

Физика

УДК 681.325.6

Г. Г. ШАКАРЯН, Я. М. ПОГОСЯН, Г. А. ВЕРМИШЯН

МЕХАНИЗМ НАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛОСКИХ
МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В ТОНКИХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

Предлагается механизм возникновения направленного движения плоских магнитных доменов по доменопродвигающим каналам в тонких ферромагнитных пленках. Основой механизма является возбуждаемое наносекундным импульсным магнитным полем $H_{тл}$, действующим в направлении оси трудного намагничивания, переменное магнитное поле H_m , действующее в направлении оси легкого намагничивания, которое и является причиной однонаправленного движения асимметрично го плоского магнитного домена.

Тонкие ферромагнитные пленки в настоящее время находят применение при построении запоминающих устройств, использующих принцип синхронной направленной передачи информации с помощью плоских магнитных доменов (ПМД) по доменопродвигающим каналам [1, 2]. В работе [3] был предложен новый способ передачи информации по доменопродвигающему каналу из тонкой ферромагнитной пленки, полученной в виде узкой ленты (рис. 1а). Передача информации парадным движением доменных границ* [4—9] по доменопродвигающему каналу осуществлялась приложением наносекундного импульсного магнитного поля $H_{тл} = (0,3 \div 0,5) H_k$ (H_k — поле анизотропии) вдоль оси трудного намагничивания (режим высокочастотного сползания) и последующим приложением однородного магнитного поля H_d вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Другой способ получения доменопродвигающих каналов с парадным движением доменных границ предлагается в работе [10]. Здесь доменопродвигающие каналы получаются в сплошной ферромагнитной пленке с большими линейными размерами путем создания локальных магнитных полей $H_{лок.}$, действующих в направлении ОЛН или вблизи нее (рис. 1б). В качестве $H_{лок.}$ используется поле рассеивания предварительно насыщенной магнитотвердой пленки или магнитное поле тока, протекающего по шине. Исследования, проведенные на телевизионной магнитооптической установке [11], показали, что как в первом (рис. 1а), так и во втором (рис. 1б) случае наблюдается явно выраженное парадное движение. Информационные домены имеют асим-

* Самопроизвольное возникновение или генерирование каким-либо способом направленного движения доменных границ в режиме высокочастотного сползания [4—6] называется парадным движением [7—9]. Высокочастотное сползание возбуждается приложением наносекундного импульсного магнитного поля $H_{тл}$ вдоль оси трудного намагничивания. При этом в отличие от парадного движения существующие в пленке доменные границы совершают хаотичное движение.

метричную форму, напоминающую сегмент, направление их смещения не зависит от полярности магнитных полей $H_{тл}$ и $H_{л}$, а обусловлено

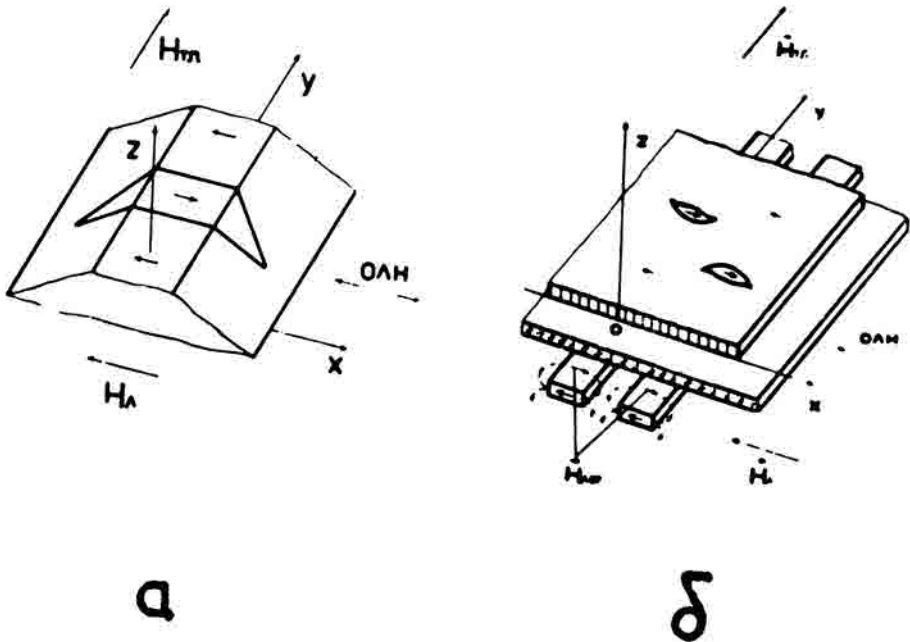


Рис. 1. Доменопродвигающие каналы с парадным движением доменных границ.

