

Модель обменного смещения в трехслойной структуре ФМ/АФМ/ФМ

М.Л. Панкратова¹, А.С. Ковалев^{1,2}

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: pankratova@ilt.kharkov.ua

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61107, Украина

Статья поступила в редакцию 14 июля 2015 г., опубликована онлайн 25 августа 2015 г.

Теоретически исследованы особенности явления обменного смещения в трехслойных структурах ФМ/АФМ/ФМ, которые активно исследуются экспериментально. В рамках предложенной дискретной модели ферромагнитных слоев таких многослойных структур получены зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля. Показано, что на зависимостях намагниченности от поля наблюдаются горизонтальные плато, расщепление петли гистерезиса, ее асимметрия. Рассмотрено влияние дефектов интерфейса на явление обменного смещения и его особенности. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.

Теоретично досліджено особливості явища обмінного зсуву у тришарових структурах ФМ/АФМ/ФМ, які активно вивчаються експериментально. У рамках запропонованої дискретної моделі феромагнітних шарів таких багатшарових структур отримано залежності намагніченості від зовнішнього магнітного поля. Показано, що на залежностях намагніченості від поля спостерігаються горизонтальні плато, розщеплення петлі гистерезису, її асиметрія. Розглянуто вплив дефектів інтерфейсу на явище обмінного зсуву та його особливості. Отримані результати якісно узгоджуються з експериментальними даними.

PACS: 75.70.Cn Магнитные свойства вблизи границы раздела (многослойные структуры, сверхрешетки, гетероструктуры);
75.60.Ch Доменные стенки и доменная структура;
75.60.Ej Кривые намагничивания, гистерезис, эффект Баркхаузена и связанные эффекты.

Ключевые слова: обменное смещение, магнитные многослойные системы, магнитный гистерезис, неоднородный интерфейс.

1. Введение

Явление обменного смещения (ОС) возникает в структурах, в которых контактируют ферромагнитная (ФМ) и антиферромагнитная (АФМ) подсистемы [1–5]. Эффект проявляется в сдвиге зависимости намагниченности ферромагнитной пленки от внешнего магнитного поля $M(H)$ вдоль оси поля. Сдвиг петли гистерезиса может сопровождаться асимметрией кривой $M(H)$, возникновением горизонтальных плато на ней, участков с разным наклоном и расщеплением гистерезисной петли [6,7]. Несмотря на большое число экспериментальных и теоретических работ [2–5], причина возникновения обменного смещения остается не до конца исследованной. В теоретических работах ОС связывалось с возникновением доменных границ в ФМ [4,8,9]

или АФМ [10] части подсистемы, шероховатостью ФМ/АФМ интерфейса [11]. В двухслойных ФМ/АФМ системах сложно различить влияние ФМ и АФМ подсистем и их границ раздела на явление ОС и его особенности [12]. Однако, несмотря на недостаточное исследование как экспериментально, так и теоретически, явление ОС уже находит применение в технологических приложениях [2]. В таких системах важен не сам «обменный сдвиг» (в среднем он может быть и нулевым). Важным становится возникновение различных полевых зависимостей намагниченности при разных направлениях внешнего поля, что дает возможность управления технологическими устройствами с помощью слабых магнитных полей. Недавние эксперименты в трехслойных структурах ФМ/АФМ/ФМ показали, что в таких системах возможно различить вклады раз-

личных магнитных взаимодействий [12]. В трехслойной системе два ферромагнитных слоя даже при их переориентации в магнитном поле могут скомпенсировать свое воздействие на антиферромагнитную прослойку. Магнитные моменты АФМ остаются фиксированными, и не происходит их переориентация во внешнем поле [12,13]. Частичная переориентация магнитных моментов на ФМ/АФМ интерфейсе приводит к эффекту тренинга, но величина сдвига и основные особенности намагниченности сохраняются [12]. На полученных в таких структурах кривых намагниченности наблюдается расщепление петли гистерезиса на две петли с разделяющим их горизонтальным плато. Положение плато при $M/M_{\text{saturation}} = 0,8$ обусловлено различными толщинами ФМ пленок в такой структуре [12]. Также на зависимостях намагниченности от внешнего магнитного поля возникают наклонные участки кривой.

Цель данной работы — теоретическое описание ОС и исследование причин возникновения горизонтального плато и асимметрии в трехслойных системах ФМ/АФМ/ФМ [12,14]. Исследовано влияние обменного взаимодействия в ФМ пленке и через ФМ/АФМ интерфейс, дефектов интерфейса и возникновения неоднородности намагниченности в ФМ пленке. Система изучена в рамках простой дискретной классической модели Гейзенберга, которая сводится к статическому варианту скалярной синусоидальной Клейна–Гордона. Материал статьи изложен следующим образом. Во втором разделе рассмотрена модель трехслойной системы ФМ/АФМ/ФМ с двумя идеальными ФМ/АФМ интерфейсами. В третьей части изучено влияние дефектов границы раздела ФМ/АФМ на особенности полевых зависимостей намагниченности трехслойников ФМ/АФМ/ФМ.

