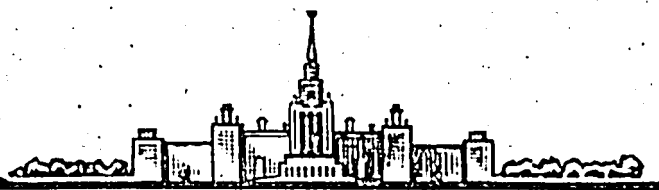


4-42



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

АНТОНОВ Л.И.

АГНИТНАЯ СТРУКТУРА И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИ-
ЧЕСКИХ ПЛЕНОК ТИПА

Диссертация написана на русском языке

(050 - физика магнитных явлений)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА • 1972

22
А42

Работа выполнена на кафедре общей физики для физическо-го факультета МГУ.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Р.В.Телеснин.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Г.С.Криччик,

кандидат физико-математических наук Д.В.Старостин.

Ведущее предприятие - Институт физики твердого тела и полупроводников АН БССР, г.Минск.

Автореферат разослан " " _____ 1972 г.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета. Отзвны на автореферат (два заверенных экземпляра) просим прислать по адресу: Москва, В-234, Ленинские горы, физический факультет МГУ.

Защита состоится " " _____ 1972 г. на заседании Специализированного Ученого Совета № 2 Отделения физики твердого тела физического факультета Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА,
кандидат физико-математических наук

/В.И.СОКОЛОВ/

Интенсивное исследование магнитных свойств ферромагнитных материалов в форме тонких ферромагнитных пленок (ТФП) привело к значительному прогрессу в физике магнитных явлений. Это стало возможным благодаря особым преимуществам, которыми обладают ТФП по сравнению с массивными ферромагнетиками и которые позволили использовать для изучения магнитных материалов в форме ТФП самые современные методы.

Большой интерес представляют исследования влияния размерного фактора на магнитные свойства ферромагнетика. Особое состояние ферромагнетика в форме ТФП, когда один из его линейных размеров становится очень малым, должно приводить к возрастающему влиянию толщины пленки и анизотропного состояния поверхностных атомов (поверхностная анизотропия) на магнитные свойства. Это подтверждается исследованиями толщиной зависимости намагниченности насыщения и температуры Кюри, резонанса спиновых волн и т.п.

Толщина ТФП влияет также и на магнитную структуру пленок. Исследования этого влияния для одноосных ТФП позволяют качественно проследить за изменением магнитной структуры пленок при изменении их толщины. Теоретические и экспериментальные исследования этого вопроса показали, что с ростом толщины пленки изменения происходят, в основном, в структуре границ макродоменов: переход от границ типа Нееля к границам типа " cross-tie " и затем к границам Блоха. При дальнейшем увеличении толщины пленки, начиная с некоторой

"критической" толщины, в ней появляется микрополосовая доменная структура (МДС). МДС характеризуется тем, что внутри пленки существуют области, в которых вектор намагниченности перпендикулярен плоскости пленки или образует с ней острый угол. Возникновение этой структуры связано с так называемой перпендикулярной анизотропией (ПА) пленки. Характер этого особого типа магнитной структуры зависит от параметров ТФП и во многом еще не ясен, хотя ее теоретическому и экспериментальному исследованию посвящено сравнительно много работ.

Изучению магнитной структуры, в том числе и МДС, монокристаллических пленок кубической симметрии уделялось значительно меньше внимания. Это, по-видимому, связано с тем, что в последнее время предпочтение отдавалось поликристаллическим пленкам (в основном $Fe-Ni$ сплава), для которых ясно выступала перспектива практического использования в вычислительной технике. Необходимо также указать и на технологические трудности получения пленочных монокристаллов. Существующие к настоящему времени сведения о МДС пленочных монокристаллов типа $\{100\}$ весьма ограничены и зачастую противоречивы. Практически нет работ, посвященных теоретическому исследованию МДС в этих пленках.

Изучение магнитной структуры пленочных монокристаллов в значительной степени облегчит понимание их магнитных свойств и поможет предсказать характер изменения этих свойств при изменении пленочных параметров. Интерес к исследованию стимулируется еще и тем, что эти пленки или пластинки нашли применение в инженерной технике. В настоящее время большое

внимание уделяется поиску и созданию ферромагнитных материалов, в основном монокристаллических, со структурой МДС, которая, в свою очередь, под влиянием внешнего магнитного поля приводит к образованию цилиндрических доменов – наиболее перспективных в вычислительной технике. Пленки с МДС нашли также применение в качестве приемников оптического изображения в спектрографических устройствах и т.п.

