

УДК 537.226; 548.73

© 1991

НЕСОРАЗМЕРНАЯ ФАЗА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Р. Ф. Мамин

Рассмотрено образование несоразмерной фазы в полупроводниках. Показано, что освещение влияет на характеристики несоразмерной фазы путем изменения неравновесной концентрации электронов на уровнях прилипания. Проанализирована экспериментальная ситуация в $\text{Sn}_2\text{P}_3(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$, особенностью которой является близость к трикритической точке и точке Лифшица. Это позволяет наблюдать при освещении резкое изменение температурной области существования несоразмерной фазы и генерацию несоразмерной фазы в системах, в которых она обычно не наблюдается. Предложен новый подход к описанию эффектов памяти в несоразмерной фазе, основанный на влиянии концентрации электронов на уровнях прилипания на фазовый переход. Показано, что при термостабилизации в определенной температуре неоднородное распределение концентрации электронов на уровнях прилипания запоминается кристаллом и при последующем возвращении в эту температуру система вспоминает свое состояние.

Кристаллы с несоразмерными фазами привлекают в последнее время большое внимание и служат объектами разнообразных исследований [1-6]. Успехи на пути теоретического описания несоразмерной фазы достигнуты при феноменологическом описании с использованием термодинамического потенциала типа Ландау—Лифшица [1-3]. Во всевозможных подобных исследованиях не учитывалось влияние электронной подсистемы в предположении, что кристаллы являются диэлектриками. В последнее время разворачиваются исследования несоразмерной фазы в полупроводниках с фотоактивными свойствами, таких как $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$, с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 1.8-2.4$ эВ. Несоразмерная фаза также обнаружена в широко исследуемых сейчас высокотемпературных сверхпроводниках как в металлическом, так и в сверхпроводящем состояниях [6-8]. Таким образом, стала актуальной задача описания взаимного влияния электронной и решеточной подсистем в области несоразмерной фазы. Это особенно важно при возникновении неравновесности электронной подсистемы, сильно влияющей на фазовый переход. Наиболее интересным взаимное влияние может быть вблизи поликритических точек [9-12], где можно легко изменять параметры несоразмерной фазы. Исследованию влияния изменения заселенности ловушек на фазовый переход в несоразмерную фазу вблизи точки Лифшица и трикритической точки посвящена первая часть работы.

Особый интерес при исследовании несоразмерной фазы вызывают эффекты запоминания системой своего состояния после длительного выдерживания при определенной температуре T_0 . Этот эффект проявляется в аномалиях физических величин при последующем прохождении данной температуры [13-18]. Часто этот эффект наблюдается при различных оптических экспериментах, и там он получил название эффекта термооптической памяти [17, 18]. Для описания подобных явлений предлагались различные механизмы, связанные с дефектами [19, 20]. В данной работе выдвинута идея связи эффектов памяти с перестройкой электронной подсистемы и развита теория, позволяющая определять аномалии физических величин и временные характеристики памяти из параметров полупроводниковой подсистемы.

1. Термодинамическое описание несоразмерной фазы в полупроводниках

Рассмотрим термодинамический потенциал, описывающий поведение параметра порядка вблизи температуры фазового перехода в системах, аналогичных $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_8$

$$\Phi = \frac{1}{L} \int \Phi dx,$$

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{a}{2} \eta^2 + \frac{\beta}{4} \eta^4 + \frac{\gamma}{6} \eta^6 + \frac{\delta}{2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\sigma}{4} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right)^2 + \frac{\kappa}{4} \eta^2 \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + m E_g(\eta), \quad (1)$$

где η — параметр порядка; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \sigma, \kappa$ — коэффициенты разложения термодинамического потенциала по степеням параметра порядка и его производным ($\alpha = \alpha'(T - T_c)$); x — координата; L — длина образца. При $\beta > 0$ в отсутствие несоразмерной фазы наблюдался бы фазовый переход второго рода, а при $\beta < 0$ фазовый переход первого рода. При $\delta < 0$ в системе возникает несоразмерная фаза. Предпоследний член в разложении (1) необходим для описания фазового перехода второго рода из исходной фазы в несоразмерную фазу при $\beta < 0$. Последний член описывает вклад электронной подсистемы в термодинамический потенциал, m — концентрация электронов на уровнях прилипания, E_g — энергия электронов на уровнях прилипания. Вблизи фазового перехода энергия электронов на уровнях прилипания (величина которой порядка ширины запрещенной зоны) может быть разложена по тем же компонентам параметра порядка, что и решеточная часть термодинамического потенциала [21]