2. Дискретная модель трехслойных ФМ/АФМ/ФМ систем с идеальными границами раздела слоев

Исследована слоистая система ФМ/АФМ/ФМ. Прослойка АФМ считается магнитожесткой, т.е. в магнитных полях, меньших поля спин-флоп перехода, ее магнитная структура фиксирована во время всего процесса перемагничивания. Рассматривается случай нескомпенсированных границ раздела ФМ/АФМ, т.е. слоистого АФМ, в котором в ближайших к границам раздела слоях средний магнитный момент отличен от нуля.

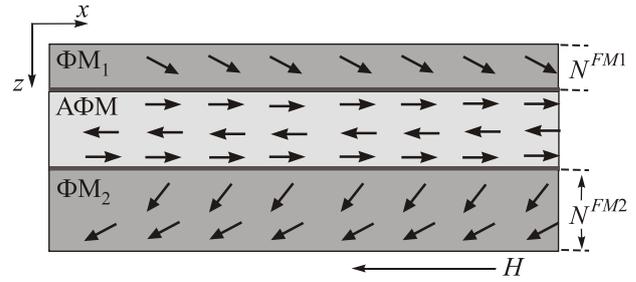


Рис. 1. Схема дискретной модели трехслойной системы ФМ/АФМ/ФМ с идеальными границами раздела.

При этом различаются ситуации с четным и нечетным количеством слоев АФМ, т.е. с различным или одинаковым направлением намагниченности на ФМ/АФМ интерфейсах, что влияет на намагниченность в ферромагнитных слоях. В основной части работы рассмотрен случай нечетного числа АФМ слоев. В этом случае намагниченность в слоях АФМ ближайших к интерфейсу направлена параллельно (рис. 1). Вопрос о четном числе слоев АФМ рассмотрен в конце работы. Учитывается сильная легкоплоскостная анизотропия в обеих ФМ пленках, определяемая, в частности, магнитодипольным взаимодействием. Ориентация магнитных моментов в легкой плоскости определяется углами φ_i^{FMj} , где индекс $j = 1, 2$ нумерует два ФМ слоя. Кроме того, учитывается слабая легкоосная анизотропия β^{FM1}, β^{FM2} в легкой плоскости ФМ слоев. Параметры магнитной анизотропии могут различаться в первой и второй ФМ пленках: $\beta^{FM1} \neq \beta^{FM2}$. Дополнительно учитывалась и поверхностная анизотропия интерфейса, т.е. различное значение параметров анизотропии для атомного ферромагнитного слоя ближайшего к интерфейсу ФМ/АФМ и на свободной границе ФМ пленки: $\beta_1^{FM1} \neq \beta_2^{FM1}$. Рассмотрены ФМ пленки различной толщины $N^{FM1} \neq N^{FM2}$ (N — число атомных слоев в ФМ подсистемах), чтобы легко идентифицировать переворот каждого ФМ слоя. Обменные взаимодействия в ФМ пленках характеризуются параметрами J^{FM1}, J^{FM2} . А обменные взаимодействия через две границы раздела ФМ/АФМ задаются параметрами J_0^{FM1}, J_0^{FM2} . Схема предложенной модели представлена на рис. 1. Предполагается, что структура ФМ слоев однородна вдоль направления x на рисунке.

Энергия такой системы определяется выражением

$$\begin{aligned}
 E = & -J_0^{FM1} \cos \varphi_1^{FM1} - J_0^{FM2} \cos \varphi_1^{FM2} - J^{FM1} \sum_{n=1}^{N^{FM1}-1} \cos (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n+1}^{FM1}) - \\
 & - J^{FM2} \sum_{n=1}^{N^{FM2}-1} \cos (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n+1}^{FM2}) - J^{FM1} \sum_{n=2}^{N^{FM1}} \cos (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n-1}^{FM1}) - J^{FM2} \sum_{n=2}^{N^{FM2}} \cos (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n-1}^{FM2}) - \\
 & - H \sum_{n=1}^{N^{FM1}} \cos \varphi_n^{FM1} - H \sum_{n=1}^{N^{FM2}} \cos \varphi_n^{FM2} - \frac{\beta^{FM1}}{2} \sum_{n=1}^{N^{FM1}} \cos^2 \varphi_n^{FM1} - \frac{\beta^{FM2}}{2} \sum_{n=1}^{N^{FM2}} \cos^2 \varphi_n^{FM2}.
 \end{aligned}$$

Здесь индексы FM1, FM2 нумеруют первый и второй ферромагнитные слои, а нижние индексы указывают номер атомного ферромагнитного слоя $1 \leq n \leq N^{FMj}$ в ферромагнитных пленках, где индекс 1 соответствует

