

УДК 621.347.41

КРИВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ
ПРИ ДЕЙСТВИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ

Л.Н. Стерелюхина

Метод дифференциальной магнитной восприимчивости (ДМВ) находит все большее применение при исследовании свойств тонких магнитных пленок (ТМП) в широком диапазоне частот благодаря своей высокой чувствительности [1-6], которая является следствием использования высокочастотного пробного поля.

До сих пор измерения ДМВ проводились при действии только квазистатического перемангничивающего поля. Цель данной работы состоит в том, чтобы выяснить особенности поведения ДМВ при действии в плоскости пленки дополнительного постоянного поля и провести сравнение экспериментальных данных с теоретическим расчетом, выполненным на основе однодоменной модели. Можно ожидать, что предлагаемый режим перемангничивания при определенном соотношении между амплитудами и ориентациями этих полей позволит повысить точность измерения некоторых магнитных характеристик пленок. Из всех ориентаций полей наибольший интерес представляет случай их взаимно перпендикулярного расположения, когда оба поля действуют под углом 45° к оси легкого намагничивания (ОЛН). Этот интерес обусловлен тем, что однодоменная пленка в данном режиме перемангничивания имеет характерную осо-

бенность при постоянном поле, равном $0,5 H_k$ (H_k - поле анизотропии) [7]. На рис. 1 показана взаимная ориентация дейст-

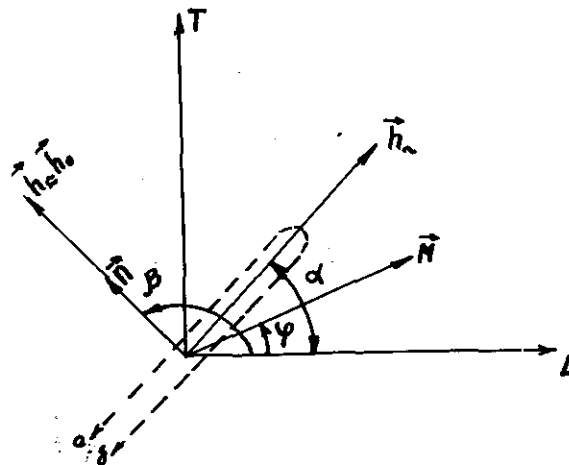


Рис. 1. Схема действия внешних магнитных полей на пленку.

вующих на ТМП полей (постоянного \vec{h}_0 и переменного квазистатического \vec{h}_ω) и ОЛН (L). Направление пробного высокочастотного поля \vec{h}_ω и нормаль \vec{n} к плоскости съемного витка ($\omega\omega$) совпадают с направлением постоянного поля. Угол φ характеризует положение вектора намагниченности \vec{M} относительно ОЛН.

Через α обозначен угол между ОЛН и направлением поля \vec{h}_ω . Согласно определению, в направлении пробного поля ДМВ $\chi = \frac{dM}{dh_\omega}$. Проведя вычисления, аналогичные выполненным в работах [5, 8], для приведенного значения ДМВ $\varepsilon = \frac{\chi}{M/H_k}$ получим выражение:

$$\varepsilon = \frac{\cos^2(\alpha - \varphi_0)}{h_\omega \cos(\alpha - \varphi_0) - h_0 \sin(\alpha - \varphi_0) + \cos 2\varphi} \quad (1)$$

при условии: $1/2 \sin \varphi_0 - h_\omega \sin(\alpha - \varphi_0) - h_0 \cos(\alpha - \varphi_0) = 0$, где φ_0 - равновесный угол между вектором \vec{M} и ОЛН. Поля h_ω и h_0 измерены в единицах H_k . Как видно из выражения (1), ε является функцией величин и направлений внешних полей, дейст-

вущих на пленку. Уравнение (1) было решено на ЭВМ для ряда значений h_0 при $\alpha = 45^\circ$. Расчетные кривые ДМВ, как функция перемещающегося поля h_2 , при различных значениях параметра h_0 представлены на рис. 2, а-ж.

Скачку вектора намагниченности из неустойчивого положения в устойчивое соответствует скачок ДМВ при $h_2 = 0,5$ ($\mathcal{E} \rightarrow \infty$, показано штриховой линией). При значениях поля $h_2 \neq \pm 0,5$ происходит равномерное движение вектора \vec{M} , кривая ДМВ изменяется плавно и имеет для $h_0 = 0$ две симметричные ветви с равными (одинаковыми) максимумами (рис. 2, а). С увеличением напряженности постоянного поля симметрия нарушается: максимум одной ветви растет, другой — уменьшается (рис. 2, б-г), причем положение максимума сдвигается в сторону меньших переменных полей.

