

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

Институт проблем машиностроения

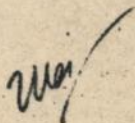
На правах рукописи

Шерышев Валерий Павлович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОПЕРЕНОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ
СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ЕМКОСТИ

05.14.05 - теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Харьков - 1996



Работа выполнена в институте проблем машиностроения
НАН Украины и Институте теоретической и прикладной
математики НАН Республики Казахстан.

Научный консультант: член-корреспондент НАН Украины
доктор технических наук, профессор
Мацевитый Юрий Михайлович.

Официальные опоненты: доктор технических наук, профессор
Симбирский Дмитрий Федорович,
доктор технических наук, профессор
Гаркуша Иван Данилович,
доктор технических наук, профессор
Маляренко Виталий Андреевич.

Ведущая организация: Научно-исследовательский
технологический институт
приборостроения, Минпромаш
Украины, г. Харьков.

Защита состоится " 4 " июля 1996 г. в 14
часов в аудитории 11 этажа на заседании специализированного
ученого совета Д 02.18.03 в Институте проблем машиностроения
НАН Украины по адресу: 310046, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
проблем машиностроения НАН Украины по адресу: 310046, г.
Харьков, ул. Пожарского, 2/10.

Автореферат разослан " 1 " июня 1996 г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

Дедков Г.В.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Моделирование и идентификация тепловых процессов представляют собой два последовательных этапа в решении ряда проблем, с которыми приходится иметь дело при исследовании процессов молекулярного теплопереноса в твердом теле. Этап моделирования включает в себя построение структуры математической модели и решение прямой задачи теплопроводности (ПЗТ) по заданным условиям однозначности. На этапе идентификации решается обратная задача (ОЗТ), в которой по результатам термометрирования объекта исследований определяются неизвестные или неточно заданные условия однозначности.

Исследование процессов теплопереноса в системах тел и телах с поверхностными источниками теплоты имеет фундаментальное теоретическое и прикладное значение. Основные трудности, связанные с проведением таких исследований традиционными методами математического моделирования обусловлены наличием резких контрастов геометрических размеров и теплофизических характеристик (ТФХ) соседних слоев, неоднородностью температурных полей и отсутствием достоверной информации о ТФХ и условиях теплообмена между телами и окружающей средой.

Одним из наиболее распространенных методов решения краевых задач теплопроводности является метод ⁰конечных разностей (МКР), заключающийся в переходе от исходной краевой задачи теплопроводности к ее разностному аналогу.

Погрешность приближения решения исходной задачи сеточной функцией, определенной в узлах расчетной сетки,

зависит от параметров сетки (ее шагов), температурных градиентов и ТФХ исследуемых тел. Поэтому при интенсивных тепловых воздействиях, когда в теле возникают большие температурные градиенты, и при контрасте геометрических размеров и ТФХ, возникает необходимость в построении густых неравномерных расчетных сеток, что влечет за собой большие затраты вычислительных ресурсов (объема оперативной памяти и времени центрального процессора), и, что в конечном итоге, предъявляет жесткие требования к средствам вычислительной техники, используемым для моделирования и оптимизации тепловых процессов. Задачи с такого рода вычислительной жесткостью могут быть успешно решены с применением системного подхода, базирующегося на концепции сосредоточенной емкости.

В диссертации разработаны методы моделирования и идентификации процессов теплопереноса и рассмотрены вопросы создания новой информационной технологии теплофизических исследований, основанной на концепции сосредоточенной емкости и ориентированной на применение современной цифровой, аналоговой и гибридной вычислительной техники.

Работа выполнялась в отделе моделирования тепловых и механических процессов Института проблем машиностроения НАН Украины и в лаборатории математических проблем теории переноса Института теоретической и прикладной математики НАН Республики Казахстан в период с 1979 по 1996гг. в соответствии с планами научно-исследовательских работ: "Разработка методов и средств идентификации и диагностики технических характеристик теплотехнических установок и оборудования" (№ ар. 01880019600), "Теплообмен в энергетических установках, технологических

процессах и объектах радиоэлектроники" (№ г.р. 01910019862), темы № 15, выполненной Институтом теоретической и прикладной математики НАН РК по постановлению Президиума НАН РК № 3 от 3.04.86 г.; тем, выполненных НПО "Алтайский НИИ технологии машиностроения: АТП-2/50-82- "Разработка математической модели процесса индукционной наплавки с целью его оптимизации" (№ г.р. 01822019076), СВП-25/50-79- "Исследование и разработка мероприятий по совершенствованию технологического процесса индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин для эффективного использования энергонасыщенных агрегатов" (№ г.р. 7906459).

Цель работы. Создание на основе концепции сосредоточенной емкости единой методологической базы, комплекса методов и средств решения прямых и обратных задач теплопроводности, возникающих при моделировании и идентификации тепловых процессов, и исследование с их помощью теплопереноса в системах тел с резким контрастом геометрических и теплофизических характеристик и телах, подверженных интенсивному нагреву поверхностными источниками теплоты.

Основные задачи. Построение математических моделей процессов теплопереноса в телах с поверхностными источниками теплоты и системах тел с резким контрастом геометрических характеристик и ТФХ. Разработка методов: интерпретации результатов измерения нестационарных температур и идентификации тепловых потоков и теплофизических характеристик материалов. Построение иерархических моделей теплопереноса и разработка методов и средств их реализации. Исследование теплопереноса в системах: шихта-металл при высокочастотном нагреве; полупроводник-диэлектрик при

активационном отжиге; кристалл-электроды в процессе работы мощных полевых транзисторов. Идентификация процессов теплопереноса при индукционном нагреве металлов, индукционной наплавке твердых сплавов и активационном отжиге полупроводниковых пластин. Оптимизация конструкции полевого транзистора по критерию минимального перегрева.

Научная новизна. В диссертационной работе получены новые результаты, которые выносятся на защиту. Впервые разработаны:

- новая информационная технология теплофизических исследований, включающая: метод моделирования тепловых процессов-метод термически тонкого слоя (МТТС), метод интерпретации результатов измерения нестационарных температур-теплофизическое сглаживание, метод идентификации тепловых потоков градиентно-калориметрического типа и метод идентификации ТФХ материалов;

- иерархические модели процессов теплопереноса, методы и средства их реализации;

- метод идентификации процессов теплопереноса при индукционном нагреве металлов;

- модели теплопереноса в системе шихта-металл при индукционной наплавке твердых сплавов, в полупроводниковых пластинах и кристаллах при активационном отжиге и в процессе работы мощных полевых транзисторов интегральных схем;

- методы оптимизации процессов индукционной наплавки твердых сплавов и активационного отжига полупроводниковых пластин;

- метод оптимизации конструкции мощного полевого транзистора;

-трехслойные измерители-преобразователи теплового потока градиентно-калориметрического типа;

-метод одновременной идентификации тепловых потоков и теплофизических характеристик материалов по результатам одного нестационарного теплофизического эксперимента.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью математических постановок прямых и обратных задач теплопроводности, рассмотренных в диссертационной работе, устойчивостью вычислительных алгоритмов, использующих законы сохранения, а также сравнением результатов численного и натурального экспериментов.

Теоретическая ценность работы заключается в создании новой информационной технологии исследования молекулярного теплопереноса в твердом теле, в разработке методов: иерархического моделирования тепловых процессов, метода термически тонкого слоя одновременной идентификации тепловых потоков и ТФХ материалов и теплофизического сглаживания измеренных температур.

Практическая ценность состоит в эффективности разработанных методов моделирования и идентификации тепловых процессов, основанных на концепции сосредоточенной емкости, отличающихся достаточной простотой реализации, адекватностью и адаптируемостью к конфигурации используемой вычислительной среды.

Внедрение полученных результатов в практику теплотехнических исследований позволяет достигнуть следующих показателей:

- повышение чувствительности первичных преобразователей при измерении нестационарных температур;

- определение температур в точках, недоступных для непосредственного наблюдения;
- идентификация тепловых потоков в случае больших значений отношения шум/сигнал;
- одновременное определение теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности по данным одного нестационарного теплофизического эксперимента;
- повышение эффективности обработки теплофизической информации с использованием ПЭВМ и специализированных вычислителей.

