

На правах рукописи

Бохов Олег Сергеевич

**ФИЗИКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на
квантовых эффектах.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры микроэлектроники
Корляков Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
Мельников Александр Александрович;

кандидат технических наук, доцент
Козлов Александр Геннадьевич.

Ведущая организация - ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»

Защита состоится «___» декабря 2010г. в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, Профессора Попова 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, Профессора Попова 5.

Ученый секретарь
диссертационного совета
по защите докторских и кандидатских диссертаций
доктор физико-математических наук, профессор

В. А. Мошников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Теплофизические микросистемы в рамках действующих стандартов отнесены к изделиям микросистемной техники (МСТ) и могут быть определены следующие основные направления их развития: сенсоры, актюаторы, микротурбины, микротермореакторы, микротеплообменники.

Уменьшение геометрических размеров при создании как устройств МСТ различного функционального назначения, так и элементной базы микро- и нанoeлектроники, требует проведения дополнительного анализа применимости ранее известных критериев, моделей, методов оценки процессов теплообмена с учетом размерного фактора. Теоретический анализ, а также дополнительные экспериментальные оценки необходимы для адаптации и эффективного применения известных пакетов прикладных программ моделирования теплофизических процессов (например CowentorWare, IntelliSuite, Comsol Multyphysics, Ansys) при конструировании устройств МСТ с использованием адекватных параметров, учитывающих изменение условий теплообмена при переходе к микро- и наноразмерам.

Следует также отметить что, уменьшение геометрических размеров и массы чувствительных и исполнительных элементов позволяют, используя новые методические подходы и материалы, создавать теплофизические микроприборы с ранее недостижимыми характеристиками в отношении чувствительности, быстродействия и стабильности работы.

Цель диссертационной работы:

исследование влияния размерных факторов на процессы теплообмена в устройствах микросистемной техники и разработка нового поколения теплофизических датчиков на основе динамического метода измерений с использованием искусственно стимулированных периодических тепловых процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ применимости классических критериев теплообмена при переходе к микро- и наноразмерам и определить доминирующие факторы и механизмы теплообмена в условиях микросистем;
- разработать конструкцию и исследовать характеристики сенсорной теплофизической микросистемы, основанной на искусственно стимулированном периодическом тепловом процессе и измерении временных параметров тепловой волны, распространяющейся в среде между источником и приемником тепла;
- осуществить проектирование кристалла универсального интегрального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанного на периодическом тепловом процессе, являющегося базисом для создания нового поколения различных теплофизических датчиков: температуры, потока, давления;

- разработать и реализовать технологический маршрут изготовления кристалла интегрального универсального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанный на стандартных операциях и материалах, а для повышения стабильности и чувствительности микросенсора, исследовать возможность использования в качестве материала базовых конструктивных элементов устойчивый к воздействию высоких температур широкозонный полупроводниковый материал карбида кремния;
- исследовать теплофизические характеристики универсального чувствительного элемента анемометрического датчика как базиса для создания теплофизических датчиков различного функционального назначения нового поколения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Осуществлен анализ применимости классических критериев теплообмена при переходе к микро- и наноразмерам и определены доминирующие факторы и механизмы теплообмена в условиях микросистем.
2. Предложен динамический метод измерения теплофизических характеристик среды, основанный на регистрации изменения временных параметров искусственно создаваемой периодической тепловой волны, распространяющейся в среде между источником и приемником тепла
(получен патент РФ на полезную модель № 59823).

Практическая значимость полученных в работе результатов:

1. Разработана конструкция универсального интегрального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанного на периодическом тепловом процессе, являющегося базисом для создания различных теплофизических датчиков (температуры, потока, давления) нового поколения.
2. Разработан и реализован технологический маршрут изготовления кристалла интегрального универсального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанный на стандартных операциях и материалах, а также с использованием в качестве базового материала конструктивных элементов - алмазоподобного широкозонного полупроводникового материала карбида кремния (получен патент РФ №2247442).
3. Исследованы образцы кристалла универсального чувствительного элемента анемометрического датчика и показано, что предложенная конструкция и материаловедческая база чувствительного элемента

позволяют создавать сенсорную теплофизическую микросистему, отличающуюся повышенной чувствительностью и стабильностью.

Основные положения выносимые на защиту:

1. При характеристических размерах конструкционных элементов микросистем, участвующих в теплообмене, соизмеримых с десятками длин свободного пробега молекул окружающей среды, на процесс теплообмена доминирующее влияние оказывает не геометрия элементов микросистемы, а теплофизические свойства окружающей среды и плотность теплового потока от микросистемы.
2. Повышение чувствительности теплофизических микросенсоров и снижение требований к точности предварительного определения теплофизических характеристик конструкционных элементов микросистем и окружающей их среды, достигается переходом от статического к динамическому методу измерений, основанному на определении временных характеристик, распространяющейся в среде между микронагревательным и чувствительным элементами, искусственно возбуждаемой, периодической тепловой волны.

