

Асимметричная кинетика перемагничивания тонких обменно-связанных пленок ферромагнетика

© Л.С. Успенская

Институт физики твердого тела РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: uspenska@issp.ac.ru

Выполнено исследование кинетики перемагничивания тонких гибридных пленок ферромагнетик–антиферромагнетик FeNi–FeMn, выраженных магнетронным распылением на кремниевых подложках в присутствии плоскостного магнитного поля, что обеспечило однонаправленную плоскостную магнитную анизотропию в ферромагнитном слое и однодоменность ферромагнетика при отсутствии внешнего поля. Построенные петли гистерезиса и голографы намагниченности позволили выявить специфические особенности процесса перемагничивания обменно-связанного ферромагнетика, выявить новые типы асимметрии и получить новые доказательства существования спиновой пружины на интерфейсе ферромагнетик–антиферромагнетик. Визуализация процесса перемагничивания позволила установить взаимоднозначное соответствие между макрохарактеристиками материала и реальными процессами в гибридных структурах ферромагнетик–антиферромагнетик.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-02-00896, программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Квантовая физика конденсированных сред“ и CNRS (Франция).

Фундаментальные и технологические аспекты композитных материалов, особенно тонких многослойных структур, широко исследуются в настоящее время и ввиду интересной физики таких систем и в силу их значимости для приложений. В частности, большой интерес вызывают композитные материалы ферромагнетик–антиферромагнетик, магнитомягкий–магнито жесткий ферромагнетик, в которых проводящие свойства изменяются под действием слабых магнитных полей [1]. Эффекты переключения в таких материалах связаны с трансформацией магнитной структуры, а в слабых полях — с трансформацией магнитной доменной структуры. Известно, что близость двух магнитных материалов с различными свойствами существенно изменяет свойства магнитомягкого слоя, что проявляется в появлении наведенной анизотропии, в сдвиге петли гистерезиса по намагничивающему полю на некоторую величину H_e (обменное смещение), расширении петель гистерезиса, появлении вращательного гистерезиса, асимметрии процесса зарождения границ при направлении магнитного поля вдоль наведенной анизотропии и асимметрии динамических характеристик процесса перемагничивания [2–10].

В настоящей работе впервые выполнено исследование корреляции кинетики перемагничивания ультратонких обменно-смещенных пленок пермаллоя с плоскостной наведенной анизотропией с особенностями на петлях гистерезиса и магнитных голографов. В результате проведенных исследований удалось обнаружить новый вид асимметрии в процессе перемагничивания обменно-смещенных пленок, напрямую связанный с наличием обменного взаимодействия между ферромагнитным и антиферромагнитным слоями, определить эффективный угол скоса между однонаправленной анизотропией, наведенной обменным полем антиферромагнетика, и одноосной анизотропией, наведенной магнитным полем

в процессе выращивания ферромагнитного слоя. Было показано, что наличие обменно-наведенной анизотропии приводит к ряду особенностей в кинетике перемагничивания ферромагнитных пленок при намагничивании под углами к оси легкого намагничивания.

Эксперименты выполнялись на гибридных пленках ферромагнетик–антиферромагнетик FeNi–FeMn, выращенных магнетронным распылением на кремниевых подложках в присутствии плоскостного магнитного поля, что обеспечило однонаправленную анизотропию в плоскости FeNi-пленки, ориентацию спонтанной намагниченности в плоскости пленки и однодоменность ферромагнитного слоя в отсутствие внешнего поля. Визуализация магнитной доменной структуры и кинетики перемагничивания гетероструктур осуществлялась с помощью магнитоактивных индикаторных пленок, помещаемых непосредственно на поверхность исследуемых пленок и воспроизводящих распределение индукции в исследуемых объектах [11,12]. Доменные границы при таком методе наблюдения выявляются благодаря магнитным полям рассеяния над ними, а направление намагниченности в исследуемых пленках определяется по величине и направлению полей рассеяния на краях образцов. Петли гистерезиса измерялись на двухкоординатном вибрационном магнитометре (Laboratoire de magnétisme de Bretagne, UBO, Brest, France). Эксперименты проводились при комнатной температуре.

