



4850932

**ЧЕЛУШКИНА Татьяна Алексеевна**

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ  
И ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

*Специальность*

*05.04.03 – машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной  
техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

23 ИЮН 2011

Махачкала – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дагестанский государственный технический университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор Исмаилов Тагир Абдурашидович

**Научный консультант:**

кандидат физико-математических наук, доцент Гаджиева Солтанат Магомедовна

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор Сулин Александр Борисович, начальник отдела теплофизических технологий ФГУП «НИИ промышленной и морской медицины» (г. Санкт-Петербург);

кандидат технических наук, доцент Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, проректор по научной и инновационной деятельности ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет».

**Ведущая организация:** ОАО «МПК Русская радиоэлектроника»

Защита диссертации состоится «01» июля 2011 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета К212.052.01 в ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля 70, ауд.202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет»

Автореферат разослан «01» июня 2011 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент**



**Евдулов О.В.**

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современной электронике все острее становится задача по обеспечению оптимальных температурных режимов для микроэлектронной техники (МЭТ). Это обусловлено увеличением степени интеграции полупроводниковых кристаллов при одновременном повышении быстродействия полупроводниковых приборов. В результате общий уровень тепловыделений кристалла резко возрастает и традиционные методы отвода тепла не обладают достаточной эффективностью, так как тепловые потоки должны проникать через кристалл, подложку и корпус, причем все эти тепловые барьеры накапливаются и затрудняют теплоперенос от активных тепловыделяющих компонентов полупроводниковых приборов внутри МЭТ к внешнему теплоотводу для переноса тепла в окружающую среду в виде кондукции, конвекции или излучения.

Дополнительная проблема возникает в виде термических ударов внутри интегрального кристалла, так как высокое быстродействие и нестационарный характер работы МЭТ может привести к локальным перегревам отдельных зон кристалла. Проблема усложняется за счет инерционности процессов теплопереноса. Традиционные методы не способны обеспечить необходимое термостатирование режимов работы полупроводникового интегрального кристалла при нестационарных режимах функционирования.

В настоящее время все большую актуальность приобретают методы отвода тепла, связанные с непосредственным охлаждением нагретых участков кристалла. К ним относятся *p-n*-переходы, зоны контактов металлов с полупроводниками. Тепловыделениями токов за счет эффекта Джоуля, протекающих через металлы и полупроводники, можно пренебречь, так как они на порядок меньше тепловыделений за счет термоэлектрических явлений в полупроводниках и металлах.

Для повышения эффективности систем охлаждения полупроводниковых кристаллов целесообразно применить новые методики на основе принципиально новых конструкций электродов в интегральных схемах и охлаждающих модулях.

Суть предлагаемой методики охлаждения состоит в том, что нагретый кристалл полупроводникового прибора будет охлаждаться при помощи дополнительного поглощения тепла в виде биметаллического электрода, причем через электрод протекает ток из дополнительного источника питания от одного металла к другому таким образом, что спай биметаллического электрода, находящийся в электрическом и кондуктивном контакте с нагретым полупроводниковым кристаллом, будет охлаждаться и отбирать тепло непосредственно от нагретой зоны наружу в источник питания. При такой методике охлаждения можно эффективно управлять процессом теплопереноса с малой инерционностью. В современных сверхбольших интегральных схемах (СБИС) каждый переключающий элемент на основе полупроводниковых приборов обладает металлическими выводами, и если их заменить на биметаллические, то от каждого работающего или не работающего транзистора можно отвести часть тепла, что повышает быстродействие процессов теплопереноса, уменьшает количество тепловых барьеров, а также позволяет в широких пределах осуществить регулирование процесса охлаждения за счет изменения величины тока в биметаллических электродах. Таким образом, тепло изнутри СБИС от участков кристалла критичных к высоким температурам и термическим ударам будет перенесено электронами во внешний источник питания практически не критичный к увеличению тепловых нагрузок.

Дополнительный отвод тепла непосредственно от интегрального кристалла в окружающую среду можно осуществить, разместив в кондуктивном контакте на поверхности тепловыделяющего полупроводникового интегрального кристалла принципиально новый тип термомодуля на основе матрицы последовательно соединенных ультрафиолетовых светодиодов. Предлагаемая матрица электрически идентична обычному термоэлектрическому устройству (ТЭУ) в виде последовательно соединенных *p-n*-переходов. Однако электроны, переходя из одной зоны в другую, выделяют энергию не в виде тепла, а в виде излучения, причем желательнее вместо инфракрасного или видимого спектра излучения использовать ультрафиолет, кванты которого обладают большей энергией. Отсюда следует, что количество энергии, которая отдается электронами на этих переходах в виде ультрафиолетового излучения, будет равно количеству энергии, поглощенной этими электронами на обратных переходах. Предлагаемые ТЭУ обладают дополнительным преимуществом за счет отсутствия кондуктивного паразитного теплопереноса между горячими и холодными спаями, который в традиционных ТЭУ снижает их эффективность. Таким образом, имеется возможность мгновенно, со скоростью света, отводить тепло от полупроводниковых интегральных схем через прозрачные корпуса в виде ультрафиолетового излучения в окружающую среду, что позволит повысить степень интеграции, мощность и быстродействие полупроводниковых схем за счет повышения эффективности систем охлаждения.

