

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ В ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕДАХ ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ

В якості факторів, що впливають на похибку вимірювання переохолодження фронту методами оптичної пірометрії при кристалізації в системі напівпрозорих матеріалів, розглядаються оптичні товщини й перепади температур у кристалі й розплаві. Запропоновано розрахункову поправку для зниження похибки вимірювання переохолодження в напівпрозорих середовищах.

В качестве факторов, влияющих на погрешность измерения переохлаждения фронта методами оптической пирометрии при кристаллизации в системе полупрозрачных материалов, рассматриваются оптические толщины и перепады температур в кристалле и расплаве. Предложена расчетная поправка для снижения погрешности измерения переохлаждения в полупрозрачных средах.

Optical opacity and thermal gradients in crystal and melt are considered as the factors influencing a measuring error of front supercooling by methods of an optical pyrometry at crystallization in system of semitransparent materials. The correction for supercooling measuring error reduction in semitransparent mediums is proposed.

k – коэффициент поглощения;
 L – высота кристалла;
 n – показатель преломления;
 q – радиационный поток;
 R – коэффициент отражения;
 I – интенсивность излучения;
 T – температура;
 x – координата;
 δ – относительная погрешность;
 λ – длина волны;
 τ – время.

Нижние индексы:

0 – относится к начальному состоянию системы;
1 – относится к верхнему торцу системы кристалл-расплав;
2 – относится к нижнему торцу системы кристалл-расплав;
 b – относится к яркостной температуре;
 cr – относится к кристаллу;
 k – относится к фронту;
 m – относится к расплаву.

Введение

Точность определения кинетики роста монокристаллов во многом зависит от достоверности данных по переохлождению границы раздела фаз [1]. Вопросы погрешности измерения температуры фронта методами оптической пирометрии в условиях выращивания кристаллов высокой прозрачности из непрозрачных расплавов рассматривались в статье [2]. Целью данной работы является исследование условий измерений переохлождения межфазной границы в случае больших коэффициентов поглощения выращиваемых кристаллов, непрозрачности и частичной прозрачности расплава и влияния этих факторов на величину погрешности измерения.

Постановка задачи

Анализ погрешности измерения переохлождения фронта выполняется на базе одномерной математической модели радиационно-кондуктивного теплообмена [3] с использованием динамически перестраиваемой координатной сетки.

Расчет яркостной температуры фронта осуществляется исходя из определенного на каждом временном шаге распределения температуры в системе кристалл-расплав по методике, описанной в работе [2]. Для учета результирующей спектральной интенсивности потока излучения поступающей из расплава в кристалл записывается

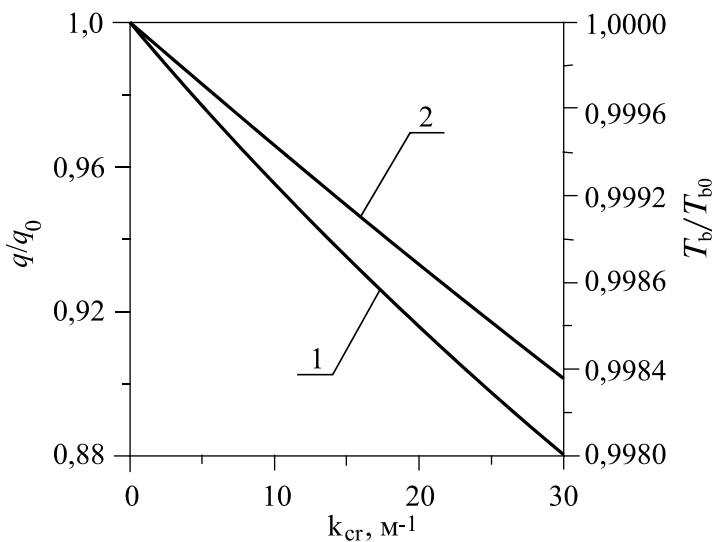


Рис. 1. Влияние поглощения кристалла на характеристики проходящего радиационного потока. Относительное изменение: 1 – q/q_0 ; 2 – T_b/T_{b0} .

выражение для интенсивности излучения на фронте:

$$I_k = (1 - R_k) \left(\frac{n_{cr}}{n_m} \right)^3 \left(I_1 \exp(-k_m L_m) + \int_0^{L_m} k_m I(\lambda, T(x)) \exp(-k_m (L_m - x)) dx \right),$$

Рассчитанная интенсивность излучения на фронте используется в методике [2], по которой и определяется яркостная температура фронта с учетом излучения слоев расплава.

