

УДК 539.216.2:538.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ГРАНИЦ В ПЛОСКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ
 С КРУГОВОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ ПО СПОЛЗАНИЮ НАМАГНИЧЕННОСТИ

А.А. Селезнев

Как показано в работе [1], в пленках с круговой анизотропией (ПКА) круговые междоменные границы обладают поверхностным натяжением, которое характеризуется величиной γ/R , где γ — плотность граничной энергии, а R — радиус кривизны границы. В частности, указанное свойство проявляется в том, что для смещения границы в ту или иную сторону требуется приложить различные по величине циркулярные поля. Предложенный на основе этого метод определения γ [1] приводит к завышенным экспериментальным результатам примерно в 2-4 раза, что можно объяснить появлением на границе магнитных зарядов из-за структурных неоднородностей [2].

Для устранения магнитных зарядов в работе [3] использовалось переменное циркулярное поле с амплитудой, при которой наблюдается частичное перемагничивание пленки. При этом считалось, что в результате граница занимает более равновесное положение, а форма границы приближается к идеально круговой. Однако, как показывают наблюдения доменной структуры на магнитооптической установке, граница раздела между перемагничиваемой частью пленки и неперемагничиваемой несет размытый характер. Последнее говорит о том, что при заданной амплитуде переменного циркулярного поля граница занимает различные положения через каждый полупериод.

В настоящей работе более равновесное состояние круговой границы по сравнению с заряженной достигается приложением однородного переменного магнитного поля частотой 1 кГц в радиальном направлении (ось трудного намагничивания). Известно [4], что если вдоль трудной оси действует переменное поле небольшой амплитуды, то вследствие процессов ползания границ образуется доменная структура с минимальной магнитной энергией. Такие процессы сползания намагниченности в обычных одноосных пленках [5] происходят под действием собственных размагничивающих полей, возникающих из-за краевого эффекта. Хотя в ПКА размагничивающий краевой фактор отсутствует, переход к более равновесному состоянию при наложении радиального переменного поля также осуществляется сползанием границ. Это подтверждает следующий эксперимент. Доведем образец до насыщения в трудном направлении и резко выключим поле. Образуется неравновесная доменная структура с многочисленными узкими серповидными доменами, вытянутыми в круговом направлении. Если теперь включить переменное радиальное поле, то в пленке наблюдаются процессы ползания границ, обусловленные, по-видимому, локальными внутренними размагничивающими полями. Эти процессы приводят к тому, что через некоторое время образуется доменная структура с несколькими замкнутыми кольцевыми доменами, соответствующая, очевидно, более равновесному состоянию пленки. Дальнейшее воздействие радиального поля практически не видоизменяет доменную структуру, хотя она и не соответствует минимуму магнитной энергии, который достигается в ПКА в однодоменном состоянии.

Более детальную картину перехода от неравновесного состояния к равновесному удобно наблюдать на одной круговой границе. Чтобы процесс сделать более заметным, граница предварительно смещалась в однородном поле, что увеличивало заряженность границы и, следовательно, приводило к еще более неравновесному состоянию. Начиная с некоторого порогового значения амплитуды радиального поля, отдельные участки границы начинают сползать, и через некоторое время граница в целом сдвигается в первоначальное положение, принимая круговую форму. Таким образом, благодаря возможности длительного воздействия радиальным полем на одну и ту же границу, последняя успевает занять более равновесное положение за счет медленных процессов сползания отдельных ее участков.

Казалось бы, что круговая граница для достижения минимума магнитной энергии должна сползти к внутреннему краю и исчезнуть за счет поверхностного натяжения, так как радиальное переменное поле помогает границе преодолевать внутренние потенциальные барьеры, эффективно снижая коэрцитивную силу H_c . Однако этого не происходит до тех пор, пока радиальное поле не достигнет амплитуды, при которой начинает уже разрушаться доменная структура с одной границей. Тем не менее упругие свойства границы проявляются в процессе сползания, но уже при наличии циркулярного поля. Так, результаты экспериментальных наблюдений показали, что скорость сползания круговой границы при сжатии больше, чем при расширении [6].

