



На правах рукописи

ШЕСТИМЕРОВ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕРМОДАТЧИК С УЛУЧШЕННЫМИ
ТОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В РАСШИРЕННОМ
ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР**

**Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

3 МАЙ 2012

Москва - 2012

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» ФГБОУ ВПО Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук, профессор
Увайсов Сайгид Увайсович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Дианов Вячеслав Николаевич - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет», профессор кафедры «Автоматики, информатики и систем управления»

Желтов Роман Леонидович - кандидат технических наук, ОАО «РКК «Энергия», с.н.с.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Московское орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени конструкторское бюро «Электрон»

Защита состоится «31» мая 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д217.047.01 при ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная, д. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования»

Автореферат разослан «24» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д217.047.01
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Варламов О. О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Управление различными технологическими процессами, поддержание в работоспособном состоянии промышленных агрегатов, машин, механизмов, обеспечение безопасной эксплуатации разнообразных технических устройств, требуют многочисленных измерений разнообразных физических величин. На сегодня существует приблизительно следующее распределение доли измерений различных физических величин: температура – 50%, расход (массовый и объемный) – 15%, давление – 10%, уровень – 5%, количество (масса, объем) – 5%, время – 4%, электрические и магнитные величины – менее 4%, что говорит о безусловном лидерстве в количестве измерений именно температуры.

Во всех областях человеческих познаний, физике, электронике, химии, механике и биологии установлены зависимости протекающих процессов от температуры. Так некоторые процессы, например химические реакции и биологические процессы, протекают нормально только в достаточно узком диапазоне температур. Электронные схемы также нормально функционируют только в довольно ограниченном температурном диапазоне, выход за рамки которого, приводит к потере работоспособности и даже разрушению аппаратуры. Многие электронные компоненты разрушаются под воздействием повышенных температур, другие, например жидкокристаллические дисплеи и полупроводниковые приборы критичны к воздействию пониженной температур.

Значительный вклад в развитие теории и практики термочувствительных элементов внесли: В. С. Громов, Н. П. Удалов, А. И. Кривоносов, Ю. В. Зайцев, И. Л. Ротберт, И. Т. Шефтель, Г. Виглеб и др.

Широкий диапазон измеряемых температур, разнообразие условий использования автоматизированных средств управления и требований к ним определяют, с одной стороны, многообразие применяемых средств измерения температуры, а с другой стороны, необходимость разработки новых типов первичных преобразователей и датчиков, удовлетворяющих возрастающим требованиям к точности, быстродействию, помехоустойчивости. Российский рынок интегральных датчиков температуры показывает, что значительную номенклатуру среди них занимают измерительно-преобразовательные устройства на диапазон температур от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. С использованием современных полупроводниковых интегральных датчиков можно реализовать измерения температуры в диапазоне от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 2,0$. Однако, в науке и промышленности существует как необходимость, так и потребность в контроле и измерении более высоких и более низких температур с высокой точностью.

С другой стороны, надо отметить, что измеряемый диапазон интегрального датчика температуры с встроенными или совмещенными

чувствительными элементами, ограничен предельными температурами элементов самой схемы (усилителями, источниками питания, цифровыми элементами и т.п.) на уровне $-55 \div +150$ °С. По этой причине за рубежом развитие и совершенствование интегральных устройств измерения температуры идёт в области сервисных функций и в части цифровой обработки измерительного сигнала. Приходится признать, за двадцать последних лет улучшение основных параметров (диапазон измерений, термочувствительность, линейность измерений) интегральных датчиков температуры не произошло.

Поэтому, создание надежного интегрального датчика температуры, отличающегося от аналогичных зарубежных образцов улучшенными основными параметрами и пригодного для серийного изготовления, является актуальной научной и технической проблемой.

Объект исследования: процесс термоэлектрического преобразования в *p-n* переходах биполярных транзисторов современных датчиков температуры.

Предмет исследования: метод, модели, схемотехнические решения, алгоритм теплоэлектрического повышения чувствительности.

Цель работы: создание конкурентноспособного интегрального термодатчика с улучшенными точностными характеристиками в расширенном диапазоне температур.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены задачи:

1. Анализ современного состояния проблемы измерения температуры в интегральном датчике.
2. Разработка метода структурного повышения чувствительности термоэлектрического преобразователя на транзисторах.
3. Построение математической модели термоэлектрического преобразователя на примере единичного биполярного транзистора.
4. Разработка алгоритма теплоэлектрического повышения чувствительности на основе построенной теплоэлектрической модели датчика.
5. Разработка принципиальной схемы интегрального датчика температуры.
6. Исследование основных параметров трех макетных образцов.
7. Создания интегрального датчика и изготовление опытной партии.
8. Проведение экспериментальных исследований образцов кремниевого интегрального датчика температуры, обоснование факта достижения в работе поставленной цели.
9. Внедрение результатов диссертационной работы в промышленность.