Полученные результаты использовались: в НПО "Алтайский НИИ технологии машиностроения" (г. Барнаул) при создании технологии индукционной наплавки деталей почвообрабатывающих машин и при разработке серии специализированных генераторов для наплавки, в НИИ Микроприборов (г. Москва) при отработке технологии активационного отжига арсенид-галлиевых полупроводниковых пластин и создании установок серии "Импульс", в Институте металлургии и обогащения НАН Республики Казахстан при разработке системы управления процессом вакуумной пироселекции полиметаллических концентратов, в НИИ вакуумных технологий (г. Барнаул) при исследовании теплофизических характеристик композиционных покрытий, полученных методом электронно-лучевой наплавки, и при разработке установки комплексного определения теплофизических характеристик материалов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной школе-семинаре "Тепло-массообмен в электрических контактах" (Алма-Ата, 1979г.), на Всесоюзной школе-конференции "Вычислительные методы газовой динамики и

тепло-массообмена" (Алма-Ата, 1980г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Применение токов высокой частоты в электротермии" Ленинград, 1981г.), на Всесоюзной школе-семинаре "Управление распределенными системами с подвижным воздействием" (Куйбышев, 1983г.), на конференции "Состояние и перспективы упрочнения деталей машин" (Москва, 1986г.), на 3-ей Всесоюзной конференции "Условно-корректные задачи математической физики и анализа" (Алма-Ата, 1989г.), на 1-ой Международной конференции "Идентификация динамических систем и обратные задачи" (Суздаль, 1990г.), на Всесоюзной конференции "Математическое моделирование в энергетике" (Киев, 1990г.), на научно-техническом семинаре "Математическое моделирование процессов и аппаратов" (Иваново, 1990г.), на научно-технической конференции "Проблемы диагностики газотурбинных двигателей и их элементов" (Рыбачье, 1990г.), на конференции "Перспективы развития и применения средств ВТ для моделирования и автоматизированного исследования" (Москва, 1991г.), на Международной конференции "Тепло-и массообмен в технологических процессах" (Юрмала, 1991г.), на Международном семинаре "Теплообмен при электронагреве" (Лодзь, 1991г.), на Международном Форуме по тепло-массообмену (Минск, 1992г.), на Международном симпозиуме по электрическим контактам (Алма-Ата, 1993г.), на 2-ой Международной конференции "Идентификация динамических систем и обратные задачи" (Санкт-Петербург, 1994г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 26 научных работ, из которых одна монография, 18 статей и три авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованных источников из 182 _____ наименований, 33 _____ рисунков, 9 таблиц, 272 страниц основного текста, трех приложений, всего 321 страниц.

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены процессы молекулярного теплопереноса в твердых телах и их математические модели; проведен анализ методов и средств моделирования тепловых процессов; дан обзор существующих методов моделирования тепловых процессов и показана целесообразность разработки нетрадиционных методов моделирования и идентификации теплопереноса в телах с поверхностными источниками теплоты и системах тел с резким контрастом геометрических и теплофизических характеристик, основанных на концепции сосредоточенной емкости.

Во второй главе рассмотрено понятие сосредоточенной емкости. Впервые это понятие было введено А.Н. Тихоновым применительно к исследованию нестационарных тепловых процессов в стержне, на одном из торцов которого помещена сосредоточенная масса (шар с теплопроводностью, во много раз превосходящей теплопроводность материала стержня). В этой работе сосредоточенная емкость моделировалась граничными условиями с производной от температуры порядка m , совпадающего с порядком основного уравнения теплопроводности:

$$\sum_{i=1}^m a_i \frac{\partial^i T}{\partial x^i} = f(t) - a_0 T. \quad (1)$$

Вместе с тем из теории теплопроводности известно, что второй порядок уравнения теплопереноса по пространственной переменной эквивалентен первому порядку по временной переменной. Это обстоятельство было использовано Ю.А. Митропольским, Л.П. Нижником и В.Л. Кульчицким при исследовании ими теплового состояния тела, подверженного индукционному нагреву токами высокой частоты. Ими впервые был дан качественный анализ нелинейных краевых задач теплопроводности с производной по времени в граничном условии. В последствии эти задачи исследовались в работах К. Ректориса и У.М. Султангазина.

Однако, вышеупомянутые граничные условия с производной по времени не получили широкого распространения в задачах моделирования тепловых процессов. Это прежде всего было связано с тем, что при переходе от исходной математической постановки задачи индукционного нагрева к модели с сосредоточенной емкостью допускалась погрешность, связанная с отбрасыванием тонкого приповерхностного слоя.

При решении же обратных задач теплопроводности, и особенно задач идентификации, закругление, вносимое переходом к модели с сосредоточенной емкостью, приносит положительный эффект в устойчивость процесса идентификации по отношению к случайной ошибке измеренных температур. Это послужило отправной точкой для введения Ю.М. Мазевитым при решении обратных задач понятия регуляризации закруглением. Именно такая регуляризация позволила применить сравнительно недорогие средства аналоговой и гибридной вычислительной техники к решению широкого спектра прикладных задач.

Задачи идентификации тепловых процессов, как правило, некорректны. Некорректность обусловлена отсутствием непрерывной зависимости их решений от исходных данных. Исследованию некорректных обратных задач теплопроводности посвящены работы О.М.Алифанова, Е.А.Артихина, Дж. Бека, В. Блакузла, Л.А. Коздобы, Ю.М.Мацевитого, Д.Ф. Симбирского и многих других отечественных и зарубежных авторов.

В настоящей работе показана корректность прямой задачи теплопроводности и условная корректность обратной задачи теплопроводности при использовании в постановке этих задач моделей с сосредоточенной емкостью. В данном случае корректность обусловлена тем, что путем перехода от исходной математической постановки задачи теплопереноса к модели с сосредоточенной емкостью обеспечивается априорное сужение множества допустимых решений обратной задачи до компактного множества. Попадание на заданный компакт обеспечивается предварительной обработкой исходной информации о температурном поле исследуемого объекта, использующей теплофизическое сглаживание.

Понятие "теплофизическое сглаживание" базируется на инерционности процессов распространения теплоты в твердом теле. Математически это выражается решением задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dT_*}{dt} - \beta T_* = \varphi(t), \quad T(0) = T_0. \quad (2)$$

Здесь ϵ - величина условного заглубления точки термометрирования в исследуемый образец; β и φ - параметры, определяемые величиной ϵ , температуропроводностью и толщиной образца.

На практике теплофизическое сглаживание реализуется с помощью инеционного звена первого порядка (аналоговый вариант).

Принципиально теплофизическое сглаживание заключается в следующем. Сначала от исходной математической модели явления теплопереноса осуществляется переход к модели с сосредоточенной емкостью. Измеренная температура поверхности тела отождествляется со среднеинтегральной температурой выделенного в теле приповерхностного слоя толщины δ . Рассматривается тепловое взаимодействие δ -слоя (присоединенной массы) с основной массой тела. При этом для определения теплового потока может быть использовано граничное условие, содержащее производную по времени. Эта производная характеризует тепловую инерцию слоя, что с математической точки зрения сужает область допустимых решений обратной задачи теплопроводности до компакта и делает математическую постановку задачи идентификации тепловых потоков условно-корректной (корректной по Тихонову).

Третья глава посвящена вопросам построения и реализации иерархических моделей теплопереноса с сосредоточенной емкостью. Согласно концепции сосредоточенной емкости рассматриваемый теплофизический объект (исходная сложная система) может быть представлен в виде совокупности более простых теплофизических объектов (подсистем), обладающих различными тепловыми свойствами. В качестве основы для такого представления может быть использовано понятие термически тонкого слоя.

Так, например, пластина может быть представлена совокупностью чередующихся слоев различной термической толщины. Тепловое состояние термически тонкого тела (слоя)

описывается функцией времени, являющейся решением обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка (балансное соотношение), в правую часть которого входят тепловые потоки, передаваемые от соседних обычных в термическом отношении слоев. В свою очередь функции времени, являющиеся решениями соответствующих задач Коши, используются в качестве граничных условий первого рода при решении краевой задачи для одномерного уравнения теплопроводности, описывающего теплоперенос в элементарном слое. Здесь осуществляется пересчет граничных условий первого рода в эквивалентные граничные условия второго рода, т.е. решается так называемая псевдообратная задача теплопроводности, которая, согласно работам О.М. Алифанова и Дж. Века, является корректной.

Степень детализации исследования процессов теплопереноса позволяет ввести уровни иерархии. Первый уровень-задача Коши (теплоперенос только во временной области, нульмерная модель), второй уровень-первая краевая задача для одномерного уравнения теплопроводности (теплоперенос в пространственно-временной области только вдоль осей абсцисс, ординат или аппликат, одномерная модель), третий уровень- первая краевая задача для двумерного уравнения теплопроводности (теплоперенос в пространственно-временной области только в плоскостях XOY , XOZ , ZOY и т.д., двумерная модель) и т.д.

Разбиение моделируемой области на подобласти и использование иерархических моделей еще не обеспечивают эффективности вычислительного процесса. Повысить эффективность вычислительного алгоритма можно путем рационального выбора способов представления информации в каждой структурной

единице модели соответствующего уровня. Наибольшего эффекта можно достичь, используя комбинированные аналоговые симуляторы тепловых процессов, персональные ЭВМ, а также методы параллельных и гибридных вычислений.

Предложенный в работе подход к построению иерархических моделей теплопереноса с сосредоточенной емкостью позволяет подготовить задачу к решению на многопроцессорных вычислительных комплексах. При этом каждый из представленных уровней иерархии может быть реализован как на базе цифровых, так и аналоговых непрерывных или сеточных процессоров.

Идентификация параметров иерархической системы моделей является обязательным этапом исследований. В данной главе на примере теплового взаимодействия двух эталонных тел с исследуемым образцом (пластиной, заключенной между двумя эталонными телами), ТФХ которого неизвестны, показана возможность одновременного определения теплофизических характеристик образца и внешних тепловых воздействий.