слою, ближайшему к соответствующему интерфейсу. Соответствующие статические конфигурации магнитных моментов ферромагнетиков задаются уравнениями $\partial E / \partial \varphi_i^{FMj} = 0$, которые имеют вид

$$\begin{aligned} (H + J_0^{FM1}) \sin \varphi_1^{FM1} + J \sin (\varphi_1^{FM1} - \varphi_2^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_1^{FM1}) &= 0, \\ H \sin \varphi_n^{FM1} + J^{FM1} \sin (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n-1}^{FM1}) + J^{FM1} \sin (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n+1}^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_n^{FM1}) &= 0, \\ H \sin \varphi_{N^{FM1}}^{FM1} + J^{FM1} \sin (\varphi_{N^{FM1}}^{FM1} - \varphi_{N^{FM1}-1}^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_{N^{FM1}}^{FM1}) &= 0, \\ (H + J_0^{FM2}) \sin \varphi_1^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_1^{FM2} - \varphi_2^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_1^{FM2}) &= 0, \\ H \sin \varphi_n^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n-1}^{FM2}) + J^{FM2} \sin (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n+1}^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_n^{FM2}) &= 0, \\ H \sin \varphi_{N^{FM2}}^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_{N^{FM2}}^{FM2} - \varphi_{N^{FM2}-1}^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_{N^{FM2}}^{FM2}) &= 0. \end{aligned}$$

Эти уравнения допускают решения, описывающие так называемые коллинеарные структуры $\varphi_i^{FM1} = \varphi_i^{FM2} = 0, \pi$. В этих состояниях намагниченность обеих ФМ пленок параллельна или антипараллельна направлению намагниченности внешних поверхностных слоев АФМ. Рассмотрим частный случай, изображенный на рис. 1, когда намагниченность двух поверхностных слоев АФМ совпадает. Кроме того, приведенные уравнения допускают решения для антиколлинеарных однородных структур с антипараллельным упорядочением однородной намагниченности в двух ФМ слоях $\varphi_i^{FM1} = 0$, $\varphi_i^{FM2} = \pi$ (антиколлинеарная фаза АК₁ с ...↑|↓↓..., где стрелками обозначена намагниченность в ФМ слоях, а вертикальная линия соответствует разделяющему их антиферромагнетику). Возможны и более сложные антиколлинеарные структуры, в которых в ФМ пленке направление намагниченности в слоях может зависеть от номера n и быть противоположным: $\varphi_1^{FMj} = 0$, $\varphi_{i+1}^{FMj} = \pi$ (антиколлинеарная фаза АК₂ с ...↑|↓↑...). Причем номер n может обозначать не только номер атомного ферромагнитного слой, но и нумеровать тонкие слабосвя-

занные слои в этой пленке (compartmental model) [12]. Допускаются решения и для более сложных магнитных структур (скошенные фазы) с $\varphi_i^{FM1}, \varphi_i^{FM2} \neq 0, \pi$, отличные от полностью перемангнитенных.

При фиксированных значениях параметров магнитной анизотропии и обменных взаимодействий в ФМ пленках характер магнитной структуры трехслойника и ее зависимости от внешнего магнитного поля определяются величиной магнитного обменного взаимодействия через ФМ/АФМ интерфейсы. Поэтому представляет интерес построение фазовой диаграммы (J_0, H) , описывающей области существования различных типов магнитного упорядочения системы в зависимости от величины взаимодействия ФМ и АФМ подсистем. Линии, отделяющие области существования коллинеарных, антиколлинеарных и скошенных структур, задаются выражениями, приведенными ниже для частного случая ФМ слоев толщиной $N^{FM1} = 1$, $N^{FM2} = 2$. Тип зависимостей намагниченности от поля изменяется с изменением параметра обменного взаимодействия через границу раздела ФМ/АФМ:

$$\begin{aligned} J_0^{FM1,FM2} &= -\frac{H^2 + 2HJ^{FM2} + 2H\beta^{FM2} + 2J^{FM2}\beta^{FM2} + (\beta^{FM2})^2}{H + J^{FM2} + \beta^{FM2}} (\uparrow\uparrow), \\ J_0^{FM1,FM2} &= -H^2 - \beta^{FM1}, \\ J_0^{FM1,FM2} &= -\frac{H^2 - 2HJ^{FM2} - 2H\beta^{FM2} + 2J^{FM2}\beta^{FM2} + (\beta^{FM2})^2}{H - J^{FM2} - \beta^{FM2}} (\downarrow\downarrow), \\ J_0^{FM1,FM2} &= -H^2 + \beta^{FM1}, \\ J_0^{FM1,FM2} &= -\frac{H^2 + 2J^{FM2}\beta^{FM2} - (\beta^{FM2})^2}{H + J^{FM2} - \beta^{FM2}} (\uparrow\downarrow). \end{aligned}$$

