

УДК 538.221
 © 1990

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ ДЛЯ СПИНОВЫХ ВОЛН В МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ

Р. С. Исхаков, А. С. Чеканов, Л. А. Чеканова

Сообщается об экспериментальном исследовании спектра спиновых волн в мультислойных ферромагнитных пленках. Обнаружено, что квазипериодическая одномерная модуляция основных магнитных параметров по толщине (обмен, намагниченность) мультислойных пленок приводит к специфической модификации дисперсионного закона для спиновых волн $\omega(k^2)$. Показано, что волновой вектор характерной особенности модификации $\omega(k^2)$ — координата точки перегиба — однозначно соответствует волновому вектору модуляции структуры $k_q = 2\pi/\lambda$ (λ — период чередования слоев). Зависимость же затухания $\Delta H_n(n)$ сохраняет вид, установленный ранее на «однослойных» пленках неупорядоченных сплавов: $\Delta H_n > \text{const}$ до некоторого k_c , $\Delta H_n \sim k^2$ для $k \geq k_c$. Однако для мультислойных пленок волновой вектор k_c также определяется волновым вектором модуляции структуры, $k_c = k_q$. Величина τ определяется структурным состоянием слоев, составляющих мультислойную пленку: для кристаллических слоев $\tau_p \approx 1.8$, для аморфных $\tau_{ам} \approx 0.9$.

Целью нашей работы является исследование спектра спиновых волн в тонкой ферромагнитной мультислойной пленке — металлической сверхрешетке, составленной из индивидуальных слоев с толщинами 100 Å, — методом СВР. Эта задача представляется нам актуальной по следующим причинам. Во-первых, прямое наблюдение спиновых волн методом СВР в мультислойных пленках представляет возможность установить здесь их закон дисперсии. Во-вторых, восстановленный закон дисперсии для спиновых волн позволяет измерить константу обменного взаимодействия в этом сложном композитном материале. И, в-третьих, специфика композитного материала должна каким-то образом проявиться на законе дисперсии спиновых волн, приводя к некоторым модификациям $\omega(k)$. Реальность последнего предположения обусловлена следующими предпосылками.

Методом СВР на тонких ферромагнитных пленках аморфных сплавов и пересыщенных твердых растворов в последние годы наблюдались модификации закона дисперсии для спиновых волн, обусловленные, согласно теоретической работе [1], флуктуациями обмена и намагниченности соответственно. Исследованиями было установлено, что причиной модификации закона дисперсии спиновых волн, наблюдаемых методом СВР в этих пленках, являются химические (фазовые) неоднородности масштаба ~ 100 Å. Различие заключается только в том, что в неупорядоченных сплавах переходный металл — металлоид (ПМ—М) химические неоднородности проявляют себя через флуктуации обмена α субмикронного масштаба (Co—P [2], Fe—В [3] и т. д.), а в неупорядоченных сплавах переходный металл — переходный металл (ПМ—ПМ) — через пространственные флуктуации модуля намагниченности этого же масштаба (Co—Zr [4], Fe—Zr [5] и т. д.). Оказалось также, что указанные химические неоднородности проявляются и в зависимостях ширины линии спин-волновых мод спектров СВР $\Delta H_n(n)$ [6, 7], причем проявляются совершенно одинаково в различных типах сплавов, тогда как закон дисперсии в них эти же неоднородности

модифицируют по-разному. Таким образом, в настоящее время методом СВР в волновом диапазоне $\sim 10^5 - 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ уверенно регистрируются два типа модификаций закона дисперсии $\delta H_{\mathbf{k}}(n^2) = H_1 - H_n \equiv \alpha M [1 - j(k)]k^2$ и один тип модификации зависимости ширины спин-волновых мод, что позволяет по результатам анализа спектра СВР пленки неупорядоченного сплава: 1) определить главный флуктуирующий параметр спиновой системы (обмен или намагниченность), 2) измерить его корреляционный радиус.