Задача решается с применением двухуровневой иерархической системы моделей с сосредоточенной емкостью. При помощи термически тонких слоев толщины ϵ эталонные и исследуемый образец отделяются друг от друга. Два других термически тонких слоя толщины $\epsilon/2$ отделяют эталонные тела от внешней среды. Таким образом, осуществляется переход от исходной трехслойной системы к модифицированной семислойной структуре

Первый уровень иерархической системы моделей теплопереноса представляют четыре задачи Коши вида:

$$\epsilon c \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^n q_i, \quad \bar{T}(0) = T_0, \quad (3)$$

где \bar{T} -среднеинтегральная температура термически тонкого слоя, T_0 -начальная температура системы, $m=2$.

На втором уровне решаются первые краевые задачи:

$$\begin{aligned} c(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad 0 < x < l_i, \quad t > 0, \\ T_i(0, t) &= \bar{T}_{i-1}, \quad T_i(l_i, t) = \bar{T}_i(t), \\ T_i(x, 0) &= T_0, \quad (i=1, 2, 3), \quad 0 \leq x \leq l_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Пересчет измеренных температур в среднеинтегральные температуры термически тонких слоев производится по формуле:

$$\bar{T}(t_{k+1}) = \bar{T}(t_k) \exp(-\beta\tau) + (1 - \exp(-\beta\tau)) \hat{T}(t_k), \quad (5)$$

где \hat{T} измеренная температура; $\tau = t_{k+1} - t_k$, t_k -текущий момент времени.

Идентификация осуществляется в следующем порядке. Сначала по результатам термометрирования вычисляются тепловые потоки, проходящие через поверхности эталонных тел. При этом решаются псевдообратные задачи теплопроводности. После этого решается задача одновременного определения теплопроводности и удельной теплоемкости образца по идентифицированным на предыдущем этапе тепловым потокам и измеренным температурам поверхности (вывод о возможной корректной постановке такой ОЗТ сделан в работах Н.В. Музылева). Погрешность идентификации параметров теплопереноса при этом регламентируется погрешностью интерпретации измеренной температуры $\Delta^{(k)}$, удовлетворяющей неравенству:

$$\Delta^{(k)} < (1 - \exp(-k\beta\tau)) \Delta_T, \quad (6)$$

где Δ_T -погрешность измерения температуры.

Четвертая глава посвящена разработке методов идентификации тепловых потоков и ТФХ материалов. Для определения локальных тепловых потоков и ТФХ материалов методами обратных задач теплопроводности используются данные о температуре поверхности исследуемых образцов. При контактном измерении температуры, например, с помощью термопары, происходит нарушение первичного температурного поля исследуемого объекта, что является основной причиной возникновения в измерительном сигнале дополнительной аддитивной составляющей. Кроме того по мере прохождения измерительного сигнала по каналам вторичного измерительного прибора на него оказывают влияние шумы, имеющие случайный характер, и являющиеся характеристиками отдельных блоков измерительной системы. Поэтому измерительная информация перед непосредственным использованием в качестве дополнительной информации о температурном поле при решении задач идентификации должна быть подвергнута предварительной обработке-теплофизическому сглаживанию.

Практическая реализация методов идентификации заключается в разработке первичных измерителей-преобразователей теплового потока. На основе МТТС разработан трехслойный измеритель тепловых потоков (ИТП) (рис. 1а), состоящий из основного (рабочего) слоя 1 и двух термически тонких пластин 2 со встроенными внутрь них датчиками температуры (термопарами А, В). При воздействии на поверхность ИТП измеряемых тепловых потоков q_1 и q_2 в нем формируется нестационарное температурное поле. По причине того, что слои являются термически тонкими, их температуры не зависят от пространственных координат и определяются средними по их

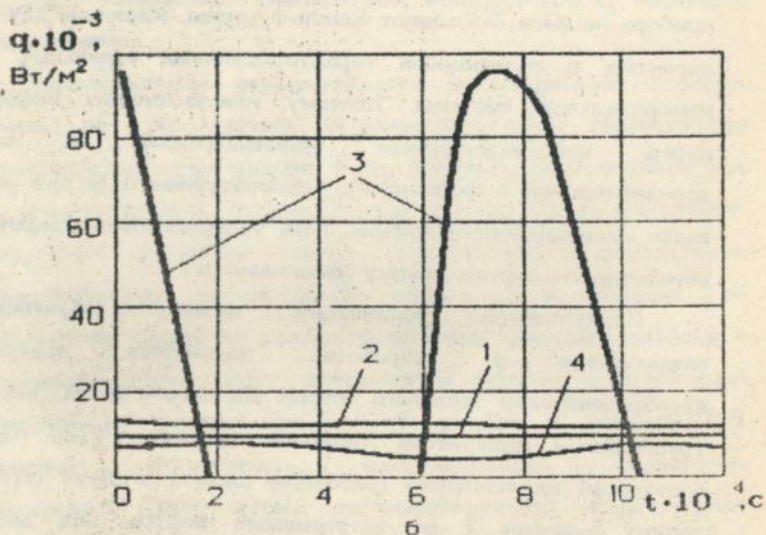
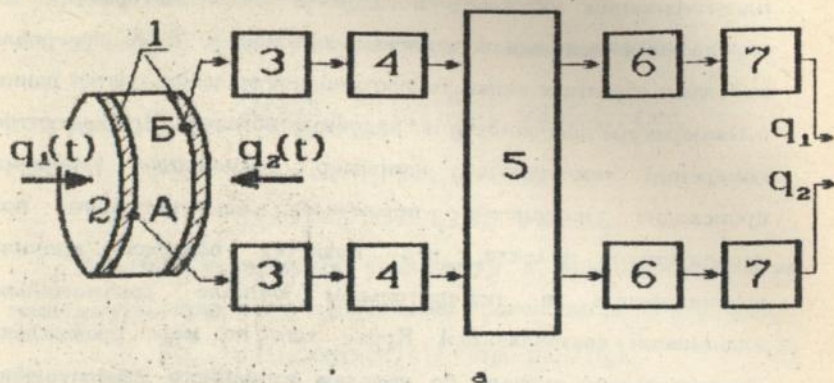


Рис. 1. К идентификации теплового потока:

- а — блок-схема процесса идентификации;
- б — результаты численного эксперимента по определению теплового потока

толщине значениями. Эти температуры измеряются термодарами. Пропорциональные измеренным температурам сигналы подаются через усилители 3 на входы аналоговых (2) или цифровых (5) фильтров 4. Теплофизически сглаженные измерительные сигналы подаются на вход вычислителя 5, осуществляющего путем реализации модельных уравнений (4) расчет температурного поля рабочего слоя тепломера. После этого сглаженные сигналы дифференцируются устройством 6. Сумматоры 7 реализуют соотношения вида (3), исходя из которых вычисляются искомые тепловые потоки q_1 и q_2 .

В приложении к работе приведены расчеты, подтверждающие эффективность процесса идентификации локального теплового потока, основанного на концепции сосредоточенной емкости. Проведено исследование влияния частоты и амплитуды аддитивной синусоидальной помехи на процесс идентификации. На рис. 16 представлены результаты одного из таких экспериментов. Здесь использовано аналитическое решение второй краевой задачи теплопроводности. Кривая 1 - исходное значение теплового потока, 2 - результат идентификации теплового потока по точным значениям измеренных температур, 3 и 4 - результаты идентификации теплового потока по зашумленным и сглаженным данным.

Метод термически тонкого слоя оказывается эффективным также в решении задачи одновременной идентификации ТФХ материалов λ и c по результатам одного теплофизического эксперимента (с теоретической точки зрения этот вопрос рассмотрен в третьей главе).

Перед началом измерений формируется многослойная система, включающая исследуемый образец и два прилетающих к

нему вплотную трехслойных тепломера. Система помещается в теплоизмерительную ячейку с управляемыми нагревателями. Осуществляется предварительная настройка блока управления нагревателями, приведение усилителей, сглаживающих фильтров и вычислителей теплового потока в исходное состояние. После этого система переводится в активный режим измерений.

Сигналы от первичных измерителей температуры (термопар) с выходов теплоизмерительной ячейки поступают на входы усилителей и через сглаживающие фильтры, реализующие теплофизическое сглаживание, передаются на входы вычислителей, осуществляющих идентификацию тепловых потоков. Далее по измеренным температурам и вычисленным тепловым потокам осуществляется определение ТФХ исследуемого образца. Устройство управления нагревателями на основе заданных программ изменения температуры и теплового потока во времени осуществляет выработку управляющего сигнала и его передачу на вход блока управляемых нагревателей. Нагрев осуществляется в соответствии с программой нагрева, приведенной на рис. 2, что позволяет при идентификации ТФХ, зависящих от температуры, пользоваться линейным на каждом из рассмотренных температурных интервалах уравнением теплопроводности. По окончании нагрева сигнал начала вычислений передается блоку управления вычислительным процессом, в котором собственно и вычисляются искомые ТФХ материалов λ и c .

Еще раз отметим, что существенную роль при этом играет понятие термически тонкого слоя. Под таковым понимается слой, изменением температуры которого по его толщине вследствие его малой толщины или большой теплопроводности можно пренебречь.