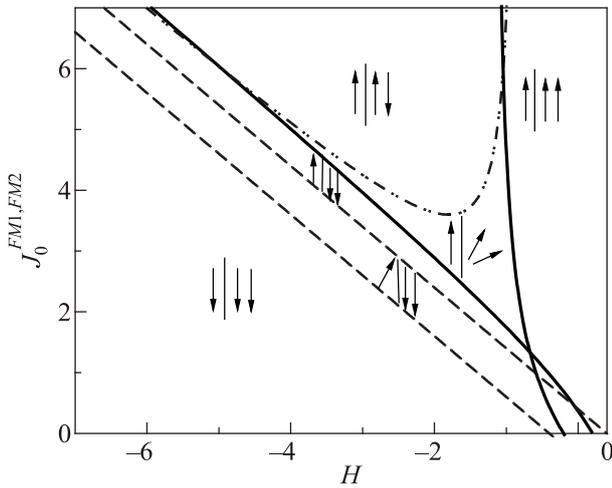


Рис. 2. Области существования коллинеарных, антиколлинеарных и скошенных структур в ФМ части подсистемы трехслойной структуры ФМ/АФМ/ФМ для случая идеального интерфейса и различных параметров магнитной анизотропии для первого и второго ФМ слоев $\beta^{FM1} = 0,4$, $\beta^{FM2} = 0,2$, $J^{FM2} = 1$.

Соответствующие зависимости $J_0^{FM1,FM2}(H)$ представлены на рис. 2, где стрелками отмечены области существования коллинеарных, антиколлинеарных и скошенных структур, а вертикальная черта отделяет векторы, характеризующие намагниченности ферромагнетиков ФМ₁ и ФМ₂. Штриховые линии соответствуют значениям обменного взаимодействия через интерфейс, при которых происходит переворот намагниченности в ФМ₁, а сплошные линии — переворот намагниченности в ФМ₂, штрихпунктирная линия отделяет область существования горизонтального плато на полевой зависимости намагниченности.

Суммарная намагниченность рассмотренной системы задается выражением

$$M = \sum_{n=1}^{N^{FM1}} \cos \varphi_n^{FM1} + \sum_{n=1}^{N^{FM2}} \cos \varphi_n^{FM2}.$$

Ее зависимость от внешнего магнитного поля находили численно с помощью алгоритма релаксации, более подробно описанного в работе [8]. Полученные петли гистерезиса приведены на рис. 3 для разных значений параметров системы, в частности, при изменении параметра обменного взаимодействия через границы раздела ФМ/АФМ и изменении параметра магнитной анизотропии, а также для случая различных параметров обменного взаимодействия через интерфейс для первого и второго ФМ слоев. Все зависимости намагниченности в данном случае приведены для системы с $N^{FM1} = 1$, $N^{FM2} = 2$. Такое соотношение толщин фер-

ромагнитных слоев выбрано в соответствии с реальными экспериментами. Так, например, в [14] толщины ФМ₁/АФМ/ФМ₂ слоев равны 6 нм/4 нм/10 нм.

На рис. 3 видно, что в предложенной модели можно получить все особенности магнитных гистерезисов, полученных ранее экспериментально (рис. 1 в [12], рис. 1 в [14]). Можно заключить, что ОС связано с образованием неоднородных состояний в ФМ пленке. Асимметрия $M(H)$ возникает из-за различных значений магнитной анизотропии в ФМ₁ и ФМ₂. Расщепление петли гистерезиса (рис. 3(б)) может вызываться переворотом первого и второго ФМ слоев, а положение горизонтального плато на зависимости намагниченности от поля обусловлено различной толщиной ФМ пленок. При одинаковой толщине первого и второго ФМ слоев на горизонтальном плато намагниченность отсутствует: $M = 0$.

3. Влияние дефектов интерфейса на особенности кривых намагниченности и ОС

В предыдущем разделе были получены сдвинутые полевые зависимости намагниченности с горизонтальными участками кривой, расщеплением гистерезиса и наклонными участками кривой. Но в реальных системах благодаря шероховатости интерфейса только несколько процентов магнитных моментов взаимодействуют через границу раздела ФМ/АФМ [15]. В нашей предыдущей работе была предложена модель точечных магнитных контактов на интерфейсе ФМ/АФМ для объяснения эффекта ОС в двухслойниках с шероховатым интерфейсом [16]. В настоящей работе мы рассматриваем трехслойную структуру с одним идеальным и одним шероховатым интерфейсом ФМ/АФМ (рис. 4). В этом случае обменное магнитное взаимодействие осуществляется через периодически расположенные точечные магнитные контакты (ТМК). ТМК периодически расположены на поверхности ФМ/АФМ интерфейса вдоль оси x , и обменное взаимодействие осуществляется только через ТМК. Другие магнитные моменты через границу раздела не взаимодействуют. Намагниченность ферромагнитных слоев вдоль оси z , перпендикулярной плоскостям интерфейсов, считается однородной, а перпендикулярно интерфейсу могут возникать доменные границы в ФМ подсистемах.

