

Г. А. ВЕДЮШКИН, О. Э. ГУСЕВ, Ю. Л. ДАНИЛЕВСКИЙ,  
В. И. ЛИТВИНЧУК, Л. Н. СТЕРЕЛЮХИНА

(Новосибирск)

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК\*

Исследования показали [1, 2], что измерение дифференциальной магнитной восприимчивости ферромагнитных пленок дает возможность получить достаточно полную информацию об их свойствах. В данной работе предлагается простая методика измерения и анализа экспериментальных кривых дифференциальной магнитной восприимчивости при различных взаимных ориентациях внешних полей, съемного витка и оси анизотропии ферромагнитной пленки на основе специально разработанной установки.

Поле анизотропии  $H_k$ , определяющее процессы вращения вектора намагниченности в ферромагнитных пленках, может быть получено из измерений дифференциальной магнитной восприимчивости. Обычно его определяют при низких частотах (порядка 1 кГц), когда исключаются различные динамические процессы в пленках. В этом случае реакция пленки на съемную катушку очень мала, и поэтому измерительные установки существенно усложняются: требуются усилители с большим коэффициентом усиления и съемные катушки с большим числом витков.

Независимость поля анизотропии от частоты дает возможность измерять  $H_k$  при особых условиях и на повышенных частотах, в частности при частоте метрового диапазона, методом дифференциальной магнитной восприимчивости. Последний обладает преимуществами: по сравнению с методом анизометра он гораздо проще, а по сравнению с методом петли гистерезиса позволяет измерять  $H_k$  при  $H_k < H_c$  [3].

Рассмотрим случай, когда на ферромагнитную пленку действуют два поля: низкочастотное (перемещающее) поле  $H$  и высокочастотное (пробное) поле  $h$ , которые образуют с осью легкого намагничивания пленки  $L$  соответственно углы  $\psi$  и  $\beta$  в плоскости пленки (рис. 1).

Дифференциальная магнитная восприимчивость в направлении пробного поля  $h$  определяется

$$\chi = \frac{dI_n}{dh}, \quad (1)$$

где  $dI_n$  — бесконечно малое приращение проекции  $I_n$  вектора  $\vec{I}$ , вызванное изменением пробного поля на величину  $dh$ , на направление этого поля.

Выражение для приведенной дифференциальной магнитной восприимчивости  $\chi_{пр}$  одноименной ферромагнитной пленки для выбранной схемы действия полей дано в [1]

$$\chi_{пр} = \frac{\sin^2(\beta - \varphi_0)}{\cos 2\varphi_0 + h_1 \cos(\psi - \varphi_0)}. \quad (2)$$

Угол  $\varphi_0$  определится из условия равновесия вектора намагниченности:

$$\frac{1}{2} \sin 2\varphi + h_1 \sin(\psi - \varphi) = 0, \quad (3)$$

где  $h_1 = \frac{H}{H_k}$ .

Если пленку поместить в одновитковую съемную петлю, нормаль к которой совпадает с направлением пробного поля  $h$ , то напряжение, наводимое в петле, пропорционально изменению магнитного потока в пленке:

$$e = I \sin(\beta - \varphi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (4)$$

\* Материал доложен на VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1964 г. в Новосибирске.

Проекция вектора намагниченности на направление нормали к плоскости петли равна

$$I_{\text{п}} = I \cos (\beta - \varphi). \quad (5)$$

Тогда

$$\frac{d I_{\text{п}}}{d t} = I \sin (\beta - \varphi) \frac{d \varphi}{d t}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно представить в таком виде:

$$\frac{d I_{\text{п}}}{d h} \cdot \frac{d h}{d t} = I \sin (\beta - \varphi) \frac{d \varphi}{d t}. \quad (7)$$

Сравнив (7) и (1), (7) с (4) и (2) и принимая  $h = h_0 \sin 2 \pi f t$ , где  $f$  — частота ВЧ-поля, а  $h_0$  — амплитуда ВЧ-поля, получим

$$e = 2 \pi f h_0 \cos 2 \pi f \frac{d I_{\text{п}}}{d h} = A \frac{\sin^2 (\beta - \varphi_0)}{\cos 2 \varphi_0 + h_1 \cos (\psi - \varphi_0)}. \quad (8)$$

Таким образом, закон изменения напряжения (8) в съемной петле с точностью до постоянных коэффициентов повторяет закон изменения дифференциальной магнитной восприимчивости (2).