Для повышения эффективности работы ТЭУ (особенно изготовленных по тонко и толстопленочным технологиям) также можно применить новые методики на основе регулирования токов питания термомодулей. Традиционные методы по использованию постоянного тока различного значения или нестационарного тока в виде импульсов, пульсаций и других типов не обеспечивали оптимальных тепловых режимов работы термомодуля, так как не были учтены все электрофизические процессы внутри полупроводника и на контактах термомодуля. Для того, чтобы электрон осуществил обмен энергией с металлическим спаем, требуется некоторое время. Поэтому целесообразно применить импульсное питание, причем скважность между импульсами соответствует временному интервалу необходимому для того, чтобы все электроны завершили обмен энергией с атомами горячих и холодных спаев. В результате электроны в термомодуле будут сгруппированы в виде энергетических пакетов дискретно перемещающихся от одного типа спая к другому. В паузах происходит энергетический обмен с кристаллами спаев. Длительность импульсов должна соответствовать, с учетом длины свободного пробега электронов и геометрических размеров термомодуля (высота *p* и *n* ветвей), времени необходимому для перемещения группы электронов в виде энергетического пакета от одного спая к другому. Кроме того, импульсное питание позволяет увеличить амплитуду тока питания по сравнению с постоянным током питания за счет пауз между импульсами, во время которых термомодуль частично охлаждается, не выделяя Джоулевого тепла.

Все вышеизложенное обуславливает актуальность проведения данного исследования. На основе проведенного анализа сформулируем цели диссертационной работы.

**Цель диссертационного исследования.** Целью диссертационного исследования является разработка и исследование охлаждающих ТЭУ для МЭТ.

В соответствии с целью исследования в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка биметаллических электродов в СБИС для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов МЭТ.
2. Разработка ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения.
3. Разработка математических моделей (ММ) биметаллических электродов в полупроводниковых приборах для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов МЭТ.
4. Разработка ММ ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения.
5. Разработка ММ ТЭУ с импульсным питанием.
6. Созданы устройств и методик для охлаждения тепловыделяющих компонентов интегральных схем.
7. Проведение комплекса экспериментальных исследований для подтверждения теоретических данных.
8. Практическая реализация результатов работы.
9. Разработка рекомендаций для уменьшения тепловыделений компонентов интегральных схем.

**Предметом исследования** являются электрофизические процессы происходящие в охлаждающих ТЭУ в стационарных и нестационарных режимах работы.

**Объектом исследования** является системы охлаждения МЭА, причем акцентируется отвод тепла непосредственно от тепловыделяющих компонентов.

**Предмет диссертационного исследования** - создание ТЭУ с отводом тепла в виде ультрафиолетового излучения и разработка биметаллических охлаждающих электродов для МЭА в стационарных и нестационарных режимах работы.

**Теоретическую и методическую основу** диссертационного исследования составляют принципы системного подхода, теория теплопроводности твердых тел, математическая статистика, численные методы решения дифференциальных уравнений и метод конечных элементов, экспериментальные методы исследования.

**Научная новизна диссертационного исследования.** При решении задач, поставленных в диссертационном исследовании, получены следующие основные новые научные результаты:

1. Разработан принцип построения биметаллических электродов в СБИС с пространственным разнесением зон поглощения и выделения в МЭТ.
2. Разработана принципиально новая структура ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения.
3. Разработана ММ биметаллических электродов в полупроводниковых приборах для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов МЭТ и выделения тепла во внешних независимых источниках питания.
4. Разработана ММ безинерционных ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения.
5. Предложен способ формирования импульсного питания ТЭУ с учетом теплофизических свойств полупроводниковых материалов в виде длины свободного пробега электронов и дрейфовой скорости движения зарядов.

**Практическая значимость диссертационной работы** состоит в том, что разработанные ТЭУ охлаждения МЭТ позволят повысить надежность и эффективность функционирования аппаратуры при стационарных и нестационарных режимах за счет оптимального термостатирования.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные в диссертационной работе методы, расчетные модели и устройства использованы при выполнении государственной научно-исследовательской работы в рамках

тематического плана ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет». Основные результаты диссертационной работы внедрены в компьютеризированную аппаратуру связи и кодирования информации МВД РД, а также в учебный процесс ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет».

**Апробация результатов исследования.** Работа в целом и ее отдельные результаты докладывались и обсуждались на Региональной НТК «Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты» (Махачкала, ДГТУ, 2006 г.), XXV, XXVI, XXVIII и XXIX итоговой НТК преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ (Махачкала, ДГТУ, с 2004 по 2008 гг.), III Всероссийская НТК «Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения» (Махачкала, ДГТУ, 2007 г.), научно-технических семинарах кафедры теоретической и общей электротехники ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет» с 2006 по 2010 гг., получена золотая медаль на XIV Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД – 2011» за разработку «Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения» (Россия, Москва, 05.04 – 08.04.2011 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 1 статья, 16 докладов и тезисов докладов на научных конференциях, получены 2 патента и положительное решение на выдачу патента РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы - 135 страниц машинописного текста, содержит 5 таблиц, 48 рисунков, список литературы включает 123 наименований и приложений.

## 2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* дано обоснование актуальности темы диссертационной работы и определена практическая направленность результатов и логическая связь глав.

*В первой главе «Обзор литературы и постановка задачи исследования»* дана характеристика существующих в настоящее время методов отвода теплоты от МЭТ, проведен их критический анализ на предмет возможности использования для обеспечения температурного режима МЭТ. Анализ традиционных методов охлаждения показал, что применение систем обеспечения тепловых режимов МЭТ на основе кондуктивного, конвективного и охлаждения излучением часто является невозможным из-за эксплуатационных и массогабаритных ограничений.

Обзор литературы по термоэлектрическому охлаждению показывает, что на сегодняшний день в этой области накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, разработано и внедрено большое количество разнообразных аппаратов, устройств и приборов. Показано, что наиболее целесообразно применение термоэлектрических способов охлаждения.