Из сказанного следует, что изучение магнитной структуры и свойств монокристаллических пленок или пластинок типа $\{100\}$ представляет несомненный интерес. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения.

В первой главе дается обзор экспериментальных и теоретических работ по изучению структуры и магнитных свойств пленок с МДС и модельных представлений этой структуры. Основное внимание в обзоре уделяется методической стороне вопроса, связанной с математической обработкой моделей МДС, где подчеркиваются те преимущества или недостатки, к которым приводит такая обработка. Особое внимание в этом разделе уделяется ряду работ /1-3/, в которых на основании самых общих представлений о распределении намагниченности в образце, удалось решить задачу определения критических параметров образования МДС одноосных пленок.

Во второй части главы рассматривается природа ПА ТФП, которая ответственна за появление в пленке МДС и методы ее измерения. Поскольку мнение о природе ПА пленок к настоящему времени определялось, то этому вопросу уделяется минимальное

внимание.

Вторая глава посвящена теоретическому рассмотрению магнитной структуры и процессам намагничивания и перемангничивания монокристаллических пленок или пластинок типа $\{100\}$ с отрицательной константой кристаллографической анизотропии. Сначала рассмотрены магнитная структура и перемангничивание пленочных монокристаллов толщиной меньше "критической". Здесь показано, что характер магнитной структуры пленок и форма кривых намагничивания и перемангничивания определяются параметром

$$\gamma_0^2 = \frac{2K_2 + K_1 - 4J_s}{3K_1} J_s^2$$

где K_2 и K_1 — константы перпендикулярной и кристаллографической анизотропии, а J_s — намагниченность насыщения. Если $\gamma_0^2 \leq 0$, то \vec{J}_s лежит в плоскости пленки. При $1 \geq \gamma_0^2 > 0$ вектор \vec{J}_s образует с плоскостью пленки острый угол ψ , величину которого можно определить из условия $\sin^2 \psi = \gamma_0^2$, где $\gamma_2^2 = \gamma_0^2$. При $\gamma_0^2 > 1$ вектор \vec{J}_s перпендикулярен плоскости пленки. Здесь же рассчитаны кривые перемангничивания вдоль нормали к плоскости пленки и критические кривые перемангничивания в плоскости симметрии типа (110) перпендикулярной плоскости пленки.

Для пленок, размеры которых ограничены в их плоскости, при анализе кривых намагничивания или перемангничивания необходимо учитывать влияние края пленки на их магнитную структуру. Качественно этот учет должен приводить к образованию в пленке под влиянием ее края структуры макродоменов типа

4

"параллельных полос" или "шахматная доска". Если линейные размеры пленки значительно превышают ее толщину, то ориентация намагниченности внутри макродоменов будет определяться параметром γ_0^2 , а форма необратимых участков петель гистерезиса пленок ограниченных размеров и их коэрцитивная сила будут определяться смещением границ макродоменов и потенциальным рельефом пленки.

Изучены условия образования в пленке МДС при различных параметрах K_2, K_1, J_s . Задача о зарождении в пленке МДС сводится к определению критической толщины $T_{кр}$ и соответствующей ширины микродоменов — $2\lambda_{кр}$ (или периода МДС — $\lambda_{кр} = 2\lambda_{кр}$), начиная с которых в пленке появляется МДС. Из решения соответствующих микромагнитных уравнений методом аналогичным [2] для случая $b_2/J_s^2 \ll 2\beta$, где $b_2 = K_2 + \frac{K_1}{2}$ получено:

$$\lambda_{кр} = 4\sqrt{\frac{A}{b_2}} \quad \text{и} \quad \frac{\lambda_{кр}}{T_{кр}} = 2,$$

где A — параметр обменного взаимодействия. Этот случай соответствует образованию в пленке МДС с полностью замкнутым внутри пленки магнитным потоком ("замкнутая" МДС). Решение микромагнитного уравнения для другого предельного случая $b_2/J_s^2 \sim 2\beta$, соответствующего образованию в пленке МДС с не замкнутым внутри пленки магнитным потоком ("открытая" МДС), дает

$$\lambda_{кр} = 2\sqrt{\frac{A}{b_2 - J_s^2 \frac{\lambda_{кр}}{T_{кр}} (1 - e^{-2\beta T_{кр}/\lambda_{кр}})}}.$$

5

Использование μ^* -коррекции /4/, где $\mu^* = 1 + \frac{2\sqrt{J_s^2}}{6_2}$ позволило получить полуэмпирическую формулу для условия образования МДС с частичным замыканием магнитного потока внутри пленки. В этом случае

$$\lambda_{cp} = 2\sqrt{\frac{2A}{6_2 \cdot Z(\frac{\lambda_{cp}}{T_{cp}})}}, \quad Z(\frac{\lambda_{cp}}{T_{cp}}) = 1 - \frac{1}{2\sqrt{}} \frac{\lambda_{cp}}{T_{cp}} (1 - e^{-2\sqrt{}} \frac{T_{cp}}{\lambda_{cp}}).$$