Как и в предыдущем случае, учитывается сильная легкоплоскостная анизотропия и дополнительная слабая анизотропия в легкой плоскости β^{FM1} , β^{FM2} . На идеальной границе обменное взаимодействие через интерфейс равно J_0^{FM1} и на неоднородной границе раздела параметр обмена через ТМК — J_0^{FM2} . Статические конфигурации характеризуются следующими уравнениями:

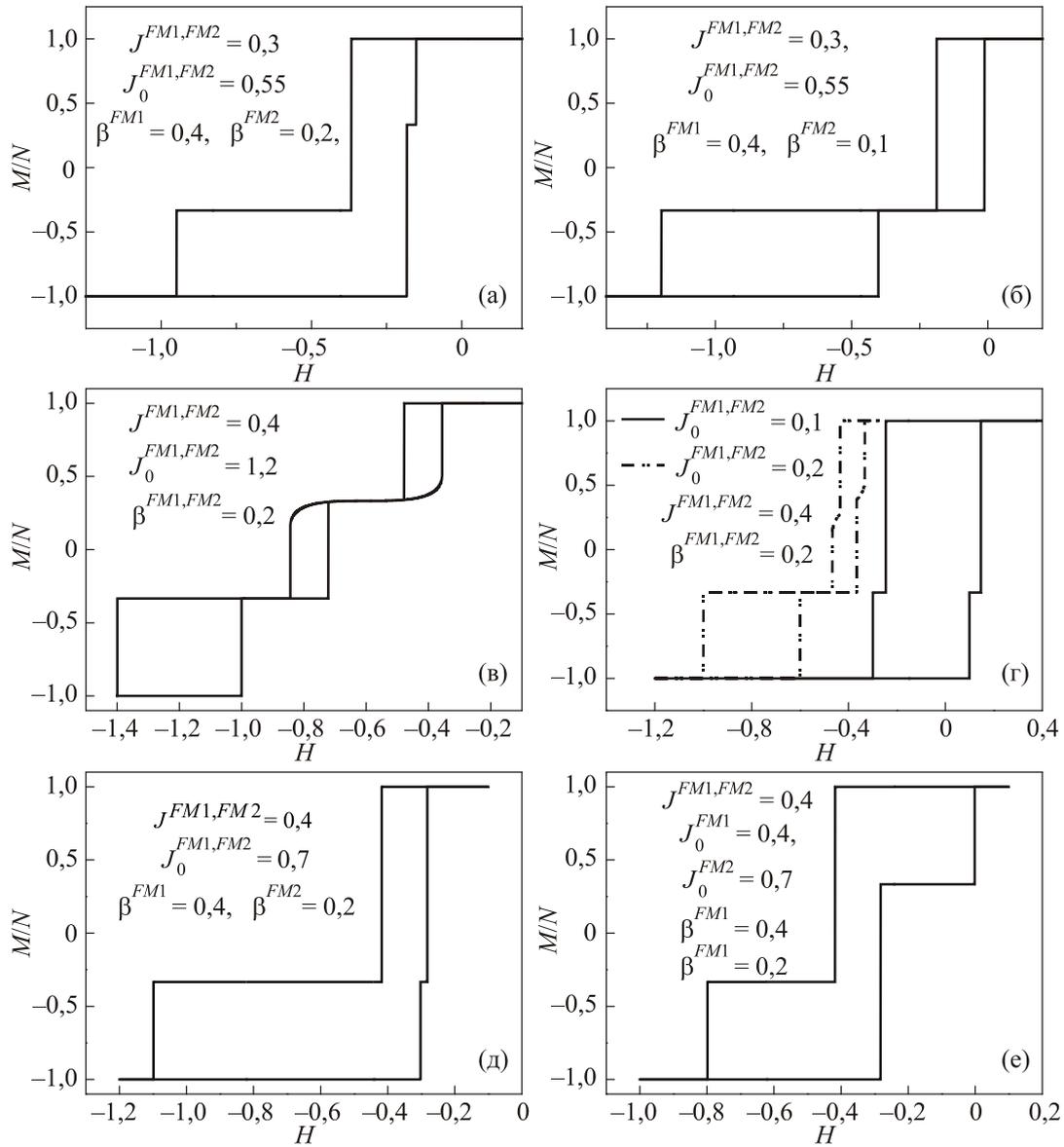


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности трехслойной структуры ФМ/АФМ/ФМ. Петли гистерезиса приведены для различных значений параметров обменного взаимодействия и анизотропии при идеальных ФМ/АФМ интерфейсах.

$$\begin{aligned}
 (H + J_0^{FM1}) \sin \varphi_1^{FM1} + J^{FM1} \sin (\varphi_1^{FM1} - \varphi_2^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_1^{FM1}) &= 0, \\
 H \sin \varphi_n^{FM1} + J^{FM1} \sin (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n-1}^{FM1}) + J^{FM1} \sin (\varphi_n^{FM1} - \varphi_{n+1}^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_n^{FM1}) &= 0, \\
 H \sin \varphi_{N^{FM1}}^{FM1} + J^{FM1} \sin (\varphi_{N^{FM1}}^{FM1} - \varphi_{N^{FM1}-1}^{FM1}) + \frac{\beta^{FM1}}{2} \sin (2\varphi_{N^{FM1}}^{FM1}) &= 0, \\
 (H + J_0^{FM2}) \sin \varphi_1^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_1^{FM2} - \varphi_2^{FM2}) + J^{FM2} \sin (\varphi_1^{FM2} - \varphi_{N^{FM2}}^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_1^{FM2}) &= 0, \\
 H \sin \varphi_n^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n-1}^{FM2}) + J^{FM2} \sin (\varphi_n^{FM2} - \varphi_{n+1}^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_n^{FM2}) &= 0, \\
 H \sin \varphi_{N^{FM2}}^{FM2} + J^{FM2} \sin (\varphi_{N^{FM2}}^{FM2} - \varphi_{N^{FM2}-1}^{FM2}) + J^{FM2} \sin (\varphi_{N^{FM2}}^{FM2} - \varphi_1^{FM2}) + \frac{\beta^{FM2}}{2} \sin (2\varphi_{N^{FM2}}^{FM2}) &= 0.
 \end{aligned}$$