Реализация результатов работы:

Результаты диссертационных исследований являлись составной частью НИР и ОКР, выполненных в Центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ в том числе:

ЦМИД-105 ОКР «Ямб – ЛЭТИ»; ЦМИД-144 ОКР «Ямб-Прибор»;

ЦМИД-165 НИР «Эпитаксия - Л»; ЦМИД-201 НИР «Находка-Л»;

Получены акты об использовании результатов диссертационной работы в ФГУП «ГосНИИ прикладных проблем», ОАО «Центр технологии микроэлектроники», а также в учебном процессе СПбГЭТУ в рамках дисциплины «САПР микросистем», «Микро- и наносенсорика»

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе: статье, опубликованной в ведущем рецензируемом издании, рекомендованном в действующем списке ВАК, 2 патента РФ, 2 тезиса доклада на межвузовских научно-практических конференциях, 1 учебно-методическое пособие.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений. Основная часть работы изложена на 126 страницах машинописного текста, включает 31 рисунок, 5 таблиц, 5 приложений и содержит список литературы из 40 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, и дано краткое описание содержания работы.

Первая глава носит обзорный характер. Рассмотрены основные типы теплофизических микросистем: микродатчики температуры и теплового излучения, микротермоактюаторы, микротурбины и микрореакторы, микротеплообменники. С целью характеристики основных конструктивных элементов теплофизических микросистем, принципов их работы и механизмов теплообмена представлен краткий анализ, позволяющий определить направления развития конструкторско-технологической реализации данного класса микроприборов.

Показано, что в рамках современных тенденций развития микросистемной техники теплофизические микросистемы обеспечивают выполнение функций за счет накопления и преобразования в микрообъемах, в том числе обратимого, тепловой энергии в электрическую или механическую. Для данного класса микроприборов процессы теплообмена носят фундаментальный характер, поскольку при переходе к микро- и наноразмерам имеет место как сверхвысокая плотность генерации тепла, так и необходимость его диссипации в чрезвычайно ограниченном объеме и в течении сверхмалых интервалов времени. Таким образом, в качестве наиболее актуальных вопросов изучения теплофизических микросистем были определены: исследование влияния размерного фактора на применимость классических критериев теплообмена в условиях микросистем; разработка высокочувствительных теплофизических микросенсоров, с учетом возможного перехода к конструкционным элементам микро- и наноразмеров; конструкторско-технологическая реализация теплофизических микросенсоров в рамках твердотельных интегральных микросистем.

Вторая глава посвящена исследованию влияния микро- и наноразмерных факторов на конструирование и функционирование микросистем. Дан анализ основных видов теплообмена для базовых конструктивных элементов микросистем и рассмотрены особенности функционирования теплофизических микросистем.

В качестве основных анализируемых классических критериев теплообмена выбраны три критерия: Кнудсена, Нуссельта и Био, которые, соответственно, определяют теплообмен между окружающей средой и микрообъектом, интенсивность теплоотдачи микрообъекта через окружающую среду и являются мерой отношения, тепловых сопротивлений окружающей среды и микрообъекта. Таблица отражает изменение в значениях ранее указанных классических критериев теплообмена при переходе в микро- и наноразмерную области.

Таблица.

Особенности описания процесса теплообмена на микроуровне

Критерий	Назначение	Математическое описание	Условия		Особенности влияния на размерный фактор
			Макро	Микро	
Кнудсена	Определяет теплообмен между анализируемой средой и микрообъектом	$Kn = \frac{\lambda}{L}$	$Kn \gg 1$	$10^{-3} < Kn < 1$	Непосредственно зависит от характеристического размера
Био	Является мерой отношения тепловых сопротивлений анализируемой среды и микрообъекта	$Bi = \frac{h \times L}{R_T}$	$Bi \gg 1$	$Bi \ll 1$	Учет характеристического размера опосредованно связан с изменением теплофизических характеристик материала и R_T , которые в свою очередь являются функциями L и действующего в микрообъекте источника тепла
Нуссельта	Определяет интенсивность теплоотдачи микрообъекта через анализируемую среду	$Gr = \frac{gL^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2}$ $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\eta c_p}{\kappa}$ $Nu = f(Gr \times Pr)$	$Gr \approx f(L^3)$ L -характеристический размер. $Pr \approx f(\alpha)$ α -коэффициент температуропроводности при переходе к микроэлементам зависит от геометрии (например толщины конструктивного элемента)	Зависит от L и формы микрообъекта (шар, пластина, струна) и принимает значение констант от 0.5 до 2.0	При характеристическом размере $< 200 \mu\text{м}$ число Nu принимает значение констант, зависящих от формы тела, что требует дополнительной экспериментальной оценки для отдельных конструктивных элементов