Вычисление коэффициента  $A$  из конструктивных данных установки позволяет измерить не только относительную, но и абсолютную величину дифференциальной магнитной восприимчивости.

Система уравнений (2) и (3) была решена на электронной вычислительной машине (ЭВМ) для ряда значений углов  $\psi$  при взаимно перпендикулярном расположении действующих полей.

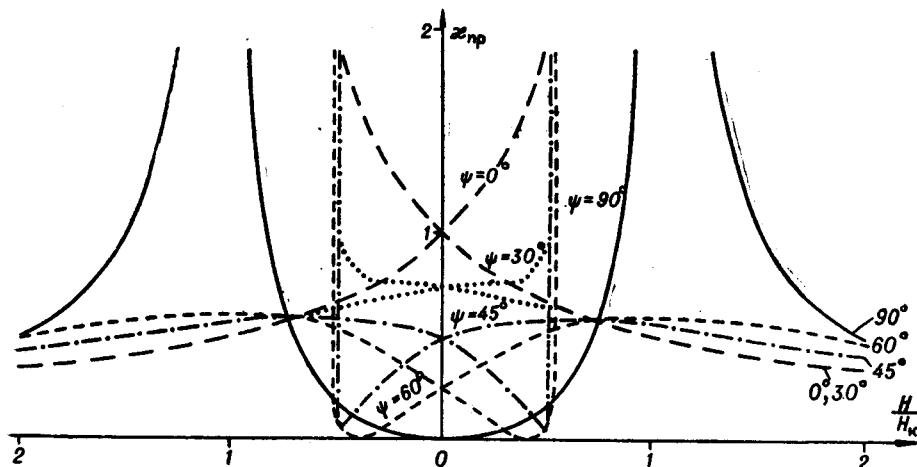


Рис. 2.

Из расчетных кривых видно (рис. 2), что  $z_{\text{пр}} \rightarrow \infty$  при  $h = (\cos^{2/3} \psi + \sin^{2/3} \psi)^{3/2}$ . Но в реальной пленке всегда существует пространственная неоднородность в распределении намагниченности, которая связана с разбросом осей анизотропии и доменной структуры. Эта неоднородность и константа затухания пленок определяют ограничение величины  $z_{\text{пр}}$  при перемагничивании. В эксперименте  $z_{\text{пр}}$  не превышает 10 для исследуемого типа пленок.

При физической интерпретации осциллограмм можно, в частности, измерять  $H_{\text{к}}$  и  $H_{\text{с}}$ , а также судить о процессах перемагничивания в магнитной пленке. Величина  $H_{\text{к}}$  соответствует половине расстояния между двумя максимумами  $z_{\text{пр}}$ , отсчитанными по полю  $H$  при перемагничивании пленки по тяжелой оси, т. е. при  $\psi = 90^\circ$  (рис. 3, а).

Величина коэрцитивной силы смещения  $H_c$  соответствует половине расстояния между двумя максимумами  $\chi_{пр}$ , отсчитанными по полю  $H$  при перемагничивании пленки по легкой оси, т. е. при  $\psi=0^\circ$  (рис. 3, б). Для повышения точности отсчета  $H_k$  и  $H_c$  в случае пологих максимумов применяется дифференцирование сигнала.

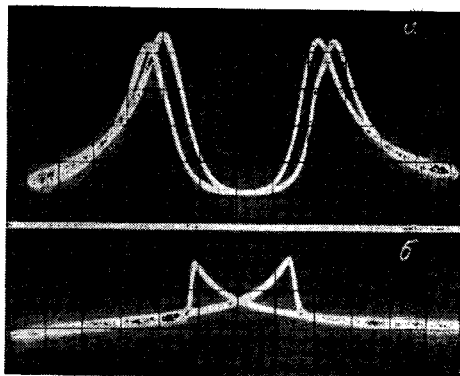


Рис. 3.

