

Особенности магнитоиндуцированного спин-переориентационного перехода в феррит-гранатовых пленках с анизотропией "угловая фаза"

© А.Р. Прокопов, С.В. Дубинко, А.О. Хребтов*, М.И. Еремина*

КБ "Домен" при Симферопольском государственном университете,
333610 Симферополь, Украина

*СКТБ при Донецком физико-техническом институте Академии наук Украины,
340114 Донецк, Украина

(Поступила в Редакцию 9 января 1997 г.)

Магнитооптическим и индукционно-частотным методами проведено исследование эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов с анизотропией типа "угловая фаза", "легкая плоскость" с кристаллографической ориентацией поверхности (111). Показано, что в пленках реализуется доменная структура четырех типов. При перемагничивании пленок постоянным магнитным полем, направленным под различными углами относительно нормали к плоскости, обнаружено anomальное поведение магнитной восприимчивости в интервале углов наклона магнитных полей от 0.3 до 1.5°.

Спин-переориентационные переходы (СПП), возникающие под воздействием внешних магнитных полей в эпитаксиальных пленках феррит-гранатов (ФГП), рассматривались ранее теоретически и экспериментально в работах [1–5]. Однако данное в этих работах описание магнитоиндуцированных СПП, строго говоря, вполне справедливо только для однослойных ФГП с анизотропией "легкая ось" и фактором качества $Q > 3$. Этот широко распространенный, но все же частный случай далеко не исчерпывает того возможного многообразия фазовых состояний и СПП, которые при соответствующих физических условиях могут реализовываться в ФГП при условии, что их магнитоэлектрические параметры качественно отличаются от рассмотренного в [1–5] случая. В этой связи данная работа, в которой изложены экспериментальные результаты, касающиеся особенностей магнитоиндуцированного СПП, возникающего в слое "угловая фаза" трехслойных ФГП с анизотропией слоев "легкая плоскость" и "угловая фаза", возможно, частично заполнит этот пробел и послужит стимулом для дальнейших исследований в этой области.

Использовавшиеся в экспериментах ФГП имели фактор качества $Q \approx 1$, толщину $h = 5–6 \mu\text{m}$ и формульный состав $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$, получались жидкофазной эпитаксией на гадолиний-галлиевых подложках ориентации (111) из висмут-свинцового раствор-расплава (температура роста $T_g = 982–987 \text{ K}$, переохлаждение 20–25 K).

Всего было выбрано четыре серии пленок, которые выращивались из одного и того же висмут-свинцового раствор-расплава без его корректировки. Серии состояли из четырех-пяти образцов. Перед выращиванием каждой серии проводилась гомогенизация раствор-расплава, а затем при эпитаксии образующих серию образцов температура роста (T_g) постепенно понижалась от первого образца серии к последнему с шагом в 1–3°С. Использование такого режима эпитаксии обеспечивало получение

ФГП, имеющих анизотропию "угловая фаза" и высокую чувствительность магнитного момента \mathbf{M} к величине и направлению внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_{(\theta, \varphi)}$ (где θ и φ — соответственно полярный и азимутальный углы, определяющие направление вектора \mathbf{H}) [6].

Магнитооптический контроль показал, что полученные ФГП по типу существующих в них исходных доменных структур (ДС) можно разделить на четыре группы.

Образцы группы I имели на всей поверхности пленки однородную равновесную высококонтрастную полосовую ДС с периодом 3–5 μm (структура типа A) (рис. 1, a). В отличие от образцов группы I в образцах группы IV наблюдалась слабоконтрастная ДС, состоящая из макродоменов (ДС типа B) (рис. 1, d). Образцы группы II (ДС типа AB) и группы III (ДС типа BA), имели промежуточную ДС между типами A и B. При этом у образцов с ДС типа AB (рис. 1, b) участки с равновесной ДС типа A разделялись доменными границами с ДС типа B, а в образцах, имевших ДС типа BA (рис. 1, c), она состояла в основном из макродоменов типа B с небольшим количеством полосовых доменов типа A, имевших значительно меньшую контрастность, чем в ФГП со структурами типа A и AB.

