ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С РАЗОРИЕНТИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Дубинко С. В., кандидат физико-математических наук, доцент

Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов (ЭПФГ) имеют сложный характер магнитной анизотропии. В настоящее время разработаны методики измерения констант магнитной анизотропии для ЭПФГ с кристаллографическими ориентациями поверхностей (111) и (110).

В данной работе предлагается методика определение констант магнитной анизотропии K_u – одноосной, K_{ort} – ромбической, K_1 – кубической в ЭПФГ с промежуточными ориентациями поверхностей от (111) до (112). В литературе расчетные формулы для определения констант магнитной анизотропии для ЭПФГ с промежуточными ориентациями поверхностей от (111) до (112) не приводятся.

Предлагаемая методика основана на измерении резонансных магнитных полей методом ферромагнитного резонанса (ФМР) [1].

Запишем магнитную энергию ЭПФГ в системе координат, показанной на рис.1, в виде:

$$
\begin{aligned}
U = {} & HM_s\left(\sin\theta\sin\varphi\sin\beta+\cos\theta\cos\beta\right)+2\pi M_s^{\,2}\cos^2\theta+\left(-\frac{3}{8}K_{ort}+6(\eta-\delta)K_{ort}\right)\sin^2\theta\sin^2\varphi+\\
&+\left(K_u-\frac{1}{8}K_{ort}-6(\delta+\eta)K_{ort}\right)\cos^2\theta+6K_{ort}\left(\delta\sin^2\theta+\chi\sin\varphi\cos 2\theta\right)+\\
&+K_1\left[\frac{\sin^4\theta\cos^4\varphi}{4}+\left(\frac{7}{32}+\frac{\eta-\delta}{2}\right)\sin^4\theta\sin^4\varphi+\left(\frac{7}{32}+\frac{\eta+\delta}{2}\right)\cos^4\theta+\right.\\
&+\left(\frac{1}{16}+\frac{3\delta}{4}\right)\sin^4\theta\sin^2 2\varphi+\left(\frac{1}{16}-\frac{3\delta}{4}\right)\sin^2 2\theta\cos^2\varphi+\lambda\sqrt{2}\sin^3\theta\cos\theta\cos^2\varphi\sin\varphi-\\
&\left.-\frac{\lambda+\nu}{\sqrt{18}}\sin^3\theta\cos\theta\sin^3\varphi+\frac{\nu-\lambda}{\sqrt{18}}\sin\theta\cos^3\theta\sin\varphi+\left(\frac{7}{64}-\frac{3}{4}\eta\right)\sin^2 2\theta\sin^2\varphi\right]
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

$$\delta=\frac{\cos 2\alpha}{12}-\frac{\sin 2\alpha}{\sqrt{18}};\qquad \eta=\frac{7\cos 4\alpha}{48}+\frac{\sin 4\alpha}{2\sqrt{18}};$$

$$\chi=\frac{\cos 2\alpha-\cos 4\alpha}{2\sqrt{18}}+\frac{2\sin 2\alpha+7\sin 4\alpha}{48};$$

$$\lambda=\cos 2\alpha+\frac{\sqrt{18}}{12}\sin 2\alpha;\qquad \nu=\cos 4\alpha-\frac{7\sqrt{18}}{24}\sin 4\alpha.$$

Расчет констант магнитной анизотропии проводился по методу Смита-Сула [1]. Резонансное соотношение этого метода записано ниже:

$$\omega/\gamma = (d^2E/d\theta^2 \cdot d^2E/d\varphi^2 - d^2E/d\theta d\varphi)^{1/2}/M_s \sin\theta, \quad (2)$$

где ω - частота ФМР, γ - гиромагнитное отношение.

Равновесное положение вектора $\vec{M}$ определялось из выражения:

$$dE/d\theta = dE/d\varphi = 0. \quad (3)$$

Равенство $dE/d\theta = 0$ справедливо при $\varphi = \pi/2$, из этого следует, что вектор $\vec{M}$ при положении поля $\vec{H}$ в плоскости ($\bar{1}\,10$) не выходит из этой плоскости. Следовательно, для ФМР-измерений эффективно применять именно эту кристаллографическую плоскость. Выражения для $dE/d\theta = 0$ при $\varphi = \pi/2$, $d^2E/d\theta^2$, $d^2E/d\varphi^2$, $d^2E/d\theta d\varphi$ не приводятся, так как имеют достаточно громоздкий вид.

