

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 536.37:621.3.049.77

На правах рукописи

ПЕТРОВ
Станислав Игоревич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2017

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ГОНОВ Александр Николаевич**,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ПОЛУБОК Владислав Анатольевич**,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой микропроцессорных систем и сетей, институт информационных технологий, учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «26» января 2017 г. года в 11⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СОГЛАСОВАНО:
канд. техн. наук, доцент

А.Н. Гонов

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным повышением требований к качеству и надежности микроэлектронных изделий, непрерывным увеличением степени интеграции, уменьшением размеров элементов, вопросы отвода тепла, моделирования и оптимизации тепловых процессов при разработке этих изделий приобретают особую актуальность.

Микроэлектронные структуры представляют собой неоднородные многослойные конструкции, содержащие большое количество топологических слоев со сложной пространственной конфигурацией.

На настоящий момент существует достаточно большое количество работ исследователей, из ближнего и дальнего зарубежья, рассматривающих решение задач теплопереноса в многослойных средах. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования тепловых процессов в микроэлектронных структурах: С. Н. Несмелов, Н. А. Кульчицкий, А. Н. Кульчицкий, А. А. Мельников. Соответствующие этим задачам области поля являются, как правило, неограниченными, при этом допускается такая формулировка граничных условий, которая обеспечивает строгую аналитическую разрешимость задач.

Экспериментальные методы исследования температурных полей в микроэлектронных структурах оказываются зачастую не применимыми в силу малых размеров структур, и, кроме этого, они не позволяют произвести оценку локальных значений максимальных температур.

В задачах расчета температурных полей в микроэлектронных структурах области поля, как правило, ограничены, причем зачастую геометрия границ является весьма сложной, топологические слои обладают сложной пространственной конфигурацией, неоднородностью внутреннего строения, теплофизические характеристики являются разрывными функциями пространственных координат.

Трудности расчета температурных полей в микроэлектронных структурах увеличиваются вследствие непрерывного увеличения плотности упаковки, числа топологических слоев, уменьшения размеров элементов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена объективной необходимостью разработки корректных математических моделей и эффективных методик численного моделирования тепловых процессов в многослойных микроэлектронных структурах широкого класса, обеспечивающих точный расчет температурных полей произвольном расположении источников тепловыделений и при различных теплофизических свойствах используемых материалов.

Степень разработанности проблемы

Исследования тепловых процессов в микроэлектронных структурах осуществлялось на основе существующих математических моделей и методов моделирования процессов теплообмена с использованием работ ученых, российских и белорусских ученых: С. Н. Несмелова, Н. А. Кульчицкого, А. Н. Кульчицкого, А. А. Мельникова, а так же зарубежных авторов: W.T. Nakayama, A.O. Moscardini.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе является не применимость результатов моделирования в силу малых размеров структур, которая не позволяет провести детальное исследование локальных особенностей распределения температурных полей.

Предложенное исследование направлено на устранение этих недостатков на основе алгоритма численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка теоретических основ численного моделирования и оптимизации тепловых процессов в микроэлектронных структурах.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить **следующие основные задачи:**

1. Исследовать математические модели процессов теплообмена в микроэлектронных структурах.
2. Разработать методику и алгоритмы численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах.
3. Произвести построение эффективных алгоритмов численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах.

Область исследования

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых по изучению тепловых процессов в микроэлектронных структурах, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Разработана обобщенная математическая модель процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками, которая, в отличие от известных, может быть применена для расчета тепловых режимов широкого класса изделий микроэлектронной техники. Разработаны общая методика и алгоритмы численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах. Разработанные подходы могут быть использованы для уточнения существующих аналитических и численно-аналитических методов расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий.

Теоретическая значимость сформулированы задачи оптимального управления тепловыми процессами в многослойных микроэлектронных структурах. Рассмотрены вопросы автоматизации численного моделирования

Практическая значимость заключается в возможности применения разработанных математических моделей и методик для прогнозирования тепловых режимов как существующих, так и вновь разрабатываемых микроэлектронных изделий.

