

Идеи и методы физики конденсированного состояния

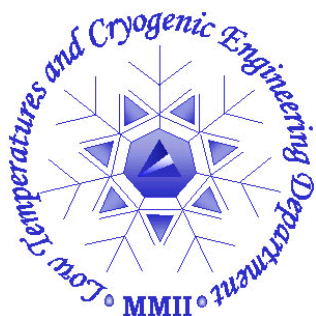
XIV Школа-конференция молодых ученых
"Проблемы физики твердого тела и высоких давлений"

Сочи, 11-20 сентября 2015г.



Неравновесные фазовые превращения в некристаллических твердых телах

Т.В. Ищенко, С.В. Демишев



*Отдел низких температур и криогенной
техники*

*Институт Общей
Физики РАН им. А.М. Прохорова*

119991 Москва,

ул. Вавилова, д. 38

<http://www.gpi.ru>





Эксперимент:

Взрывная кристаллизация, **ВК**:
локальное энергетическое воздействие

Твердофазная аморфизация, **ТФА**:
релаксация (распад) метастабильной фазы

Проблемы описания:

ВК:

- *Высокая скорость процесса фазового превращения* (не соответствует экстраполяции скорости равновесной кристаллизации к температуре на фронте);
- *Существенно неоднородный профиль температуры* (не соответствует скорости фазового превращения и равновесной теплопроводности).

ТФА:

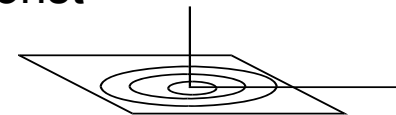
Как описать потерю дальнего порядка

(переход метастабильная кристаллическая фаза → аморфная фаза с другим типом ближнего порядка).



1). **Равновесный процесс** $V_{eq} = V_0 \exp(E_a/T)$ $T \sim T_{cr}$, $T \approx \text{const}$

2). **Неравновесный (взрывной) процесс** $V_{ex} \gg V_{eq}(T_f)$, $T_f \gg T_0$



Характерные особенности:

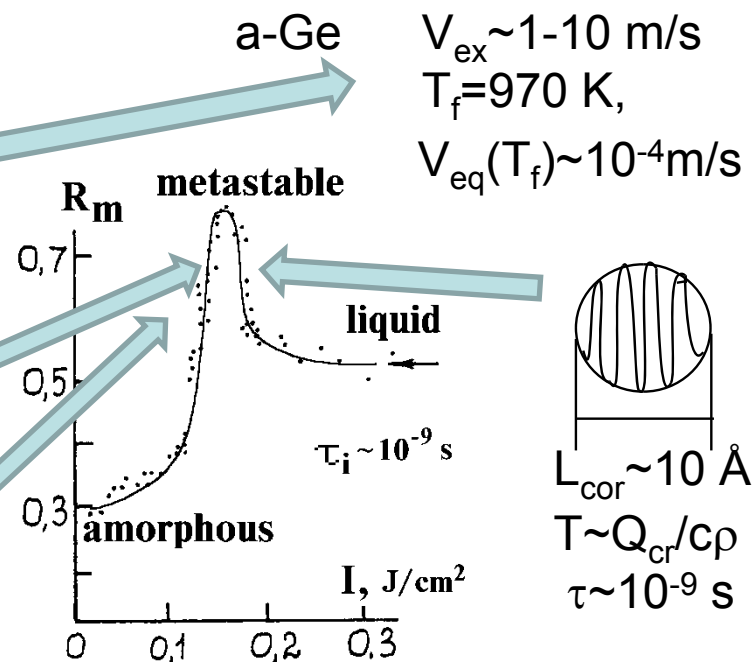
- Пороговый характер;
- «Запирание» энергии на фронте и ускоренная «сборка» новой фазы - аномальная диффузия:

$$D_N^{ex} \gg D_N^{eq} \quad D_T^{ex} \ll D_T^{eq}$$

- Метастабильная «промежуточная» фаза

Физические основы модели:

- Возбужденные состояния на фронте кристаллизации
- Локализованные колебания $\Rightarrow D_T^{ex}$
- Возбуждение электронной подсистемы $\Rightarrow D_N^{ex}$

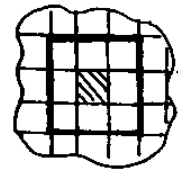
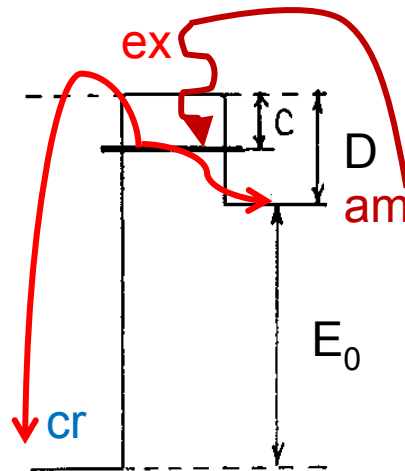


