

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИГРАНИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ЗИГЗАГООБРАЗНЫХ МЕЖДОМЕННЫХ И МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ

А.Л.Ройтбурд

Дальнедействующее поле межфазной или междоменной границы может приводить к потере устойчивости приграничной области и ее распаду на систему периодически чередующихся доменов. При этом граница приобретает зигзагообразную форму.

В последние годы внимание исследователей привлекают так называемые зигзагообразные границы (ЗГ) между сегнетоэластическими и сегнетоэлектрическими доменами. Хотя ЗГ обнаружены почти 15 лет назад ¹, до сих пор не ясно, какова причина образования таких границ с чрезвычайно развитой поверхностью и соответственно с поверхностной энергией на несколько порядков выше, чем энергия гладкой границы с той же средней кристаллографической ориентировкой. Ниже мы покажем, что ЗГ между доменами, как и аналогичные им периодические гетерофазные структуры, наблюдаемые на межфазных границах при сегнетоэластических ² и мартенситных ³ переходах, имеют ту же физическую природу, что и промежуточное состояние сверхпроводников. Возникновение их есть следствие неустойчивости однофазного состояния под действием дальнедействующего поля, порожденного межфазной границей.

1. Для конкретности рассмотрим возникновение ЗГ между сегнетоэластическими доменами (двойниками). На рис. 1 *a* представлена свободная энергия сегнетоэластика как функция параметра перехода — однородной деформации сдвига. Равновесные состояния ненапряженных доменов соответствуют деформациям ϵ_0^1 и ϵ_0^2 . Состояния внутри спиnodальной области $\epsilon_1^* < \epsilon < \epsilon_2^*$, для которых $\partial^2 f / \partial \epsilon^2 < 0$, являются неустойчивыми. Если под действием внешнего напряжения домен 1 достигает границы устойчивости ϵ_1^* , то он сваливается в состояние стабильного домена 2. Если система нагружалась путем задания внешней деформации, то внутри спиnodальной области она безбарьерно переходит в смесь плоскопараллельных доменов ⁴.

2. Межфазные и междоменные границы могут являться источником дальнедействующих полей — упругих, магнитных или электрических, распространяющихся от границы на рассто-

яние порядка ее протяженности. В рассматриваемом случае деформационного перехода источником поля напряжения является несовместность собственных (равновесных) деформаций доменов $\hat{\eta} = \mathbf{n} \times (\hat{\epsilon}_2^0 - \hat{\epsilon}_1^0) \times \mathbf{n}$, где \mathbf{n} — вектор нормали к границе доменов ⁵. Если домены граничат по плоскости двойникования, эта несовместность равна нулю, напряжения не возникают и скачок деформаций между доменами равен $\Delta\epsilon = \epsilon_2^0 - \epsilon_1^0$ (рис. 1 б). При отклонении ориентировки границы от двойниковой несовместность растет и скачок деформаций уменьшается. При этом имеется некоторая критическая ориентировка границы, для которой скачок деформаций достигает ширины спинодальной области $\Delta\epsilon^* = \epsilon_2^* - \epsilon_1^*$. На рис. 1 в показана граница с "закритической" ориентировкой. В результате упругого взаимодействия между доменами скачок деформаций уменьшился до $\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1 = \nu(\epsilon_2^0 - \epsilon_1^0) < \Delta\epsilon^*$ (ν — коэффициент Пуассона), и оба домена находятся в нестабильном состоянии. (Невозможность закритических ориентировок была использована И.М.Лифшицем при определении равновесной формы двойника ⁵).

В общем случае при критической ориентировке межфазной границы порождаемое ею поле делает нестабильной хотя бы одну из граничащих фаз. Это приводит к спинодальному распаду ⁶ нестабильной фазы на чередующиеся слои обеих фаз и образованию ЗГ. Каждый участок такой границы имеет докритическую ориентировку, а деформации фаз нигде не соответствуют неустойчивым состояниям.

