

05; 09
© 1992 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КРИВОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОРОДНОГО СОСТОЯНИЯ И КОНСТАНТ АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ

Г. В. Арзамасцев, Ф. В. Лисовский, Е. С. Чижик

Исследовалось преобразование мод при волноводном распространении света в пленках феррит-гранатов во внешних магнитных полях. Показано, что особенности на зависимостях производной интенсивности волноводной моды от внешних магнитных полей связаны с зарождением (или уничтожением) доменной структуры, что позволяет определять положение линии потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ волноводным методом в пленках с малым углом поворота плоскости поляризации света с анизотропией типа "легкая ось" и "легкая плоскость".

Введение

При исследовании и практическом использовании магнитных пленок часто необходимо иметь полную информацию о характере анизотропии таких объектов. Для пленок магнитных гранатов наиболее распространенным способом определения констант и положений осей анизотропии является метод ориентационного фазового перехода (ФП) в поперечном (по отношению к нормали n к поверхности пленок) магнитном поле H_{\perp} [1]. При этом необходимые для расчета характеризующих анизотропию параметров сведения получают из анализа азимутальных зависимостей положения вершины кривой потери устойчивости однородно намагниченного состояния пленок относительно возникновения доменной структуры (ДС) на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$, где H_{\parallel} — компонента магнитного поля вдоль нормали n . Используемые методики измерений обычно базируются на эффекте Фарадея (визуальное наблюдение за процессом зарождения ДС, магнитооптическое измерение магнитной восприимчивости при ФП [2] и т. д.). Однако если угол поворота плоскости поляризации света в пленке мал или пленка обладает анизотропией типа "легкая плоскость", то применение известных магнитооптических методик оказывается затруднительным или невозможным.

В данной работе для определения компонент поля зарождения ДС H_{\perp} и H_{\parallel} и констант анизотропии использован метод, основанный на анализе волноводного распространения света в магнитной пленке и происходящего при этом преобразования мод. Попытка качественного анализа анизотропии пленок типа "легкая плоскость" на основе использования волноводного распространения света была предпринята в работе [3]. Выполнено исследование полевых зависимостей интенсивности волноводной TM_j (или TE_p)-моды $I(H_{\perp}H_{\parallel})$ и дифференциальных зависимостей $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$, $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\perp}$ при $H_{\perp} \parallel k$ (j — индекс моды, k — волновой вектор моды). Показано, что при ФП I или II рода на кривых $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$, $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\perp}$ наблюдаются отчетливо выраженные особенности.

Исследовались эпитаксиальные пленки феррит-гранатов состава $(Y\text{GdYbBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$ с анизотропией типа "легкая ось" и "легкая плоскость", выращенные на подложках из гадолиний-галлиевого граната с (110) ориентацией. Оптические моды в пленках возбуждались на длине волны $\lambda = 1.152$ мкм методом призмного ввода. Для пространственного разделения мод с TE - и TM -поляризациями использовались рутиловые призмы. Поля H_{\perp} и H_{\parallel} с напряженностью до 1 кЭ создавались соответственно парой катушек и соленоидом, которые устанавливались на столике гониометра вместе с размещаемым внутри катушек макетом с пленкой. Волноводная TM_j (TE_j)-мода регистрировалась фотоприемником; сигнал с фотоприемника подавался на селективный нановольтметр, затем на двухкоординатный самописец. Полевые зависимости интенсивности волноводной моды $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$ записывались модуляционным методом с помощью обтюратора; для получения зависимостей производных $\partial I/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I/\partial H_{\perp}$ в схеме были предусмотрены модулирующие катушки, реализующие переменные магнитные поля \tilde{h}_{\parallel} и \tilde{h}_{\perp} с напряженностью порядка 1 Э на частоте 1.8 кГц. Первая катушка, внутри которой размещался образец, имела диаметр ~ 20 мм, толщину ~ 2 мм и число витков ~ 40 , вторая наматывалась непосредственно на макет с образцом. Исследуемая пленка могла поворачиваться вокруг нормали n на произвольный угол φ_H , отсчитываемый от некоторого опорного направления в плоскости. При снятии зависимостей $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$ и дифференциальных зависимостей обеспечивалась возможность одновременного визуального наблюдения ДС по эффекту Фарадея.