лишь формой доменов. Домены смещаются в сторону выпуклой границы (рис. 2).

Следует отметить, что под действием наносекундного импульсного магнитного поля $H_{т}$ в тонких пермалловых пленках обычно возбуждается высокочастотное сползание доменных границ и для возбуждения парадного движения приходится прибегать к различным искусственным

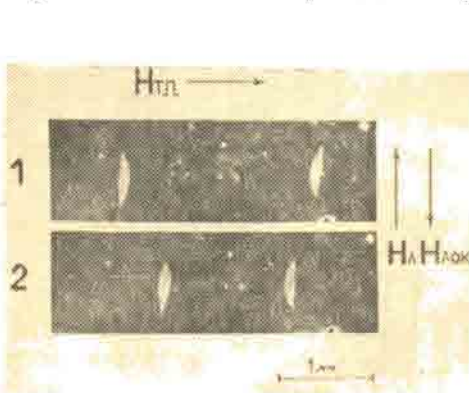


Рис. 2. Направление движения ПМД в зависимости от их формы: $H_c = 1,032$ Э; $H_k = 6,296$ Э.

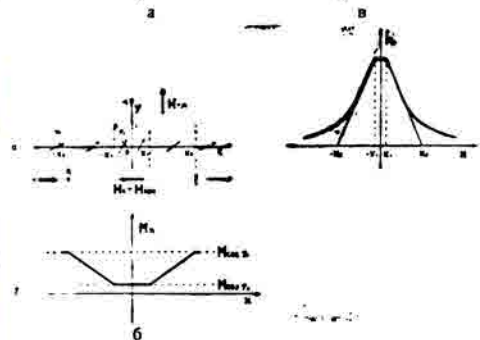


Рис. 3. а—неоднородное вращение векторов намагниченности в области действия магнитного поля $H_{лок}$, когда к пленке прикладываются магнитные поля $H_{л}$ и $H_{тл}$; б—распределение x -составляющей намагниченности M ; в—график зависимости локального магнитного поля h от x (жирная линия) и его аппроксимация (тонкая линия).

способам [8]. В отличие от этого в доменопродвигающих каналах (рис 1а, б) под действием наносекундного импульсного магнитного поля $H_{л}$ наблюдается только парадное движение, что и явилось основой разра-

ботки новых способов передачи информации (рис. 1а, б). Такое поведение ПМД в доменопродвигающих каналах наводит на мысль о существовании нового ранее неизвестного механизма парадного движения, связанного с геометрической формой ПМД. Целью настоящей работы является выявление механизма парадного движения ПМД по доменопродвигающим каналам.

Отметим некоторые характерные особенности поведения ПМД, связанные с парадным движением в доменопродвигающих каналах.

1. Направление движения ПМД не зависит от полярности полей $H_{тл}$ и $H_{л}$, а определяется формой домена (рис. 2).

2. В пленках, полученных в виде узкой ленты, под действием наносекундного импульсного магнитного поля $H_{тл}$ ($H_{л} = 0$) наблюдается высокочастотное сползание доменных границ [4—6]. Переход к парадному движению доменных границ происходит после приложения магнитного поля $H_{л}$. Процесс парадного движения доменных границ осуществляется при определенной остаточной намагниченности $\sim \Delta S = S_1 - S_2$ (S_1 и S_2 — площади доменов, в которых векторы намагниченности M антипараллельны), обусловленной амплитудным значением магнитного поля $H_{л}$ [3]. В этих же пленках парадное движение доменных границ можно возбудить и под действием низкочастотного синусоидального магнитного поля $H_{л} \sim (H_{тл} = 0)$ [9].

3. В сплошных пленках с большими линейными размерами процесс парадного движения доменных границ наступает сразу же после разбивания доменопродвигающего канала на отдельные домены [10].

