

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, КОНТРОЛЬНЫЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.412

Г. А. ВЕДЮШКИН

(Новосибирск)

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ РАДИОСПЕКТРОМЕТРОВ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ*

Метод магнитной восприимчивости, включающий в себя исследование сигналов ферромагнитного резонанса и радиочастотных потерь, широко используется при изучении физических свойств тонких магнитных пленок (ТМП) [1—7]. Для исследования ферромагнитного резонанса и изучения сигналов радиочастотных потерь ТМП создана соответствующая радиоаппаратура. Указанная аппаратура представляет собой специальные радиоспектрометры, работающие в зависимости от поставленной задачи либо на фиксированной частоте [5, 8, 9], либо в диапазоне частот пробного поля [10—12].

В радиоспектрометрах магнитной восприимчивости пробное и перематнивающее магнитные поля приложены в плоскости тонкопленочного образца под углом 90° друг к другу. Схема действия полей и расположение оси легкого намагничивания (ОЛН) и петли съема (там, где петля отсутствует, указывается продольная ось симметрии полосковой линии) представлены на рис. 1, где h_{\sim} — пробное поле; H — поле перематничивания; ОЛН — ось легкого намагничивания; СВ — съемный виток; ОС — продольная ось симметрии полосковой линии; β — угол между направлением пробного поля и осью симметрии; ψ — угол между направлением перематнивающего поля H и осью симметрии; Θ — угол между ОЛН и осью симметрии.

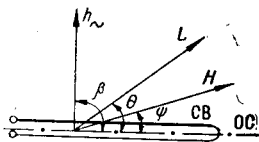


Рис. 1. Схема действия магнитных полей.

В процессе изменения условий перематнивания форма сигналов магнитной восприимчивости не остается неизменной. Более того, именно эти изменения формы несут полезную информацию о магнитных свойствах ТМП [13—16].

В настоящей работе исследованы изменения формы сигналов радиочастотных потерь и ферромагнитного резонанса, несущие полезную информацию о свойствах ТМП, произведен Фурье-анализ этих сигналов, на основе которого дана рекомендация по выбору полосы пропускания измерительных трактов радиоспектрометров магнитной восприимчивости.

* В целях упрощения записи термин «дифференциальная магнитная восприимчивость» всюду заменен термином «магнитная восприимчивость».

Ввиду того, что сигналы магнитной восприимчивости можно рассматривать как периодические функции, удовлетворяющие условиям Дирихле, оказалось возможным для изучения изменения их формы применить метод гармонического анализа и оценить эти изменения с помощью коэффициентов Фурье. Разложению в ряд Фурье

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kx \quad (1)$$

подвергались экспериментальные сигналы радиочастотных потерь и ферромагнитного резонанса, получаемые с установок [11, 12].

Сравнение теоретических и экспериментальных кривых магнитной восприимчивости (кривые 1, 2, 3 на рис. 2, ∂) и активной ширины их спектров показало хорошее соответствие теории с экспериментом, что дало возможность произвести выбор полосы пропускания измерительных трактов радиоспектрометров на основе изучения гармонических спектров экспериментальных сигналов, полученных при различных условиях перемагничивания на широкополосной аппаратуре. Аппаратура, примененная в эксперименте, обладала широкой (3 кГц) и равномерной (10%) полосой пропускания низкочастотного тракта и позволяла при частоте перемагничивания $F_m = 50$ гц передавать на индикаторное устройство спектр сигнала до шестидесятой гармоники включительно. Кривые магнитной восприимчивости были получены с тонких плоских пермалловых пленок с одноосной анизотропией, имеющих форму круга диаметром 3—5 мм, толщиной около 1000Å, напыленных в вакууме на стеклянные подложки $18 \times 18 \times 0,3$ мм.

Расчет коэффициентов Фурье был проведен в соответствии со схемой группирования для 24 ординат [17] и схемой Нанси Клок и М. Г. Сребренникова для 48 ординат [18]. Последняя схема позволяет произвести разложение в ряд до 24-й гармоники. Для определения достаточности такого числа членов разложения исследуемый импульс был аппроксимирован прямоугольным импульсом с длительностью, равной активной длительности исследуемого импульса $\tau_{и. а}$. Известно, что активная ширина спектра прямоугольного импульса, содержащая по определению 95% энергии, описывается следующим выражением [19]:

$$\Delta f_{и. а}^* = \frac{2}{\tau_{и. а}}. \quad (2)$$

При частоте перемагничивания $F_m = 50$ гц и $\tau_{и. а} = 1,66$ мсек гармоника наивысшей частоты активной ширины спектра составляет

$$\frac{\Delta f_{и. а}}{F_m} = 24.$$

Исследуемый импульс более гладкий, чем аппроксимирующий; это позволяет считать, что активная ширина спектра исследуемого импульса не превышает активной ширины спектра прямоугольного импульса. Следовательно, разложение в ряд с числом членов, превышающим 24, целесообразно.