Методы исследования

При решении научно технических задач были использованы принципы системного подхода, а также численные методы решения уравнений и экспериментальные методы исследования, статистические методы обработки

результатов измерений, основы теории электрических зарядов, теории управления и теории оптимизации физического моделирования.

Научная новизна результатов исследования

При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана модель структурного повышения чувствительности интегрального датчика температуры на основе группы транзисторов (Патент РФ на полезную модель №100827 от 27 декабря 2010 г.) в транзисторном включении, отличающихся от транзисторов в диодном включении известных аналогов. Это позволило повысить температурную чувствительность до $>4,2$ мВ/°С, без уменьшения диапазона измерений температуры.

2. Разработана и обоснована структура термоэлектрического преобразователя на примере единичного биполярного транзистора, учитывающая в отличие от ранее известных, влияние опорного $p-n$ перехода на свойства измерительного $p-n$ перехода, что позволило оценивать основные параметры датчика до этапа экспериментальных исследований.

3. Предложен алгоритм термоэлектрического повышения чувствительности интегрального датчика, позволяющий интегрировать термочувствительность с нескольких точек термопреобразования на кристалле микросхемы, что дало возможность впервые (в интегральных датчиках) отказаться от использования транзисторных усилителей тока и напряжения и, тем самым, увеличить диапазон измерений температуры с $-55^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$ до $-65^{\circ}\text{C} \dots +175^{\circ}\text{C}$.

4. Разработан метод объединения двух прямосмещённых $p-n$ переходов биполярного транзистора в схеме с общей базой, отличающаяся от известных способов тем, что не имеет токовых связей между переходами. Анализ позволил установить, каким образом управление диффузионным зарядом из опорного $p-n$ перехода снижает объёмное сопротивление базы транзистора. Практическое решение этой проблемы в транзисторном интегральном датчике повысило линейность измерений во всём рабочем диапазоне температур с 8°C до 1°C .

Практическая полезность диссертационной работы:

1. Разработан интегральный термодатчик с улучшенными точностными характеристиками в расширенном диапазоне температур для контроля и управления температурой твердых, жидких и газообразных тел с использованием в качестве термочувствительного параметра выходной ток, величина которого определяется совокупностью термоэлектрических процессов в различных элементах транзисторного устройства.

2. Создан транзисторный интегральный датчик температур, который имеет измеряемый диапазон от минус 65°C до плюс 175°C с погрешностью измерения не хуже $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, что превышает в 1,2-1,5 раза параметры измерений зарубежных аналогичных образцов.

3. Результаты полученные в ходе настоящей диссертационной работы, в том числе модели, методы, алгоритмы, схемотехнические решения, могут использоваться при разработке новых транзисторных интегральных датчиков на измерение в диапазоне температур, приближающемся к теоретически возможному для кремния: $-100^{\circ}\text{C} \dots +300^{\circ}\text{C}$.

4. Использование в схеме датчика опорного p - n перехода ещё и как нагревателя, позволит использовать датчик в качестве:

- термоанемометра;
- датчика электромагнитных излучений;
- датчика ионизирующих излучений.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанное устройство было внедрено в системах контроля на предприятиях: ООО «НПА Вира Реалтайм», ЗАО ИТЦ «Циклон», ЗАО «ЭМИКОН», ООО фирма «Мэй».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на международном ежегодном симпозиуме «Надёжность и качество 2010» - Пенза, ПГУ, 2010;
- на международной научно-практической конференции «Инфо-2010», Россия, - Сочи, МГИЭМ, М., 2010;
- на международном ежегодном симпозиуме «Надёжность и качество 2011» - Пенза, ПГУ, 2011;
- на международной научно-практической конференции «Инфо-2011», Россия, - Сочи, МГИЭМ, М., 2011.

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАХ: журнал «Датчики и системы», журнал «Качество. Инновации. Образование.», журнал «Измерения. Контроль. Автоматизация»; получен 1 патент РФ на полезную модель на устройство для измерения температуры.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы, приложения, включающих акты внедрения и патент на полезную модель.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Модель структурного повышения чувствительности интегрального датчика температуры;
2. Структура первичного термоэлектрического преобразователя;
3. Алгоритм теплоэлектрического повышения чувствительности интегрального датчика температуры;
4. Метод объединения двух прямосмещённых p - n переходов биполярного транзистора в схеме с общей базой.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризована научно-техническая проблема, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, которые необходимо решить для её достижения, показана научная новизна и значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, дано описание логических связей между разделами диссертации.

В первой главе приведён анализ технического состояния отечественных и зарубежных разработок интегральных датчиков температуры.

В первой части главы рассмотрены и даны определения таких понятий: датчик, интегральный датчик, интегральный датчик температуры. Ввиду отсутствия в отечественной нормативной документации понятия «интегральный датчик» в главе проведено изучение терминов, ближайших к данному понятию и на основе такого изучения сформулировано определение понятия следующего содержания: «Датчик, выполненный в виде полупроводниковой интегральной схемы с встроенным чувствительным элементом на основе термопары, терморезистора, диода или транзистора и предназначенный для преобразования температуры в измерительный электрический сигнал следует считать интегральным датчиком температуры».

