

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Д.Р.Джураев, А.В.Каримов,  
А.А.Тураев, О.А.Абдулжаев**

**Чувствительные к внешним  
воздействиям датчики  
нового поколения  
(на примере температуры)**

**Бухара - 2019**

**УДК 538.1:548**  
**ББК**

*Монография издана в рамках гранта БА-А3-014 финансируемого министерством инновации Республики Узбекистана*

Монография посвящена термодатчикам работающим в интервале температур от  $-155^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , которые необходимы для науки и промышленности. Здесь представлены виды датчиков температуры и принцип их работы, анализированы состояния исследований в области термочувствительных датчиков, рассмотрено влияние теплового и деформационного воздействий на характеристики диодных и транзисторных структур. В монографии подытожены опубликованные к настоящему времени результаты исследований по термочувствительности полевого транзистора в режиме отсечки канала. Особое внимание уделено результатам комплексных экспериментальных исследований по выявлению влияния температуры на характеристики полевого транзистора в режиме отсечки канала запираемым р-п-переходом. Исследованием физико-технологических особенностей многофункционального датчика на основе полевого транзистора в режиме отсечки канала показано, что они отличаются высокой чувствительностью к внешним воздействиям.

Монография предназначена для научных работников специализирующихся в области физики и техники полупроводниковых приборов, а также для студентов и магистрантов соответствующих специальностей.

Монография фан ва саноат учун зарур бўлган  $-155^{\circ}\text{C}$  дан  $+150^{\circ}\text{C}$  гача бўлган ҳароратлар соҳасида ишлатилиши мумкин бўлган термодатчик-ларга бағишланган. Бу ерда термометрларнинг турлари ва уларнинг ишлаш принципи, термосезгир датчиклар соҳасидаги тадқиқотлар ҳолати анализ қилинган, диодли ва транзисторли тузилмалар характеристика-ларига ҳароратнинг ва деформациянинг таъсири кўрилган. Монография-да канали ёпилиш режимидаги майдон транзисторнинг термосезгирлик бўйича ҳозирги кунларда чоп этилган тадқиқот натижалари сарҳисоб қилинган. Асосий эътибор р-п-ўтиш билан канали ёпилиш режимидаги майдон транзисторнинг характеристикаларига ҳароратнинг таъсирини аниқлаш бўйича комплекс экспериментал тадқиқотларга қаратилди. Канали ёпилиш режимидаги майдон транзистори асосидаги кўп функционал датчикнинг физико-технологик хусусиятларини тадқиқ этиш орқали уларнинг таъсирига сезгирлиги бошқа датчикларга нисбатан юқори эканлиги билан фарқ қилиши кўрсатилган.

Монография ярим ўтказгичли асбобларнинг физикаси ва техникаси соҳасидаги илмий ходимлар, мутахассислар, талабалар ва магистрларга мўлжалланган.

The monograph is devoted to the thermal sensors working in the range of temperatures from  $-155^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  which are necessary for science and the industry. Here types of sensors of temperature and the principle of their work are presented, conditions of researches in the field of thermosensitive sensors are analyzed, influence of thermal and deformation impacts on characteristics of diode and transistor structures is considered. In the monograph the results of researches on thermosensitivity of the field transistor published so far in the mode of a cut-off of the channel are summed up. Special attention is paid to results of complex pilot studies on identification of influence of temperature on characteristics of the field transistor in the mode of a cut-off of the channel by the locked p - n - transition. By a research of physico-technological features of the multipurpose sensor on the basis of the field transistor in the mode of a cut-off of the channel it is shown that their sensitivity to external influences increases.

The monograph is usefully for the scientists and engineers specializing in the field of physics and the equipment of semiconductor devices and also for students and doctoral candidates of the corresponding specialties.