Результаты расчетов

Анализ влияния прозрачности кристалла на величину яркостной температуры фронта проводился при варьировании величины коэффициента поглощения кристалла в пределах от 0 м^{-1} до 30 м^{-1} при практически непрозрачном расплаве (коэффициенте поглощения расплава $k_m = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$). В качестве исходных данных принимались: высота системы кристалл-расплав $L = 36 \text{ мм}$; показатель преломления кристалла $n_{cr} = 2,1$; показатель преломления расплава $n_m = 1,9$; температура верхней границы $T_1 = 1380 \text{ К}$ с коэффициентом отражения $R_1 = 0,814$; температура нижней границы

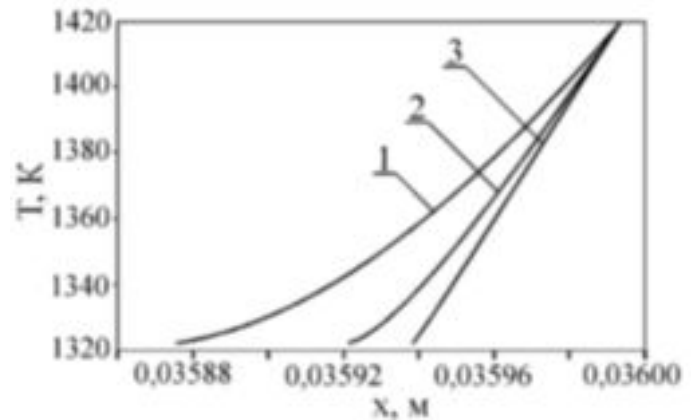


Рис. 2. Распределение температуры в расплаве: 1 – при коэффициенте поглощения расплава $k_m = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$; 2 – $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$; 3 – $5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$.

$T_2 = 1300 \text{ К}$ с коэффициентом отражения $R_2 = 0,814$; температура кристаллизации $T_k = 1323 \text{ К}$. На рис. 1 видно, что увеличение непрозрачности кристалла приводит к ослаблению величины радиационного потока и соответственно уменьшению значения яркостной температуры фронта кристаллизации, что приводит к увеличению погрешности измерения переохлаждения на фронте.

При снижении коэффициента поглощения расплава от $5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ до $1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ наблюдается искривление профиля температуры в тонком слое расплава (рис. 2), что указывает на проявление частичной прозрачности расплавленной фазы. Влияние интенсивности излучения внутренних слоев расплава и верхнего торца системы приводит к увеличению значения результирующего потока и яркостной температуры фронта, что также вносит дополнительную погрешность в пирометрическое определение температуры.

Для анализа точности определения яркостной температуры фронта в процессе роста прозрачных кристаллов из полупрозрачных расплавов был проведен ряд численных экспериментов при разных коэффициентах поглощения расплава. Расчеты проводились без и с учетом переохлаждения фронта. Временная зависимость переохлаждения фронта принималась в виде $\Delta T_k(\tau) = 0,005\tau$. Темп охлаждения верхнего торца задавался равным $b_1 = 0,05 \text{ К/с}$. На рис. 3. показано, что значение яркостной температуры фронта в процессе кристаллизации изменяется.

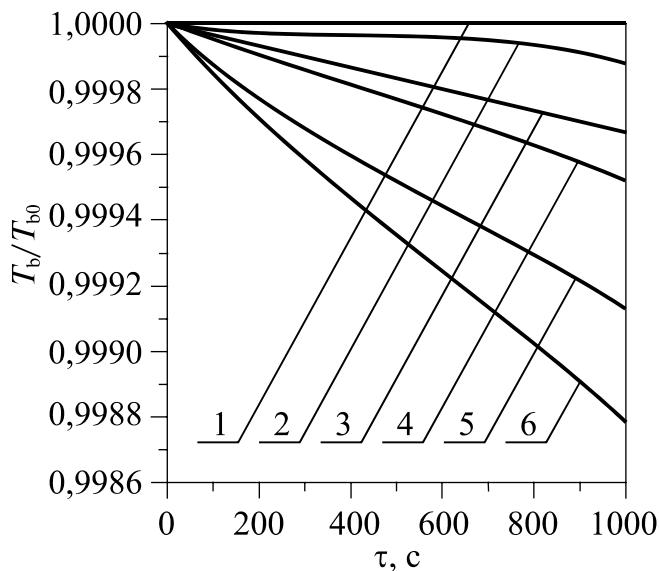


Рис. 3. Изменение во времени яркостной температуры равновесного (1, 2, 5) и переохлажденного (3, 4, 6) фронта кристаллизации:

1, 3 – при коэффициенте поглощения расплава $k_m = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$; 2, 4 – $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$; 5, 6 – $1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$.