Результаты и обсуждение

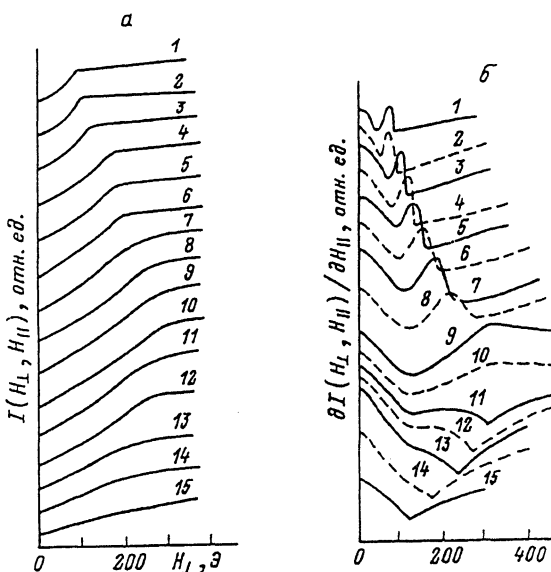


Рис. 1. Зависимости $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$ (а) и $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ (б) при $\text{tg}\alpha = H_{\parallel}/H_{\perp} = \text{const}$ и $\varphi_H = 0$ для пленки 1.

$\text{tg} \alpha$: 1 — 1.39, 2 — 1.11, 3 — 0.83, 4 — 0.56, 5 — 0.42, 6 — 0.28, 7 — 0.14, 8 — 0, 9 — 0.14, 10 — 0.28, 11 — 0.42, 12 — 0.56, 13 — 0.83, 14 — 1.11, 15 — 1.39.

Пленки с анизотропией типа "легкая ось". На рис. 1, а, б приведены зависимости $I(H_{\perp})$ и $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при $\text{tg}\alpha = H_{\parallel}/H_{\perp} = \text{const}$ и $\varphi_H = 0$ в случае преобразования мод типа $TE_3 - TM_3$ для пленки 1 (толщина пленки $h = 7.04$ мкм, намагниченность $M_0 = 14.0$ Гс, угол отклонения ОЛН от нормали $\eta_u = 13.1^\circ$, константы одноосной K_u , кубической K_c и ромбической K_p анизотропии равны соответственно 1810, 410 и 200 Эрг/см³). Для удобства кривые разнесены по высоте. Визуальное наблюдения за ДС позволило установить, что резкое изменение $\partial(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при уменьшении напряженности поля связано с зарождением доменов. Для тех напряжений H , при которых зарождение ДС происходит путем ФП I рода, эти особенности наиболее ярко выражены (кривые 1—8, 12—

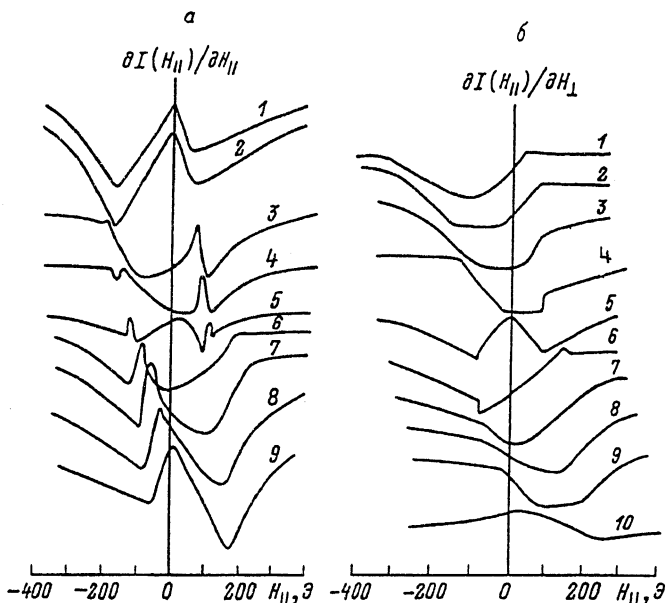


Рис. 2. Зависимости $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ (а) и $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\perp}$ (б) при $H_{\perp} = \text{const}$ и $\varphi_H = 0$ для пленки 1. $H_{\parallel}, \text{Э}$: 1 — 200, 2 — 150, 3 — 100, 4 — 50, 5 — 0, 6 — 50, 7 — 100, 8 — 150, 9 — 200, 10 — 300.

15). При приближении к области, где зарождение ДС происходит путем ФП II рода, особенности на кривых $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ сглаживаются (кривые 9 и 11) и совсем исчезают при ФП II рода (кривая 10). Видно, что особенности на дифференциальных кривых $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ выражены гораздо сильнее, чем на кривых $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$.

