

На правах рукописи

Гоник Марк Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ
РЕЖИМОМ В УСТАНОВКАХ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Специальность

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Боевкин Виктор Иванович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Митришкин Юрий Владимирович

Доктор физико-математических наук, профессор
Юферев Валентин Степанович

Ведущее предприятие: Экспериментальный завод научного
приборостроения со Специальным
конструкторским бюро РАН (ФГУП ЭЗАН),
г. Черноголовка

Защита диссертации состоится "___" _____ 2011 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана. Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан " ___ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Михайлов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электронной техники во многом определяется характеристиками материалов, применяемых в качестве чувствительных элементов приборов, оптических преобразователей, основ полупроводниковых структур. Требования к совершенству, однородности, размерам материалов постоянно возрастают, и возникает необходимость в модернизации существующих технологий их получения.

Одним из основных способов получения материалов электронной техники является рост монокристаллов из расплава. Технология выращивания представляет собой процесс управляемой кристаллизации, при котором необходимые тепловые условия фазового перехода создаются и поддерживаются на протяжении всего ростового цикла с помощью автоматической системы. Точность управления температурным режимом определяет качество растущего кристалла, воспроизводимость результатов ростового цикла, выход годной продукции, объем научных исследований при разработке новых технологий, и, в конечном итоге, - экономическую эффективность производственных процессов в целом.

На сегодняшний день требования к точности стабилизации температуры в зоне роста кристалла составляют порядка 0.1°C . Однако традиционными методами такая точность не всегда обеспечивается. Основная сложность управления заключается в том, что в ростовых установках управляющие органы (нагреватели) и измерительные датчики (термопары) расположены на удалении от фазовой границы. В результате управление температурой в зоне кристаллизации осуществляется без обратной связи или обеспечивается регулирование параметров, косвенно характеризующих распределение температур в данной области. Дополнительной сложностью является нестационарный характер свойств объекта управления, т.к. в течение ростового цикла в установке происходит перераспределение материалов с разными теплофизическими свойствами.

Повышение точности управления может быть обеспечено за счет измерения и регулирования температур в точках вблизи растущего кристалла. Однако в таком случае существенно возрастает инерционность и взаимное влияние каналов в многомерном объекте управления. Это приводит к значительным трудностям при регулировании, и до сих пор такой подход реализован не был. Успешное решение данной задачи может быть осуществлено, если воспользоваться достижениями нескольких областей науки, связанных с рассматриваемой проблемой – технологии роста кристаллов, моделирования процессов теплопереноса, теории и практики автоматического управления в многосвязных системах, разработки математического, алгоритмического и программного обеспечения для создания систем управления и реализации их на базе современного прецизионного оборудования. Получение методики и средств повышения точности управления температурным режимом в ростовых установках откроет новые возможности для совершенствования существующих и разработки новых технологий выращивания монокристаллов.

Целью настоящей работы является повышения точности управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов с помощью многосвязной системы автоматического управления, которая обеспечивает регулирование температуры в нескольких точках вокруг растущего кристалла. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

– Разработка математической модели процесса управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов как системы управления объектом с распределенными параметрами.

– Исследование и выбор конструкции теплового узла установки как структуры многосвязного объекта управления с сосредоточенными параметрами с помощью размещения термодатчиков и нагревателей в установке, а так же комбинации пар управления между ними.

– Определение модели ростовой установки как нестационарного многомерного объекта управления в виде матричных передаточных функций.

– Синтез системы регулирования для выбранного объекта и определение задающих воздействий системы управления на основе требований к распределению температуры в зоне кристаллизации.

– Разработка алгоритмического и программного обеспечения для проектирования и реализации автоматической системы управления температурным режимом, а так же визуальных методов его исследования.

– Проведение модельных и натурных испытаний разработанной системы управления.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика повышения точности управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов с помощью многосвязной системы автоматического управления, обеспечивающей регулирование температур в нескольких точках вокруг растущего кристалла.

2. Структура объекта управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов, представляющая собой расположение термодатчиков и нагревателей в ростовой установке и комбинацию пар управления между ними, которая позволяет регулировать температуру в нескольких точках вокруг растущего кристалла с помощью сепаратных ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами.

3. Математическая модель процесса управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов как системы управления объектом с распределенными параметрами, функционирующая в ускоренном масштабе времени.

4. Линеаризованная математическая модель ростовой установки как нестационарного, многомерного объекта управления с сосредоточенными параметрами в виде матричных передаточных функций для нескольких стадий ростового цикла.

5. Алгоритмическое и программное обеспечение для проектирования и реализации системы автоматического управления температурным режимом в ростовой установке, а также визуальных методов его исследования.

Научная новизна

– Предложена новая методика повышения точности управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов с помощью многосвязной системы управления, которая обеспечивает регулирование температур в нескольких точках вокруг растущего кристалла. Определяющим этапом методики является процедура исследования и выбора конструкции ростовой установки на стадии ее проектирования с целью уменьшения взаимного влияния каналов и изменения свойств многомерного объекта управления в течение всего ростового цикла.

– С помощью разработанной системы управления в натуральных испытаниях впервые обеспечено регулирование температуры в нескольких точках вокруг растущего кристалла с точностью 0.03-0.18°C.

– Впервые разработана модель процесса управления температурным режимом в установке выращивания кристаллов, функционирующая в ускоренном масштабе времени. Модель процесса построена на основе тепловой динамической модели ростовой установки и цифровой многомерной системы регулирования температуры в любых ее точках.

– С помощью тепловой модели установки выращивания кристаллов впервые проведена идентификация многомерного объекта управления температурой в произвольно выбранных точках установки для нескольких стадий ростового цикла. Определена модель нестационарного объекта управления с сосредоточенными параметрами в виде матричных передаточных функций.

– Предложена новая конструкция теплового узла ростовой установки и связанная с ней структура многомерного объекта управления, которая позволяет обеспечить регулирование температур в нескольких точках вокруг растущего кристалла с помощью сепаратных ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами.

– С помощью моделирования процесса управления температурным режимом в ростовой установке определена программа изменения температур вокруг растущего кристалла, позволяющая обеспечить заданное распределение температур в зоне кристаллизации на протяжении всего ростового цикла.

Практическая ценность

– Предложенные методика и средства позволили разработать систему управления, с помощью которой проведены исследования физических процессов при росте и совершенствование технологий получения кристаллов Ge, CdZnTe, Bi и CsI.