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор **С.Х.Астанов**

доктор физико-математических наук, профессор **С.Х.Умаров**

**Монография Бухоро давлат университети Илмий-техник кенгашининг 2018 йил 28- сентябрьдаги № 1-сон йиғилишида кўриб чиқилиб, чоп этишга рухсат берилган.**

Д.Р.Джураев, А.В.Каримов, А.А.Тураев, О.А.Абдулхаев, 2018

Издательство «Дурдона», 2018

**ISBN**

## Предисловие

В мире на сегодняшний день большое внимание уделяется датчикам на основе полупроводников, исследованию их тепловых и фотоэлектрических параметров. При этом одной из важных задач является проведение целевых научных исследований в следующих направлениях: разработка и исследование влияния тепла и света на транзисторные структуры с р-п-переходом; установление зависимости напряжения отсечки от температуры и деформации в режиме отсечки канала; выяснение особенностей фотоэлектрических эффектов в полевом транзисторе при различных режимах включения; выявление возможности их применения по новому назначению, расширение функциональных параметров полупроводниковых датчиков.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан имеет важное значение стимулирование разработок эффективного механизма внедрения достижений научных исследований, применение физических процессов протекающих в полупроводниковых приборах в практику их использования по новому назначению для управления технологическими процессами. Кроме того, развитие активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленных на получение новых научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития, обращает особое внимание.

С использованием современных полупроводниковых интегральных датчиков можно реализовать измерения температуры в диапазоне от 0°С до +125°С 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 минус 155 до плюс 150°C. 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.

До настоящего времени для измерения температуры в узком интервале температур исторически использовались стеклянные ртутные термометры, а температура окружающей среды измерялась спиртовыми термометрами. Вместе с тем необходимость автоматизации технологических процессов потребовали решения проблем дистанционного управления и мониторинга различных объектов. Процессы обеспечения стабильного температурного режима моторов и двигателей потребовали разработки датчиков температуры снимающих данные с узких зазоров, в том числе температуры биологических объектов. В частности, возникла необходимость в разработке устройств и приборов, позволяющих с высокой точностью и эффективно проводить мониторинг

биологических сигналов, таких как давление крови, биение сердца и температуру тела. При этом крайне привлекательным является создание устройства работающего в беспроводной среде, то есть обеспечивающее дистанционную передачу сигнала с последующей обработкой ее внешним устройством (биотелеметрия).

Основным элементом измерителей температуры является датчик (сенсор). Одними из широко используемых в настоящее время датчиков являются помещенные в стеклянный корпус ртуть или спирт, которые пропорционально воздействующей температуре меняют объем. Они, требуя длительное время для регистрации температуры тела, являются также токсичными и небезопасными, особенно при использовании для измерения температуры тела детей.

Учитывая недостатки ртутных термометров, были разработаны ряд конструкций термодатчиков на основе проволочных резисторов, пленок металлов и полупроводников. К настоящему времени на основе этих термодатчиков изготавливаются устройства, преобразующие внешнее воздействие на полезный сигнал удобный для измерения, передачи, хранения, обработки и регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы. При этом терморезисторы, обладая высокой чувствительностью, являются очень инерционными и имеют нелинейную зависимость выходного сигнала от температуры. Полупроводниковые диодные и транзисторные же термодатчики имея высокое быстродействие и линейную зависимость выходного сигнала от температуры обладают низкой чувствительностью связанной с параметрами внешнего питающего устройства, что требует применения стабилизированных источников питания. Данные термодатчики для регистрации температуры тела должны подключаться к специальному устройству,

обеспечивающему обработку выходного сигнала датчиков. При подключении кабелем усложняется проведение полноценного дезинфицирования устройств, кроме того сам кабель и встроенные наконечники металлического датчика создают определенные неудобства для пациента. Привлекательным является создание устройства обеспечивающего дистанционную передачу сигнала с последующей обработкой ее внешним автономным устройством.

Однако известные термодатчики не отвечают современным требованиям беспроводного дистанционного мониторинга температуры тела, то есть не могут функционировать от нестабильного источника с низким напряжением и малой мощностью. При разработке устройств для использования в медицине основными требованиями являются высокая точность измерений, возможность беспроводного мониторинга температуры тела с заданными интервалами времени, использование автоматизированных систем анализа результатов, что требует разработки термодатчика работающего от низковольтного и маломощного нестабильного источника.

В этом аспекте представляет интерес термодатчик на основе полевого транзистора, в котором путем подбора режима включения и измерительного параметра можно обеспечить преобразование физического воздействия (температуры, света, давления и магнитного поля) в электрический сигнал при малом потреблении энергии, в частности, при выборе в качестве измерительного параметра напряжения отсечки канала.