Отсюда можно предположить, что возбуждение парадного движения доменных границ связано с возникновением в пленке некоторого переменного магнитного поля $H_{м}$, действующего в направлении ОЛН. Действительно, парадное движение доменных границ возникает в пленке, полученной в виде узкой ленты, лишь после приложения магнитного поля $H_{л}$, т. е. когда возникает размагничивающее поле $H_{р}$, х-составляющая которого изменяется вследствие вращения вектора намагниченности M под действием наносекундного импульсного магнитного поля $H_{тл}$ (рис. 1а). Так как магнитное поле $H_{л}$ постоянно и равно средней величине размагничивающего поля $H_{р}$, то на доменные границы ПМД, помимо импульсного магнитного поля $H_{тл}$, будет действовать переменное магнитное поле $H_{м}$, частота которого совпадает с частотой $H_{тл}$. Если $H_{л} = 0$, то и $H_{м} = 0$, так как под действием импульсного магнитного поля $H_{тл}$ пленка размагничивается, т. е. $H_{р} = 0$. Кроме того, в этом случае наблюдается лишь высокочастотное сползание доменных границ.

Причину возникновения $H_{м}$, когда в сплошной ферромагнитной пленке с большими линейными размерами формируется доменопродвигающий канал, легко понять из рис. 3а. Так как полярности магнитных полей $H_{л}$ и $H_{лок}$ противоположны и $H_{лок} > H_{л}$, то под действием магнитного поля $H_{тл}$ углы поворота векторов намагниченности, расположенных в области действия магнитного поля $H_{лок}$ и вне ее, будут различны ($\varphi_2 > \varphi_1$). Такое неоднородное вращение векторов намагниченности приводит к образованию объемных магнитных зарядов с плотностью $\rho = -\text{div}M$, а следовательно, и связанного с ними магнитного поля $H_{м}$, действующего в положительном направлении оси X.

Оценим величину магнитного поля $H_{м}$. При условии, что пленка бесконечна в направлении оси Y и область изменения намагниченности намного больше толщины пленки, т. е. $|x_2 - x_1| \gg d$, а также $\frac{dM_x}{dx} =$

$= \pm M(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)(x_2 - x_1)^{-1}$ (рис. 3б), H_m определяется при помощи формулы [12]:

$$H_m(x) = -d \int_{y=-\infty}^{\infty} \left| \int_{-x_2}^{-x_1} \left(\frac{dM_x}{dx} \right)_{x-x'} \frac{x-x'}{r_{ik}^3} dx' + \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{dM_x}{dx} \right)_{x-x'} \frac{x-x'}{r_{ik}^3} dx' \right| dy'. \tag{1}$$

где $r_{ik} = [(x-x')^2 + (y-y')^2]^{1/2}$. Учитывая, что локальное магнитное поле $h = H_{лок}/H_{лок}^0 = r^2/(x^2 + r^2)$ ($H_{лок}^0 = 1/2\pi r$) создавалось током величиной I , протекающим по проволоке, ось симметрии которой удалена на расстояние r от поверхности пленки, пределы интегрирования $|x_1|$ и $|x_2|$ найдем следующим образом. Аппроксимируем кривую, выражаемую функцией $h(x)$, прямыми касательными к точкам перегиба кривой $h(x)$ (рис. 3в). В этом случае $|x_1| = r\sqrt{3}$ и $|x_2| = \sqrt{3}r$. Подставляя в (1) найденные значения пределов интегрирования и интегрируя по y' и x' , получим

$$H_m(x) = \frac{3\sqrt{3}}{4} M(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \frac{d}{r} \ln \left| \frac{3r^2 - x^2}{0,03r^2 - x^2} \right| \tag{2}$$

и

$$H_m(0) = 5,71 M(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \frac{d}{r}. \tag{3}$$

Углы φ_1 и φ_2 в формуле (3) можно оценить с помощью астроида [13]. Например, для образца с коэрцитивной силой $H_c = 1,032$ Э и полем анизотропии $H_k = 6,296$ Э при $H_{лок} = 4$ Э, $H_d = 2,8$ Э, $H_{тл}/H_k = 0,5$, $r = 600$ мкм получим $H_m(0) = 0,317$ Э ($\varphi_1 = 20^\circ$, $\varphi_2 = 43^\circ$).