Алферов Ж.И. и др. Письма в ЖТФ **9**, 1373(1983)

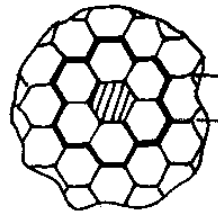
ПК:	$a \sim L_{MRO} = L_{cor} \sim L_{NE} \ll L_E$
БК:	$a < L_{MRO} = L_{cor} \ll L_{NE} \ll L_E$



a-Ge $E_0 \sim 620K$, $D \sim 600K$



L_{MRO} (Окрестность Мура)



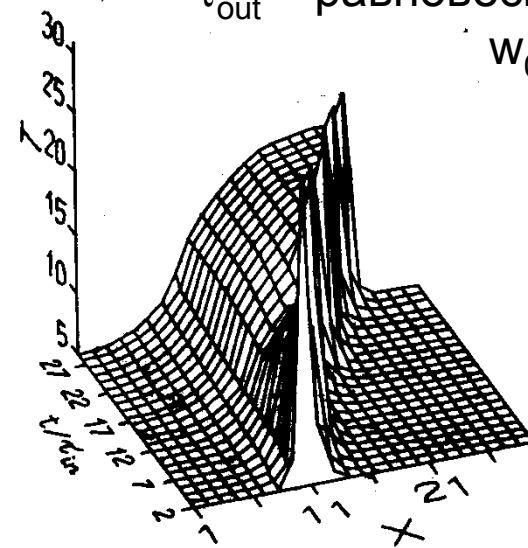
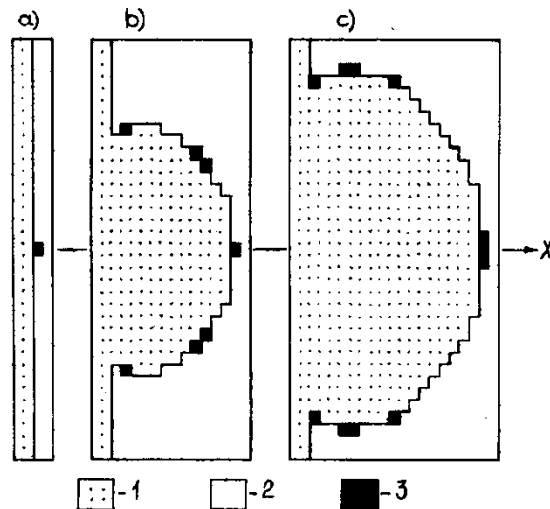
L_{MRO}

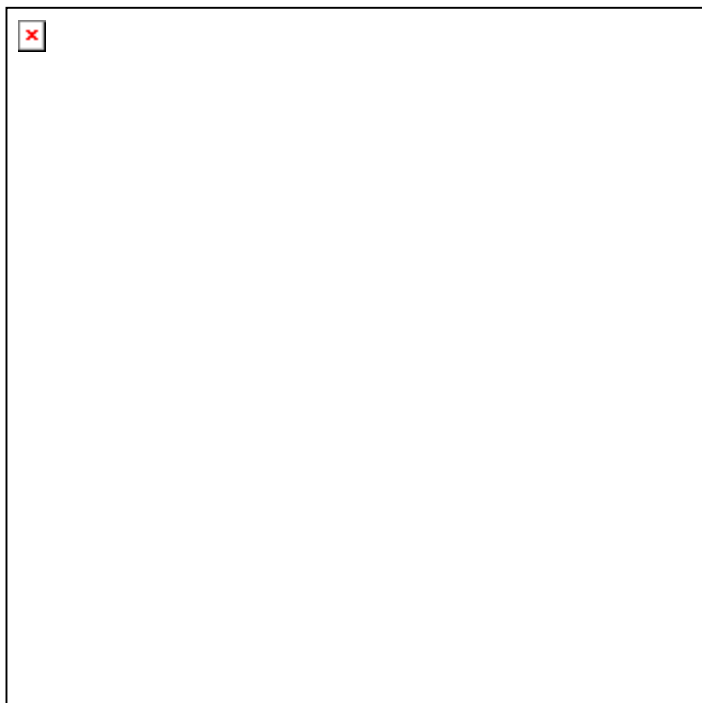
$E_0 \sim Q_{cr}/c_p$ - теплота кристаллизации;
 $D \sim T_{cr}$ - область стабильности аморфной фазы;
 C - время жизни возбужденных состояний.

