

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ СЕРЕБРА

А. А. Бугримов

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. А. Концевой

*Изучено влияние физических параметров высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава чистого вещества в случае волнового возмущения линии роста на кинетические параметры фронта. Расчеты выполнены для серебра.*

**Ключевые слова:** высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

Проблема высокоскоростного дендритного роста кристалла из переохлажденного расплава имеет большое значение для разработки технологий получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Дендритный режим роста кристалла наблюдается при достаточно глубоких переохлаждениях расплава  $\Delta T$ . При изучении эволюции дендрита принципиально важен вопрос о морфологической устойчивости фазовой границы кристаллизации. Цель данной работы – изучить пример волнового возмущения линии роста дендрита.

В [1, 2] получено уравнение

$$\partial^2 f / \partial y^2 = B_1(\partial f / \partial y) + B_2(\partial f / \partial t), \quad (1)$$

$$B_1 = 2\varphi A_1 A_2 < 0, \quad B_2 = (1 + A_2^2)\varphi > 0, \quad \alpha = L/(UT_c), \quad \varphi = \alpha / \mu,$$

определяющее возмущенное состояние дендрита, где  $A_2 = 1/\text{tg}\theta_1$  – положительная константа, характеризующая угол  $\theta_1$  заострения линии роста;  $L$  – теплота фазового перехода единицы объема вещества;  $T_c$  – равновесная температура кристаллизации;  $U$  – поверхностная энергия границы раздела фаз;  $\mu$  – кинетический коэффициент роста;  $N = A_1 \sin \theta_1$  – скорость перемещения фазовой границы.

Решение уравнения (1) представим в виде

$$f/H = \exp[h_1 t + y(h_2 - k)] \cos\left(ky - \frac{2k^2}{B_2} t\right), \quad y \geq 0, \quad t \geq 0, \quad (2)$$

$$h_1 = -B_1^2/(4B_2) < 0, \quad h_2 = B_1/2 < 0,$$

где  $H$ ,  $k$  – произвольные постоянные. Физическое истолкование решения (2) состоит в следующем: волна  $y = (2kt/B_2) \geq 0$ ,  $k > 0$  распространяется по неоднородному фону  $f_0(y) = H \exp(-n_2 y)$ ,  $y \geq 0$ ,  $n_2 = k - h_2 - (h_1 B_2/2k)$  со скоростью  $V = 2k/B_2 > 0$ . Волна возмущения существует, если параметр неоднородности фона удовлетворяет неравенству  $n_2 > (-\varphi A_1 A_2)(1 + \sqrt{2})$ . Если  $0 < \frac{n_2}{(-\varphi A_1 A_2)} < (1 + \sqrt{2})$ , то волна не возникает.

Запишем параметр неоднородности в виде  $n_2 = B_2 V / 2 - h_2 - h_1 / V$ . Отсюда ясно, что связь  $n_2 \leftrightarrow V$  нелинейная:  $dn_2/dV = 0$  при  $V^2 = V_*^2$ ,  $V_*^2 = 2A_1^2 A_2^2 / (1 + A_2^2)^2$ . Пороговое значение  $V = V_*$  соответствует минимуму функции  $n_2 = n_2(V)$  при каждом фиксированном  $A_2 > 0$ . Таким образом, пороговая ширина зоны неоднородности равна  $y_* = 1/n_2^*$ ,  $n_2^* = n_2(V = V_*)$ .

На рис. 1–3 демонстрируется влияние основных физических параметров задачи на скорость волны возмущения. Расчеты проведены для серебра при следующих значениях теплофизических параметров:  $T_c = 1233,8$  К;  $L = 1,1 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>;  $c = 2,62 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $\lambda = 379$  Вт/(м · К);  $U = 0,12$  Дж/м<sup>2</sup>;  $\mu = 1,24$  м/(К · с);  $T_* = 1157,8$  К;  $N_b = 14,7$  м/с.

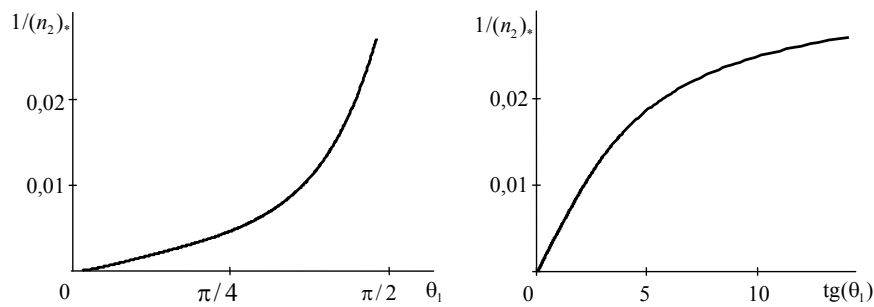


Рис. 1. Пороговое значение ширины зоны неоднородности как функция угла заострения линии роста