На рис. 2, $a - \partial$ представлены формы сигналов радиочастотных потерь при различной ориентации ТМП относительно направлений магнитных полей и петли съема ($\Theta = \text{var}$; $\beta = 90^\circ$; $\Psi = 0^\circ$), а на рис. 2, $a' - \partial'$ — результаты разложения этих сигналов в ряд Фурье до 24-й гармоники включительно. Можно видеть, что наиболее широкий гармонический спектр наблюдается при перемагничивании ТМП вдоль ОЛН (см.

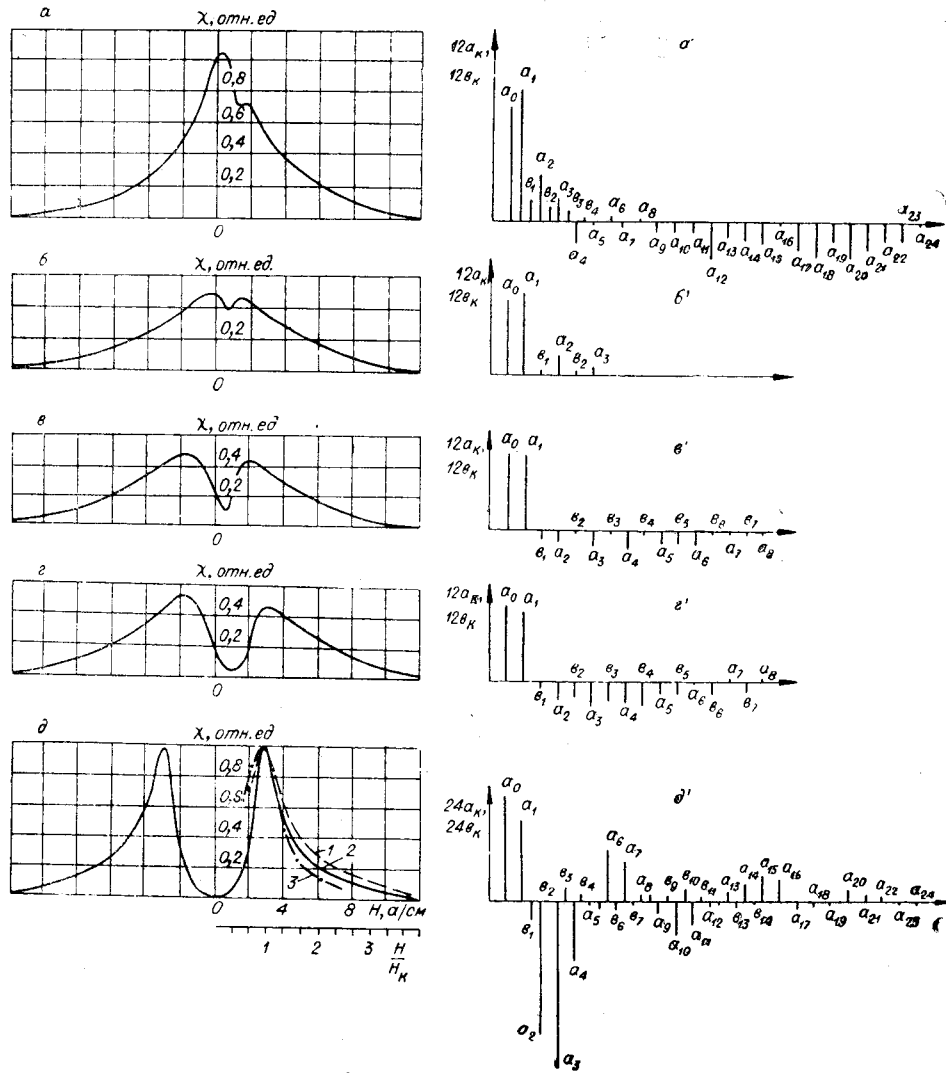


Рис. 2. Формы сигналов радиочастотных потерь и их частотные спектры: $a - \Theta=0^\circ, \beta=90^\circ, \Psi=0^\circ$; a' — спектр сигнала рис. 2, a ; $б - \Theta=30^\circ, \beta=90^\circ, \Psi=0^\circ$; $б'$ — спектр сигнала рис. 2, $б$; $в - \Theta=45^\circ, \beta=90^\circ, \Psi=0^\circ$; $в'$ — спектр сигнала рис. 2, $в$; $г - \Theta=60^\circ, \beta=90^\circ, \Psi=0^\circ$; $г'$ — спектр сигнала рис. 2, $г$; $д - \Theta=90^\circ, \beta=90^\circ, \Psi=0^\circ$; $д'$ — спектр сигнала рис. 2, $д$. Частота перемангничивания 50 гц, частота пробного поля 70 Мгц. На рис. 2, $д$: 1 — теоретическая кривая χ , рассчитанная Фельдткеллером; 2 — экспериментальная кривая χ ; 3 — теоретическая кривая χ , рассчитанная Хоффманом с учетом риппл-структуры. Для кривых 1, 3 [22] ось абсцисс проградуирована в относительных единицах H/H_k .

рис. 2, a' , где $\Theta=0^\circ, \beta=90^\circ, \psi=0^\circ$) и вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) (см. рис. 2, $д'$, где $\Theta=90^\circ; \beta=90^\circ; \psi=0^\circ$).

Если принять в качестве активной ширины спектра полосу, содержащую 95% энергии от энергии 24 гармоник, то в первом случае активная ширина спектра простирается до 20-й гармоники, а во втором — до 10-й включительно. Основной вклад в формирование сигнала рис. 2, $д$ вносят косинусоидальные составляющие спектра; наличие синусоидальных составляющих свидетельствует о несимметрии сигнала относительно нуля, имеющей место в полях, меньших H_k .