При нормальных условиях: $P=1 \text{ атм.}$ и $T=20 \text{ }^\circ\text{C.}$

В таблице использованы следующие условные обозначения физических величин: λ - длина свободного пробега молекул окружающей среды, [м];
 L - характеристический размер конструкционного элемента;
 h - коэффициент теплоотдачи в газ, жидкость [Вт/м²];
 g - ускорение свободного падения, [м/с²];
 t_c - температура поверхности теплообмена, [К];
 t_0 - температура теплоносителя, [К];
 ν - коэффициент кинематической вязкости, [м²/с];
 β - температурный коэффициент объёмного расширения теплоносителя;
 ρ - плотность [кг/м³]; R_T - коэффициент теплопроводности, [Вт/м·К];
 C_p - удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении [Дж·кг⁻¹·К⁻¹];
 α - коэффициент температуропроводности [м/с];

Для типовой конструкции и геометрических размеров элементов микросистемы (рис. 1.) дан анализ наиболее значимого критерия теплообмена – критерия Кнудсена, который определяет теплообмен между окружающей средой и конструктивными элементами микросистемы.

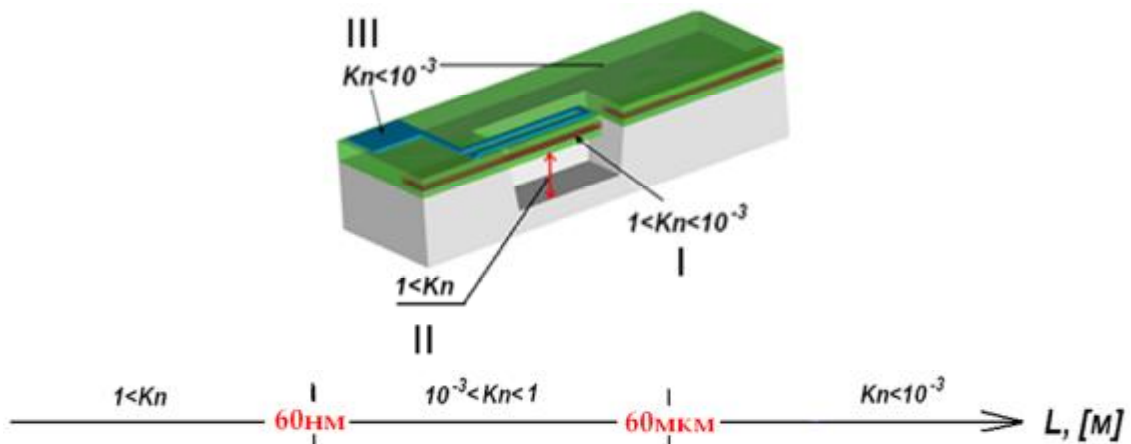


Рис. 1. Изменение значений числа Кнудсена в зависимости от вида конструкционных элементов микросистемы

В качестве таких анализируемых узлов типовой микросистемы выбраны три основные области: функционально значимые микро- и нанозазоры в объеме твердого тела (I), определяющие основные характеристики микросистемы; базовые элементы конструкции микроприборов, размещенные в зоне полостей микро размеров (II); элементы несущей конструкции большой площади, обеспечивающие основной тепловой контакт микросистемы с окружающей средой (III).

При выборе в качестве базисного параметра - длины свободного пробега молекул окружающей среды, которая для нормальных условий взаимодействия микросистемы с окружающей средой ($P=1$ атм, $T=200$ °С) составляет 60 нм, была построена диаграмма, отражающая градацию значений числа Кнудсена в пределах $10^{-3} < Kn < 1$. Данная диаграмма устанавливает связь на микро- и

наноразмерных уровнях между характеристическими параметрами конструктивных элементов и значением данного критерия, определяющего особенности теплообмена между окружающей средой и функциональными областями микрообъектов.

В результате анализа показано, что, исходя из известных теоретических представлений для микросистем, конструктивные элементы которых во взаимодействии с окружающей средой характеризуются значениями числа Кнудсена в интервале $10^{-3} < \text{Kn} < 1$, должны реализоваться различные промежуточные режимы течения газа от свободномолекулярного до континуального.

