

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОДЛОЖКИ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

К. А. ЕГИЯН, Ю. Г. САНОЯН

Разработаны установка и методика измерения поперечной восприимчивости цилиндрических магнитных пленок. Исследованы два типа пленок — шероховатые и гладкие. Дается модель, объясняющая аномальное поведение восприимчивости шероховатых пленок.

Работы Гофмана и Харта [1—3] по теории ряби и восприимчивости заставили по-новому взглянуть на восприимчивость пленок. Возникла возможность прямого сравнения микромагнитной теории ряби с экспериментом, связать восприимчивость со структурными параметрами пленок. В связи с этим в последние годы появились работы, в которых рассматривалось влияние различных факторов на восприимчивость и производилось сравнение экспериментальных результатов с теоретическими. Однако эти работы в основном выполнены на плоских пленках.

Из работ по цилиндрическим пленкам можно отметить две работы Дойля [4, 5]. В [4] рассматривается зависимость восприимчивости от магнитных свойств пленок, а в [5] изучается влияние внутренних напряжений на восприимчивость. Ни в той, ни в другой работе нет точной методики измерений восприимчивости цилиндрических магнитных пленок, что связано, как мы увидим ниже, с определенными трудностями, не объясняется ряд аномальных свойств восприимчивости цилиндрических пленок.

В данной работе рассматривается методика измерений поперечной восприимчивости цилиндрических пленок $\chi_{\perp, \beta, \gamma} = \chi_{\pi/2, 0, 0}$ (по обозначениям Гофмана [1]) и влияние на нее шероховатости подложки. В нашем случае для $\chi_{\pi/2, 0, 0}$ пробное поле направлено вдоль легкой оси ($\beta = 0$), средний вектор намагниченности лежит вдоль трудной оси ($\varphi = \pi/2$), съем сигнала осуществляется с легкой оси ($\gamma = 0$).

На рис. 1 приводится схема измерительной установки, в основе которой положена мостовая схема. В одном плече моста устанавли-

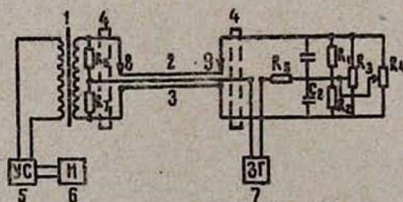


Рис. 1. Схема измерительной установки.

вается цилиндрическая магнитная пленка 2, во втором — подложка без пленки 3. Длина исследуемого образца — 12 см. Чтобы избежать деформации образца используются ртутные контакты 8, 9. Постоянное поле в трудном направлении H создается катушками Гельмгольца 4, позволяющими получать поля до 400 э. Для согласования моста с узкополосным усилителем 5 служит трансформатор 1, напряжение на выходе которого измеряется цифровым вольтметром 6 марки ВК7—10А/1. Для компенсации моста служат сопротивления R_1, R_2 , емкости C_1, C_2 и потенциометры R_3, R_4 . Потенциометром R_3 осуществляется грубая компенсация, а потенциометром R_4 — более тонкая. Сопротивлением R_5 задается ток, подаваемый на пленку от звукового генератора 7, которым определяется величина пробного поля. Частота пробного поля — 10 кГц. Согласно Фельдткеллеру [6], кривые проницаемостей при больших величинах пробного поля искажаются, поэтому оно бралось меньше 0,01 э. В этом случае при $H = 50$ э напряжение на выходе трансформатора было порядка долей микровольт. Помехоустойчивость системы достигалась соответствующей экранировкой и расположением деталей схемы.

При измерении восприимчивости плоских пленок система без пленки устанавливается на нулевой сигнал, в связи с чем после введения пленки в измерительное устройство снимаемый сигнал U пропорционален χ . В случае цилиндрических пленок компенсацию необходимо производить при установленной пленке, поскольку пленка является частью измерительной системы. В этом случае для получения точных данных при компенсации необходимо „заморозить“ намагниченность пленки в очень больших полях. Тогда, согласно [6],

$$U = k\chi = \frac{B}{H - H_k + H_b}, \quad (1)$$

где U — напряжение на выходе усилителя, k — коэффициент пропорциональности между U и χ , B — константа, определяемая свойствами пленок, H — внешнее поле, приложенное в трудном направлении, H_k — поле анизотропии, H_b — эффективное поле рассеяния пленки, которое в больших приложенных полях, как будет показано ниже, постоянно.