При измерении петель гистерезиса было установлено, что наряду со стандартными петлями, соответствующими обменно-смещенной петле при направлении магнитного поля вдоль легкой оси (рис. 1, *a*) или вращению намагниченности при перпендикулярном направлении поля (рис. 1, *b*), в широком диапазоне углов ϕ между направлением поля и легкой осью прорисовы-

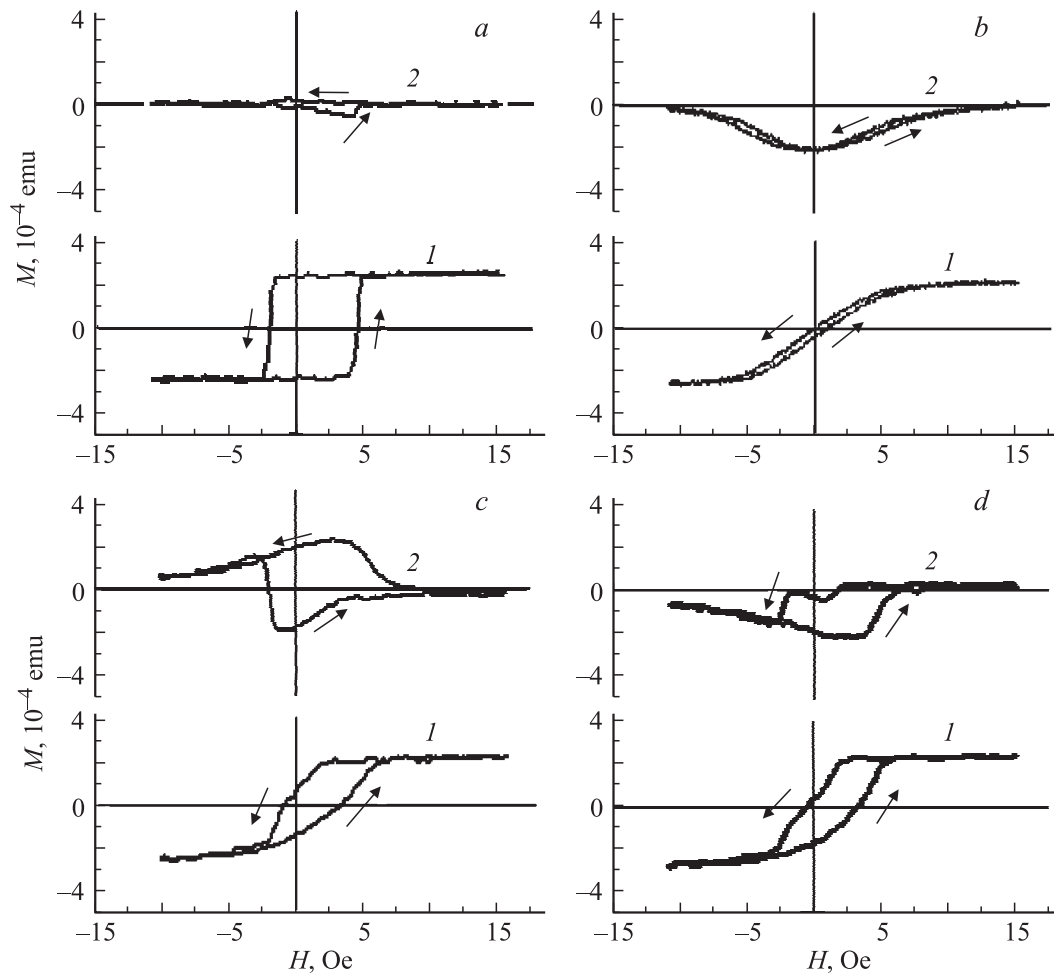


Рис. 1. Продольные (1) и поперечные (2) компоненты намагниченности при направлении внешнего магнитного поля к оси легкого намагничивания под углами $\phi = 0$ (a), 90 (b), 70 (c) и -78° (d).

вается асимметричные петли (рис. 1, c, d). Объяснить происхождение таких петель, т.е. однозначно связать их особенности с происходящими в пленке процессами, сложно, даже если принять во внимание имеющуюся в пленках однонаправленную обменно-наведенную анизотропию. Однако петли гистерезиса — это стандартная техническая характеристика материала, из которой можно определить коэрцитивность, намагниченность насыщения, поле анизотропии, но сложно понять, какие физические процессы происходят в материале. С этой целью удобно анализировать годографы, описываемые концом усредненной намагниченности при развертке поля на плоскости (M_x, M_y) , где M_x, M_y — две взаимноперпендикулярные компоненты намагниченности, направленные, например, по приложенному полю и перпендикулярно ему. При таком описании участки годографа, совпадающие с дугой, соответствуют процессу вращения намагниченности, идущему синхронно во всем образце, а отклонения от дуги — неоднородному вращению намагниченности или движению доменных границ.