Из анализа полученных уравнений следует, что при $6_2/J_s^2 \approx (1+2)$, образовавшееся в пленке МДС, по своему характеру ближе к структуре с замкнутым внутри пленки магнитным потоком и может быть хорошо описана моделью, аналогичной /5/. В другом предельном случае $6_2/J_s^2 \approx (2-3)$, образовавшееся в пленке МДС, ближе к "открытой" структуре. В общем же случае образование в пленке МДС соответствует структуре с частичным замыканием магнитного потока внутри пленки.

Далее изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного параллельно МДС, на ширину микродоменов в условиях, близких к зарождению МДС, т.е. для пленок с большой остаточной намагниченностью. Показано, что для широкого интервала значений $6_2/J_s^2$ величина $(\frac{\lambda_0}{\lambda})^2$, где λ_0 - период МДС при $H = 0$, практически является линейной функцией поля. Отклонение от линейности будет наибольшим для значений $6_2/J_s^2$ непосредственно примыкающим к величине $2\sqrt{}$, когда $\frac{\lambda_{cp}}{T_{cp}}$ очень сильно зависит от $6_2/J_s^2$, а также для пленок с малой остаточной намагниченностью.

Наконец, построена модель "открытой" МДС для "закрити-

ческих" пленок в предположении, что ширина границ, разделяющих микродомены, значительно меньше ширины самих микродоменов. Для этого численным методом изучена зависимость энергии границы от угла между векторами намагниченности в соседних микродоменах (2ψ). Показано, что эта зависимость хорошо аппроксимируется первыми членами ряда

$$\sigma(\psi) = 6_0 \sum_n z_n \sin^{2n} \psi, \quad n=1,2,3,\dots$$

где $6_0 = 4\sqrt{AK_1}$, z_n - зависят от отношения $\frac{K_1}{K_2} = \alpha$. В общем случае для описания магнитных свойств "закритических" пленок требуется численное решение из-за характера выражений магнитостатической энергии и энергии границ между микродоменами. Однако, если в выражении для $\sigma(\psi)$ учесть только первый член разложения и воспользоваться Киттелевским приближением для магнитостатической энергии, то это приводит к простому аналитическому соотношению, определяющим магнитные свойства "закритических" пленок. Так, петля гистерезиса "закритической" пленки при ее перемагничивании вдоль МДС в этом случае описывается уравнением:

$$\beta(\beta^2 - \beta_0^2) = h, \quad \beta = \cos \psi, \quad \beta_0^2 = \frac{2K_1 + \left(\frac{2\sqrt{J_s^2} 6_0 z_m}{T}\right)^2 - 2K_2}{3K_1}$$

$h = \frac{H}{3K_1/J_s}$, z_m - зависит от α и для $\alpha = 0$ и I соответственно равно 0,35 и 0,68.

Далее показано, что с ростом толщины "закритической" пленки "открытая" структура переходит в "замкнутую". "Замкнутой" характер структуры имеет место для пленок толщиной

$T \geq T_{кр2}$, где $T_{кр2}$ определяется из сравнения энергии "открытой" МДС и МДС, которая аналогична структуре Ландау-Лифшица.

Третья глава посвящена аппаратуре, методам исследования и магнитным свойствам монокристаллических пленок $Mg-Mn$ феррита. Здесь же дается сравнение выводов теории с экспериментом.

Монокристаллические пленки $Mg-Mn$ феррита, полученные методом химического транспорта из шихты стехиометрического состава $Mg_{0,75}Mn_{0,25}Fe_2O_4$ на подложках скола кристалла MgO , были изготовлены в проблемной лаборатории Куйбышевского педагогического института. Эти пленки обладают рядом особенностей, которые выгодно отличают их от пленок чистых металлов и их сплавов. Прежде всего они обладают достаточной большой кристаллографической анизотропией и сравнительно малой намагниченностью насыщения ($K_1 \approx J_s^2$), что способствует образованию МДС. Кроме того, они оказались прозрачными к свету $He-Ne$ лазера и это позволило использовать магнитооптический эффект Фарадея при их исследовании. Методической особенностью аппаратуры, примененной для изучения пленок $Mg-Mn$ феррита является то, что она позволяет изучать магнитные свойства пленок в относительно высоких магнитных полях, достаточных для насыщения намагниченности. В этом отношении полезным оказалось использование маятниковых магнитных весов /6/ для исследования относительно толстых пленок и магнитооптического эффекта Фарадея для пленок прозрачных к свету $He-Ne$ лазера.