Более детальное магнитооптическое исследование позволило установить, что все ФГП имели анизотропию "угловая фаза", а наблюдаемое в них различие ДС вызвано увеличением угла θ_m между вектором \mathbf{M} и \mathbf{n} : в образцах с ДС типа A он минимален (\mathbf{M} почти параллелен \mathbf{n}), а в образцах с ДС типа B максимален (\mathbf{M} почти перпендикулярен \mathbf{n}).

Исследование трансформаций ДС в образцах под действием малых магнитных полей $H_\theta = 50–200 \text{ Oe}$ при $\theta = 0^\circ$, а также экспериментально наблюдаемое "расслоение" ДС типа A в магнитных полях, направленных под углом $\theta = 80–90^\circ$, при котором на фоне структуры типа A наблюдались домены типа B (рис. 1, e), позволили предположить многослойность исследуемых ФГП.

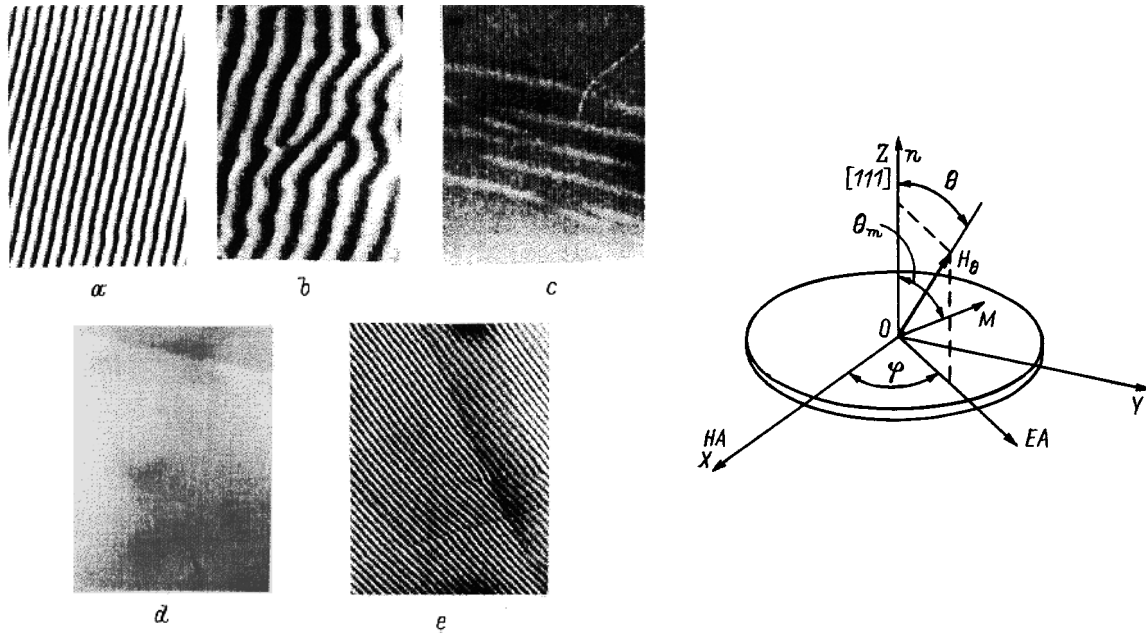


Рис. 1. Типы магнитных структур ФГП состава $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ в слое "угловая фаза" (θ_m — угол между вектором намагниченности \mathbf{M} и нормалью \mathbf{n} к плоскости (111)). *a* — тип A, $H = 0$, *b* — тип AB, $H = 0$, *c* — тип BA, $H = 0$, *d* — тип B, $H = 0$, *e* — тип A, $H \approx 40$ Ое.

Поскольку в ФГП количество слоев, тип их магнитной анизотропии и магнитостатические параметры каждого из слоев можно определить, исследуя зависимость магнитной восприимчивости χ пленок как функцию внешних магнитных полей и температуры [7–9], в изучаемых пленках были исследованы зависимости $\chi = f(H)$ в соответствии с описанной в [7–9] методикой.