Критические значения параметров $J_0^{FM1,FM2}(H)$, при которых возникают коллинеарные структуры, при учете неоднородности границы приобретают вид

$$J_0^{FM1,FM2} = -\frac{H^2 + 4HJ^{FM2} + 2H\beta^{FM2} + 4J^{FM2}\beta^{FM2} + (\beta^{FM2})^2}{H + 2J^{FM2} + \beta^{FM2}} (\uparrow\uparrow),$$

$$J_0^{FM1,FM2} = -\frac{H^2 - 4HJ^{FM2} - 2H\beta^{FM2} + 4J^{FM2}\beta^{FM2} + (\beta^{FM2})^2}{H - 2J^{FM2} - \beta^{FM2}} (\downarrow\downarrow).$$

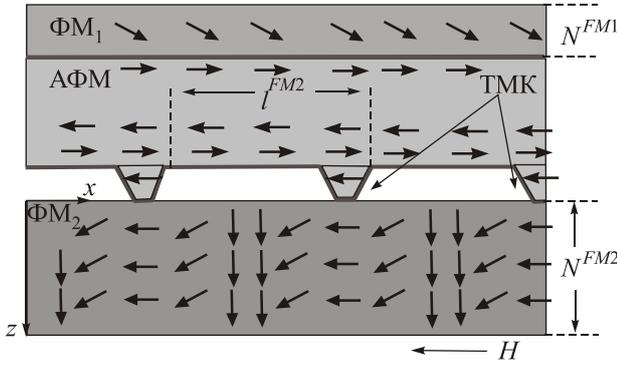


Рис. 4. Модель трехслойной структуры ФМ/АФМ/ФМ с одним идеальным и одним неоднородным ФМ/АФМ интерфейсом.

Приведенные зависимости представлены на рис. 5 штриховыми линиями, а сплошными линиями обозначены кривые $J_0^{FM1,FM2}(H)$ для случая идеальной границы ФМ/АФМ. Видно, что для обоих типов интерфейсов качественно кривые намагниченности будут иметь один и тот же вид, но при разных значениях параметров системы (обменное взаимодействие через границу и магнитная анизотропия).

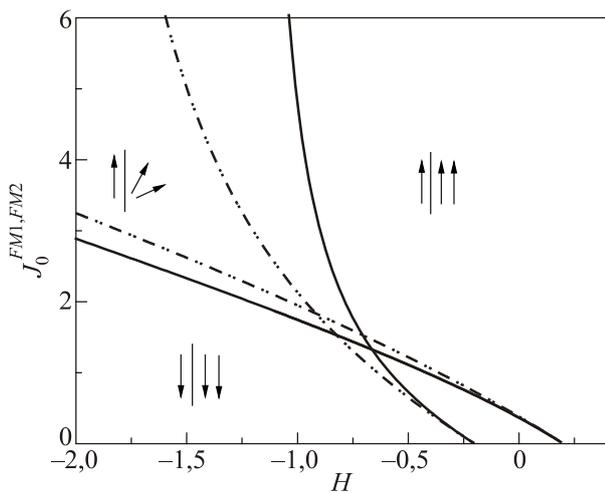


Рис. 5. Области существования коллинеарных, антиколлинеарных и скошенных структур в ФМ части подсистемы для трехслойной системы с идеальным и шероховатым интерфейсом ФМ/АФМ и с двумя идеальными интерфейсами.

Полученные зависимости намагниченности для трехслойной системы с идеальными интерфейсами и с учетом неоднородности границы на одном из интерфейсов приведены на рис. 6. Области гистерезиса отмечены штриховыми линиями. Видно, что петля гистерезиса, отвечающая за переворот намагниченности в ФМ₂, изменяет свою форму при наличии дефектов интерфейса. В то же время петля гистерезиса, соответствующая перевороту намагниченности в ФМ₁, сохраняет свое положение и форму. В этом месте штриховкой указано, что петли гистерезиса для обеих трехслойных систем перекрываются.

Для такой системы полевые зависимости намагниченности были получены численно при разных концентрациях ТМК (рис. 7). Области гистерезисов для трех различных концентраций ТМК отмечены штриховкой. Видно, что с изменением степени неоднородности границы горизонтальное плато на зависимости смещается, а петли гистерезиса меняют свою форму. В то же время петля гистерезиса, отвечающая перевороту намагниченности в ФМ₁ слое, сохраняет свое положение. Области гистерезиса для трех разных степеней неоднородности здесь частично перекрываются.