При компенсации системы в большом поле H_0 неточность в определении U в рабочем интервале полей составляет

$$\Delta_0 = \frac{B}{H_0 - H_k + H_b}, \quad (2)$$

поскольку сигнал, соответствующий полю H_0 , компенсируется и измеренное значение U оказывается на величину Δ_0 ниже истинного. Поэтому чем больше поле компенсации H_0 , тем выше точность измерения. Если χ измеряется в поле 50 э, то для получения 5% точности необходимо вести компенсацию, по крайней мере, в полях порядка 1000 э, что технически сложно.

В связи с этим разработана методика определения поправки Δ_0 . Для этого в поле H_A , соответствующем верхней границе интервала измерений χ , определяется ряд значений U_i при различных полях компенсации H_i , в несколько раз превышающих H_A . Тогда

$$U_i = U(H_A) - \frac{B}{H_A}, \quad (3)$$

поскольку $H_i \gg H_k + H_b$ ($i = 0, 1, 2, \dots, k$). Вычитая из U_0 соответственно $U_1, U_2, \dots, U_k$, получим новую последовательность

$$\Delta_i = U_0 - U_i = \frac{B}{H_i} - \frac{B}{H_0}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что при $H_i \rightarrow \infty$ или $B/H_i \rightarrow 0$ $\Delta_i \rightarrow \Delta_0 = -B/H_0$, в связи с чем B/H_0 определяется как точка пересечения прямой $\Delta_i(H)$ с осью ординат, если по оси x отложить величину $1/(U_0 - U_i)$. Прибавляя найденную таким образом поправку Δ_0 к измеренным значениям U_j в рабочем интервале, при поле компенсации H_0 находим истинные значения сигнала (как если бы компенсация проводилась в бесконечно большом поле).

В работе измерялась восприимчивость двух типов цилиндрических пленок: гладких и шероховатых [7]. Пленки осаждались на проволоку из бериллиевой бронзы толщиной 0,23 мм. В случае гладких пленок проволока-подложка специально полировалась, для шероховатых пленок после полировки производилось травление поверхности проволоки для создания специального микрорельефа с целью управления свойствами пленок.

Шероховатая пленка имела характерную бугристую поверхность со средним размером бугров 1–2 мкм и амплитудой 0,2–0,25 мкм; размеры неровностей гладкой пленки были порядка сотен ангстрем.

На рис. 2 приведены характерные кривые восприимчивости для гладкой и шероховатой пленок, отнесенные к толщинам образцов.

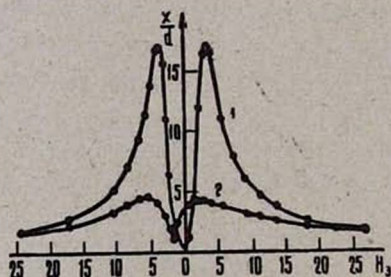


Рис. 2. Кривые восприимчивости гладкой (1) и шероховатой (2) пленок; χ/d — в произвольных единицах, d — толщина пленки.

Гладкая пленка толщиной 1 мкм имела следующие параметры: $H_c = 0,51$ э, $H_k = 2,4$ э, дисперсия анизотропии $\varphi_{80} < 1^\circ$, коэффициент прямоугольности и коэрцитивная сила петли гистерезиса в трудном направлении при перемагничивании в переменном поле с амплитудой

5 э составляли соответственно $K_n = 0,3$ и $H_{ст} = 0,4$ э. Аналогичные параметры для шероховатой пленки толщиной $0,9 \text{ мкм}$ были: $H_c = 1,8$ э, $H_k = 2,8$ э, $\varphi_{80} \sim 2,5^\circ$, $K_n = 0,45$, $H_{ст} = 0,8$ э.

Для получения воспроизводимых результатов по восприимчивости пленки насыщались в трудном направлении полем $H = +350$ э, которое постепенно уменьшалось до значения -50 э. По ходу изменения H в интервале ± 50 э производилось измерение восприимчивости.

Кривые восприимчивости имеют следующие характерные особенности.

1. Максимальная восприимчивость гладкой пленки в несколько раз выше, чем шероховатой. Это же наблюдалось в [4, 8].

3. В случае гладкой пленки первый пик по ходу изменения H от $+200$ э до -200 э выше, чем второй. В случае шероховатой пленки, наоборот, второй пик выше первого. В работе [4] первый пик всегда выше второго.