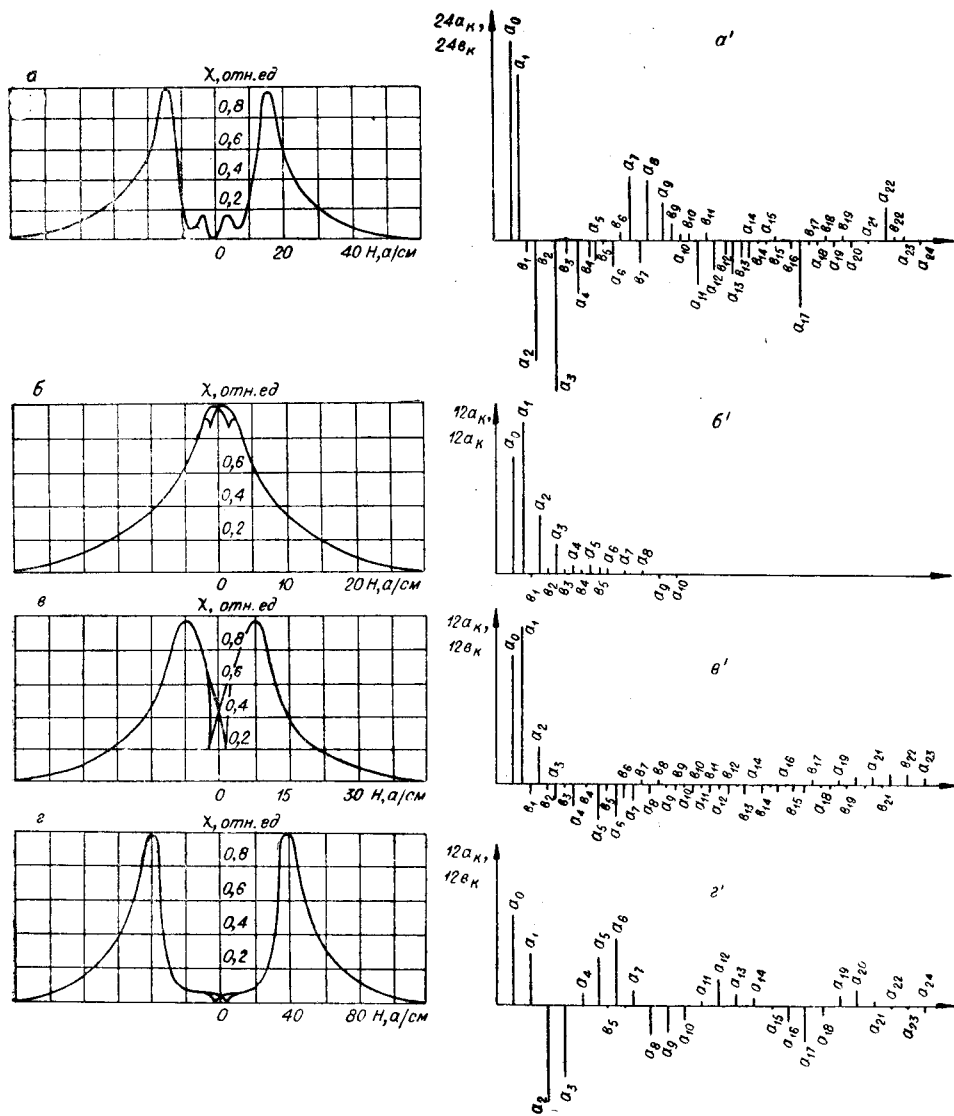


Рис. 3. Форма сигналов ферромагнитного резонанса:
 $a - \theta = 90^\circ, \beta = 90^\circ, \Psi = 0^\circ$; a' — спектр сигнала рис. 3, a на частоте 1020 Мгц; $б - \theta = 0^\circ, \beta = 90^\circ, \Psi = 0^\circ$;
 $б'$ — спектр сигнала рис. 3, $б$ на частоте 530 Мгц; $в$ — то же, на частоте 810 Мгц; $в'$ — спектр
сигнала рис. 3, $в$; $г$ — то же, на частоте 1900 Мгц; $г'$ — спектр сигнала рис. 3, $г$.

Сигналы радиочастотных потерь (см. рис. 2) были получены на частоте пробного поля 70 Мгц. Исследования сигналов магнитной восприимчивости в диапазоне частот 20 Мгц — 2 Ггц показали, что до частот 500—600 Мгц они не проявляют ярко выраженной частотной зависимости, кроме обычного увеличения амплитуды с повышением частоты и небольших изменений формы. Однако с повышением частоты от 500 Мгц сигналы, соответствующие перемагничиванию по ОН, проявляют частотную зависимость, которая выражается в перемещении пиков (теперь уже пиков ферромагнитного резонанса) в сторону больших полей; в области малых полей сохраняются небольшие пики нерезонанс-

ного поглощения, характеризующие процесс перемагничивания [20, 21]. На рис. 3, *a* представлена осциллограмма такого сигнала на частоте 1020 *Мгц*, а на рис. 3, *a'* — результаты разложения сигнала в ряд Фурье. Активная ширина спектра сигнала по