

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., Воляр 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: $u = v = 0$; $w = \omega_{kp} R_{kp}$, $T = T_{кр}$, $f_c(1 - k_0)C + D \cdot grad C = 0$,

где u , v , w – радиальная, осевая и азимутальная составляющие вектора скорости движения расплава; ω_{cm} , ω_{kp} – 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:

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

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

Выражая частоту вращения кристалла через азимутальную составляющую скорости и учитывая, что кроме вращения существует и радиальное движение расплава, можно получить зависимость толщины диффузионного слоя от скорости движения расплава:

$$\delta_D = 1,6 \cdot D^{1/3} \cdot v^{1/6} \cdot \frac{R_{kp}^{1/2}}{(u^2 + w^2)^{1/4}}. \quad (5)$$

В зависимости от режимов плавки в расплаве преобладающей становится тепловая конвекция, характеризующаяся радиальной составляющей скорости движения расплава, или центробежная конвекция, характеризующаяся азимутальной составляющей. Управляя режимом перемешивания расплава можно выращивать монокристаллы кремния с заданным радиальным распределением примеси

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ШЛАКА ШАХТНОЙ СВИНЦОВОЙ ПЛАВКИ

Косенко В.Н., Грицай В. П.

Запорожская государственная инженерная академия, colour@zp.ua

Ежегодно на поверхности складированы миллионы тонн силикатных промышленных отходов, что порождает серьезные экологические проблемы, занимая сотни тысяч гектаров плодородных земель.

В то же время народное хозяйство нуждается в огромных количествах дешевых видов строительных материалов для промышленного, гражданского сельского, жилищного и дорожного строительства. Замена горных пород, при изготовлении строительных материалов силикатными промышленными отходами, в большинстве случаев улучшает их качество.

Одним из основных направлений совершенствования комплексности переработки сырья с целью извлечения из него ценных составляющих является оптимизация состава шлаков металлургического производства.

В данной работе рассмотрен в качестве исследуемой системы - шлак шахтной плавки вторичного свинцового сырья.

Основой исследований стали результаты анализов 780 проб шлака шахтной печи завода "Укрцинк" с целью определения оптимального состава шлака при шахтной плавке вторичного свинецсодержащего сырья методами математического моделирования.

В основу решения задачи нахождения оптимального состава шлака положен аналитический метод корреляционного анализа статистических данных пассивного наблюдения над составом шлака. Целью исследований являлось изучение зависимости потерь свинца со шлаком от содержания в нем шлакообразующих компонентов.

Проверка гипотезы нормальности распределений показала, что распределения исследуемых факторов близки к нормальным. Это позволило в первом приближении проанализировать распределение и оценить связи между параметрами по коэффициентам парной корреляции.

На основании полученных линии регрессии авторами сделан вывод, что при увеличении содержания оксида кальция в шлаке потери свинца уменьшаются, причем наиболее резкое снижение потерь свинца в шлак наблюдается при содержании в нем оксида кальция 15-21%, когда зависимость между ними близка к линейной.

Зависимости потерь свинца от содержания оксида железа, диоксидов кремния и алюминия имеют экстремальный характер с точками минимума и максимума соответственно: 20-24%; 31-40%; 13-16%.