Зависимости $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\perp}$ при $H_{\perp} = \text{const}$ для пленки 1 при $\varphi_H = 0$ приведены на рис.2, а, б. Особенности, сопровождающие зарождение ДС, хорошо видны на кривых $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$; они сглаживаются по мере увеличения поля H_{\perp} и приближения к области ФП II рода. В квазиодноосных пленках модуляция интенсивности $I(H_{\perp}, H_{\parallel})$ переменным полем “в плоскости” \vec{H}_{\perp} приводила к зависимостям $\partial I/\partial H_{\perp}$ с менее ярко выраженными особенностями, чем в случае модуляции полем \vec{H}_{\parallel} , что, например, видно из сравнения рис. 2, а и б.

На рис. 3 приведена кривая потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$, построенная на основании анализа зависимостей $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ при $H_{\perp} = \text{const}$ и $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при $\text{tg}\alpha = \text{const}$ (значения $\text{tg}\alpha$ на кривых 1—15 те же, что и на рис.1). Для пленки 1 кривые потери устойчивости однородного состояния были определены для всех направлений в плоскости, составляющих угол $\varphi_H = 30 \cdot m$ (где $m = 0, 1, \dots, 11$). Это позволило определить критические точки $H_{\perp c}H_{\parallel c}$, соответствующие вершине кривой ФП II рода и рассчитать константы анизотропии K_u , K_c и K_p [1]. Для этой же пленки кривые потери устойчивости однородного состояния и константы анизотропии были найдены также и методом “однородного зарождения” при нормальном падении света

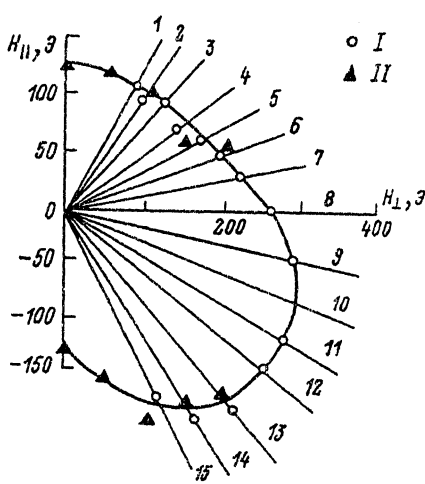


Рис. 3. Линия потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ в пленке 1 для $\varphi_H = 0$.
 $I - \text{tg}\alpha = \text{const}$, $II - H_{\perp} = \text{const}$.

на образец, когда призмы отсутствовали и их давление не могло влиять на ДС. Оба метода дали одинаковые результаты.

Исследовалось влияние ширины оптического контакта d , расстояния между призмами l , коэффициента преобразования мод и индекса моды на дифференциальные зависимости $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$. Наиболее резкие особенности на дифференциальных кривых получены при узком оптическом контакте, т. е. при $d \ll l$. Увеличение ширины оптического контакта приводит к уменьшению отношения сигнал-шум и

“сглаживанию” особенностей на дифференциальных кривых. Индекс моды, коэффициент преобразования и расстояние между призмами не играют существенной роли. Однако, если расстояние между призмами таково, что коэффициент преобразования моды проходит через экстремум, особенности на дифференциальных кривых несколько сглаживаются.

Для пленки 1 было сделано сравнение отклика $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ при волноводном распространении света и при нормальном падении света на образец. Угол между анализатором и поляризатором составлял 45° , использовалась та же самая модуляционная катушка для создания поля H_{\parallel} , что и при волноводном распространении света. Регистрировалась продольная компонента восприимчивости $\chi_{zz}(e_z || H_{\parallel})$. При одинаковой схеме регистрации сигнала отклик при волноводном распространении света ($\lambda = 1.152$ мкм) превосходил таковой при нормальном падении света на образец ($\lambda = 0.63$ мкм) в 50—100 раз. Поля, при которых наблюдались особенности, сопровождающие зарождение ДС, в обоих случаях совпадали. Сами особенности носили более резкий характер в случае волноводного распространения света.

Пленки с анизотропией типа “легкая плоскость”. Предложенный метод определения положения кривой потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ наиболее удобен для пленок с анизотропией типа “легкая плоскость” и пленок с небольшим удельным вращением плоскости поляризации света, в которых результирующий поворот плоскости поляризации при нормальном падении света на образец мал.

Данным методом исследовались пленка 2 ($h = 5.24$ мкм). Угол ν_M между равновесным положением намагниченности M_0 и нормалью к плоскости пленки p составлял 65° .