– Разработанные методика и средства могут быть использованы для создания моделей и систем управления температурными режимами в установках выращивания кристаллов традиционным и модифицированными методами Бриджмена, а так же подобных тепловых объектах, для которых не требуется учитывать излучение в материале и конвекцию в расплаве, или они могут быть адекватно описаны эффективным коэффициентом теплопроводности.

– Предложенная методика повышения точности управления обеспечивает достижение цели одним из наиболее простых для реализации на практике способов – с помощью применения сепаратных ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами.

– Коэффициенты ПИД-регуляторов, найденные в настоящей работе, могут быть с определенным успехом использованы для управления температурным режимом в различных установках выращивания кристаллов, конструкция которых идентична исследованному в работе.

– Разработанная модель процесса управления, функционирующая в ускоренном масштабе времени, может быть использована для построения системы автоматического управления не измеряемыми параметрами кристаллизации.

Реализация и внедрение результатов. Результаты настоящей работы использованы в Центре теплофизических исследований «Термо» (г. Александров), где разработанная система управления явилась неотъемлемой составляющей нового метода выращивания кристаллов. С ее помощью проведены научные исследования в рамках проектов, поддержанных фондами РФФИ, АФГИР (CRDF), ИНТАС (INTAS) и других программ.

Алгоритмическое и программное обеспечение для синтеза и реализации системы управления применяется в лабораторных работах на кафедре ИУЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках курса «Теория автоматического управления».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIII и XIV национальных конференциях по росту кристаллов (г. Москва, 2008 и 2010 гг.), 6-ой международной конференции по моделированию и росту кристаллов (г. Висконсин, США, 2009), конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (г. Москва, ИПУ РАН, 2008), XVIII Петербургских чтениях по проблеме прочности и роста кристаллов (г. Санкт-Петербург, 2008), конференции «Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством» (г. Тамбов, 2007), 3-ей международной конференции по физике и управлению PhysCon (г. Потсдам, Германия, 2007), 5-ой международной конференции по моделированию и росту кристаллов (г. Бамберг, Германия, 2006), 3-ей и 4-ой научно-практических конференциях “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments” (г. Москва, 2004 и 2005 гг.), 6-ой международной конференция «Рост монокристаллов и тепломассоперенос» (г. Обнинск, 2005), конференции по росту кристаллов и их приложениям в 21 веке (г. Александров, 2004).

Список публикаций. Основное содержание диссертации отражено в 14 публикациях, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основная часть работы изложена на 160 страницах, содержит 85 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 115 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель работы, определена научная новизна, охарактеризованы практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации содержит обзор литературы, в котором описаны существующие методы, модели и системы управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов.

Показано, что работы в большинстве своем посвящены определению программ управления мощностями удаленных от растущего кристалла нагревателей или температурами возле них, которые обеспечивают необходимые тепловые условия фазового перехода. Программы определяются с помощью глобальных тепловых моделей установок или по результатам серии ростовых экспериментов. Если позволяет технология, осуществляется регулирование параметров, косвенно характеризующих распределение температур в зоне роста, таких как производная веса кристалла, его диаметр. Разрабатываемые тепловые модели установок обеспечивают расчеты с точностью не выше 1-2°C и скоростью существенно меньше масштаба реального времени.

Так же рассмотрены методы управления температурным режимом в ростовых установках, конструкция которых позволяет измерять температуру вблизи растущего кристалла за счет применения погруженного в расплав нагревателя (рис. 1). Приведены результаты регулирования в таких установках двух температур T_0 и T_1 на оси кристалла с помощью ПИД регуляторов. Точность управления в течении ростового цикла составила 1.5-3°C, длительность переходных процессов 2000-3000с. Такой невысокий результат объясняется сложностью задачи регулирования, вызванной значительным взаимным влиянием каналов в объекте управления и изменением его параметров в процессе роста. С целью повышения точности управления режимом обсуждается потребность в изучении динамических свойств объекта, выборе дополнительных точек регулирования температур вокруг растущего кристалла.

В главе рассмотрены методы регулирования в многосвязных системах управления. Сделан вывод, что одним из простых способов является управление с помощью сепаратных ПИД-регуляторов, и для их успешного применения необходимо обеспечить развязку каналов в многомерном объекте.

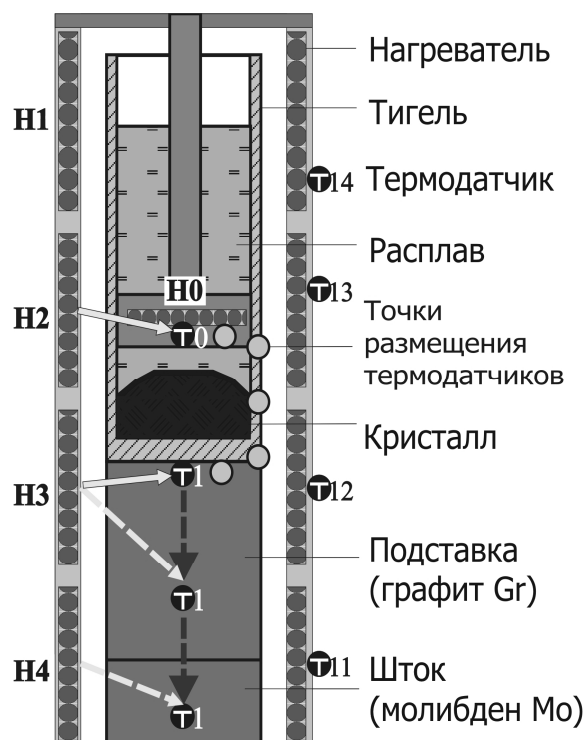


Рис. 1. Ростовая установка, позволяющая регулировать температуру вокруг кристалла

С этой целью автором сформулирована задача выбора конструкции ростовой установки и связанной с ней структуры многомерного объекта, которая определяет достаточно малое взаимное влияние каналов многосвязной системы. В качестве меры связности традиционно применяется матрица Бристоля, характеризующая изменение коэффициентов усиления в сепаратных разомкнутых контурах при замыкании всех остальных контуров в многосвязной системе. В идеальном случае для автономной системы матрица Бристоля равна единичной. Рассмотрено, что для управления нестационарным объектом с помощью ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами необходимо при выборе структуры объекта обеспечить достаточно малое изменение его свойств в течение всего ростового цикла.

Так же в главе представлен обзор средств разработки алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего проектировать и реализовывать системы автоматического управления, обработки изображений. В качестве такого инструмента обоснован выбор среды графического программирования Labview, позволяющей существенно сократить время разработки программ.