Однако следует отметить, что на сегодняшний день недостаточно рассмотрены вопросы, касающиеся возможности эффективного применения в охлаждающих ТЭУ новых полупроводниковых материалов успешно применяемых в других полупроводниковых приборах, например, в светодиодах. Для решения указанных задач, не решенных в настоящее время в полной мере, в диссертационной работе предложена схема охлаждения СБИС на базе охлаждающих биметаллических электродов, выполненных в едином технологическом процессе при производстве интегральной схемы, причем охлаждающие спаи поглощают тепло непосредственно внутри СБИС в зонах тепловыделения, а выделение тепла происходит во внешних независимых источниках питания, причем работа системы охлаждения как в стационарном, так

и в нестационарном режиме практически не оказывает никаких помех в работе самой СБИС. Кроме того предложено при импульсном питании ТЭУ учитывать теплофизические параметры полупроводниковых ветвей (длину свободного пробега, скорость дрейфа зарядов, время для обмена энергией при соударениях зарядов с кристаллической решеткой), что позволит повысить эффективность работы охлаждающих ТЭУ.

С учетом проведенного обзора сформулирована цель диссертационной работы. Поставлены задачи диссертационной работы, которые необходимо решить для достижения указанной цели.

Во второй главе «Математические модели термоэлектрических полупроводниковых устройств, функционирующих в стационарных режимах» рассмотрены ММ охлаждающих биметаллических электродов СБИС для МЭТ и излучающих ТЭУ.

Одним из достоинств термоэлектрического охлаждения является независимость эффективности процессов от масштабного фактора. Поэтому величина холодильного коэффициента термоэлектрического холодильника может быть получена при рассмотрении единичного биметаллического термоэлемента, т.е. простой пары разнородных проводников. Ток  $I$  проходит через термоэлемент, один из спаев которого находится в контакте с тепловой нагрузкой, а с другого отводится тепло. Биметаллический термоэлемент должен состоять из проводников, имеющих соответственно положительный и отрицательный абсолютные коэффициенты Зеебека. Температура холодного спае уменьшается по сравнению с температурой горячего спае на величину  $\Delta T$ . Полное сопротивление  $R$  охлаждающего биметаллического термоэлемента:

$$R = \frac{l_1}{S_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{S_2 \sigma_2}, \quad (1)$$

где  $l$  означает длину,  $S$  – площадь поперечного сечения и  $\sigma$  – электропроводность ветвей охлаждающего биметаллического термоэлемента. Общая теплопроводность  $K$  двух параллельных ветвей термоэлемента

$$K = \frac{S_1 k_1}{l_1} + \frac{S_2 k_2}{l_2}, \quad (2)$$

где  $k$  – удельная теплопроводность. Величина охлаждения на холодном спае в результате эффекта Пельтье равна  $\pi_{21} I$ . Из первого соотношения Томсона она равна  $\alpha_{21} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I$ , где  $\alpha_{21}$  – дифференциальная термо-э.д.с.,  $T_M$  – средняя абсолютная температура. Эффекту охлаждения препятствует Джоулево тепло (для металлических выводов оно незначительно) в ветвях и тепло, подводимое от горячего спае (спае расположен вне БИС внутри независимых источников питания). Половина от всего Джоулева тепла переходит к каждому из спаев. Количество тепла (внебрежем Джоулевым теплом), поглощаемого холодным спае от источника в единицу времени, равно

$$Q = \alpha_{21} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - K \Delta T. \quad (3)$$

Эффектом Томсона можно пренебречь.

Часть разности потенциалов, приложенной к биметаллическому термоэлементу, приходится на сопротивление ветвей, а часть компенсируется напряжением, возникающим в результате наличия разности температур между спаеми, в соответствии с эффектом Зеебека. Итак, мощность  $W$ , потребляемая термоэлементом, равна

$$W = \alpha_{21} \Delta T \cdot I. \quad (4)$$

Характеристика эффективности охлаждающего ТЭУ определяется как соотношение  $\frac{Q}{W}$ . Следовательно,

$$\varphi = \frac{\alpha_{21} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - K \Delta T}{\alpha_{21} \Delta T I} \quad (5)$$

Для данной пары термоэлектрических материалов холодильный коэффициент охлаждающего биметаллического термоэлемента является функцией тока  $I$ , а также сопротивления  $R$  и теплопроводности  $K$ . Однако, две последние величины не являются независимыми, они весьма просто связаны через размеры элементов. Для заданной холодопроизводительности отношение длины к площади поперечного сечения элемента должно возрастать с ростом электропроводности.  $\varphi$  достигает максимума, когда размеры элементов подчиняются следующему соотношению:

$$\frac{l_1 S_2}{l_2 S_1} = \left( \frac{\sigma_1 k_1}{\sigma_2 k_2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Тогда

$$KR = \left[ \left( \frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2 \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\alpha_{21} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) (IR) - \Delta T \left[ \left( \frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2}{\alpha_{21} \Delta T (IR)} \quad (8)$$

Дифференцированием  $\varphi$  можно найти оптимальный ток для заданной разности температур

$$(IR)_{\text{opt}} = \frac{\alpha_{21} \Delta T}{\sqrt{1 + Z T_M} - 1} \quad \text{где: } Z = \frac{\alpha_{21}^2}{\left[ \left( \frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2} \quad (9)$$

Подставляя оптимальную величину из выражения (6) в уравнение (7), находим, что максимальная характеристика эффективности выражается как

$$\varphi_{\text{МАКС}} = \frac{T_M (\sqrt{1 + Z T_M} - 1)}{\Delta T (\sqrt{1 + Z T_M} + 1)} \cdot \frac{1}{2} \quad (10)$$

Очевидно, когда заданы величины  $T_M$  и  $\Delta T$ , характеристика эффективности возрастает с увеличением  $Z$ . Поэтому  $Z$  является критерием эффективности или добротности для биметаллического термоэлемента.