Далее в главе описано техническое состояние разработок датчиков температуры с использованием термопар, рассмотрены термоэлектрические явления и конструктивные особенности термопар. Оценены метрологические возможности термопар как датчиков температуры с учётом схемотехнических методов обеспечения основных параметров. Аналогичные работы представлены в отношении технического состояния разработок:

- с использованием терморезисторов;
- с использованием диодных включений;
- с использованием транзисторных включений.

Выполненный в первой главе диссертации анализ характеристик интегральных датчиков температуры на основе термопар, терморезисторов, диодов и транзисторов, а также оценка потребности таких датчиков в науке и промышленности, в зависимости от диапазона измеряемых температур, позволил не только обосновать в работе выбор – это полупроводниковые интегральные датчики температуры, но определить температурный диапазон измерений температуры: от -65°C до $+175^{\circ}\text{C}$.

В заключении главы с учётом предложенных новых решений показано, что наиболее перспективной частью исследования, связанной с повышением точности измерения температуры и расширением температурного диапазона, являются транзисторные интегральные датчики на основе биполярного транзистора в схеме с общей базой в режиме насыщения и что именно эту группу интегральных датчиков следует выбирать в качестве основного датчика в дальнейших исследованиях.

Предложена к рассмотрению отечественная разработка транзисторного интегрального датчика температуры с аналоговым выходом (так называемый, «абсолютный датчик»), взятая за прототип в диссертационной работе (рис.1).

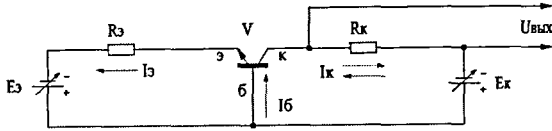


Рис.1. Включение транзистора.

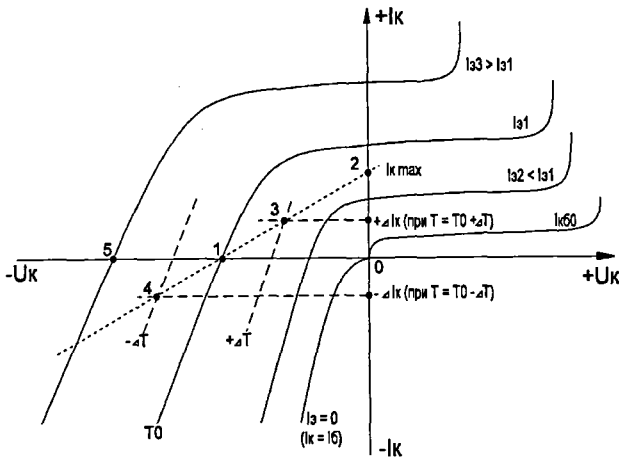


Рис.2. Выходная вольтамперная характеристика (ВАХ) п-р-п транзистора.

Рабочая область на ВАХ (рис. 2), характеризуется отрицательными значениями U_K , (область работы транзистора с прямосмещёнными р-п переходами эмиттер – база и коллектор – база). Полагая, в общем случае, что токи эмиттера и коллектора складываются из двух компонентов (инжектируемого и собираемого), для семейства выходных вольтамперных характеристик транзистора, включённого по схеме с общей базой, можно записать выражение:

$$I_K = \alpha \cdot I_E - I_{KB0} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_K}{kT}} - 1 \right).$$

величина U_K , при котором $I_K = 0$, а именно:

$$-U_K = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\alpha \cdot I_{Э1}}{I_{КБ0}} + 1 \right).$$

Очевидно для точек 3 и 4: $U_{ВЫХ4} = -\Delta I_K R_K$ и $U_{ВЫХ3} = +\Delta I_K R_K$.

Если выполняется условие $I_{Э1} \gg \pm \Delta I_K$, то можно считать, что ТКН на коллекторе является величиной постоянной и что $U_{ВЫХ} = \Delta I_K R_K \approx (ТКН) \cdot \Delta T$, в диапазоне изменения коллекторного тока от $-\Delta I_K$ до $+\Delta I_K$. Для начальной температуры среды T_0 может быть установлено любое значение в пределах рабочих температур, в том числе и равное 0°C .

Сделан следующий вывод: зависимость температурного коэффициента коллекторного тока от величины резистора R_K , не зависящего от температуры, даёт возможность регулировать чувствительность транзисторного термопреобразователя независимо от материала и технологии его изготовления, в отличие от его полупроводниковых аналогов.

Вторая глава посвящена разработке транзисторного интегрального датчика температуры. Произведены выбор и обоснование структуры чувствительного элемента на основе $p-n$ переходов, изучены особенности применения полупроводниковой структуры, состоящей из двух и более $p-n$ переходов. Выбран чувствительный элемент на основе $p-n$ переходов, изучена электрофизическая модель транзисторного чувствительного элемента, построена математическая модель термочувствительного элемента на примере единичного биполярного транзистора, разработан алгоритм теплоэлектрического повышения чувствительности датчика.