$$E_g = E_{g0} + \frac{a}{2} \eta^2 + \frac{b}{4} \eta^4 + \frac{e}{6} \eta^6 + \frac{c}{2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{d}{4} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right)^2 + \frac{g}{4} \eta^2 \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь a, b, e, c, d, g — коэффициенты разложения по параметру порядка и ее производным. Подставив (2) в (1) и вводя амплитуду ρ и фазу φ параметра порядка ($\eta = \rho \cos(\varphi)$), получим для разложения термодинамического потенциала следующее выражение в гармоническом приближении ($\varphi = kx$):

$$\Phi = \Phi'_0 + \frac{a_m}{4} \rho^2 + \frac{3\beta_m}{32} \rho^4 + \frac{5\gamma_m}{96} \rho^6 + \frac{\delta_m}{4} k^2 \rho^2 + \frac{\sigma_m}{8} k^4 \rho^2 + \frac{\kappa_m}{32} k^2 \rho^4, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} a_m &= \alpha + am, & \beta_m &= \beta + am, & \gamma_m &= \gamma + em, & \delta_m &= \delta + cm, \\ \sigma_m &= \sigma + dm, & \kappa_m &= \kappa + gm, & \Phi'_0 &= \Phi_0 + mE_{g0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, все коэффициенты разложения термодинамического потенциала зависят от концентрации электронов на уровнях прилипания. Так как при освещении происходит заполнение уровней прилипания, то изменяются все характеристики несоразмерной фазы.

Для ситуации в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_8$ характерно то, что система находится как вблизи трикритической точки, так и вблизи точки Лифшица. Поэтому можно считать, что электроны прежде всего перенормируют коэффициенты α, β, δ , поскольку эти коэффициенты являются малыми вблизи этих точек и вклад электронной подсистемы может быть сравним с самими коэффициентами.

В гармоническом приближении несоразмерная фаза описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = 0 &= \frac{a_m}{2} \rho + \frac{3\beta_m}{8} \rho^3 + \frac{5\gamma_m}{16} \rho^5 + \frac{\delta_m}{2} k^2 \rho + \frac{\sigma_m}{4} k^4 \rho + \frac{\kappa_m}{8} k^2 \rho^3, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial k} = 0 &= \frac{\delta_m}{2} k \rho^2 + \frac{\sigma_m}{2} k^3 \rho^2 + \frac{\kappa_m}{16} k \rho^4. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим сначала случай, когда система находится вблизи трикритической точки (случай $\beta_m \sim 0$). При этом будем полагать, что $x_m \delta_m / \sigma_m > \beta_m$, что характерно для области вблизи трикритической точки. Соответствующее решение для несоразмерной фазы находим в следующем виде:

$$k^2 = -\frac{\delta_m}{\sigma_m} + \frac{x_m}{4\sigma_m} \left\{ -\frac{2(\alpha_m - \alpha_{0m})}{5\gamma_m - 3x_m^2/16\sigma_m} \right\}^{1/2},$$

$$\rho^4 = -\frac{8(\alpha_m - \alpha_{0m})}{5\gamma_m - 3x_m^2/16\sigma_m}, \quad (6)$$

$$\alpha_{0m} = \delta_m^2 / 2\sigma_m,$$

$$\Phi = \Phi'_0 - \frac{\alpha_{0m} - \alpha_m}{3} \left\{ -\frac{2(\alpha_m - \alpha_{0m})}{5\gamma_m - 3x_m^2/16\sigma_m} \right\}^{1/2}. \quad (7)$$

Температура фазового перехода исходная—несоразмерная фаза зависит от числа электронов на уровнях прилипания следующим образом:

$$T_c = T_c + \frac{1}{a'} \left(\frac{(\delta + cm)^2}{2(\delta + dm)} - am \right). \quad (8)$$

Решения, описывающие соразмерную фазу вблизи трикритической точки, имеют вид

$$\eta^4 = -\frac{\alpha_m}{\gamma_m}, \quad \Phi_{\text{сф}} = \Phi'_0 + \frac{\alpha_m}{3} \left\{ -\frac{\alpha_m}{\gamma_m} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Температура фазового перехода несоразмерная—соразмерная фаза T_k определяется из равенства соответствующих термодинамических потенциалов (7), (9) и вблизи трикритической точки (при условии $3x_m^2/80\gamma_m\sigma_m^2 \ll 1$) имеет следующую зависимость от концентрации электронов на уровнях прилипания:

$$T_k = T_c - \frac{1}{a'} \left(1.4 \frac{(\delta + cm)^2}{(\sigma + dm)} - am \right). \quad (10)$$

