УДК 622.016.47

К.ГЕРМАН, А.РЕКОПФ, Х.ЗАУЕРМАН
Горная академия, Фрайберг, Германия

РЕГУЛИРОВКА МНОГОЗОННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Один из самых распространенных и эффективных способов выращивания кристаллов – метод вытягивания кристаллов из расплава. Выращивание кристаллов осуществляется перемещением фронта кристаллизации с формированием теплового режима нагревателями с независимым управлением. Рассмотрены вопросы автоматизации многозонных печей для выращивания кристаллов по методу вертикального замораживания (VGF-метод). Основное технологическое требование – точность регулировки в установившихся и динамических режимах.

One of the most widely-spread and effective ways to grow crystals is the method of crystal pulling from a liquid melt. Crystal growth is achieved by crystallization front movement through formation of thermal conditions by means of independent controlled heaters. The article studies automation issues of multizone furnaces to grow crystals with application of the vertical freezing method (the VGF method), the main process requirements being adjustment accuracy in settled and dynamic modes.

Кристаллы находят широкое применение в технике, в частности, в микроэлектронике и технике высоких частот. Для выращивания кристаллов (Si, GaAs, InP и т.д.) существует много различных методов. Одним из самых распространенных и эффективных является метод вытягивания кристаллов из расплава, так называемый метод Чохральского.

Для выращивания композитных полупроводниковых кристаллов используется VGF-метод (вертикальный метод замораживания). Особенностью данного метода является неподвижность всех элементов печи, что предотвращает возникновение микродефектов в объеме кристалла и тем самым способствует повышению структурного совершенства. Выращивание кристаллов осуществляется перемещением фронта кристаллизации с помощью формирования теплового режима нагревателями с независимым управлением.

Цель работы состоит в автоматизации многозонных печей для выращивания кристаллов по методу вертикального замораживания. Основным технологическим требованием является точность регулировки в установившихся (<0,1 К) и динамических режимах.

В Техническом университете во Фрайберге (Германия) проводятся многочисленные работы по разработке и автоматизации многозонных печей для выращивания кристаллов по VGF- и HGF-методу (рис.1). Рис.2 показывает основную структуру применяемых установок.

Многозонная печь представляет из себя взаимосвязанную систему нескольких величин (многомерную систему). Основными свойствами подобных систем являются две или более управляемых величины, а также их взаимодействие.

Для описания динамики многомерных систем применяется каноническая модель (рис.3). Исходя из энергобаланса

$$P(t) = \dot{Q}_{sp}(t) + \dot{Q}_{ab}(t) \qquad (1)$$

и учитывая законы термодинамики, а также термическое взаимодействие между зонами, получаем дифференциальное уравнение динамики

$$T_i \dot{\vartheta}_i(t) + \vartheta_i(t) = K_i \left(P_{э,i}(t) + \sum_{j \neq i} V_{ij} \vartheta_i(t) \right), \quad (2)$$