В связи с этим представляют как научный и практический интерес результаты комплексного экспериментального исследования по выявлению влияния температуры на характеристики полевого транзистора в режиме отсечки канала запираемым р-n-переходом.

Следует отметить, что в развитие этого направления ученые Узбекистана группы М.К. Бахадирханова тоже внесли определенный вклад. Ими заложены основы создания термодатчиков с нанокластерными включениями. Однако проблемы применения полупроводниковых транзисторных структур в новом назначении, в частности, датчиков температуры и светового излучения, а также возможности расширения их функциональных свойств остаются неизученными.

До сегодняшнего дня в мире для управления технологическими процессами остаются широко используемыми приборами термо и фоторезисторные структуры, термодары, однако их быстродействие перестает удовлетворять растущим требованием. Для удовлетворения в определенной степени поставленных требований задачи разработки новых структур или раскрытие их режимов включения обеспечивающих достижение быстродействия и чувствительности диодов и транзисторов остаётся актуальной.

В настоящей монографии делается попытка восполнить существующий пробел проведением комплексного экспериментального исследования по выявлению влияния температуры на характеристики полевого транзистора в режиме отсечки канала запираемым р-п-переходом. Исследования физико-технологических особенностей многофункционального датчика на основе полевого транзистора в режиме отсечки канала показало, что их чувствительность к внешним воздействиям увеличивается.

При работе над рукописью авторами были использованы многочисленные советы и замечания сотрудников лаборатории «Приборостроения в области электроники, оптоэлектроники и фотоники» ФТИ АН РУз. Авторы им приносят глубокую благодарность.

Авторы будут признательны читателям за сообщение о всех замечаниях ими недостатках и за отзывы о книге которые следует направить по электронным почтам: [djurayev2002@mail](mailto:djurayev2002@mail); [drdjuraev@yahoo.com](mailto:drdjuraev@yahoo.com).

## Основные условные обозначения и сокращения;

- $a$  - общая толщина канала;  
 $\alpha_U$  - температурный коэффициент напряжения;  
 $d$  - толщина проводящей части канала;  
 $E_{пит}$  - напряжение питания;  
 $I$  - ток через структуру;  
 $I_{p-n}$  - ток  $p$ - $n$ -перехода;  
 $I_0$  - темновой ток через структуру;  
 $I_{э}$  - ток эмиттера;  
 $I_{прям}$  - ток через структуру при прямом смещении;  
 $I_{прям}^{const}$  - прямой фиксированный ток через  $p$ - $n$ -переход;  
 $I_{нас}$  - ток насыщения  $p$ - $n$ -перехода;  
 $I_{огр}$  - ограниченный ток через  $p$ - $n$ -переход;  
 $N_{кан}$  - концентрация примеси в канале транзистора;  
 $N_{зат}$  - концентрация примеси в затворе транзистора  
 $n$  - коэффициент идеальности  $p$ - $n$ -перехода;  
 $n_i$  - собственная концентрация электронов;  
 $k$  - постоянная Больцмана;  
 $R_H$  - нагрузочное сопротивление;  
 $C_{p-n}$  - емкость  $p$ - $n$ -перехода;  
 $T$  - температура структуры;  
 $U_{КБ}$  - напряжение коллектор-база;  
 $U_{КЭ}$  - напряжение коллектор-эмиттер;  
 $\Delta U$  - разность напряжения;  
 $U_{R_H}^{T_1}$  - падение напряжения на нагрузочном сопротивлении;  
 $U_d$  - контактная разность потенциалов;  
 $U_{p-n}$  - напряжение смещения на  $p$ - $n$ -переходе;  
 $U_{ЗИ}$  - напряжение, падающее на затвор-исток;  
 $U_{отс}$  - напряжение отсечки;

$U_{отс}^{зи}$  - напряжение, падающее на затвор-исток при отсечке канала;

$U_{прям}$  - напряжение прямого смещения;

$U_{сз}$  - напряжение, падающее на сток-затвор;

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума.