Вдали от трикритической точки, когда $x_m \ll \beta_m \sigma_m / \delta_m$, температура фазового перехода T_k равна

$$T_k = T_c - \frac{1}{a'} \left(2.2 \frac{(\delta + cm)^2}{(\sigma + dm)} - am \right). \quad (11)$$

Таким образом, температурная область существования несоразмерной фазы вдали от трикритической точки, но вблизи точки Лифшица следующая:

$$\Delta T_{\text{нсф}} = \frac{1}{a'} \left(2.7 \frac{(\delta + cm)^2}{(\sigma + dm)} \right), \quad (12)$$

а вблизи трикритической точки

$$\Delta T_{\text{нсф}} = \frac{1}{a'} \left(1.9 \frac{(\delta + cm)^2}{(\sigma + dm)} \right). \quad (13)$$

Когда система находится вблизи трикритической точки Лифшица [5] ($\beta > 0$), то

$$\Phi_{\text{нсф}} = \Phi'_0 - \frac{1}{6} \frac{(\alpha_{0m} - \alpha_m)^2}{\beta_m + x_m \frac{\delta_m}{\sigma_m}}, \quad (14)$$

$$\Phi'_{\text{сф}} = \Phi_0 - \alpha_m^2 / 4\beta_m. \quad (15)$$

В результате температура фазового перехода несоразмерная—соразмерная фаза T_k определяется из выражений (14), (15)

$$\alpha_m = x\alpha_{0m}, \quad x = \frac{-2 - \left\{ 6 + 6 \frac{x_m \delta_m}{\sigma_m \beta_m} \right\}^{1/2}}{1 + 3 \left(x_m \delta_m / \sigma_m \beta_m \right)}. \quad (16)$$

В случае, когда $\beta_m < 0$ и система по-прежнему находится вблизи трикритической точки, ввиду малости β_m имеем $x_m \delta_m / \sigma_m > -\beta_m$. Поэтому фазовый переход исходная—несоразмерная фаза будет переходом второго рода. При $\beta_m < 0$ переход в соразмерную фазу в отсутствие несоразмерной фазы будет переходом первого рода со скачком параметра порядка

$$\eta_0^2 = -\beta_m / 2\gamma_m. \quad (17)$$

При наблюдении несоразмерной фазы в согласии с (6)—(8) изменений в характеристиках перехода из несоразмерной фазы в соразмерную не будет.

2. Обсуждение экспериментов в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$

Особенностью системы $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ является то, что она находится вблизи точки Лифшица и вблизи трикритической точки, т. е. параметры δ и β малы и легко могут изменить знак. В отсутствие освещения при $x < 0.28$, $\delta > 0$ и $\beta > 0$ в системе наблюдается фазовый переход второго рода в сегнетофазу, описываемый соотношением (8). При $x > 0.28$ параметр δ становится меньше нуля и в системе наблюдается несоразмерная фаза [5, 9–12], близкая к трикритической точке (6)—(8), (13). При этом в области $x \approx 0.6$ происходит изменение знака β (трикритическая точка) [9–11]. Значения коэффициентов термодинамического потенциала (1) можно найти в работах [5, 9, 10].

С изменением x изменяется как параметр δ , так и β . Корреляция между этими изменениями выражается соотношением [10]

$$\delta = \lambda_1(\beta - \beta_0). \quad (18)$$

Здесь λ_1 и β_0 зависят от вида внешнего воздействия и первоначального состояния. Соотношение (18) существует потому, что оба параметра δ и β зависят от величины «близкодействующих» сил [11]. Поэтому, когда изменяется соотношение сил, в системе происходит изменение параметров δ и β .

При воздействии освещения за счет изменения заселенности ловушек прежде всего будут изменяться параметры δ и β (8), а также α (т. е. T_c), потому что они малы, и относительное изменение их будет велико, поскольку коэффициенты b и c при соответствующих степенях параметра порядка и ее производных в разложении E_g могут быть большими. Это обусловлено тем, что β и δ определяются решеточной подсистемой, в то время как b и c определяются электрон-фононным взаимодействием. При $x < 0.28$ при освещении в результате изменения знака δ_m возникает область несоразмерной фазы. При $x > 0.28$ происходит увеличение температурной области существования несоразмерной фазы за счет увеличения $|\delta_m|$. При этом происходит изменение параметра β и система приближается к трикритической точке.