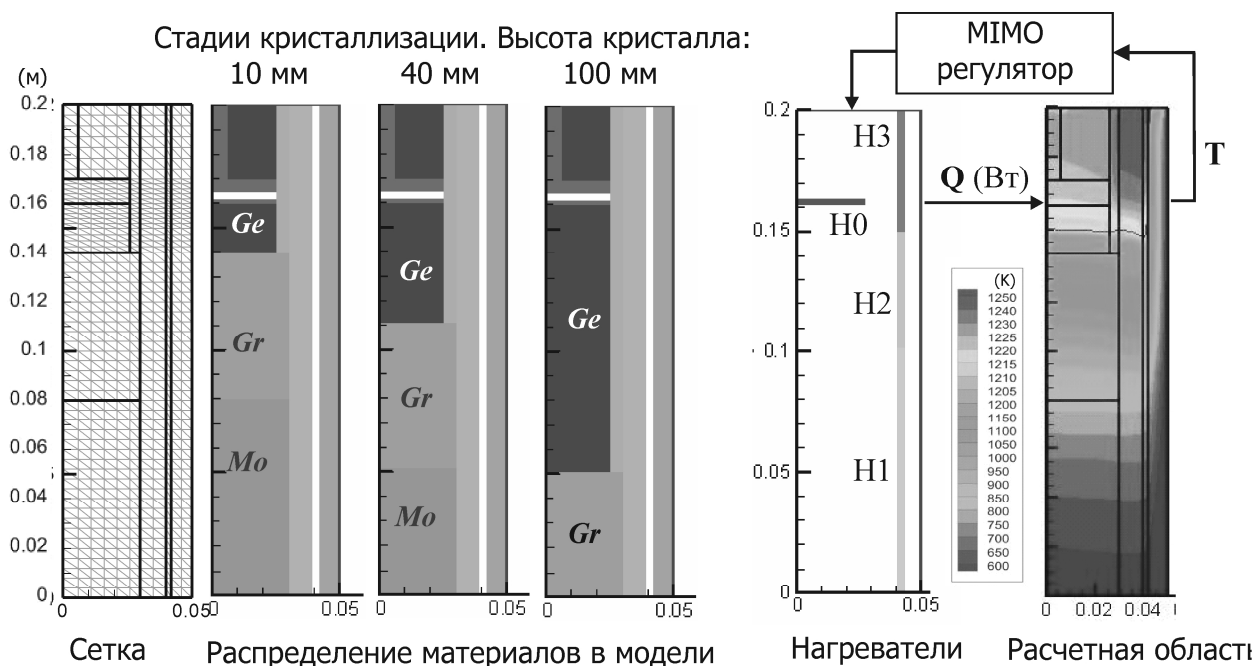


Рис. 2. Модель процесса управления температурным режимом

Вторая глава посвящена разработке модели процесса управления температурным режимом в ростовой установке как системы управления объектом с распределенными параметрами. Модель представляет собой объединение тепловой двумерной модели ростовой установки и многомерной системы регулирования температуры в любой точке исследуемой области с помощью нескольких произвольно расположенных нагревателей (рис. 2). Реализованы 4 канала регулирования по ПИД алгоритму для любых пар «нагреватель-температура» и шага дискретизации системы. Тепловая модель основана на решении уравнения теплопроводности с учетом теплоты фазового перехода (1), температурной зависимости теплофизических свойств материалов; граничные условия задаются 3 рода (рис. 3). Обеспечена

возможность управления выделением и поглощением теплоты кристаллизации на подвижной фазовой границе. Результаты экспериментов визуализируются в виде двумерного теплового поля и графиков выбранных параметров по мере их поступления. Главной особенностью модели является скорость счета, при которой вычисления происходят быстрее, чем исследуемые процессы в действительности. Модель построена для условий выращивания кристалла германия (Ge) диаметром 46 мм модифицированным методом Бриджмана - методом ОТФ (осевого теплового потока вблизи фронта кристаллизации).

$$\rho(T) \frac{\partial \varepsilon(T)}{\partial t} = \nabla(k(T) \nabla T) + Q(t); \quad \rho(T) = \begin{cases} \rho_1, T < T_k \\ \rho_2, T > T_k \end{cases}$$

$$\varepsilon(T) = \begin{cases} \varepsilon(T_0) + c_1(T)T, T < T_k \\ \varepsilon(T_k) + q_k + c_2(T - T_k), T > T_k \end{cases} \quad k(T) = \begin{cases} k_1(T), T < T_k \\ k_2, T > T_k \end{cases}$$

граничные условия $k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c)$ $c(T) = \begin{cases} c_1(T), T < T_k \\ c_2, T > T_k \end{cases}$

ρ - плотность,
 k - теплопроводность,
 c - теплоемкость,
 q_k - удельная теплота кристаллизации,
 ε - удельная энтальпия,
 T_k - температура кристаллизации,
 Q - мощность внутренних источников тепла (нагреватели),
 α - коэффициент теплоотдачи,
 T_c - температура внешней среды

Рис.3. Уравнение теплопроводности с учетом теплоты фазового перехода

В третьей главе описаны методика и результаты исследования и выбора конструкции ростовой установки и структуры многомерного объекта управления. С этой целью с помощью разработанной тепловой модели установки проведена идентификация (рис. 4) и получены передаточные функции более чем 400 различных пар управления «нагреватель–температура» для трех стадий кристаллизации: начальной, промежуточной и конечной, соответствующих длине кристалла 10, 40 и 100 мм. Для обработки результатов экспериментов, описания объекта передаточной функцией, проведения анализа взаимного влияния его каналов, разработано алгоритмическое и программное обеспечение в среде Labview с применением библиотеки System Identification.