$$\frac{dT_\alpha}{dt} = -\frac{1}{\tau_{in}} \sum_{\beta \in \Omega_\alpha} (T_\alpha - T_\beta) - \frac{1}{\tau_{out}} (T_\alpha - T_0)$$

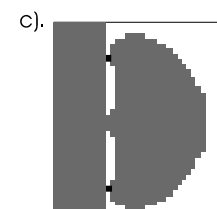
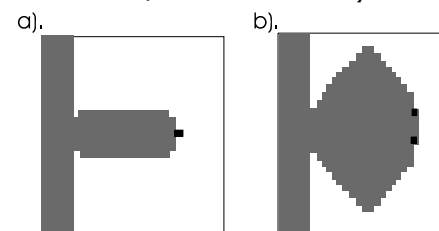
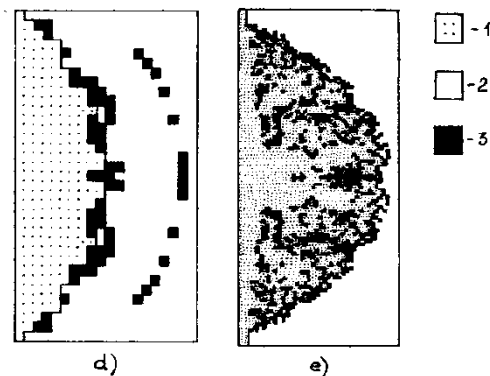
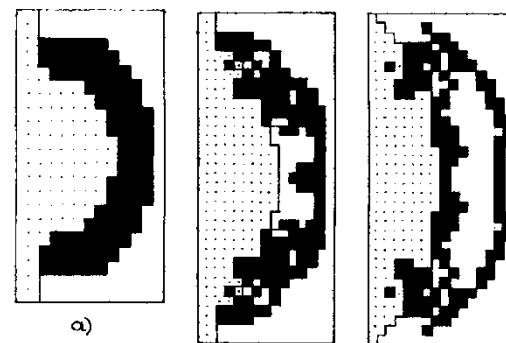
τ_{in} - неравновесный канал;
 τ_{out} - равновесный канал;