Проверка показала, что независимо от типа ДС, несмотря на то что все исследовавшиеся пленки были получены путем однократной эпитаксии, в магнитном отношении ФГП представляли собой трехслойные структуры (рис. 2) с анизотропией слоев "легкая плоскость" (первый слой), "угловая фаза" (второй слой) и "легкая плоскость" (третий слой). Ориентированные по нормали к поверхности ФГП поля насыщения составляли: для слоя 1 — 1500–1800 Ое, для слоя 2 — 1200–1350 Ое, для слоя 3 — 100–500 Ое.

Появление в ФГП, которые выращивались как однослойные магнитные структуры с анизотропией "угловая фаза", слоев с анизотропией "легкая ось" связано с нестационарной эпитаксией [10], которая приводит к изменению состава пленки и возникновению переходных слоев пленка–подложка и пленка–воздух. В частности, в рассматриваемом нами случае появление слоя с анизотропией "легкая плоскость" на границе раздела пленка–подложка, обусловленное дополнительным вхождением ионов Ga и Gd в состав пленки, практически неизбежно, поскольку в ФГП с Ga–Ge-замещением переходный слой с анизотропией "легкая плоскость" возникает даже в том случае, когда основная пленка имеет анизотропию "легкая ось" и большой фактор качества [11].

Сравнение магнитостатических характеристик слоев позволило сделать вывод о том, что в пленках всех групп параметры слоев 1 и 3 при переходе от образцов с ДС типа A к образцам со структурой типа B практически не изменяются. Существенные отличия магнитостатических характеристик наблюдаются только в слое 2, изменение ДС которого отражает факт изменения ориентации вектора \mathbf{M} в нем относительно нормали к плоскости пленки.

Разброс магнитостатических параметров в слое 2 (анизотропия "угловая фаза") привел к тому, что в пленках с ДС типа A, AB, BA и B магнитоиндуцированные СПП существенно отличались. В связи с этим для более точного отбора ФГП с идентичными магнитостатическими параметрами у пленок всех групп по зависимости $\chi = f(T)$ при $H = 0$ была определена температура происходящего в слое 2 спонтанного СПП (T_s) "угловая фаза–легкая плоскость", а также температура Нееля (T_N) слоя.

Расположенные затем в порядке убывания T_s пленки образовали правильный ряд по типам наблюдаемых в них ДС, а именно пленки с максимальной T_s имели ДС типа A и далее по мере уменьшения величины T_s ДС последовательно без каких-либо исключений переходит в тип B, образуя ряд $A \rightarrow AB \rightarrow BA \rightarrow B$ (рис. 2).

Этот экспериментально установленный факт однозначной связи между величиной угла θ_m в слое с анизотропией "угловая фаза" и температурой происходящего в этом же слое спонтанного СПП "угловая фаза–легкая плоскость" был положен в основу оценки исходной идентичности слоев с анизотропией "угловая фаза" при про-

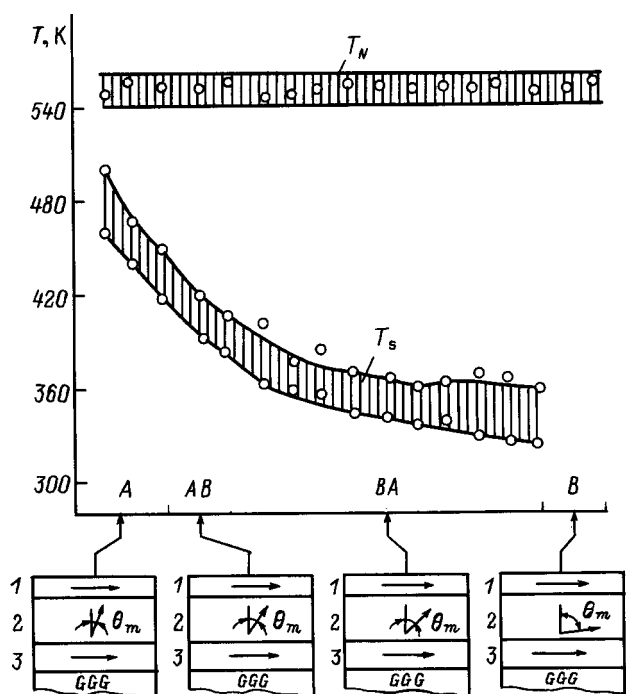


Рис. 2. Взаимосвязь между типом магнитной структуры в слое "угловая фаза" (A, AB, BA) и температурой СПП "угловая фаза → легкая плоскость".