Если считать, что направленное движение ПМД в данном случае связано с возникновением магнитного поля H_m , и учесть то обстоятельство, что возбуждение парадного движения доменных границ переменным магнитным полем $H_d \sim H_d + H \sim (H \sim \text{низкочастотное магнитное поле, приложенное вдоль ОЛН})$ в пленках, полученных в виде узкой ленты, обусловлено формой доменных границ (доменные границы имеют форму дуги) [5], то, в принципе, под действием переменного магнитного поля $H_d(i)_{тл} = 0$) направленное движение ПМД должно наблюдаться и в сплошной ферромагнитной пленке с большими линейными размерами, где имеются домены асимметричной формы. Из рис. 4а позиции 1—5 видно, что при уменьшении магнитного поля H_d ($H_{лок} = \text{const.}$) наблюдается рост ПМД (позиции 2,4), причем ПМД растет только лишь смещением более выпуклой границы. Если теперь увеличить поле H_d , то ПМД будет уменьшаться смещением другой границы, менее выпуклой (позиции 1, 3, 5). Ясно, что в пленке можно возбудить парадное движение доменных границ, если приложить к ней переменное магнитное поле H_d .

Отметим, что из-за наличия в пленке магнитных и структурных неоднородностей парадное движение доменных границ, возбуждаемое магнитным полем H_d , не является стабильным. Действительно, если при движении ПМД доменная граница зацепляется за какой-либо дефект в пленке, то ПМД изменяет свою форму, что ведет к прекращению парадного движения (рис. 4а, позиции 5—7). Процесс парадного движения можно стабилизировать приложением импульсного магнитного поля $H_{дл}$. Теперь уже неоднородности, которые препятствуют движе-

нию ПМД при возбуждении парадного движения только магнитным полем H_{γ} (рис. 4а, позиции 5—7), свободно преодолеваются (рис. 4б, позиции 1—7).

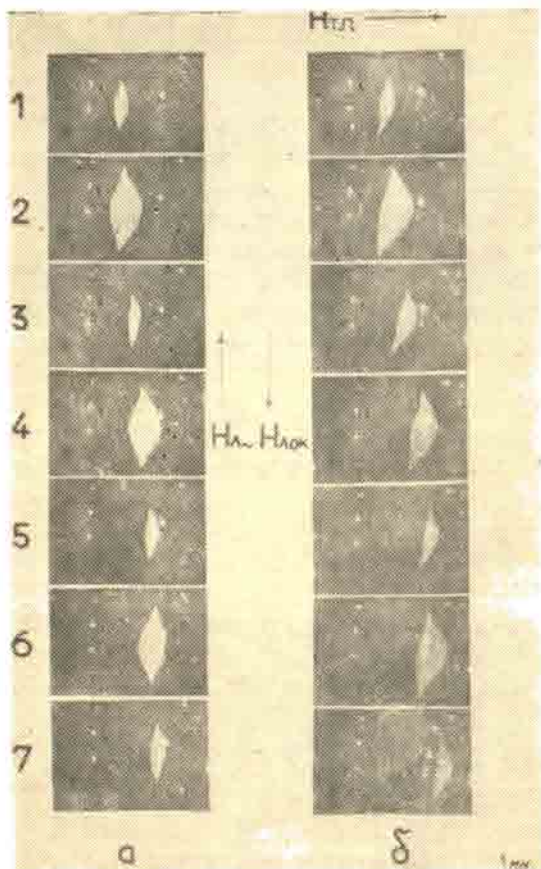


Рис. 4. Направленное движение ПМД, возбуждаемое под действием магнитных полей H_{γ} и H_{ox} . (а), и в случае, когда прикладывается еще и магнитное поле H_m (б).

силы, стремящейся вернуть ПМД в первоначальное положение. В момент, когда давление на доменные границы ПМД, создаваемое магнитным полем H_{γ} ($H_{\gamma}^c = H_m$ — магнитное поле, возникающее при отходе ПМД от своего равновесного положения), уменьшается и достигает величины γ/R , т. е. $2MH_{\gamma}^c < \gamma/R$, ПМД начинает увеличиваться теперь уже смещением выпуклой доменной границы и т. д. Разумеется, механизм направленного движения ПМД по доменопродвигающему каналу, изображенному на рис. 1а, тот же.

* Равновесные размеры ПМД определяются конкуренцией между энергией намагничивания в поле H_{ox} с одной стороны, и энергией доменной границы, собственной магнитоэтической энергией, а также энергией намагничивания в поле H_{γ} — с другой.