$$w_0 = \tau_{in}/\tau_{out}$$



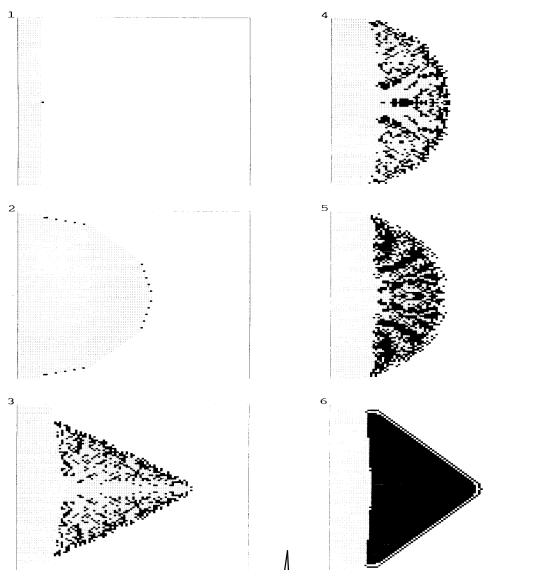


материал	a-Ge	a-Sb
v_{ex} , м/с эксперимен	1	32
v_{ex}^T , м/с теория	0.8	28

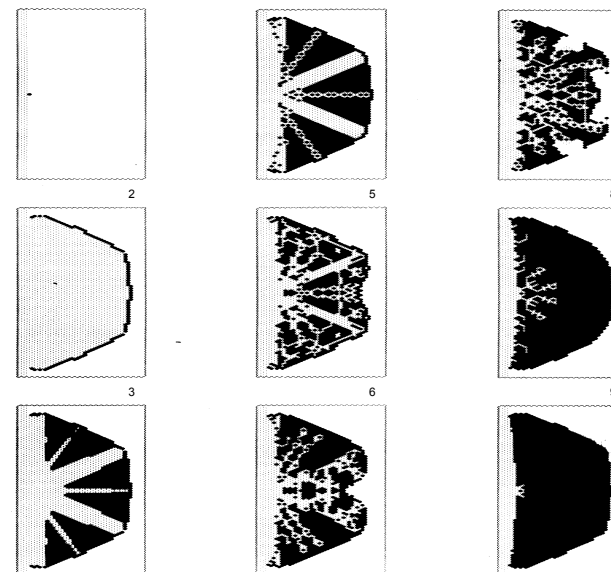




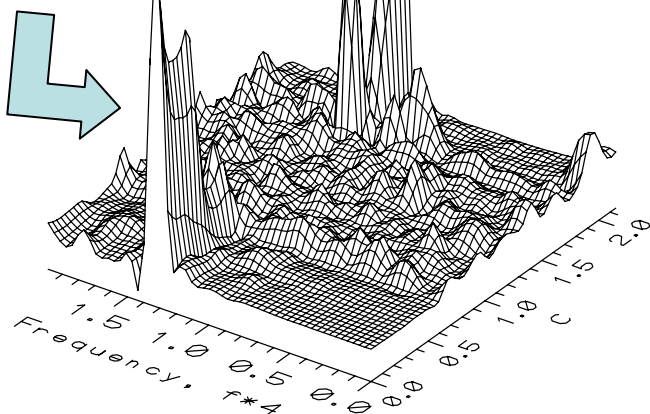
Квадратная решетка



Гексагональная решетка

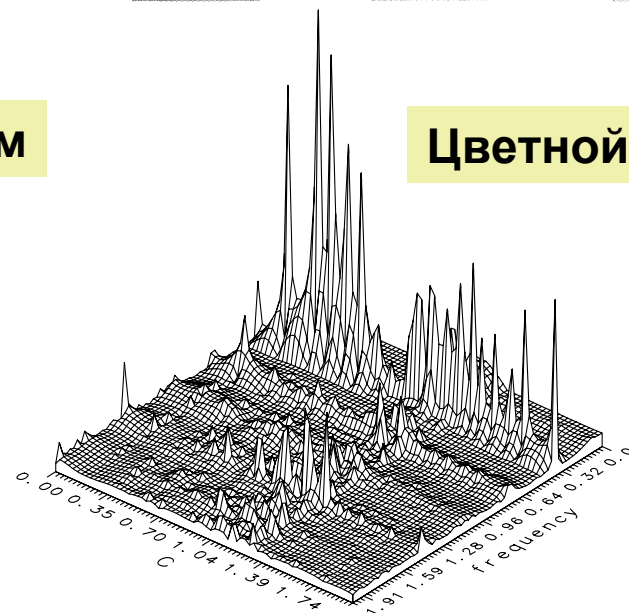


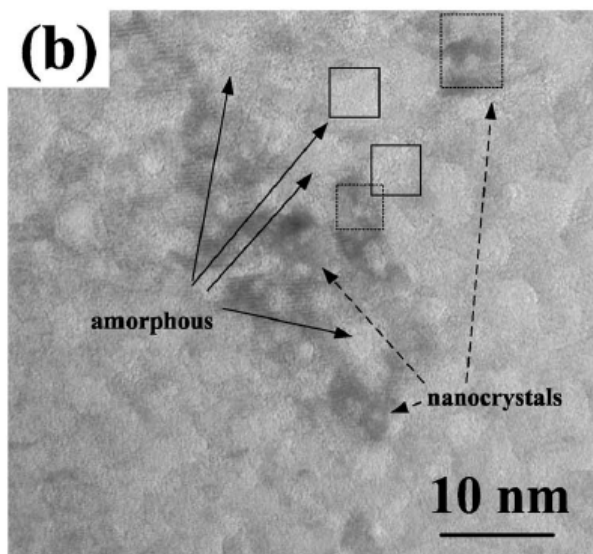
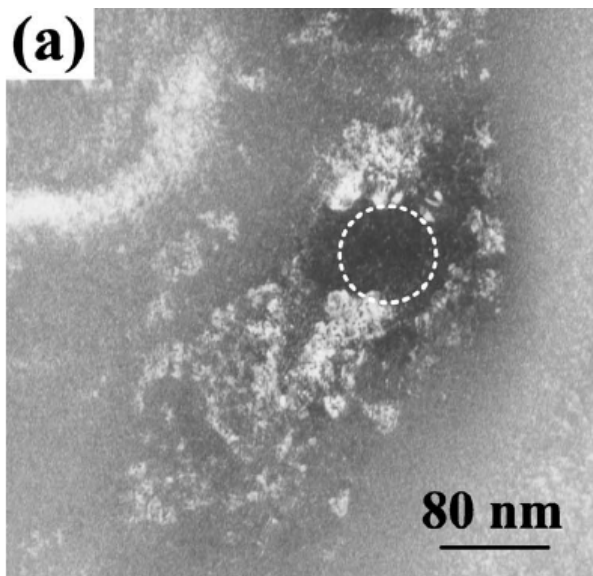
Основная частота
процесса