Следует заметить, что когда  $Z$  стремится к бесконечности, то величина  $\varphi$ , получающаяся из уравнения (10), приближается к  $(T_M - \Delta T/2)/\Delta T$ . Уравнение (10) может быть использовано для определения максимального значения разности температур на охлаждающем биметаллическом термоэлементе, находящемся в адиабатическом режиме. При этих условиях  $Q$ , а потому и  $\varphi$  падают до нуля, так что

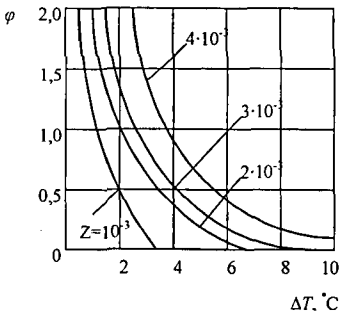


Рисунок 1 - Зависимость холодильного коэффициента биметаллического ТЭУ от разности температур для средней температуры 290° К



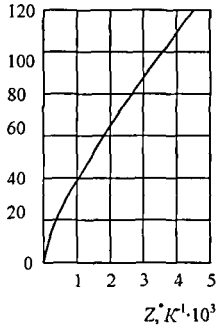
$\Delta T_{\text{макс}}$ 

Рисунок 2 - Зависимость максимальной разности температур биметаллического ТЭУ от параметра добротности при средней температуре 290° К

$$\Delta T_{\text{макс}} = 2T_M \frac{\sqrt{1+2T_M} - 1}{\sqrt{1+2T_M} + 1} \quad (11)$$

Рисунок 1 показывает, как изменяется величина холодильного коэффициента в зависимости от разности температур для возможного диапазона изменения величины  $Z$ , а рисунок 2 показывает, как максимальная разность температур зависит от величины  $Z$ . На обеих диаграммах средняя температура была принята равной 290° К (17° С).

Применение биметаллических электродов имеет преимущество перед полупроводниковыми материалами, так как в данном случае важно невысокое значение сопротивления проводников. Кроме того, за счет параллельного соединения всех биметаллических электродов также снижается общее сопротивление ТЭУ.

Обобщенная тепловая модель охлаждающего ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения, представленная на рис. 3, включает целый ряд практических задач расчета температурных полей в монолитных многослойных светонзлучающих структурах (МСС).

Рассматриваемая область  $V$  шириной  $L$  и толщиной  $\Delta$  состоит из  $n$  слоев, причем  $i$ -й слой характеризуется толщиной  $\delta_i$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda_i$ . Источниками теплового поля являются внутренние источники теплоты с удельной мощностью  $q_i$  и внешние тепловые потоки на поверхности структуры с плотностью  $Q_i$ . Модель, изображенная на рис. 3, состоит из однородных параллельных слоев и не содержит аномальных границ раздела сред, так как все границы слоев совпадают с одноименным семейством координатных поверхностей  $y = \text{const}$ ; теплопроводность слоев  $\lambda_i$  не изменяется вдоль указанных границ.

Обобщенная тепловая модель ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения, изображенная на рис. 4, относится к гибридным МСС.

Эта модель содержит две аномальные границы раздела сред, являющиеся границами раздела слоев  $n-2$ ,  $n-1$  и  $n-1$ ,  $n$  (на этих границах зависимость теплопроводности от координаты  $x$  имеет ступенчатый вид). Такие границы характерны, например, для гибридных матричных МСС УФ-диапазона.

В наиболее общем виде температурное поле в МСС, обобщенные тепловые модели ТЭУ которых представлены на рис. 3 и рис. 4, определяется из уравнения теплопроводности

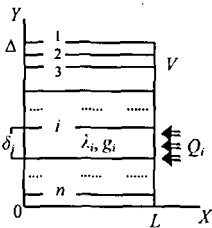


Рисунок 3 - Обобщенная тепловая модель МСС без аномальных границ раздела сред

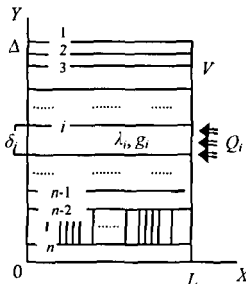


Рисунок 4 - Обобщенная тепловая модель МСС с аномальными границами раздела сред

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q \quad (12)$$

при граничных условиях:

$$T = T_s \text{ на } S_1, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2, \quad (13)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) = 0 \text{ на } S_3 \quad (14)$$

и начальном условии:

$$T = T_* \text{ при } t = t_0. \quad (15)$$

Кроме этого, температурное поле в МСС удовлетворяет условиям сопряжения на границах раздела слоев  $i$  и  $j$ :

$$T_i = T_j, \quad \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_i} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_j}, \quad (16)$$

где  $T$  - температура;  $\rho$  - плотность материала;  $c$  - теплоемкость;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $q$  - удельная мощность источников теплоты, которая считается положительной, если теплота подводится к структуре;  $Q$  - поток теплоты на части границы  $S$ , который считается положительным, если теплота теряется структурой;  $\alpha$  - 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 граница многослойной области  $V$ ;  $n$  - внешняя нормаль к границе  $S$ .

Модель (12) - (15) является ММ для расчета температурных полей в МСС ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения. При расчете температурных полей в МСС целесообразно пользоваться частными моделями, соответствующими общей. Отметим также, что в ряде практических случаев на боковых поверхностях тепловых моделей, представленных на рис. 3 и рис. 4, имеет место условие адиабатичности.