Анализ возможности использования другого классического критерия теплообмена, числа Нуссельта, определяющего интенсивность теплоотдачи микрообъекта через окружающую среду показал, что при значениях произведения критериев Грасгоффа и Прандтля, входящих в критерий Нуссельта (см. Таблицу), меньших, чем 10^{-3} (соответствует характеристическому линейному размеру $\approx 200 \mu\text{м}$) на данный критерий, в первую очередь, оказывает влияние форма объекта. При значениях комплекса GrPr меньше 10^{-3} для струны экспериментально определено значение критерия Nu равное 0.45, а для шара минимальное значение критерия Nu достигает 2.

Таким образом, поскольку, при значениях комплекса $\text{GrPr} < 10^{-3}$ числовое значение критерия Nu стремится к константе, зависящей от формы тела, то при определении условий теплоотдачи доминирующим будет являться значение критерия Кнудсена. Следовательно, при выполнении этих условий можно сделать вывод о том, что при характеристических размерах конструктивных элементов, участвующих в теплообмене, соизмеримых с десятками длин свободного пробега молекул окружающей среды, на процесс теплообмена доминирующее влияние оказывает не геометрия элементов микросистемы, а теплофизические свойства окружающей среды и плотность теплового потока от микросистемы. Обобщенное представление об эффективности выбора базовых критериев теплообмена иллюстрирует рис.2

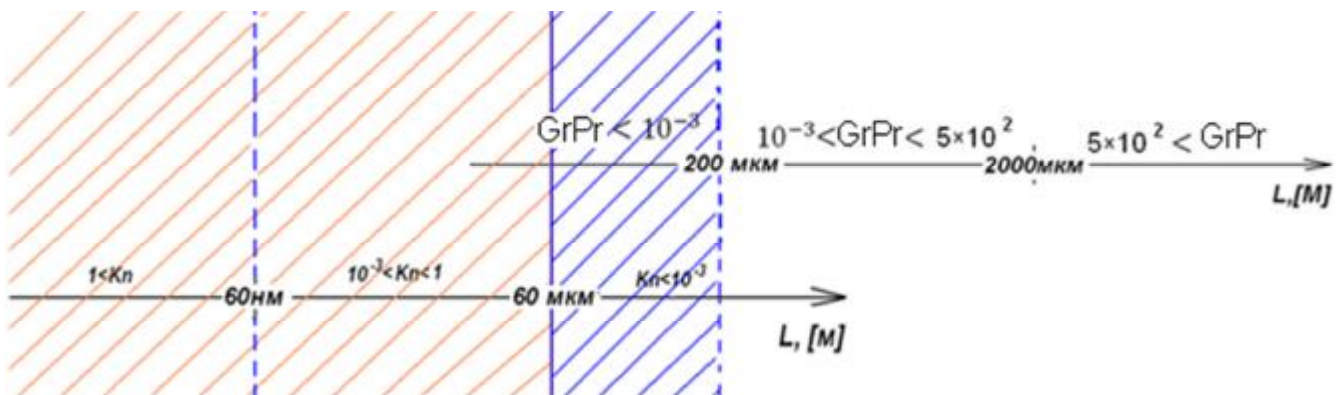


Рис.2 Влияние размерного фактора на выбор базового критерия теплообмена микрообъекта и среды

Обобщенное представление о возможности использования критерия Био, являющегося мерой отношения тепловых сопротивлений анализируемой среды и микрообъекта, отражает Таблица. Однозначного влияния размерного фактора на численное значение критерия Био нет, поскольку в данный критерий, наряду с характеристическим размером, входит ряд физических параметров: температуропроводность, тепловое сопротивление, которые при достижении микро размеров в значительной мере зависят от геометрии конструктивных элементов. Кроме того, применительно к данному критерию может быть использовано представление о тепловой нагрузке элементов микросистемной техники, определяемой выделяемой в них мощностью, что типично для импульсных микро размерных систем с высокой локализацией процессов энерговыделения.

Таким образом, установлено, что изменение размерного фактора существенно влияет на критерии Кнудсена и Нуссельта, и это следует учитывать при оценке процессов теплообмена с использованием ранее указанных программных пакетов для моделирования микросистем.