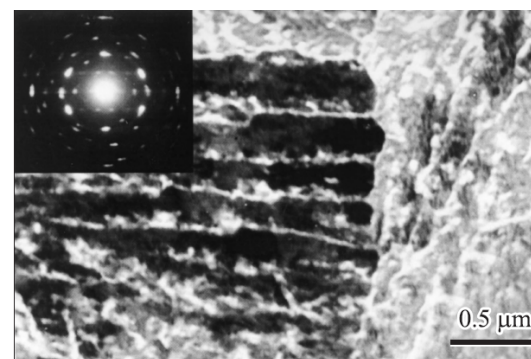
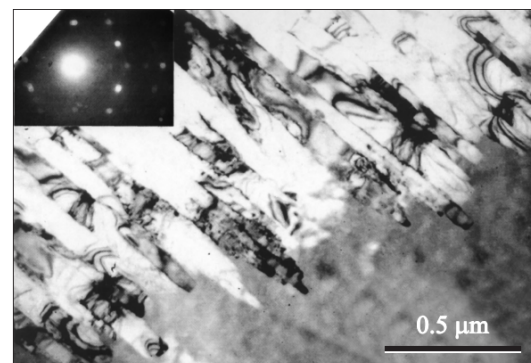
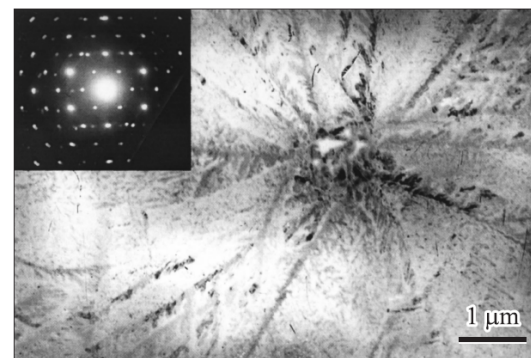
Хаотический режим

Цветной шум





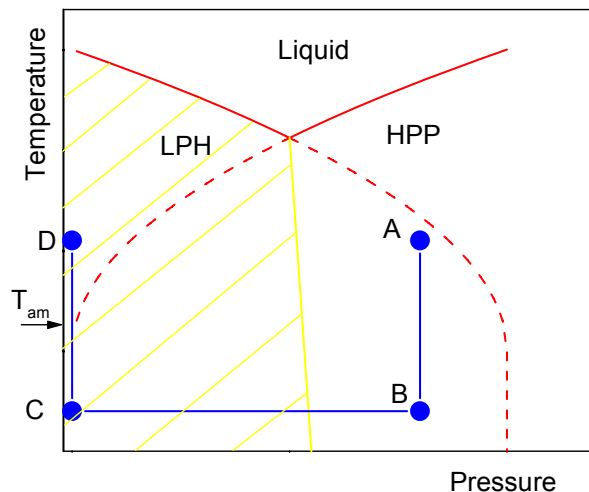
К.В.Ким *et al*,
Phys. Rev. **B** 72, 092102 (2005)



Жарков С.М., Кверглис Л.И.
ФТТ **46**, 938 (2004)

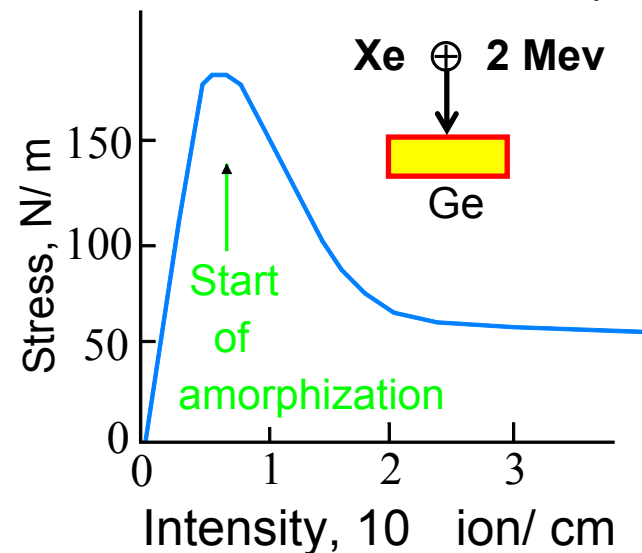


ТФА под давлением

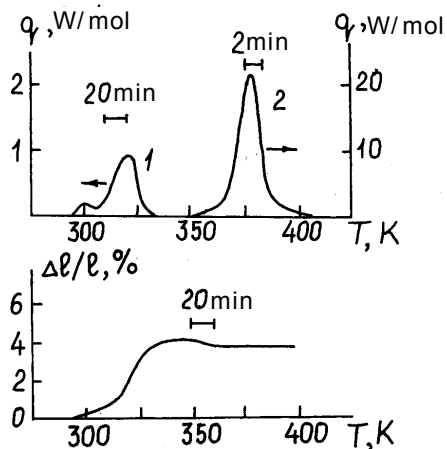


Бражкин В.В. и др. УФН **150**, 466 (1986)

