

Литература

1. Osland, P. Model-independent limits on four-fermion contact interactions at LC with polarization / P. Osland, A. A. Pankov // Phys. Lett. B. – 1998. – Vol. 432. – P. 159–166.
2. Model-independent analysis of the effects of new heavy gauge bosons at high energy electron–positron colliders / D. V. Sinigribov [et al.] // XXVIII International seminar in memory of Prof V. I. Kuvshinov “Nonlinear Phenomena in Complex Systems”. – 2021. – Vol. 27. – P. 440–447.

ВОЗМУЩЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

Н. С. Селиверстов

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

Научный руководитель Д. Г. Кроль

Объект исследования – линия роста свободного дендрита в переохлажденном расплаве чистого серебра. Выполнен анализ возмущенных состояний линии роста. Получены аналитические зависимости влияния ширины зоны неоднородности и угла заострения линии роста на параметр затухания. Проанализировано влияние ширины зоны неоднородности на скорость волны. Представлена графическая информация о свойствах дендритного роста для переохлажденного расплава чистого серебра.

Ключевые слова: дендритный рост, высокоскоростная кристаллизация, линия роста дендрита, переохлажденный расплав.

Важной проблемой современного материаловедения является получение новых высокоэффективных материалов. Одно из перспективных направлений – использование сверхвысоких скоростей кристаллизации глубоко переохлажденного расплава. В ходе экспериментальных исследований были достигнуты скорости роста 50 м/с при переохлаждениях до 300 К [1]. Цель данной работы – изучить свойства возмущенного состояния линии роста дендрита при высокоскоростной кристаллизации серебра.

Дифференциальное уравнение, описывающее малое возмущение $f = f(y, t)$ исходной фазовой границы кристаллизации (ФГК), имеет вид [2, 3]:

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

$$A_1 = N / \sin \theta_1, \quad A_2 = 1 / \operatorname{tg} \theta_1, \quad B_1 = 2\varphi A_1 A_2 < 0, \quad B_2 = (1 + A_2^2)\varphi > 0,$$

$$\alpha = L / (UT_c), \quad \varphi = \alpha / \mu, \quad A_1, A_2, B \equiv \text{const},$$

где L – теплота фазового перехода единицы объема вещества; μ – кинетический коэффициент роста; T_e – температура равновесия между твердой и жидкой фазами; T_c – равновесная температура кристаллизации; U – поверхностная энергия границы раздела фаз; B – переохлаждение на вершине дендрита; ΔT – переохлаждение расплава; c – объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; координата x направлена вдоль оси симметрии дендрита в сторону твердой фазы; y – поперечная декартова координата; θ_1 – угол заострения линии роста; N – скорость перемещения ФГК; $N_m = -N > 0$.

Теплофизические свойства серебра: $T_c = 1233,8 \text{ К}$; $L = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$; $c = 2,62 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$; $\lambda = 379 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $U = 0,12 \text{ Дж/м}^2$; $\mu = 1,24 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$.

Применяем следующее решение уравнения (1)^

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

где H, k – произвольные постоянные; посредством выбора H это решение можно сделать сколь угодно малым. Физическая модель решения состоит в следующем. Волна

$$h_2 y = t \left(\frac{k^2}{B_2} - h_1 \right) + \text{const} \quad (3)$$

распространяется по пространственно периодическому фону $f_0(y) = H \cos ky$ со скоростью

$$V = \frac{2}{B_1 B_2} \left(k^2 + \frac{B_1^2}{4} \right) < 0.$$

В начальном ($t = 0$) состоянии фронт волны (3) имеет координату $y > 0$, а затем движется с периферии дендрита к его вершине. Полупериод колебаний π/k представляет собой ширину зоны неоднородности исходного возмущения линии роста. За фронтом волны ($y \geq Vt$) состояние линии роста устойчивое.

Эволюция возмущения (2) во времени определяется экспонентой $f \sim \exp(-n_1 t)$, $n_1 = (B_1^2 + 4k^2)/(4B_2)$, $n_1 = (k^2 + \varphi^2 A_1^2 A_2^2)/[\varphi(1 + A_2^2)]$ есть параметр затухания.

Отсюда получаем

$$\frac{dn_1}{d(A_2^2)} = \frac{(\varphi^2 A_1^2 - k^2)}{\varphi(1 + A_2^2)^2}.$$

Значит, при фиксированных φA_1 и k зависимость $n_1 = n_1(A_2^2)$ монотонно возрастает по мере заострения ФГК, если $\varphi^2 A_1^2 > k^2$. Очевидно, что рост A_2^2 означает уменьшение θ_1 . При $k^2 > \varphi^2 A_1^2$ имеем убывающую функцию $n_1 = n_1(A_2^2)$. Пороговое значение $k_{**}^2 = \varphi^2 A_1^2$ примечательно тем, что для него параметр затухания $n_1^{**} = \varphi A_1^2$ не зависит от угла заострения θ_1 .