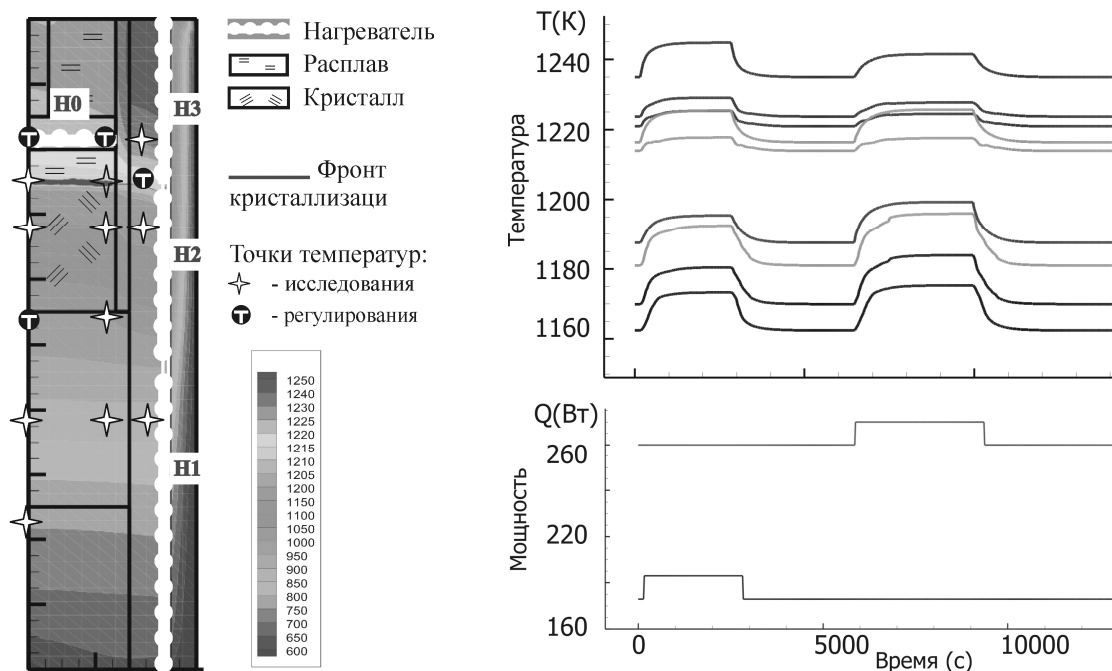


Рис.4. Идентификация многомерного объекта на модели ростовой установки с помощью ступенчатых изменений мощностей нагревателей

По результатам исследований на модели ростовой установки, выявлены характерные точки вокруг растущего кристалла, температура в которых может быть измерена в ростовой установке и в значительной степени определяет распределение температур в зоне кристаллизации. При этом программы управления температурами в данных точках в течение всего ростового цикла представляют собой простые для реализации функции. Так температура в точках T0, T3, T2 должна поддерживаться постоянной, а температура T1 – охлаждаться с постоянным темпом. Для регулирования таких параметров предложены новые пары управления «нагреватель-температура». В отличие от предыдущей структуры объекта управления (рис. 1), охлаждение установки рекомендовано проводить за счет нижнего нагревателя Н1, стабилизацию температур вокруг фазовой границы за счет окружающих ее нагревателей Н0, Н2, Н3 (рис. 5 структура 1). С целью уменьшения взаимного влияния каналов в таком многомерном объекте и диапазона изменения параметров его передаточной функции предложена новая геометрия нагревателей в ростовой установке (рис. 5 структура 2). Для выбранного объекта управления элементы

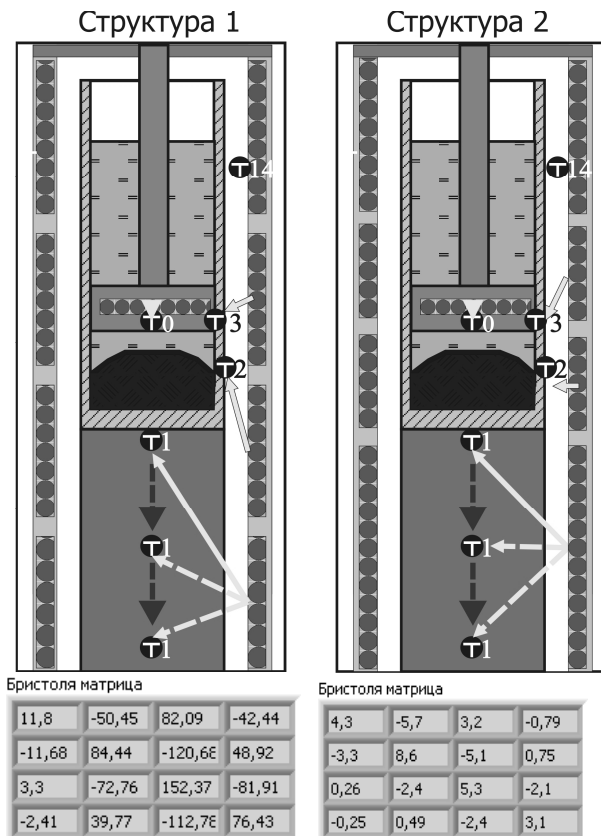


Рис. 5. Варианты структуры многомерного объекта управления

Конечная стадия (кристалл 100 мм):

$$\begin{bmatrix} \frac{1,75(1+182,857s)}{(1+311s)(1+30s)} & \frac{0,43}{(1+297s)} & \frac{0,39}{(1+331s)(1+12s)} & \frac{0,14}{(1+768s)(1+9s)} \\ & & & \frac{0,17}{6s} \end{bmatrix}$$

Промежуточная стадия (кристалл 40 мм):

$$\begin{bmatrix} \frac{1,76(1+177,273s)}{(1+294s)(1+32s)} & \frac{0,42(1+183,333s)}{(1+458s)(1+75s)} & \frac{0,42}{(1+336s)(1+6,5s)} & \frac{0,15}{(1+620s)(1+7,4s)} \\ & & & \frac{0,16}{34s} \end{bmatrix}$$

Начальная стадия (кристалл 10 мм):

$$\begin{bmatrix} \frac{1,29(1+198,45s)}{(1+330s)(1+26s)} & \frac{0,34}{(1+260s)(1+6s)} & \frac{0,34}{(1+312s)(1+7s)} & \frac{0,16}{(1+531s)(1+43s)} \\ \frac{1,24(1+211,29s)}{(1+334s)(1+28s)} & \frac{0,45}{(1+248s)(1+3s)} & \frac{0,47}{(1+354s)} & \frac{0,2}{(1+452s)(1+112s)} \\ \frac{0,87}{(1+350s)(1+2s)} & \frac{0,7}{(1+330s)} & \frac{1,2(1+183,333s)}{(1+405s)(1+71s)} & \frac{0,48(1+32,2917s)}{(1+433s)(1+128s)} \\ \frac{1,24}{(1+337s)} & \frac{0,69}{(1+401s)(1+39s)} & \frac{1,17}{(1+401s)(1+1,6s)} & \frac{0,71}{(1+428s)(1+72s)} \end{bmatrix}$$

Рис.6. Передаточные функции объекта управления для 3х стадий кристаллизации

матрицы Бристоля уменьшены практически на порядок относительно предыдущей конструкции ростовой установки (рис. 5), а диапазон изменения постоянных времени составил 20-30 %.

