

УДК 548 : 537.611.44/45/46
© 1990

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАЧАЛА НЕОДНОРОДНОГО ВРАЩЕНИЯ ВЕКТОРОВ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ПЛЕНКАХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ

А. С. Логгинов, Г. А. Непокойчицкий, Т. Б. Розанова,
М. П. Тихомирова

Экспериментально определены критические условия начала неоднородного вращения (НВ) векторов намагнитченности в однородном импульсном поле. Показано, что процесс генерации магнитных возмущений (МВ) движущимися доменными границами (ДГ) можно считать одним из проявлений процесса НВ магнитных моментов. Исследован характер генерации МВ при наличии постоянного магнитного поля в плоскости образца. Предложена модель, позволяющая установить, у какой из поверхностей пленки феррита-граната начинают развиваться МВ.

1. Методика эксперимента

В качестве исследуемого объекта была выбрана пленка феррита-граната состава $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, выращенная на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Толщина пленки $h=10$ мкм, период полосовых доменов $p_0=8.7$ мкм, поле коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) $H_0=129.8$ Э, фактор качества $Q=6.6$. Ее особенностью являются относительно низкое значение поля одноосной анизотропии $H_k \approx 950$ Э и высокая намагнитченность насыщения $4\pi M_s \approx 144$ Гс. При таком соотношении параметров образца после превышения импульсным магнитным полем некоторого порогового значения начиналась бурная генерация магнитных возмущений.

Для изучения динамических явлений был использован метод электронно-оптической высокоскоростной фотографии с временным разрешением ~ 8 нс и пространственным ≤ 1 мкм [1, 2].

2. Критические условия начала неоднородного вращения векторов намагнитченности в однородном импульсном поле

Известно, что при значениях импульсного магнитного поля $H_{\text{имп}}$, меньшего поля одноосной анизотропии H_k , перемагничивание образцов происходит за счет движения ДГ, а также образования и роста зародышей с обратным (по отношению к исходному) направлением намагнитченности. Если $H_{\text{имп}} > H_k$, то после приложения импульса поля исходная магнитная фаза становится абсолютно неустойчивой и имеет место неоднородное вращение векторов намагнитченности [3, 4]. Создаваемое плоской катушкой импульсное магнитное поле имеет градиентный характер. Если вблизи витков импульсной катушки действующее на образец магнитное поле $H = H_{\text{имп}} - H_{\text{см}} > H_k^*$, где $H_k^* = H_k - 4\pi M_s$ — эффективное поле одноосной анизотропии, $H_{\text{см}}$ — постоянное поле смещения, то в этой области начинается процесс перемагничивания образца путем НВ векторов намагнитченности. Начавшись вблизи витков катушки, где $H_{\text{имп}}$ максимально,

процесс неоднородного вращения быстро распространяется на область более слабых полей, возбуждая волну опрокидывания магнитных моментов [3, 4], движущуюся от краев катушки к ее центру.

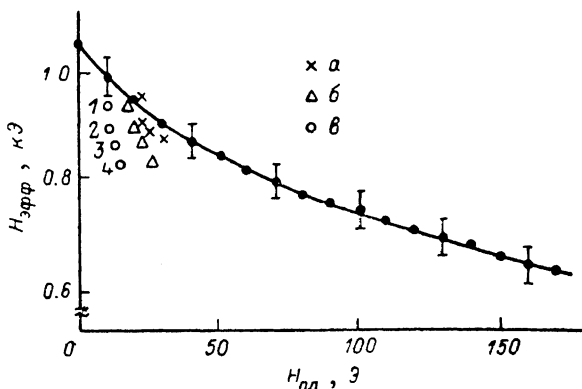


Рис. 1. Зависимость эффективного поля $H_{эфф}$ от поля в плоскости образца $H_{пл}$. Доверительные интервалы — усреднение по азимутальному углу φ . Указаны компоненты суммарного поля в окрестности полосового домена шириной $a=4.5$ мкм. $\Delta h=0.1+0.5$ (а), 1 (б), 3 мкм (в). $F_{\text{ш}} \text{ п}$ (Э), Δt_{max} (нмкс): 1 — 900, 3; 2 — 860, 4.5; 3 — 840, 4; 4 — 800, 3.5.

Если в центре импульсной катушки $H < H_k^*$, то там останется строго ориентированная треугольная неперемагнитченная за счет НВ область. Ее форма и ориентация определяются кубической анизотропией образца [5].