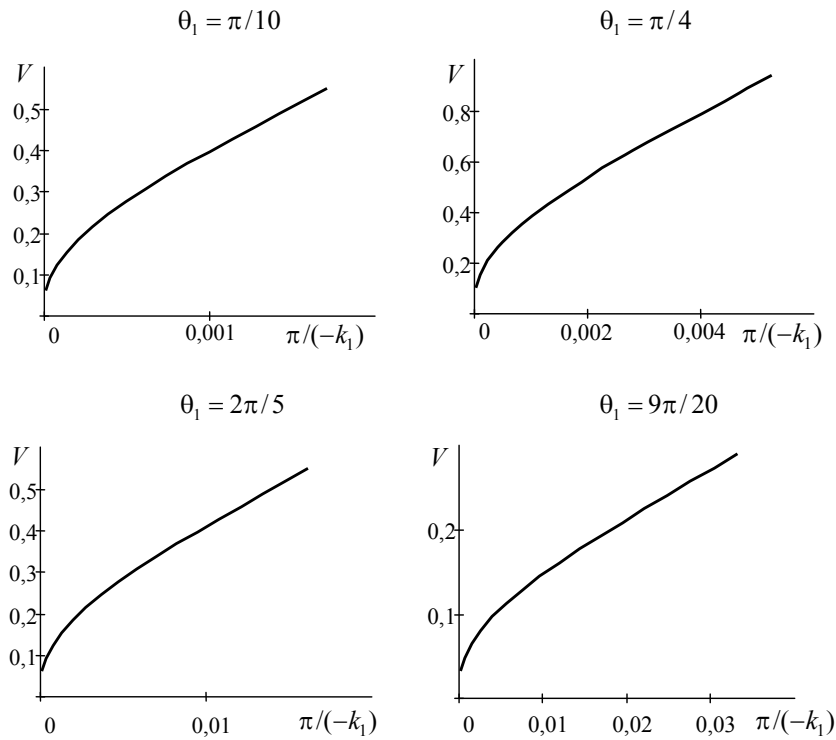


Рис. 2. Нелинейная связь скорости волны ( $V > 0$ ) и ширины зоны неоднородности пространственно-периодически возмущенного фона

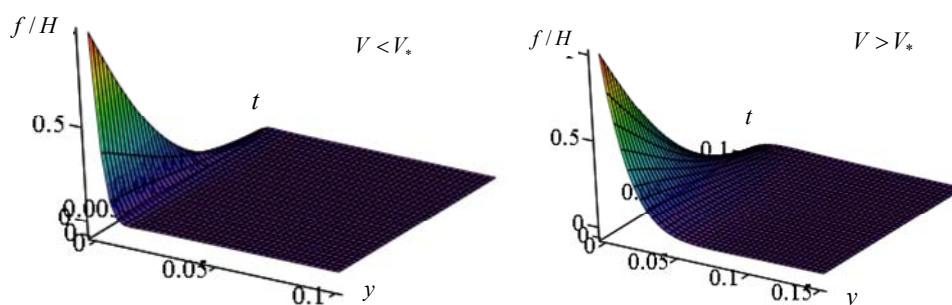


Рис. 3. Затухающий периодический режим (2): пространственно-временной портрет линии роста

Работа выполнена в рамках работы по заданию ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограмма – «Энергетические процессы и технологии». Руководитель задания – профессор О. Н. Шабловский.

#### Литература

1. Шабловский, О. Н. Морфологические свойства линии роста двухмерного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2012. – № 4. – С. 40–46.
2. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.

### РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НОВЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ БОЗОНОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ В ПАРУ КВАРКОВ

Д. В. Синегрибов<sup>1</sup>, В. Р. Куриленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь

Научные руководители: И. А. Серенкова<sup>1</sup>, В. В. Андреев<sup>2</sup>

Разработан метод обнаружения интерференционных эффектов новых нейтральных промежуточных бозонов в процессе  $e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b}$  с помощью асимметрии вперед-назад  $A_{FB}$  на будущих электрон-позитронных коллайдерах CLIC и ILC; получены модельно-независимые ограничения констант связи  $Z'$ -бозонов для заданного процесса; сравнены полученные результаты с аналогичными расчетами для процесса  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

**Ключевые слова:** асимметрия вперед-назад,  $Z'$ -бозон, Стандартная модель, модельно-независимые ограничения.

Международный линейный коллайдер ILC предназначен для исследования свойств таких фундаментальных частиц, как кварки и электроны, а также состояний взаимодействия частиц, которые нельзя наблюдать в других экспериментах. Первоначально планировалось завершить его строительство в 2019 г., но из-за значительных задержек (финансовых, технических, а также международных соглашений) окончание строительства планируется в 2026 г.