Ионная имплантация



Volkert C.A. J.Appl.Phys. **70**, 3521 (1991)



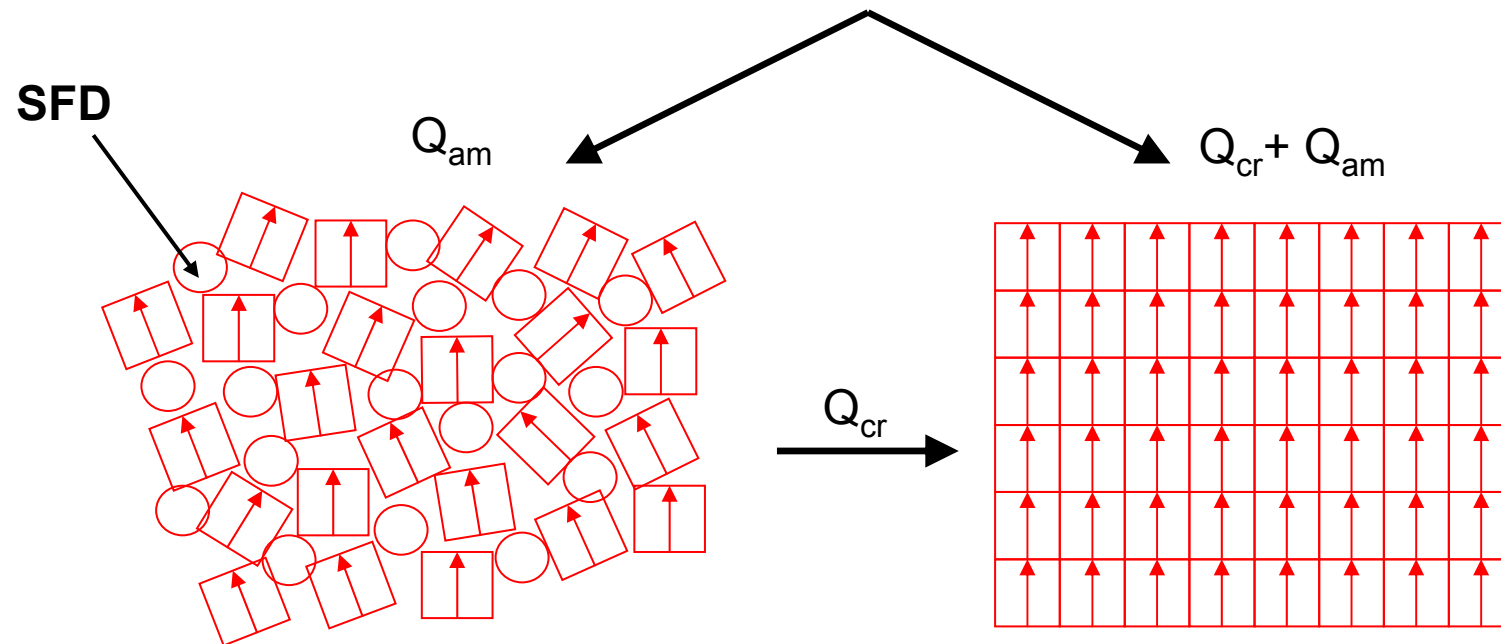
Antonov V.E. et al.
J.Non-Cryst.Solids **192&193**, 443 (1995)

Основные особенности:

- Сильная метастабильность исходного состояния
- Одинаковый ближний порядок в фазе низкого давления и в аморфной фазе.
- Аморфизация сопровождается релаксацией напряжений



Метастабильная напряженная фаза $Q_{tr} = Q_{am} + Q_{cr}$



Аморфная фаза $L_{MRO} \neq \infty$
 $y_{str} \neq 0$, Q_{cr} запасено в SFD
 $y_{str}^{-1/3}(t \rightarrow \infty) \sim L_{MRO}$

Кристаллическая фаза $L_{MRO} = \infty$
 $y_{str} = 0$

Концентрация структурообразующих дефектов (SFD)