Построенные из экспериментальных зависимостей $M_x(H), M_y(H)$ годографы показаны на рис. 2. Видно, что при наклонах поля к оси легкого намагничивания это почти симметричные петли, расширяющиеся с увеличением угла ϕ ($\phi = 2, 12, 22, 32, 152^\circ$), где ϕ — угол между осью легкого намагничивания и направлением внешнего поля. Однако по мере приближения к перпендикулярному направлению симметрия нарушается ($\phi = 52, 72, 112, 142^\circ$), появляется быстрый просок вектора намагниченности к направлению оси легкого намагничивания. И наконец, при ϕ в диапазоне $75-102^\circ$ петли „схлопываются“ и становятся подобны дуге, что соответствует развороту намагниченности (при развертке поля от $+60$ к -60 Oe и от -60 к $+60$ Oe) через одно и то же направление, соответствующее направлению оси легкого намагничивания (рис. 2) ($\phi = 82, 87, 102^\circ$). Отсюда можно предположить, что при определенных направлениях поля ($\phi_A = -70 - -102^\circ$) имеет место принципиальная разница в процессе намагничивания и перенамагничивания пленки: при развертке поля в одном направлении имеет место в чистом виде процесс

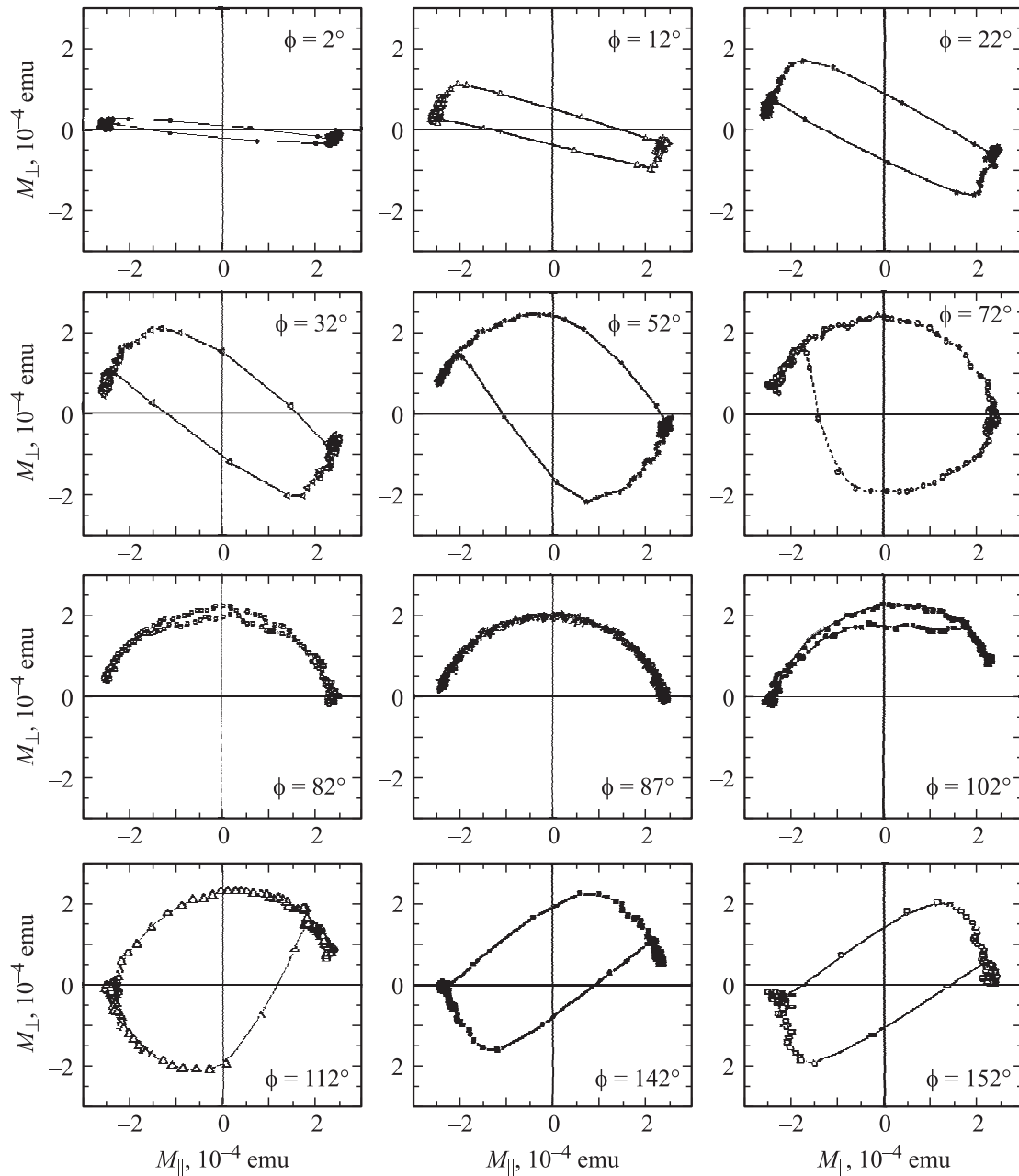


Рис. 2. Траектория вектора намагниченности при пилообразной развертке поля между -60 и $+60$ Ое при его направлении под различными углами ϕ к оси однонаправленной анизотропии (по оси x отложена параллельная полю компонента намагниченности, по оси y — перпендикулярная).