Мультислойная пленка, представляющая собой среду с искусственно сформированными химическими (либо фазовыми) неоднородностями, так же как и пленка неупорядоченного сплава, является системой с флуктуирующими спиновыми параметрами, отличаясь от систем, изученных ранее [2-7], лишь характером пространственного распределения этих флуктуаций. (Действительно, аморфные сплавы (АС) и твердые растворы вследствие изотропного и однородного распределения химических неоднородностей

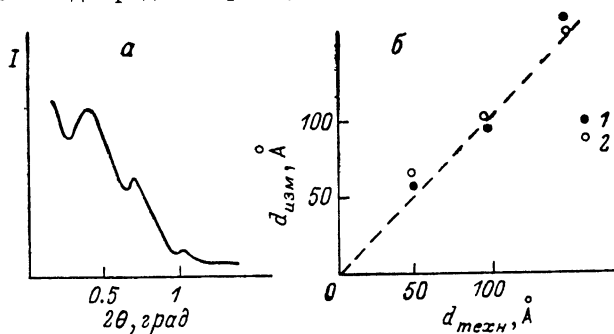


Рис. 1. Картина малоуглового рассеяния рентгеновских лучей ($\text{Cu } K_{\alpha}$) — осцилляции Кизиха — на мультислойной структуре Co-P/Ni-P (толщина слоя 50 Å) (а) и сравнение данных по периоду мультислойной структуры, получаемых различными методами (б).

1 — данные МУР, 2 — метод взвешивания.

характеризуются однородным и изотропным распределением флуктуации обмена и намагниченности, тогда как мультислойные композиты могут быть охарактеризованы в основном одномерной модуляцией параметров спиновой системы). Поэтому размер флуктуаций спиновых параметров должен проявить себя каким-то образом и в спектре СВР мультислойных пленок. Задача исследования — экспериментально обнаружить эти проявления.

1. Эксперимент

Исследуемые мультислойные пленки с одномерной модуляцией спиновых параметров изготавливались методом химического осаждения; общая толщина пленки составляла $2000 - 2500 \text{ Å}$, а толщины d_i индивидуальных слоев (иными словами, период модуляции) варьировались от 20 до 200 Å . Исследовались три типа мультислойных пленок: а) композиционно-модулируемая структура, получаемая чередованием слоев (кристаллических либо аморфных) сплавов Co-P и Ni-P ; б) гексагональный ГПУ Co(P)/ кубический ГЦК Co(P) ; в) модулированная структура типа «порядок — беспорядок», получаемая периодическим чередованием тонких слоев кристаллического сплава ГЦК Co_{92}P_8 и аморфного сплава $\text{Co}_{90}\text{P}_{10}$. Период модуляции оценивался по скорости осаждения индивидуальных слоев, которая определялась весовым методом (точность $\sim 10\%$). Для нескольких образцов период также был измерен методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (излучение $\text{Cu } K_{\alpha}$) по осцилляциям Кизиха [8]. Результаты прямого и косвенного определения периода модуляции приведены на рис. 1. Согласие, как видно из рисунка, удовлетворительное.

Перечисленные типы модуляции выбирались из следующих соображений. Композиционно-модулируемая структура представляет собой композит, в котором все параметры спиновой системы (обмен, намагниченность, анизотропия и т. д.) также промодулированы: $\alpha(z)$, $M(z)$ и т. д. Иная ситуация может быть реализована в сплавах Co—P, диаграмма состояний которых была установлена ранее [9, 10]. В перечисленных работах показано, что при выбранных технологических режимах сплав Co—P в области $x=0\div 4$ ат. % P получался в виде твердого раствора ГПУ Co(P); при $x=5\div 8$ ат. % P сплав получался в виде твердого раствора ГЦК Co(P); в области $x \geq 9$ ат. % P сплав имел аморфную структуру с ГЦК-подобной симметрией ближнего окружения. Таким образом, диаграмма состояний сплава Co—P характеризовалась двумя критическими концентрациями,