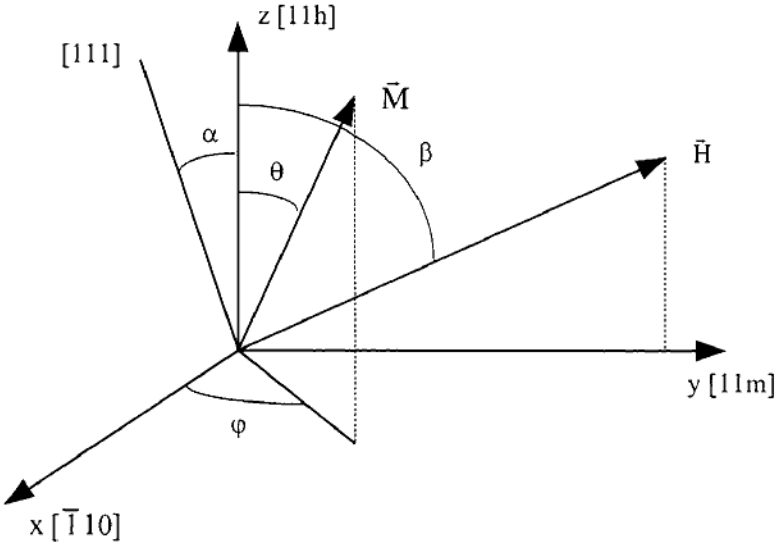

Рис. 1. Система координат, связанная с поверхностью ЭПФГ с ориентацией (11h)
α - угол разориентации поверхности ЭПФГ от ориентации (111)

При выводе выражения (4) предполагалось, что разность $(\theta-\beta)$ мала, тогда $\cos(\theta-\beta) \approx 1$. Для определения степени отклонения вектора $\vec{M}$ от вектора $\vec{H}$ во время измерения резонансного магнитного поля, было использовано выражение $dE/d\theta = 0$ при $\varphi = \pi/2$, что позволило при условии $\cos(\theta-\beta) \approx 1$ получить формулу (1), в которую угол β не входит. Тогда резонансное соотношение Смита-Сула имеет вид:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left\{H - \left(4\pi M_s + \frac{2K_u}{M_s} + \frac{1}{2}\frac{K_{ort}}{M_s} - 12\frac{K_{ort}}{M_s}(\delta + 2\eta)\right)\cos 2\theta - \frac{24K_{ort}}{M_s}\chi \sin 2\theta + \right.$$

$$+ \frac{2K_1}{M_s}\left[6\sin^2\theta\cos^2\theta(x_1 + x_2) - 2x_1\sin^4\theta - 2x_2\cos^4\theta + 2\frac{\lambda - 4\nu}{\sqrt{18}}\sin\theta\cos^3\theta + \right.$$

$$\left.\left. + 2\frac{\lambda - 4\nu}{\sqrt{18}}\sin\theta\cos^3\theta + 2\frac{\lambda + 4\nu}{\sqrt{18}}\sin^3\theta + 4x_5\cos 4\theta\right]\right\} \cdot \left\{H - \left(4\pi M_s + \frac{2K_u}{M_s} + \frac{1}{2}\frac{K_{ort}}{M_s} - \right.\right. \qquad (4)$$

$$\left. - 12\frac{K_{ort}}{M_s}(\delta + 2\eta)\right)\cos^2\theta + \frac{3}{4}\frac{K_{ort}}{M_s} + 12\frac{K_{ort}}{M_s}(\delta - \eta) - 12\frac{K_{ort}}{M_s}\chi\sin 2\theta + \frac{2K_1}{M_s}\left[-2x_1\sin^4\theta - \right.$$

$$- 2x_2\cos^4\theta + 4x_3\sin^2\theta + 4x_4\cos^2\theta + \frac{\lambda + \nu}{2\sqrt{18}}\sin^3\theta\cos\theta + \frac{\lambda - 7\nu}{2\sqrt{18}}\sin\theta\cos^3\theta + $$

$$\left.\left. + \frac{5\lambda + 3\nu}{4}\sqrt{2}\sin 2\theta - 2x_5\sin^2 2\theta\right]\right\},$$

где $x_1 = \frac{7}{32} + \frac{\eta - \delta}{2}$; $x_2 = \frac{7}{32} + \frac{\eta + \delta}{2}$; $x_3 = \frac{1}{16} + \frac{3\delta}{4}$; $x_4 = \frac{1}{16} - \frac{3\delta}{4}$; $x_5 = \frac{7}{64} - \frac{3\eta}{4}$.