Наша система $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ находится вблизи трикритической точки, при этом $x_m \delta_m / \sigma_m > \beta_m$, так как β_m мало. Поэтому в области отрицательных β_m по-прежнему наблюдается фазовый переход второго рода из исходной в несоразмерную фазу. При $\beta_m < 0$, когда $x_m \delta_m / \sigma_m < \beta_m$, несоразмерная фаза возникает при T_i (8) при условии $\delta_m^2 / \sigma_m > 3\beta_m^2 / 8\gamma_m$. Это обстоятельство особенно существенно при описании фазовых переходов с воздействием освещения и давления. Следует полагать, что во всех случаях вблизи трикритической точки фазовый переход исходная—несоразмерная фаза будет фазовым переходом второго рода.

Зависимость характеристик несоразмерной фазы от концентрации электронов на уровнях прилипания и соответственно от интенсивности освещения определяется величиной коэффициентов разложения ширины запрещенной зоны E_g по степеням параметра порядка (2). Для их определения надо хорошо знать температурное поведение ширины запрещенной зоны и параметра порядка в области фазового перехода. Параметр b определяется из измерения наклона линии температурного изменения ширины

запрещенной зоны при фазовом переходе исходная — несоразмерная фаза вблизи трикритической точки

$$|b| \approx \frac{5 \left[\Delta \left(\frac{\partial E_g}{\partial T} \right) \right] \gamma_m}{2a'} \quad (19)$$

Из скачка ширины запрещенной зоны при фазовом переходе первого рода их несоразмерной фазы в соразмерную можно определить параметр a

$$a = 2\Delta E_g / \gamma_m^2 \quad (20)$$

Для определения еще одного важного параметра c можно воспользоваться эмпирическим соотношением

$$c = \lambda_i b, \quad (21)$$

коэффициент λ_i определяется из экспериментов.

В $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ при следующих величинах изменения запрещенной зоны: $\Delta(\partial E_g/\partial T) = 0.03$ эВ/К, $\Delta E_g = 0.02$ эВ можно определить следующие значения коэффициентов: $a \approx 2 \cdot 10^{-19}$ Дж·м⁴/Кл², $|b| \approx 7.5 \times 10^{-16}$ Дж·м⁸/Кл⁴, $|c| \approx 10^{-8}$ Дж·м⁶/Кл². Это соответствует максимальному сдвигу температуры фазового перехода при $M = 10^{18}$ см⁻³, ~ 2.5 К, максимальному изменению температурной области несоразмерной фазы ~ 20 К, относительному изменению коэффициента β : $\Delta\beta \sim \beta_{\text{Se}}$ [9].

Изменение параметров δ и β будет подчиняться закону (18), и можно предположить, что влияние светового воздействия эквивалентно изменению состава, поэтому справедливо (18) с тем же параметром λ . В общем случае значение констант λ_i , δ_0 и β_0 в случае освещения будет отличаться от λ_x . При изменении давления [9] также справедливо соотношение (18), но со своими константами.

Так как при изменении освещения и давления происходят изменения параметров по различным фазовым траекториям в пространстве $\{\delta, \beta\}$, то, комбинируя интенсивности освещения и давления, можно достичь поликритической точки [9], т. е. такого состояния системы, когда оба параметра системы δ и β будут равны нулю. Таким же образом можно наблюдать фазовый переход первого рода (17) из исходной фазы в соразмерную фазу. Если для освещения верно соотношение (18) с $\lambda_i = 3.3 \times 10^{-19}$ Кл²/м², то поликритическая точка в образце $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ может быть достигнута при интенсивности освещения $I = 0.2$ Вт и давлении $P = 15$ ГПа.

3. Эффекты памяти

Перейдем к описанию эффектов памяти. Рассмотрим поведение системы при длительном выдерживании при определенной температуре в несоразмерной фазе. При этом в системе существуют два характерных масштаба времени: τ_m — время релаксации электронов на уровнях прилипания и τ_η — время релаксации параметра порядка ($\tau_m \gg \tau_\eta$). В соответствии с этим происходит медленная релаксация электронов на уровнях прилипания, а решеточная система быстро подстраивается к возникшему электронному состоянию.