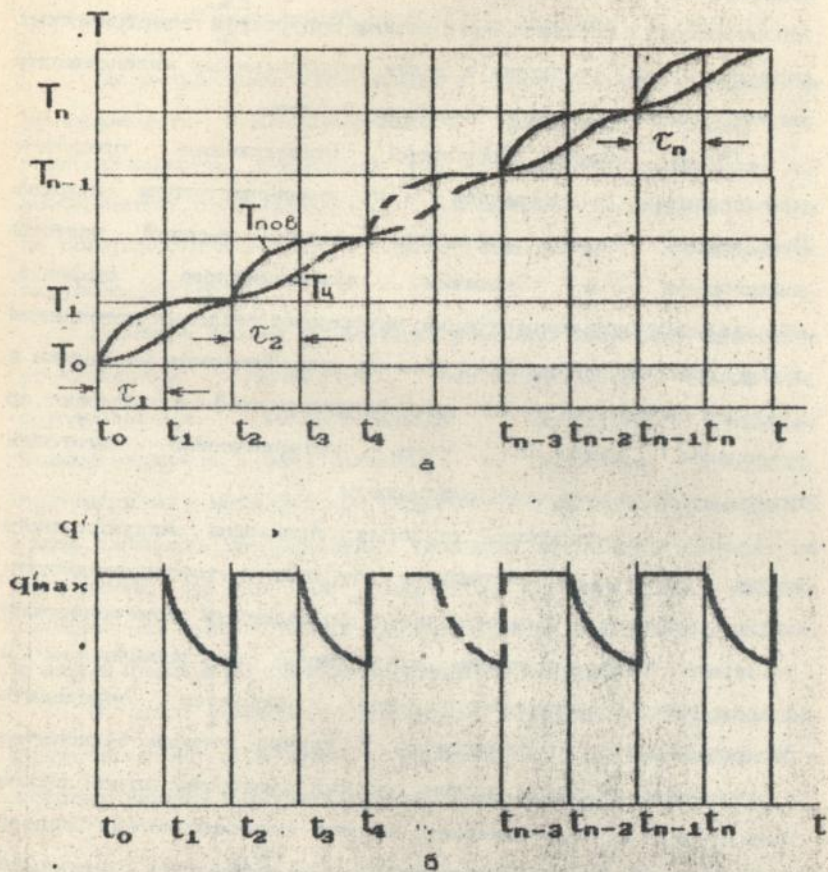


Рис. 2. Программа нагрева: а — изменение температуры; б — изменение теплового потока

В главах с пятой по восьмую включительно показана эффективность применения моделей с сосредоточенной теплоемкостью к исследованию и оптимизации процессов теплопереноса в системах тел с резким контрастом геометрических размеров и ТФХ, а также в телах, подверженных интенсивному нагреву поверхностными источниками теплоты.

Пятая глава посвящена исследованию процессов теплопереноса в металлах при высокочастотном нагреве. Особенность нагрева металлов токами высокой частоты заключается в наличии поверхностного эффекта, обуславливающего концентрацию внутренних тепловых источников вблизи границы нагреваемого участка тела. Тепловые источники в пределах достаточно тонкого приповерхностного δ -слоя убывают по экспоненте. Остальная часть металлической заготовки прогревается за счет теплопроводности.

При исследовании тепловых процессов индукционного нагрева могут быть поставлены две задачи теплопроводности: прямая и обратная. В прямой задаче по заданным геометрическим размерам, ТФХ, условиям теплообмена на поверхности и напряженности магнитного поля требуется определить распределение поля температур. В случае нагрева бесконечно протяженной пластины в поле плоской электромагнитной волны прямая задача индукционного нагрева (математическая модель электрических и тепловых процессов) формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = c(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \rho(T) \left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|^2.$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho(T) \frac{\partial H}{\partial x} \right) = i \omega \mu_0 \mu(H) H.$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = \alpha(T - T_0), T|_{t=0} = T_0, \quad (7)$$

$$\left. \frac{dH}{dx} \right|_{x=0} = 0, H|_{x=l} = H_{\text{нв}},$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление, μ - магнитная проницаемость, H - напряженность магнитного поля, λ - теплопроводность, c - удельная теплоемкость, T - температура, α - коэффициент теплоотдачи, $H_{\text{нв}}$ - напряженность магнитного поля на поверхности пластины, l - толщина пластины, T_0 - температура окружающей среды.

Решение задачи (7) методом конечных разностей связано с преодолением трудностей вычислительного характера, обусловленных вычислительной жесткостью модели взаимосвязанных электрических и тепловых процессов, протекающих в металлах при индукционном нагреве: поскольку в δ -слое плотность распределения тепловых источников убывает по экспоненте, то для их адекватного представления должна применяться неравномерная расчетная сетка, или равномерная, но с малым шагом h по пространственной переменной.

В этих условиях правомерен переход к упрощенному представлению исследуемого процесса с помощью модели с сосредоточенной емкостью, которая в данном случае имеет вид:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < l, \quad t > 0,$$

$$c\delta \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha(T - T_0) = P(t), \quad x = L, \quad t > 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad t > 0; \quad T|_{t=0} = T_0$$

Здесь $P(t)$ —удельная мощность тепловых источников, определяемая соотношением:

$$P(t) = \rho H_{me}^1 f(\delta, l). \quad (9)$$

Очевидно, что модель теплопереноса вида (8) значительно проще исходной математической модели (7), что способствует ее эффективной численной реализации с помощью МКР.

Преимущества моделей с сосредоточенной емкостью особенно ощутимы при решении задач идентификации тепловых источников. В обратной задаче индукционного нагрева по заданным условиям однозначности и дополнительной информации о температурном поле (например, по температуре поверхности нагреваемого образца) требуется определить недостающие условия однозначности (например, плотность теплового потока, или внутренние тепловые источники, однозначно связанные с амплитудой напряженности магнитного поля на поверхности). Решение обратной задачи предполагает наличие измерительной информации о температурном поле исследуемого объекта. Поскольку любой процесс измерений сопровождается наложением на полезный сигнал различного рода помех и случайных ошибок, то перед использованием результатов измерений в качестве дополнительной информации для решения обратных задач требуется их предварительная обработка, которая осуществлена в работе методом теплофизического сглаживания.

Приведены результаты численного восстановления напряженности магнитного поля на поверхности плоской стальной пластины при ее нагреве токами высокой частоты, которые являются подтверждением эффективности предложенного метода идентификации.

Численный эксперимент проводился в следующем порядке. Сначала по заданной на поверхности пластины напряженности магнитного поля H_m путем решения задачи (7) определялось температурное поле пластины. Затем температура ее поверхности $T(t, t)$ использовалась в качестве дополнительной информации при решении ОЗТ на основе модели с сосредоточенной емкостью (8). При этом функция $H(t)$ восстанавливалась с погрешностью 3% на сетке с шагом $h=5 \cdot 10^{-5}$ м, и с погрешностью 6% на сетке с шагом $h=5 \cdot 10^{-4}$ м. Далее на функцию, моделирующую измеренную температуру накладывалась аддитивная синусоидальная помеха единичной амплитуды с частотой $\omega=50$. Погрешность идентификации при этом возрастала до 100%. Однако применение к "результату измерения" теплофизического сглаживания (формула (5)) вновь возвращало погрешность идентификации к прежнему уровню 3-6%.

В шестой главе рассмотрены вопросы моделирования, идентификации и оптимизации теплопереноса в системе шихта-металл при индукционной наплавке. Индукционная наплавка твердых сплавов широко применяется в различных машиностроительных отраслях промышленности для восстановления и упрочнения деталей машин. Отличие этого процесса от традиционных (поверхностной закалки и сквозного нагрева заготовок) заключается в наличии высоких температур (выше температуры точки магнитных превращений) и двух подвижных границ (границы металла, нагретого выше точки Кюри и границы плавления твердого сплава), что делает моделирование данного процесса с помощью традиционных методов практически неосуществимым. В этих условиях модели с сосредоточенной емкостью являются эффективным и по существу единственным

средством моделирования процессов теплопереноса в системе шихта-металл при индукционной наплавке.

Для исследования процесса наплавки, также как и в предыдущем случае, построена модель электрических и тепловых процессов и от нее осуществлен переход к модели с сосредоточенной емкостью. При этом под шихтой понимается некоторое квазиоднородное изотропное тело с эффективными параметрами теплопереноса.

Для упрощения анализа весь процесс разделяется на три основные стадии: а) нагрев до точки Кюри; б) нагрев до температуры плавления твердого сплава; в) нагрев до полного расплавления шихты.

Анализ процессов теплопереноса в приближении сосредоточенной емкости позволил получить простые расчетные формулы для идентификации удельной мощности тепловых источников. Они имеют вид:

$$P_1(t) = c_M \delta_M \frac{d\bar{T}_{M,1}}{dt} - \lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x} + \alpha(T_M - T_0), \quad (10)$$

$$P_2(t) = c_M \delta_M \frac{d\bar{T}_{M,2}}{dt} + \lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x} - \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x}, \quad (11)$$

$$P_3(t) = k \left[L_m \frac{dy}{dt} + \lambda_S \frac{T_S - T_3}{h_S(t)} \right], \quad (12)$$

где индекс "М" относит соответствующую величину к металлу, индекс "S" - к шихте, L_m - скрытая теплота плавления, $y(t)$ - фронт расплава, T_3 - температура средней подвижной точки нерасплавленной шихты, являющаяся решением уравнения:

$$\frac{dT_3}{dt} - \beta(t)T_3 = \phi(t), \quad T_3(\tau_p) = T_0, \quad (13)$$

где T_0 - температура подвижной точки в момент появления жидкой фазы шихты.