Несимметричность кривых ДМВ объясняется тем, что вектор намагниченности, вращаясь в плоскости пленки, находится попеременно под действием либо разности, либо суммы компонент постоянного и переменного внешних полей. При $h_0 = 0,5$ (рис. 2, д) максимум уходит в бесконечность в точке, где значение перемещающегося поля h_2 равно нулю. Как показали расчеты, правая ветвь (1,1) кривой ДМВ с этим бесконечным максимумом точно определяется выражением: $\mathcal{E} = \frac{1}{h_2}$. Существование этой ветви соответствует неподвижному положению вектора \vec{M} вдоль направления переменного поля несмотря на то, что направление и величина суммарного поля меняется [7].

При значениях постоянного поля $h_0 > 0,5$ вращательный режим движения намагниченности переходит в колебательный около направления постоянного поля. Однако гистерезисный характер движения, выражающийся в существовании бесконечных скачков ДМВ, остается вплоть до значения $h_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ (рис. 2, е, ж). Ветвь (2,2) на кривой рис. 2, е соответствует устойчивым состояниям вектора намагниченности, которые не осуществляются при неизменном направлении перемещающегося внешнего поля [7].

При $h_0 > \frac{1}{\sqrt{2}}$ кривая ДМВ имеет плавный характер, что соответствует переходу к обратимому движению вектора намагниченности (рис. 2, з).

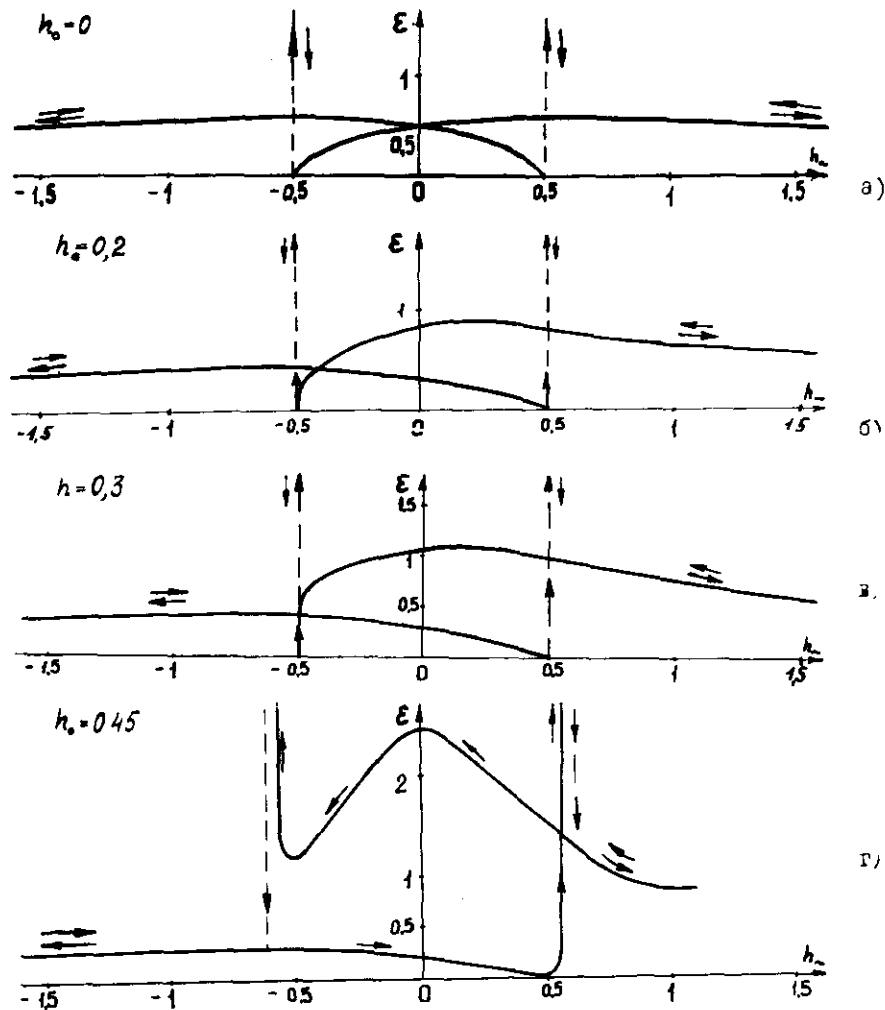
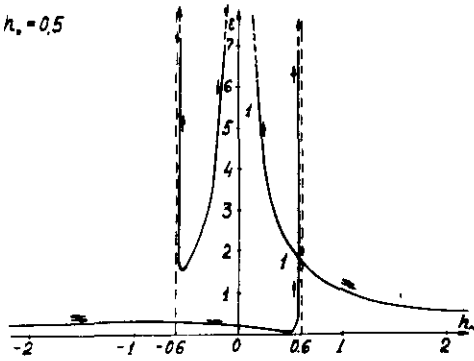