На рис. 4, а—в приведены соответственно зависимости I , $\partial I/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I/\partial H_{\perp}$ от H_{\perp} при $H_{\parallel} = \text{const}$, а на рис. 4, г—е — зависимости тех же величин от H_{\parallel} при $H_{\perp} = \text{const}$ для пленки 2 при $\varphi_H = 120^\circ$ в случае преобразования мод типа TE_5-TM_5 . Особенности, связанные с зарождением ДС путем ФП I рода, достаточно хорошо видны на зависимостях интенсивности волноводной TM_5 -моды от полей H_{\parallel} и H_{\perp} ; еще более ярко выражены на дифференциальных зависимостях $\partial I/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I/\partial H_{\perp}$. Видно, что по мере увеличения полей H_{\perp} и H_{\parallel} и приближения к области ФП II рода эти особенности сглаживаются. Многочисленные побочные пики на зависимостях $\partial I/\partial H_{\parallel}$ и $\partial I/\partial H_{\perp}$ для данной пленки связаны с пиннингом доменных границ на дефектах. Аналогичные пики

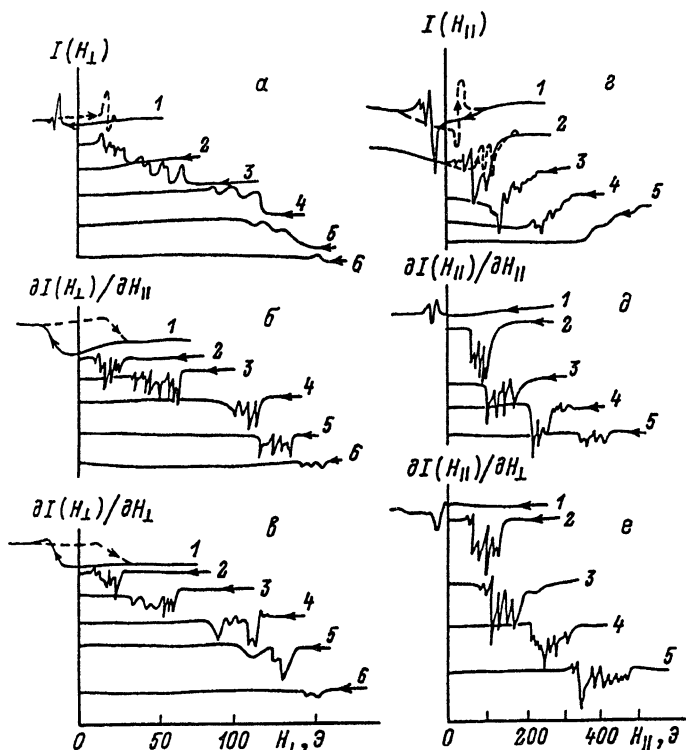


Рис. 4. Зависимости I , $\partial I/\partial H_{\parallel}$, $\partial I/\partial H_{\perp}$ от H_{\perp} при $H_{\parallel} = \text{const}$ (а-в) и от H_{\parallel} при $H_{\perp} = \text{const}$ (г-е) для пленки 2 при $\varphi_H = 120^\circ$.

H_{\parallel} , Э (а-в): 1 - 0, 2 - 70, 3 - 140, 4 - 280, 5 - 350, 6 - 480; H_{\perp} , Э (г-е): 1 - 0, 2 - 25, 3 - 50, 4 - 100, 5 - 150.

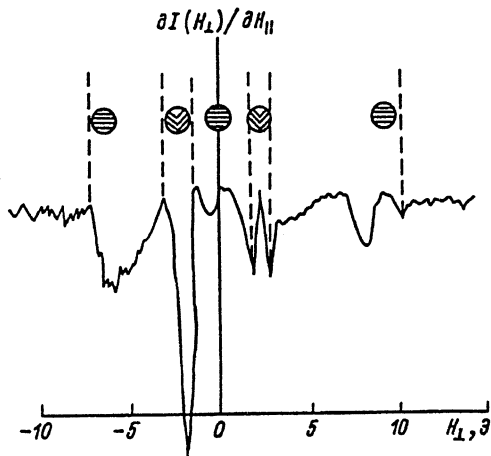
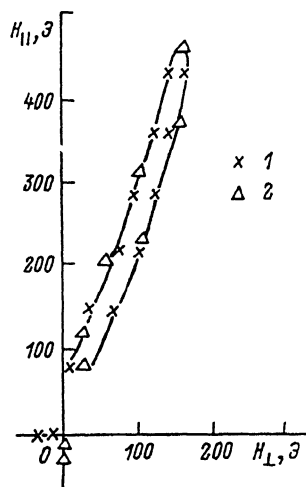


Рис. 5. Зависимость $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при $H_{\parallel} = 80$ Э для пленки ЖИГ. Показаны области существования полосовой ДС и структуры типа "елочка".