При идентификации процесса индукционной наплавки решена следующая ОЗТ: по измеренной температуре контакта шихта-металл (рис. 3а) определена удельная мощность тепловых источников $P(t)$ (рис. 3б). По разработанной методике может быть осуществлена также идентификация тепловых потоков, отводимых теплопроводностью в шихту и металл: q_S, q_M .

Вычисления проводились для стальной детали толщины 6 мм, на поверхность которой нанесен слой шихты толщины 3 мм, по формулам (10), (11). При этом использовались следующие значения параметров: $\lambda_S = 2$ Вт/м/К, $c_S = 10^7$ Дж/м³/К, $f = 440$ кГц;

$$\lambda_M(T) = 1.8 - 1.72 \times 10^{-3} T + 21.9 T^2,$$

$$c_M(T) = 0.392 \times 10^7 + 0.5 \times 10^5 T + 5.29 T^2.$$

При переходе температуры поверхности контакта шихта-металл через точку Кюри ($T_K = 1023$ К) и через точку плавления шихты ($T^* = 1473$ К) теплофизические характеристики соответствующим образом корректировались.

Простейший анализ экспериментальных данных (рис. 3а) показывает, что при нагреве выше точки Кюри происходит резкое замедление скорости нагрева, вызванное уменьшением удельной мощности тепловых источников. Это является следствием того, что стальная деталь переходит из магнитного в немагнитное состояние (ее относительная магнитная проницаемость резко падает до единицы).

Поскольку термический КПД процесса нагрева магнитных деталей выше, чем немагнитных, то целесообразно как можно более равномерно по толщине прогреть деталь до перехода в немагнитное состояние.

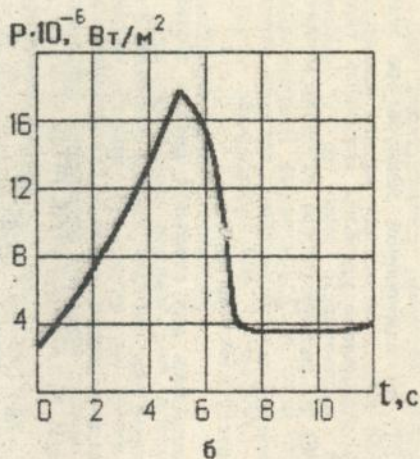
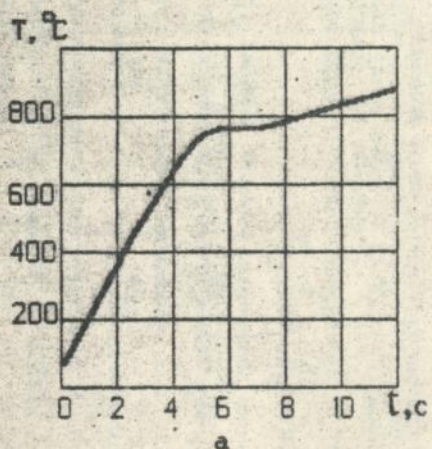


Рис. 3. Результат идентификации процесса индукционной наплавки:
 а — экспериментальная кривая изменения температуры поверхности шихта—металл;
 б — удельная мощность тепловых источников

Исходя из этого положения на основе анализа процессов теплопереноса в приближении сосредоточенной емкости в работе сформулирована оптимальная стратегия управления: режим наплавки будет рациональным (близким к оптимальному) при выполнении следующей последовательности действий: 1. быстрый нагрев при максимальной мощности до точки Кюри; 2. первая изотермическая выдержка; 3. быстрый нагрев до температуры плавления твердого сплава; 4. вторая изотермическая выдержка. Суммарное время нагрева процесса наплавки, а следовательно и его энергоемкость при таком (рациональном или субоптимальном) режиме уменьшается.

В диссертации разработаны алгоритмы идентификации параметров моделей с сосредоточенной емкостью, и изложены принципы построения систем контроля и управления индукционной наплавкой с идентификатором.

В седьмой главе модели с сосредоточенной емкостью используются для анализа тепловых процессов в системе полупроводник-диэлектрик при активационном отжиге арсенид-галлиевых пластин. Этот процесс широко используется в микроэлектронике при формировании областей различных типов проводимости.

Поскольку отжиг осуществляется при температурах порядка 1000-1100 К, то с целью предотвращения термического разложения пластина предварительно покрывается тонким слоем диоксида кремния.

Процесс формирования областей n-типа проводимости в приповерхностном слое арсенид-галлиевой пластины осуществляется в два этапа: на первом методом ионной имплантации в приповерхностный слой осуществляется внедрение

примеси (например, кремния), на втором с помощью высокотемпературного отжига осуществляется устранение дефектов кристаллической решетки полупроводника и электрическая активация ионов внедренной примеси.

В процессе отжига ионы примеси должны быть равномерно распределены по толщине модифицированного слоя, а вынос примеси за пределы этого слоя должен быть минимальным. Соответствием этим требованиям определяется качество полупроводниковых пластин и приборных структур на их основе.

Отжиг осуществляется с помощью инфракрасного излучения галогенных кварцевых ламп. Плотность внутренних тепловых источников при этом резко убывает в приповерхностном тепловыделяющем слое и определяется длиной волны и характером взаимодействия излучения с веществом. Толщина полупроводниковой пластины составляет величину порядка 100-400 мкм, а плотность тепловыделения уменьшается до пренебрежимо малого значения в пределах слоя толщины порядка 10-20 мкм.

Резкое различие в геометрических размерах и теплофизических характеристиках пластины и слоя диэлектрика, а также экспоненциальное убывание плотности тепловых источников внутри δ -слоя делают проблематичным исследование теплопереноса с помощью традиционных методов математического моделирования тепловых процессов. Кроме этого осложняющим фактором является необходимость моделирования процессов массопереноса, сопровождающих активационный отжиг.

Поэтому, как и в случаях индукционного нагрева и наплавки здесь правомерен переход к упрощенному представлению процесса теплопереноса в форме модели с сосредоточенной емкостью:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < l, \quad t > 0,$$

$$\bar{c}(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = P(t), \quad x = l, \quad t > 0, \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad t > 0; \quad T|_{t=0} = T_0.$$

Обозначения: $\bar{c}(T) = l'c_2 + \delta c_1$, l' -толщина слоя диоксида кремния, δ -толщина тепловыделяющего слоя; $\bar{\lambda}(T) = \lambda(T) + \bar{\lambda}(x)$, $\bar{\lambda}$ -эффективная теплопроводность, $\bar{\lambda}$ -дополнительная составляющая теплопроводности, равная нулю за пределами δ -слоя, $\lambda(T)$ -монотонно убывающая от 30 Вт/(м К) при 300 К до 0.1 Вт/(м К) при 1200 К функция температуры. При температурах выше 1200 К теплопроводность арсенида галлия практически не меняется.

Процесс массопереноса регламентируется температурой поверхности полупроводниковой пластины. Его математическая модель имеет вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T) \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad t > 0; \quad v|_{x=l} = 0; \quad v|_{t=0} = v_0(x);$$

Здесь $D(T)$ -эффективный коэффициент, учитывающий все механизмы диффузии, определяемый соотношением:

$$D(T) = D_0 \exp(-\Delta E / (kT)),$$

где D_0 -коэффициент диффузии при $T \rightarrow 0$, ΔE -энергия активации, k -постоянная Больцмана, v -концентрация примеси, $v_0(x)$ -начальное распределение примеси:

$$v_0(x) = v_{\max} \exp\left[-(x - R_p)^2 / (2\Delta R_p^2)\right], \quad 0 \leq x \leq l, \quad (16)$$

где R_p - проецированный пробег ионов примеси; ΔR_p - среднеквадратичное отклонение пробега от его среднего значения; v_{\max} - максимальная концентрация примеси, определяемая

соотношением: $v_{\max} = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}$, где Φ - доза имплантированной

примеси.

В работе исследован отжиг арсенид-галлиевой пластины, имплантированной примесью с эффективным коэффициентом диффузии $D_{\text{эф}} = 1.85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Результаты исследований, приведенные на рис. 4а,б, свидетельствуют о возможности сокращения времени отжига при управлении изменением удельной мощности теплового потока в соответствии с субоптимальной программой нагрева.

Действительно, если формальным критерием качества активационного отжига пластин является равномерное распределение ионов по толщине активного слоя при минимуме массы примеси, вынесенной за его пределы, то при $P = \text{const}$ приемлемое распределение концентрации примеси достигается за 5с, в то время как такое же распределение при $P = P_{\text{opt}}(t)$ достигается за 2,0 с.