ведении экспериментов по магнитоиндуцируемым СПП в исследуемых ФГП.

СПП, возникающие под действием внешних магнитных полей в слое 2, исследовались при комнатных температурах путем регистрации изменений магнитной восприимчивости либо дифференциальной магнитной восприимчивости индуктивно-частотным методом.

СПП типа ДС ↔ монодоменное состояние в слое 2 определялся используемой экспериментальной методикой однозначно, поскольку исчезновению ДС в слое 2 соответствует строго определенный пик на зависимости $\chi = f(H_\theta)$. В сложных случаях интерпретации особенностей на зависимости $\chi = f(H_\theta)$ применялась магнитооптическая методика исследования ДС образца, которая в данном случае давала хорошие результаты, так как слой с анизотропией "угловая фаза" составлял не менее 80% объема образца.

Для наблюдения магнитоиндуцируемых СПП исследуемый образец помещался полюсами электромагнита таким образом, что вектор напряженности магнитного поля H_θ находился в плоскости пленки (угол $\theta = 90^\circ$) (рис. 1). Затем, последовательно увеличивая величину напряженности магнитного поля H_θ до величины $H_\theta > H_a$, где H_a — поле насыщения в данном образце, регистрировали зависимости $\chi = f(H_\theta)$ и, продолжая регистрировать $\chi = f(H_\theta)$, уменьшали напряженность магнитного поля H_θ до нуля. Увеличение и уменьшение магнитного поля производились по линейному закону $H_\theta = \eta t$, где η — константа, выбранная таким образом,

чтобы процесс перемагничивания образца происходил квазистатически, t — время.

Очевидно, что, последовательно повторяя описанную операцию для ряда дискретных значений угла θ в диапазоне $90 \geq \theta \geq 0^\circ$, можно для слоя 2 в координатах (H_θ, θ) построить диаграмму магнитоиндуцированного СПП ДС ↔ МДС, где ДС — исходная доменная структура при $H = 0$, а МДС — монодоменное состояние при $H_\theta > H_a$. Однако в процессе проведения экспериментов было обнаружено, что в тех случаях, когда вектор магнитного поля H_θ составлял с нормалью к ФГП угол $\theta = 0.3-1.5^\circ$, в магнитных полях $H_\theta > H_a$, соответствующих монодоменному состоянию слоя 2, в образцах ФГП, имевших при $H_\theta = 0$ ДС типа АВ, ВА и В, наблюдается гигантская аномалия восприимчивости (рис. 3), угловой интервал существования которой не превышает $\Delta\theta \leq 20-40'$.

Основные черты наблюдаемого явления удобнее всего рассмотреть на конкретном примере. На рис. 3 представлены экспериментальные кривые изменения относительной магнитной восприимчивости χ/χ_0 (χ — магнитная восприимчивость в полях $0.1 \leq H_\theta \leq 2.5$ кОе,