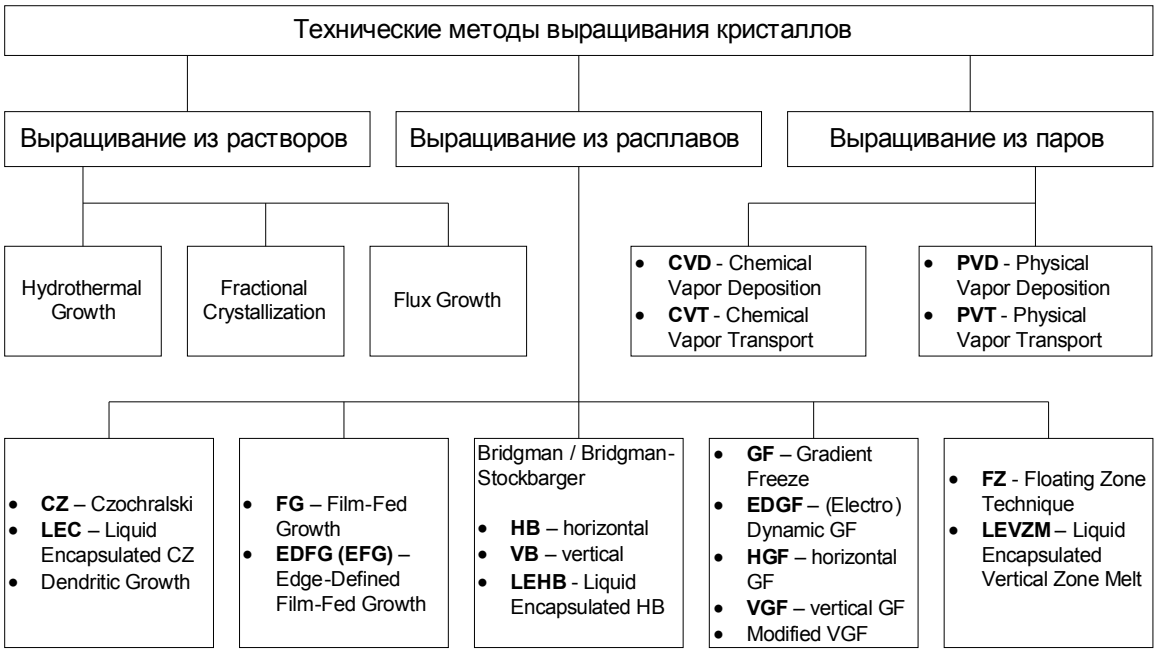


Рис.1. Классификация методов выращивания кристаллов

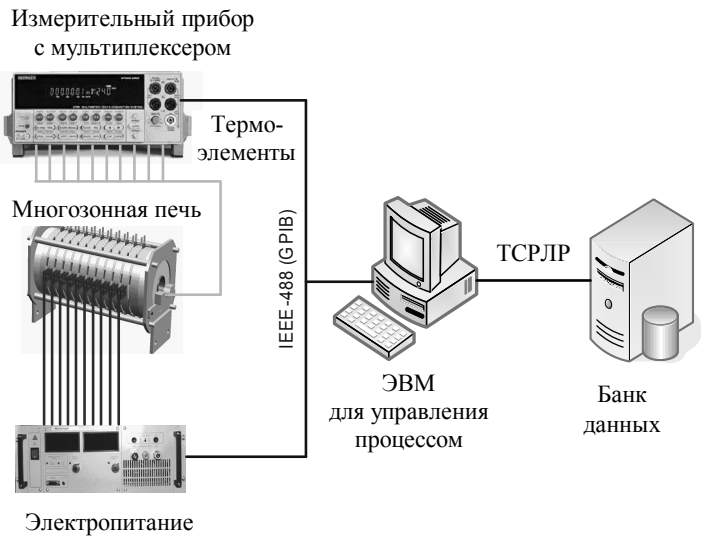


Рис.2. Структура GF-установки

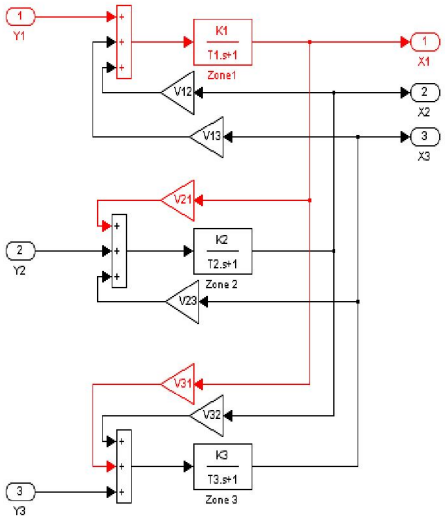


Рис.3. Каноническая модель на примере 3-зонной печи

где T_i – постоянная времени; K_i – передаточный коэффициент; $P_э$ – электрическая мощность; ϑ_i – температура; V_{ij} – коэффициент термического взаимодействия.

Для оценки динамических свойств системы и отдельных звеньев принято исследовать их реакцию на типовые входные воздействия, которые наиболее полно отражают особенности реальных возмущений. Самыми распространенными воздействиями являются импульсные или синусоидальные сигналы.

Вычисление системных параметров (идентификация) осуществляется итеративным путем с помощью програмного пакета Matlab-Simulink. При этом используется метод наименьшего квадрата (рис.4).