Возможности повышения точностных характеристик транзисторного чувствительного элемента оцениваются в данной работе как на основе построенной математической модели термочувствительного элемента на примере единичного биполярного транзистора, так и экспериментальных исследований. На рис.3 представлена эквивалентная схема транзистора с общей базой в режиме насыщения, которая позволяет построить базовую математическую модель для качественной и количественной оценки новых предложений. Полученные базовые параметры превосходят характеристики выпускаемых за рубежом лучших образцов полупроводниковых интегральных датчиков температуры: диапазон измерений - $65^\circ\text{C} \dots + 175^\circ\text{C}$, что на треть больше, чем у существующих зарубежных образцов:

- высокая чувствительность ($\geq 2,3 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ с одного транзистора) без применения обычных транзисторных усилителей;
- повышенная линейность $\pm 1,0^\circ\text{C}$.

Измерительный N-P
коллекторный переход

Опорный N-P
эмиттерный переход

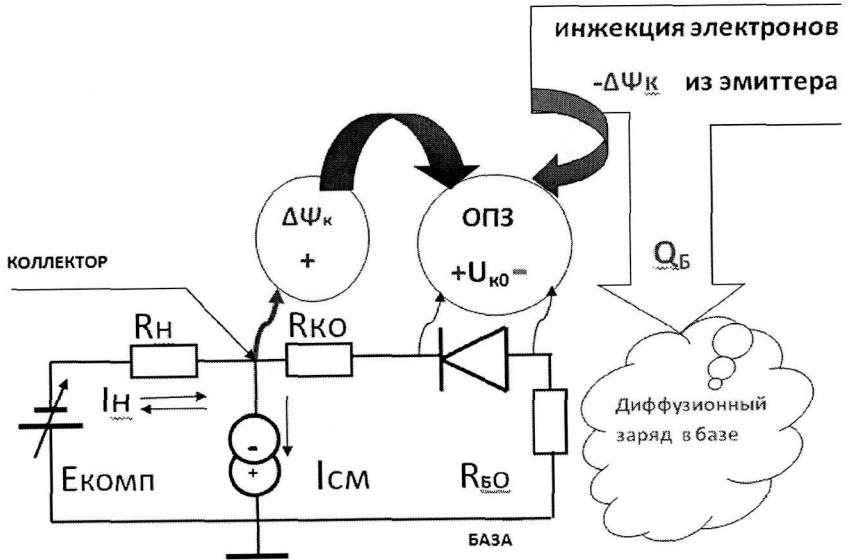


Рис.3. Эквивалентная схема транзистора с общей базой в режиме насыщения.

Где: $U_{к0}$ —начальная контактная разность потенциалов коллекторного перехода;

$\Delta\Psi_K$ - индуцированная электростатическим полем дополнительная напряжённость в коллекторном переходе за счёт опорного эмиттерного перехода;

опз - область пространственного заряда шириной W ;

Q_B -диффузионный заряд электронов в базе;

$R_{Б0}$ -объёмное сопротивление базы;

Проведена математическая оценка точностных характеристик на предложенной модели термоэлектрического преобразователя на примере единичного биполярного транзистора.

Как отмечалось ранее, в данной работе исследовались и анализировались применяемые схемные и технологические решения для современных полупроводниковых интегральных датчиков температуры. В результате были

определены критические факторы, не позволяющие повысить точность и диапазон измерений. Перечень этих факторов следующий:

1. Использование в схеме интегрального температурного датчика транзисторных усилителей тока и напряжения.
2. Наличие объёмного сопротивления базы в измерительном $p - n$ переходе транзистора или диода.
3. Недостаточная чувствительность измерительного $p - n$ перехода, причём, чем больше заданный измеряемый диапазон температур, тем ниже термочувствительность.

В диссертационной работе установлено: применение транзисторных усилителей в интегральных датчиках температуры ограничивает диапазон измеряемой температуры, как в области низких температур, так и в области высоких температур, а также не обеспечивает требований к погрешности измерений в широком диапазоне температур.

Отказ от транзисторных усилителей потребовал найти способ повышения чувствительности термодатчика. Для этого была предложена структура из группы биполярных транзисторов (патент № 100827 от 27 декабря 2010 г.) для так называемого структурного метода повышения чувствительности. Уравнение преобразования для единичного транзисторного термочувствительного элемента будет иметь вид:

$$\frac{1}{R_n} \left(\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{cm}}{I_0} - E_{комп} \right) = \frac{\Delta T}{R_n} (\text{ТКН}) = I_n$$

Математическое уравнение для ТКН получено следующим образом:

$$(\text{ТКН}) = \frac{dU}{dT} = \frac{dUk1}{dT}; \quad Uk1 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cm}}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{cm}}{I_0},$$