В результате исследований разработана модель ростовой установки как нестационарного объекта управления с сосредоточенными параметрами в виде матричных передаточных функций, соответствующих трем стадиям ростового цикла (рис. 6).

Четвертая глава посвящена решению проблемы настройки регуляторов и определению задающих воздействий системы управления. С этой целью в среде Labview разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее исследовать качество управления в рассматриваемой многосвязной системе при варьировании коэффициентов диагонального регулятора и параметров матричной передаточной функции объекта. Предложена методика синтеза диагонального ПИД-регулятора, которая основана на определении коэффициентов регуляторов в сепаратных контурах и их корректировке по результатам моделирования всей системы. Дискретные одномерные регуляторы определяются на основе их аналоговых прототипов с учетом целей и задач, стоящих перед многосвязной системой, требуемой точности управления, наличия взаимного влияния между ее каналами, а так же наложенных на систему ограничений. При поиске коэффициентов используются знания о диапазоне изменения параметров передаточной функции объекта, полученные на стадии его исследования.

$$R = \begin{bmatrix} R0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R3 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} R0(s) &= 1 + \frac{1}{60s}, & R2(s) &= 4 \cdot \left(1 + \frac{1}{60s}\right), \\ R1(s) &= 5 \cdot \left(1 + \frac{1}{50s}\right), & R3(s) &= 6 \cdot \left(1 + \frac{1}{200s} + 10s\right) \end{aligned}$$

Рис.7. Регулятор для управления моделью объекта

Согласно предложенной методике определены искомые коэффициенты диагонального ПИД-регулятора (рис. 7). Теоретические расчеты показали, что при представлении объекта матричными передаточными функциями, соответствующим трем стадиям кристаллизации, такая система регулирования обеспечивает управление температурой в режиме роста кристалла с точностью 0.02-0.15°C (среднее квадратическое отклонение σ от входного сигнала) и временем переходных процессов 600-800с при шагах дискретизации до 30 с и рабочем диапазоне управляющих воздействий $\pm 15В$.

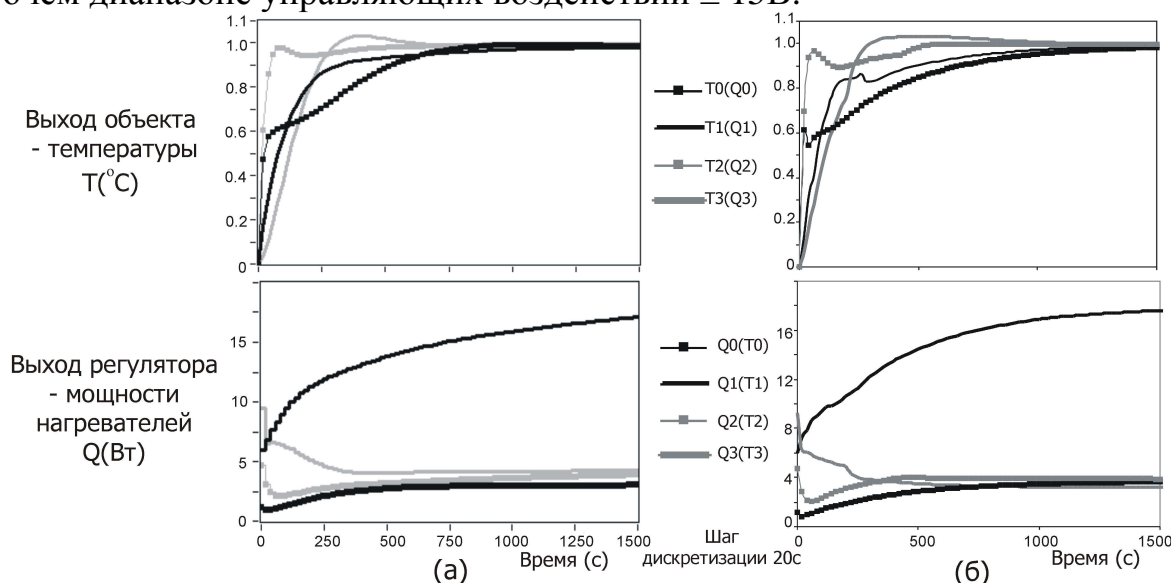


Рис.8. Переходные процессы в многосвязной системе управления при единичных входных воздействиях. Представление объекта моделью с сосредоточенными (а) и распределенными (б) параметрами

Проведены испытания полученной многосвязной системы регулирования на двумерной тепловой модели ростовой установки как объекте управления с распределенными параметрами (рис. 8). По результатам экспериментов выявлено, что поведение замкнутой системы управления при представлении объекта моделью с распределенными параметрами и моделью с сосредоточенными параметрами отличается не более чем на 10 %. Такой результат подтверждает корректность проведенной идентификации объекта и расчетов переходных процессов с помощью разработанного программного обеспечения.

С помощью моделирования процесса управления температурным режимом в ростовой установке проведены исследования объекта с распределенными параметрами и изучена связь температур в точках вокруг растущего кристалла (T_0, T_1, T_2, T_3) с распределением температур внутри зоны кристаллизации. В результате определены уставки температур для выбранного объекта, которые обеспечивают формирование и поддержание на протяжении всего ростового цикла практически плоского по форме фронта кристаллизации на заданном расстоянии от погруженного нагревателя Н0, требуемые значения осевого и радиального градиентов температур при выращивании кристалла германия диаметром 46 мм методом ОТФ со скоростью 20 мм/час.

Проведено сравнение программ управления температурой T_1 на оси кристалла, определенных с помощью одномерной тепловой модели ростовой установки, как это делалось ранее, и ее двумерной модели, как предлагается в настоящей работе (рис. 9). Выявлено, что программы управления значительно отличаются и существенно зависят от геометрии нагревателей и распределения материалов в расчетной двумерной области.