3. Для шероховатой пленки поле H_{p_1} , соответствующее $\chi_{1\max}$ для первого пика, меньше, чем H_k ; для гладкой — $H_{p_1} > H_k$. Поле H_{p_2} , соответствующее второму пику, как для гладкой, так и для шероховатой пленок больше H_k , причем $H_{p_2}(\text{шер}) > H_{p_2}(\text{глад})$. Для гладкой пленки величины этих полей близки $H_{p_1} = 3,41$ э и $H_{p_2} = 3,72$ э, для шероховатой пленки — $H_{p_1} = 2,08$ э и $H_{p_2} = 5,5$ э. Полуширина пика восприимчивости ΔH на уровне $\chi/2$ у шероховатой пленки существенно больше, чем у гладкой.

4. Для шероховатой пленки минимум χ сдвинут в область отрицательных H . Если для гладкой пленки $H_{\min} = -0,05$ э, то для шероховатой $H_{\min} = -1,62$ э. $\chi_{\min}$ для шероховатой пленки в три раза выше минимума χ гладкой пленки. В поле $H = 0$ проницаемость шероховатой пленки близка к максимальной и $\chi_0 = 0,8 \chi_{\max}$.

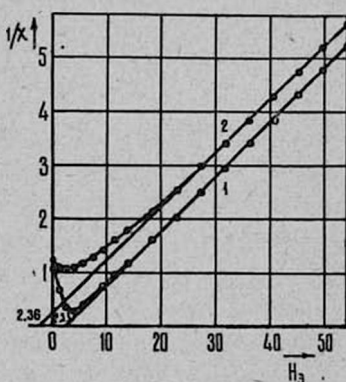


Рис. 3. Зависимость $1/\chi$ от поля в трудном направлении; $1/\chi$ — в произвольных единицах, 1 — гладкая пленка, 2 — шероховатая пленка.

5. На рис. 3 приводится зависимость $1/\chi$ от H . Из рисунка видно, что для гладкой пленки существенное отклонение от прямолинейной зависимости наблюдается при значениях поля меньше 30 э. Экстрапо-

ляция прямолинейных участков кривых к оси абсцисс дает для гладких пленок значение $H' = 2,53$ э, а для шероховатых — $H' = -2,36$ э. Величина H_b в уравнении (1), которая характеризует внутренние эффективные поля рассеяния, в больших полях не зависит от приложенного поля и является постоянной величиной. Для гладких пленок это поле практически равно нулю, поскольку с учетом точности измерения H_k совпадает с H' .

Приведенные особенности поведения гладкой и шероховатой пленок, за исключением того, что у шероховатой пленки $\chi_{1\max} < \chi_{2\max}$, близки к данным Дойля [4]. Согласно его терминологии наши гладкие пленки можно отнести к типу низкодисперсионных, а шероховатые — к пленкам с высокой дисперсией.

Если кривые восприимчивости гладких пленок соответствуют общепринятым теоретическим и экспериментальным данным для плоских пленок [1, 6, 8, 9], поведение шероховатых пленок весьма аномально. В первую очередь это относится к сдвигу H_p в область низких полей, так что $H_p < H_k$. Это отмечалось и в [4], однако объяснения не получило.

Влияние шероховатости на восприимчивость пленок в области полей, значительно превышающих H_k , теоретически изучалось в [10]. Однако поведение χ в области пика в этой работе не анализировалось.

Смещение пика восприимчивости от значения H_k в литературе связывается с влиянием структуры ряби. Поскольку по данным магнитных измерений шероховатые пленки должны обладать существенной рябью, имеет смысл рассмотреть теоретические и экспериментальные данные по этому вопросу. Уже в первой работе по восприимчивости для плоских пленок Фельдткеллер [6] отмечал, что $H_p > H_k$, причем эта разница существенна для пленок с большим отношением H_c/H_k , т. е. в пленках с большой рябью. Согласно расчетам Гофмана по линейной теории ряби [11]

$$H_p - H_k \sim (Ka)^{8/3}, \quad (5)$$

где K — константа кристаллической анизотропии, a — размер кристаллитов. Левер и др. [9] показали, что хотя большим значениям разности $H_p - H_k$ и соответствуют большие значения K , однако однозначной зависимости между ними не наблюдается. В работе [8] было показано, что эта разность существенно увеличивается с увеличением шероховатости плоских пленок. Хотя в последних работах Гофмана разность $H_p - H_k$ непосредственно не вычислялась, однако поскольку пик восприимчивости связан с полем блокировки $h_z > 0$ ($h_z = \frac{H_c - H_k}{H}$),

то теоретически $H_p > H_k$. Действительно, для всех экспериментально исследованных пленок у Гофмана [2, 11] это условие выполнялось. Таким образом, как теоретически, с точки зрения теории ряби, так и экспериментально для плоских пленок $H_p > H_k$.