При переходе в несоразмерную фазу электронная подсистема чувствует изменение решеточной подсистемы, поэтому наряду с однородной m_0 возникает неоднородная $m_1(x)$ концентрация электронов на уровнях прилипания

$$m = m_0 + m_1(x) \quad (22)$$

Значения неоднородной и однородной концентраций электронов на уровнях прилипания найдем из уравнения, описывающего динамику концентрации электронов на уровнях прилипания

$$\frac{dm}{dt} = \gamma_n n_0 (M - m) - \gamma_n m N_c \exp\left(-\frac{u_+ + \bar{a}\eta^2}{kT}\right) \quad (23)$$

Здесь n_0 — концентрация электронов проводимости; M — концентрация уровней прилипания; γ_n — кинетический коэффициент; N_c — плотность состояний в зоне проводимости; $u = u_0 + \bar{a}\eta^2$ — энергетический интервал от дна зоны проводимости до уровней прилипания, зависящий от параметра порядка [22]. Из (23) находим равновесную концентрацию электронов на уровнях прилипания

$$m = \frac{n_0 M}{n_0 + N_c \exp\left(-\frac{u_0 + \bar{a}\eta^2}{kT}\right)}. \quad (24)$$

Таким образом, в равновесных условиях за счет модуляции термозаброса возникает неоднородная концентрация электронов на уровнях прилипания. Разлагая m (24) по малому параметру $\bar{a}\eta^2/kT$, находим

$$m_0 = \frac{n_0 M}{n_0 + N_c \exp(-u_0/kT)},$$

$$m_1(x) \approx \frac{N_c \exp\left(-\frac{u_0}{kT}\right) \bar{a} m_0}{n_0 + N_c \exp(-u_0/kT)} \eta^2. \quad (25)$$

При этом времена релаксации τ_m концентрации электронов на уровнях прилипания определяются процессами термозаброса

$$\tau_m = (\gamma_n (n_0 + N_c \exp(-u_0/T)))^{-1}. \quad (26)$$

Времена τ_m являются достаточно медленными для описания эффектов памяти: при $\gamma_n = 10^{-13} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $n_0 = 10^8 \div 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $u_0/kT = 20-25$ (например, $u_0 = 0.12 \text{ эВ}$ при $T \approx 50 \text{ К}$ у прустита [22], $u_0 = 0.7 \text{ эВ}$ при $T \approx 300 \text{ К}$ в образцах $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_8$) имеем $\tau_m = 5 \div 300 \text{ мин}$. При этом среднее значение $m_1(x)$ в образце порядка $0.15m_0$.

Таким образом, с понижением температуры происходит фазовый переход в несоразмерную фазу и в дальнейшем наряду с изменением $k(T)$ возрастает амплитуда параметра порядка. При этом однородная часть концентрации электронов на уровнях прилипания подстраивается к равновесному значению m_0 (25). После остановки при определенной температуре T_0 постепенно нарастает неоднородная часть концентрации электронов на уровнях прилипания, что приводит к постепенному уменьшению амплитуды параметра порядка от значения $\rho^2 \approx -(\alpha + am_0)/\beta$ к равновесному значению

$$\rho_0^2 = -\frac{\alpha + am_0}{\beta + a\bar{a}m_0/kT}. \quad (27)$$

В соответствии с этим изменяются и другие физические свойства, зависящие от параметра порядка. Теперь система запомнит неоднородное распределение концентрации электронов в ловушках с определенным значением волнового вектора $k(T_0)$, если даже изменить температуру. Время релаксации такого метастабильного состояния 5—300 мин. Если через некоторое время, меньшее τ_m , вновь пройти через эту температуру, то в температурной зависимости амплитуды параметра порядка появится прогиб, соответствующий совпадению волнового вектора возникшей структуры и волнового вектора неоднородного распределения концентрации электронов в ловушках. Если остановиться при этой температуре, то система за короткое время τ_η подстроится к неоднородному распределению электронов в ловушках — таким образом система вспоминает свое состояние. Далее с временами τ_m происходит дальнейшая релаксация к ρ_0 (26), если это значение еще не достигнуто. Аналогичные явления наблюдались в работах [13—17].

Возникающая структура неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания может заставить несоразмерную фазу вести себя подобно соразмерной фазе, так как поведение концентрации электронов будет коррелировать с поведением основной решетки.