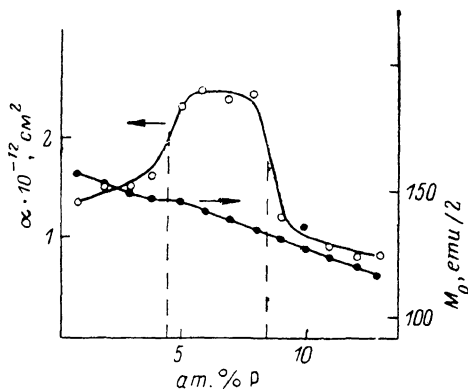


Рис. 2. Концентрационные зависимости намагниченности насыщения M и постоянной обмена α для Co—P сплавов [9, 10].

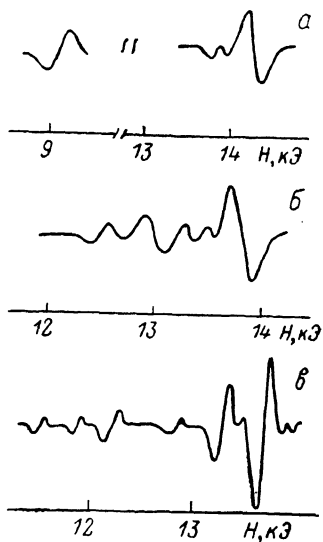


Рис. 3. «Стадии» формирования единого спектра СВР в мультислойных пленках Co—P/Ni—P.

$d_{\text{сл}}$, Å: а — 500, б — 300, в — 100.

разделяющими состояния сплавов с различными атомными структурами. Однако на концентрационных зависимостях основных магнитных параметров критические концентрации проявлялись по-разному. Так, на зависимости $\alpha(x)$ (рис. 2) они проявились в виде существенного скачкообразного увеличения величины α при x_1 и столь же существенного скачкообразного уменьшения α при x_2 при локализации скачков в пределах области $\Delta x \sim 1$ ат. % P [9]. На зависимости $H_a(x)$ (где H_a — величина поля локальной анизотропии) проявилась только точка x_1 , в окрестности которой происходит уменьшение величины H_a в несколько раз [10]. На линейной зависимости $M(x)$ критические концентрации вообще не проявились (градиент зависимости ~ 40 Гс/ат. % P). Поэтому в мультислойных пленках, изготовленных путем чередования индивидуальных слоев из разных относительно x_1 и x_2 концентрационных областей, может быть получена модуляция не всех, а только отдельных параметров спиновой системы. Например, для случая ГЦК $\text{Co}_{92}\text{P}_8/\text{AC Co}_{90}\text{P}_{10}$ — модуляция только обмена $\alpha(z)$ и т. д.

Спектр спин-волнового резонанса изучался на стандартном спектрометре ЭПА-2М с частотой $\chi = 9.2$ ГГц. Пленки намагничивались нормально к поверхности, температура измерения — комнатная. Условия наблюдения спектра СВР на мультислойных пленках устанавливались опытным путем. Основным требованием, как оказалось, является ограничение величины толщины индивидуальных слоев некоторой критической толщиной d_c . Например, для пленок Co—P/Ni—P эта критическая толщина составляет ~ 200 Å. При толщине индивидуальных слоев ~ 150 Å на мультислойной пленке наблюдается единый спектр СВР, содержащий до 10 резо-