Рис. 6. Линия потери устойчивости однородного состояния пленки 2 на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ для $\varphi_H = 120^\circ$.

1 - $H_{\parallel} = \text{const}$, 2 - $H_{\perp} = \text{const}$.



x 1
Δ 2

наблюдались и при локальном скачкообразном изменении ориентации полосовых доменов в плоскости пленки ЖИГ ((111) ориентация, $h = 8.42$ мкм). На рис. 5 показана зависимость $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при $H_{\parallel} = 80$ Э для TE_1-TM_1 -преобразования в пленке ЖИГ и отмечены значения полей H_{\perp} , при которых полосовая ДС преобразуется в “елочку”, что сопровождается появлением пиков на $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$.

На рис. 6 приведена кривая потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ пленки 2 для $\varphi_H = 120^\circ$, построенная на основании анализа зависимостей $\partial I(H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ при $H_{\perp} = \text{const}$ и $\partial I(H_{\perp})/\partial H_{\parallel}$ при $H_{\parallel} = \text{const}$. Зависимости критиче-

ских полей $H_{\perp c}$ и $H_{\parallel c}$, при которых зарождение ДС происходит путем ФП II рода, от угла φ_H показаны на рис. 7, а. Для сравнения на рис. 7, б даны зависимости $H_{\perp c}(\varphi_H)$ и $H_{\parallel c}(\varphi_H)$, полученные в пленке 1 с анизотропией типа “легкая ось”. Результаты расчета, связывающего критические поля $H_{\perp c}$ и $H_{\parallel c}$ с константами анизотропии для пленок с анизотропией типа “легкая плоскость”, будут опубликованы позже.

Заключение

Проведенные исследования показали, что по зависимостям производной интенсивности волноводной моды $\partial I(H_{\perp}, H_{\parallel})/\partial H_{\parallel}$ от внешних магнитных полей можно определить положение линии потери устойчивости однородного состояния на плоскости $H_{\perp}H_{\parallel}$ в пленках с анизотропией типа как “легкая ось”, так и “легкая плоскость”. Расстояние между призмами, индекс волноводной моды (для однородных по толщине пленок) и эффективность преобразования при этом не играют существенной роли. Данный метод обладает как достоинствами (возможность исследовать пленки с очень малым углом поворота плоскости поляризации света и анизотропией типа “легкая плоскость”), так и недостатками: давление на пленку, возможно, несколько изменяет константы анизотропии [4], что может

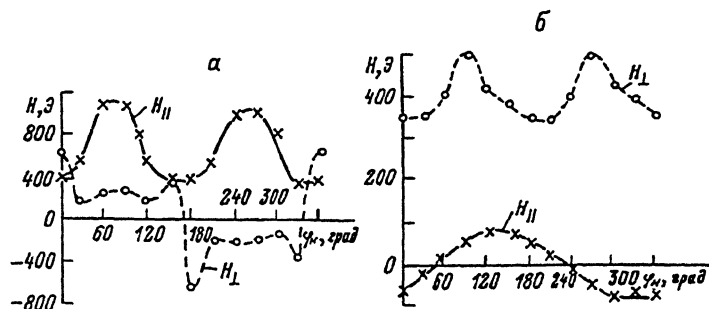


Рис. 7. Зависимости $H_{\perp c}(\varphi_H)$ и $H_{\parallel c}(\varphi_H)$ в пленках 2 (“легкая плоскость”) (а) и 1 (“легкая ось”) (б).

быть существенно для пленок с полями анизотропии порядка нескольких эрстед; метод более трудоемок из-за использования призм, чем в случае нормального падения света на образец. Регистрация доменной структуры волноводным методом может представлять практический интерес и для интегральной оптики.

Список литературы

- [1] Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г., Тарасенко В. В. // Микроэлектроника. 1984. Т. 13. № 4. С. 337—347.
- [2] Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г., Чижик Е. С. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. Вып. 2. С. 614—633.
- [3] McGlashan-Powell M., Wolf R., Dillon J. F., Jr., Fratello V. J. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 66. N 7. P. 3342—3347.
- [4] Tien P. K., Schinke D. P., Blank S. L. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 7. P. 3059—3068.

Институт радиотехники и электроники
РАН
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
17 апреля 1991 г.