

К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ВЫТЯГИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВА

В.С. Юферев, Э.Н. Колесникова

Нелинейный характер процесса капиллярного формообразования кристаллов может явиться причиной возникновения периодических колебаний при вытягивании кристаллов из расплава способом Степанова, Чохральского и другими подобными методами. На это обстоятельство до сих пор не обращалось должного внимания, хотя задача устойчивости роста кристаллов исследовалась неоднократно (см., например, монографию [1]). Возможное объяснение этому состоит в том, что во всех рассмотренных случаях устойчивость роста кристалла изучалась лишь относительно таких возмущений, когда его боковая поверхность смещается как единое целое, т.е. относительно пространственных возмущений формы кристалла с бесконечной длиной волны. Очевидно, что периодические во времени колебания такой пространственной формы существовать не могут, а соответствующие возмущения будут либо асимптотически затухать, либо возрастать. В настоящей работе исследована устойчивость роста кристалла относительно пространственно-периодических возмущений его боковой поверхности и показано, что в этом случае возможно появление периодических колебаний положения фронта кристаллизации.

Задача рассматривалась при следующих ограничениях.

1. Температурное поле в кристалле является одномерным, фронт кристаллизации плоским, а кристалл считается достаточно длинным, чтобы влиянием его верхнего конца можно было пренебречь.
2. Температура в основании мениска расплава задана и постоянна, а теплообменом с боковой поверхности мениска пренебрегается.
3. Капиллярная задача, описывающая форму столба расплава, является плоской.
4. Теплообмен в расплаве и кристалле считается квазистационарным.

Тогда в системе координат, связанной с фронтом кристаллизации, процесс вытягивания кристалла из расплава будет описываться следующей системой безразмерных уравнений:

Уравнение теплообмена в кристалле

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{t}{h} = 0, \quad \text{при } x=0 \quad t=1, \quad \text{при } x=\infty \quad t=0. \quad (1a)$$

Условие Стефана

$$-(1+\mu) \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{\mu}{l} = 1 - \frac{l_0}{\delta} \frac{dl}{d\tau}. \quad (16)$$

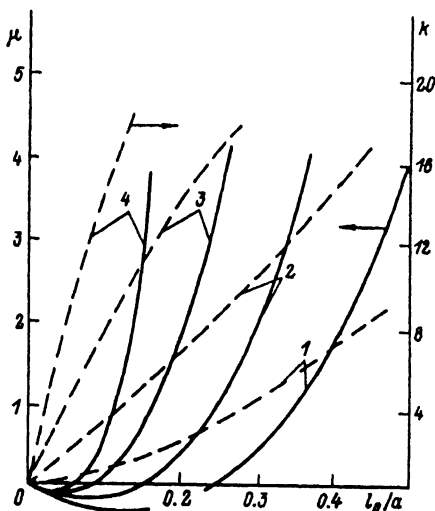


Рис. 1. Кривые: 1 - $\frac{P}{a} = 0$; 2 - 0.9; 3 - 1.9; 4 - 2.5.

Уравнение боковой поверхности кристалла

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} + \left(1 - \frac{l_0}{\delta} \frac{dl}{d\tau}\right) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1b)$$

при $x = 0$
$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = -\frac{\delta}{h_0} \left(1 - \frac{l_0}{\delta} \frac{dl}{d\tau}\right) \frac{tg\alpha - tg\alpha_0}{1 + tg\alpha \cdot tg\alpha_0}.$$

Здесь
$$\delta = \left(\frac{\lambda_S h_0}{\epsilon_S \epsilon T_0^3}\right)^{1/2}, \quad \mu = \frac{\lambda_L G_L}{QV},$$

l - высота мениска, h - поперечный размер кристалла (полутолщина пластины или половина радиуса цилиндра), α - угол наклона плоскости, касательной к поверхности столба расплава у трехфазной линии, к плоскости расплава в тигле, T_0 - температура окружающей среды, $\lambda_{S,L}$ - коэффициенты теплопроводности твердой и жидкой фаз, V - скорость вытягивания, а Q - скрытая теплота кристаллизации. При этом для нормировки координаты x использовалась величина δ , времени $\tau - \delta/V$, а величины l, h нормировались на невозмущенные размерные значения l_0, h_0 , соответствующие стационарному росту кристалла. Необходимо отметить, что аналогичная постановка задачи использовалась в работе [2] для изучения переходных процессов при вытягивании тонких пластин методом Степанова (EFG).