однородного вращения намагниченности, а при инверсии поля — либо неоднородное вращение намагниченности, либо зарождение и движение доменных границ с последующим поворотом намагниченности к направлению поля. При этом также остается неясным, какого типа границы участвуют в перемагничивании, лежат ли они в плоскости образца, или это обычные доменные границы, перпендикулярные плоскости пленки. Обращает на себя внимание и тот факт, что диапазон углов ϕ_A несимметричен относительно перпендикуляра к оси легкого намагничивания: минимальный угол диапазона отличается от

перпендикуляра на $d\phi_1 = -20^\circ$, а максимальный — на $d\phi_2 = +12^\circ$. При этих же углах между внешним полем и осью легкого намагничивания имеются аномалии на зависимости коэрцитивности H_{c2} и поля H_e от угла поворота поля (рис. 3), определенных из петель гистерезиса. Причем эти аномалии более ярко выражены при направлении поля в диапазоне углов $\phi_A = -70 - -102^\circ$ и значительно слабее при $\phi_A = +70 - +102^\circ$.

Визуализация процесса перемагничивания полностью подтвердила предположение о механизме перемагничивания, сделанное на основе анализа годографов. Было

подтверждено, что в широком диапазоне углов между намагничивающим полем и осью легкого намагничивания имеет место процесс перемагничивания через зарождение и движение доменных границ с последующим поворотом намагниченности к направлению поля (рис. 4, 5). Зарождение границ происходит на краях образца, перпендикулярных направлению оси легкого намагничивания, пороговым по величине поля образом; величина порога H_p зависит от направления поля. H_p практически совпадает с H_{c1} и H_{c2} в той области углов, где годографы намагниченности имеют вид симметричных кривых. Смещающиеся по образцу доменные границы имеют зигзагообразный вид, причем параметры зигзага (длина и угол раствора) зависят от направления поля. При небольшом отклонении поля от оси легкого намагничивания зигзаги отслеживают направление поля: среднее направление доменных границ варьируется в зависимости от направления поля, т.е. поворачивается вслед за полем, но не совпадает с ним по направлению. При больших отклонениях это соответствие исчезает и одновременно вид доменных границ становится зависящим от знака поля, т.е. в прямом и инверсном полях раствор зигзага и его длина различаются. При этом длина зигзагов и суммарная длина доменных границ минимальны в поле, параллельном оси легкого намагничивания. Экспериментально наблюдается и относительно небольшой диапазон углов, когда намагничивание происходит только через процесс вращения намагниченности, а размагничивание осуществляется за счет движения доменных границ. При этом границы зарождаются во многих участках кристалла и приобретают вид очень сильно вытянутых зигзагов — квазиполосовых доменов. И наконец, в очень небольшом диапазоне углов между стрелками на рис. 3 и в окрестности направления **EA2** на рис. 4 доменные границы зарождаются не при инверсии поля, а еще на стадии уменьшения намагничивающего поля. Причем это происходит только в поле одной

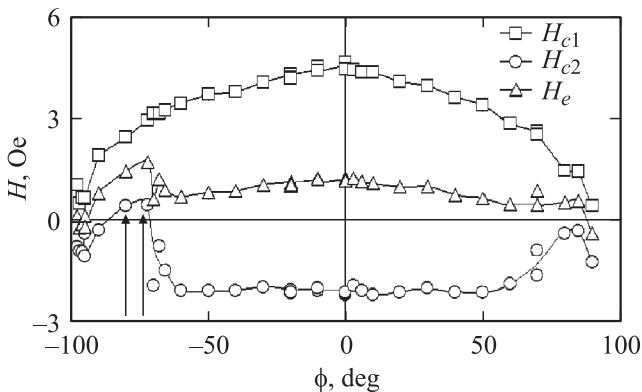


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы H_{c1} , H_{c2} и поля смещения H_e от угла поворота поля. H_{c1} , H_{c2} и H_e определены из петель гистерезиса и соответствуют развертке внешнего поля в противоположных направлениях. Стрелки показывают область аномальной зависимости величин H_{c2} и H_e от угла ϕ .