нансных пиков с распределением интенсивностей ($\sim 1/n^2$), соответствующим объемным модам (рис. 3). При толщине индивидуальных слоев $\sim 300 \text{ \AA}$ наблюдается сложный спектр — раздвоение пиков, отсутствует закономерность спада интенсивности пиков и т. д., что существенно затрудняет его интерпретацию, и, наконец, при толщине индивидуальных слоев $\geq 500 \text{ \AA}$ наблюдаются два независимых спектра СВР от каждого отдельного слоя. «Стадии» формирования единого спектра СВР мультислойной пленки, аналогичные рис. 3, свойственны всем трем типам модуляции, рассмотренным в работе. Обработка же единого спектра СВР велась по правилам, отработанным ранее [2-7] для пленок неупорядоченных сплавов величины резонансных полей отстраивались в координатах ($H_1 - H_a, n^2$),

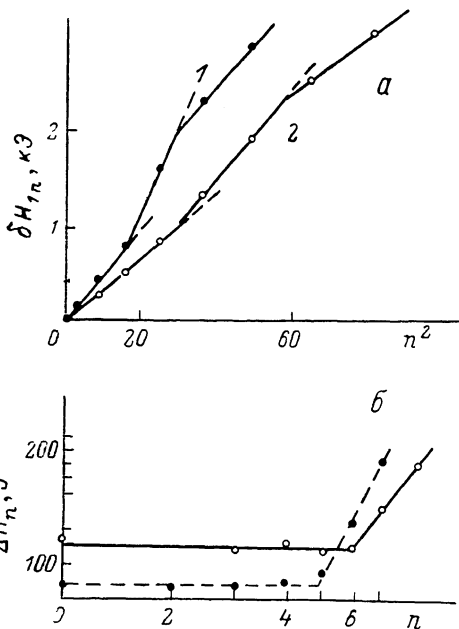


Рис. 4. Закон дисперсии для спиновых волн (а) и зависимость ширины линии спин-волновых мод от номера мод $\Delta H_n(n)$ (б) в мультислойных пленках Со—Р/Ni—Р.

$$d_{\text{из}} = 1800 \text{ \AA}.$$

$$d_{\text{сл}}, \text{ \AA}: 1 - 80, 2 - 60.$$

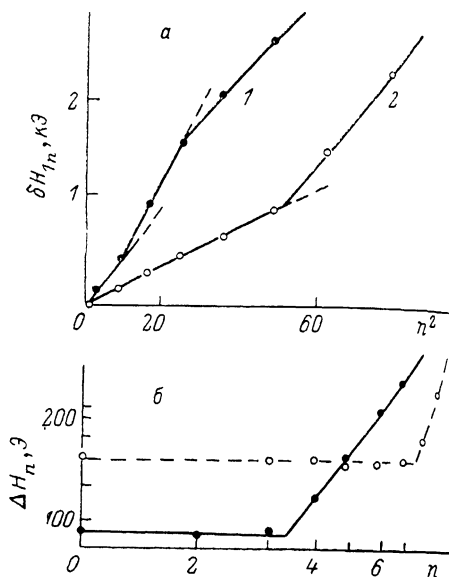


Рис. 5. Закон дисперсии для спиновых волн (а) и зависимость ширины линии спин-волновых мод (б) в мультислойных пленках Со—Р. $d_{\text{из}} = 2000 \text{ \AA}$.

$$1 - \text{ГЦК/АС}, d_{\text{сл}} = 100 \text{ \AA}; 2 - \text{ГПУ/ГЦК}, d_{\text{сл}} = 50 \text{ \AA}.$$