I_0 – тепловой ток = $I_{00} e^{-\varphi_3/\varphi T}$, I_{00} не зависит от температур;

$$(\text{ТКН}) = \frac{dUk1}{dT} (\text{ТКН}) = \frac{d}{dT} \left(\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{cm}}{I_0} \right) =$$

$$= \left(\ln \frac{I_{cm}}{I_0} \right) \cdot \frac{k}{q} + \frac{kT}{q} \frac{d}{dT} \left(\ln \frac{I_{cm}}{I_{00} e^{-\varphi_3/\varphi T}} \right) =$$

$$= \frac{1}{T} \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{cm}}{I_0} + \frac{kT}{q} \frac{d}{dT} \left(\ln \frac{I_{cm}}{I_{00}} + \frac{\varphi_3}{\varphi T} \right) = \frac{Uk1 - \varphi_3}{T}.$$

\swarrow UK1 \searrow 0

Подставляем $U_{k1} = 0,026 \ln \left(\frac{I_{CM}}{I_0} + 1 \right)$, где $I_0 = qSDnNi/W_6$, где:

q - заряд электрона,

S -площадь коллектора,

Dn -коэффициент диффузии для электронов коллекторного $p-n$ перехода,

Ni -собственная концентрация носителей заряда в кремнии,

W_6 - толщина ОПЗ,

область пространственного заряда коллекторного $p-n$ перехода.

$$\text{Следовательно: } (TKH) = \frac{1}{T} [0,026 \ln \left(\frac{W_6 I_{CM}}{qSDnNi} + 1 \right) - \varphi_3]$$

Окончательно, при фиксации условия: $I_{CM} - \text{const} = 20 \cdot 10^{-6} \text{A}$, получено:
 $(TKH) = 2,3 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$.

Как отмечалось, наличие омических сопротивлений, дополнительных к дифференциальному сопротивлению (R_d) идеального $p-n$ перехода приводит к снижению линейности измерений температуры. В общем случае преобладающее влияние оказывает объёмное сопротивление базы (R_6), т. к.

$$R_6 \gg R_k \gg R_m.$$

Следовательно, математическую модель для оценки вносимой погрешности измерений температуры можно построить с учётом только объёмного сопротивления базы. Математическая формула для R_d имеет вид:

$$R_d = \frac{dU_{k1}}{dI} = \frac{kT}{qI_{CM}} + R_6.$$

Так как R_6 имеет природу сопротивления кремниевого терморезистора $\left(R_T = R_{T_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2,3} \right)$, то отклонение от линейности в абсолютном значении

можно вычислить из тождества, в котором одинаковые значения U_{k1} достигаются при $R_6 = \text{const}$, а в другом при $R_6 = f(T)$.

Получена абсолютная нелинейность измерений температуры на верхней и нижней границы диапазона: $\Delta_+ = T_1 - T_6 = +8^\circ\text{C}$ и $\Delta_- = T_1 - T_6 = -4^\circ\text{C}$.

Таким образом, окончательно: $\Delta = +8^\circ\text{C} / -4^\circ\text{C}$.

Без снижения величины R_6 , высокий уровень погрешности не позволяет решить поставленные в работе задачи. Это привело к поиску необходимых решений. Аналитические исследования дали возможность найти механизм

кардинального снижения величины R_6 . Способ основан на создании в области базы биполярного транзистора диффузионного заряда неосновных носителей (электронов) инжектированных из эмиттера транзистора. Как известно из теории физики твёрдого тела, повышение концентрации свободных носителей зарядов в полупроводнике приводит к увеличению проводимости.

Данный режим обеспечивается следующими условиями:

- биполярный транзистор включён в схеме с общей базой;
- эмиттерный и коллекторный переходы прямосмещённые (режим насыщения);
- ток эмиттера $I_3 = \text{const}$;
- $I_{cm} = \text{const}$;
- $I_3 \gg I_k$.

Построим математическую модель «накачки» диффузионного заряда электронов для оценки эффективности механизма повышения проводимости в базовой области транзистора. При указанных допущениях, можно рассчитать вклад диффузионного заряда в проводимость базы (объёмного сопротивления) при неравновесном состоянии биполярного транзистора:

$$\sigma = \frac{q\mu S N_3}{w_6}, \quad N_3 = \frac{I_3 \tau}{q \iiint dx dy dz'}$$

$\tau = 1,5 \cdot 10^{-6}$ с – время жизни электронов в базе;

$\iiint dx dy dz \approx S \cdot w_6$ – объём области базы транзистора;

В итоге, при фиксации $I_3 = 200 \cdot 10^{-6}$ А и, подставляя справочные данные, получим:

$$\sigma = \frac{\mu \tau I_3}{w_6^2} = 31 \text{ Сим.}$$

Сравнивая значения R_6 без использования механизма «накачки» диффузионным зарядом электронов и с использованием этого механизма, приходим к следующему результату:

$$\sigma \gg 1/R_6 \Rightarrow 775 : 1.$$

На основании полученных результатов был сделан вывод: разработанный механизм получения диффузионного заряда неосновных носителей (электронов), инжектированных из опорного эмиттерного $p-n$ перехода в базу транзистора, позволяет полностью устранить влияние объёмного сопротивления базы на линейность измерения температуры транзисторным датчиком.