- Переход происходит через возбужденную метастабильную фазу с избыточной энергией $Q_{tr} = Q_{cr} + Q_{am}$
- Аморфизация сопровождается релаксацией напряжений и выделением тепла $Q \leq Q_{am}$
- Аморфизация эквивалентна генерации **структурообразующих дефектов (SFD)** со стационарной концентрацией $y_{str}(t \rightarrow \infty)^{-1/3} \approx L_{MRO} \approx 20 \text{ \AA}$ и L_{MRO} — длиной среднего порядка
- SFD взаимодействуют через поле напряжений, что уменьшает энергию активации рождения SFD
- На создание SFD расходуется теплота Q_{cr}
- Концентрация SFD задает корреляционную длину аморфной фазы

(a)

(b)



$$\frac{\partial y_{str}}{\partial t} = \omega_0 e^{-\frac{U}{k_B T}} - y_{str} \nu_1 e^{-\frac{E_{cr}}{k_B T}} + D_{str} \frac{\partial^2 y_{str}}{\partial r^2},$$

Генерация

Рекомбинация

Градиент

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{Heat} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{1}{c\rho} \frac{\partial E}{\partial t},$$

Градиент

Обмен энергией

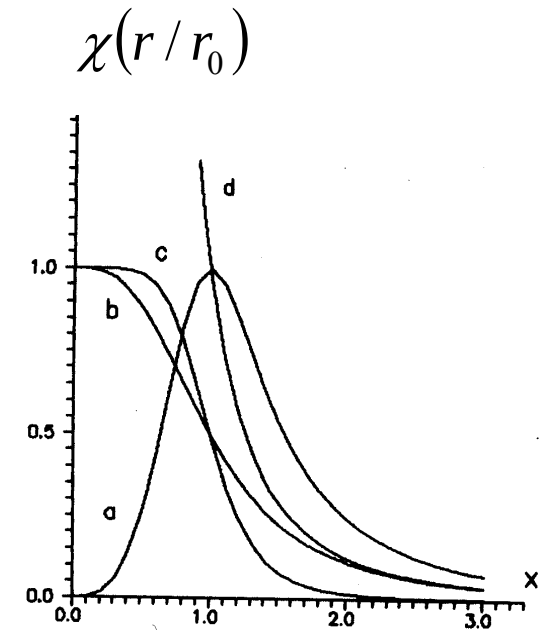
Среднее расстояние между SFD: $\bar{r} = y_{str}^{-1/3}$

Внутренняя энергия: $E = \langle U \cdot y_{str} \rangle \approx U(y_{str}) \cdot y_{str}$

Энергия активации SFD:

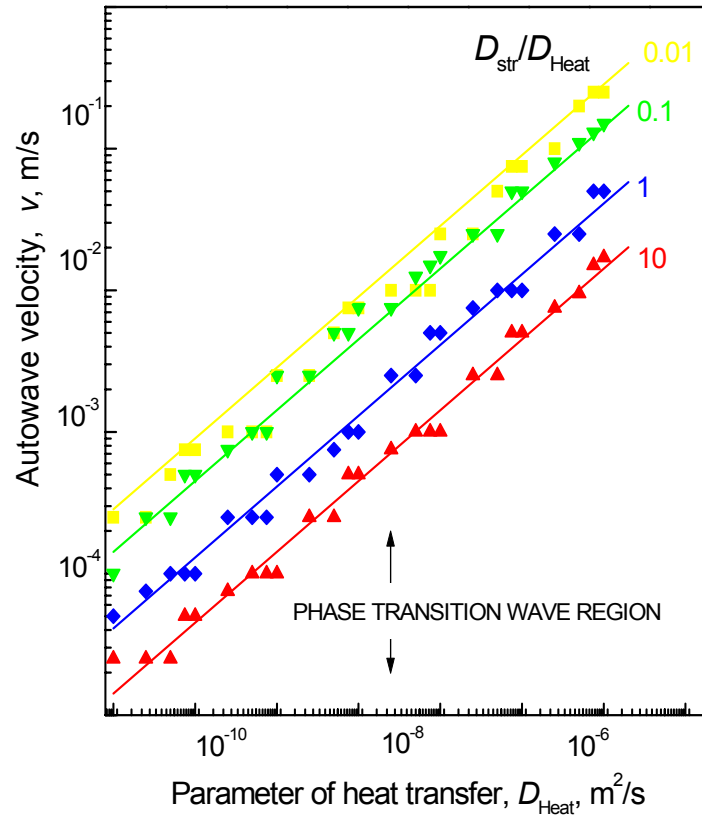
$$U = \langle U(r) \rangle = U_0 - \left\langle \sum_i \phi(r - r_i) \right\rangle \approx U_0 - n_0 \phi(\bar{r}),$$