Разработанные в диссертации алгоритмы и комплекс программ применимы для решения широкого класса задач моделирования и оптимизации тепловых режимов микроэлектронных изделий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель процессов теплообмена в многослойных кусочно-неоднородных структурах с плоскостной симметрией методом эквивалентной гомогенизации.
2. Математическая модель процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с применением обобщенных ортогональных криволинейных координат для описания теплообменных процессов.
3. Алгоритм численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах на основе разработанной математической модели процессов теплообмена.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались международной конференции: Международная научно-практическая интернет-конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (Луцкий НТУ совместно с НУ «Львовская политехника», Национальным горным университетом (г. Днепропетровск) и Любинской политехникой (Польша))

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборниках матери-

алов научных конференций и 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 0,4 авторских листа.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассмотрены существующие математические модели и методы моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах. Обоснована необходимость разработки корректных математических моделей и эффективных методик численного моделирования и оптимизации процессов теплообмена в микроэлектронных структурах. Сформулированы задачи исследования, решаемые в диссертации.

Так же рассмотрены вопросы математического моделирования процессов теплообмена в кусочно-неоднородных структурах с плоскостной симметрией и оценки погрешности методов эквивалентной гомогенизации.

Во второй главе представлена обобщенная математическая модель процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной геометрической формы с разрывными теплофизическими характеристиками. Получены математические описания процессов теплообмена в кусочно-неоднородных и кусочно-однородных многослойных микроэлектронных структурах. Дана вариационная постановка задач теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах. Сформулированы задачи оптимального управления тепловыми процессами в многослойных микроэлектронных структурах.

Третья глава посвящена разработке общей методики и алгоритмов численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками. Рассмотрены вопросы автоматизации численного моделирования.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертации составляет 83 страницы. Из них 64 страницы основного текста, 8 иллюстраций на 10 страницах, 1 таблица на 1 странице, библиографический список из 89 наименований на 7 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 2 страницах, 3 приложения на 31 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, обоснованы научная и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

Первая глава содержит обзор и анализ моделей и методов решения задач расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий. Анализ публикаций показывает, что внимание исследователей сосредоточено главным образом на решении частных задач расчета тепловых режимов конкретных микроэлектронных изделий. До настоящего времени недостаточно развиты методы расчета тепловых режимов микроэлектронных структур сложной формы, позволяющие учитывать их неоднородные свойства. Неточность используемых методов с учетом применяемых неадекватных математических моделей приводит к неточным результатам по оценке теплового состояния микроэлектронных изделий. Анализ существующих моделей и методов решения задач расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий позволил сформулировать задачи исследования, решаемые в диссертации.

Рассматриваются вопросы математического моделирования тепловых процессов в кусочно-неоднородных структурах с плоскостной симметрией и оценке погрешности методов эквивалентной гомогенизации.

Для решения задач моделирования тепловых процессов в многослойных микроэлектронных структурах до настоящего времени широко используются методы эквивалентной гомогенизации (аппроксимации) таких структур сплошными однородными или однородно-анизотропными слоями.

Методы эквивалентной гомогенизации находят применение в моделях различных уровней, например, в эквивалентных тепловых схемах с сосредоточенными элементами и в полевых моделях.

В связи с этим актуальной проблемой является оценка погрешности методов эквивалентной гомогенизации, используемых для решения задач расчета температурных полей в многослойных микроэлектронных структурах.

Вторая глава посвящена разработке обобщенной математической модели процессов теплообмена в микроэлектронных структурах и постановке задач оптимального управления тепловыми процессами в микроэлектронных структурах. Показано, что особенностью многослойных микроэлектронных структур является то, что тепловые процессы в них описываются 10 системами уравнений математической физики с разрывными коэффициентами. Это связано с тем, что теплофизические характеристики многослойных структур резко изменяются при переходе через границы раздела их отдельных слоев.

Для моделирования процессов теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками разработана обобщенная математическая модель.