$q$ - заряд электрона;

$\phi_T$ -тепловой потенциал;

$W_0$  - исходная толщина области объемного заряда;

$W_T$  - толщина области объемного заряда как функция от температуры;

$W_{ооз}$  - толщина области объемного заряда;

# Глава I.

## Типы и назначения термочувствительных датчиков

- 1.1. Виды термометров и их применение.
- 1.2. Функциональные характеристики датчиков температуры на основе термопар.
- 1.3. Термометры сопротивления
- 1.4. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления
- 1.5. Датчики температуры на основе диодных и транзисторных структур

## **Глава I. Типы и назначения термочувствительных датчиков**

В настоящее время наблюдается тенденция широкой автоматизации большинства технологических процессов. Кроме того, управление технологическими процессами и различными устройствами немислимо без точных измерений характеристических величин. Возникает необходимость измерения давления, угловой скорости, а также связанных с температурой других параметров. Но самыми востребованными являются температурные измерения.

В соответствии с диапазоном измерений и условиями разработаны разные по точности и быстродействию типы датчиков (первичных преобразователей). Какого бы типа не был температурный датчик, для всех общим является принцип преобразования. То есть измеряемая температура во всех случаях преобразуется в электрическую величину, так как при этом дальнейшая передача информации облегчается.

### **1.1. Виды термометров и их применение**

Термометр (от греч. *Terme*-тепло, *metreo*-из-меряю) -прибор для измерения температуры: воздуха, воды, почвы, тела человека и других физических тел. Термометры применяются в метеорологии, гидрологии, медицине и других науках и отраслях хозяйства.

Изобретателем первого термометра-термоскопа был знаменитый итальянский учёный Галилео Галилей (1597 г.). Термоскоп Галилея представлял собой стеклянный шарик с припаянной к нему стеклянной трубкой конец которого опускали в сосуд с водой (рис.1.1). При охлаждении давление в шарике уменьшалось и вода под действием атмосферного

давления поднималась по трубке вверх на некоторую высоту. А при потеплении, давление воздуха в шарике увеличивалось, и уровень воды в трубке понижался, а при охлаждении-повышался. Таким образом, термоскоп показывал изменение температуры, но не имел шкалы.



Рис. 1.1. Термоскоп Галилея.

Современную форму (запаяв трубку и перевернув её шариком вниз) термометру придал Габриель Даниель Фаренгейт, голландский физик, выдувальщик стекла. А постоянные (реперные) точки-кипящей воды и тающего льда-на шкале термометра разместил шведский астроном и физик Андерс Цельсий в 1742 году. Наиболее простым прибором для измерения температуры является жидкостной (ртутный, галлиевый, спиртовой) термометр. Их температурный предел и конструкции в зависимости от назначения имеют различные конструкции [1].

**Ртутный термометр** применяют для измерения температур от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+630^{\circ}\text{C}$ , а в отдельных случаях и до  $800^{\circ}\text{C}$ . Ртутный термометр состоит из почти цилиндрического резервуара, заполненного ртутью, и

вакуумированной капиллярной трубки. Ртутные термометры бывают палочными (толстостенный капилляр, шкала снаружи) (рис. 1.2 а) и трубчатыми с вставной пластинкой (рис. 1.2, б-в), на которой нанесена температурная шкала. Нижняя граница области применения ртутных термометров определяется температурой затвердевания ртути ( $-38,87^{\circ}\text{C}$ ), а верхняя - температурой кипения ртути при давлении  $0,1\text{ МПа}$  ( $1\text{ атм}$ ) ( $+356,58^{\circ}\text{C}$ ). Тем не менее возможно применение ртутных термометров и для измерения более высоких температур. В этом случае их готовят из кварцевого стекла, а капилляры заполняют азотом или аргоном под значительным давлением. В частности, для температур от  $300^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$  давление в капилляре составляет  $1,5\text{ МПа}$ .