Диффузионное размытие профиля внедренной примеси тем больше, чем дальше пластина находится под воздействием высоких температур. Поэтому постимплантационный отжиг должен осуществляться в два этапа; 1) быстрый нагрев до максимальной температуры при максимально допустимой (возможной) мощности; 2) изотермическая выдержка, осуществляемая с целью выравнивания концентрации примеси по толщине активного слоя.

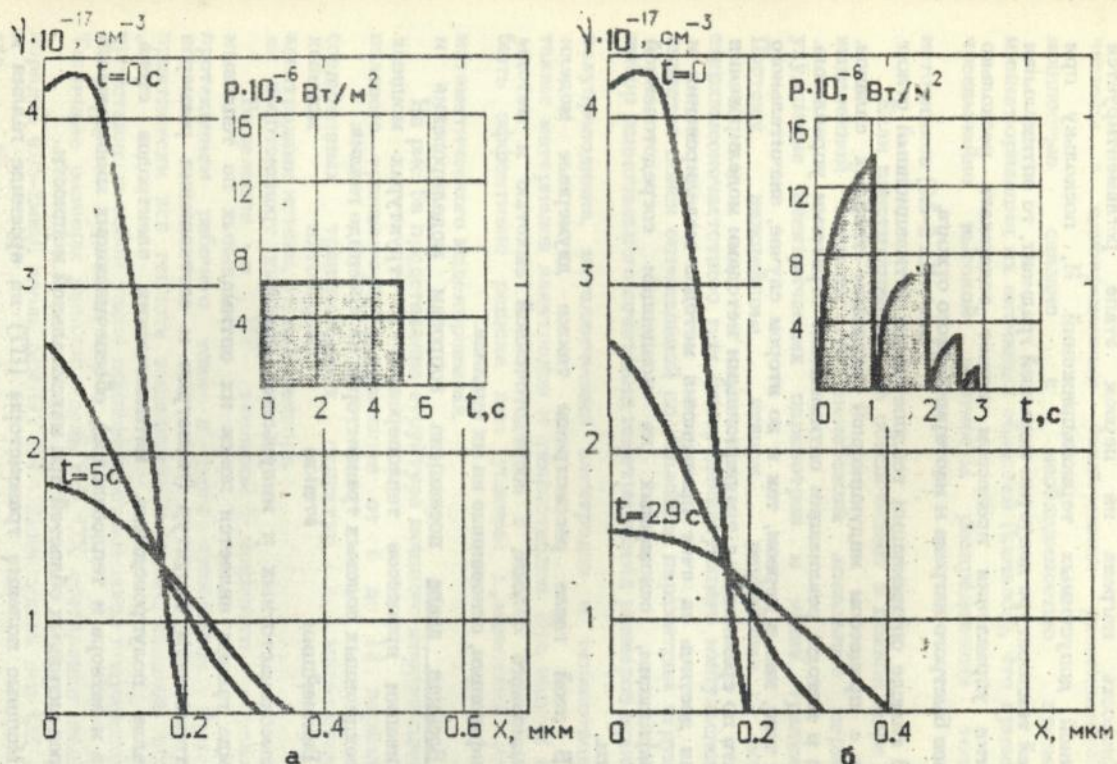


Рис. 4. Динамика изменения концентрации примеси: а — при постоянной удельной мощности; б — при субоптимальном законе изменения удельной мощности

Скорость нагрева на первом этапе регламентируется величиной допустимых термонапряжений. И, поскольку при большей температуре допустим меньший градиент, то оптимальная стратегия управления процессом может содержать несколько участков быстрого нагрева и изотермического отжига.

В смысле оптимизации теплопереноса активационный отжиг сходен с процессом индукционной наплавки твердых сплавов. Схожи и методы реализации оптимальной стратегии управления. Кроме того, как в первом, так и во втором случае, значительного эффекта по сравнению с традиционными методами моделирования удастся достичь за счет применения методов моделирования и идентификации, основанных на концепции сосредоточенной емкости.

В этой главе рассмотрены также двумерные модели активационного отжига с сосредоточенной емкостью и методы идентификации, основанные на их анализе.

Восьмая глава посвящена вопросам моделирования и оптимизации процессов теплопереноса в структурах мощных многосекционных полевых транзисторов на арсениде галлия.

Важнейшим этапом разработки мощных сверхвысокочастотных и импульсных полевых транзисторов на арсениде галлия является поиск их оптимальных по тепловым характеристикам структур (геометрии и соотношения размеров кристалла полупроводника, металлических электродов стока, истока и затвора и теплоотводов), обеспечивающих минимальный перегрев активных областей при максимальной мощности.

Мощные полевые транзисторы (ПТ) на арсениде галлия и интегральные схемы на их основе представляют собой элементную базу современной сверхвысокочастотной радиоэлектроники. Их

мощность составляет величину порядка десятков Ватт. Повышение частоты с одновременным увеличением рассеиваемой ПТ мощностью связано с необходимостью предельной миниатюризации их активных областей (каналов), что приводит к чрезвычайно высокой плотности распределения тепловых источников ($0.5-2 \text{ кВт/мм}^2$).

Если конструкция ПТ не обеспечивает в полной мере отвод выделенной теплоты, то неизбежны локальные перегревы, ухудшение электрических параметров и отказ транзистора. Поэтому важнейшим этапом разработки мощного сверхвысокочастотного или быстродействующего импульсного ПТ является поиск оптимальной по тепловым параметрам структуры, выбор рационального сочетания геометрических размеров кристалла полупроводника, металлических электродов и теплоотводов, а также материалов электродов и теплоотводов. Эта задача может быть эффективно решена при условии применения методов математического моделирования.

На рис. 5а представлена структура мощного многосекционного полевого транзистора, содержащая от 6 до 12 параллельно соединенных транзисторных структур с металлическими электродами истока, стока и затвора.

Выделение в ПТ тепловой мощности обусловлено протеканием рабочего тока в цепи сток-исток. При этом практически вся теплота выделяется в зонах каналов, которые представляют собой узкие приповерхностные зоны полупроводника. Типичные размеры каналов вдоль оси ОХ составляют величину порядка $0.05-2 \text{ мкм}$, вдоль оси ОУ $0.4 - 2 \text{ мкм}$, вдоль оси ОZ $100-200 \text{ мкм}$. Геометрическая форма каналов делает правомерным предположение о том, что практически вся выделенная теплота

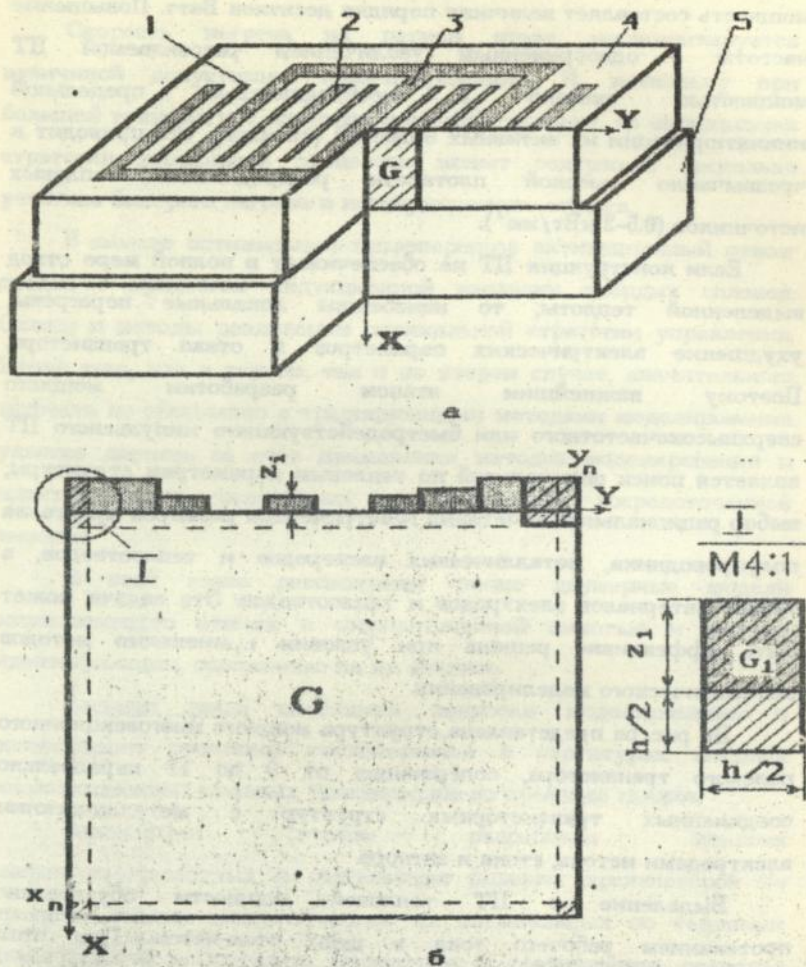


Рис. 5

К расчету теплопереноса в полевом транзисторе:
 а — многосекционный транзистор; 1 — затвор,
 2 — исток, 3 — сток, 4 — полупроводник, 5 — теплоотвод;
 б — расчетная область

сосредоточена (локализована) на границе раздела между кристаллом полупроводника и металлом электрода (затвора).

