

## Особенность высокочастотной восприимчивости тонких магнитных пленок с одноосной анизотропией

Б. А. Беляев<sup>1)</sup>, А. В. Изотов, С. Я. Кипарисов\*

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отд. РАН, 660036 Красноярск, Россия

\* Красноярский государственный университет НИИЦ “Кристалл”, 660041 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 24 июля 2001 г.

На одноосных магнитных пленках в спектрах ферромагнитного резонанса обнаружен острый пик магнитной восприимчивости в планарном поле, направленном ортогонально к оси легкого намагничивания, вдоль которой ориентировано высокочастотное магнитное поле накачки. Ширина пика значительно уже ширины линии однородного ферромагнитного резонанса, а его положение в поле, равном полю анизотропии пленки, не зависит от частоты накачки. Природа пика связана с резким увеличением статической перпендикулярной восприимчивости пленки вблизи поля анизотропии. Феноменологически показано, что обнаруженный пик можно наблюдать лишь на качественных образцах с малой угловой и амплитудной дисперсией одноосной анизотропии.

PACS: 75.70.-i, 75.90.+w

Известно, что в спектре ферромагнитного резонанса (ФМР) магнитных пленок в однодоменном состоянии, обладающих одноосной магнитной анизотропией в плоскости, при развертке планарного магнитного поля перпендикулярно к оси легкого намагничивания (ОЛН) наблюдается один или два резонансных пика в зависимости от частоты накачки [1]. Величину резонансных полей этих пиков можно определить из уравнений

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 &= \left(\frac{H_k^2 - H^2}{H_k}\right)(4\pi M_s + H_k), \quad H \leq H_k, \\ \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 &= (H - H_k)(4\pi M_s + H_k), \quad H \geq H_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота магнитного поля накачки;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $H_k$  – поле одноосной магнитной анизотропии;  $H$  – поле ФМР;  $M_s$  – намагниченность насыщения.

Нами на магнитных пленках Co-Ni-P в спектре ФМР обнаружен еще один острый пик, ширина линии которого на порядок меньше ширины линии однородного ферромагнитного резонанса. Спектры снимались с локальных участков образцов на автоматизированном сканирующем спектрометре ФМР [2]. Локальность измерений определялась диаметром измерительного отверстия в микрополосковом резонаторе датчика  $\approx 1 \text{ мм}^2$ .

Магнитные пленки толщиной 0.05–1.0 мкм получались химическим осаждением из раствора [3] при

температуре 96–97 °С на подложки размером  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ . В качестве материалов подложек использовались стекло, плавненный кварц и монокристаллические пластины GaAs, при этом, независимо от материала подложки, пленки имели рентgenoаморфную структуру. Микроструктурные исследования пленок проводились на электронном просвечивающем микроскопе ПРЭМ-200 и показали, что пленка состоит из микрокристаллитов с размерами 20–60 Å. Состав пленок изменялся в пределах  $\text{Co}_{65-70}\text{-Ni}_{32-27}\text{-P}_{3-5}$  весовых процентов и контролировался рентгеноспектральным флуоресцентным анализом [4]. Планарная одноосная магнитная анизотропия  $H_k = 25 - 30 \text{ Э}$  наводилась однородным магнитным полем  $H = 3 \text{ кЭ}$ , прикладываемым в плоскости подложек во время осаждения пленок. Измерение магнитных характеристик на локальных участках образцов [5] показали достаточно высокую их однородность в центральной части размерами  $\sim 6 \times 6 \text{ мм}^2$ . Например, для образца толщиной 0.3 мкм эффективная намагниченность насыщения изменялась от точки к точке всего лишь в пределах  $M_s = 1100 \pm 20$ , отклонение направления осей легкого намагничивания на локальных участках пленки от средней не превышало  $\pm 0.4^\circ$ , а отклонение поля анизотропии от средней  $H_k = 28 \text{ Э}$  было меньше 0.5 Э. На рис.1 для этого образца представлены спектры ферромагнитного резонанса, снятые на трех частотах накачки с его центрального участка. Магнитное поле в эксперименте было ориентировано строго перпендикулярно оси легкого намагничивания. Независимо от частоты накачки, на всех спектрах в одном