Показано, что если многослойная микроэлектронная структура объемом V , ограниченная поверхностью S , состоящая из n слоев V_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), нагревается внутренними источниками теплоты и внешней средой или теп-

ловым потоком, то ее температурное поле в ортогональных криволинейных координатах (q_1, q_2, q_3) определяется в результате решения системы обобщенных уравнений теплопроводности:

$$c_i p_i \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{H_2 H_3}{H_1} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_3 H_1}{H_2} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{H_1 H_2}{H_3} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial q_3} \right) \right] + q_{vi}, \quad (1)$$

$$i=1,2,3,\dots,n.$$

При смешанных граничных условиях:

$$T = T_s \quad \text{на } S_1, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \quad \text{на } S_2, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + a(T - T_0) = 0 \quad \text{на } S_3 \quad (6)$$

и начальном условии:

$$T = T_s \quad \text{при } \tau = \tau_0. \quad (4)$$

И условиях сопряжения, заданных на границах раздела S^i отдельных слоев структуры i и j :

$$T_i = T_j, \quad (5)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial n} \quad \text{на } S^i (i=1,2,3,\dots,n-1), \quad (6)$$

где T – температура; p_i – плотность; c_i – удельная теплоемкость; λ_i – коэффициент теплопроводности; q_{vi} – удельная мощность источников теплоты; Q – поток тепла на части границы S ; a – коэффициент теплообмена с окружающей средой с температурой T_0 ; T_s – температура на части границы S ; T^* – начальное распределение температуры; $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ – полная грани-

ца области V ; n – внешняя нормаль к границе S ; $H_i, i=1,2,3$ – коэффициенты Ламэ данной криволинейной системы координат.

В общем случае внешние границы и внутренние границы S^i области V являются криволинейными и могут перемещаться с течением времени. Граничные условия третьего рода (4) могут быть использованы при рассмотрении нагревания или охлаждения микроэлектронных структур излучением. По закону Стефана-Больцмана, количество теплоты, отдаваемой структурой окружающему пространству посредством излучения, равно:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \varepsilon(T^4 - T_0^4) = 0 \quad \text{на } S_4, \quad (7)$$

где ε – степень черноты;

Модель (3) – (9) является обобщенной математической моделью для расчета процессов теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах сложной геометрической формы с разрывными теплофизическими характеристиками.

Получены математические описания процессов теплообмена в многослойных кусочно-неоднородных и кусочно-однородных микроэлектронных структурах как частные случаи обобщенной тепловой математической модели. Рассмотрены математические описания процессов теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах с плоскостной и азимутальной симметрией. Дана вариационная постановка задач расчета процессов теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах.

Сформулированы задачи оптимального управления тепловыми процессами в многослойных микроэлектронных структурах.

Третья глава посвящена разработке методики и алгоритмов численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками. Точные расчеты температурных полей в микроэлектронных структурах, которые представляют собой кусочно-неоднородные среды, в ряде практических случаев не могут быть выполнены из-за отсутствия аналитических решений полевых задач и ввиду сложности, как геометрической формы этих структур, так и характера граничных условий, а также в силу разнообразия теплофизических характеристик применяемых материалов и сложного распределения источников теплоты в структурах такого рода. В основу методики решения смешанной краевой задачи (3) – (9) положен метод декомпозиции без наложения подобластей.

Решение краевой задачи (3) – (9) в ортогональных криволинейных координатах (q_1, q_2, q_3) эквивалентно минимизации функционала.

$$F = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} \left\{ \frac{1}{2} \lambda_i \left[\frac{H_2 H_3}{H_1} \left(\frac{\partial T}{\partial q_1} \right)^2 + \frac{H_3 H_1}{H_2} \left(\frac{\partial T}{\partial q_2} \right)^2 + \frac{H_1 H_2}{H_3} \left(\frac{\partial T}{\partial q_3} \right)^2 \right] + \left(q_{Hi} - c_{Hi} p_{Hi} \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right\} dV - \int_{S_2} Q T dS + \int_{S_3} \frac{1}{2} \alpha (T - T_0)^2 dS, \quad (8)$$

где $q_{Hi} = H_1 H_2 H_3 q_{Vi}$, $c_{Hi} = (H_1 H_2 H_3)^{1/2} c_i$, $p_{Hi} = (H_1 H_2 H_3)^{1/2} p_i$.