В третьей главе предложен метод теплофизических измерений и выполнена разработка сенсорной теплофизической микросистемы, основанный на использовании периодической тепловой волны, позволивший создать сенсорную теплофизическую интегральную микросистему повышенной стабильности и чувствительности. В основу метода положено измерение временных параметров искусственно стимулированной тепловой волны, распространяющейся в среде между источником и приемником тепла, то есть между исполнительным и чувствительным элементами. Для физико-математического обоснования данного метода используется решение задачи распространения тепла в полубесконечном теле от источника с температурой поверхности периодически изменяющейся по закону:

$$T_c = T_{\max} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot p \cdot t}{t_0}\right),$$

где: T_c – температура поверхности, T_{\max} – амплитуда температурных колебаний, t - время, t_0 - период колебаний

Получены решения, определяющие изменение температуры вдоль координаты x по нормали к поверхности:

$$T = T_{\max} \cdot e^{-\sqrt{\frac{p}{a \cdot t_0}} \cdot x} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot p \cdot t}{t_0} - \sqrt{\frac{p}{a \cdot t_0}} \cdot x\right),$$

где x – координата по нормали к поверхности.

Для любого расстояния x колебания температуры имеют один и тот же период, однако на расстоянии x от источника колебания запаздывают по фазе

$$\Delta t = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_0}{a \cdot p}} \cdot x,$$

где Δt - время запаздывания.

Таким образом, в предложенном методе тепловое поле меняется во времени периодически, что является основой для универсального чувствительного элемента анемометрического датчика с повышенной чувствительностью, поскольку в основу метода положено измерение временных параметров.

На рис.4. представлено сравнение двух принципов измерений - традиционного стационарного и предлагаемого динамического метода измерения.

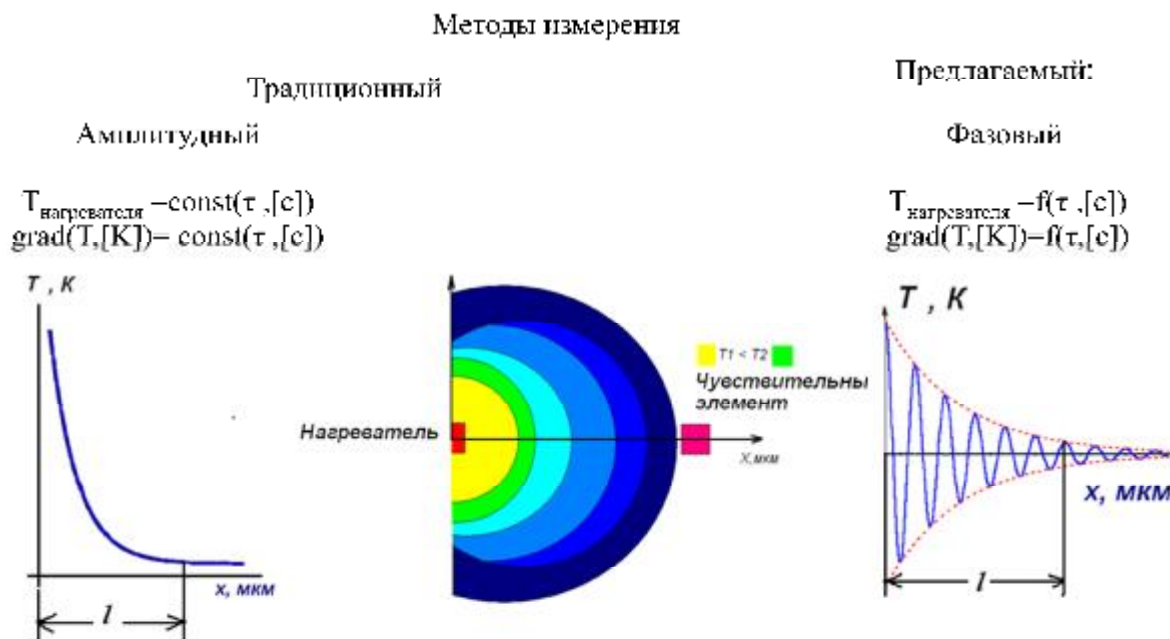


Рис. 4. Сравнение традиционного и предлагаемого метода теплофизических измерений

Проектирование кристалла универсального чувствительного элемента анемометрического датчика осуществлено в пакете сквозного проектирования устройств МСТ «CowentorWare» и включает: построение эквивалентной схемы универсального анемометрического датчика, учитывающей основные физические явления и процессы, имеющие место в базовом наборе элементов; расчет и предварительную оценку параметров элементов с учетом размерных факторов; параметрический поиск оптимальной конструкции с учетом используемых конструктивных материалов; разработку технологического маршрута изготовления кристалла универсального анемометрического датчика и набора фотошаблонов для его реализации.

В качестве базовых материалов были выбраны кремний и карбид кремния. Последний обеспечивает более высокую стабильность работы теплофизической микросистемы в условиях повышенных температур. Реализуемая базовая топологическая норма составляла 2 мкм при расстоянии между источником теплового излучения и приемником 120 мкм.