В отношении расширения диапазона был предложен и реализован следующий способ:

- известно, из теоретической физики электрического поля, при электростатической индукции на одной стороне сверхобеднённого тела (ОПЗ $p - n$ перехода) образуются положительные заряды, на другой стороне отрицательные, что создаёт равные и противоположные потенциалы на $p - n$ переходе. Таким образом можно индуцировать дополнительный потенциал напряжения из опорного в измерительный $p - n$ переход.

Это решает две проблемы:

- высокая чувствительность (1см) при расширенном диапазоне (1э);
- можно управлять границами температурного диапазона, имея возможность расширять его в область высоких температур.

Проведя математические расчёты для оценки расширения диапазона измеряемых температур, получено: $K_{\text{диапазон}} = 1,15$

Установлено, что в пределах принятых упрощений и найденных механизмов, повышающих точностные характеристики в расширенном диапазоне измерений, аналитический расчет единичного транзисторного чувствительного элемента представлен в табл.1

Таблица1

Первичный термопреобразователь	Диапазон измеряемых температур %	Чувствительность мВ/°С	Линейность °С		Ток потребления. мА
			без калибр.	С калибровкой	
1	2	3	4	5	6
Транзистор	115	2,3	±1,0	±0,0	0,4

В заключении главы описан новый предложенный метод повышения чувствительности датчика, где тепло преобразуется в одном элементе в пригодный для дальнейшего преобразования электрический сигнал, который целенаправленно передается другому элементу посредством электрической связи и где складывается с выходным сигналом. В данной работе он назван, как «метод теплоэлектрического повышения чувствительности датчика».

В рамках разработанного метода в диссертационной работе предложена электрофизическая модель механизма теплоэлектрического повышения чувствительности создаваемого в работе датчика температуры. На рис.4 рассмотрена эквивалентная схема теплоэлектрической модели датчика на сосредоточенных параметрах.

Представлены:

1. Окружающая температура $T_{\text{окр}}$ - в виде источника напряжения $U_{\text{окр}}$.
2. Теплоемкость – электрической емкостью C_T .
3. Тепловое сопротивление – электрическим сопротивлением R_T .
4. Температурные зависимости напряжения на переходах (V_1 ; $U_{\text{ЭБ2}}$; $U_{\text{КБ3}}$; $U_{\text{КБ4}}$) промоделированы усилителями с коэффициентами передачи (M_1 ; M_2 ; M_3 ; M_4) соответственно.

5. T_0 – начальная температура.

6. t – время.

7. $\tau = R_T C_T$ – тепловая постоянная времени датчика.

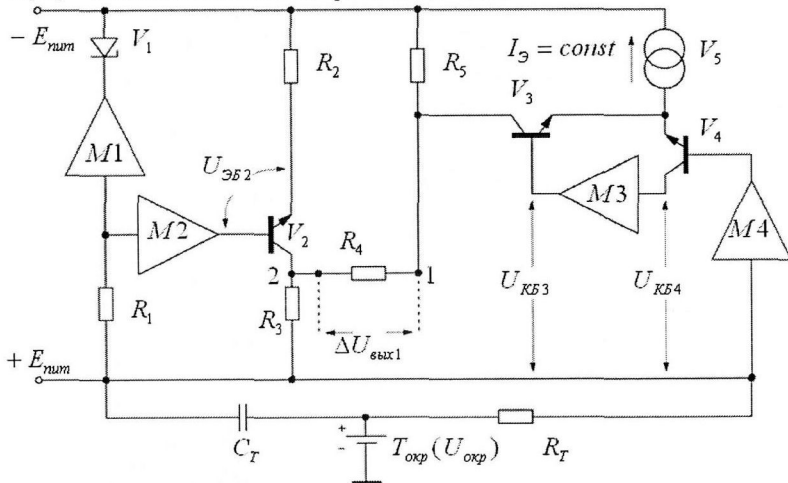


Рис.4. Теплоэлектрическая модель датчика на сосредоточенных параметрах

При изменении $T_{\text{окр}}$ на $\Delta T_{(t)} = (T_{\text{окр}} - T_0)$ передаточная функция модели имеет вид:

$$\Delta U_{\text{вых1}} = \left[\left(\frac{\partial U_{V1}}{\partial T} + \frac{\partial U_{\text{ЭБ2}}}{\partial T} \right) \frac{R_3}{R_2} + \left(\frac{\partial U_{\text{КБ3}}}{\partial T} + \frac{\partial U_{\text{КБ4}}}{\partial T} \right) \right] \cdot \Delta T_{(t)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Предложенная модель позволяет проводить оценку эффективности теплоэлектрического и структурного повышения термочувствительности, а также возможность саморазогрева и оценку инерционности датчика.