Поэтому вместо граничного условия (14) можно использовать граничное условие

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (17)$$

Если температурное поле в МСС стационарно, т.е. процесс установившийся, то уравнение (12) преобразуется к виду

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q = 0. \quad (18)$$

В случае, когда теплофизические характеристики являются только функциями декартовых координат, из (18) получаем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = 0. \quad (19)$$

Это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = 0. \quad (20)$$

Уравнение (20) применяется для решения двумерных задач расчета температурных полей в МСС ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения с плоскостной симметрией при следующих граничных условиях:

$$T = T_s \text{ на } S_1; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_3 \quad (21)$$

и условиях сопряжения на границе раздела слоев  $i$  и  $j$  (16).

Таким образом, задача расчета температурных полей в МСС сводится к решению сопряженной задачи теплопроводности при разнородных граничных условиях, заданных на различных участках границы  $S$  многослойной области  $V$ .

В основу методики решения краевой задачи (20)-(21), (16) положен метод конечных элементов. Решение этой задачи эквивалентно минимизации функционала

$$F = \int_V \frac{1}{2} \left[ \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2qT \right] dV + \int_{S_1} Q T dS. \quad (22)$$

Для упрощения дальнейших преобразований введены матрицы

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}^T, \quad [c] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (23)$$

С учетом обозначений (23) функционал (22) после преобразований примет вид:

$$F = \int_V \frac{1}{2} [b]^T [c] [b] - 2qT dV + \int_{S_2} Q T dS. \quad (24)$$

Область  $V$  разбита на непересекающиеся конечные элементы с системой базисных функций  $N_i$ ,  $i=1,2,3$ . Введем в рассмотрение функции  $T^{(i)}$ , определенные на отдельных конечных элементах. Элементарный вклад конечного элемента  $V^{(i)}$  в общие значения функционала (24) определяется равенством

$$F^{(i)} = \int_{V^{(i)}} \frac{1}{2} [b^{(i)}]^T [c^{(i)}] [b^{(i)}] dV - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} T^{(i)} dV + \int_{S_2^{(i)}} Q^{(i)} T^{(i)} dS. \quad (25)$$

С учетом (25) выражение (24) примет вид:

$$F = \sum_{i=1}^N F^{(i)}, \quad (26)$$

где  $N$  - общее число элементов, на которые разбита многослойная область  $V$ .

Для того чтобы минимизировать функционал,  $F$ , необходимо продифференцировать выражение (24) по  $\{T\}$  и результат приравнять нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial \{T\}} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F^{(i)}}{\partial \{T\}} = 0, \quad (27)$$

где  $\{T\}$  - узловые значения искомой функции  $T$ . Искомая функция  $T$  определена для каждого конечного элемента через базисные функции  $N_i$  следующим образом:  $T^{(i)} = [N^{(i)}] \{T\}$ .

Таким образом,

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} = [D^{(i)}] \{T\}. \quad (28)$$

После дифференцирования выражения (26) по  $\{T\}$  с учетом выражений (25) и (28) и приравнивания результата нулю получим систему уравнений

$$[G] \{T\} = [F]; \quad [G] = \sum_{i=1}^N [g^{(i)}]; \quad [F] = \sum_{i=1}^N [f^{(i)}]; \quad F^{(i)} = \int_{V^{(i)}} [D^{(i)}]^T [C^{(i)}] [D^{(i)}] dV; \quad (29)$$

$$[f^{(i)}] = - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} [N^{(i)}] dV - \int_{S_2^{(i)}} Q^{(i)} dS.$$

Для учета граничных условий Дирихле (21) систему уравнений (29) преобразуем с помощью метода Джордано-Гаусса. С помощью разработанного комплекса программ были рассчитаны температурные режимы работы гибридной МСС охлаждающего ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения с учетом геометрических размеров кристаллов, полупроводниковых межсоединений, тепловыделений в кремниевой интегральной схеме, первичной обработки сигнала и известных теплопритоках через границы  $S_4$  и  $S_5$ .

Расчет проводился для матричного охлаждающего ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения с размером кристалла светодиодной матрицы 7x7 мм и размером кристалла кремниевой интегральной схемы 10x10 мм. Высота полупроводниковых межсоединений составляла 10 мкм при площади их сечений 50x50 мкм. Решалось уравнение теплопроводности (20) с граничными условиями

$$T=77 \text{ K на } S_1; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_4 \text{ и } S_5; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2, S_3, S_6, \dots, S_k \quad (30)$$

и условиях сопряжения границ раздела слоев  $i$  и  $j$  (16).

В результате расчетов были получены зависимости максимальной температуры рабочего слоя от тепловыделений в кремниевой интегральной схеме, от теплопроводности клея, от теплопритоков через проволочные межсоединения кремниевой интегральной схемы с выводами корпуса и от рассогласования полупроводниковых столбиков-контактов.

Результаты расчетов показали, что рассогласование полупроводниковых столбиков-контактов при сборке гибридных многослойных ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения не должно превышать 3 мкм.

Из ММ очевидно преимущество использования ультрафиолетового диапазона для получения большей эффективности охлаждающего ТЭУ.

В третьей главе «Экспериментальные исследования термоэлектрических устройств» представлены результаты экспериментальных исследований охлаждающих биметаллических электродов и излучающих ТЭУ. Эксперименты проводились с целью подтверждения адекватности ММ физическому процессу и для проверки правильности сделанных на их основе выводов.