Таким образом, в работе проанализировано влияние освещения на характеристики несоизмерной фазы путем изменения неравновесной концентрации электронов на уровнях прилипания. Рассмотрена экспериментальная ситуация в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$, особенностью которой является близость к трикритической точке и точке Лифшица. Это позволяет наблюдать при освещении резкое изменение температурной области существования несоизмерной фазы и генерацию несоизмерной фазы в системах, в которых она обычно не наблюдается.

В заключение заметим, что концентрацию электронов на уровнях прилипания можно менять не только световым воздействием. В некоторых случаях при быстром охлаждении полупроводников возникают метастабильные состояния с эффективно опустошенными ловушками. Т. е. можно говорить, что неравновесная концентрация электронов на уровнях прилипания будет отрицательной. Поэтому реальна ситуация, когда будет возможным наблюдение точки Лифшица в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ при $x > 0.3$ за счет опустошения ловушек.

Из проведенного анализа следует, что эффекты памяти в несоизмерной фазе в полупроводнике связаны с возникновением неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания, поэтому освещение и другие воздействия, приводящие к изменению заселенности уровней прилипания, будут существенно влиять на эффекты памяти.

Автор благодарен Ю. М. Высочанскому за предоставление полезной информации и Г. Б. Тейтельбауму за обсуждение работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Леванюк А. П., Санников Д. Г. // ФТТ. 1976. Т. 18. № 2. С. 423—428.
- [2] Аслаян Т. А., Леванюк А. П. // ФТТ. 1978. Т. 20. № 3. С. 804—808.
- [3] Голован В. А. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 2. С. 182—197.
- [4] Фурцев В. Г., Сало Л. А., Высочанский Ю. М., Сливка В. Ю. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 7. С. 1946—1948.
- [5] Высочанский Ю. М., Фурцев В. Г., Хома М. М., Гурзан М. И., Сливка В. Ю. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. № 3. С. 939—945.
- [6] Зарецкий В. В., Зарецкая-Элиашберг В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 10. С. 428—430.
- [7] Yang D. Y., Li J. Q., Li F. H., Zhou Y. Q., Huang L. Q., Rau Z. Y., Zhou Z. X. // Supercond. Scin. Technol. 1988. V. 1. N 1. P. 100—101.
- [8] Kawaguchi K., Sasaki S., Mukaida H., Nakao M. // Japanes Journal of Applied Physics. 1988. V. 27. N 6. P. L1015—L1017.
- [9] Высочанский Ю. М., Майор М. М., Ризак В. М., Сливка В. Ю., Хома М. М. // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. № 4. С. 1355—1365.
- [10] Высочанский Ю. М., Майор М. М., Ризак В. М., Перечинский С. И., Сливка В. Ю., Хома М. М. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1990. Т. 54. № 4. С. 677—681.
- [11] Ризак В. М., Высочанский Ю. М., Грабар А. А., Сливка В. Ю. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 7. С. 154—159.
- [12] Высочанский Ю. М., Сливка В. Ю., Перечинский С. И., Коперлес Б. М., Гурзан М. И., Чепур Д. В. // УФЖ. 1980. Т. 25. № 2. С. 281—285.
- [13] Unruh H.-G. // J. Phys. C: Sol. Stat. Phys. 1983. V. 16. N 10. P. 3245—3255.
- [14] Unruh H.-G. // Ferroelectrics. 1984. V. 53. N 1—4. P. 319—322.
- [15] Folcia C. L., Tello M. J., Perez-Mato J. M. // Solid State Commun. 1986. V. 60. N 7. P. 581—585.
- [16] Folcia C. L., Tello M. J., Perez-Mato J. M. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 13. P. 7181—7183.
- [17] Влох О. Г., Каминский Б. В., Китык А. В., Половинко И. И., Свелеба С. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 7. С. 2215—2217.
- [18] Влох О. Г., Каминский Б. В., Половинко И. И., Свелеба С. А. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 11. С. 3436—3438.
- [19] Jamet S. P., Lederer P. // J. Physique Lett. 1983. V. 44. P. L257—L259.
- [20] Вихнин В. С. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. Т. 50. № 2. С. 340—344.
- [21] Фридкин В. М. Сегнетоэлектрики—полупроводники. М.: Наука, 1976.
- [22] Мамин Р. Ф., Тейтельбаум Г. Б. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 2. С. 228—230.

Казанский

физико-технический институт АН СССР

Поступило в Редакцию
13 февраля 1991 г.