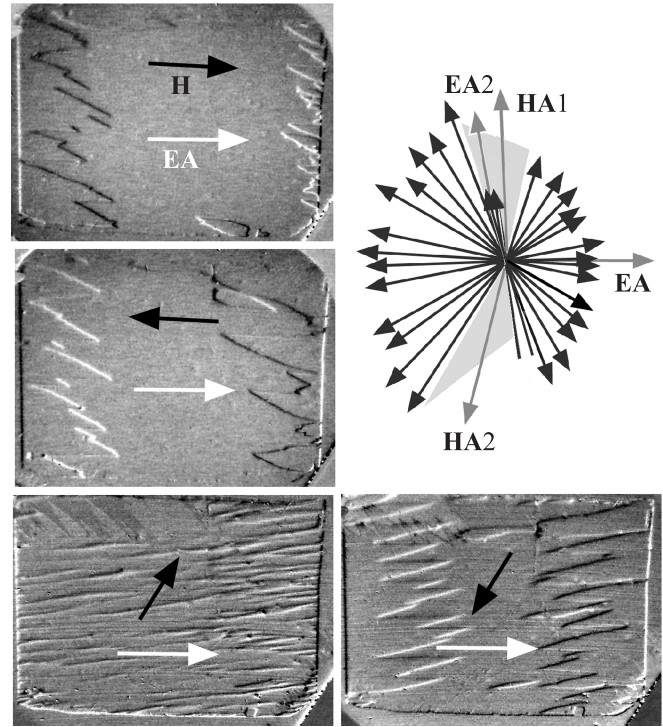


Рис. 4. Зигзагообразные доменные границы при различных направлениях внешнего поля к оси легкого намагничивания (черные стрелки указывают направление поля, белые — направление легкой оси, наведенной обменом с антиферромагнетиком) и зависимость поля появления доменных границ от направления поля (длина черных стрелок на гистограмме пропорциональна величине поля, серые стрелки показывают направления легких и трудных осей для зарождения границ, серые области показывают направления поля, при которых границы не зарождаются и имеет место лишь вращение вектора намагниченности).

полярности, а на второй ветви петли гистерезиса наблюдается лишь вращение вектора намагниченности. Поля, при которых доменные границы движутся по пленке, и эффективные направления легкого и трудного намагничивания схематично показаны на векторной гистограмме на рис. 4. Видно, что гистограмма вписывается в вытянутый эллипсоид с особенностями в окрестности направлений **EA2**, **HA1**, **HA2**, причем векторы **HA1**, **HA2** отклонены от легкой оси **EA** на разные углы, примерно соответствующие углам $d\phi_1$ и $d\phi_2$, определенным из магнитных годографов. Как правило, этап перемагничивания за счет движения границ начинается и завершается в небольшом интервале полей от H_p до H_{p1} (рис. 5). Исключение составляет узкий диапазон углов вблизи направления **EA2**, где доменные границы не зарождаются на краю пленки, а „проявляются“ по всей плоскости пленки в виде слабоконтрастной полосовой структуры. Они практически не двигаются. С изменением поля лишь изменяется яркость их изображения — от слабой к умеренной и опять к слабой. Такое поведение контраста можно трактовать как зарождение

доменов вблизи одной поверхности ферромагнитной пленки, их расширение и прораствание вглубь (не на всю глубину), а затем постепенную аннигиляцию с ростом поля (метод магнитооптической визуализации доменной структуры не позволяет определять, на какой из поверхностей ферромагнитной пленки — верхней, нижней или в середине — расположены возникающие домены).

Таким образом, одним из важных результатов настоящей работы является наблюдение различия направлений эффективных жестких осей перемангничивания в обменно-смещенной структуре на угол порядка 12° . Это видно и из годографов движения магнитного момента (рис. 2), и на гистограммах полей, при которых происходит смена механизма перемангничивания (рис. 4), и на угловых зависимостях критических значений полей $H_{c1}(\phi)$, $H_{c2}(\phi)$, $H_e(\phi)$, $H_p(\phi)$, $H_{p1}(\phi)$ (рис. 5). Во многих работах (см. [13,14] и ссылки в них) анизотропия в обменно-смещенных магнитных пленках описывается как сумма одноосной и однонаправленной анизотропий. Наблюдаемая в настоящей работе анизотропия макрохарактеристик исследуемых пленок связана с наличием в наших образцах и одноосной, и однонаправленной анизотропии, оси симметрии которых могут не совпадать (схема на рис. 5).