Точнее значение  $H_k$  можно определить по данным измерения  $\chi_{пр}$ , соответствующим нескольким значениям напряженности перемагничивающего поля, построив зависимость  $1/\chi_{пр}$  от  $H$ .

Рассмотрим перемагничивание пленки по легкой оси, т. е. при  $\psi=0$ . Выражение (2) приводим к виду:

$$\chi_{пр1} = A \frac{H_k}{H_k - H_1},$$

где  $H_1$  — значение поля, соответствующее выбранному значению  $\chi_{пр}$  на осциллограмме.

Для точки, взятой вблизи  $H_1$ , справедливо соотношение

$$\chi_{пр2} = A \frac{H_k}{H_k - H_2}.$$

Найдем приращение  $\Delta\chi_{пр}$  и выразим его через приращение поля  $\Delta H$ :

$$\frac{\Delta\chi_{пр}}{\chi_{пр}} = \frac{\Delta H}{H_k - H_1},$$

откуда

$$H_k = H_1 - \frac{\Delta H}{\Delta\chi_{пр}} \chi_{пр1}.$$

Таким образом, точки ложатся на прямую, пересечение которой с горизонтальной осью  $H$  дает значение  $H_k$ . Сравнение теоретических кривых (см. рис. 2) с экспериментальными (см. рис. 3, а и б) говорит о довольно хорошем качественном их соответствии.

Метод дифференциальной магнитной восприимчивости позволяет определять не только  $H_k$  и  $H_c$  магнитных пленок, но и амплитудную и угловую дисперсии  $H_k$ , а также магнитные потери.

Информация, получаемая из кривых дифференциальной магнитной восприимчивости, особенно из-за анизотропности свойств ферромагнитных пленок, эффективно может быть использована только с помощью логической обработки на ЭВМ. Полная систематическая обработка данных на ЭВМ позволит вскрыть ряд закономерностей в очень сложной картине перемагничивания тонких ферромагнитных пленок и наладить разработку серийно получаемых образцов по их существенным параметрам.

Блок-схема установки для измерения дифференциальной магнитной восприимчивости ферромагнитных пленок приведена на рис. 4. Исследуемая магнитная пленка подвергается действию двух магнитных полей: перемгничивающего поля  $H$  (50 гц), создаваемого кольцами Гельмгольца, и высокочастотного поля  $h$  (60–180 Мгц), создаваемого в полосковой линии. Полосковая линия питается от стандартных генераторов.