<sup>1)</sup>e-mail: belyaev@iph.krasn.ru

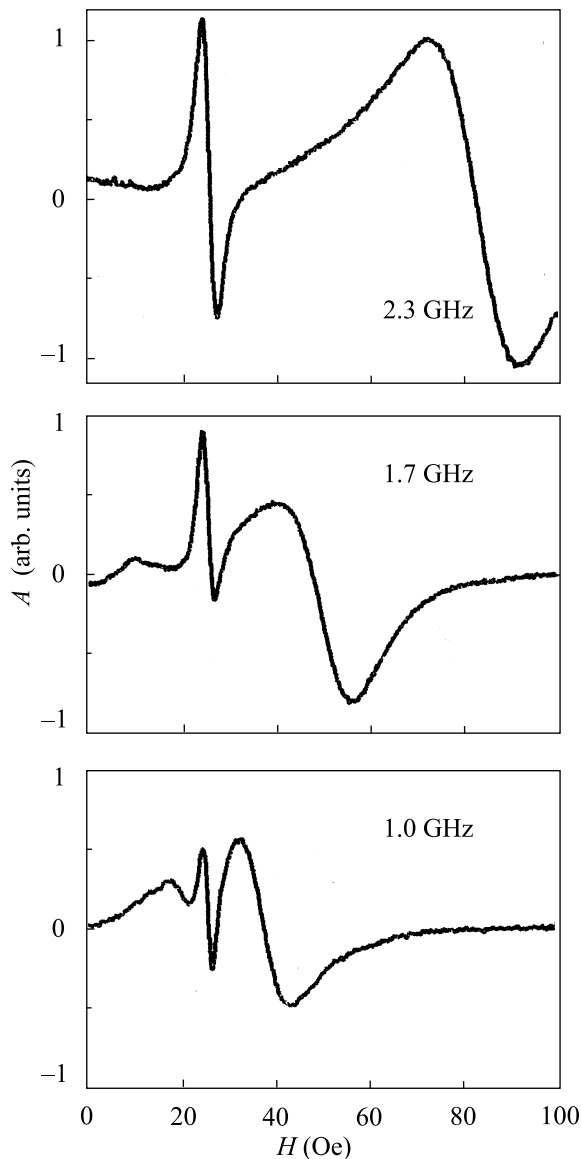


Рис.1. Спектры ферромагнитного резонанса на различных частотах накачки

и том же магнитном поле, равном полю одноосной магнитной анизотропии  $H_k = 28$  Э, наблюдается интенсивный острый пик, ширина которого значительно меньше ширины линии однородного ферромагнитного резонанса. Для исследуемого участка образца на рис.2 сплошными линиями показаны зависимости резонансной частоты однородного ферромагнитного резонанса от поля ФМР, рассчитанные по формулам (1), а точками показаны результаты измерений. Штриховая вертикальная линия соединяет точки максимальной восприимчивости обнаруженного в спектре ФМР нового пика. Следует отметить, что амплитуда этого пика быстро падает с уменьшением частоты накачки ниже 1 ГГц вследствие подавления его

сближающимися пиками однородного ферромагнитного резонанса. В результате на частоте 0.2 ГГц этот пик уже практически не виден. С увеличением частоты накачки выше 2.6 ГГц амплитуда пика монотонно падает, что, очевидно, можно объяснить проявлением скин-эффекта. Важно также отметить, что при нарушении ортогональности направления оси легко-

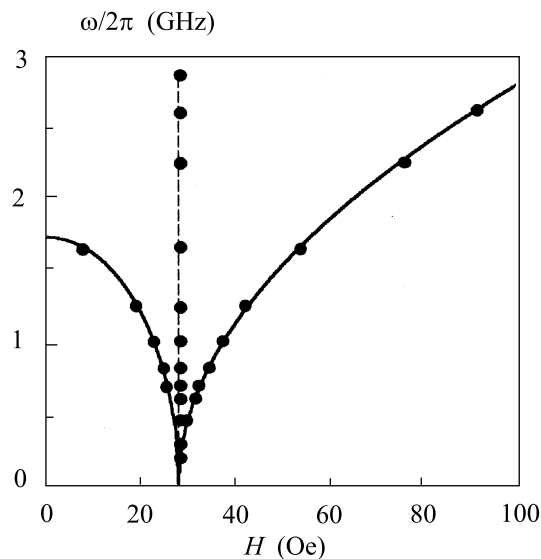


Рис.2. Зависимости резонансных частот от поля ФМР

го намагничивания от направления поля  $H$  в ту или иную сторону всего на  $1^\circ$  обнаруженный пик практически исчезает (рис.3).