сравнению со спектром рис. 2, *д'* расширилась до 16-й гармоники. Еще большие изменения претерпевает сигнал, соответствующий перемагничиванию ТМП вдоль ОЛН (см. рис. 2, *a*); на рис. 3, *б* — *г* показаны последовательно, с увеличением частоты (530, 810, 1900 *Мгц* соответственно) появление и отделение пиков ферромагнитного резонанса от пиков нерезонансного поглощения. Частотный спектр сначала сужается (см. рис. 3, *б'*), а затем расширяется и усложняется (см. рис. 3, *в'*, *г'*). Активная ширина спектра сигнала рис. 3, *в* включает 6 гармоник и сигнала рис. 3, *г* — 16 гармоник. Пройдя все стадии превращений, сигнал ферромагнитного резонанса при $\Theta=0^\circ$ (см. рис. 3, *г*) мало отличается от сигнала ферромагнитного резонанса при $\Theta=90^\circ$ (см. рис. 3, *a*). Различие этих сигналов заключается в величине полей, соответствующих точке резонанса, и в форме пиков нерезонансного поглощения.

Выводы

Наиболее сложные частотные спектры наблюдаются у сигналов радиочастотных потерь и ферромагнитного резонанса при перемагничивании вдоль ОЛН и ОТН.

Характер амплитудных и фазовых изменений некоторых гармоник (например, второй и третьей) при исследовании магнитной восприимчивости в условиях $\Theta=\text{var}$, $\beta=90^\circ$, $\Psi=0^\circ$ (см. рис. 2) может быть использован для определения осей анизотропии ТМП.