Решение задачи (1) разыскивалось в виде

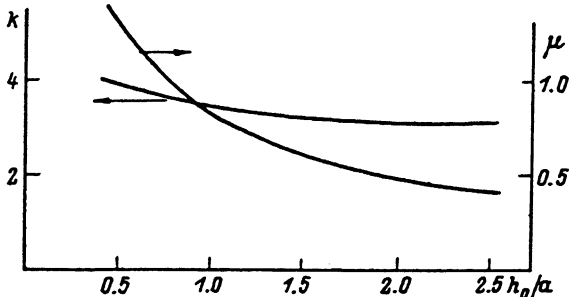


Рис. 2.

$$\begin{aligned}
 l &= 1 + l_1, & l_1 &= L \exp(-ik\tau), \\
 h &= 1 + h_1, & h_1 &= A \exp(ik(x-\tau)),
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$t = \exp(-x) (1 + B(\exp(ik(x-\tau)) - \exp(-ik\tau))),$$

где L, A, B - амплитуды возмущенного решения, а k - его волновое число. Разложим α в ряд Тейлора около стационарного значения α_0 :

$$\alpha = \alpha_0 + r_l l_1 + r_h h_1, \quad (3)$$

где $r_l = \left. \frac{\partial \alpha}{\partial l} \right|_{l=1}$ и $r_h = \left. \frac{\partial \alpha}{\partial h} \right|_{h=1}$ определяются из решения капиллярной задачи так, как это делается в [1]. Тогда, подставляя (2), (3) в (1) и приравнявая нулю определитель линейной системы относительно амплитуд L, A , получим два уравнения для вычисления значений μ и k , соответствующих ненулевому нейтральному возмущению

где $r_l = \left. \frac{\partial \alpha}{\partial l} \right|_{l=1}$ и $r_h = \left. \frac{\partial \alpha}{\partial h} \right|_{h=1}$ определяются из решения капиллярной задачи так, как это делается в [1]. Тогда, подставляя (2), (3) в (1) и приравнявая нулю определитель линейной системы относительно амплитуд L, A , получим два уравнения для вычисления значений μ и k , соответствующих ненулевому нейтральному возмущению

$$b\mu^2 + (b^2 - r_l \frac{h_0}{S}) \left(\frac{l_0}{h_0} \right) \mu + 2 \frac{l_0^2}{S h_0} b r_h - \frac{l_0}{S} r_l = 0, \quad (4)$$

$$k^2 = \frac{S^2}{l_0 h_0} b \mu + 2 \frac{S}{h_0} r_h, \quad \text{где } b = r_h + 2 \frac{h_0}{S}.$$

Расчеты были выполнены для кремния. На рис. 1 показаны зависимости μ и k от $\frac{l_0}{a}$ для тонкой пластины, где $a = \left(\frac{2\sigma a_0}{\rho_0 g} \right)^{1/2}$ -

капиллярная постоянная при различных значениях высоты верхней кромки формообразователя ρ над поверхностью расплава в тигле,

а на рис. 2 зависимости μ и k от $\frac{k_0}{a}$ при вытягивании цилиндрического кристалла способом Чохральского ($\rho = 0$). Устойчивому росту соответствуют значения μ , лежащие выше нейтральных кривых.

Для полупроводниковых кристаллов, как правило, $\mu < 1$. Поэтому возникновение периодических колебаний рассматриваемого типа может иметь место достаточно часто. При этом размерная длина волны нейтрального возмущения оказывается пропорциональной δ .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Татарченко В.А. Устойчивый рост кристаллов. М.: Наука, 1988. 238 с.
- [2] Bell R.O. Proc. 2 nd Int. Symp. on Shaped Crystal Growth, Budapest, 1989. P. 9.

Поступило в Редакцию
19 апреля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 13 12 июля 1990 г.

05.4; 06; 09

© 1990 г.

ВОЛНОВОДНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ПЛЕНКИ

О.Г. Вендик, М.М. Гайдук,
А. Карпюк, А.Б. Козырев,
С.Г. Колесов, С.Б. Розанов

Коммутационные устройства на основе сверхпроводников, принцип действия которых основан на $S-N$ -переключении [1], для охлаждаемых до гелиевой температуры входных цепей модуляционных радиометров [2] являются конкурентноспособными с полупроводниковыми и ферритовыми устройствами во всем СВЧ диапазоне [1, 3]. В диапазоне миллиметровых длин волн и особенно на частотах выше 100 ГГц реализация коммутационных устройств на традиционной элементной базе связана с определенными трудностями.

В настоящем сообщении приведены результаты исследований электрофизических параметров пленок нитрида ниобия, описана конструкция волноводного выключателя на их основе и приведены результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик этих выключателей.