Характеризуя особенности конструкции чувствительного элемента термоанемометрического датчика, следует отметить, что за основу была выбрана мостовая схема, при этом, резисторные пары R1 и R3, R2 и R4 (расчетный номинал – 7 кОм) располагались на тонких свободных балках, подвешенных в окне конструкции. Резисторы в парах имеют непосредственный тепловой контакт друг с другом, то есть перегрев R3 и R4 вызывает изменение сопротивления терморезисторов R1 и R2. Электрическая схема, топология и физическая структура чувствительного элемента универсального термоанемометрического датчика представлены на рис. 5.

Симметричность схемы позволяет использовать любое из плеч в качестве рабочего или корректирующего. Обеспечивается также универсальность чувствительного элемента, и он может быть оптимизирован для измерения давления, температуры, скорости потока.

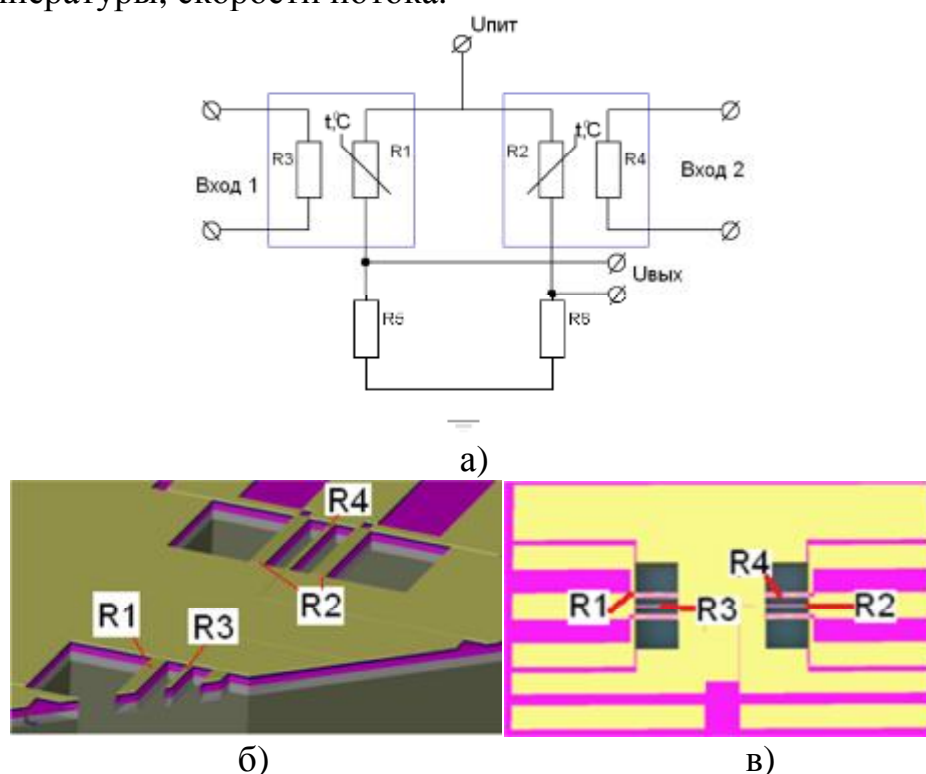


Рис. 5. Электрическая схема (а), физическая структура(б) и топология (в) кристалла интегрального чувствительного элемента анемометрического преобразователя на основе периодического теплового процесса

Четвертая глава отражает техническую реализацию и исследование универсального чувствительного элемента анемометрического датчика на основе теплового периодического волнового процесса.

На рисунке 6 представлена фотография фрагмента изготовленного кристалла интегрального универсального чувствительного элемента термоанемометрического датчика с детализацией зоны «источник–приемник» тепла.

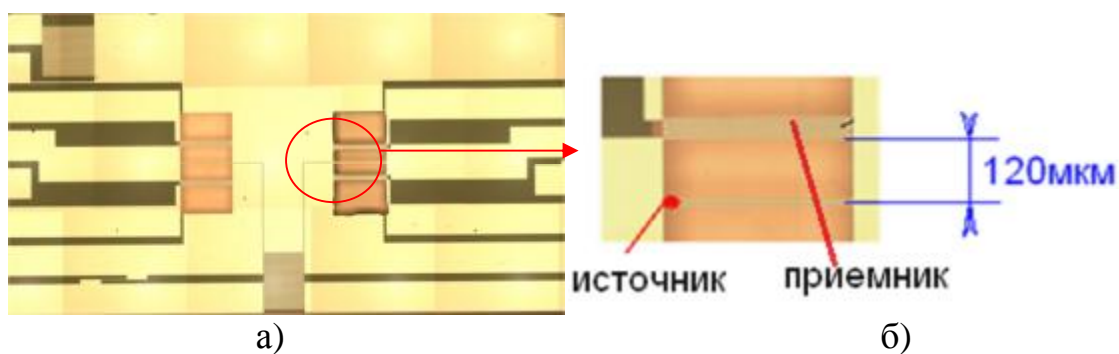


Рис. 6. Кристалл интегрального универсального чувствительного элемента термоанемометрического датчика