Объектами экспериментальных исследований были опытные образцы охлаждающих биметаллических электродов и излучающих ТЭУ. Экспериментальный стенд (рис. 5) содержит управляемый блок питания 5, позволяющий сформировать четыре независимых источника для питания исследуемых образцов ТЭУ 2 и управления режимами работы имитатора тепловых нагрузок 3, который позволяет в широком диапазоне варьировать тепловые нагрузки с высокой точностью за счет применения прецизионного

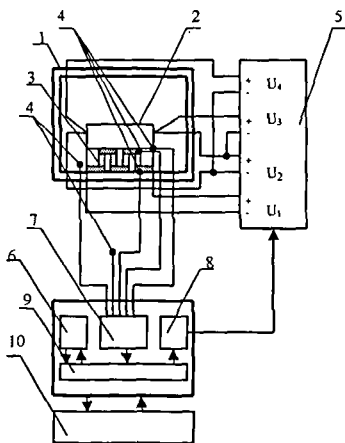


Рисунок 5 - Схема экспериментального стенда для испытания охлаждающих ТЭУ

ТЭУ в качестве имитатора тепловых потоков, причем горячий спай ТЭУ находится в кондуктивном контакте с исследуемым образцом кристалла, а холодный спай находится в кондуктивном контакте с контейнером содержащем плавающий лед 1. Применение льда в состоянии фазового перехода позволяет с высокой точностью обеспечивать температуру холодного спаия ТЭУ, а это, в свою очередь, повышает точность формирования температуры горячего спаия и количество теплоты поступающего через ТЭУ в испытуемый образец кристалла. Для определения основных параметров охлаждающих ТЭУ при испытаниях замерялись следующие величины: температура, ток

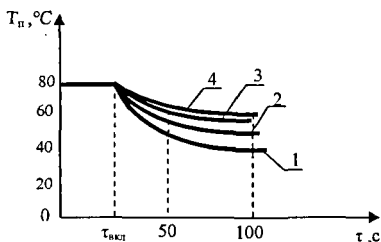


Рисунок 6 - Температурный график работы биметаллических электродов в СБИС для различных металлов (спай алюминия с: 1 золотом; 2 серебром; 3 железом; 4 медью)

цифрового интерфейса 6, 7, 8, 9 типа E14-440AD/DA converter позволяет проводить обработку данных как в виде базы данных, относительно заданного временного интервала, так и в графическом отображении, при этом формируется файл данных, позволяющий сохранять полученную информацию для дальнейшей анализа и обработки.

В ходе эксперимента определялись напряжения и ток на охлаждающем ТЭУ, температура окружающей среды, температуры на биметаллических контактах, температура на холодных спаих излучающих ТЭУ.

В результате проведения эксперимента установлено, что образцы охлаждающих биметаллических электродов в СБИС позволяют для различных

сочетаний металлов в спае получить следующий температурный график (рис. 6):

Эксперимент подтвердил правомерность разработанных ММ и полученных на их основе теоретических положений. Среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных составило не более 9 % на всем диапазоне измерений.

В результате экспериментальных исследований ТЭУ с отводом тепла в виде излучения для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов МЭТ можно сделать вывод о целесообразности охлаждать нагретый кристалл полупроводникового прибора при помощи излучения, причем мощность охлаждения прямо пропорциональна частоте излучения (рис. 7). Таким образом, применение оптических матриц в виде светодиодных матриц ультрафиолетового диапазона позволяет изготовить высокоэффективные, малоинерционные системы охлаждения для МЭТ. Кроме того, частично можно рекуперировать световое

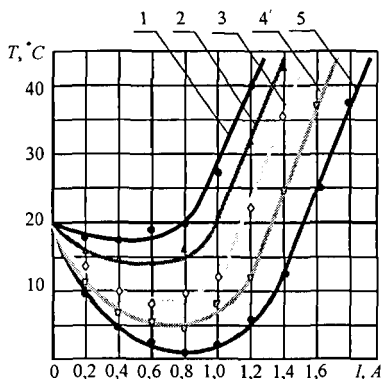


Рисунок 7 - Сравнение расчетных и экспериментальных температурных зависимостей работы излучающих ТЭУ различного светового диапазона: 1 - обычный ТЭУ, 2 - излучающий ТЭУ в красном диапазоне, 3 - излучающий ТЭУ в желтом диапазоне, 4 - излучающий ТЭУ в зеленом диапазоне, 5 - излучающий ТЭУ в ультрафиолетовом диапазоне

излучение обратно в электроэнергию при помощи солнечных батарей (до 30 %).

Эксперимент подтвердил правомерность разработанных ММ и полученных на их основе теоретических положений. Среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных составило не более 11 % на всем диапазоне измерений.

В результате экспериментальных исследований ТЭУ с отводом тепла с импульсным питанием для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов МЭТ можно сделать вывод о целесообразности применения импульсного питания, причем для каждого конкретного ТЭУ существуют свои оптимальные значения параметров импульсов, позволяющие достичь максимального режима хладопроизводительности (рис. 8).

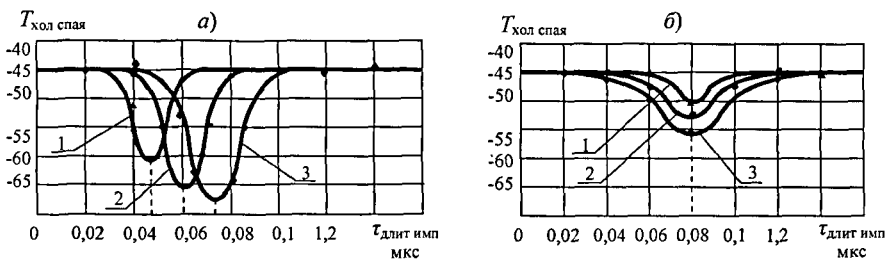


Рисунок 8 - Зависимость температуры охлаждающего спая от длительности (а) и скважности (б) импульсов питания:

1 – ТВ-12-0.45-1.3; 2 – ТВ-11-0.6-1.5; 3 – ТВ-17-1.0-0.7

Эксперимент проведенный для трех образцов ТЭУ подтвердил правомерность разработанных ММ и полученных на их основе теоретических положений. Среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных составило не более 7 % на всем диапазоне измерений.