Выявленные закономерности в поведении обнаруженного пика позволяют предположить, что его природа связана со статической восприимчивостью магнитной пленки. Действительно, на кривой намагничивания пленки перпендикулярно ОЛН при магнитном поле, равном полю анизотропии образца, наблюдается излом [1], который показывает неустойчивость магнитного момента в этой точке. Поэтому здесь резонно ожидать увеличения перпендикулярной магнитной восприимчивости.

Рассмотрим модель безграничной магнитной пленки в плоскости  $x - y$ , в которой внешнее магнитное поле  $H$  направлено под углом  $\theta_H$  к оси  $x$ , а ось легкого намагничивания одноосной магнитной анизотропии направлена под углом  $\theta_n$  к  $x$ . В этом случае равновесный угол  $\theta_M$ , характеризующий наклон вектора намагниченности  $M_s$  к оси  $x$ , определяется из уравнения

$$H \sin(\theta_H - \theta_M) + \frac{1}{2} H_k \sin 2(\theta_n - \theta_M) = 0, \quad (2)$$

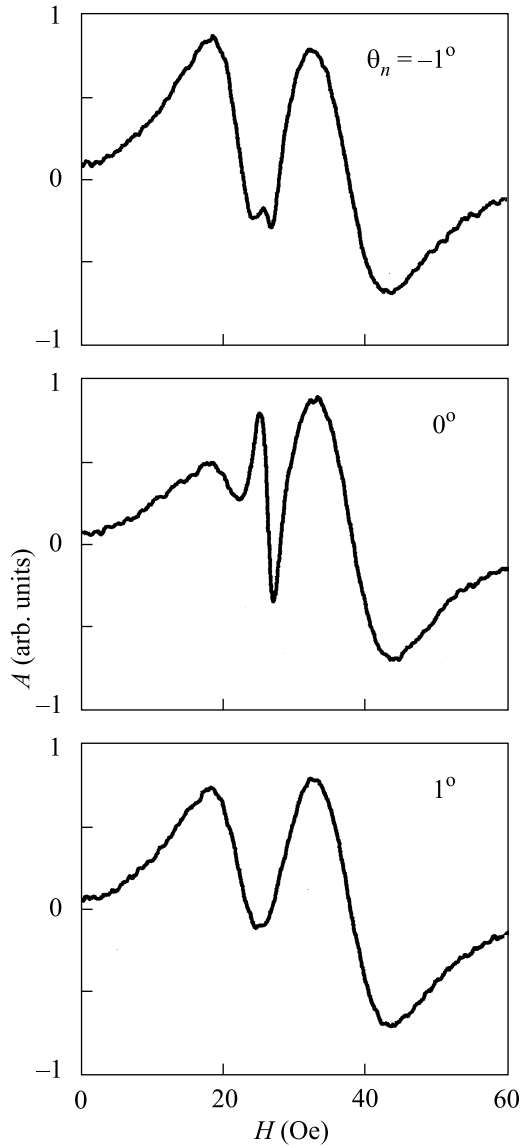


Рис.3. Спектры ФМР при различных углах ориентации оси легкого намагничивания

полученного из условия минимума плотности свободной энергии пленки

$$F = -(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) + \frac{1}{2}(\mathbf{M} \cdot \overset{\leftrightarrow}{N} \cdot \mathbf{M} - \frac{H_k}{2M}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{n})^2). \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{M}$  – вектор магнитного момента,  $\mathbf{n}$  – единичный вектор, совпадающий с направлением ОЛН,  $\overset{\leftrightarrow}{N}$  – тензор размагничивающих коэффициентов, обусловленный формой образца, который для случая магнитной пленки имеет только одну компоненту  $N_{zz} = 4\pi$ .

Статическая магнитная восприимчивость пленки

$$\chi = m/h, \quad (4)$$

где  $m$  – отклонение вектора намагниченности от равновесия под воздействием пробного магнитного поля  $h$  вычисляется из решения уравнения

$$[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] = 0, \quad (5)$$

где  $\mathbf{H}_{\text{eff}} = dF/d\mathbf{M}$ . Это уравнение сводится к уравнению третьей степени относительно величины  $\psi = m/M_s$ , которое в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} & \psi^3 + \frac{h \cos(\theta_H - \theta_M) + H_k \sin 2(\theta_n - \theta_M)}{H_k \sin^2(\theta_n - \theta_M)} \cdot \psi^2 + \\ & + 2 \frac{H \cos(\theta_H - \theta_M) + H_k \cos 2(\theta_n - \theta_M) - h \sin(\theta_H - \theta_M)}{H_k \sin^2(\theta_n - \theta_M)} \times \\ & \times \psi = 2 \frac{h \cos(\theta_H - \theta_M)}{H_k \sin^2(\theta_n - \theta_M)}. \quad (6) \end{aligned}$$