Для проведения исследований тепловых полей, возникающих при подключении микронагревателя к источнику напряжения, периодически изменяющемуся по закону:

$$U_{BX} = U_0 + U_1 \cdot \cos\left(\frac{2p \cdot t}{t_0}\right),$$

где: U_{BX} – напряжение на микронагревателе, U_0 – постоянная составляющая напряжения, U_1 – амплитуда переменной составляющей напряжения,

использовался инфракрасный микроскоп InfraScope HS (QFI), имеющий пространственное разрешение не хуже 2 мкм и чувствительность к изменению температуры не хуже 0.1 К. Временное разрешение системы, определяемое его паспортными данными, характеризуется максимальным значением частоты периодически меняющихся тепловых процессов в 200 кГц.

На рисунке 7 представлены картина температурного поля на поверхности кристалла интегрального универсального чувствительного элемента термоанемометрического датчика в зоне «источник–приемник» и осциллограмма изменения температуры на источнике при подаче синусоидального напряжения с частотой 50 Гц.

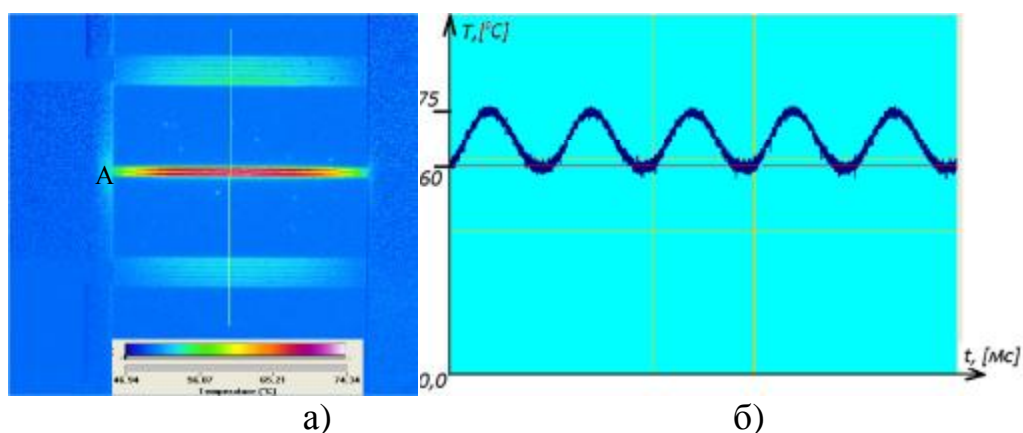


Рис.7 Картина теплового поля (а) кристалла интегрального универсального чувствительного элемента термоанемометрического датчика в зоне «источник–приемник» и осциллограмма (б) изменения температуры источника.

Для исследования электрических характеристик созданного чувствительного элемента использовалось осцилографирование времени запаздывания фронта тепловой волны. Базовые частотные параметры задающего сигнала изменяются в диапазоне от 60 до 300 Гц. Установлено, что гармонические изменения температуры на входном резисторе R3 вызывает гармоническое изменение сопротивления R1, но с запаздыванием по фазе на некоторый временной интервал Δt . Полученные осцилограммы входного и выходного напряжений для чувствительного элемента представлены на рисунке 8.

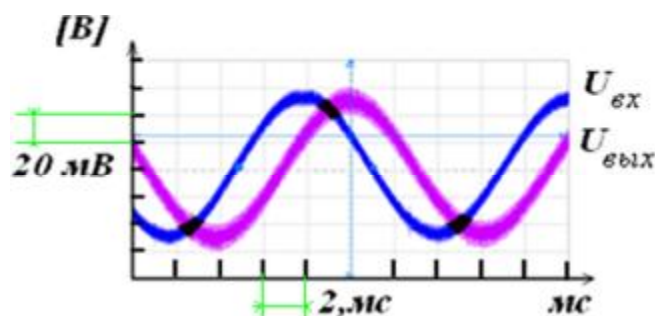


Рис.8. Экспериментально наблюдаемое запаздывание выходного напряжения относительно входного в системе «источник-приемник» тепла

Экспериментально полученное время запаздывания при нормальном атмосферном давлении воздуха 10^5 Па и расстоянии между нагревателем и датчиком температуры 120 мкм составляло $2.0 \text{ мс} \pm 0.1 \text{ мкс}$. Рассчитанное по ранее представленной формуле, запаздывание имело значение 2.3 мс. Такое различие может отражать реальную картину распространения тепла не только через воздушную среду между источником и приемником, но и через несущие элементы конструкции (зоны крепления струн нагревателя). На это также указывает, ранее представленная, картина теплового поля (см., рис.7 точка А).

