

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЗОННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

М.М. Филиппов

Томский политехнический университет

В качестве объекта исследования рассматривается термическая установка для выращивания монокристаллов ZnGeP_2 вертикальным методом Бриджмена. Установка выполнена в виде многозонной печи на основе планарных нагревательных модулей [1].

Рабочий объем установки представляет собой цилиндр, ограниченный в радиальном направлении внутренними поверхностями кольцевых нагревательных модулей, соосно установленных друг относительно друга и разделенных теплоизолирующими прокладками. Объем заполнен атрибутами, связанными с выращиванием кристаллов: ампула, тигель, загрузка рабочего материала, затравочный кристалл и теплоотвод.

В соответствии с функциональным назначением установки ее рабочий объем разделен на три тепловые зоны:

- верхняя тепловая зона предназначена для плавления рабочего вещества и поддержания его в жидком состоянии;
- в градиентной зоне осуществляется контакт расплава с затравочным кристаллом и последующее превращение рабочего вещества из жидкого состояния в твердое, т.е. происходит непосредственный рост кристалла;
- в нижней тепловой зоне поддерживается температурный режим, обеспечивающий теплоотвод от выращенного кристалла для формирования необходимого распределения температуры в градиентной зоне.

Нагревательные модули верхней и нижней зон имеют один кольцеобразный резистивный нагревательный элемент, который совмещает две основные функции – обеспечение необходимого общего температурного фона и подстройка вырабатываемой мощности при управлении распределением температуры в рабочем объеме установки. В градиентной зоне, где требуется повышенная точность и динамичность работы, используются модули с двумя нагревательными элементами, которые позволяют дифференцировать их функциональное назначение: внешний элемент с основным энергопотреблением предназначен для создания высокостабильного температурного фона, а внутренний – для прецизионного управления температурой в рабочем объеме.

Тепловые процессы в элементах установки и рабочем объеме описываются уравнением вида [2]:

$$\nabla(l \nabla T) + Q = c \rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

где ∇ – оператор Лапласа; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); T – температура, К; Q – удельная мощность джоулева тепловыделения электрических нагревателей, Вт/м³; ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Граничные условия задаются в следующем виде:

1) на внешней границе установки

$$-(l \nabla T) = h(T - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4),$$

где h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ε – приведенная степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_{amb} – температура окружающей среды, К;

2) на внутренних границах используется условие непрерывности – тепловой поток и температура на границах внутренних поверхностей величины непрерывные;

3) теплообмен рабочего объема с установкой определяется выражением

$$-(l \nabla T) = \varepsilon \sigma (T_y^4 - T_z^4),$$

где T_y , T_z – температура внутренней поверхности термической установки и внешней поверхности ампулы с рабочим веществом соответственно, К;

4) вдоль оси $r=0$ используется условие осевой симметрии $(l \nabla T) = 0$.

В качестве начального условия задачи принимается условие равенства температуры T во всем объеме установки температуре окружающей среды $T = T_{amb} = 293,15$ К.

Разработанная модель многозонной термической установки с заполненным рабочим объемом реализована в пакете программ COMSOL Multiphysics [3] и позволяет:

– на этапе проектирования оценивать статические и динамические характеристики, отрабатывать различные законы управления тепловой мощностью нагревателей, исследовать влияние теплофизических свойств материалов и геометрии конструктивов на температурное поле в рабочем объеме;

– на этапе эксплуатации изучать особенности роста кристаллов в многозонной установке, оценивать влияние ее параметров на форму фронта кристаллизации и скорость роста, от которых зависит структурное совершенство и свойства выращиваемых кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 1830132 СССР. МПК⁵ F27B 5/06. Трубчатая печь / В.Е. Гинсар., В.А. Десятов. Заявлено 22.01.1991; Опубл. 23.07.1993, Бюл. № 27. – 8 с.: ил.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
3. Официальный сайт COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.comsol.com/>. – 07.09.2009.