Относительно большая протяженность секции ПТ вдоль электродов (направление оси OZ) и малые размеры секции в плоскости XOY, а также вертикальный характер теплопереноса от канала, расположенного на верхней поверхности секции, к подложке, выполняющей роль теплоотвода, определяют для близких к центральной части секций двумерный характер теплопереноса в плоскости XOY, и, соответственно, делают правомерной постановку двумерной краевой задачи теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) = 0, \quad 0 \leq x \leq x_n, \quad 0 \leq y \leq y_n,$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial y} = 0, \quad y = 0, \quad \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0, \quad y = y_n, \quad (17)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = z_i \lambda_M \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + v_i P_i, \quad x = 0, \quad T_p = T_0, \quad x = x_n$$

Здесь "р"-полупроводник, "м"-металл, z_i -толщина i -го участка электрода ($i = \overline{1, n}$, $n = 10$), n -число участков, P_i -мощность тепловыделения, v_i -равно единице только под затворным электродом. В остальных случаях $v_i = 0$.

В нестационарном случае решается уравнение:

$$c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right), \quad 0 \leq x \leq x_n, \quad 0 \leq y \leq y_n, \quad t > 0, \quad (18)$$

а граничное условие при $y = y_n$ заменяется на условие с производной по времени вида:

$$\left(\frac{h}{2} c_p + z_i c_M \right) \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{h}{2} \lambda_p + z_i \lambda_M \right) \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} + v_i P_i(t). \quad (19)$$

Аналогичные условия выполняются также и на остальных границах области. Полоска материала полупроводника толщины $\frac{h}{2}$ использована для построения балансного соотношения (19) с целью упрощения процедуры построения разностной схемы второго порядка точности по пространственной переменной. При этом должны использоваться также условия согласования граничных условий в угловых точках области G (рис. 5б). Для левой верхней угловой зоны области G условие согласования имеет вид:

$$\frac{h}{2} \lambda_P \frac{\partial T_P}{\partial y} = \left(\frac{h}{2} z_1 c_M + \frac{h^2}{4} c_P \right) \frac{\partial T_P}{\partial t} - \left(z_1 \lambda_M + \frac{h}{2} \lambda_P \right) \frac{\partial T_P}{\partial x}, \quad x=0, \quad y=0, \quad (20)$$

С помощью разработанных в диссертации моделей теплопереноса исследовано тепловое состояние трех конструкций транзистора: базовой, имеющей толщину 400 мкм, и двух других: с толщиной 100 мкм и с такой же толщиной, но с дополнительным теплоотводом, выполненным гальваническим осаждением металла в сквозном отверстии пластины (дополнительный теплоотвод расположен на стыке двух соседних секций транзистора вдоль границы $y=y_D$, рис. 5б).

Анализ результатов численного эксперимента позволил сделать следующие выводы: 1) существенно двумерный характер теплопереноса в верхних ($0 < x < 20$ мкм) областях транзистора подтверждает обоснованность синтеза двумерной тепловой модели; 2) максимальная температура области канала в ПТ соответствующих конструкций ($T_{\max}^{(1)} = 487, T_{\max}^{(2)} = 399, T_{\max}^{(3)} = 330$) при одинаковой рассеиваемой мощности 3 Вт в каждом канале указывает на соответственно умеренную и высокую эффективность утончения подложки и введения дополнительного вертикального теплоотвода; 3) дополнительный теплоотвод отводит

почти весь тепловой поток в ПТ третьей конструкции; 4) значительный перегрев ПТ базовой конструкции усугубляется уменьшением теплопроводности арсенида галлия с ростом температуры.

В работе проведен анализ тепловых режимов трех вариантов конструкций: транзистор с обычной толщиной подложки (полупроводниковой пластины), транзистор с утонченной подложкой и транзистор с утонченной подложкой и дополнительным металлическим теплоотводом. Показано, что оптимальной в смысле минимального перегрева активных элементов конструкцией является конструкция транзистора с утонченной подложкой и дополнительным теплоотводом.

В случае многослойных электродов и теплоотводов эффективные параметры теплопереноса вдоль границ полупроводниковой области определяются соотношениями:

$$\bar{c} = \sum_{j=1}^{K_1} z_j' c_M' + \delta c_P, \quad \bar{\lambda} = \sum_{j=1}^{K_1} z_j' \lambda_M' + \lambda \delta_P,$$

$$\hat{c} = \sum_{j=1}^{K_2} z_j' c_M' + \delta c_P, \quad \hat{\lambda} = \sum_{j=1}^{K_2} z_j' \lambda_M' + \lambda \delta_P,$$

Здесь K_1 -количество слоев многослойной металлизации электродов, K_2 -количество слоев многослойного вертикального теплоотвода, "М" - металл, "Р" - полупроводник.

Оптимизационная задача для многослойной конструкции ставится в следующей форме. Для заданного уровня удельной мощности тепловыделения требуется определить такие ТФХ (параметры $c = (\bar{c}, \hat{c})$, $\lambda = (\bar{\lambda}, \hat{\lambda})$), при которых будет обеспечено минимальное значение максимального перепада температур в

транзисторной структуре на протяжении всего периода работы транзистора. При этом осуществляется минимизация функции:

$$\Phi(T_{\min}, T_{\max}) = \min \max |T_{\max} - T_{\min}| \quad (21)$$

по всем λ , c , удовлетворяющим неравенствам:

$$\begin{aligned} \lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}, \\ c_{\min} < c < c_{\max}. \end{aligned} \quad (22)$$

При этом температурное поле должно удовлетворять ограничениям:

$$T_{\max} < \bar{T}_{\max}, \quad \text{grad}T < (\text{grad}T)_{\max}. \quad (23)$$

Оптимизационная задача может быть поставлена и иначе: для заданной конструкции ПТ требуется определить значение эффективных параметров теплопереноса, изменяющихся в пределах, определенных неравенствами (22), и максимально допустимое значение рассеиваемой мощности P_{\max} . Температурное поле при этом должно удовлетворять ограничениям (23).

В результате решения сформулированных в данном разделе оптимизационных задач осуществляется оптимальный по тепловым характеристикам синтез структур ПТ с многослойными электродами и теплоотводами.

8 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В работе исследованы особенности протекания процессов теплопереноса в системах тел с резким контрастом геометрических размеров и ТФХ и телах при интенсивном тепловом воздействии на их поверхность. Показано, что математические модели таких процессов обладают свойством вычислительной жесткости, что затрудняет, а в ряде случаев делает практически неосуществимой их реализацию с помощью традиционных численных методов

(например, МКР). Исходя из этого сделан вывод о необходимости разработки: новых методов моделирования и идентификации тепловых процессов, традиционные математические модели которых обладают вычислительной жесткостью.

Для решения таких задач на основании концепции сосредоточенной емкости с использованием системного подхода создана единая методологическая база, комплекс методов и средств решения прямых и обратных задач теплопроводности, возникающих при моделировании, идентификации и оптимизации процессов теплопереноса в сложных теплофизических объектах современной техники и технологии.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработан метод теплофизического сглаживания измеренных температур.
2. Построены иерархические модели процессов теплопереноса и дан анализ способов их реализации с помощью средств современной вычислительной техники.
3. Разработана методика синтеза универсальных комбинированных аналоговых симуляторов тепловых процессов.
4. Предложена методика одновременной идентификации ТФХ материалов и внешних тепловых воздействий.
5. Разработан метод термически тонкого слоя, на основе которого созданы принципиально новые измерители-преобразователи теплового потока градиентно-калориметрического типа и многослойные теплоизмерительные ячейки, предназначенные для одновременного определения теплопроводности и теплоемкости исследуемого материала.

6. Разработаны математические модели тепловых процессов с сосредоточенной емкостью, описывающие теплоперенос: -в металлах при индукционной закалке деталей машин;-в системе шихта-металл при индукционной наплавке твердых сплавов;-в системе полупроводник-покрытие при активационном отжиге арсенид-галлиевых полупроводниковых пластин;-в системе кристалл-электроды мощных полевых транзисторов интегральных схем в процессе работы полупроводниковых приборов;-в многослойных теплоизмерительных ячейках калориметров и измерителях-преобразователях теплового потока.

7. Создан комплекс методов и средств идентификации параметров теплопереноса при анализе теплового состояния загрузки индукционной нагревательной системы в процессах закалки и наплавки.

8. Разработан способ идентификации напряженности магнитного поля по температуре поверхности нагреваемого образца.

9. Сформулирована оптимальная стратегия управления процессами индукционной наплавки твердых сплавов и активационного отжига полупроводниковых пластин.

10. С помощью численного эксперимента на ЭВМ получена оптимальная по критерию минимального перегрева конструкция мощного арсенид-галлиевого полевого транзистора и предложена методика синтеза оптимальных по тепловым характеристикам транзисторных структур с многослойными электродами и теплоотводами.

Численный эксперимент, проведенный для широкого диапазона частот и амплитуд случайной составляющей ошибки измерения нестационарных температур (результаты численного эксперимента приведены в автореферате (рис. 16) и в приложении

к диссертации), показал необходимость применения теплофизического сглаживания при решении задач идентификации тепловых процессов..