Отклонения величины яркостной температуры от начальной возрастают с увеличением прозрачности расплава. Такое отклонение обуславливается влиянием изменяющейся во времени температуры внутренних слоев расплава и верхней границы системы.

При существенных отклонениях яркостной температуры T_b относительно базовой T_{b0} относительная погрешность переохлаждения фронта,

определяемая по формуле $\delta = \frac{(T_{b0} - T_b) - \Delta T_k}{\Delta T_k}$ до-

стигает значения $\delta = 0,5$ при $k_m = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ и $\delta = 2,5$ при $k_m = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$.

Поэтому для слоя расплава с относительно малой оптической толщиной предлагается модификация методики измерения переохлаждения, заключающаяся во введении расчетной поправки на базовую температуру. Базовая температура T_{b0} умножается на поправку, представляющую собой отношение яркостной температуры, полученной из расчета без учета переохлаждения, к начальной базовой температуре: $\xi = T'_b / T_{b0}$. В этом случае исключается составля-

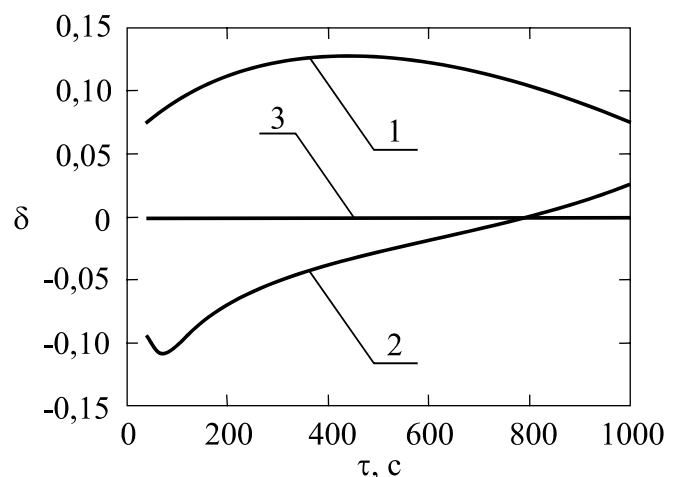


Рис. 4. Погрешность определения температуры фронта кристаллизации:

1 – при коэффициенте поглощения расплава $k_m = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$; 2 – $1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$; 3 – $5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$.

ющая погрешности, обусловленная частичной прозрачностью расплава. Такой подход позволяет уменьшить погрешность измерения до $\delta = 0,1$ (рис. 4).

Выводы

Предложена методика определения яркостной температуры фронта кристаллизации в случае частичной прозрачности расплава. На основе проведенного комплексного анализа выявлены основные факторы, влияющие на точность измерения переохлаждения, определен диапазон условий эксперимента, при которых измерения переохлаждения с помощью оптической пирометрии возможны с заданной погрешностью. Предложенные расчетные поправки, полученные с помощью численного моделирования, позволили снизить погрешность измерения переохлаждения до допустимых значений.

Исследования были проведены при финансовой поддержке программы ИНТАС проект № 05-1000008-8111.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bykova S.V., Golyshev V.D., Gonik M.A., Tsvetovsky V.B., Deshko V.I., Karvatskii A.Ya.,*

Lenkin A.V. Numerical and experimental investigation of crystal growth rate dependence on facet undercooling for dielectric crystal growth from the melt //Heat Transfer Engineering. – 2006. – V.27, N2. – P. 43 – 57.

2. *Дешко В.І., Карвацький А.Я., Ленькин О.В., Бикова С.В., Голишев В.Д., Гонік М.О., Цветовський В.Б.* Аналіз похибки вимірювання переохо-

лодження міжфазної границі оптичним пірометром// Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2003. – №4. – С. 35 – 41.

3. *Дешко В.И., Карвацкий А.Я.* Исследование теплообмена при кристаллизации фтористого кальция //Промышленная теплотехника. – 1988. – Т.10, №1. – С. 60–65.