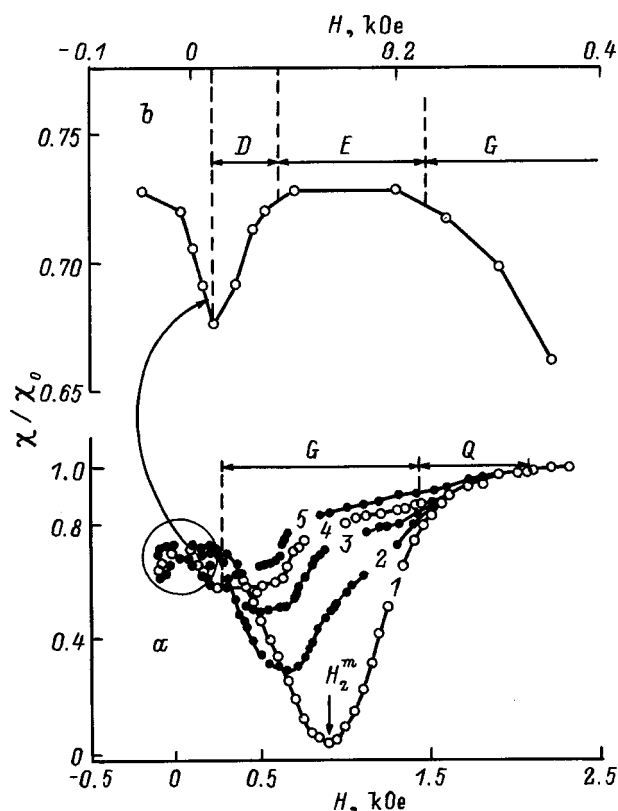


Рис. 3. Влияние угла θ между направлением \mathbf{n} и \mathbf{H}_θ на изменение относительной магнитной восприимчивости (χ/χ_0) под действием внешних магнитных полей (D — область существования структуры ДС1, E — область монодоменного состояния МДС1, G — область существования структуры ДС2, Q — область монодоменного состояния МДС2). а) θ ($^\circ$): 1 — 0.3, 2 — 0.4, 3 — 0.5, 4 — 0.8, 5 — 1.5. б) $\theta = 0.3^\circ$, $-0.1 \leq H_\theta \leq 0.3$ кОе.

χ_0 — магнитная восприимчивость ФГП при $H_\theta = 2.5 \text{ кОе}$), происходящего под действием внешних магнитных полей H_θ в одном из образцов, имевшем при $H_\theta = 0$ ДС типа ВА. Видно (рис. 3, а), что при изменении угла θ от 0.3 до 1.5° на зависимости $\chi/\chi_0 = f(H_\theta)$ в диапазоне магнитных полей $H_\theta = 300\text{--}1450 \text{ Ое}$ возникает аномалия восприимчивости, минимум которой соответствует $H_\chi^m = 850 \text{ Ое}$.

Для выяснения природы наблюдаемой аномалии было проведено магнитооптическое исследование процесса перемагничивания ДС слоя 2 в случаях, когда направление вектора внешнего магнитного поля \mathbf{H}_θ находилось в пределах диапазона углов θ , при которых наблюдается аномалия χ , и вне его.

Исходная ДС слоя 2 представляла собой равновесную полосовую либо лабиринтную ДС, образованную доменами с противоположной ориентацией вектора \mathbf{M}_s . Для доменов разных фаз и для удобства описания преобразования ДС в слое 2 в дальнейшем домены, в которых вектор $\mathbf{M}_s \uparrow \uparrow \mathbf{H}_\theta$, будем называть доменами типа M_{s1}^+ , а домены с $\mathbf{M}_s \uparrow \downarrow \mathbf{H}_\theta$ — доменами M_{s2}^- . Тогда для исходной равновесной ДС, существующей в слое 2 при $H_\theta = 0$, справедливо выражение $V(M_{s1}^+) + V(M_{s2}^-) = 0$, где $V(M_{s1}^+)$ и $V(M_{s2}^-)$ — суммарный объем, занимаемый доменами с соответствующей ориентацией магнитного момента.

В тех случаях, когда угол θ находился вне диапазона "аномальных" углов, преобразование ДС в слое 2 происходило следующим образом: по мере увеличения напряженности магнитного поля (в диапазоне полей D на рис. 3, б) объем слоя 2, занимаемый доменами M_{s2}^- , последовательно уменьшался $V(M_{s2}^-) \rightarrow 0$ и на верхней границе интервала D , которая определялась по СПП ДС \longleftrightarrow МДС, слой 2 переходил в МДС. В дальнейшем слой 2 оставался в МДС во всем интервале магнитных полей $H_\theta^{(1)} < H_\theta < 2.5 \text{ кОе}$ (где $H_\theta^{(1)}$ — поле СПП ДС \longleftrightarrow МДС).

Если же угол θ соответствовал полярному углу, для которого наблюдалось аномальное поведение магнитной восприимчивости, то изменения ДС в слое 2 носили существенно иной характер. В области магнитных полей, соответствующих интервалу D (рис. 3, б), исходная ДС трансформировалась так же, как и в случаях, когда угол θ находился вне "аномальных" углов, и в конце интервала D слой 2 переходил в состояние МДС1. Состояние МДС1 устойчиво существовало в интервале магнитных полей E (рис. 3, б). В этом интервале магнитных полей изменение ориентации вектора \mathbf{M}_s^+ под действием внешнего магнитного поля происходило путем вращения, но при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля в слое 2 вновь зарождалась клиновидно-полосовая доменная структура ДС2. Таким образом, полевой интервал E (область существования МДС1) снизу ограничен фазовым СПП ДС \longleftrightarrow МДС1, а сверху — СПП МДС1 \longleftrightarrow ДС2.

С увеличением напряженности магнитного поля (интервал G) в слое 2 происходит развитие ДС2, которая

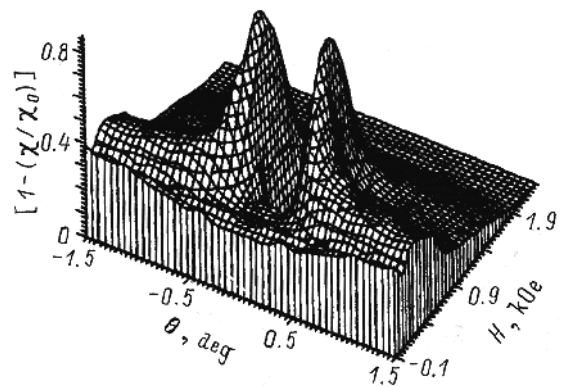


Рис. 4. Диаграмма зависимости $(1 - \chi/\chi_0) = f(H_\theta, \theta)$ для ФГП со структурой ВА при $\varphi = \varphi_{EA}$, рассчитанная по экспериментальным кривым $\chi = f(H_\theta)$ для плоскости EAZ.

в области минимума аномалии магнитной восприимчивости (H_χ^m , рис. 3, а) становится равновесной. Если ориентацию магнитных моментов в МДС1 обозначить как M_{s1}^+ , а в зародившейся новой магнитной фазе — как M_{s2}^- , то в области полей, соответствующих минимуму аномалии магнитной восприимчивости, состояние ДС2 соответствует случаю $V(M_{s1}^+) + V(M_{s2}^-) = 0$, где $V(M_{s1}^+)$, $V(M_{s2}^-)$ — суммарный объем, занимаемый доменами с соответствующей ориентацией магнитных моментов. Дальнейшее увеличение H_θ приводит к тому, что объем магнитной фазы M_{s1}^+ уменьшается ($V(M_{s1}^+) \rightarrow 0$) и в конце интервала G слой 2 переходит в монодоменное состояние МДС2.

Таким образом, при воздействии на слой 2 магнитного поля, вектор напряженности которого направлен под углом θ , лежащим в интервале "аномальных" углов, преобразование ДС в слое 2 происходит по схеме ДС1 \longleftrightarrow МДС1 \longleftrightarrow ДС2 \longleftrightarrow МДС2, где ДС1 — исходная доменная структура слоя 2 при $H_\theta = 0$, МДС1 — монодоменное состояние, существующее в интервале полей E , ДС2 — доменная структура, существующая в интервале полей G , МДС2 — монодоменное состояние, возникающее при величине магнитных полей $H_\theta \geq H_\theta^{\min}$, гд H_θ^{\min} — нижняя граница интервала полей Q на рис. 3.

Из вышесказанного очевидно, что наблюдаемые ДС1, ДС2, МДС1 и МДС2 физически неэквивалентны, поскольку соответствуют различным состояниям слоя 2 ("угловая фаза"), а наблюдаемая аномалия χ обусловлена возникновением в слое "угловая фаза" клиновидно-полосовой доменной структуры.

Описанные выше преобразования ДС и магнитоиндуцированные СПП в слое II относились к ситуации, когда проекция вектора \mathbf{H}_θ на плоскость пленки совпадала с направлением легкой оси в плоскости ФГП ($\varphi = \varphi_{EA}$). Более полное представление об области существования аномалии χ дает представленная на рис. 4 диаграмма зависимости $[1 - (\chi/\chi_0)] = f(H_\theta, \theta)$ при $\varphi = \varphi_{EA}$, рассчитанная на ЭВМ для плоскости EAZ по экспериментальным данным для рассмотренной выше ФГП. Из

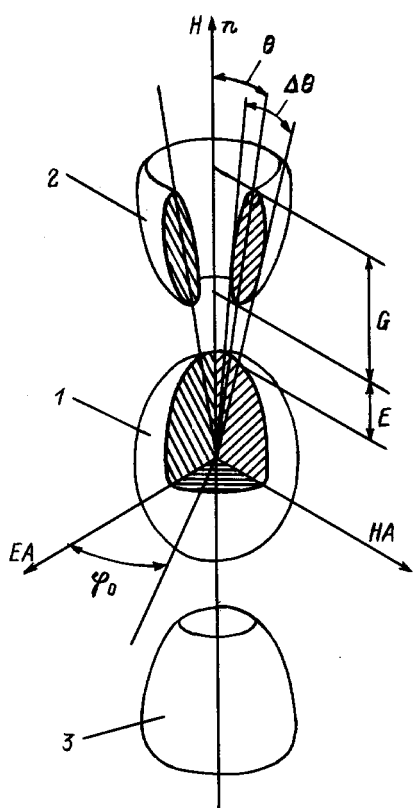


Рис. 5. Фазовая диаграмма магнито-статических состояний слоя "угловая фаза" ФГП со структурой ВА. 1 — поверхность СПП ДС1 ↔ МДС1, 2, 3 — поверхности СПП ДС2 ↔ МДС2, Δθ — область существования аномального СПП, φ₀ — азимутальный угол, G, E — интервалы напряженности магнитного поля на рис. 3.

представленных на рис. 4 данных видно, что направления магнитных полей, при которых наблюдается аномалия χ, располагаются симметрично относительно оси [111] и составляют с нормалью угол θ = ±0.5°, а угловой интервал существования аномалии Δθ = 30'.

Повторение эксперимента для ряда последовательных значений азимутального угла, в том числе и для φ = φ_{НА}, где φ_{НА} — угол, при котором проекция **H**_θ совпадает с трудным направлением в плоскости ФГП, показало, что совокупность векторов **H**(θ, φ), при которых наблюдается аномалия χ, в первом приближении образует поверхность конуса (конус аномальной магнитной восприимчивости) с углом θ = 0.5°, ось симметрии которого совпадает с осью [111].

При условии нахождения вектора **H** на поверхности конуса аномальной χ наблюдаемая аномалия симметрична относительно изменения направления магнитного поля на 180°. Рассчитывая на ЭВМ диаграммы распределения χ в плоскостях, проходящих через ось OZ для дискретного ряда значений φ₀, где φ₀ — азимутальный угол, изменяющийся в пределах от 0 до 360°, можно построить трехмерную фазовую диаграмму существования анома-

лии χ в координатах (H_θ, θ, φ₀) (рис. 5). Точка начала координат на этой диаграмме соответствует исходному состоянию слоя 2 при H_θ = 0, т.е. состоянию равновесной ДС1, а поверхность 1 — совокупности точек СПП ДС1 ↔ МДС1. Поверхность 1 выделяет область фазового пространства, внутри которой существует ДС1. Вне этой области слой 2 находится в МДС1 или в МДС2, за исключением областей фазового пространства внутри замкнутых поверхностей 2 и 3, представляющих собой деформированные тороиды (рис. 5). Очевидно, что замкнутые поверхности 2 и 3 ограничивают объем фазового пространства, в котором существует ДС2.