С целью более глубокого изучения аномалии $H_{p1} < H_k$ нами были проведены дополнительные эксперименты. Кривые восприимчивости снимались при различных начальных состояниях образцов (рис. 4). Для кривой 1 пленка размагничивалась переменным убывающим полем, приложенным вдоль трудного направления. Максимальное значение размагничивающего поля составляло 140 э. Кривая снималась от нулевого значения H до 50 э и аналогичным образом от нуля до -50 э.

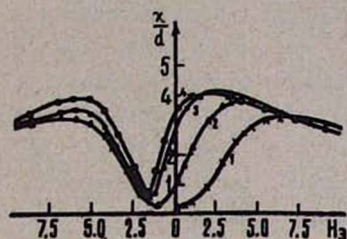


Рис. 4. Кривые восприимчивости шероховатой пленки при различных насыщающих полях: $\times$ — $H = 0$, $\triangle$ — $H = 9$ э, $\blacksquare$ — $H = 45$ э, $\bullet$ — $H = 90$ э; χ/d — в произвольных единицах.

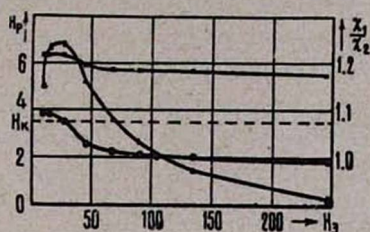


Рис. 5. Зависимость H_{p1} , $|H_{p2}|$ и $\chi_{1\max}/\chi_{2\max}$ от поля насыщения; $\bullet$ — H_{p1} , $\blacksquare$ — H_{p2} , $\triangle$ — $\chi_{1\max}/\chi_{2\max}$.

Кривые, соответствующие положительным и отрицательным H , совпадают, поэтому на графике приводится кривая только для положительных H . Для снятия кривых 2, 3 и 4 после размагничивания пленка насыщалась в трудном направлении в полях 9, 45 и 90 э соответственно, затем поле уменьшалось до -50 э и по ходу изменения H измерялась восприимчивость. Данные рис. 4 относятся к шероховатой пленке. Для гладкой пленки изменения кривых были незначительными.

Результаты измерений указывают на существенную связь кривых восприимчивости шероховатых пленок от их исходного состояния. Как видно из рис. 5, на котором отложены зависимости H_{p1} и H_{p2} от начального поля в трудном направлении, условие $H_{p1} > H_k$ выполняется только для начальных полей, лежащих в области 30 э. С ростом исходного насыщающего поля в дальнейшем происходит уменьшение H_{p1} и величина $H_{p1} - H_k$ становится отрицательной. Меняется не только H_{p1} , но и максимальные величины пиков восприимчивости $\chi_{1\max}$ и $\chi_{2\max}$, причем отношение $\chi_{1\max}/\chi_{2\max}$, которое также приводится на рис. 5, в зависимости от исходного состояния может быть как больше, так и меньше единицы. В исследованной шероховатой пленке $\chi_{1\max}/\chi_{2\max}$ становится меньше единицы при насыщающих полях, превышающих 100 э, поэтому не удивительно, что в работе [4], в которой максимальное поле не превышало 70 э, это отношение было всегда больше единицы.

Полученная зависимость кривых восприимчивости от начальных условий указывает на их резкое отличие от плоских пленок и наводит на мысль, что наблюдаемые в шероховатых цилиндрических пленках аномалии связаны со спецификой этих пленок и, в частности, с особенностями формирования их структуры. Шероховатые пленки осаж-