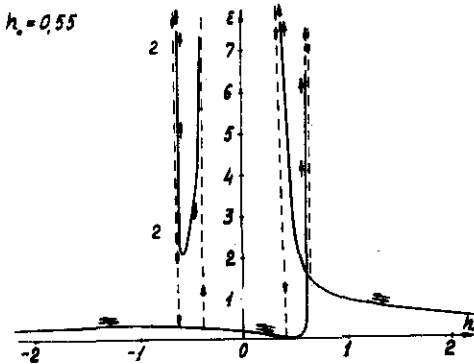
Рис. 2

$h_0 = 0,5$



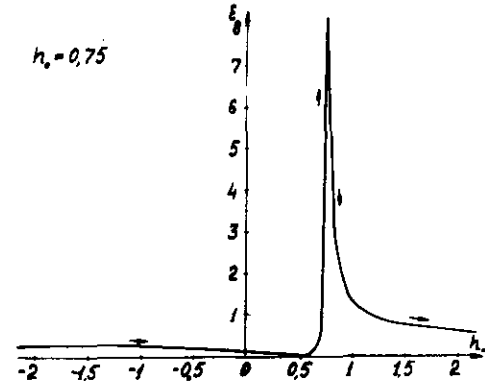
д)

$h_0 = 0,55$



е)

$h_0 = 0,75$



ж)

Рис.2 (д - ж)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА. Измерение кривых ДМВ проводилось на установке, описанной ранее [9]. В качестве исследуемых образцов использовались пермаллоевые пленки состава 80% Ni , 20% Fe , нанесенные вакуумным напылением на стеклянные подложки в виде круглых пятен ($\phi = 5-10$ мм). Частота пробного поля была выбрана 70 мгц. Квазистатическое перемангничивание осуществлялось на частоте 50 гц. На рис. 3 приведены сфотографированные осциллограммы кривых ДМВ одного из образцов для различных зна-

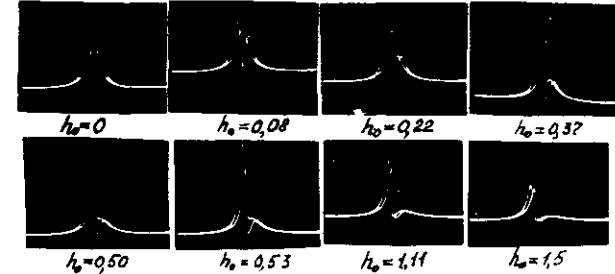


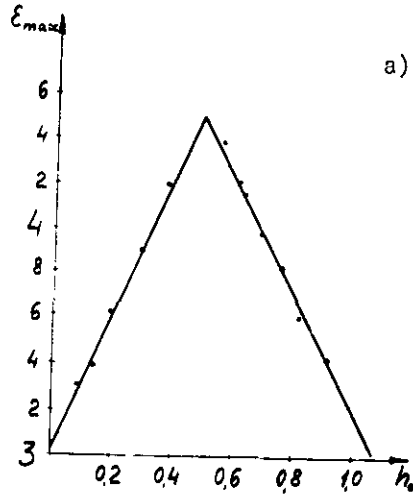
Рис. 3. Осциллограммы кривых ДМВ для различных значений постоянного поля.

чений постоянного поля в единицах H_k . H_k пленок измерялось на петлескопе по начальной проницаемости вдоль оси трудного намагничивания. Из сравнения осциллограмм с теоретическими кривыми ДМВ видно, что форма кривых качественно соответствует расчетной. Пики на осциллограммах соответствуют скачку ДМВ в момент перемангничивания ТМП. Ограниченность амплитуды пиков объясняется наличием в реальной пленке неоднородного распределения внутренних размагничивающих полей.