Результаты, представленные в диссертационной работе, позволяют сделать вывод об эффективности применения методов моделирования и идентификации, основанных на концепции сосредоточенной емкости, к исследованию процессов теплопереноса в системах тел с резким контрастом геометрических характеристик и ТФХ и телах с поверхностными источниками теплоты

4 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

опубликовано в работах:

1. Ержанов Р.Ж., Кремлев В.Я., Султангазин У.М., Шерышев В.П. Синтез граничных условий одного класса математических моделей функционально-интегрированных полупроводниковых структур// Вестник АН КазССР.-1979.-№10.-С.54-60.
2. Султангазин У.М., Шерышев В.П. Решение задачи индукционного нагрева методом квазилинеаризации/ Дифференциальные уравнения и их приложения.-Алма-Ата.-1981.-с.169-173.
3. Шерышев В.П., Панкратова И.Н., Тимошенко В.П. и др. Расчет теплофизических характеристик шихты по данным натурального эксперимента/ Аналитические и численные методы решения задач математики и механики.-Алма-Ата:Наука,1984.-С.10-15.
4. Султангазин У.М., Шерышев В.П., Панкратова И.Н. Численно-аналитическое решение задачи о распространении плоской электромагнитной волны в линейной слоистой среде на

- ферромагнитной подложке// Изв.АН КазССР.сер.физ.-матем.-1982.-№5.-С.32-36.
6. Султангазин У.М., Воль А.А., Шеръшев В.П. Об одном методе решения задачи управления процессом индукционной наплавки/ Численные методы решения задач математической физики и оптимизации.-Алма-Ата.-1982.-С.3-11.
 6. Шеръшев В.П. Управление нагревом системы шихта-деталь в процессе индукционной наплавки// Вестник АН КазССР.-1983.-№4.-С.45-51.
 7. Шеръшев В.П., Панкратова И.Н., Тимошенко В.П. и др. Расчет теплофизических характеристик шихты по данным натурального эксперимента/ Аналитические и численные методы решения задач математики и механики.-Алма-Ата:Наука,1984.-С.10-15.
 8. Султангазин У.М., Ержанов Р.Ж., Шеръшев В.П. Применение математической модели типа сосредоточенной теплоемкости к анализу электрических характеристик функционально-интегрированных полупроводниковых структур интегральных схем// Изв.АН КазССР.Сер.физ.-матем.-1985.-№3.-С.85-89.
 9. Воль А.А., Коваль В.Н., Тимошенко В.П., Лесков С.П., Шеръшев В.П. Оптимизация процесса индукционной наплавки//Изв.сиб.отд-ния АН СССР.Сер.техн.-1985.-Вып.2.-С.86-92.
 10. Султангазин У.М., Шеръшев В.П.Определение напряженности магнитного поля по температуре поверхности нагреваемого образца. 1. Однослойная металлическая пластина// Изв.АН КазССР.Сер.Физ.-матем.-1986.-№1.-С.58-64.
 11. Султангазин У.М., Ержанов Р.Ж., Шеръшев В.П., Мартъянов С.В. Моделирование стационарных процессов теплопереноса в

структурах мощных сверхвысокочастотных полевых транзисторов// Вестн.АН КазССР.-1987.-№12.-С.23-29.

12. Шерышев В.П. Моделирование и оптимизация процессов теплообмена в системе шихта-металл при индукционной наплавке твердых сплавов: Автореф.дисс.канд.техн.наук.-Харьков,1978.-16с.
13. Matsevyty Yu.M., Sheryshev V.P., Leskov S.P. Identification of Thermal Flows at Induction Surfacing./ SEMINAR 'Heat Transfer in Electroheat'.-Lods 22-25 October(Education and Research on Electroheat Steady Committee).-1991.-P.85-92.
14. Мацевитый Ю.М., Шерышев В.П. Моделирование теплофизических процессов с использованием концепции сосредоточенной емкости. 1. Иерархические модели// Электронное моделирование.-1991.-13.-№4.-С.15-20.
15. Мацевитый Ю.М., Шерышев В.П. Моделирование теплофизических процессов с использованием концепции сосредоточенной емкости. 2. Моделирующие среды и гибридизация вычислений// Электронное моделирование.-1992.-13.-№5.-С.20-26.
16. Мацевитый Ю.М., Шерышев В.П. Моделирование теплофизических процессов с использованием концепции сосредоточенной емкости. 3. Идентификация параметров иерархических моделей// Электронное моделирование.-1992.-14.-№3.С.15-19.
17. Мацевитый Ю.М., Тимченко В.М., Шерышев В.П. и др. Моделирование теплопереноса при активационном отжиге арсенид-галлиевых полупроводниковых пластин// Теплофиз.высок.температур.-1992.-30.-№3.-С.601-608.

18. Мацевитый Ю.М., Ержанов Р.Ж., Тимченко В.М., Шерышев В.П. Оптимизация параметров активационного отжига полупроводниковых пластин// Теплофиз.высок.температур.-1992.-30.-№6.-С.1181-1188.
19. Мацевитый Ю.М., Шерышев В.П. Концепция сосредоточенной емкости в задачах идентификации тепловых процессов/ Труды 2-го Междунар.Форума по тепломассопереносу.-Минск,1992.
20. Бажанов А.А., Бавлаков В.Н., Мацевитый Ю.М., Семенов С.Ю., Шерышев В.П. Математическое моделирование процессов теплопереноса в системе контактирующих проводящих тел./ Труды междунар. симп. по электрическим контактам. Теория и приложения, 21-25 июня 1998.-Алма-Ата.-С.237-244.
21. Бажанов А.А., Бавлаков В.Н., Шерышев В.П. Определение тепловых потоков при вакуумной пироселекции полиметаллических концентратов// Комплисп.минер.сырья.-1994.-№1.-С.48-53.
22. Шерышев В.П., Бажанов А.А., Пиунова И.М. Метод определения теплофизических характеристик материалов// Докл.НАН Респ.Казахстан.-1994.-№3.-С.44-54.
23. Лукьянов А.Т., Бажанов А.А., Шерышев В.П., Пиунова И.М. Определение теплофизических характеристик материалов методом обратных задач/ Труды 2-ой междунар. конф.: "Идентификация динамических систем и обратные задачи."-Санкт-Петербург.-1994.-С. В-14-1.
24. А.с. 868015 СССР, МПК G06g 7/56. Устройство для решения нелинейных сопряженных задач/ А.Т. Лукьянов, А.Т. Любушкин, У.М.Султангазин, В.П.Шерышев.-Опубл. 23.08.81, Бюлл. №81.

25. Бажанов А.А., Бавлаков В.Н., Пиунова И.М., Шерышев В.П. Способ определения величин тепловых потоков // Патент Республики Казахстан №362.-Бюлл.пром.соб.-1994.-№1.
26. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Ю.М.Мацевитый, В.П.Шерышев, А.А.Бажанов, В.Н.Бавлаков М.В.Радченко С.Ю.Семенов // Патент Респ. Казахстан, 1994.-№1125.

SUMMARY

Sheryshev V.P. Modeling and identification of heat transfer with help of concentrated capacity conception. Thesis is a manuscript for finding of academic degree of a doctor of sciences on the specialty 05.14.05 - theoretical thermal engineering, Institute for Problems in Machinery of National Academy of Sciences of the Ukraine, Kharkov, 1996.

On the basis of the concentrated capacity conception the methods of modeling and identification of heat transfer within systems of bodies with a big contrast of geometrical sizes and thermal properties and bodies with surface heat sources have been elaborated. Hierarchy models of heat transfer have been developed and analysis of method and facilities for realization of them have been given. A new technology for proceeding thermal physical information including interpretation of transient thermal measurement and identification of local heat flows and thermal properties of materials have been elaborated. Results of modeling, identification and optimization of heat transfer within objects of metallurgical thermal engineering and semiconductor microelectronics have been adduced.

Шершнев В.П. Моделирование и идентификация процессов теплопереноса с использованием концепции сосредоточенной емкости. Диссертация является рукописью, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.05 - теоретическая теплотехника, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, 1996.

На основе концепции сосредоточенной емкости разработаны методы моделирования и идентификации процессов теплопереноса в системах тел с резким контрастом геометрических размеров и ТФХ и телах с поверхностными источниками теплоты. Разработаны иерархические модели теплопереноса и дан анализ методов и средств их реализации. Разработана новая технология обработки теплофизической информации, включающая интерпретацию результатов нестационарного термометрирования, идентификацию локальных тепловых потоков и ТФХ материалов. Приведены результаты моделирования, идентификации и оптимизации теплопереноса в объектах металлургической теплотехники и полупроводниковой микроэлектроники.

Ключові слова: моделювання, ідентифікація, оптимізація, теплообмін, температура, зосереджена ємкість, теплофізичні дослідження, інформаційна технологія.

Ответственный за выпуск: к.т.н. Лушпенко С.Ф.

Подписано к печати

Формат 60 x 90 1/16. Бумага

тип. №1. Услов. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 110 экз. Заказ № 131

Ротапринт ИПМаш НАН Украины

810046, Харьков-46, ул. Дм. Пожарского, 2/10