В четвертой главе «Термоэлектрические устройства и приборы для охлаждения микроэлектронной техники» описаны разработанные конструкции охлаждающих металлических электродов для охлаждения СБИС в МЭТ и ТЭУ.

Целесообразно использовать излучающее ТЭУ вместо традиционных куллеров для компьютерных процессоров (рис. 9).

Преимуществом является:

1. Абсолютная бесшумность;
2. Малая тепловая инерционность за счет мгновенного переноса тепловой энергии в виде излучения, причем если изготовить светодиодную матрицу непосредственно на полупроводниковом кристалле чипа и сделать корпус процессора прозрачным, то уменьшится количество тепловых сопротивлений от источников тепловыделения до охладителя;

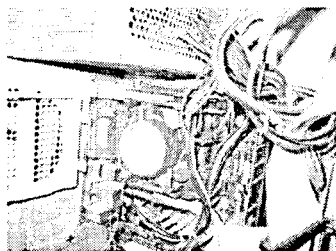


Рисунок 9 - Излучающее ТЭУ для компьютерных процессоров

3. За счет изменения режимов работы излучающего ТЭУ можно динамично изменять режимы охлаждения процессора, тем самым, обеспечив термостатирование даже в нестационарных режимах работы.
4. С целью обеспечения режима энергосбережения испускаемые излучения могут быть частично рекуперированы при помощи солнечных батарей и сгенерированная энергия может быть возвращена в электронную схему.

Наиболее целесообразно применять энергосберегающие технологии такого вида в автономных устройствах для продления режима работы от автономного источника питания (сотовые телефоны, смартфоны, коммуникаторы, ноутбуки, видекамеры и т.д.).

Наиболее ценным качеством созданных охлаждающих устройств с отводом тепла в виде излучения является их безинерционность, так как излучение со скоростью света уводит тепло от источника в виде энергии излучения в окружающую среду.

На рис. 10 и 11 приведены опытные образцы излучающих ТЭУ для охлаждения мощных полупроводниковых приборов (транзистора и СБИС).

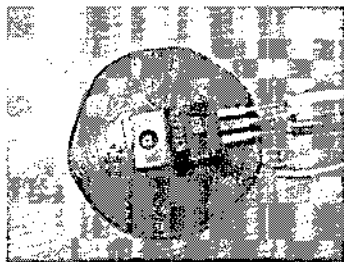


Рисунок 10 - Опытный образец излучающего ТЭУ для охлаждения мощного полупроводникового транзистора

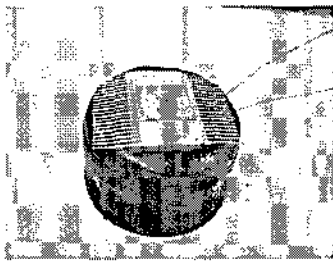


Рисунок 11 - Опытный образец излучающего ТЭУ для охлаждения мощной СБИС

Для повышения мощности охлаждения тепловыделяющих источников МЭТ можно рекомендовать применение одновременно светодиодных матриц, биметаллических электродов и импульсного питания охлаждающих ТЭУ. Кроме того, импульсный режим питания позволяет путем выбора длительности, скважности и амплитуды импульсов оптимизировать режимы работы для получения максимальной холодопроизводительности ТЭУ.

Для обычных ТЭУ одним из конструктивных ограничений являлась толщина модуля, т.е. расстояние между горячими и холодными спаями. Если это расстояние было маленьким, то кондуктивный теплоперенос не позволял получить большой перепад температур, а если расстояние между спаями было большим, то Джоулевы тепловыделения в ветвях ограничивали производительность ТЭУ. Этот недостаток полностью отсутствует в предлагаемом излучающем ТЭУ, так как отсутствует горячий спай и нет паразитного кондуктивного теплопереноса на холодный спай. Излучающее ТЭУ может быть изготовлено в виде тонкой прозрачной многослойной структуры. Применение нескольких каскадов при отсутствии Джоулевых тепловыделений, за счет ничтожно малого омического сопротивления  $p-n$  ветвей в виде тонких пленок позволяет легко достичь сверхнизких температур, применяемых для криоэлектроники. Дополнительным преимуществом является сохранение работоспособности излучающего ТЭУ даже в режимах сверхпроводимости, так как отсутствуют дестабилизирующие тепловыделения при сохранении охлаждающего эффекта Пельтье за счет разных энергетических уровней электронов в разнородных материалах, даже в режиме сверхпроводимости.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

В приложениях к диссертации приведены акты внедрения результатов работы.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе решения задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие основные результаты:

1. Разработаны различные тепловые схемы полупроводниковых ТЭУ для охлаждения тепловыделяющих компонентов на основе биметаллических электродов СБИС и со стационарным отводом тепла в виде излучения, позволяющие получить конкретные рекомендации по их использованию в МЭТ для различных условий эксплуатации.
2. Разработаны ММ биметаллических электродов СБИС для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов в МЭТ.
3. Разработаны ММ ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения.
4. Созданы методики, позволяющие разработчикам проводить целенаправленный выбор охлаждающих ТЭУ с импульсным питанием в зависимости от предъявляемых требований.
5. Доказана адекватность разработанных ММ экспериментальным путем; сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение не превысило допустимых значений.
6. На основе проведенных исследований разработаны принципиально новые типы охлаждающих ТЭУ для МЭТ.
7. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс и в учебный процесс вуза.
8. Получены положительные решения на выдачу патентов РФ на изобретение для полупроводниковых ТЭУ для охлаждения тепловыделяющих компонентов в МЭТ со стационарным отводом тепла в виде излучения и способа импульсного питания охлаждающих ТЭУ.
9. Разработаны рекомендации для уменьшения тепловыделений компонентов интегральных схем в МЭТ.
10. Совокупность результатов проведенных исследований позволяет использовать их в качестве научной основы в дальнейшем при разработке и создании ТЭУ для МЭТ.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

**I. Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:**

1. Челушкина Т.А. Термоэлектрическое устройство со стационарным отводом тепла в виде излучения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2010. - №18. – С.21-30.