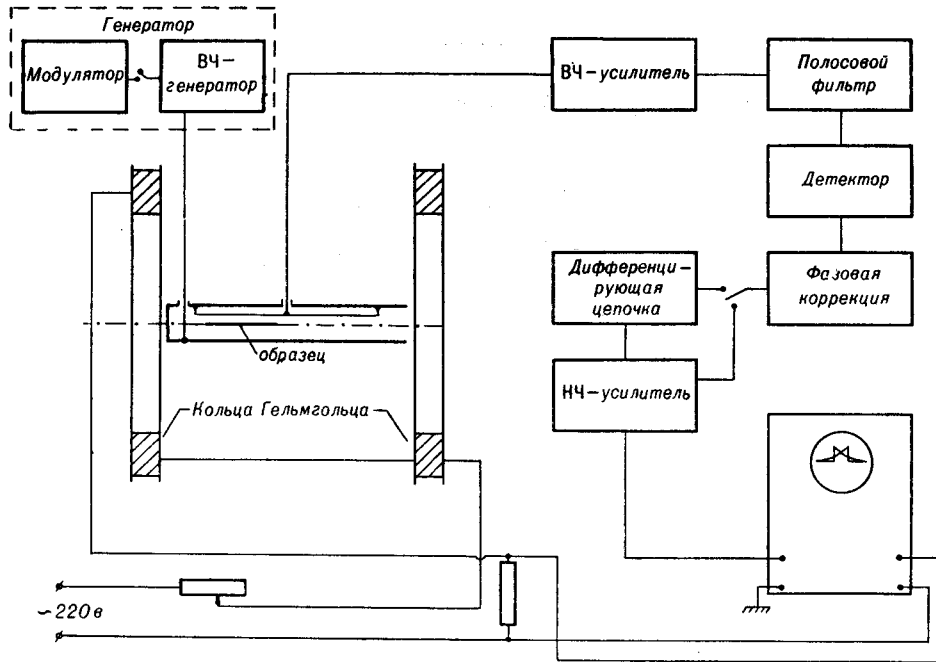


Рис. 4.

Для снятия сигнала с пленки используется высокочастотный мост. Уравновешивание балансного моста производится за счет механической прецизионной подгонки плеч. Сигнал разбаланса составляет не более 1% от максимального сигнала.

В результате взаимодействия магнитных полей с исследуемой пленкой на выходе балансной системы возникает несбалансированный сигнал, пропорциональный дифференциальной магнитной восприимчивости пленки. В схеме предусмотрена коррекция фазы как по каналу сигнала, так и по каналу развертки [4]. Снимаемый ВЧ-сигнал усиливается, фильтруется и детектируется практически без искажений. Выделенный протектированный сигнал с выхода НЧ-усилителя поступает на вертикальный вход осциллографа. Горизонтальная развертка луча осциллографа пропорциональна напряженности перемгничивающего поля  $H$ .

Кольца Гельмгольца и трафарет для образца монтируются на вращающихся лимбах, что позволяет создавать различные комбинации направлений полей относительно оси анизотропии и относительно друг друга.

Используемая в установке оптическая приставка позволяет ориентировать образец с точностью до  $\pm 15'$ . Внешний вид основного блока установки представлен на рис. 5.

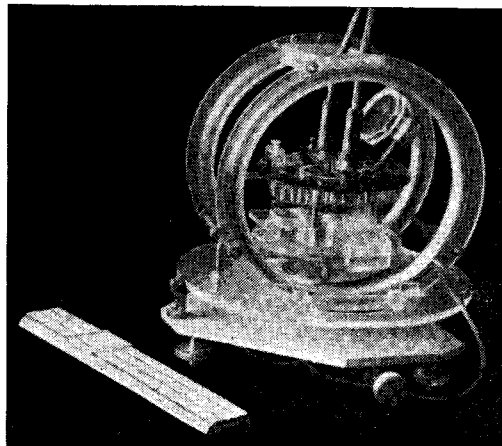


Рис. 5.

Применение ВЧ-поля позволяет уменьшить число каскадов усиления, ограничиться одной съемной петлей, а также дает возможность изучать поведение ферромагнитных пленок в этих полях. Чувствительность установки позволяет получать сигналы с пленок толщиной 0,05 мк при диаметре пятна 1 мм.

В заключение благодарим канд. техн. наук В. Л. Дятлова за постановку задачи и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. М. Поливанов, А. Л. Фрумкин. Дифференциальная восприимчивость тонких магнитных пленок при однородном вращении намагниченности.— Физика металлов и металловедение, 1962, т. 14, вып. 2.
2. А. Л. Фрумкин. Теоретические исследования магнитной проницаемости анизотропных тонких магнитных пленок.— Изв. АН СССР, серия физич., 1962, т. 26, № 2.
3. E. Feldtkeller. Anisotropy magnetude of thin magnetic films.— Physics Letters, 1963, v. 7, № 1.
4. Г. С. Векслер. Фазовые искажения в каналах  $B$  и  $H$  при осциллографировании гистерезисных петель ферромагнетиков.— Журнал технической физики, 1953, т. 23, вып. 5.
5. E. Feldtkeller. Suszeptibilitätsmessungen an anisotropen Nickeleisen — Schichten.— Zeitschrift für Physik, 1963, Bd. 176, № 4.

*Поступила в редакцию  
15 февраля 1965 г.*