В эксперименте, как и в случае расчетных кривых при нулевом постоянном поле, имеем симметричную картину. По мере увеличения постоянного поля симметрия нарушается, один из пиков растет, а другой уменьшается. Причем около значения постоянного поля $h_0 = 0,5$ один пик практически исчезает совсем, а амплитуда другого, "растущего" пика достигает максимума и при $h_0 > 0,5$ начинает падать.

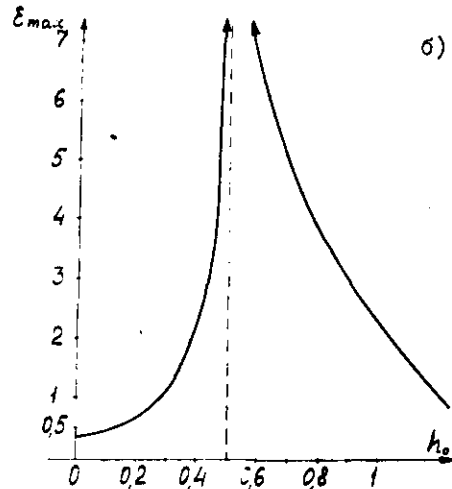
Экспериментально была получена зависимость максимальной величины ДМВ, измеряемой по амплитуде "растущего пика", как

функция постоянного поля (рис. 4, а). Эта кривая была построена по методу наименьших квадратов. Как видно из рис. 4, а, для значений поля $h_0 < 0,5$ наблюдается линейный рост амплитуды ДМВ, а при $h_0 \approx 0,5$ кривая имеет резкий излом. С дальнейшим ростом величины постоянного поля происходит линейный спад амплитуды ДМВ.



а)

Точки ϵ_{max} на теоретической кривой (рис. 4, б) соответствуют максимумам на расчетных кривых ДМВ, показанных на рис. 2, а-ж сплошной линией. Хотя характер этой кривой и отличается от экспериментальной, тем не менее есть и явное сходство: обе кривые имеют максимумы. Причем теоретическая кривая имеет бесконечный максимум при $h_0 = 0,5$, а экспериментальная — ограниченный максимум вблизи точки со значением постоянного поля, равного $0,5 H_K$. Наличие резкого излома на экспериментальной кривой при значении постоянного поля, равного приблизительно $0,5 \cdot H_K$, может быть использовано для измерения H_K ТМП методом ДМВ.



б)

Рис. 4. Кривые максимальных значений ДМВ в зависимости от величины постоянного поля: а) экспериментальная, б) теоретическая.

1. TOROK E.I., WHITE R.A. J.Appl.Phys., 1963, vol.34, p.958.
2. FELDTKELLER E. Z.Phys., 1963, Bd.176, N 4, S.510.
3. FELDTKELLER E. Phys.Lett., 1963, vol.7, N 1, p.9.
4. ЛЕСНИК А.Г., ЛЕВИН Г.И. Измерение магнитных характеристик пермаллоевых пленок методом резонансного поглощения. — Изв. АН СССР, Сер. физ., 1965, т.29, № 4, стр. 560–567.
5. ПОЛИВАНОВ К.М., ФРУМКИН А.Л. Дифференциальная восприимчивость тонких магнитных пленок при однородном вращении намагниченности. — Физ.металлов и металловедение, 1962, т.14, вып. 2, стр. 165.
6. ВЕДОШКИН Г.А., ГУСЕВ О.З., ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., ЗОТОВ Л.Ф., ЛИТВИНЧУК В.И., СТЕРЕЛЮХИНА Л.Н. К вопросу о применении метода дифференциальной магнитной восприимчивости к определению магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок. — Изв. АН СССР, Сер. физ., 1967, т. 31, № 5.
7. КОБЕЛЕВ В.В. Петли гистерезиса одноосных ферромагнитных пленок. — "Магнитные элементы устройств вычислительной техники". М., АН СССР, 1961.
8. ВЕДОШКИН Г.А., ГУСЕВ О.З., ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., ЛИТВИНЧУК В.И., СТЕРЕЛЮХИНА Л.Н. Измерение дифференциальной магнитной восприимчивости ферромагнитных пленок. — "Автоматика", 1965, №3.
9. ВЕДОШКИН Г.А., ГУСЕВ О.З., ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., ЗОТОВ Л.Ф., ЛИТВИНЧУК В.И., СТЕРЕЛЮХИНА Л.Н. Комплекс приборов для измерения дифференциальной магнитной восприимчивости тонких пленок. — "Запоминающие устройства. Тонкие магнитные пленки". М., Наука, 1968.

Поступила в редакцию
20.12.1969 г.