Из условий минимума функционала (9) :

$$\frac{\partial F}{\partial \{T\}} = \sum_{e=1}^N \frac{F^{(e)}}{\partial \{T\}} = 0. \quad (9)$$

В ортогональных криволинейных координатах (q_1, q_2, q_3) получена результирующая система уравнений:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial e} + [G] \{T\} = \{F\}, \quad (10)$$

где

$$[C] = \sum_{e=1}^N [c^{(e)}], \quad (11)$$

$$[G] = \sum_{e=1}^N [g^{(e)}], \quad (12)$$

$$[F] = \sum_{e=1}^N [f^{(e)}], \quad (13)$$

$$[c^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} c_{Hi} p_{Hi} [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dV, \quad (14)$$

$$[g^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} \{D^{(e)}\}^T [c^{(e)}] \{D^{(e)}\} dV + \int_{S_3^{(e)}} \alpha [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dS, \quad (15)$$

$$[f^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} q_{Hi} [N^{(e)}]^T dV + \int_{S_2^{(e)}} Q^{(e)} [N^{(e)}]^T dS - \int_{S_3^{(e)}} \alpha T_0 [N^{(e)}]^T dS. \quad (16)$$

Рассмотрены вопросы численной реализации задач расчета температурных полей в микроэлектронных структурах. Для решения смешанных краевых задач расчета температурных полей в многослойных микроэлектронных структурах произвольной геометрии, с произвольным расположением источников тепловыделений и произвольными физическими характеристиками слоев, разработан комплекс программ MICROTERM, являющийся частью учебно-проектной САПР изделий микроэлектроники, твердотельной электроники, нано- и микросистемной техники, базирующейся на методе конечных элементов (МКЭ). В состав комплекса программ входят модули ввода и подготовки исходной информации, автоматической генерации конечно-элементной сетки в расчетной области, визуализации конечно-элементной сетки, расчета искомых величин в узлах конечно-элементной сетки, обработки, анализа и вывода результатов расчета. Эффективность конечно-элементного программного комплекса в большей степени определяется типом конечных элементов, которые в нем используются. Так как при решении задач расчета температурных полей в микроэлектронных структурах приходится иметь дело с поиском решения в областях со сложной геометрией, предпочтение отдано объемным прямоугольным и криволинейным тетраэдральным и гексаэдральным изопараметрическим конечным элементам. Использование изопараметрических конечных элементов позволило существенно сократить объем исходной информации и повысить точность расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий. Разработана методика построения нерегулярных конечно-элементных сеток, согласованных с формой границ, позволяющая автоматизировать процесс расчета температурных полей в микроэлектронных структурах. Для решения разреженных систем линейных уравнений большой размерности, получаемых в результате дискретной аппроксимации по МКЭ линейных стационарных смешанных краевых задач расчета температурных полей в микроэлектронных структурах, в работе использован метод сопряженных градиентов, обладающий высокой скоростью сходимости и позволяющий получать решение с высокой точностью. Для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, получаемых в результате дискретной аппроксимации по МКЭ линейных нестационарных смешанных краевых задач расчета температурных полей в микроэлектронных структурах, в работе используется аппроксимация производной по времени с помощью центральной конечно-разностной схемы с решением на каждом шагу по времени полученной линейной системы уравнений методом сопряженных градиентов. В результате дискретной аппроксимации по МКЭ нелинейных смешанных краевых задач расчета температурных полей в микроэлектронных изделиях получается система нелинейных алгебраических уравнений, для решения которой в работе использован итерационный метод Ньютона со специальной схемой построения начального приближения, гарантирующей сходимость итерационного процесса. Для оценки точности и достоверности получаемых результатов с помощью разработанного комплекса программ были решены тестовые линейные задачи расчета температурных полей, имеющие аналитические решения. В процессе таких расчетов наблю-

далось совпадение аналитического и численного решений с точностью до 0,01%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана обобщенная математическая модель процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками, которая, в отличие от известных, может быть применена для расчета тепловых режимов широкого класса изделий микроэлектронной техники.

2. Разработаны общая методика и алгоритмы численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах, обеспечивающие высокую точность расчетов температурных полей в кусочно-неоднородных и кусочно-однородных расчетных многослойных объемных областях со сложной конфигурацией границ, при смешанных граничных условиях, произвольном расположении источников тепловыделений в областях такого рода, разнообразии теплофизических свойств используемых материалов. Методика и алгоритмы моделирования созданы на основе универсальных и адекватных тепловых математических моделей и применимы для расчета тепловых режимов широкого класса изделий микроэлектронной техники. Разработанные подходы могут быть использованы для уточнения существующих аналитических и численно-аналитических методов расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий.