Энергия взаимодействия: $\phi(r) = \phi_0 \chi(r / r_0)$

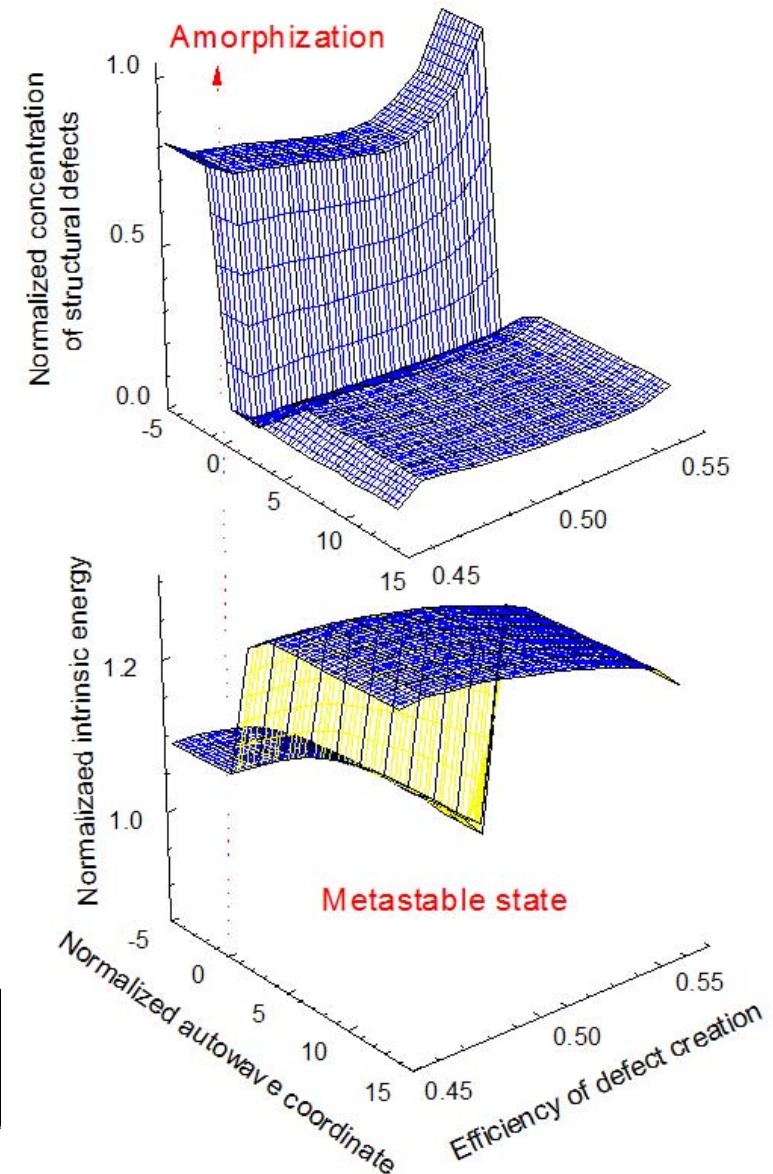


$y_{str}^{max} \rightarrow$ Аморфное состояние;

a-CdSb: $L_{MRO} \sim (y_{str}^{max})^{-1/3} \approx 15 \text{ \AA}$



Скорость автоволны ТФА определяется
диффузионными параметрами





Синхронизация скоростей диссипации энергии и фазового превращения порождает универсальную иерархию пространственных масштабов, характеризующих морфологию образца, полученного с помощью неравновесного фазового превращения

$$L' = v_{ex} \tau \sim 1 \text{ nm}$$

Средний порядок, L_{MRO}

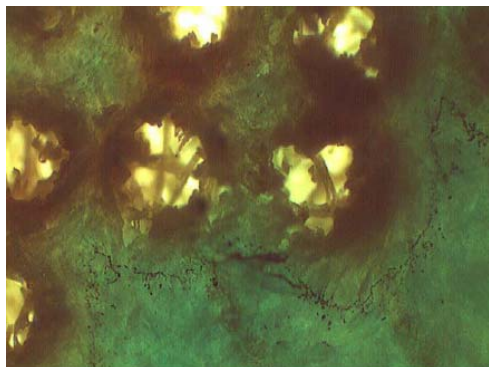
$$L'' = (D_T \tau)^{0.5} \sim 10 \div 100 \text{ nm}$$

Термализация неравновесных фононов на фронте фазового превращения (маленькие блоки), L_{NE}

$$L''' = D_T / v_{ex} \sim 1 \div 10 \text{ } \mu\text{m}$$

Потеря когерентности процесса (большие блоки), L_E

Термодинамика процесса ТФА позволяет найти корреляционную длину аморфной фазы



*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!*

- Как амортизацию не считай,
денег больше не станет! А жаль...