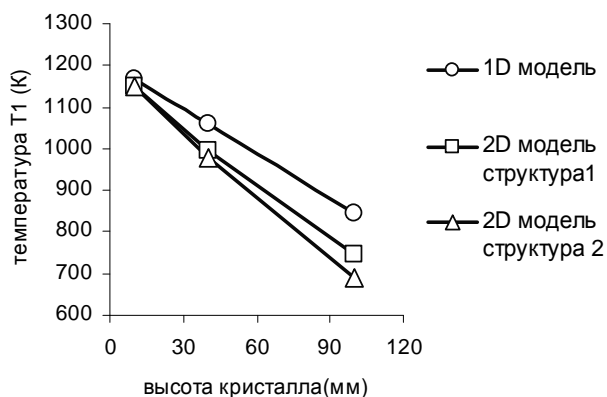


Рис.9. Сравнение программ управления T_1 , определенных на одномерной (1D) и двумерной (2D) моделях

В главе 5 представлены результаты разработки в среде Labview алгоритмического и программного обеспечения (рис. 10), позволяющие реализовать систему управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов. Обеспечена автоматизация работы аппаратного комплекса, осуществляющего измерение до 60 каналов температур, постоянных и переменных напряжений и токов, перемещение штока и осевого нагревателя с помощью асинхронного и шаговых двигателей, формирование напряжения на нагревателях с помощью блоков управления тиристорами. Предложена и реализована процедура автоматической калибровки данных блоков. Программное обеспечение реализует 5 контуров регулирования по ПИД алгоритму с заданным шагом дискретизации для любых выбираемых пар управляемого и управляющего сигнала. Осуществляется обработка и

отображение результатов измерений и управления. Разработан модуль эмуляции режима управления температурой в реальном масштабе времени. Алгоритмическое и программное обеспечение реализует методику визуального измерения полей температур жидкости, основанной на обработке изображения исследуемой области в которой распределены частицы, меняющие свой цвет в зависимости от температуры. Осуществляется измерение геометрических параметров формы мениска на основе фото и видео наблюдения для бестигельной технологии выращивания кристаллов. Обеспечена возможность сохранения и восстановления режима работы системы, защита от нелегального использования программных средств.

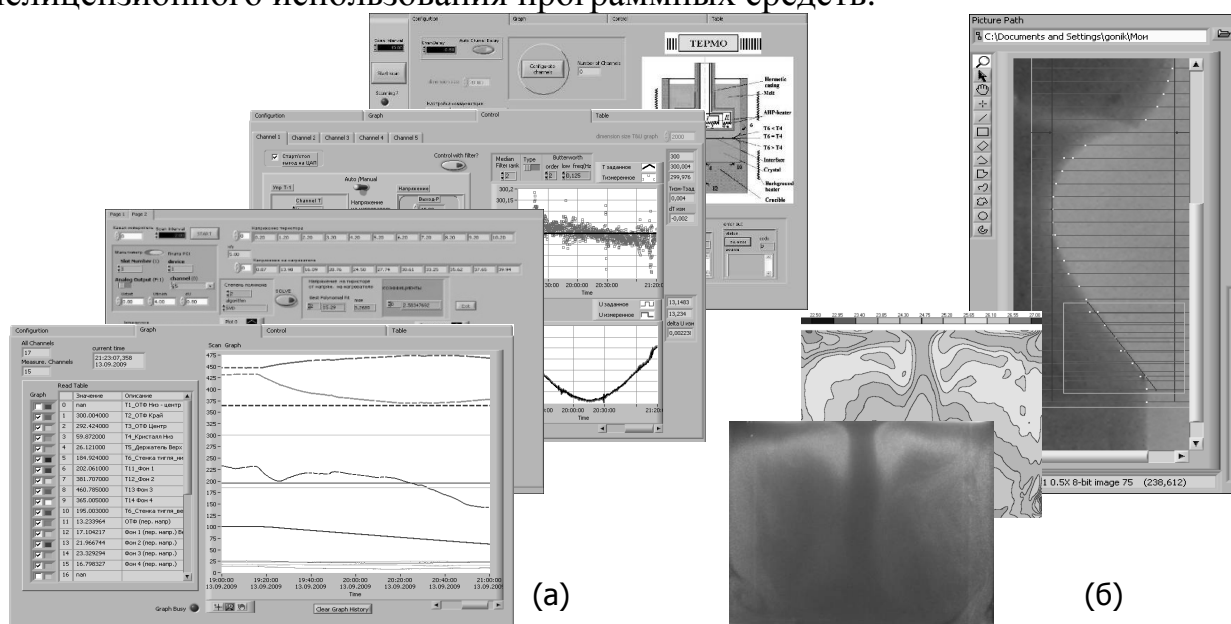


Рис. 10. Программный комплекс, реализующий управление температурным режимом в ростовой установке (а) и визуальные методы его исследования (б)

В целом разработан гибкий программный комплекс, ориентированный на поисковые условия проведения экспериментов, позволяющий использовать взаимозаменяемое мобильное оборудование, и предусматривающий модификацию кода при появлении новых технологических и сервисных задач за счет широкой библиотеки инженерных функций и процедур в Labview.

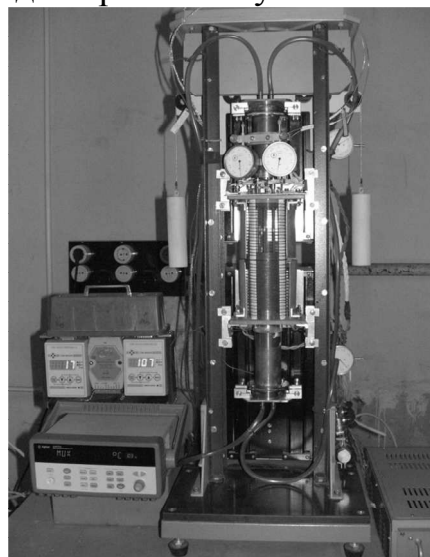
Глава 6 посвящена натурным испытаниям разработанной системы управления. Проведены эксперименты по выращиванию кристаллов в лабораторных ростовых установках (рис.11а), конструкция которых соответствует структуре многомерного объекта управления размерностью 2x2, используемой ранее (рис. 1). Для испытаний многосвязной системы управления с новой структурой, позволяющей регулировать температуру в четырех точках вокруг растущего кристалла (рис. 5 структура 2), специально создана исследовательская установка (рис. 11б), позволяющая выращивать кристаллы в открытой камере при температуре до 500°C.

Проведена серия экспериментов по идентификации натуральных многомерных объектов управления для различных установок выращивания кристаллов.

Аппроксимация пар управления проводилась с помощью разработанного программного обеспечения, отлаженного на модели ростовой установки.