Обсудим свойства скорости волны возмущения: $V^2 = 4n_1^2/B_1^2$. Функция $V^2 = V^2(k^2, A_2^2)$ ведет себя немонотонно по отношению к аргументу A_2^2 : $\partial(V^2)/\partial(A_2^2) = 0$ вдоль линии

$$k^2 = (\varphi^2 A_1^2 A_2^2 (1 - A_2^2))/(1 + 3A_2^2),$$

которая существует при $0 < A_2^2 < 1$, т. е. при $\text{tg}\theta_1 > 1$. Квадрат скорости волны равен $V^2 = (n_1^2 \sin^2 \theta_1 \text{tg}^2 \theta_1)/(\varphi^2 N^2)$. В данном классе решений возмущения быстро исчезают

на квазиплоской ФГК: $\theta_1 \rightarrow (\pi/2)$, $V^2 \rightarrow \infty$. Вместе с тем на игле ($\theta_1 \rightarrow 0$) имеем $V^2 \rightarrow 0$. Возмущение устойчивое и отчетливо проявляет себя на конечном удалении от границ интервала $\theta \in (0, \pi/2)$. Кроме того, при не слишком малом затуплении линии роста ($\theta_1 > 1$) наблюдается резкий рост V^2 при достаточно большой ширине зоны неоднородности (π/k). Ширина зоны неоднородности π/k оказывает значительное влияние на параметр затухания возмущения и на скорость волны. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 1.

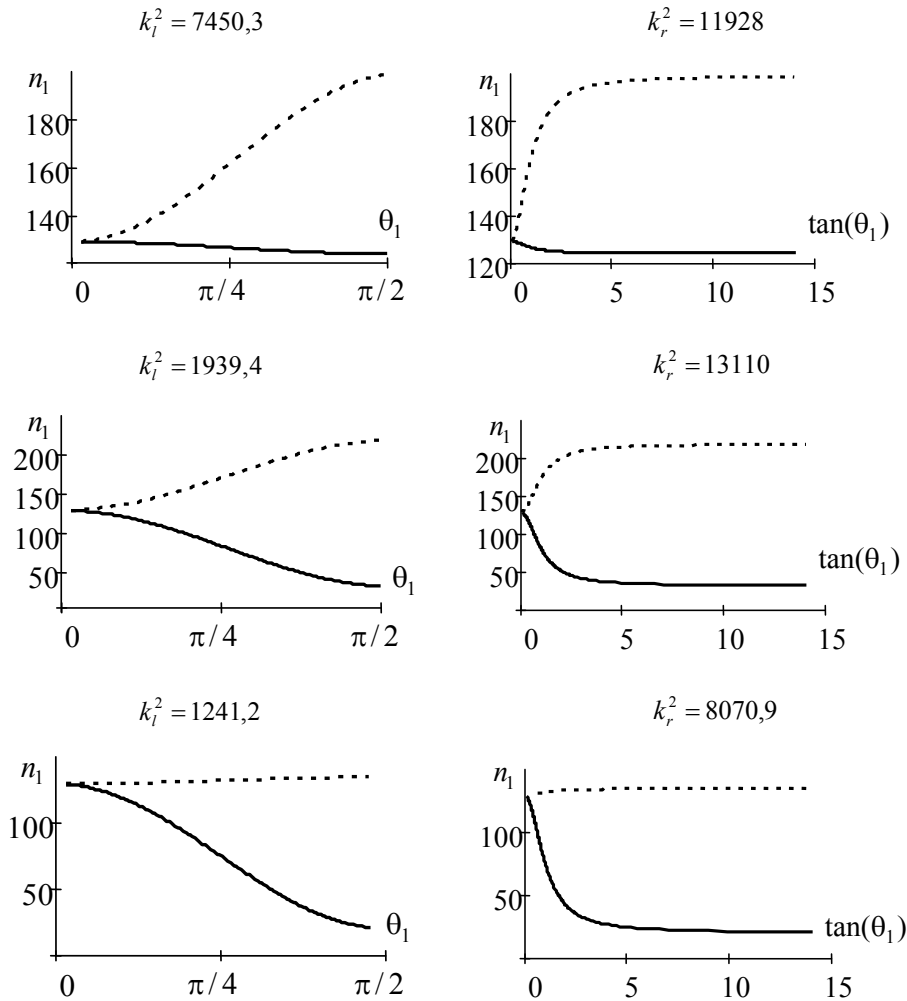


Рис. 1. Зависимость параметра затухания от угла заострения линии роста. Сплошная и пунктирная линии соответствуют частотам возмущения, расположенным слева k_l^2 и справа k_r^2 от порогового значения $k_{**}^2 = 7757,5$

Выполнен анализ возмущенных состояний линии роста. Получены аналитические зависимости влияния ширины зоны неоднородности и угла заострения линии роста на параметр затухания. Проанализировано влияние ширины зоны неоднородности на скорость волны. Представлена информация о свойствах дендритного роста для переохлажденного расплава серебра.

Данная работа выполнена в рамках НИР «Кинетика неравновесных фазовых границ и неклассические тепловые структуры при высокоскоростной кристаллизации чистых веществ». Научный руководитель НИР – профессор О. Н. Шабловский.

Литература

1. Herlach, D. M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford : Pergamon, 2007. – 448 p.
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. – № 2. – С. 189–202.
3. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2014. – № 2. – С. 12–17.