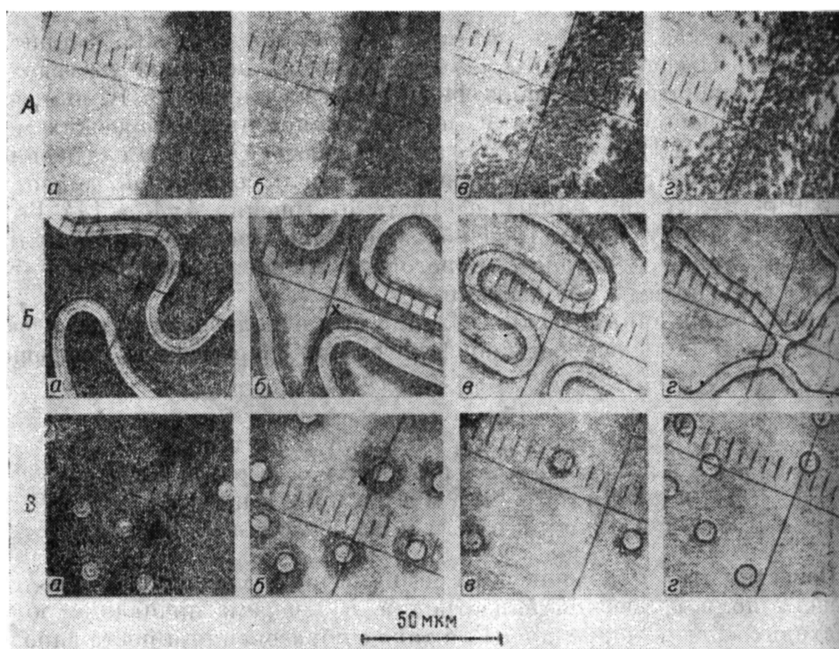


Рис. 2. Влияние поля в плоскости на процесс НВ векторов намагнитченности (А) и генерация МВ границами полосовых доменов и ЦМД соответственно (В, В). $H_{см}=150$ (А), 80 (В), 93 Э (В). А: а — $H_{пл}=10$, б — 20, в — 60, г — 10 Э; А—В: а — $H_{пл}=950$, б — 900, в — 830, г — 700 Э. $\tau=160$ нс.

На границах этой области выполняются критические условия начала неоднородного вращения векторов намагнитченности.

Плавное увеличение напряженности $H_{пл}$ приводит к уменьшению размеров неперемагнитченной области. Фиксируя значение $H_{крит}^0$, при котором

неперемагнитиченная область исчезает, мы получим значение $H_k^* = H_{\text{имп}}^0 - H_{\text{см}}$ в центре импульсной катушки, где отсутствуют плоскостная составляющая и градиент импульсного поля, т. е. внешнее поле является практически однородным.

Приложение магнитного поля $H_{\text{пл}}$ в плоскости образца вызывает изменение критических условий [6], что приводит к смещению неперемагнитиченной области [5]. Изменяя $H_{\text{имп}}$ до значения, когда граница перемагнитиченной области достигает центра импульсной катушки, мы получим новое значение H . Таким образом, изменяя $H_{\text{пл}}$, мы получим зависимость критического значения нормальной к плоскости пленки составляющей однородного поля начала НВ от поля в плоскости.

В данном эксперименте мы изменяли как напряженность поля в плоскости от 0 до 170 Э, так и его направление. На рис. 1 представлена усредненная по азимутальному углу φ зависимость $H_{\text{эфф}} = H_{\text{внп}} - H_{\text{см}} - 4\pi M_s$ от поля, приложенного в плоскости образца. Доверительные интервалы отражают пределы изменения $H_{\text{эфф}}(\varphi)$ при фиксированном значении $H_{\text{пл}}$.

В $H_{\text{эфф}}$, кроме внешних магнитных полей $H_{\text{внп}}$ и $H_{\text{см}}$, мы включили величину $4\pi M_s$, которая представляет собой поле размагничивания образца без доменной структуры.

Влияние $H_{\text{пл}}$ на картину неоднородного вращения показано на рис. 2, А. Видно, что с ростом $H_{\text{пл}}$ четкая граница раздела области, захваченной и не захваченной процессом перемагнитичивания (рис. 2, А, а, б), исчезает и возникает переходная область шириной ~ 50 мкм, в пределах которой наблюдается бурный рост микродоменов; размеры микродоменов с ростом $H_{\text{пл}}$ увеличиваются (рис. 2, А, в, г), а границы становятся все более размытыми.