Искомая полоса пропускания видеотрактов радиоспектрометров магнитной восприимчивости может быть определена из условия $\Delta f \gg \geq 20 F_m$.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность канд. техн. наук В. Л. Дятлову за общую постановку задачи и канд. техн. наук В. С. Соболеву за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Soohoo. Initial Susceptibility Spectra of Permalloy Films.— J. Appl. Phys., 1960, v. 31, Suppl., № 5.
2. T. E. Hasty, L. J. Boudreaux. Ferromagnetic Resonance in Thin Magnetic Films at Radio-frequencies.— J. Appl. Phys., 1961, v. 32, № 9.
3. А. Л. Фрумкин. Теоретическое исследование магнитной проницаемости анизотропных тонких магнитных пленок.— Изв. АН СССР, серия физич., 1962, т. 26, № 2.
4. К. М. Поливанов, А. Л. Фрумкин. Дифференциальная восприимчивость тонких магнитных пленок при однородном вращении намагниченности.— Физика металлов и металловедение, 1962, т. 14, вып. 2.
5. А. Г. Лесник, Г. И. Левин. Измерение магнитных характеристик пермаллоевых пленок методом резонансного поглощения.— Изв. АН СССР, серия физич., 1965, т. 29, № 4.
6. G. P. Weiss D. O. Smith. Annealing of Oblique-incidence Permalloy Films.— J. Appl. Phys., 1961, v. 32, Suppl., № 3.
7. Г. А. Ведюшкин, О. З. Гусев, Ю. Л. Данилевский, Л. Ф. Зотов, В. И. Литвинчук, Л. Н. Стерелюхина. К вопросу о применении метода дифференциальной магнитной восприимчивости к определению магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок.— Изв. АН СССР, серия физич., 1967, т. 31, № 5.

8. Л. В. Киренский, В. А. Игнатченко, О. Г. Бакланов. Ферромагнитный резонанс в тонких пленках.—Изв. АН СССР, серия физич., 1961, т. 25, № 5.
9. Б. М. Абакумов, В. Г. Шуняев. Прибор для измерения параметров тонких ферромагнитных пленок с одноосной анизотропией методом радиочастотных потерь.—Приборы и системы управления, 1967, № 11.
10. Г. А. Ведюшкин, О. З. Гусев, Ю. Л. Данилевский, В. И. Литвинчук, Л. Н. Стерелюхина. Измерение дифференциальной магнитной восприимчивости ферромагнитных пленок.—Автометрия, 1965, № 3.
11. Г. А. Ведюшкин, О. З. Гусев, Ю. Л. Данилевский, Л. Ф. Зотов, В. И. Литвинчук, Л. Н. Стерелюхина.—Прибор для измерения дифференциальной магнитной восприимчивости.—ПНТПО, № 18—67—394/37. М., ГОСИНТИ, 1967.
12. Г. А. Ведюшкин, О. З. Гусев, Л. Ф. Зотов, В. И. Литвинчук, И. Н. Моренко, В. В. Якушкин. Установка для измерения параметров тонких ферромагнитных пленок.—Изв. АН СССР, серия физич., 1966, т. 30, № 1.
13. F. Vesciai, I. J. Hutchings, E. D. Jacobs, W. L. Zinger y. Ferromagnetic Resonance Measurements in Ni—Fe Films From 2—100 Mc/sec.—J. Appl. Phys., 1965, v. 36.
16. А. Г. Лесник, Л. М. Сандлер. Исследование влияния дефектов, создаваемых пластической деформацией, на магнитную анизотропию пермалловых пленок.—Украинский физический журнал, 1967, т. 12, № 10.
17. Я. С. Безикович. Приближенные вычисления. Л.—М., Гостехиздат, 1941.
18. М. Г. Серебренников. Гармонический анализ. М.—Л., Гостехиздат, 1948.
19. Справочник по радиоэлектронике. Под ред. А. А. Куликовского. М., «Энергия», 1967.
20. Р. В. Телеснин, В. И. Козлов. Квазистатическое перемагничивание тонких ферромагнитных пленок при воздействии на них СВЧ-поля.—Изв. АН СССР, серия физич., 1966, т. 30, № 1.
21. Н. С. Чистяков, В. А. Игнатченко. Сверхвысокочастотная восприимчивость тонких ферромагнитных пленок в слабых магнитных полях.—Изв. АН СССР, серия физич., 1966, т. 30, № 1.
22. K. D. Leaver, M. Prutton, F. G. West. Susceptibility Measurements and the magnetocrystalline anisotropy of polycrystalline ferromagnetic films.—Phys. stat. sol., 1966, v. 15, № 1.

*Поступила в редакцию
8 апреля 1968 г.,
окончательный вариант —
23 октября 1968 г.*