что позволяло (благодаря связи $k_n = n\pi/d_0$, где d_0 — общая толщина мультислойной пленки) сопоставлять зависимость $\delta H_{1n}(k^2)$ с дисперсионной кривой $\omega(k^2)$; ширина линии спин-волновой моды ΔH_n определялась по разнице координат экстремумов кривой производной спектра поглощения; анализ зависимости функции $\Delta H_n(n)$ проводился в двойных логарифмических координатах: $\lg \Delta H_n$ от $\lg n$.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены экспериментальные кривые $\delta H_{1n}(n^2)$ (а) и $\Delta H_n(n)$ (б) в виде зависимости $\lg \Delta H_n$ от $\lg n$ для двух композиционно-модулированных мультислойных пленок Со—Р/Ni—Р, отличающихся структурным состоянием индивидуальных слоев: для пленок $\text{Co}_{93}\text{P}_7/\text{Ni}_{96}\text{P}_4$ — это состояние кристалл/кристалл, а для пленок $\text{Co}_{89}\text{P}_{11}/\text{Ni}_{86}\text{P}_{14}$ — аморфность/аморфность. Аналогичные кривые для Со—Р мультислойных пленок, модулированных по фазовому состоянию, — ГПУ/ГЦК и ГЦК/АС, приведены на рис. 5. Начнем анализ полученных экспериментальных

зависимостей с ширины линии спин-волновых мод мультислойных пленок. Видно, что зависимости $\Delta H_n(n)$ для всех трех типов модуляции мультислойных пленок полностью тождественны зависимостям $\Delta H_n(n)$, наблюдаемым ранее [6, 7] на пленках аморфных сплавов и пересыщенных твердых растворов. Так же как и в [6, 7], $\Delta H_n(k) \sim \text{const}$ до некоторого k_c , а в области волновых векторов, больших k_c , описывается степенной функцией: $\Delta H_n \sim k^\tau$. Оказалось, что для мультислойных пленок сохраняет силу общая закономерность, обнаруженная в [6] для неупорядоченных сплавов, заключающаяся в изменении показателя степени τ вдвое при аморфизации (кристаллизации) сплава. Кроме того, совпадают и величины τ : в [6] установлено, что $\tau \approx 2$ для кристаллического и $\tau \approx 1$ для аморфного состояния сплава. В нашем случае для композиционной модуляции Co—P/Ni—P при аморфности индивидуальных слоев имеем $\tau \approx 0.9$, при кристаллических индивидуальных слоях $\tau \approx 1.8$. Аналогично для мультислойной пленки ГПУ Co(P)/ГЦК Co(P) эксперимент дает величину показателя степенной зависимости в области $k > k_c$ $\tau \approx 1.8$, а для мультислойной пленки ГЦК Co(P)/АС Co(P) $\tau \approx 1.3$, что характерно для частично кристаллизованного аморфного сплава (см. [6]). Перечисленные результаты позволяют утверждать, что изменение показателя степени τ при аморфизации (кристаллизации) сплава является универсальным свойством спектра спиновых волн и дает возможность использовать метод спин-волнового резонанса для идентификации аморфного состояния.

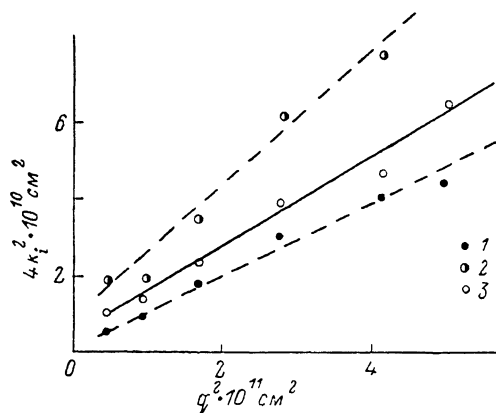
Обсудим теперь физический смысл волнового вектора k_c в случае мультислойных пленок. Для неупорядоченных сплавов ПМ—М и ПМ—ПМ (кристаллических и аморфных), рассмотренных в начале статьи, физический смысл k_c уже установлен [6] — в этих материалах волновой вектор k_c , определяемый из точки излома зависимости $\Delta H_n(n)$, тождественно равен критическому волновому вектору, определяемому из точки излома закона дисперсии для спиновых волн $\delta H_{1n}(n^2)$, и указывает на размер химической (либо фазовой) неоднородности в сплаве, $r_c \approx 1/k_c$. В случае же мультислойных пленок, как оказалось, величина удвоенного волнового вектора k_c (в пределах экспериментальной погрешности) близка к величине волнового вектора модуляции структуры $q = 2\pi/(d_1 + d_2)$, определяемой периодом модуляции $(d_1 + d_2)$, где d_1, d_2 — толщины индивидуальных слоев. Это легко устанавливается в результате прямых подстановок величин d_0, d_1 и d_2 в выражения для k_c и q . Поэтому эффект излома зависимости $\Delta H_n(n)$ в координатах $\lg \Delta H_n$ от $\lg n$ (рис. 4, 5) есть результат проявления на релаксационных характеристиках спектра СВР мультислойных пленок периода модуляции структуры. В дальнейшем мы наглядно проиллюстрируем сделанное утверждение, а теперь перейдем к модификации закона дисперсии $\delta H_{1n}(n^2)$.

Видно, что мультислойные пленки, как композиционно-, так и структурно-модулированные, характеризуются одним и тем же типом модификации закона дисперсии для спиновых волн, качественно отличающимся от модификаций, наблюдаемых на пленках сплавов ПМ—М и ПМ—ПМ ранее. Во-первых, характерные волновые векторы k_1 и k_2 точек изломов зависимости $\delta H_{1n}(n^2)$ не совпадают с волновым вектором k_c излома зависимости $\Delta H_n(n)$, а всегда образуют неравенство $k_1 < k_c < k_2$. Во-вторых, векторы k_1, k_2 удовлетворяют соотношению $(k_1/k_2)^2 \sim 1.5 \div 2$ и, так же как и k_c , зависят от периода модуляции структуры. Последнее позволяет предположить, что экспериментально обнаруженный тип модификации закона дисперсии $\delta H_{1n}(n^2)$ является следствием одномерной квазипериодической модуляции. На это же указывает сопоставление экспериментальных зависимостей $\delta H_{1n}(n^2)$ с теоретически рассчитанными в работе [11] модификациями закона дисперсии для спиновых волн в средах с квазипериодической модуляцией обмана и намагниченности.

В [11] квазипериодическая модуляция описывается введением двухпараметрической корреляционной функции вида $k(x) = e^{-p^2 x^2/2} \cos qx$, которая в зависимости от соотношения между параметрами p и q может моделировать широкий диапазон изменений отношения между стохастиче-

ной и периодичностью в системе. Оказалось, что при расчетах с выбранной корреляционной функцией и флуктуации намагниченности, и флуктуации обмена приводят к качественно подобной модификации закона дисперсии. На кривой $\omega(k^2)$ при $q \ll p$ должен наблюдаться перегиб, с ростом q модификация принимает форму ступеньки. Координата точки перегиба определяется выражением $k_n^2 = (p^2 + q^2)/4$. Теоретическое выражение для точки перегиба подсказывает способ проверки справедливости сопоставления экспериментальных кривых $\delta H_{1n}(n^2)$ с теоретически рассчитанными.

Предположим, что координата точки перегиба k_n однозначно определяется из координаты точки излома k_c зависимости ширины линии спиновых мод $\Delta H_n(n)$, а характерные волновые векторы k_1, k_2 изломов



зависимости $\delta H_n(n)$ могут быть поставлены в соответствие с координатами точек максимальной кривизны теоретической зависимости $\omega(k^2)$. Тогда все три волновых вектора k_c, k_1 и k_2 должны зависеть от периода одномер-

Рис. 6. Влияние периода модуляции мультислойных структур Co—P/Ni—P и Co—P/Co—P на координаты характерных волновых векторов k_1 (1), k_2 (2), k_c (3) закона дисперсии $\delta H_{1n}(n^2)$ и зависимости $\Delta H_n(n)$.

ной модуляции следующим образом: $k_c^2 \sim q^2$ и т. д. И действительно, именно такая зависимость и наблюдается на опыте. На рис. 6 представлены линейные зависимости функций k_c^2, k_1^2, k_2^2 от величины $q^2 = (2\pi/(d_1 + d_2))^2$.