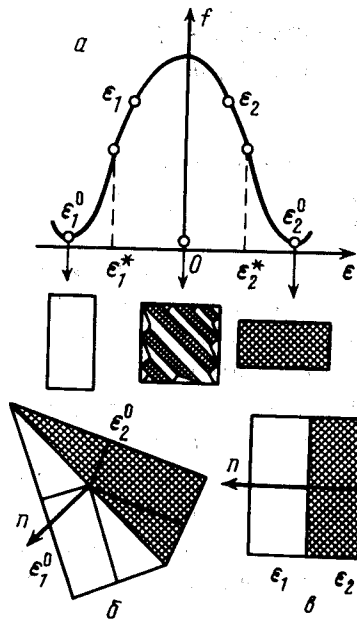


Рис. 1

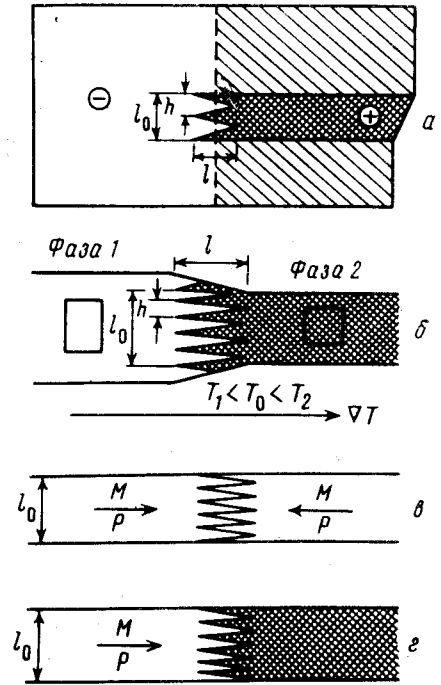


Рис. 2

Рис. 1. а — Свободная энергия как функция параметра перехода (деформации), б, в — взаимная деформация фаз при различных ориентировках границы. Под осью ϵ на а изображены состояния ϵ_1^0 и ϵ_2^0 , отвечающие равновесным доменам, и полидоменная система, возникающая при распаде нестабильного состояния $\epsilon = 0$

Рис. 2. Различные случаи образования ЗГ: а — граница двойника, б — межфазная граница (показаны элементарные ячейки фаз и направление градиента температуры, T_0 — температура равновесия фаз), в — граница встречных доменов, г — граница полярной и неполярной фаз

3. Как реально возникают критические ориентировки межфазных и междоменных границ? На рис. 2 а дана схема, соответствующая экспериментальному получению домена-двойника в молибдате гадолиния ⁷. Этот кристалл является сегнетоэластиком — сегнетоэлектри-

ком, и двойникование в нем сопровождается изменением направления поляризации на противоположное (заштрихованная часть кристалла помещена в электрическое поле). Представлена начальная стадия реполяризации — образование под электродом единичной двойниковой прослойки. Протяженные границы домена совпадают с плоскостями двойникования и не порождают механических напряжений (см. рис. 1 б), торцевая граница неустойчива (рис. 1 в). Неустойчивость приграничной области у торца двойника не может быть снята путем изменения ориентировки границы, поскольку она удерживается электрическим полем, и торцевая граница превращается в ЗГ. Подобная ситуация возникает также в результате фазового перехода части кристалла при наличии градиента температуры в направлении, нормальном к неустойчивым межфазным границам (рис. 2 б). Аналогичным образом ЗГ могут образовываться между встречными доменами полярных фаз (ферромагнитных или сегнетоэлектрических) (рис. 2 в) или между полярной и неполярной фазами (рис. 2 г). Толщина ЗГ, т. е. длина зубцов, определяется протяженностью неустойчивой области и примерно равна протяженности межфазного контакта (l_0 на рис. 2).

4. Дадим оценку основной геометрической характеристики ЗГ — отношению периода h к толщине l . Это отношение определяется конкуренцией двух факторов: упругой энергии напряжений, создаваемых боковыми сторонами зубцов, и поверхностной энергией. Для тонких зубцов ($h/l \ll 1$) упругие напряжения пропорциональны отклонению сторон зубцов от плоскости, при которой взаимное искажение фаз минимально (в случае ЗГ между сегнетоэластическими доменами это плоскость двойникования (рис. 2 а), для межфазной ЗГ на рис. 2 б — это горизонтальная плоскость). Поэтому упругие напряжения пропорциональны h/l , и упругая энергия тем меньше, чем меньше h . Поверхностная энергия, наоборот, растет с уменьшением толщины зубцов h . Минимизируя свободную энергию, приходящуюся на единицу площади ЗГ, $F = e(h/l)^2 l + 2\gamma(l/h)$ по периоду h , получаем равновесное отношение $(h/l) = (h_0/l)^{1/3}$, где $h_0 = \gamma/e$ — характеристический размер, для двойников он порядка межатомного ($e \approx G(\epsilon_2^0 - \epsilon_1^0)^2$, G — модуль упругости), γ — удельная поверхностная энергия). Найденное соотношение между h и l находится в соответствии с результатами количественного исследования ЗГ в молибдате гадолия ⁸. Энергия равновесной ЗГ $F_0 = 3\gamma(l/h_0)^{1/3}$ при $l = 10^{-2}$ см на ~ 2 порядка превосходит поверхностную энергию гладкой межфазной или междоменной границы. Сравнение F_0 с энергией неустойчивой гладкой границы ($\sim el$) позволяет оценить минимальную протяженность ЗГ: $l_{0 \min} \approx 5 h_0$.

Литература

1. Flippen R.B., Haas C.W. Solid State Comm., 1973, 13, 1207.
2. Отко А.И., Крайнюк Г.Г. Изв. АН СССР сер физ., 1986, 50, 402.
3. Беликов А.М., Василенко А.Ю., Косилов А.Т. ФММ, 1980, 50, 642.
4. Ройтбурд А.Л. ФТТ, 1968, 10, 3619.
5. Лифшиц И.М. ЖЭТФ, 1948, 18, 1134.
6. Sahn J.W., Acta Met., 1961, 9, 795.
7. Шур В.Я., Летучев В.В., Румянцев Е.Л., Чарикова Т.Б. ФТТ, 1986, 28, 2829.
8. Крайнюк Г.Г., Отко А.А. VII Всесоюзная конференция по физике сегнетоэлектриков, Черновцы 1987, Тезисы докладов.

Поступила в редакцию
16 июля 1987 г.

После переработки
19 ноября 1987 г.