3. Особенности неоднородного вращения векторов намагнитичности вблизи движущихся ДГ

Известно, что при превышении некоторой напряженности $H_{\text{имп}}^*$ движущаяся ДГ генерирует локальные, опережающие ее, магнитные возмущения [1]. Мы предполагаем, что условия их возникновения и максимальное удаление от ДГ определяются в первую очередь магнитодипольным взаимодействием. Для непосредственной проверки этой гипотезы необходимо сравнить критические поля $H_{\text{эфф}}$ и $H_{\text{пл}}$ начала неоднородного вращения, полученные в предыдущем разделе (рис. 1), с плоскостной и нормальной компонентами полей, действующих на магнитные моменты в области зарождения МВ. Для корректного сравнения двух исследуемых процессов очень важна реализация одинаковых условий эксперимента. С этой целью все процессы регистрировались при фиксированном времени задержки между передним фронтом импульса магнитного поля и световым импульсом: $\tau = 160$ нс. Указанное время является оптимальным для наблюдения неоднородного вращения и генерации МВ в данном образце, поскольку при меньших задержках процесс еще недостаточно развился, а при больших уже возможно образование сквозных по толщине образца областей обратной намагнитичности, которые не являются, строго говоря, магнитными возмущениями.

В процессе эксперимента устанавливали значение поля в плоскости $H_{\text{пл}}$ в диапазоне от 0 до 150 Э и поля смещения $H_{\text{см}} = 150$ Э. Выбранная величина поля смещения превышает поле коллапса доменной структуры, и в исходном состоянии пленка является однородно-намагнитиченной. При этом магнитные моменты создают поле размагничивания $H_m = -4\pi M_s$. Затем, как и в предыдущем разделе, подбирали $H_{\text{имп}}$, соответствующее началу неоднородного вращения в центре катушки (рис. 2, А). После этого, оставляя без изменения τ и найденное значение $H_{\text{имп}}$, отключали поле $H_{\text{пл}}$, а $H_{\text{см}}$ устанавливали равным 80 или 93 Э, что соответствует существованию в пленке полосовых доменов или ЦМД соответственно. Регистрировался процесс генерации МВ доменными границами (рис. 2, Б, В).

При увеличении поля в плоскости от 0 до 150 Э импульсное поле, соответствующее началу НВ, уменьшалось (рис. 1). Следовательно, уменьшалось $H_{\text{нп}}$, в котором исследовалась доменная структура. Это привело к переходу от установившейся вдоль всей границы генерации МВ к одиночным изолированным «выбросам», а также к существенному уменьшению удаления МВ от ДГ (переход от $a, б$ к $в, г$ на рис. 2, Б, В).

По полученным данным (размер доменной структуры в момент времени τ и максимальное удаление МВ от доменной границы Δ_{max}) были рассчитаны поля размагничивания H_m , которые в сумме с $H_{\text{нп}}$ и $H_{\text{см}}$ и обуславливали генерацию МВ.

Нормальная $H_{m\perp}$ и плоскостная $H_{m\parallel}$ компоненты поля размагничивания полосового домена определялись по формулам

$$\frac{H_{m\perp}}{4\pi M_s} = 1 + \frac{1}{\pi} \left[\text{arctg} \frac{\Delta + a}{z - h} - \text{arctg} \frac{\Delta + a}{z} + \text{arctg} \frac{\Delta}{z} - \text{arctg} \frac{\Delta}{z - h} \right], \quad (1)$$

$$\frac{H_{m\parallel}}{4\pi M_s} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{[(\Delta + a/(z - h))^2 + 1][(\Delta/z)^2 + 1]}{[(\Delta + a/z)^2 + 1][(\Delta/(z - h))^2 + 1]}. \quad (2)$$

Здесь h — толщина пленки; a — ширина полосового домена в момент времени τ ; Δ — удаление МВ от ДГ; z — координата, отсчитываемая перпендикулярно пленке, от ее поверхности.

Для сравнения двух процессов выбирались только те значения $H_{\text{нп}}$, при которых процесс генерации МВ уже установился (как, например, на рис. 2, Б, В, б), поскольку при меньших генерация МВ имеет случайный характер. На рис. 2, А—В, б крестиками отмечены типичные точки, в которых процесс перемагничивания протекает практически идентично и где проводилось сравнение суммарных магнитных полей. Нормальная компонента эффективного поля в такой точке определяется суммой

$$H_{\text{эфф}\perp} = H_{\text{нп}} + H_{m\perp} - H_{\text{см}}. \quad (3)$$

При изучении процесса генерации МВ внешнее поле в плоскости образца отсутствовало, поэтому вклад в $H_{\text{нп}}$ определялся только плоскостной компонентой поля размагничивания $H_{m\parallel}$, которая максимальна вблизи поверхностей пленки. Естественно ожидать, что и процесс перемагничивания в данном случае начнется с приповерхностных слоев образца. Интересно определить, на каком удалении от поверхности пленки $\Delta h_{\text{кр}}$ еще сильно влияние плоскостной компоненты $H_{m\parallel}$. Расчеты показали, что для $\Delta h = 0.1 \div 1$ мкм при фиксированном удалении от ДГ Δ изменение поля $H_{m\parallel}$ по толщине пленки незначительно.

Компоненты суммарного поля $H_{\text{эфф}\perp}$ и $H_{\text{нп}}$ в окрестности ДГ полосового домена на удалении 0.1—0.5 мкм от поверхности образца для различных значений $H_{\text{нп}}$ и соответствующих им Δ представлены на диаграмме $H_{\text{эфф}}$ ($H_{\text{нп}}$) (рис. 1, а). Как видно, эти точки оказываются близки к определенным в предыдущем разделе значениям критического поля начала неоднородного вращения магнитных моментов. При больших значениях Δh (1 и 3 мкм) компонента $H_{m\parallel}$ сильно уменьшается и соответствующие точки на диаграмме ложатся далеко от критической кривой потери устойчивости.

Таким образом, можно считать, что генерация МВ действительно начинается в тех участках образца, где выполняются условия потери устойчивости однородно-намагниченного состояния для данного образца, т. е. в окрестности доменных границ в приповерхностных слоях пленки (в слое толщиной ≤ 1 мкм). Магнитодипольное взаимодействие создает благоприятные условия для бурного развития процесса перемагничивания в этих областях.

4. Влияние постоянного поля в плоскости на генерацию магнитных возмущений

Мы рассмотрели процесс генерации МВ под действием импульсного магнитного поля. Исследуем теперь, как меняются условия генерации МВ при наличии постоянного магнитного поля в плоскости образца. Если

верно наше предположение о том, что разворот магнитных моментов начинается в тех областях впереди ДГ, где выполнены условия потери устойчивости

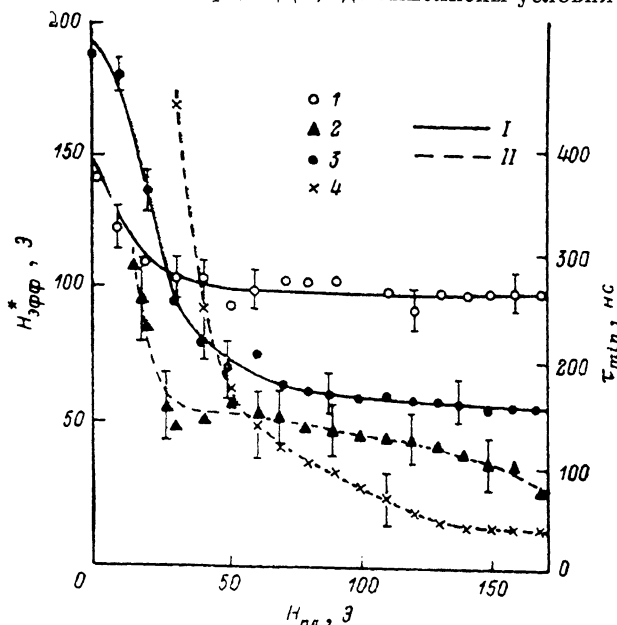


Рис. 3. Зависимость порогового поля $H_{зф}^*$ (I) и минимального времени τ_{min} (II) начала генерации МВ от поля в плоскости $H_{пл}$.

1, 2 — ЦМД; 3, 4 — полосовые домены.

чивости однородного состояния, то увеличение поля в плоскости должно вызывать снижение порогового значения импульсного поля, при котором начинается генерация МВ. Соответствующая экспериментальная зависи-

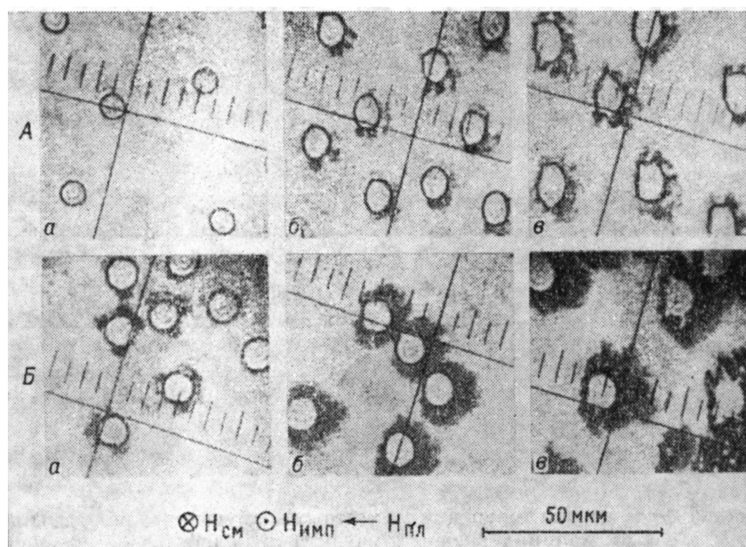
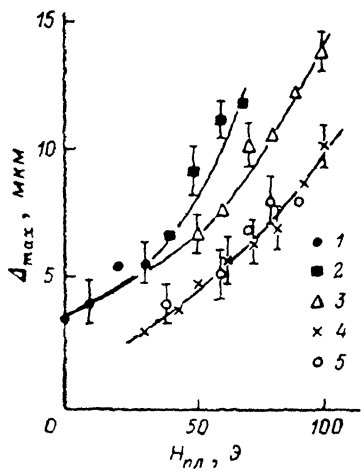


Рис. 4. Влияние поля в плоскости $H_{пл}$ на процесс генерации МВ.

$H_{см} = 105$ Э, $\tau = 300$ нс. $H_{имп} = 215$ (А) и 690 Э (Б); $H_{пл} = 0$ (а), 50 (б) и 70 Э (в).

мость для полосовых доменов и ЦМД представлена на рис. 3. Кроме того, уменьшается интервал времени между фронтом $H_{имп}$ и началом генерации МВ τ_{min} (рис. 3).

Внешнее поле в плоскости, складываясь с плоскостной компонентой поля размагничивания $H_{\text{пл}}$, приводит к расширению области впереди ДГ, в которой идет вращение магнитных моментов (рис. 4). Зависимость максимального удаления Δ_{max} от напряженности $H_{\text{пл}}$ для двух различных значений $H_{\text{имп}}$ приведена на рис. 5; $H_{\text{пл}}$ в данном случае было приложено вдоль одной из осей кубической анизотропии типа [112].



Нижняя кривая соответствует значению $H_{\text{имп}} = 215$ Э, при котором в отсутствие $H_{\text{пл}}$ генерация МВ не происходит (рис. 4, А). Две ветви верхней кривой и различные обозначения на нижней кривой соответствуют противоположным направлениям $H_{\text{пл}}$ и отражают влияние кубической анизотропии на генерацию МВ.

Из рис. 4 также ясно видно, что поле $H_{\text{пл}}$ приводит не только к увеличе-

Рис. 5. Зависимость максимального удаления МВ от ДГ Δ_{max} от поля в плоскости $H_{\text{пл}}$ при $\tau = 300$ нс.

1-3 -- $H_{\text{имп}} = 690$; 4, 5 -- 215 Э. 1 — совпадающие точки; 2, 5 — $H_{\text{пл}} \uparrow \uparrow [112]$; 3, 4 — $H_{\text{пл}} \uparrow \downarrow [112]$.

нию Δ_{max} , но и к явной асимметрии области, в которой развиваются МВ. Для объяснения этого факта рассмотрим схематическое распределение полей в поперечном сечении домена. Как видно из рис. 6, а, существуют две

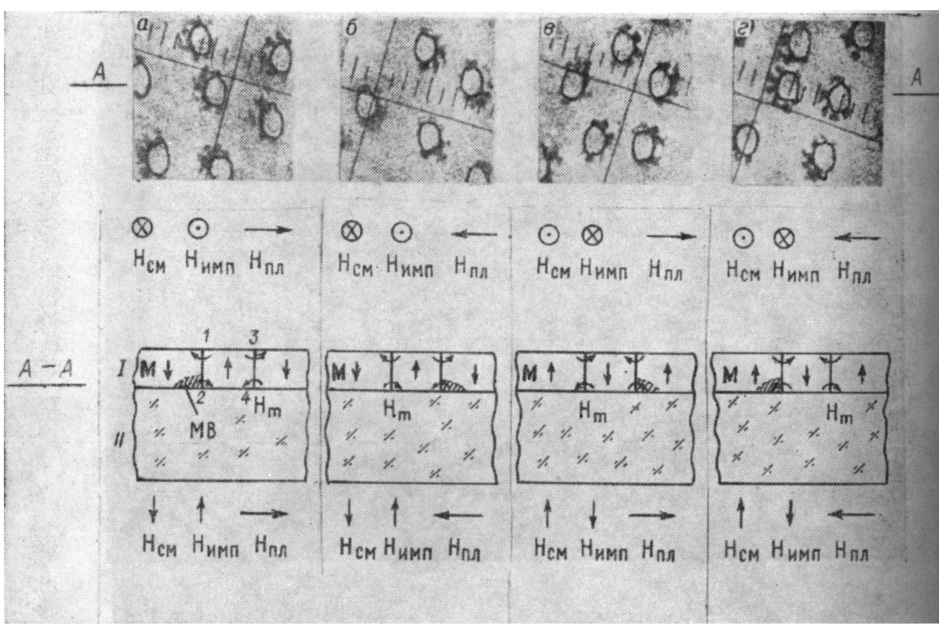


Рис. 6. Анализ места начала генерации магнитных возмущений при различных ориентациях внешних магнитных полей.

$H_{\text{с1}} = 105$, $H_{\text{имп}} = 215$, $H_{\text{пл}} = 60$ Э, $\tau = 300$ нс. I — пленка ФГ, II — подложка.

области (2, 3): одна — у подложки, другая — у границы раздела пленка-воздух, в которых внешнее поле $H_{\text{пл}}$ складывается с плоскостной компонентой размагничивающего поля $H_{\text{мт}}$. В двух других областях (1, 4) эти поля вычитаются. Если бы свойства пленки не менялись по толщине, то, наблюдая напросвет интегральную картину перемagnичивания, мы

видели бы усиление генерации МВ в двух направлениях. Однако сопоставление картины распределения полей с соответствующей фотографией, иллюстрирующей развитие МВ в данных условиях, показывает, что генерация МВ происходит лишь в области 2, расположенной вблизи границы пленка—подложка. Аналогичные рассуждения можно провести и для других распределений внешних полей (рис. 6, б—г). Это говорит о том, что свойства переходного слоя между подложкой и пленкой отличаются от свойств остальной части пленки. По всей видимости, этот слой обладает пониженной одноосной анизотропией.

В работе изучена зависимость критического значения нормальной составляющей внешнего импульсного магнитного поля, при котором в пленке ФГ начинается неоднородное вращение векторов намагниченности, от величины и ориентации постоянного поля, приложенного в плоскости образца.

Исследованы особенности неоднородного вращения векторов намагниченности вблизи движущейся доменной границы, а также влияние поля в плоскости на развитие этого процесса.

Сравнение расчетных значений эффективных магнитных полей, действующих на векторы намагниченности в области генерации МВ, с данными эксперимента по неоднородному вращению магнитных моментов в образце без доменной структуры показало одинаковую природу этих явлений. Следовательно, генерацию магнитных возмущений можно считать частным случаем неоднородного вращения векторов намагниченности. Определяющим в развитии этого процесса являются распределение и напряженность суммарного магнитного поля в окрестности ДГ.

Показано, что генерация МВ в первую очередь начинается в переходном слое от подложки к пленке, толщина которого, по оценке, составляет ~1 мкм или около 10 % толщины пленки.

Список литературы

- [1] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. № 3. С. 1006—1022.
- [2] Иванов Л. П., Лисовский Ф. В., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А. // Физика многочастичных систем. 1984. № 6. С. 76—98.
- [3] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Морченко А. Т., Непокойчицкий Г. А. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 6. С. 337—341.
- [4] Куделькин Н. Н., Прохоров А. М., Рандошкин В. В., Сигачев В. Б., Тимошечкин М. И. // ДАН СССР. 1985. Т. 281. № 4. С. 848—851.
- [5] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А., Никитин Н. И. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 3. С. 839—847.
- [6] Логгунов М. В., Рандошкин В. В. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 1. С. 28—32.

Московский
государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Москва

Поступило в Редакцию
29 мая 1989 г.
В окончательной редакции
13 сентября 1989 г.