(а) Лабораторная установка



(б) Исследовательская установка

Рис. 11. Установки выращивания кристаллов

Выявлено, что для установок выращивания различных, но близких по размеру кристаллов (CdZnTe \varnothing 40мм, Ge \varnothing 46 мм), параметры передаточной функции объекта управления имеют одинаковый порядок значений. Следовательно, в таких системах могут быть с определенным успехом применены единые коэффициенты ПИД-регуляторов. Так же выявлено, что параметры матричных передаточных функций, определенных на натурном объекте (рис. 12а) и его двумерной тепловой модели (рис. б), имеют один порядок значений. При этом бóльшие постоянные времени диагональных элементов отличаются не более чем на 30 %. Такой результат свидетельствует о соответствии построенной модели натурному объекту и корректно проведенной идентификации с помощью разработанного программного обеспечения. Отличие коэффициентов пропорциональности в передаточных функциях объясняется тем, что в модели в качестве управляющего сигнала использовалась мощность, выделяемая на нагревателе, а в реальной системе – напряжение на нем.

$\frac{3.7(1 + 41.8919s)}{(1 + 420s)(1 + 59s)}$	$\frac{2.8}{(1 + 388s)(1 + 87s)}$	$\frac{3.6}{(1 + 454s)(1 + 80s)}$	$\frac{0.7}{(1 + 203s)(1 + 170s)}$	$R0(s) = 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{50s}\right),$ $R1(s) = 1.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{70s}\right),$ $R2(s) = 1.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{70s}\right),$ $R3(s) = 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{165s} + 30s\right)$
$\frac{1.5}{(1 + 415s)(1 + 93s)}$	$\frac{2.5(1 + 128s)}{(1 + 373s)(1 + 60s)}$	$\frac{1.1}{(1 + 260s)(1 + 10s)}$	$\frac{0.7}{(1 + 320s)(1 + 97s)}$	
$\frac{1.2}{(1 + 500s)(1 + 302s)}$	$\frac{1.6}{(1 + 227s)(1 + 16s)}$	$\frac{2.7(1 + 85.9259s)}{(1 + 460s)(1 + 74s)}$	$\frac{0.96}{(1 + 757s)}$	
$\frac{0.3}{(1 + 600s)}$	0	0	$\frac{1.6}{(1 + 550s)(1 + 110s)}$	
(а)				(б)

Рис. 12. Передаточная функция объекта на начальной стадии кристаллизации (а) и регулятора (б) натурной системы управления

С помощью разработанного алгоритмического и программного обеспечения и согласно предложенной методике проведена настройка диагональных ПИД-

регуляторов с постоянными коэффициентами для систем управления объектом с новой и старой структурами. При настройке использованы данные о диапазоне изменения параметров передаточной функции объекта в течение ростового цикла, полученные на модели. Обнаружено, что коэффициенты регуляторов (рис.12б и рис. 7), обеспечивающие одинаковое качество управления натурным объектом (рис. 12а) и его тепловой моделью (рис. 6), имеют один порядок значений, при этом пропорциональные и интегральные члены отличаются не более чем на 20 %, дифференциальные примерно в 3 раза.

Приведены результаты натуральных ростовых экспериментов. Применение новых регуляторов для системы управления со старой конструкцией установки и структурой объекта позволило повысить точность управления температурами в двух точках на оси растущего кристалла (среднее квадратическое отклонение σ от входного сигнала) с 1.5-2 °С до 0.2-0.4 °С, время переходных процессов уменьшить с 3000с до 700-900с. Применение разработанной многосвязной системы с новой структурой объекта позволило обеспечить управление температурами в четырех точках вокруг растущего кристалла с точностью σ 0.03-0.18С и временем переходных процессов 600 с (рис. 13).

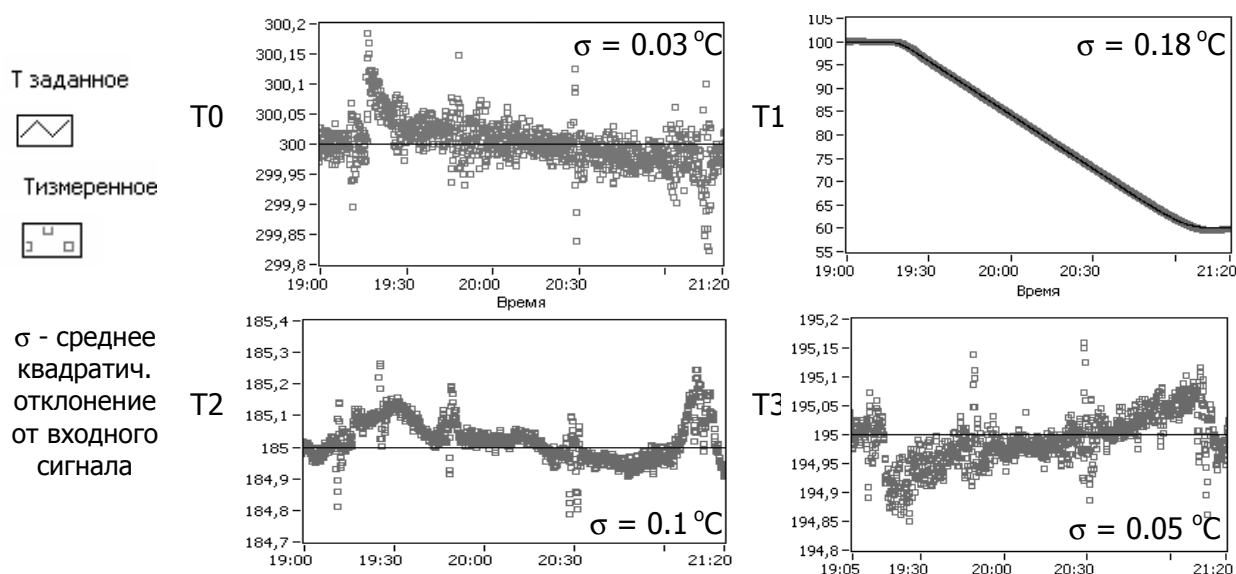


Рис. 13. Результаты управления температурой в четырех точках вокруг растущего кристалла в исследовательской установке

Результаты экспериментов показали, что стабилизация температур на границах зоны кристаллизации в точка T0, T2, T3 и охлаждение T1 по линейной функции происходит при изменении температур возле удаленных фоновых нагревателей (T11, T12, T13, T14 на рис. 1) по нетривиальным траекториям. Тем самым делавшиеся ранее предположения о возможности реализации заданного температурного режима в зоне кристаллизации с помощью их поддержания или изменения с постоянным темпом не нашли своего подтверждения.