даются на поверхность никель-фосфорного подслоя, имеющего характерную бугристую топографию, определяемую рельефом травленной поверхности проволоки [7]. С ростом железоникелевой пленки происходит сглаживание бугров, что указывает на различную активность поверхностных выступов и впадин формирующегося осадка. Действительно, согласно адсорбционно-диффузионной теории [12] при электролитическом осаждении на шероховатую поверхность на выступах адсорбируется больше примесных атомов, приводящих к уменьшению скорости осаждения в этих точках. Адсорбент частично захватывается растущей пленкой и образует в ней немагнитные включения, которые обуславливают внутренние напряжения, разброс по составу в микрорегионах из-за разных плотностей тока и т. п. Это приводит к сильному увеличению H_c в шероховатых пленках, имеющих толщину меньше 0,4–0,5 мкм, причем она начинает терять свои анизотропные свойства. В очень тонких слоях, порядка 0,1 мкм и тоньше, пленки, видимо, в основном изотропны и имеют H_c порядка десятков эрстед. В таком случае шероховатые цилиндрические пленки в грубом приближении могут рассматриваться как двухслойные, связанные обменным и магнитостатическим взаимодействиями [13]. Если перед измерением восприимчивости такой образец насыщается полем в трудном направлении, большим, чем максимальное значение H_c нижнего слоя, то последний будет намагничиваться и в дальнейшем при уменьшении H до нуля он не изменит свое магнитное состояние. Тогда из-за обменного и магнитостатического взаимодействий этот слой будет задерживать поворот векторов намагниченности верхнего слоя. Таким образом, этот слой действует как некоторое эффективное постоянное поле в направлении приложенного H , в связи с чем становится понятным смещение H_p в область полей, меньших H_k . Естественно, что если нижний слой находится в размагниченном состоянии, области с направлением намагниченности, обратным приложенному H , из-за большой коэрцитивности будут препятствовать вращению намагниченности верхних слоев, сдвигая H_p вправо, что и наблюдается на эксперименте. При частичном насыщении пик восприимчивости должен занимать положение, промежуточное по отношению к этим крайним случаям.

Таким образом, аномальное поведение восприимчивости шероховатых цилиндрических пленок можно связать со спецификой формирования их структуры и качественно объяснить наличием на границе пленка-подложка тонкого изотропного магнитного слоя с большой коэрцитивностью.

Авторы признательны А. А. Едигаряну и А. Б. Какояну за предоставление образцов.

Поступила 5.VII.1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. H. Hoffmann. Phys. stat. sol., 33, 175 (1969).
2. K. Kempter, H. Hoffmann. Phys. stat. sol., 34, 237 (1969).
3. H. Harte. J. Appl. Phys., 39, 1503 (1968).
4. W. D. Doyle, R. M. Josephs, A. Baltz. J. Appl. Phys., 40, 1172 (1969).
5. W. D. Doyle, T. E. Finnegan. J. Appl. Phys., 39, 3355 (1968).
6. E. Feldtkeller. Z. Physik, 176, 510 (1963).
7. Л. А. Едигарян, К. А. Егиян, А. Б. Какоян, Р. Г. Арутюнян, Г. А. Алаканян. Изв. АН АрмССР, Физика, 6, 34 (1971).
8. R. J. Fairholme, K. D. Leaver. Brit. J. Appl. Phys., D, ser. 2, 2, 1267 (1969).
9. K. D. Leaver, M. Prutton, F. G. West. Phys. stat. sol., 15, 267 (1966).
10. А. Г. Лесник. ФММ, 27, 1000 (1969).
11. H. Hoffmann. Micromagnetic Theory of the Quasistatic Behavior of Thin Films, University of Munich, 1965.
12. H. Hoffman, H. M. Wiedemann. Z. angew. Physik, 30, 117 (1970).
13. Н. П. Гнусин, Н. Я. Коварский. Шероховатость электроосажденных поверхностей, Изд. Наука, Новосибирск, 1970.
14. E. Goto, N. Hayashi, T. Miyashita, K. Nakagawa. J. Appl. Phys., 36, 2951 (1965).

**ՀԻՄՔԻ ԽՈՐԴՈՒԹՈՐԴՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԼԱՆԱՅԻՆ
ՄԱԿԵՆՍԱԿԱՆ ԹԱՂԱՆՔՆԵՐԻ ԸՆԿԱԼՄԱՆ ՎՐԱ**

Կ. Ա. ԵԴԻԳՅԱՆ, ՅՈՒ. Գ. ՍԱՆՈՅԱՆ

Մշակված է սարքավորում և մեթոդ զլանային մագնիսական թաղանթների ընդլայնական չափումների համար: Ուսումնասիրված է երկու տեսակի թաղանթներ՝ ողորկ և խորդուրդ: Բերված է մոդել խորդուրդ թաղանթների ընկալիության անոմալ վարքը բացատրելու համար:

**THE INFLUENCE OF THE SUBSTRATE ROUGHNESS ON THE
TRANSVERSE SUSCEPTIBILITY OF CYLINDRICAL
MAGNETIC FILMS**

K. A. YEGIAN, Ju. G. SANOIAN

The apparatus and methods to measure transverse susceptibility of cylindrical magnetic films have been developed. Rough and smooth films were tried. The model given helps to understand the anomalous behaviour of susceptibility of rough films.