Различны так же, как показано ниже, пороговые поля сползания круговой границы в зависимости от направления смещения. На этом и основан предлагаемый в данной работе метод для определения γ , который заключается в следующем.

К предварительно намагниченному до насыщения вдоль легкой оси образцу прикладывается переменное радиальное поле. Затем включается обратное циркулярное поле, создаваемое осевым током по проводом. Циркулярное поле постепенно увеличивается от нуля до тех пор, пока не возникает круговая граница, которая начинает сползать к внешнему краю пленки. Увеличивая далее поле с малым шагом и выдерживая на каждом шаге по 5-10 мин, можно добиться того, чтобы граница достигла заданного радиуса R (на опыте $R = 0,2$ см). Так определялось пороговое поле при расширении границы. Аналогичная процедура определения порогового поля сжатия, но уже с имеющейся границей проводилась при изменении полярности циркулярного поля. В обоих случаях момент сползания определялся визуально, что приводило к разбросу при определении пороговых полей примерно на $\pm 5\%$. Такое довольно четкое определение порога сползания в ПКА в отличие от обычных одноосных пленок [7] разумно приписать отсутствию краевого эффекта. На рис. 1 представлены типичные пороговые кривые сползания для одного из образцов ($H_c = 0,4$ э, $H_k = 6$ э) при расширении (1) и сжатии (2) круговой границы в зависимости от амплитуды радиального поля H_r . Из рисунка видно, что в то время как пороговые поля сползания уменьшаются с увеличением H_r , разность между ними практически не зависит от амплитуды H_r в довольно

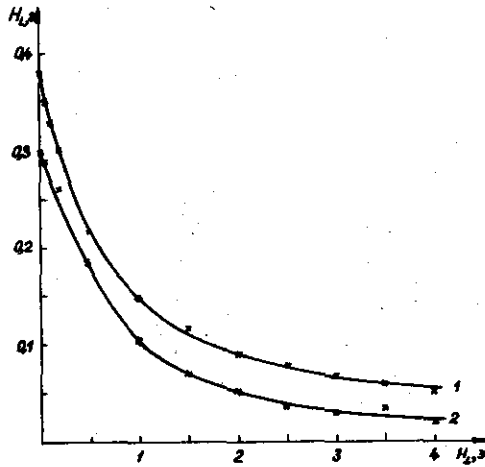


Рис. 1

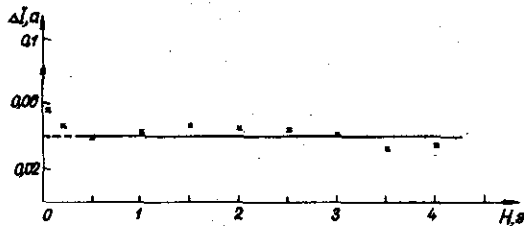


Рис. 2

широком интервале. Более наглядно этот факт иллюстрирует приведенная на рис. 2 зависимость разности пороговых токов ΔI от амплитуды радиального поля H_{\perp} , из которой следует, что разность ΔI , максимальная при $H_{\perp} = 0$, быстро спадает с ростом H_{\perp} . Для исследованных образцов, начиная с $H_{\perp} \approx 0,1 H_k$, ΔI практически остается постоянной до значений $H_{\perp} \approx 0,6 - 0,7 H_k$, при которых начинается разрушаться доменная структура с одной границей. Следовательно, можно считать, что при достижении определенной амплитуды радиального поля H_{\perp} междоменная граница занимает наиболее равновесное положение, которое уже не изменяется при дальнейшем увеличении H_{\perp} . Если предположить, что наличие переменного радиального поля приводит лишь к уменьшению порога сползания, то уравнение, определяющее равновесное положение, круговой границы при расширении и сжатии в циркулярном поле, можно записать в виде:

$$2M_s (H_L^{\text{расш}} - H_0) = \frac{\gamma}{R}, \quad (1)$$

$$2M_s (H_L^{\text{сж}} - H_0) = -\frac{\gamma}{R}, \quad (2)$$

где M_s — намагниченность насыщения, $H_L^{\text{расш}}$ и $H_L^{\text{сж}}$ — пороговые поля, создаваемые соответственно токами $I^{\text{расш}}$ и $I^{\text{сж}}$ через осевой проводник, H_0 — критическое поле смещения границы, зависящее от амплитуды H_{\perp} . Учитывая, что $H_L = \frac{0,2I}{R}$, из выражений (1) и (2) получим:

$$\text{где } \Delta I = I^{\text{расш}} - I^{\text{сж}} = 0,2 \cdot M_s \cdot \Delta I, \quad (3)$$