Таким образом, повышение чувствительности теплофизических микросенсоров и снижение требований к точности предварительного определения теплофизических характеристик используемой среды достигается переходом от статического к динамическому методу измерений, основанному на определении сдвига фаз искусственной периодической тепловой волны, распространяющейся в среде между микронагревателем и чувствительным элементом.

Установлено, что исходя из устойчивости SiC в условиях повышенных температур целесообразно его использование, как базового материала для микронагревателя в интегральном универсальном чувствительном элементе термоанемометрического датчика с целью обеспечения стабильности и долговечности работы.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты выполненных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Проведен анализ особенностей проявления микро- и наноразмерных факторов при конструировании и функционировании микросистем и показано, что при характеристических размерах конструкционных элементов, участвующих в теплообмене, соизмеримых с десятками длин свободного пробега молекул окружающей среды, доминирующее влияние на процесс теплообмена оказывает не геометрия элементов микросистемы, а теплофизические свойства окружающей среды и плотность теплового потока от конструкционных элементов.
2. Предложен динамический метод измерения теплофизических параметров среды, основанный на регистрации измерения временных параметров искусственно создаваемой периодической тепловой волны распространяющейся в среде между нагревателем и чувствительным элементом.
3. Предложена конструкция и осуществлена разработка сенсорной теплофизической микросистемы на основе периодического теплового процесса и показано, что повышение чувствительности теплофизических микросенсоров и снижение требований к точности предварительного определения теплофизических характеристик используемой среды, достигается переходом от статического к динамическому методу измерений, основанному на определении сдвига фаз искусственно создаваемой периодической тепловой волны, распространяющейся в среде между микронагревателем и чувствительным элементом
4. Реализовано, с использованием САПР «CoventorWare», проектирование кристалла интегрального универсального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанного на периодическом тепловом процессе, включая оптимизацию конструктивно геометрических параметров и разработку комплекта фотошаблонов для практической реализации.
5. Разработан и реализован технологический маршрут изготовления кристалла интегрального универсального чувствительного элемента анемометрического датчика, основанный на стандартных операциях и материалах, а также при использовании в качестве базового материала нагревательных и чувствительных элементов алмазоподобного широкозонного полупроводникового материала карбида кремния.
6. Проведено экспериментальное исследование теплофизических характеристик универсального чувствительного элемента анемометрического датчика, который может являться базисом для создания различных теплофизических датчиков (температуры, потока, давления) нового поколения с повышенной чувствительностью и стабильностью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ, ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях ВАК России:

1. Бохов О. С., Бройко А. П., Корляков А. В., Лучинин В. В. Микросенсор для контроля остаточного давления на основе периодического теплового режима. // Нано- и микросистемная техника №2, 2010. С. 14-17.

Патенты:

2. Корляков А.В., Лучинин В.В., Бройко А.П., Бохов О.С. Термоизмерительная система и способ изготовления информационной микросхемы для термоизмерительной системы. // Описание к патенту Российской Федерации, Патент №2247442 от 27.02. 2005.

3. Бохов О.С. Лучинин В.В., Корляков А.В. Устройство для определения давления // Описание к патенту Российской Федерации, Патент на полезную модель № 59823 от 27.12.2006.

Другие печатные издания и материалы конференций:

4. Бохов О.С., Ильвес А.Г., Ильков А.В., Лучинин В.В. Введение в САПР микросистем. // Москва, 2009, Издательство Академия ФСБ России, 76 с.

5. Бохов О.С., Корляков А. В. Исследование механизма электропроводности в поликристаллических пленках SiC, полученных методом магнетронного распыления. // 7-ая научная Молодежная школа по твердотельной электронике “Физика и технология микро- и наноструктур” СПбГЭТУ “ЛЭТИ” 2004 г. С. 25.

6. Герасимов А.А. Бохов О.С., Корляков А. В. Свойства пленок карбида кремния, полученных методом магнетронного распыления. // 9-ая научная Молодежная школа по твердотельной электронике “Нанотехнологии и нанодиагностики” СПбГЭТУ “ЛЭТИ” 2006 г. С. 29.