В третьей главе приведено исследование теплоэлектрических и метрологических характеристик макетного образца транзисторного интегрального датчика температуры. Были изготовлены три макетных образца датчика и изучение вольтамперных характеристик отдельных его элементов, в том числе исследование зависимости выходного напряжения макетного образца датчика от температуры при напряжении питания 10 В и исследование зависимости температурных характеристик макетных образцов датчика от напряжения питания. На рис. 5 представлены соответствующие зависимости.

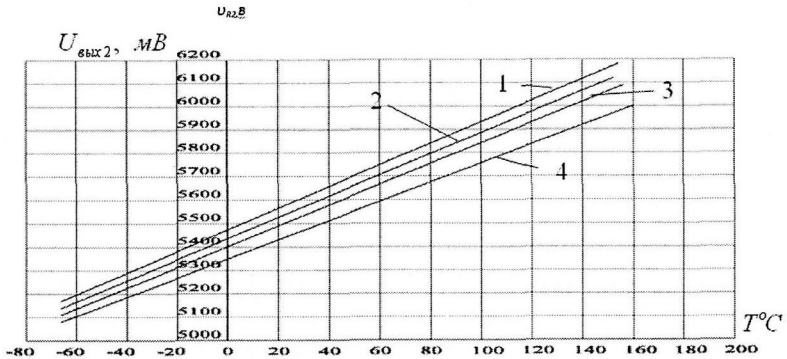
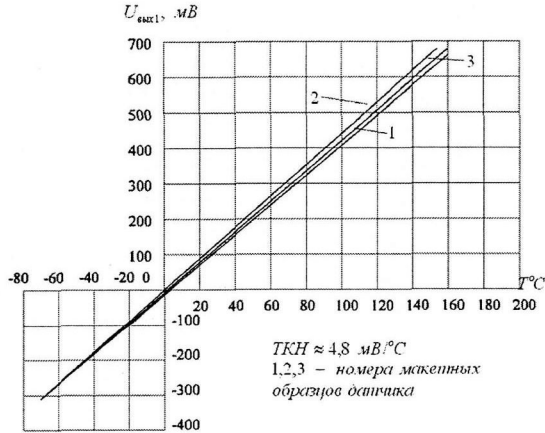


Рис.5. Зависимость температурных характеристик U_{R2} от напряжения питания датчика; для номеров (1,2,3,4) – напряжение питания (28,20,14,8) В.

В результате проведенных в работе экспериментальных исследований макетных образцов датчика получены данные, подтверждающие возможность создания интегрального датчика температуры в виде полупроводниковой монокристаллической микросхемы с встроенным чувствительным элементом со следующими основными параметрами:

- Диапазон измеряемых температур..... $-65 \div +175^{\circ}\text{C}$
- Температурный коэффициент $U_{\text{вых}1}$ $5 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$
- Нелинейность выходного напряжения $U_{\text{вых}1}$ в диапазоне температур от -65 до 175°C , по абсолютной величине не более $1,0^{\circ}\text{C}$
- Чувствительность выходного напряжения $U_{\text{вых}1}$ к изменению напряжения питания..... $1,0 \text{ мВ}/\text{В}$
- Напряжение питания датчика..... $(8 \div 27) \text{ В}$
- Ток потребления датчика, не более..... $1,0 \text{ мА}$

В четвёртой главе описана разработка и изготовление кремниевой монолитной интегральной схемы датчика температуры. Процесс преобразования обычной схемы на дискретных компонентах в интегральную схему связан с учетом следующих основных факторов. Во-первых, в схеме должно быть как можно меньше резисторов, особенно высокоомных, свыше 100кОм, поскольку они занимают значительную площадь полупроводникового кристалла. Во-вторых, схема должна, по возможности, содержать активные элементы (транзисторы) одного типа проводимости, лучше *n-p-n* транзисторы вследствие относительной простоты их изготовления. В – третьих, мощность, рассеиваемая в микросхеме, должна быть как можно меньше, чтобы избежать ошибок при измерениях из-за саморазогрева схемы. С учетом рассмотренных факторов схема для макетных образцов, была упрощена, не изменяя точностных и эксплуатационных характеристик, как показано на рис. 6.

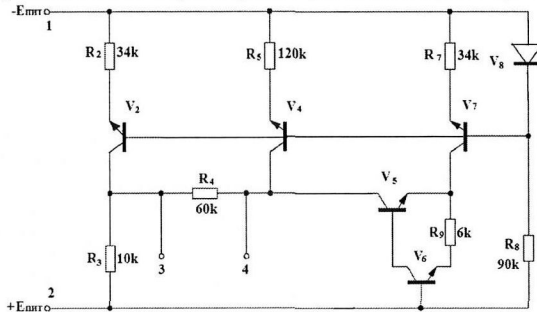


Рис. 6. Схема для макетных образцов датчика температуры

Топология разработанной интегральной схемы датчика температуры представлена на рис. 7.