Таким образом, измеряя ΔI , можно по формуле (3) определить величину плотности граничной энергии γ . Экспериментально ΔI измерялось в зависимости от H_{\perp} , а затем проводилось усреднение в промежутке, где ΔI практически постоянно. По среднему значению $\Delta I_{\text{ср}}$ и формуле (3) рассчитывалась величина γ . При расчетах значение M_s принималось равным 800 гс. Для экспериментальных ПКА толщиной около 2000 Å величина γ оставила 4–6 эрг/см², что почти в два раза меньше результата при $H_{\perp} = 0$.

С вышеприведенными результатами согласуются предварительные данные, полученные при измерении скорости сползания круговой границы в режимах расширения и сжатия. Однако интерпретация измерений в этом случае затруднена тем, что процесс сползания происходит в неоднородном циркулярном поле, спадающем обратно пропорционально R , и, таким образом, граница смещается с переменной скоростью. Поэтому на опыте определялись средние скорости границы при сжатии и расширении на фиксированном промежутке. Отсюда рассчитывалась величина γ , оказавшаяся приблизительно равной 5 эрг/см².

Выводы

1. Радиальное переменное поле, начиная с некоторой амплитуды H_{\perp} , приводит круговую границу в более равновесное состояние. При дальнейшем повышении амплитуды H_{\perp} положение границы остается неизменным вплоть до значений H_{\perp} , разрушающих доменную структуру с одной границей.

2. В этом интервале изменения H_{\perp} разность пороговых полей сползания круговой границы при сжатии и расширении не зависит от H_{\perp} .

3. Предложенный метод измерения плотности граничной энергии γ по сравнению с $[I]$ позволяет получить результаты, более согласующиеся с известными.

Л и т е р а т у р а

1. ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., СЕЛЕЗНЕВ А.А. Определение энергии 180° -й доменной границы в плоской кольцевой пермаллоевой пленке. - "Физика магнитных пленок". Материалы международного симпозиума, Иркутск, 8-16 июля 1968, стр. 154.
2. ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., МАЛЫХ Б.П., СЕЛЕЗНЕВ А.А., СТЕРЕЛЮХИНА Л.Н., НИКОЛАЕВА Г.Н. Квазистатическое перемагничивание плоских кольцевых пермаллоевых пленок с круговой анизотропией. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. 43, стр. 3-32.
3. КИМ П.Д., ПОТЫЛИЦЫН В.И., БОГАТЫРЕВА Л.А., РОДИЧЕВ Д.М., САФОНОВ И.А. Энергия доменных границ в пермаллоевых пленках. - "Физика металлов и металловедение", 1970, т. 3, вып. 5, стр. 903.
4. СУХУ Р. Магнитные тонкие пленки. Пер. с англ., М., "Мир", 1967.
5. ОСУХОВСКИЙ В.Э., ШИШКОВ А.Г. Сползание намагниченности в собственном размагничивающем поле ферромагнитной пленки. - "Физика металлов и металловедение", 1969, т. 27, № 2, стр. 219-223.
6. ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., МАЛЫХ Б.П., НИКОЛАЕВА Г.Н., СЕЛЕЗНЕВ А.А., СТЕРЕЛЮХИНА Л.Н. Доменная структура плоских пермаллоевых пленок с вращательной симметрией ось легкого намагничивания. - Всесоюзная конференция по магнетизму (тезисы). Красноярск, 20-29 июня 1971.
7. ТЕЛЕСНИН Р.В., ИЛЫЧЕВА Е.Н., КАНАВИНА Н.Г., ОСУХОВСКИЙ В.Э., ШИШКОВ А.Г. О методах исследования процессов ползания доменных границ. - "Аппаратура и методы исследования тонких магнитных пленок", Красноярск, 1968, стр. 335.

Поступила в ред.-изд.отд.

14 июня 1972 г.