Порядок определения K_u, K_{ort}, K_1, g-фактора принимался следующий.

1. Измерялась зависимость поля ферромагнитного резонанса $H_{рез}$ от θ.
2. Численным методом по формуле (4) производился расчет параметров ЭПРФГ. Алгоритм вычислений построен таким образом, чтобы с ее помощью можно было вычислить $H_{рез.теор.}$ по произвольно заданным K_u, K_{ort}, K_1 и g-фактора при известном значении намагниченности насыщения $4\pi M_s$.
3. Вычислялось средне квадратичное отклонение $S = [\Sigma\Delta H_{пр.}^2/N(N-1)]^{1/2}$ где $\Delta H_{рез.} = H_{рез.эк.} - H_{рез.теор.}$, где $H_{рез.эк.}$ - резонансное поле, полученное экспериментально, а $H_{рез.теор.}$ - получено из (4). $H_{рез.эк.}$ и $H_{рез.теор.}$ сравнивались для одинаковых θ.
4. Материальными константами считались величины K_u, K_{ort}, K_1 и g-фактора, при которых S достигало минимального значения. На рис. 2 показана типичная зависимость $H_{рез.эк.}$ (сплошная линия) и $H_{рез.теор.}$ (пунктирная линия) от θ.

С помощью предлагаемой методики были определены константы магнитной анизотропии ЭПФГ с составами близкими к $(Bi, Lu)_3 Fe_5 O_{12}$ с разбавлением ионной подрешетки ионами галлия. Полученные результаты приведены в таблице 1. Намагниченность насыщения $4\pi M_s$ измерялась вибромагнитометром.

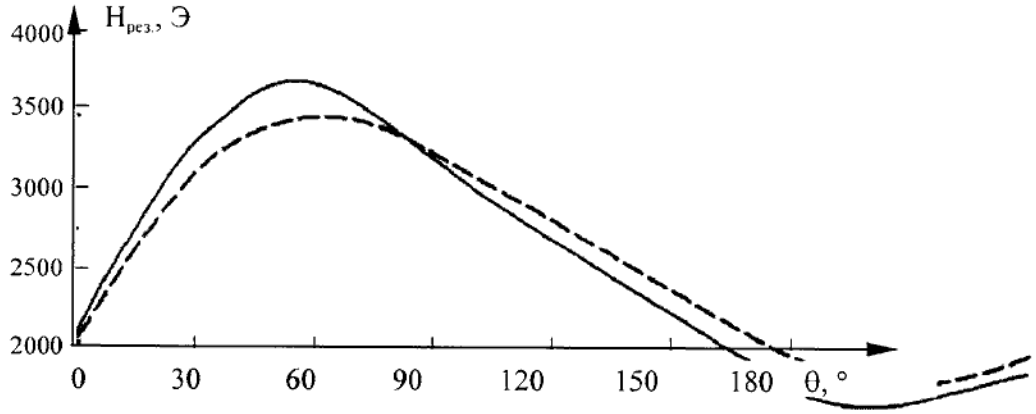

Рис. 2. Зависимость поля ферромагнитного резонанса $H_{рез.}$ от θ

Таблица 1

Магнитные параметры ЭПФГ

α, °	$4\pi M_s$, Гс	$K_u \cdot 10^4$, эрг/см^3	$K_u/2\pi M_s^2$	$K_{опт} \cdot 10^4$, эрг/см^3	$K_{опт}/2\pi M_s^2$	$K_1 \cdot 10^4$, эрг/см^3
0	410	32,185	0,30	0	0	1,23
4,1	380	80,047	0,88	27,93	0,31	6,65
8,3	400	47,060	0,47	17,98	0,18	10,10
11,2	650	35,880	0,14	19,66	0,07	20,80
15,3	350	18,865	0,25	9,80	0,13	16,80
19,4	370	2,812	0,03	4,80	0,06	15,54

Разработанная в данной работе методика определения параметров ЭПФГ, включающая в себя резонансное соотношение (4) и способ аппроксимации экспериментальной зависимости $H_{рез.эк.}$ от θ позволяет с большой степенью достоверности определять константы магнитной анизотропии пленки.

Литература

Гуревич А.С. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 591 с.