Важно подчеркнуть, что исследуемые обменно-смещенные пленки действительно находятся в однодоменном состоянии. Однодоменность ферромагнитного слоя подтверждается конфигурацией полей рассеяния на краях пленки, зарождением доменов с обратной намагниченностью только на краях пленки, прохождением образовавшихся на краю и расширяющихся под действием внешнего магнитного поля доменов через всю пленку вплоть до аннигиляции огибающих их границ при встрече расширяющихся доменов в центре пленки, а также равномерностью движения доменных границ по кристаллу, показанному в [10]. В экспериментах использовались умеренные магнитные поля; после перемангничивания однодоменность ферромагнетика в нулевом поле сохранялась, намагниченность после перемангничивания оставалась направленной параллельно или антипараллельно направлению оси легкого намагничивания, и это всегда воспроизводилось от эксперимента к эксперименту. Таким образом, получена однозначная связь между кинетикой перемангничивания исследуемых пленок и вариациями вида магнитных годографов и петель гистерезиса, что дает основания предполагать, что обнаруженные особенности на петлях гистерезиса и магнитных годографах однозначно связаны со свойствами именно обменно-наведенной анизотропии, а не являются следствием неоднородности свойств исследуемых пленок.

Второй результат связан с наличием ярко выраженных углов вблизи трудного направления намагничивания, при которых состояние однородного намагничивания настолько невыгодно, что образец разбивается на домены не при переключении магнитного поля и превышении им некоего порога, а уже при понижении удерживающего намагничивающего поля, причем это наблюдается

только для поля одной полярности ($\phi = 102^\circ$ на рис. 2 и направление **EA2** на гистограмме на рис. 4). Объяснить такое поведение системы можно, предположив, что намагничивающее поле закрутило намагниченность в доменах против спиновой пружины на интерфейсе до предельно возможного угла и ослабление поля приводит к раскрутке этой пружины. Возможно, что намагниченность в ферромагнетике начинает локально „проскальзывать“ (и образуются частичные несквозные домены с горизонтальной границей в ферромагнетике!?). К сожалению, на основании имеющихся данных не удастся корректно проанализировать эту ситуацию. Ясно лишь, что направление **EA2** крайне невыгодно. На основании выполненных экспериментов нельзя также определить, когда и где закручивается спиновая пружина. Можно только утверждать, что намагниченность образцов в определенном диапазоне направлений магнитного поля вблизи направлений трудного намагничивания (**HA1**, **HA2**) всегда раскручивается через одно и то же направление, совпадающее с легкой осью. И что наибольшая асимметрия процессов перемангничивания имеет место для направления $\phi = 102^\circ$, т.е. отклоненного на 12° от трудного направления для одноосной анизотропии, наведенной в процессе выращивания поликристаллических пленок пермаллоя. Кроме того, из анализа динамических характеристик процесса перемангничивания гибридных структур FeNi–FeMn [10] следует, что имеет место различие на порядки во временах зарождения доменных границ и в скоростях их движения при перемангничивании вдоль и против эффективного направления оси легкого намагничивания. Причем скорости движения границ в обменно-смещенном пермаллое в сотни раз ниже, чем в таком же пермаллое (выращенном тем же методом на тех же подложках) без его покрытия антиферромагнетиком. Таким образом, динамические характеристики пермаллоя на порядки хуже как при перемангничивании вдоль, так и при перемангничивании против оси легкого намагничивания, что можно объяснить сложной гибридной природой движущейся в ферромагнетике доменной границы, неизбежностью образования границы вблизи интерфейса ферромагнетик–антиферромагнетик при смещении доменной границы вдоль ферромагнитного слоя, требующей затрат энергии. Активационные объемы для движения доменной границы вдоль и против оси легкого намагничивания составляли величины порядка $\gamma_{f1} = 1.25 \cdot 10^4 \text{ nm}^3$ и $\gamma_{f2} = 4.81 \cdot 10^4 \text{ nm}^3$, т.е. различались в 4 раза. Совокупность данных: существенное снижение скорости границ при движении под действием поля, приложенного как вдоль, так и против оси легкого намагничивания, и различие активационных объемов — дает основание предполагать, что имеется угол между обменно-наведенной однонаправленной и одноосной анизотропией ферромагнитной пленки. Если есть скос, аналогичный найденному в [15], то обменная спиновая пружина формируется как при намагничивании пермаллоя вдоль направления легкой оси, так и в противоположном направлении.