Высокая точность управления температурным режимом позволила исключить основные причины образования дефектов при росте кристаллов Ge, CdZnTe, CsI и получить образцы однородных материалов с высокими характеристиками. Так для кристалла $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ плотность дислокаций по

ямкам травления на плоскости (110) составила $5 \times 10^3 \text{ см}^2$, что существенно ниже, чем для таких кристаллов, получаемых из расплава традиционными способами. Разброс содержания Zn не превысил $\pm 0.5\%$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате проведения теоретических и практических исследований была достигнута цель работы, выполнены все поставленные задачи. Основными выводами диссертационной работы являются следующие:

1. Разработанные методика и средства позволяют осуществить регулирование температур в нескольких точках вокруг растущего кристалла с точностью $0.03\text{-}0.18^\circ\text{C}$ на протяжении всего процесса кристаллизации с помощью многосвязной системы автоматического управления на базе сепаратных ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами.

2. Определяющим этапом методики является процедура выбора расположения нагревателей и термодатчиков, а так же комбинации пар управления между ними как структуры многомерного объекта управления. Критерием выбора является обеспечение достаточно малого взаимного влияния каналов и изменения свойств нестационарного объекта управления в течение всего ростового цикла.

3. В установках выращивания кристаллов традиционным и модифицированными методами Бриджмена рекомендуется осуществлять охлаждение системы расплав-кристалл с помощью увеличенного относительно остальных нижнего нагревателя по показаниям датчика, расположенного в центре доньшка тигля, а стабилизацию температур вблизи фронта кристаллизации - с помощью ближайших к ним нагревателей, в том числе и погруженного в расплав. При этом важно, чтобы один из датчиков был размещен около стенки тигля на желаемом уровне прохождения фронта кристаллизации.

4. Разработанное алгоритмическое, математическое и программное обеспечение позволяет построить адекватную модель процесса управления температурным режимом в ростовой установке, функционирующую в ускоренном масштабе времени, для класса объектов, в которых не требуется учитывать перенос тепла излучением в материале и конвекцией в расплаве, или они могут быть адекватно описаны эффективными коэффициентами теплопроводности.

5. Модель процесса управления и разработанные программные средства позволяют провести исследование многомерного, нестационарного объекта управления, определить его линеаризованную модель в виде матричных передаточных функций для нескольких стадий кристаллизации, синтезировать систему регулирования, с ее помощью найти программу управления объектом, которая обеспечивает реализацию требуемого режима кристаллизации, и использовать результаты для разработки натурной системы управления.

6. Результаты идентификации установок выращивания кристаллов диаметром 40-50 мм методом погруженного нагревателя и их тепловых моделей показали, что динамика объекта определяется в большей степени

конструкцией установки, чем свойствами кристаллизуемого материала, а изменение в процессе роста преимущественно претерпевают его диагональные связи, чем прямые. Таким образом, в схожих по конструкции установках могут с определенным успехом использоваться одинаковые коэффициенты ПИД-регуляторов.

7. Среда программирования Labview позволяет разработать алгоритмическое и программное обеспечение для проектирования и реализации системы автоматического управления температурным режимом в ростовой установке как мобильного, легко адаптируемого под новые задачи и оборудование, программно-аппаратного комплекса.

8. Метод выращивания кристаллов, при котором осуществляется регулирование температур вблизи фронта кристаллизации, позволяет получить материалы более совершенные по структуре и однородные по составу, чем при традиционных способах управления температурным режимом в ростовых установках. Так для монокристалла $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ плотность дислокаций не превышает $5 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$, разброс содержания Zn – $\pm 0.5\%$.

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Гоник М. М., Боевкин В. И. Повышение точности управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов // Управление большими системами. 2010. № 1. С.211-229.

2. Combined Thermal and Control Model for AHP Crystal Growth / M.M. Gonik [et al.] // Abstracts of 6th International Workshop on Modeling in Crystal Growth. Lake Geneva (Wisconsin), 2009. P. 324.

3. Пат. № 2357023 РФ. Способ управления процессом выращивания кристаллов из расплава / М.М. Гоник [и др.]; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. 4 с.

4. Гоник М.А., Гоник М.М., Томсон А.С. Влияние условий кристаллизации на однородность состава монокристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ // Неорганические материалы. 2009. Т. 45, № 10. С. 1182-1191.

5. Гоник М.М., Боевкин В.И., Низкая Т.В. Программно-технические средства для исследования и управления процессами теплопереноса при росте кристаллов // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: Сборник трудов Российской конференции с международным участием. Москва, 2008. С. 372-379.

6. Действующий макет для выращивания монокристаллов бестигельным ОТФ методом / М.М. Гоник [и др.] // Тезисы докладов XIII Национальной конференции по росту кристаллов. Москва, 2008. С.190.

7. Контроль за формой мениска расплава при управлении ростом кристаллов бестигельным ОТФ методом / М.М. Гоник [и др.] // XVIII Петербургские чтения по проблеме прочности и роста кристаллов (методом Степанова): Сборник трудов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2008. С. 83-86.

8. Гоник М.М., Боевкин В.И., Гоник М.А. Программно-аппаратный комплекс для управления свойствами выращиваемых кристаллов методом ОТФ // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством: Сборник трудов Международной теплофизической школы. Тамбов, 2007. С. 67-71.

9. Development of a model for on-line control of crystal growth by the AHP method / M.M. Gonik [et al.] // Journal of Crystal Growth. 2007.Vol. 303 (2007). P.180-186.

10. Gonik M.M., Boevkin V.I., Lomokhova A.V. Design of control system for growing crystals with desired properties [электронный ресурс] // Proceeding of the 3rd International Scientific Conference on Physics and Control. Potsdam (Germany), 2007. URL: <http://lib.physcon.ru/?item=1261> (дата обращения: 10.12.2010)

11. Автоматическая система управления на базе технологий National Instruments/ М.М. Гоник [и др.] // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Москва, 2005. С. 287-290.

12. Гоник М.М., Алексич Е.. Визуальное измерение полей температур жидкости // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Москва, 2005. С.229-232.

13. Разработка установки выращивания кристаллов методом ОТФ для получения высоко летучих материалов/ М.М. Гоник [и др.] // Рост монокристаллов и тепломассоперенос: Сборник трудов 6-ой Международной конференции. Обнинск , 2005. Т.1. С.178-187.

14. Gonik M.A., Gonik M.M. Application of visualization technique for study and control of heat and mass transfer in crystal growth// Abstracts of International Conference on Single crystals and their application. Alexandrov (Russia), 2004. P.139-140.