

Рис. 4. Возможные структуры стенок ЦМД с малыми индексами S.

собой общее число полных оборотов намагниченности в центре стенки при обходе домена против часовой стрелки. Наиб. простой доменной структуре соответствует  $S=1$ .

Для каждого значения индекса S существуют две возможные конфигурации стенки, связанные с типом винтовой образности (спиральности) нормальной участка стенки:  $\chi^+$  и  $\chi^-$ , причём, по определению,  $\chi^+$  соответствует левовинтовому распределению намагниченности в нормальной стенке.

Возможны также и другие реально наблюдаемые конфигурации стенок. Так, на рис. 5 (слева) показано состояние ЦМД ( $S=0$ ), к-рое может реализоваться при наличии поля в плоскости плёнки. Возникающие в стенке переходные области, связанные с разл. направлением разворота намагниченности в центре стенки, наз. блоховскими линиями и (БЛ; в данном случае — вертикальными блоховскими линиями — ВБЛ; см. Блоха линия). В случае конфигурации, изображённой на рис. 5 (справа,  $S=1$ ), говорят о незакрученной паре БЛ — паре БЛ разного знака (при сближении таких БЛ разворот намагниченности исчезает — линии аннигилируют), в отличие от закрученной пары БЛ (линии одного знака) в структуре на рис. 5 (слева).



Рис. 5. Слева — структура стенки ЦМД с  $S=0$ ; справа — структура стенки ЦМД с  $S=1$  с незакрученной парой блоховских линий.

Блоховская линия создаёт поля рассеяния. Эти поля уменьшаются, если БЛ разбивается, на две части, намагниченность в к-рых ориентирована антипараллельно. Возникающая при этом переходная область — неоднородное распределение намагниченности в БЛ — наз. блоховской точкой (см. Блоха точка). Так, если верх. часть ЦМД соответствует  $S=1$ , а нижняя  $S=0$ , то в результате получается состояние  $S=1/2$ . При наличии магн. поля в плоскости плёнки блоховская точка будет перемещаться из центра в направлении, соответствующем увеличению участка БЛ, намагниченность в к-рой ориентирована вдоль поля. Т. о., ЦМД может находиться в промежуточном состоянии со значением S между 0 и  $1/2$ .

Статическое состояние ЦМД характеризуется тройкой чисел ( $S, L, P$ ) и спиральностью доменной стенки; здесь индекс состояния S — целое или полуцелое число, L — число блоховских линий (чётное), P — число блоховских точек. Для не сильно закрученных доменных стенок (малые индексы S) характерно асимметричное распределение БЛ вдоль контура домена (рис. 4). Этот эффект получил название кластеризации ВБЛ (Хуберт, 1973; Слончевский, 1974) и обусловлен конкуренцией между магнитостатической и обменной энергиями.

Если число БЛ в стенке ЦМД достаточно велико, то такой домен является жёстким. Для реальных жёстких ЦМД S порядка 30—100. При уменьшении поля смещения жёсткие ЦМД испытывают эллиптич. неустойчивость, однако они не растягиваются до бесконечности, а принимают форму эллипса определ. размера. В свою очередь, эллипсоидальные ЦМД при дальнейшем уменьшении поля преобразуются в домены, имеющие форму гантели. Жёсткие

ЦМД нежелательны в ЦМД-устройствах, поэтому для их подавления в поверхностный слой ЦМД-плёнки имплантируют атомы H, He, Ne, а также выращивают многослойные плёнки с малой анизотропией в поверхностном слое либо наносят на поверхность тонкий слой пермаллоя. Наиб. сильно различия между состояниями ЦМД проявляются в динамич. экспериментах.

**Динамические свойства ЦМД.** Под действием магн. поля смещения, не однородного в плоскости плёнки, ЦМД перемещаются в область с более слабым полем смещения, где их энергия понижается. Движению ЦМД препятствуют сила вязкого трения и коэрцитивность плёнки. Первая из них обусловлена сопровождающим движение ЦМД переворотом спинов в плёнке и, следовательно, диссипацией энергии. Вторая связана с несовершенством структуры плёнки: дефекты структуры затрудняют перемещение ЦМД в плёнке. В результате скорость движения ЦМД определяется выражением

$$v = \frac{\eta_w}{2} \left( \Delta H_z - \frac{8}{\pi} H_c \right),$$

где  $\Delta H_z$  — изменение напряжённости поля на расстоянии, равном диаметру ЦМД;  $\eta_w$  — подвижность доменной стенки;  $H_c$  — коэрцитивная сила материала (Пернески, 1969). Типичные значения этих величин в ЦМД-материалах:  $\eta_w \approx 10^2 - 10^3 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ А}^{-1}$ ,  $\Delta H_z \approx 80 - 400 \text{ А/м}$ ,  $H_c \approx 80 \text{ А/м}$ ,  $v \approx 1 - 10 \text{ м/с}$ .

Важнейший результат исследований 1970-х гг. — открытие эффекта отклонения траектории поступат. движения ЦМД от направления градиента внеш. поля смещения. Отклонение ЦМД вызывается поперечной гироскопич. силой, действующей на движущийся участок стенки, характеризующийся разворотом вектора намагниченности по азимутальному углу  $\phi$ , независимо от того, локализовано ли изменение  $\phi$  в блоховской линии или распределено непрерывным образом вдоль стенки домена, как в ЦМД с  $S=1$  (рис. 4) (см. также Доменной стенки динамика). Гироскопич. сила  $F_g$ , действующая на ЦМД, зависит от суммарного разворота угла  $\phi$  вдоль стенки домена (т. е. от ср. индекса S):

$$F_g = \frac{4\pi M_s}{\gamma} h \bar{S} [nv];$$

здесь  $\gamma$  — гиромагн. соотношение;  $n$  — единичный вектор, направленный против намагниченности внутри домена;  $v$  — скорость смещения домена.

Движение ЦМД определяется одноврем. действием продвигающей силы со стороны внеш. поля, силы вязкого трения, коэрцитивной и гироскопич. сил (рис. 6). Вели-

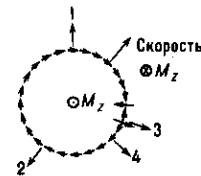


Рис. 6. Направление действия сил внешнего поля (1), вязкого трения (2, 3) и гироскопической силы (4) для движущегося ЦМД с  $S=+2$  (1 — фарадеевская сила, 2 — сила вязкого трения, 3 — добавочная сила вязкого трения из-за неелевских линий).

чина и знак угла сноса ЦМД зависят от индекса ЦМД; при  $S=0$  ЦМД движется вдоль проекции градиента поля смещения на плоскость плёнки. При очень большой плотности ВБЛ (жёсткие ЦМД) угол сноса ЦМД стремится к  $\pm 90^\circ$ .

При включении или выключении магн. поля в плоскости плёнки возможно движение ЦМД и без внешнего продвигающего градиентного поля смещения. Это движение (т. н. а в т о д в и ж е н и е) характерно для ЦМД со сложной структурой доменной стенки и связано с перемещением БЛ вдоль стенки ЦМД при изменении внеш. поля.