Таким образом, на мультислойных пленках наблюдается третий тип модификации закона дисперсии для спиновых волн. Главный элемент модификации — перегиб кривой $\delta H_{1n}(n^2)$ (и соответственно $\omega(k^2)$) типа ступеньки. Далее один и тот же характер модификации $\delta H_{1n}(n^2)$ для всех изученных типов модуляции мультислойных пленок свидетельствует о доминирующем влиянии на модификацию закона дисперсии факта одномерной модуляции спинового параметра, а не типа этого параметра. И наконец, обнаруженная зависимость $k_c^2(q^2) \equiv k_n^2(q^2)$ позволяет, используя возможность прямого измерения величины волнового вектора модуляции q , определить величину p , т. е. мы получаем возможность измерения всех основных параметров, характеризующих двухпараметрическую корреляционную функцию. Для сплавов, исследуемых в работе, получаем $p \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ (рис. 6).

1. Приготовлены многослойные пленки, пригодные для исследования методом СВЧ спектроскопии, со следующими типами модуляций: композиционная модуляция Co/Ni, модуляция по симметрии ГПУ Co/ГЦК Co, модуляция «порядок—беспорядок» ГЦК Co/аморфный Co(P). Период модуляции 20—200 Å.

2. Методом СВР на мультислойных пленках независимо от вида модуляции обнаружен один и тот же характер модификации закона дисперсии для спиновых волн $\delta H_{1n}(n^2)$, существенно отличный от наблюдаемых ранее на пленках неупорядоченных сплавов. Главный элемент модификации — перегиб кривой $\delta H_{1n}(n^2)$ типа ступеньки с координатой точки перегиба, зависящей от периода модуляции. Это свидетельствует о доминирующем влиянии на модификацию факта одномерной модуляции спиновых параметров, а не пространственных флуктуаций этих параметров.

3. Обнаружено, что характерный волновой вектор модуляции проявляется на зависимости ширины спин-волновых мод $\Delta H_n(k)$. Характер же

модификации зависимости $\Delta H_n(n)$ аналогичен наблюдаемым ранее на пленках неупорядоченных сплавов.

Список литературы

- [1] Игнатченко В. А., Исаков Р. С. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1980. Т. 44. № 7. С. 1434—1437.
- [2] Игнатченко В. А., Исаков Р. С., Чеканова Л. А., Чистяков Н. С. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. № 2. С. 653—657.
- [3] Maksymovicz L. J., Temple D., Zuberek R. // JMMM. 1986. V. 58. N 3. P. 303—308.
- [4] Исаков Р. С., Бруштунов М. М., Чеканов А. С. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2699—2704.
- [5] Исаков Р. С., Бруштунов М. М., Турпанов И. А. // ФММ. 1988. Т. 66. № 3. С. 469—477.
- [6] Исаков Р. С., Чеканов А. С., Чеканова Л. А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 4. С. 970—978.
- [7] Iskhakov R. S., Maksymovicz L. J., Temple D., Zuberek R. // Magn. prop. of amorph. metals. Elsevier Publ., 1987. P. 353—356.
- [8] Dinlage J., Frerichs R. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 9. P. 2633—2638.
- [9] Исаков Р. С., Попов Г. В., Карпенко М. М. // ФММ. 1983. Т. 56. № 1. С. 85—93.
- [10] Игнатченко В. А., Исаков Р. С., Попов Г. В. // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. № 5. С. 1518—1531.
- [11] Ignatchenko V. A., Iskhakov R. S., Chekanov A. S., Chekanova L. A. // Digest of the 3 ICPRM—Szczyrk—Bila. Poland, 1986. P. 126.

Институт физики
им. Л. В. Киренского СО АН СССР
Красноярск

Поступило в Редакцию
25 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
25 июля 1989 г.