Таким образом, механизм направленного движения ПМД по доменопродвигающим каналам (рис. 1б) под действием магнитных полей H_{γ} , H_{γ} и H_{ox} , представляется следующим. Как было показано, импульсное магнитное поле H_{γ} способствует возникновению магнитного поля H_m , действующего в положительном направлении оси X (рис. 3). Полярность поля H_m предопределяется направлением смещения доменных границ ПМД, т. е. под действием магнитных полей H_{γ} и H_m ПМД будет уменьшаться. Но так как ПМД имеет асимметричную форму и, следовательно, на выпуклую доменную границу будет действовать добавочное давление γ/R (γ , R — плотность энергии и радиус кривизны доменной границы) [5], препятствующее смещению этой границы, то уменьшение ПМД будет происходить только смещением относительно прямой границы. Уменьшаясь, ПМД постепенно отходит от своего равновесного положения*, что приводит к возникновению

ЛИТЕРАТУРА

1. Боярченко М. А., Васильева Н. П., Розенгаль Ю. Д. Логические устройства на магнитных средах с управляемым движением доменов. М.: 1978.
2. Васильева Н. П., Малютин В. И. Тенденции развития запоминающих устройств на плоских магнитных доменах.—Приборы и системы управления, 1978, т. 9, с. 11—15.
3. Погосян Я. М., Шакарян Г. Г. Новый принцип продвижения доменов по ферромагнитному каналу.—ФММ, 1979, т. 48, с. 431—433.
4. Stein K. U., Feldtkeller E. Wall Streaming in Ferromagnetic Thin Films. — J. Appl. Phys., 1967, v. 38, p. 4401—4408.
5. Христенко А. И., Шников А. Г., Ильичева Е. П., Канавина Н. Г. Колебания намагниченности в пермалловых пленках при возбуждении поперечным импульсным полем.—ФММ, 1972, т. 34, с. 1179—1189.
6. Погосян Я. М., Арутюнян С. А. Высокочастотное сползание в ферромагнитных пленках.—ФММ, 1973, т. 36, с. 270—276.
7. Bourne H. C., Kusuda T., Lin H. Wall Streaming, Creeping and a New Parade Motion in Ni-Fe Films Excited by Hard-Axis Pulses.—IEEE Trans. Magn., 1968, v. 4, p. 440—445.
8. Погосян Я. М., Шакарян Г. Г. Парадное движение доменных границ.—ФММ, 1977, т. 44, с. 190—193.
9. Погосян Я. М., Шакарян Г. Г. Низкочастотное парадное движение доменных границ.—ФММ, 1980, т. 50, с. 42—44.
10. Pogosjan J. M., Schakarjan G. G., Geworkjan S. D., Straubel R. Neue Prinzipien der digitalen Informationsspeicherung und-verarbeitung in feinkristallinen dünnen magnetischen Schichten.—Nachrichtentechnik. Elektronik, 1981, v. 31. N. 4, S. 159—161.
11. Шакарян Г. Г., Вермишян Г. А. Телевизионная магнитооптическая установка для изучения доменной структуры магнитных материалов.—ПТЭ, 1984, т. 5, с. 155—156.
12. Vigier P., Haymann P. Study of Symmetrical Wall in Permalloy and Lorentz Microscopy.—Phys. stat. sol., 1969, v. 34, p. 649—660.
13. Прадтон М. Тонкие ферромагнитные пленки. Л.: 1967.

Գ. Գ. ՇԱՔԱՐՅԱՆ, ՅԱ. Մ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Գ. Ա. ՎԵՐՄԻՇՅԱՆ

ԲԱՐԱԿ ՖԵՐՐՈՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐՈՒՄ ՀԱՐԹ ՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ
ԴՐՄԵՆՆԵՐԻ ՈՒՂՂՈՐԴՎԱԾ ՇԱՐԺՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Առաջարկվում է հարթ մագնիսական դոմենների երթուղիներով ուղղորդված շարժման մեխանիզմ: Նրա էությունը հետևյալն է: Մագնիսացվածության դժվար առանցքով գործող նանովայրկյանային իմպուլսային մագնիսական $H_{\tau,1}$ դաշտից գրգռված և մագնիսացվածության հեշտ առանցքով ուղղված H_{10} փոփոխական դաշտը հարթ ասիմետրիկ մագնիսական դոմենի միակողմանի շարժման պատճառն է: