюри  $T_c$ . Заметим, что первые четыре линии на диаграмме состояния (рис. 6) исчезают в поле до 100 Э, так как в этих слоях достигается температура Кюри  $T_c$ .

Таким образом, экспериментально исследовано поведение  $\chi_{zz}(T)$  в пленках с различным типом компенсационной поверхности: с двумя вертикальными участками КП (двухслойная), с наклонной КП и с большим числом вертикальных участков КП (многослойная).

Предложена модель, качественно объясняющая все наблюдаемые особенности восприимчивости в области температур компенсации для пленок с различным типом компенсационной поверхности.

Неоднородность состава по толщине в пленках ферритов-гранатов обычно исследуется методом ФМР, вторичной ионной масс-спектропии, магнитооптическим способом (в области температур магнитной компенсации) [2,6,7] и т.д. Обнаруженные особенности на температурных зависимостях восприимчивости также можно использовать в этих целях.

В заключение авторы выражают благодарность Л.М.Филимоновой за выращивание пленок.

### Список литературы

- [1] Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1979. 319 с.
- [2] Аваева И.Г., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Шаповалов В.И. // ФТТ. 1977. Т. 19. № 9. С. 1577-1586.
- [3] Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. № 2. С. 614-633.
- [4] Арзамасцева Г.В., Кравченко В.Б., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Соболев А.Т., Филимонова Л.М. // Кристаллография. 1985. Т. 30. № 2. С. 360-365.
- [5] Арзамасцева Г.В., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г. // ФММ. 1981. Т. 52. № 4. С. 726-732.
- [6] Hoekstra B. // Solid State Comm. 1976. V. 18. N 4. P. 469-471.
- [7] Jonker H.D., Morgan A.E., Werner H.W. // J. Cryst. Growth. 1975. V. 31. P. 387-391.

Институт радиотехники и электроники РАН  
Фрязино  
Московская область

Поступило в Редакцию  
29 декабря 1992 г.  
В окончательной редакции  
15 апреля 1993 г.