

УДК 535.42 : 538.61

© 1990

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

С. Н. Гаврилин, Ф. В. Лисовский, Е. Г. Мансветова,  
С. А. Никитов

Предложен новый метод исследования нерегулярных доменных структур магнитных пленок, основанный на корреляционном и спектральном анализе. Выполнена экспериментальная проверка метода на пленках ферритов-гранатов.

Для изучения доменных структур (ДС), существующих в магнитных пленках, широко применяются магнитооптические методы наблюдения, позволяющие получать информацию как о статических, так и о динамических свойствах различных неоднородных распределений магнитного момента. Изучение процессов эволюции ДС под действием внешних факторов важно не только с чисто физической точки зрения, но и для определения параметров магнитных пленок (восприимчивость, константы анизотропии, подвижность и др.). ДС, возникающие в пленках при различных полях, могут быть весьма разнообразными. Известно, что наряду с упорядоченными (регулярными) ДС со строго периодическими пространственными вариациями вектора намагниченности (аналог твердого тела) довольно часто наблюдаются неупорядоченные (нерегулярные) с различной степенью нерегулярности: от квазиупорядоченных ДС до полностью аморфизованных (аналог жидкости) [1]. В настоящей работе сообщается о разработке методов корреляционного и спектрального анализа нерегулярных ДС, основанных на описании последних с помощью корреляционных функций  $W$  и их спектральных плотностей  $S$ . Описана также экспериментальная процедура определения этих функций.

Распределение намагниченности в пленке с нерегулярной ДС описывается случайной функцией, которую следует характеризовать с помощью среднестатистических величин. Мы пользовались корреляционной функцией (КФ) и ее спектральной плотностью, поскольку именно они легче всего определяются из эксперимента.

Пусть плоскополяризованный монохроматический свет падает по нормали на магнитную пленку с нерегулярной ДС, в которой распределение перпендикулярной к поверхности пленки компоненты намагниченности  $M_x$  описывается случайной функцией  $\xi(x, y)$ , характеризуемой КФ

$$W(x, x', y, y') = \sigma^{-2} \langle \xi(x, y) \xi(x', y') \rangle, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение, а угловые скобки означают усреднение по ансамблю. В предположении изотропности, стационарности и эргодичности функции  $\xi(x, y)$  (что справедливо для пленок выбранной ориентации) выражение (1) сводится к

$$W(x - x') = \sigma^{-2} \langle \xi(x) \xi(x') \rangle. \quad (2)$$

Распределение интенсивности света с поляризацией, ортогональной исходной, в дальней зоне дифракции представляет собой Фурье-образ введенной КФ

$$S(\zeta) = A \int_{-\infty}^{+\infty} W(x) \exp(-i\zeta x) dx, \quad (3)$$

где  $A$  — амплитудный множитель; функция  $S(\zeta)$  — спектральная плотность функции  $W(x)$ .

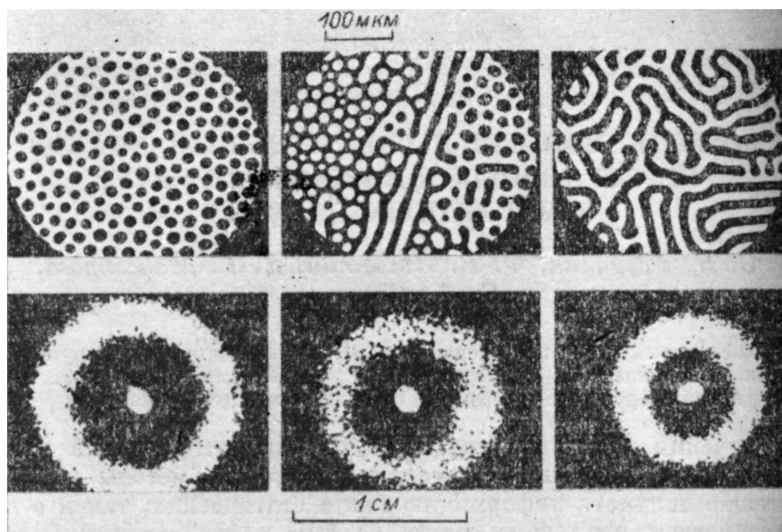


Рис. 1. Фотографии доменных структур и дифракционных картин для пленки состава  $(\text{YGdYbBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$  толщиной 10 мкм.

Экспериментально исследовались эпитаксиальные пленки висмут-содержащих ферритов-гранатов на подложках из галлий-гадолиниевого граната с (111)-ориентацией. Образцы помещались в статическое магнит-

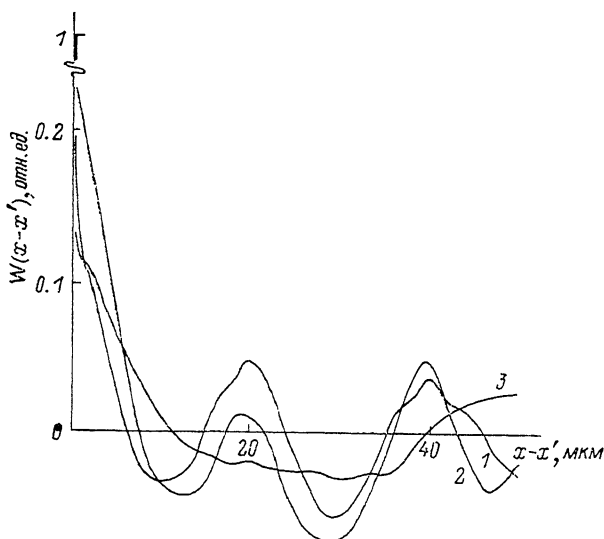


Рис. 2. Корреляционные функции для доменных структур рис. 1.

1 — «монополярная» аморфная решетка ЦМД, 2 — ДС со «смешанной полярностью», 3 — лабиринтная ДС.

ное поле, и по известной методике (см., например, [1]) в пленках были реализованы нерегулярные ДС, фотографии которых в поляризованном свете показаны на рис. 1. В «монополярной» аморфной решетке цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) случайным образом изменяются

диаметр и положение ЦМД; в ДС со «смешанной поляриностью» [сосуществуют обрывки полосовых доменов и ЦМД с различным направлением  $M_z$  внутри доменов, т. е. случайным образом изменяются размеры, форма и поляриность доменов. Лабиринтная ДС характеризуется нерегулярным расположением доменных границ; флуктуирует в определенных пределах также и размер доменов. На рис. 1 приведены также фотографии, показывающие распределение интенсивности излучения  $I$  в дальней зоне при дифракции света на этих ДС. Изображения ДС на фотопленке оцифровывались с шагом 40 мкм на машинном комплексе «Роботрон» для обработки изображений (размер изображения  $20 \times 20$  мм). Поскольку степень локального почернения фотопленки определяется распределением компоненты намагниченности  $M_z$  в плоскости образца, то зависимость оптической плотности негатива от любой координаты в плоскости пленки однозначно определяет случайную функцию  $\xi(x)$ . По формулам (2), (3)

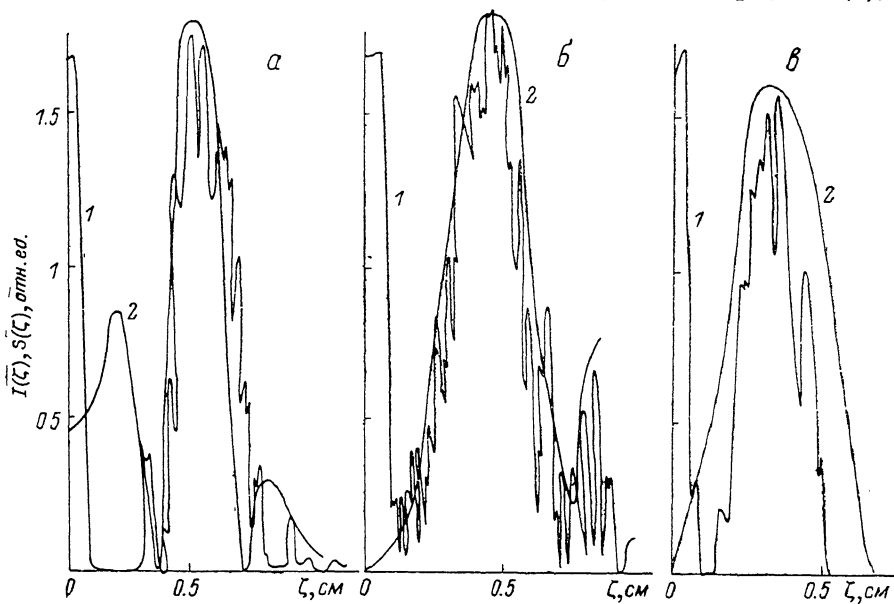


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности корреляционной функции (1) и интенсивности дифрагированного света (2) от  $z$ .

Расстояние от объекта до плоскости наблюдения дифракционной картины  $\approx 15$  см.

с применением известных методик [2] на ЭВМ были рассчитаны КФ и их спектральные плотности для всех трех случаев (рис. 2, 3). С помощью денситометра были получены также графики распределения интенсивности в дифракционной картине для всех трех случаев (начало координат совпадает с центром дифракционной картины) и выполнено сравнение с графиками спектральной плотности КФ (рис. 3). Центральный дифракционный максимум, поляризация излучения в котором совпадает с исходной, а интенсивность определяется качеством используемого в экспериментах поляризатора, является паразитным и никакой информации о спектральной плотности КФ не дает. Полезная информация извлекается из боковых дифракционных максимумов, угловое положение которых  $\theta_{\max}$  определяется соотношением [3]

$$P \sin \theta_{\max} = \lambda, \quad (4)$$

где  $P$  — средний период ДС,  $\lambda$  — длина волны света. Форма боковых максимумов дает информацию о степени нерегулярности ДС, мерой которой может служить их полуширина. В случае регулярной полосовой ДС боковые максимумы описываются  $\delta$ -функцией; по мере увеличения степени аморфизации структуры максимумы размываются и изменяется

их форма. На рис. 3, а, б, кроме основных, видны дополнительные максимумы с меньшей интенсивностью, наличие которых свидетельствует о том, что КФ соответствующих ДС наряду с первой гармоникой Фурье-разложения содержат и высшие гармоники, амплитуды которых пропорциональны высотам соответствующих пиков. Изрезанность экспериментальных кривых является проявлением спекл-структуры дифракционной картины.

Хорошее совпадение результатов, полученных в дифракционном эксперименте и при вычислении спектральных плотностей КФ, подтверждает правильность построенной теории дифракции света на нерегулярной ДС. Разработанная методика позволяет определить КФ нерегулярных ДС и их спектральные плотности экспериментальным путем и интерпретировать эти результаты. Изложенный метод может служить основой экспериментальной проверки правильности теоретического расчета КФ нерегулярных ДС в окрестности линий фазовых переходов [1].

Авторы благодарны В. П. Орлову, Д. В. Соколову и В. И. Царюк за помощь в обработке результатов эксперимента.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г., Тарасенко В. В. // ЖЭТФ. 1986. Т. 86. № 4. С. 1473—1494.
- [2] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., 1974. 463 с.
- [3] Звездин А. К., Котов В. А. Магнитооптика тонких пленок. М., 1988. 192 с.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР  
Фрязино  
Московская обл.

Поступило в Редакцию  
13 ноября 1989 г.