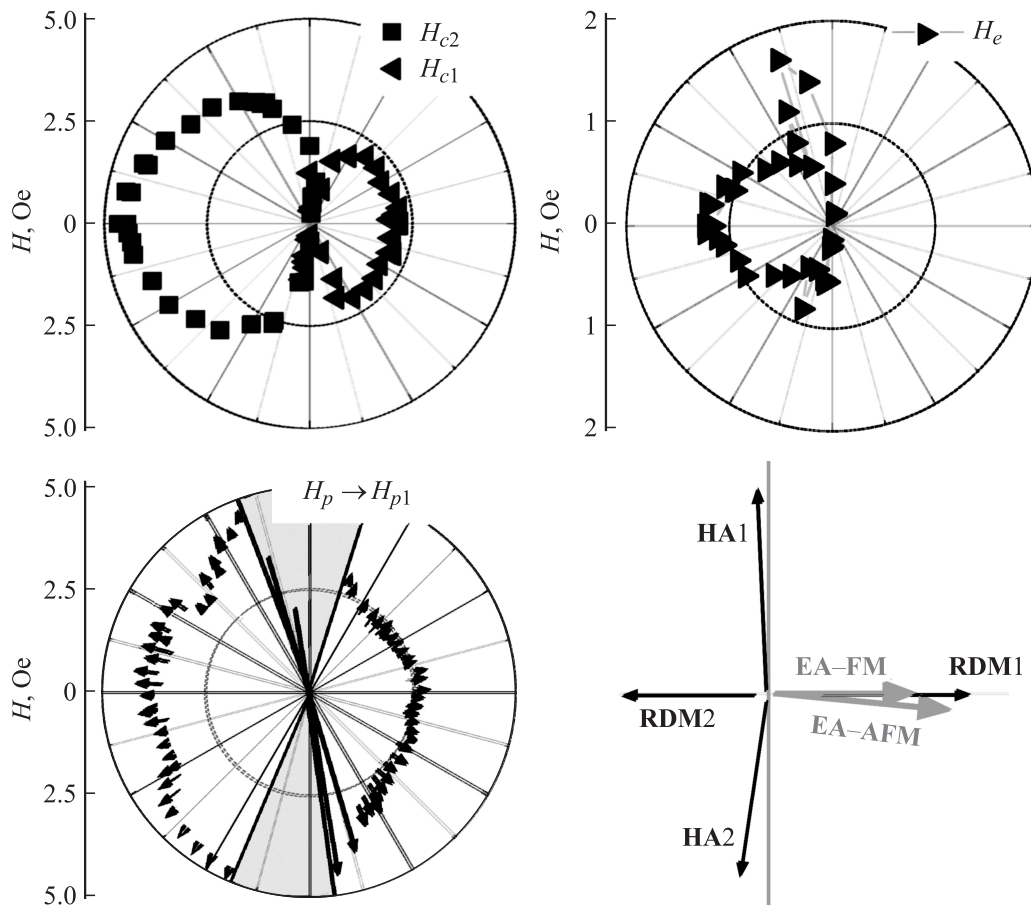


Рис. 5. Сравнение симметрии угловых зависимостей H_{c1} , H_{c2} , H_e и H_p , H_{p1} и схема ориентации осей легкого и трудного намагничивания, построенная на основании анализа угловых зависимостей H_p , H_{p1} . **RDM1** и **RDM2** — направления, вдоль которых намагниченность остается ориентированной после перемагничивания, **HA1** и **HA2** — средние направления полей, при которых имеет место только вращение намагниченности без образования доменных границ, **EA-FM** и **EA-AFM** — гипотетические направления осей одноосной и однонаправленной анизотропии.

В заключение обсудим трансформацию вида доменных границ при поворотах магнитного поля. Как уже указывалось, перемагничивание гибридных структур осуществляется за счет смещения зигзагообразных 180° „head-on“ (заряженных) доменных границ, которые часто наблюдаются в тонких пленках с анизотропией, направленной в плоскости пленки, и достаточно высокой коэрцитивностью [16–19]. При этом часто диагональ зигзага оказывается ориентированной по внешнему полю, а угол раскрытия зигзага уменьшается при отклонении внешнего поля от легкой оси [20]. В данном случае это не совсем так; при отклонении поля от оси легкого намагничивания в пределах $20\text{--}30^\circ$ зигзаги отслеживают направление поля, но диагональ зигзага не совпадает с направлением поля (рис. 4). Более того, даже при намагничивании образцов полем, совпадающим по направлению с осью легкого намагничивания или направленным против оси легкого намагничивания, средняя линия зигзагов не совпадает с направлением поля, и суммарная длина сегментов границы с одной или другой ориентацией различается (рис. 4, две верхние фотографии). Это означает, что различается энергия