Полученные экспериментально кривые намагничивания и перемагничивания пленок $Mg-Mn$ феррита имеют форму обратных участков, которая хорошо согласуется с выводами теории. Что касается коэрцитивной силы, то она полностью определяется смещением границ макродоменов и значительно меньше, чем это следует из теории. Такое расхождение следовало ожидать, поскольку в теории не учитывалось влияние края пленки.

Так как для сравнения выводов теории с экспериментом для пленок с МДС необходимо знать параметры вещества пленки K_1, K_2, J_s , то на основе анализа кривых намагничивания вдоль нормали к плоскости пленки, нами разработан метод независимого определения K_1 и K_2 .

Рассчитанные этим методом значения K_1 для пленок, полученных в различных технологических циклах, лежат в интервале $(2 \div 10) \cdot 10^4$ эрг/см³, а K_2 соответственно $(2 \div 6) \cdot 10^4$ эрг/см³. Контрольные измерения значений K_1 , выполненные на анисометре с точностью до ошибок измерений, соответствуют данным полученным из формы кривой намагничивания пленок вдоль нормали к их плоскости. По этим данным и значению $J_s = 200$ гс на основе формул, определяющих условия образования МДС, рассчитана критическая толщина, начиная с которой в пленке появляется МДС. Для различных B_2 эти значения лежат в интервале $(0,1-0,75)$ мкм. Экспериментально МДС наблюдается в пленках толщиной свыше одного микрона. Кажущееся расхождение связано с тем, что МДС удается наблюдать в пленках толщиной существенно большей $T_{кр}$, т.е. когда величина нормальной компоненты намагниченности внутри микродоменов до-

менов достаточна, чтобы надежно регистрировать фарадеево вращение или, чтобы соответствующими ей полями рассеяния сформировать порошковые осадки в линии. Соответствие указанного интервала $T_{\text{ср}}$ с реальными значениями $T_{\text{ср}}$ в пленках подтверждается также и косвенными данными, полученными из измерений толщиной зависимости ширины микродоменов.

Анализ параметров материала пленок $Mg-Mn$ феррита, а также данные по наблюдению порошковых осадков позволяют предположить, что зарождающаяся в пленках МДС по своему характеру соответствует МДС с частичным замыканием магнитного потока внутри пленки и ближе к "открытой" МДС. Лучшее соответствие с "открытой" моделью подтверждается также и экспериментальными данными по зависимости периода МДС от поля. Все это дает основания, в известном приближении, использовать построенную в гл. II "открытую" модель МДС для описания магнитных свойств закритических пленок феррита.

Материал диссертации доложен на Всесоюзной конференции по магнетизму в г. Красноярске (июнь 1971 г.) /10/ и опубликован в работах /6-9/.

Литература

1. Murayama J., J.Phys.Soc.Japan, 21, 2253 (1966).
2. Hobz A., Kronmüller H., Phys.Stat.Sol., 31, 787 (1969).
3. Hubert A., Phys.Stat.Sol., 32, 519 (1969).
4. Williams H.J., Bozorth R.M., Sockley W., Phys.Rev., 75, 155 (1949).
5. Криничик Г.С., Чепурова Е.Е. "Физика магнитных пленок", Иркутск, 1968, стр. 149.
6. Антонов Л.И., Чечерников В.И. Сб. "Аппаратура и методы исследования ТФП", Красноярск, стр. 102 (1967).
7. Антонов Л.И., Кошкин Л.И., Нестрелай Т.И. Изв. АН СССР, сер. физич., 34, 1073 (1970).
8. Антонов Л.И., Телеснин Р.В. Сб. "Магнитные свойства ферритов", Куйбышев, 1971 г.
9. Telesnin R.V., Nestrelay T.I., Koshkin L.I., Ikononov N.A., Antonov L.I., Phys.Stat.Sol., 4(a), 805 (1971).
10. Антонов Л.И., Телеснин Р.В. Всесоюзная конференция по магнетизму. Красноярск, 1971, тез. докл. ДТ-5 и АМ-4.

ПОДП. К ПЕЧАТИ 12/1У-72 Г. Л-88004. Ф. 80x80/10
ФИЗ.П.Л. 0,75. ЗАКАЗ 1909. ТИРАЖ 200 ЭКЗ.

ОТПЕЧАТАНО НА РОТАПРИНТАХ В ТИП. ИЗД. МГУ
МОСКВА, ЛЕНГОРЫ

