УДК 534.1

Сенотова Светлана Анатольевна,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: sveta-senotova@mail.ru

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Senotova S.A.

ASYMPTOTIC TEMPERATURE STABILITY DURING POLYCRYSTALLINE SILICON PRODUCTION

Аннотация. Исследована асимптотическая устойчивость температурного режима в процессе получения поликристаллического кремния.

Ключевые слова: процесс получения поликристаллического кремния, стационарное движение, асимптотическая устойчивость.

Abstract. Asymptotic stability of temperature regime in the process of polycrystalline silicon production was investigated.

Keywords: process of producing polycrystalline silicon, stationary motion, asymptotic stability.

Рассмотрим процесс производства поликристаллического кремния (Si). Смесь трихлорсилана ($SiHCl_3$) и водорода (H_2) подается в реактор, где трихлорсилан восстанавливается и кремний осаждается на стержнях-основах, разогретых до оптимальной температуры 1100-1150 °C по реакции:

$$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3HCl.$$

Когда температура ниже оптимальной повышается степень превращения трихлорсилана в тетрахлорид кремния и уменьшается выход кремния. При увеличении температуры возрастают энергозатраты, поэтому необходимо поддерживать постоянный температурный режим.

Рассмотрим двумерное движение парогазовой смеси в прямоугольном сечении реактора получения поликристаллического кремния.

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \tag{1}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{4}$$

В уравнениях (1)–(4) v_x – проекция скорости на ось Ox, v_y – проекция скорости на ось Oy, p – давление, T – температура.

Стационарное движение

$$\begin{aligned} v_{x0} &= const \\ v_{y0} &= const \\ p_0 &= const \\ T_0 &= const \end{aligned} \quad (5)$$

является частным решением системы уравнений (1)-(4).

Рассмотрим отклонения от стационарного движения

$$\begin{aligned} v_x &= v_{x0} + u_x \\ v_y &= v_{y0} + u_y \\ p &= p_0 + q \\ T &= T_0 + z \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим формулы (6) в уравнения (3) и (4). После преобразований получим:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -(v_{x0} + u_x)\frac{\partial z}{\partial x} - \left(v_{y0} + u_y\right)\frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (8)$$

Введем в рассмотрение функционал Ляпунова

$$V = \frac{1}{2}\int z^2\, ds, \quad (9)$$

где $ds = dxdy$. Под записью (9) будем понимать интеграл, распространенный на всю площадь сечения реактора. Функционал (9) определенно положителен и непрерывен по мере

$$\rho = \int z^2\, ds, \quad (10)$$

Производная функционала в силу уравнения (8) определенно отрицательна. На основании теоремы [1] можно сделать вывод, что стационарное движение (5) асимптотически устойчиво по мере (10).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сиразетдинов Т.К.** Устойчивость систем с распределенными параметрами. / Т. К. Сиразетдинов. – Новосибирск: Наука. – 1987.