Для случая  $\theta_H = \pi/2$  и  $\theta_n = 0$  на рис. 4 представлена зависимость перпендикулярной магнитной восприимчивости пленки от величины внешнего магнитного поля (кривая 1), полученная численным решением уравнения (6). В расчете использовались параметры участка пленки, результаты измерений которого приведены на рис.1–3: намагниченность насыщения  $M_s = 1100$  Гс; поле анизотропии  $H_k = 28$  Э; величина

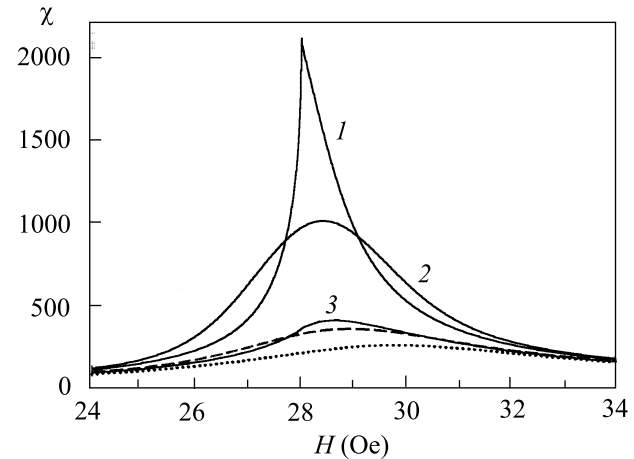


Рис.4. Полевые зависимости магнитной восприимчивости, полученные численным расчетом: кривая 1 – без дисперсии анизотропии, 2 – только амплитудная дисперсия в 1 Э, 3 – только угловая дисперсия в 1°, штриховая линия означает, что присутствует угловая и амплитудная дисперсии, точки – дисперсия отсутствует, но ОЛН отклонена на 1° от исходного направления

на пробного поля  $h = 0.1$  Э. Видно, что в магнитном поле, равном полю анизотропии, как и в эксперименте, наблюдается ярко выраженный острый максимум восприимчивости. Более того, расчет показывает, что аналогично эксперименту при отклонении

легкой оси всего на один градус ( $\theta_n = \pm 1^\circ$ ) от исходного направления ( $\theta_n = 0$ ) пик восприимчивости почти исчезает (пунктирная кривая на рис.4). Исследования показали также монотонный рост восприимчивости с уменьшением величины поля анизотропии. Из этих фактов следует, что на пик восприимчивости большое влияние должны оказывать как угловая, так и амплитудная дисперсии одноосной магнитной анизотропии, которые, как известно [6], могут быть значительными в реальных образцах в силу несовершенства технологии их получения.

Для оценки влияния дисперсии анизотропии на пик магнитной восприимчивости воспользуемся гауссовым распределением как величины поля анизотропии  $H_k$ , так и направления угла легкого намагничивания  $\theta_n$  [7]. На рис. 4 показаны зависимости перпендикулярной магнитной восприимчивости от внешнего магнитного поля, также полученные численным расчетом, при наличии в пленке только амплитудной дисперсии анизотропии  $\Delta_k = 1$  Э (кривая 2), только угловой дисперсии  $\Delta_\theta = 1^\circ$  (кривая 3) и при одновременном присутствии угловой и амплитудной дисперсии тех же величин (штриховая линия). Видно, что даже небольшая угловая дисперсия одноосной магнитной анизотропии приводит почти к исчезновению исследуемого пика восприимчивости. Это доказывает, что обнаруженный эффект можно наблюдать только на высококачественных образцах. Следует также отметить, что дисперсия анизотропии сдвигает максимум восприимчивости пленки в область больших полей.

Заметим, что при условии  $|H - H_k| \gg h$ , решая уравнение (5) для случая  $\theta_H = \pi/2$  и  $\theta_n = 0$  в отсутствие дисперсии одноосной магнитной анизотропии, можно пренебречь членами второго порядка малости. В результате получим

$$\chi \approx \frac{M_s H}{H_k^2 - H^2}, \quad H < H_k, \quad (7)$$

$$\chi \approx \frac{M_s}{H - H_k}, \quad H > H_k. \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) видно, что зависимость  $\chi(H)$  в области “малых” полей более сильная, чем эта же зависимость в области “больших” полей. Это объясняет наблюдаемую асимметрию правого и левого склонов на полевой зависимости восприимчивости, полученной численным расчетом без приближений (см. рис.4). Интересно, что наличие амплитудной дисперсии магнитной анизотропии пленки уменьшает асимметрию склонов кривой  $\chi(H)$ .