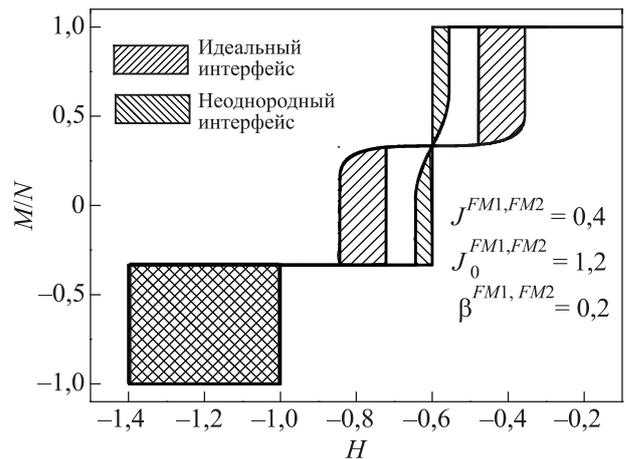


Рис. 6. Зависимости намагниченности от поля $M(H)$ трехслойной структуры ФМ/АФМ/ФМ для случаев двух идеальных ФМ/АФМ интерфейсов и идеального и неоднородного ФМ/АФМ интерфейсов. Области гистерезиса отмечены штриховкой. В нижней петле гистерезиса, отвечающей перевороту ФМ₁, петли гистерезиса для разных типов интерфейсов частично перекрываются.

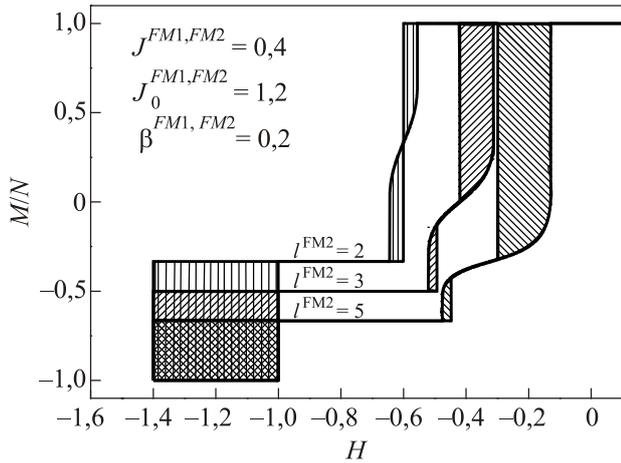


Рис. 7. Кривые намагниченности трехслойной системы ФМ/АФМ/ФМ с одним идеальным и одним неоднородным интерфейсом ФМ/АФМ при разных степенях неоднородности границы раздела ФМ/АФМ. Области гистерезиса отмечены штриховкой. В нижней петле гистерезиса, отвечающей перевороту ФМ₁, петли гистерезиса для разных степеней неоднородности интерфейса частично перекрываются.

Рассмотренная одномерная модель соответствует линейным контактам, периодически расположенным вдоль оси *y*. Реально же такие контакты расположены случайным образом по поверхности ФМ/АФМ интерфейса. Но, как показано в работе [16], кривые намагниченности качественно будут иметь один и тот же вид в случаях одномерных и двумерных периодических систем ТМК, однако при разных значениях параметров системы.

Шероховатость интерфейса также может моделироваться атомными ступеньками на интерфейсе [17]. Но в этом случае все особенности петель гистерезиса (горизонтальное плато, наклонные участки кривой и расщепление петли гистерезиса) сохраняются [17,18].

Необходимо отметить, что выше рассмотрен случай нечетного числа слоев в антиферромагнитной пленке (рис. 1). В случае же четного числа слоев в АФМ подсистеме намагниченность в слоях АФМ, ближайших к интерфейсу на первой и второй ФМ/АФМ границах, будет направлена противоположно. Таким образом, одна из ФМ пленок будет находиться в дополнительном поле, действующем со стороны АФМ и направленном параллельно внешнему магнитному полю. Магнитные моменты этой ФМ пленки начнут вращаться в меньшем магнитном поле, а петля гистерезиса сдвинется в область положительных полей. Соответствующие петли гистерезиса для случаев АФМ с четным и нечетным количеством слоев приведены на рис. 8. Кривые намагниченности получены для случая двух идеальных ФМ/АФМ интерфейсов при *N* = 4.

В данной работе рассмотрена трехслойная система ФМ/АФМ/ФМ, в которой магнитные моменты АФМ

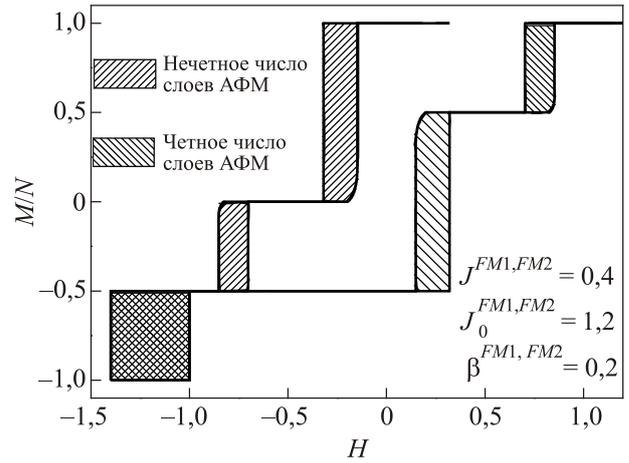


Рис. 8. Кривые намагниченности трехслойной системы ФМ/АФМ/ФМ с идеальными интерфейсами ФМ/АФМ для четного и нечетного числа слоев в АФМ. Области гистерезиса отмечены штриховкой. В нижней петле гистерезиса, отвечающей перевороту ФМ₁, магнитные гистерезисы для обоих случаев частично перекрываются.