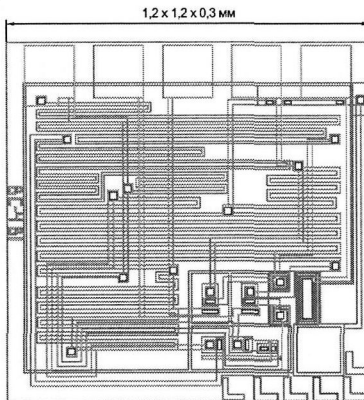


Рис. 7. Топология интегральной схемы датчика температуры

В конце главы представлена экспериментальная проверка датчика температуры и сравнение его с зарубежным аналогом. Результаты подтверждающие, теоретические положения диссертации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Датчик температуры	Диапазон измеряемых температур, °С	Чувствительность		Погрешность		Напряжение питания, В	Ток потребления, мА
		мВ/Т °С	мВ/Еп, В	с калибр	без калибр.		
1	2	3	4	5	6	7	8
Интегральный образец	-65 ÷ +175	U _{вых1} = 5,0 U _{вых2} = 4,1	1/1	±1	±1,5	8 ÷ 30	не более 1,0
LM50, аналоговый (National Semiconductor)	-40 ÷ +125	U _{вых} = 10	3/1	±1	±3	4,5 ÷ 10	не более 0,5

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе. **В приложении** к диссертации приведены акты внедрения и патент РФ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ состояния проблемы измерения температуры в интегральном датчике.
2. Разработана методика структурного повышения чувствительности термоэлектрического преобразователя на транзисторах.
3. Построена математическая модель термоэлектрического преобразователя на примере единичного биполярного транзистора.
4. Разработан алгоритм теплоэлектрического повышения чувствительности на основе построенной теплоэлектрической модели датчика.
5. Разработана принципиальная схема интегрального датчика температуры.
6. Проведено исследование основных параметров трех макетных образцов.
7. Создан интегральный датчик температуры и изготовлена опытная партия.
8. Проведены экспериментальные исследования образцов кремниевого интегрального датчика температуры, проверен и обоснован факт достижения в работе поставленной цели.
9. Результаты диссертационной работы внедрены в промышленность.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шестимеров С.М. Высокоточный транзисторный датчик температуры / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // Датчики и системы – М.: 2010. № 11. С. 19 – 22 (в журнале).
2. Шестимеров С.М. Современные полупроводниковые интегральные датчики температуры / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // ИЗМЕРЕНИЯ. КОНТРОЛЬ. АВТОМАТИЗАЦИЯ – М.: 2010. № 12. С. 59 – 68 (в журнале).
3. Шестимеров С.М. Транзисторный термопреобразователь для повышения качества контроля температуры / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // Качество. Инновации. Образование. – М.: 2010. № 11. С. 63-69 (в журнале).

В других изданиях:

4. Шестимеров С.М. Особенности полупроводниковых резистивных термодатчиков. / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.У. // Материалы международной научно-практической конференции «Инфо-2010», 1 – 10 октября 2010 года, Россия, г. Сочи, – Московский государственный институт электроники и математики, М.: 2010. С. 366 – 368.
5. Шестимеров С.М. Первичные преобразователи температуры на основе диодных структур. / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.У. // Материалы международной научно-практической конференции «Инфо-2010», 1 – 10 октября 2010 года, Россия, г. Сочи, – Московский государственный институт электроники и математики, М.: 2010. С. 366 – 368.
6. Шестимеров С.М. Полупроводниковые интегральные датчики температуры / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // Материалы международного ежегодного симпозиума «Надёжность и качество 2010» – Пенза, ПГУ, 2010. С. 161 – 164.
7. Шестимеров С.М. Термодатчики на основе многоэмиттерных транзисторных структур. / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.У. // Материалы международной научно-практической конференции «Инфо-2010», 1 – 10 октября 2010 года, Россия, г. Сочи, – Московский государственный институт электроники и математики, М.: 2010. С. 364 – 366.
8. Шестимеров С.М. Транзисторный термопреобразователь с улучшенными характеристиками / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // Материалы международного ежегодного симпозиума «Надёжность и качество 2010» – Пенза, ПГУ, 2010. С. 477 – 479.

9. Шестимеров С.М. Методы построения полупроводниковых датчиков температуры. / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.Г. // Материалы международного ежегодного симпозиума «Надёжность и качество 2011» – Пенза, ПГУ, 2011. С. 471 – 475.

10. Шестимеров С.М. Транзисторные термопреобразователь в качестве датчика контроля полупроводниковых интегральных термоанемометров. / Громов В.С., Шестимеров С.М., Увайсов С.У. // Материалы международной научно-практической конференции «Инфо-2011», 1 – 10 октября 2011 года, Россия, г. Сочи, – Московский государственный институт электроники и математики, М.: 2011. С. 255 – 257.

Объект интеллектуальной собственности:

11. Устройство для измерения температуры. Патент РФ на полезную модель №100827 от 27 декабря 2010 г. Шестимеров С. М., Громов В.С., Увайсов С.У.

Подписано в печать: 20.04.12
Объем: 1,5 усл.п.л.
Тираж: 120 экз. Заказ № 47
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, ул. Бауманская д.33
(495) 979-96-99; www.reglet.ru