**II. Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А. Интенсификация теплопереноса в тепловых трубах за счет применения магнитогидродинамической системы // Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты: сб. трудов регион. науч.-техн. конф., 7-9 дек. 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2006. – С.79;
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А. Разработка математической модели режима максимальной холодопроизводительности термоэлемента при импульсном питании // Сборник тезисов докладов XXVIII итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2007. – Ч.1. – С.60;



4. Исмаилов Т.А., Исмаилов Р.Т., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А. Высокорецизионные малоинерционные датчики температуры для мониторинга // Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения: материалы III Всерос. науч.-тех. конф., 10-14 окт. 2007 г. – Махачкала: ДГТУ, 2007. – С. 76 – 78;
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А. Математическая модель тепловых явлений в биметаллических электродах для охлаждения тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники // Сборник тезисов докладов XXIX итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2008. – С.47-48;
6. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Асекова М., Цымбалова Т. Диагностика состояния здоровья человеческого организма // Биотехнические и медицинские аппараты и системы: тез. докл. Всерос. науч.-тех. конф., 19-20 июня 2003 г. – Махачкала: ДГТУ, 2003. – С.57;
7. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Колесникова Ю., Цымбалова Т., Маслов О. Программно-аппаратный комплекс для диагностики электронной аппаратуры на базе ПК // Сборник тезисов докладов XXV итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 22-24 апр. 2004 г. – Махачкала: ДГТУ, 2004. – С.131-132;
8. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Ирзаев Г.Х. Разработка программно-аппаратного комплекса для кодирования информации при работе с кредитными карточками // Сборник тезисов докладов XXV итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 22-24 апр. 2004 г. – Махачкала: ДГТУ, 2004. – С.134;
9. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М. Модернизация станков с числовым программным управлением на базе персонального компьютера // Сборник тезисов докладов XXVI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21-23 апр. 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2005. – С.182;
10. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Термоэлектрический автомобильный термостат для системы охлаждения двигателя // Сервис: проблемы и пути развития в условиях рыночной экономики: сб. докл. регион. науч.-практ. конф., 26-27 мая 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2005. – С.74-75;
11. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Использование термоэлектрических явлений в полупроводниковых структурах для уменьшения тепловыделений полевых и биполярных транзисторов // Сервис: проблемы и пути развития в условиях рыночной экономики: сб. докл. регион. науч.-практ. конф., 26-27 мая 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2005. – С.85-86;
12. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Сфиев М.М. Сервисная автоматизированная система диагностики при микроскопических исследованиях // Сервис: проблемы и пути развития в условиях рыночной экономики: сб. докл. регион. науч.-практ. конф., 26-27 мая 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2005. – С.112-113;
13. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Применение тепловых труб для охлаждения полупроводниковых приборов через коммутационные проводники // Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты: сб. трудов регион. науч.-техн. конф., 7-9 дек. 2005 г. – Махачкала: ДГТУ, 2006. – С.80;
14. Челушкина Т.А., Гаджиева С.М. Рекуперирование энергии тепловыделяющих компонентов электронных схем при помощи оптронных термомодулей // Сборник тезисов докладов XXVIII итоговой научно-технической

- конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2007. – Ч.1. – С.75;
15. Челушкина Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Применение термоэлектрических устройств для опреснения морской воды на аварийно-спасательных шлюпках // Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения: материалы III Всерос. науч.-тех. конф., 10-14 окт. 2007 г. – Махачкала: ДГТУ, 2007. – С. 94 – 95;
  16. Челушкина Т.А. Термоэлектрический теплоотвод с применением кипящего хладагента // Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения: материалы III Всерос. науч.-тех. конф., 10-14 окт. 2007 г. – Махачкала: ДГТУ, 2007. – С. 131 – 132;
  17. Челушкина Т.А., Гаджиева С.М. Математическая модель теплофизических явлений в термоэлектрических устройствах с отводом тепловой энергии в виде излучения // Сборник тезисов докладов XXIX итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2008. – С.43-44;
  18. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения: пат. 2405230 Рос. Федерация: МПК G 06 F 1/20 / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет». - № 2009120686/09; заявл. 01.06.2009, опубл. 27.11.2010, Бюл. №33;
  19. Способ оптимизации режимов работы термоэлектрической батареи с учетом геометрических и электротеплофизических параметров при импульсном питании: пат. 2417356 Рос. Федерация: МПК G 05 D23/01/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет». - №2009120687/28; заявл. 01.06.2009, опубл. 10.12.2010, Бюл. №34;
  20. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение от 02.03.2011 по заявке №2009120673/28(028566); Способ охлаждения полупроводниковых тепловыделяющих электронных компонентов через биметаллические термоэлектрические электроды/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., заявитель ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет», заявл. 01.06.2009.

Сдано в набор 30.05.2011. Подписано в печать 30.05.2011.  
Формат издания 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать ризограф. Усл. печ. л 1,0  
Уч-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ 262

**Отпечатано в ИПЦ ДГТУ.**  
**367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70.**