

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Воляр Р.Н., Егоров С.Г., Червоний И.Ф.

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, rot@zgia.zp.ua

При выращивании монокристаллов кремния методом Чохральского из расплава в выращиваемом монокристалле создается тепловое поле, которое зависит от количества расплава в тигле, конструкции теплового узла и ростовой камеры установки выращивания. Выращивание производилось в промышленных условиях по методу Чохральского в установках типа «Редмет-30» в вакууме при протоке инертного газа аргона при следующих технологических режимах: скорость выращивания составляла 1,8 мм/мин в начале процесса и 0,7 мм/мин в конце процесса выращивания, скорость вращения тигля 5 мин^{-1} , скорость вращения кристалла 15 мин^{-1} , расход инертного газа аргона составлял 30 л/мин. Масса загрузки составляла 40 кг, диаметр кварцевого тигля 356 мм. Распределение температуры по радиусу выращиваемого монокристалла кремния описывается уравнением

$$\frac{T}{T_0} \approx \left[1 - \frac{ah}{2} \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-\frac{z}{a} \cdot (2ah)^{1/2} \right],$$

где T – текущая температура монокристалла, К; T_0 – температура кристаллизации кремния, К; a – радиус выращиваемого монокристалла кремния м; $h = \alpha/\lambda$, α – коэффициент теплоотдачи с поверхности монокристалла, λ – теплопроводность; r и z – радиальная и осевая координаты соответственно.

Реальное распределение температуры в монокристалле в процессе выращивания приведено на рисунке. За начало координат принимается линия фронта кристаллизации. Распределение температуры по длине монокристалла фиксировалось при изменении скорости выращивания от 1,5 мм/мин в начале процесса выращивания до 0,6 мм/мин в конце процесса.

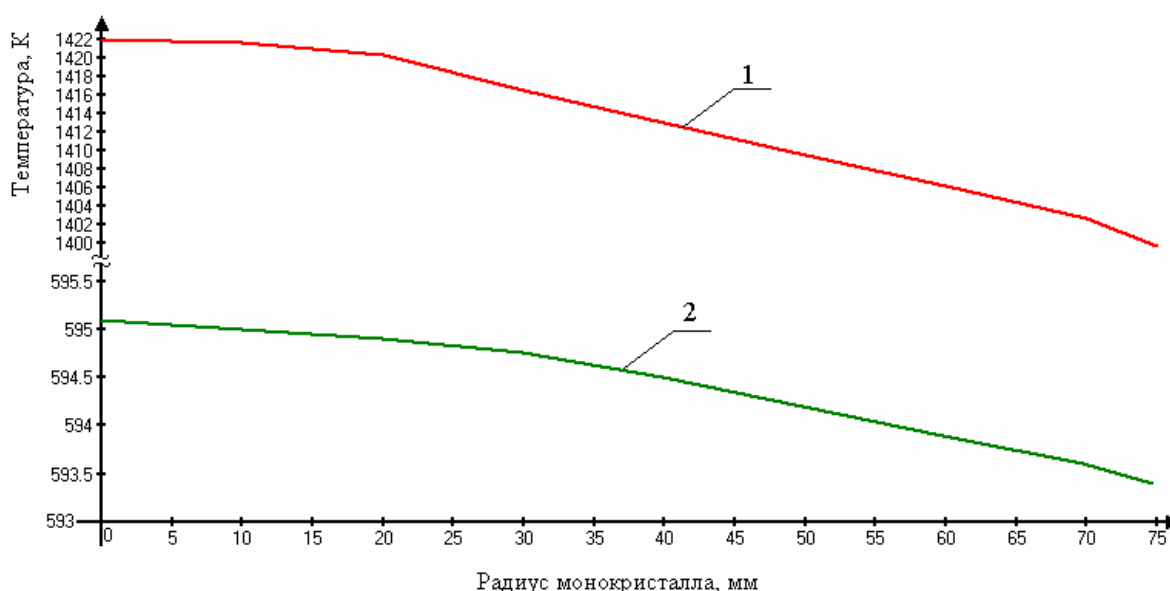


Рис. 1. Распределение температуры по оси монокристалла кремния
1 – расстояние 50 мм от фронта кристаллизации
2 – расстояние 750 мм от фронта кристаллизации

Как видно из рисунка, распределение температуры по длине монокристалла в реальном процессе выращивания отличается от теоретического распределения. Такое отличие распределения температуры можно объяснить применением экранирования нагревателя для сокращения тепловых потерь в камере выращивания.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА

Егоров С.Г., Волярь Р.Н., Червоный И.Ф.

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, rot@zgia.zp.ua

При индукционной бестигельной зонной плавки (БЗП) выращивание монокристаллов кремния осуществляется из расплавленной зоны. Процессы, протекающие в этой зоне, играют определяющую роль в формировании электрофизических свойств монокристалла [1, 2]. Наличие тепловой, центробежной, термокапиллярной и электродинамической конвекций вызывает движение расплава. Вид потоков и их скорость движения зависят от таких технологических параметров как скорость прохода зоны и частоты вращения монокристалла [3, 4]. Движение расплава оказывает влияние на распределение температуры и примесей, как в объеме расплава, так и на фронте кристаллизации.

Для проведения исследований была построена математическая модель движения расплава в жидкой зоне при БЗП кремния, которая основывалась на совместном решении системы уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска с уравнениями переноса тепла и массы (решение осуществлялось с помощью математического пакета *Femlab 2.3*):

$$\begin{aligned} -\eta \nabla^2 U + \rho(U \nabla)U + \nabla P = F, \\ \nabla U = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\nabla(-k \nabla T + \rho \cdot C_p \cdot TU) = Q_T, \quad (2)$$

$$\nabla(-D \nabla C + CU) = Q_C, \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость; U – вектор скорости; ρ – плотность; P – давление; F – внешние силы; T – температура; k – коэффициент теплопроводности; C_p – теплоемкость; Q_T – источник тепла; D – коэффициент диффузии; Q_C – источник вещества.

Решение системы (1)-(3) производилось при следующих граничных условиях:

- ось симметрии: $u = 0$, $\partial v / \partial x = 0$, $w = 0$, $\partial T / \partial x = 0$, $\partial C / \partial x = 0$;
- фронт плавления: $u = v = 0$, $w = \omega_{cm} R_{cm}$, $T = T_{пл}$, $C = 1$;
- свободная поверхность расплава: $u = f(x)$, $v = f(y)$, $w = const$, $T = f(x)$, $\partial C / \partial y = 0$;
- фронт кристаллизации: $u = v = 0$; $w = \omega_{кр} R_{кр}$, $T = T_{кр}$, $f_c(1 - k_0)C + D \cdot grad C = 0$,

где u , v , w – радиальная, осевая и азимутальная составляющие вектора скорости движения расплава; ω_{cm} , $\omega_{кр}$ – частота вращения исходного стержня и монокристалла соответственно, c^{-1} ; f_c – скорость прохода зоны, мм/мин; k_0 – равновесный коэффициент распределения примеси.

Зависимость толщины диффузионного слоя от частоты вращения монокристалла:

$$\delta = 1,6 \frac{D^{1/3} \cdot \nu^{1/6}}{\omega_{кр}^{1/2}}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава кремния, $\nu = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.