смежных сторон зигзагообразной границы, в которых, как предполагают в [17], осуществляется противоположный разворот спинов. Это свидетельствует об энергетической неэквивалентности двух вариантов закрутки спинов в обменно-смещенном ферромагнетике в отличие от обычного ферромагнетика с одноосной анизотропией, что можно объяснить только свойствами спиновой пружины, сформировавшей за счет обменного поля однонаправленную анизотропию под некоторым углом к оси одноосной анизотропии, наведенной в процессе роста поликристаллического пермаллоя магнитным полем. Начиная с некоторых углов между полем и осью легкого намагничивания суммарная длина доменных границ различается очень значительно для прямого и обратного поля (см. две нижние фотографии на рис. 4), что также свидетельствует о различии энергии границ при перемагничивании в направлении восходящей и нисходящей ветвей петли гистерезиса, что может быть связано с неэквивалентностью двух направлений закрутки спинов (по часовой и против часовой стрелки) из-за наличия асимметрии в ориентации легких и трудных осей.

Таким образом, полученные результаты можно рассматривать как еще одно экспериментальное исследование свойств спиновой пружины и доказательство ее существования.

Хотелось бы поблагодарить CNRS и проф. М.В. Инденбома за предоставление возможности проведения экспериментов в Laboratoire de magnétisme de Bretagne.

Список литературы

- [1] I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma. *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
- [2] X.W. Wu, T. Ambrose, C.L. Chien. *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2176 (1998).
- [3] J.W. Cai, K. Liu, C.L. Chien. *Phys. Rev. B* **60**, 72 (1999).
- [4] T. Ambrose, R.L. Sommer, C.L. Chien. *Phys. Rev. B* **56**, 83 (1997).
- [5] N.J. Gokemeijer, T. Ambrose, C.L. Chien. *Phys. Rev. Lett.* **79**, 4270 (1997).
- [6] H. Xi, M.H. Kryder, R.M. White. *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2687 (1999).
- [7] J. Nogures, I.K. Shuller, J. Magn. *Magn. Mater.* **192**, 203 (1999).
- [8] V.I. Nikitenko, V.S. Gornakov, A.J. Shapiro, R.D. Shull, Kai Liu, S.M. Zhou, C.L. Chien. *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4, 765 (2000).
- [9] В.С. Горнаков, Ю.П. Кабанов, В.И. Никитенко, О.А. Тихомиров, А.И. Шапиро, Р.Д. Шуль. *ЖЭТФ* **126**, 691 (2004).
- [10] Л.С. Успенская. *Изв. РАН. Сер. физ.* **74**, 744 (2010).
- [11] В.К. Власко-Власов, Л.А. Дорошинский, М.В. Инденбом, В.И. Никитенко, Ю.А. Осипьян, А.А. Полянский. *ФНТ* **17**, 1410 (1991); L.A. Doroshinskii, M.V. Indenbom, V.I. Nikitenko, Yu.A. Ossip'yan, A.A. Polyanskii, V.K. Vlasko-Vlasov. *Physica C* **203**, 149 (1992).
- [12] L.H. Bennett, R.D. Mc Muchael, L.J. Swartzendruber, S. Hua, D.S. Lashmore, A.J. Shapiro, V.S. Gornakov, L.M. Dedukh, V.I. Nikitenko. *Appl. Phys. Lett.* **66**, 888 (1995).
- [13] D. Stenato, V. Castel, S.P. Pogossian, D.T. Dekadjevi, J. Ben Youssef. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 062 515 (2007).
- [14] P. Luches, S. Benedetti, A. di Bona, S. Valeri. *Phys. Rev. B* **81**, 054 431 (2010).
- [15] C. Le Graët, D. Spenato, S.P. Pogossian, D.T. Dekadjevi, J. Ben Youssef. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 262 502 (2009).
- [16] V.S. Gornakov, V.I. Nikitenko, A.J. Shapiro, R.D. Shull, J.S. Jiang, S.D. Bader. *J. Magn. Magn. Mater.* **246**, 80 (2002).
- [17] A. Hubert, R. Schäfer. *Magnetic Domains*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg (1998). 686 p.
- [18] I.L. Sanders, R.M. Jones, A.J. Collins. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **10**, 2503 (1977).
- [19] B. Cerruti, S. Zapperi. *Phys. Rev. B* **72**, 064 416 (2007).
- [20] L.S. Uspenskaya, T. Nurgaliev, S. Miteva. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 185 006 (2009).