остаются фиксированными, а ФМ подсистемы между собой не взаимодействуют. Поэтому фактически результаты данной работы обобщают результаты, полученные нами ранее для двухслойной модели ФМ/АФМ системы в работе [8]. А полученные зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля фактически являются суперпозицией зависимостей намагниченности от поля для двух ферромагнитных слоев, контактирующих с АФМ.

Выводы

В рамках дискретной модели трехслойной системы ФМ/АФМ/ФМ показано, что возникновение горизонтальных плато, асимметрии, расщепление петли гистерезиса на кривых намагниченности связано с образованием доменных границ в ФМ части подсистемы. Проанализированы случаи идеального и неоднородного ФМ/АФМ интерфейсов. Найдены области существования коллинеарных, антиколлинеарных и скошенных структур. Показано, что кривые намагниченности имеют качественно один и тот же вид в случаях идеального и неоднородного интерфейсов. Полученные гистерезисные полевые зависимости намагниченности хорошо качественно согласуются с экспериментальными данными.

Работа частично поддержана научным проектом НАН Украины № 4/15-Н.

1. W.H. Meiklejohn and C.P. Bean, *Phys. Rev.* **102**, 1413 (1956).
2. J. Nogues and I.K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **192**, 203 (1999).

3. A.E. Berkowitz and K. Takano, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 552 (1999).
4. M. Kiwi, *J. Magn. Magn. Mater.* **234**, 584 (2001).
5. E. Fertman, S. Dolya, V. Desnenko, M. Kajňaková, and A. Feher, *Fiz. Nizk. Temp.* **40**, 200 (2014) [*Low Temp. Phys.* **40**, 156 (2014)].
6. L.S. Uspenskaya, *Phys. Status Solidi* **52**, 2274 (2010).
7. C.Y. You, H.S. Goripati, T. Furubayashi, Y.K. Takahashi, and K. Hono, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 012501 (2008).
8. A.G. Grechnev, A.S. Kovalev, and M.L. Pankratova, *Fiz. Nizk. Temp.* **38**, 1184 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 937 (2012)].
9. А.Г. Гречнев, А.С. Ковалев, М.Л. Панкратова, *ФНТ* **39**, 1060 (2013) [*Low Temp. Phys.* **39**, 1361 (2013)].
10. D. Mauri, H.C. Siegmann, P.S. Bagus, and E. Kay, *J. Appl. Phys.* **62**, 3047 (1987).
11. A.P. Malozemoff, *Phys. Rev. B* **35**, 3679 (1987).
12. A.N. Dobrynin and D. Givord, *Phys. Rev. B* **85**, 014413 (2012).
13. Yong Hu, Feng Shi, Ning Jia, Yan Liu, Haina Wu, and An Du, *J. Appl. Phys.* **114**, 153901 (2013).
14. G. Vallejo-Fernandez, L.E. Fernandez-Outon, and K. O'Grady, *J. Appl. Phys.* **103**, 07C101 (2008).
15. W.J. Antel, Jr., F. Perjeru, and G.R. Harp, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1439 (1999).
16. A. Kovalev and M. Pankratova, *Superlattices and Microstructures* **73**, 275 (2014).
17. А.С. Ковалев, М.Л. Панкратова, *ФНТ* **40**, 1267 (2014) [*Low Temp. Phys.* **40**, 990 (2014)].
18. L. Anghinolfi, F. Bisio, M. Canepa, and L. Mattera, *Phys. Rev. B* **81**, 224427 (2010).

Exchange bias model of the FM/AFM/FM trilayer structure

M.L. Pankratova and A.S. Kovalev

The exchange bias phenomenon in the trilayer systems FM/AFM/FM which actively studied experimentally is theoretically investigated. In the proposed discrete model magnetization dependencies on external magnetic field are obtained. It is shown that on the magnetization dependencies on magnetic field the horizontal plateaus, splitting of the hysteresis loop, their asymmetries are observed. The impact of the interface defects on the exchange bias phenomenon and its features was studied. Obtained results are in qualitative agreement with experimental data.

PACS: 75.70.Cn Magnetic properties of interfaces (multilayers, superlattices, heterostructures);
 75.60.Ch Domain walls and domain structure;
 75.60.Ej Magnetization curves, hysteresis, Barkhausen and related effects.

Keywords: exchange bias, magnetic multilayer systems, magnetic hysteresis, nonuniform interface.