В случае  $H = H_k$  уравнение (6) при условии  $\theta_H = \pi/2$  и  $\theta_n = 0$  принимает простой вид:

$$\psi^3 + \frac{h}{H_k} \psi^2 = 2 \frac{h}{H_k}. \quad (9)$$

Учитывая, что  $\psi = m/M_s$  и  $h/H_k \ll 1$ , получим выражение для максимальной восприимчивости

$$\chi_{\max} \approx M_s \sqrt[3]{\frac{2}{H_k h^2}}. \quad (10)$$

Приближенная формула (10) показывает, что с ростом величины пробного поля максимальное значение магнитной восприимчивости уменьшается по закону  $(h)^{-2/3}$ , а с ростом поля одноосной магнитной анизотропии уменьшается по закону  $(H_k)^{-1/3}$ . Эти закономерности достаточно хорошо подтвердил численный расчет, проведенный без приближений.

Таким образом, теоретический анализ показал, что обнаруженный в спектре ФМР узкий пик восприимчивости обусловлен резким увеличением статической перпендикулярной магнитной восприимчивости пленки в точке неустойчивости магнитного момента, наблюдаемой в поле  $H = H_k$ . В этом поле на кривой намагничивания наблюдается излом [1], который нивелируется с увеличением угловой и амплитудной дисперсий анизотропии. Расчет также показал, что пик восприимчивости почти исчезает при угловой дисперсии поля анизотропии  $\geq 1^\circ$ . Поэтому, несмотря на высокое качество полученных пленок, эффект обнаруживается лишь на локальных участках образцов, где дисперсия анизотропии достаточно мала. На пермалловых пленках с одноосной магнитной анизотропией, полученных вакуумным напылением в магнитном поле, также виден сигнал, обусловленный статической восприимчивостью. Однако его амплитуда почти на два порядка меньше амплитуды сигнала однородного ферромагнитного резонанса, что объясняется сравнительно большой угловой дисперсией анизотропии в этих пленках.

Важно отметить, что обнаруженный эффект увеличения статической восприимчивости в поле  $H = H_k$  удается наблюдать только на сравнительно высоких частотах в СВЧ диапазоне, когда резонансные поля пиков однородного ферромагнитного резонанса достаточно удалены от  $H_k$  (см. рис.2). С понижением частоты накачки однородный ферромагнитный резонанс, сближаясь с пиком статической восприимчивости, подавляет его.

Исследованный в настоящей работе пик статической восприимчивости, на наш взгляд, позволяет объяснить резкое увеличение амплитуды сигнала ядерного магнитного резонанса, обнаруженное на анизотропных пленках кобальта [8, 9]. Этот эффект также

наблюдался в поле, равном полю анизотропии, при намагничивании пленки перпендикулярно оси легкого намагничивания. Причем, отклонение направления магнитного поля от ортогонального всего на  $1^\circ$  практически приводило к исчезновению сигнала.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Игнатченко Вальтеру Алексеевичу за плодотворное обсуждение результатов работы.

1. Н. М. Саланский, М. Ш. Ерухимов, *Физические свойства и применение магнитных пленок*, Новосибирск: Наука, 1975.
2. Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, И. Я. Макиевский, В. В. Тюрнев, ПТЭ **3**, 106 (1997).
3. С. Я. Кипарисов, авт. свидет. СССР № 1145050, БИ № 10 (1985).
4. Г. В. Бондаренко, А. П. Долгарев, сб. *Аппаратура и методы рентгеновского анализа*, Л.: Машиностроение, 1983, с. 128-132.
5. Б. А. Беляев, А. В. Изотов, А. А. Лексиков, Заводская лаборатория. Диагностика материалов. **67**, № 9, 23 (2001).
6. М. Праттон, *Тонкие ферромагнитные пленки*, Л.: Судостроение, 1967. (M. Prutton, *Thin ferromagnetic films*, London, Butterworths, 1964.)
7. А. Г. Лесник, ФММ **27**, 1000 (1969).
8. Н. В. Бакшеев, Э. С. Мушаилов, ФТТ **21**, 2801 (1979).
9. Е. М. Артемьев, Н. В. Бакшеев, Э. С. Мушаилов, ФММ **53**, 1224 (1982).