Эксперименты показали, что в зависимости от типа образца, т.е. от типа существующей в нем при H_θ = 0 ДС, и магнито-статических параметров, обусловленных вариациями ростовых условий, расположение областей 2 и 3 в фазовом пространстве и их размеры могут существенно изменяться. В частности, величина монодоменного интервала E в зависимости от типа начальной в ФГП ДС может изменяться от образца к образцу в несколько раз (для исследованных образцов интервал E изменялся от 200 до ≈ 700 Oe). Кроме того, в принципе возможен вариант, когда E = 0. В этом случае будет возникать фазовая область, в которой возможно сосуществование ДС1 и ДС2. Столь же широко может варьироваться и величина интервала G. Величина же углов θ и Δθ, при которых наблюдается аномалия χ, изменяется незначительно в узком интервале значений, как правило не превышающих 0.5–1.5° для θ и 30–40' для Δθ.

Наиболее систематически вопросы физики магнитоиндуцированных СПП рассматривались в работе [12], в которой, в частности, убедительно показано, что необходимым условием образования всех термодинамически устойчивых ДС в магнетиках является наличие в системе индуцированного внешним магнитным полем фазового перехода первого рода. ДС при таком подходе есть промежуточное состояние при фазовом переходе первого рода, поскольку в магнетиках реализуются состояния, соответствующие конкурирующим доменным фазам данного перехода.

С этой точки зрения поверхности областей 2 и 3 на рис. 5 соответствуют промежуточному состоянию, возникающему при фазовом переходе первого рода в слое 2 в тех случаях, когда вектор магнитного поля **H**_θ расположен в области аномальных углов.

Описание влияния кристаллографической анизотропии и легкоплоскостных слоев на возможные магнито-статические состояния слоя 2 и возникающие в нем под действием магнитных полей СПП не входило в задачу настоящей работы и будет рассмотрено в дальнейшем. Однако, несмотря на качественный характер представленной на рис. 5 диаграммы, она дает верное общее представление о возможных состояниях ферритгранатового слоя с анизотропией "угловая фаза" и наблюдаемых в нем магнитоиндуцированных СПП.

Авторы благодарят В.Г. Барьяхтара за обсуждение результатов, ценные замечания и интерес к работе.

Список литературы

- [1] В.В. Тарасенко, Е.В. Ченский, И.Е. Дикштейн. ЖЭТФ **70**, 6, 2178 (1976).
- [2] Ю.И. Беспятых, И.Е. Дикштейн, С.В. Мериакри, В.В. Тарасенко. ФММ **52**, 3, 484 (1981).
- [3] Ю.И. Беспятых, И.Е. Дикштейн, Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, В.В. Тарасенко. VIII Всесоюз. школа-семинар "Новые магнитные материалы для микроэлектроники". Тез. докл. Донецк (1982). С. 64.
- [4] А.И. Беляева, А.В. Антонов, Г.С. Егизарян, В.П. Юрьев. ФТТ **24**, 7, 2191 (1982).
- [5] А.И. Беляева, О.В. Милославская, В.П. Юрьев, В.А. Потакова. ФТТ **26**, 11, 3250 (1984).
- [6] V.G. Vishnevski, S.L. Levy, S.V. Dubinko, N.A. Groshenko. 14th Int. Colloquium on Magnetic Films and Surfaces. Düsseldorf (1994). P. 751.
- [7] А.О. Хребтов, Е.Ф. Ходосов. Письма в ЖТФ **10**, 18, 1127 (1984).
- [8] Ф.Г. Барьяхтар, А.О. Хребтов, А.И. Савуцкий. Сб. науч. тр. ИНЭУМ. М. (1986). С. 115, 109.
- [9] Ф.Г. Барьяхтар, А.О. Хребтов, А.И. Савуцкий. Препринт ДонФТИ АН УССР. Донецк (1986).
- [10] Ю.В. Старостин, В.И. Смокин, А.Ю. Трошин, А.В. Шабурников. Вопр. радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника, 5, 119 (1983).
- [11] Ф.Г. Барьяхтар, Л.А. Суслин, А.О. Хребтов. ФТТ **28**, 7, 2246 (1986).
- [12] В.Г. Барьяхтар, А.И. Богданов, Д.А. Яблонский. УФН **156**, 1, 47 (1988).