3. На основе конечно-элементного вариационного метода и принципа суперпозиции разработана методика решения задач оптимального управления тепловыми процессами в микроэлектронных структурах при управлении как локальными тепловыми источниками, так и граничными режимами.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебные курсы “Физические основы проектирования радиоэлектронных средств”, “Конструирование радиоэлектронных устройств”.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Петров, С.И. Проблемы, методы и задачи математического моделирования и оптимизации тепловых процессов в микроэлектронных структурах / С.И Петров, А.О. Давидовский // Международная научно-практическая интернет-конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы автоматизации и управления», Луцк, Украина, 23–25 ноября 2016 г.) – С. 80–

84.

2. Петров, С.И. Обобщенная математическая модель процессов теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах // Международная научно-практическая интернет-конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (Луцк, Украина, 23–25 ноября 2016 г.) – С. 90–97.

3. Петров, С.И. Построение эффективных алгоритмов численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / С.И. Петров, А.В. Матвеев // Репозиторий БГУИР, 2017.–[Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/11431>.

4. Петров, С.И. Математическое описание процессов теплообмена в многослойных кусочно-неоднородных микроэлектронных структурах/ С.И. Петров, А.В. Матвеев // Репозиторий БГУИР, 2017.–[Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/11432>.

5. Петров, С.И. Вариационная постановка задач теплообмена в многослойных микроэлектронных структурах/ С.И. Петров, А.В. Матвеев // Репозиторий БГУИР, 2017.–[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/11433>.

6. Петров, С.И. Постановка задач оптимального управления тепловыми процессами в многослойных микроэлектронных структурах / С.И. Петров, А.В. Матвеев // Репозиторий БГУИР, 2017.–[Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/11434>.

РЭЗІЮМЭ

Пятроў Станіслаў Ігаравіч

Аптымізацыя цеплавых працэсаў у мікраэлектронных структурах

Ключавыя словы: цеплайой працэс, матэматычная мадэль.

Мэта працы распрацоўка тэарэтычных асноў колькаснага мадэлявання і аптымізацыі цеплавых працэсаў у мікраэлектронных структурах..

Атрыманыя вынікі і іх навізна: сфармуляваны задачы аптымальнага кіравання цеплавымі працэсамі ў шматслойных мікраэлектронных структурах. Разгледжаны пытанні ав-томатизацыі колькаснага мадэлявання. Распрацаваныя ў дысертацыйнай рабоце алгарытмы і комплекс праграм дастасавальных для вырашэння шырокага класа задач мадэлявання і аптымізацыі цеплавых рэжымаў мікраэлектронных вырабаў.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў».

Вобласць ужывання: магчымасць прымянення распрацаваных матэматычных мадэляў і метадаў-дзік для прагназавання цеплавых рэжымаў як існуючых, так і зноў распрацоўваных мікраэлектронных вырабаў.

РЕЗЮМЕ

Петров Станислав Игоревич

Оптимизация тепловых процессов в микроэлектронных структурах

Ключевые слова: тепловой процесс, математическая модель.

Цель работы: разработка теоретических основ численного моделирования и оптимизации тепловых процессов в микроэлектронных структурах.

Полученные результаты и их новизна: сформулированы задачи оптимального управления тепловыми процессами в многослойных микроэлектронных структурах. Рассмотрены вопросы автоматизации численного моделирования. Разработанные в диссертации алгоритмы и комплекс программ применимы для решения широкого класса задач моделирования и оптимизации тепловых режимов микроэлектронных изделий.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Область применения: возможность применения разработанных математических моделей и методик для прогнозирования тепловых режимов как существующих, так и вновь разрабатываемых микроэлектронных изделий.

SUMMARY

Petrov Stanislav Igorevich

The optimization of thermal processes in microelectronic structures

Keywords: thermal process, mathematical model

The object of study: To increase the stability of the CEA to the damaging factors of electrification due to detection the effect of characteristics of electronic components on the threshold of their failure when subjected to discharge by CBM-model.

The results and novelty: formulate an optimal thermal management problems in multilayer microelectronic structures. The problems of numerical modeling automation. Developed in the thesis algorithms and programs are useful for solving a wide range of modeling and optimization of thermal modes of microelectronic products.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Physical fundamentals of the design of radio-electronic means».

Sphere of application: the possibility of using the developed mathematical models and Meto-dik to predict the thermal conditions of both existing and newly developed microelectronic products.