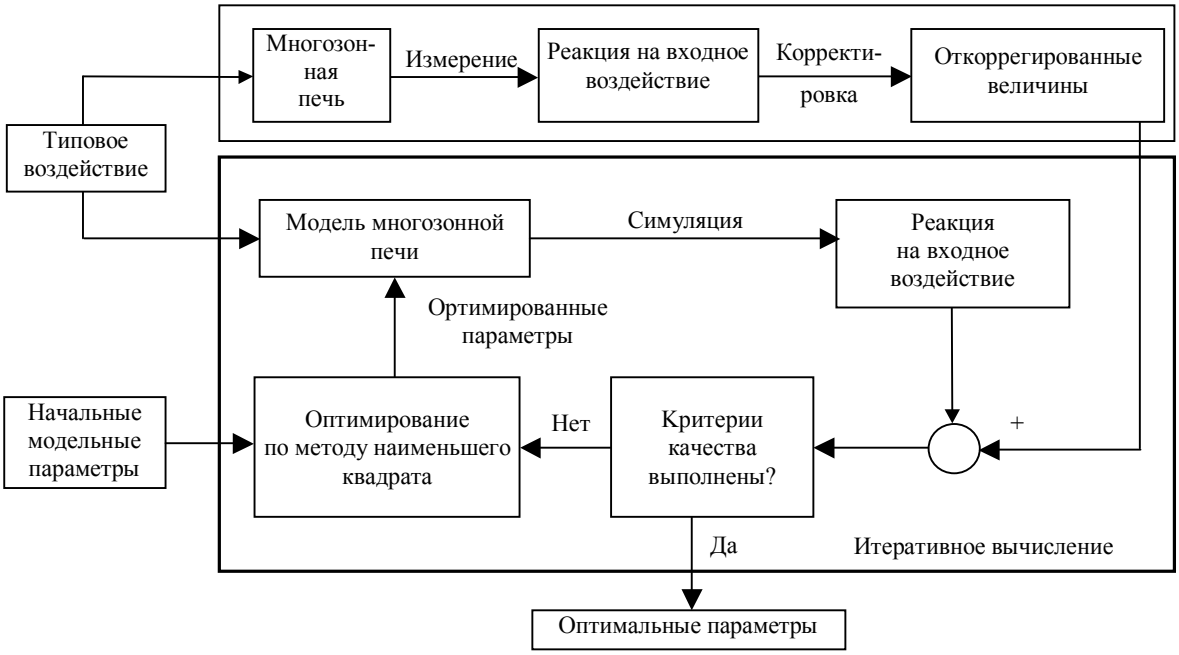


Рис.4. Итеративное вычисление системных параметров с помощью метода наименьшего квадрата

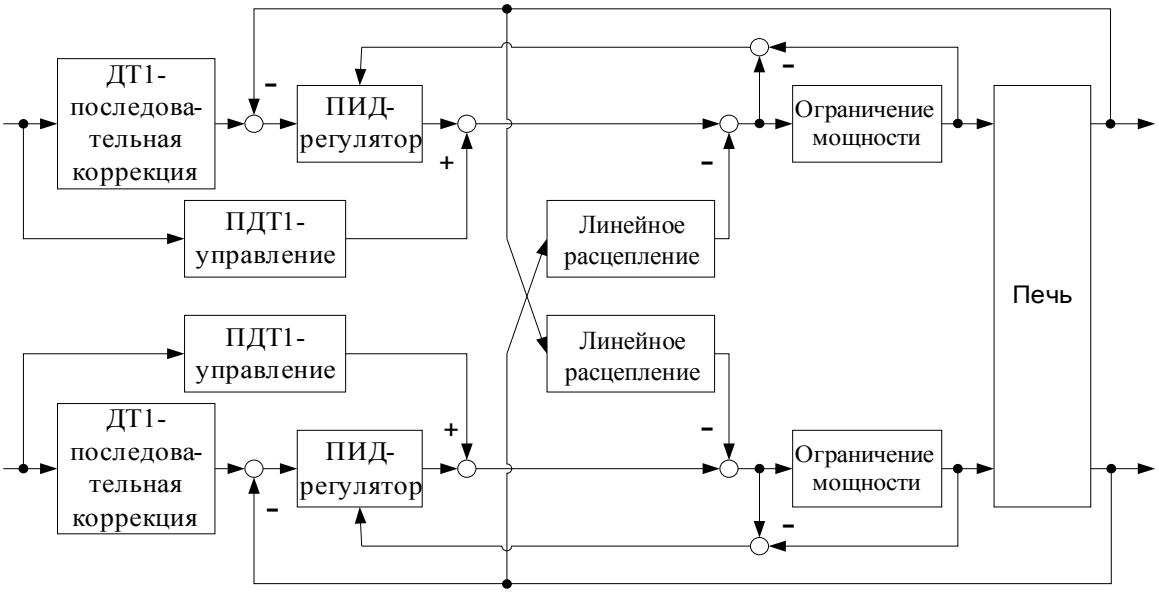


Рис.6. Структура канонической регулировки

Используемый регулятор является дискретным многомерным каноническим ПИД-регулятором. Его характерное свойство заключается в компенсации термического взаимодействия управляемых величин с помощью линейного расцепления (рис.5), т.е. коэффициент линейного расцепления равен отрицательному коэффициенту термического взаимодействия. Это позволяет рассматривать управляемые температуры как друг от друга независимые величины и тем самым осуществить переход к одноконтурной регулировке.

Отличительные черты вышеназванного регулятора: последовательная коррекция по задающему воздействию (ДТ1-звено) для

улучшения статической точности; комбинация ПИД регулировки с ПДТ1-управлением для грубой установки мощности Anti Wind-Up: ограничение интегрирующей части и этим самым уменьшение величины перерегулирования; уменьшение времени переходного процесса

Представленные методы моделлирования, идентификации и регулировки позволяют выращивать высококачественные кристаллы по методу Gradient Freeze (GF). Полученные результаты удовлетворяют поставленным статическим и динамическим требованиям. Точность регулировки в установившемся режиме составляет ±0,1 К.

Описанный принципы могут быть применены для многозонных печей независимо от их технических и конструктивных свойств.