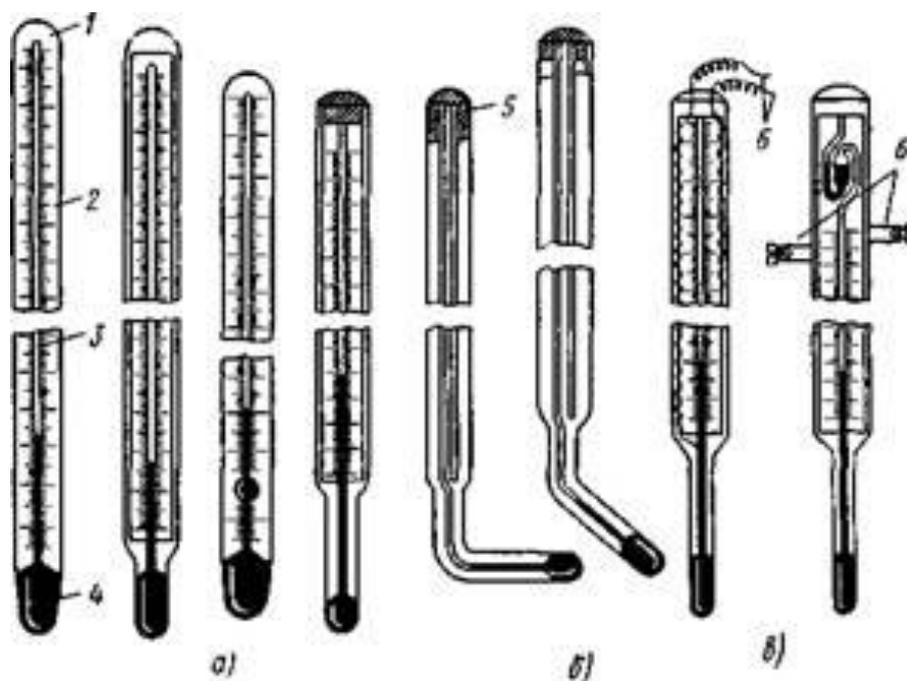


Рис. 1.2. Ртутные стеклянные термометры:  
 а) прямые типа, б) угловые типа, в) электроконтактные; 1-корпус, 2-шкала, 3-капилляр, 4-расширитель, 5-заглушка, 6-контакты.

**Термометр медицинский максимальный** отличается от обычного ртутного термометра тем, что просвет на месте перехода капиллярной трубки в

резервуар для ртути сужен и искривлён, что затрудняет движение ртути в этом колене. Поэтому при нагревании ртуть медленнее достигает своего максимального уровня, но зато после прекращения нагревания ртутный столбик сам по себе не опускается, а продолжает показывать максимальную цифру на температурной шкале, до которой он дошёл. Поэтому такой термометр и называют максимальным. Чтобы столбик ртути опустился обратно в резервуар, ртутный термометр надо встряхнуть.

Ртутный термометр остаётся наиболее распространённым прибором для измерения температуры тела.

#### **Недостатки ртутного термометра:**

- долгое время измерения - не менее 10 минут;
- главный недостаток, который легко перечёркивает все достоинства, содержит опасную для здоровья ртуть (около 2 граммов) и при этом легко разбивается.

Именно по этой причине ртутный термометр для измерения температуры тела в некоторых странах запрещён. Запрет касается также комнатных термометров, барометров и приборов для измерения артериального давления. Данная мера позволяет существенно сократить количество токсичной ртути, попадающей с мусором в окружающую среду.

Ртутные термометры не обладают высокой точностью измерения температуры (предел точности  $0,001^{\circ}\text{C}$ ), но зато они удобны в обращении, а их стеклянная оболочка в достаточной мере термически и химически устойчива. Сравнительно большие размеры ртутного резервуара не позволяют применять жидкостные термометры для измерения температур малых объектов. Непригодны ртутные термометры и для дистанционного измерения температуры.

Палочные термометры (рис. 1.2, а) представляют собой толстостенные капиллярные трубки с внешним диаметром 5-8 мм на внешней стороне которых

вытравлены деления, покрашенны,е черной или красной краской.

Такие термометры обладают достаточной механической прочностью и виброустойчивостью. Палочные термометры применяют для измерения высоких температур. Эталонные термометры делают всегда палочными.

Термометры, заполненные спиртом, применяют в метеорологии для измерения температур ниже  $-38^{\circ}\text{C}$  (так как при более низкой температуре ртуть отвердевает).

**Спиртовые термометры** (рис. 1.3) применимы для измерения температур от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . При измерении температуры воздуха, когда воздействует на термометр лучистое тепло, показания обыкновенных ртутных термометров оказываются неверными. Измерять температуру следует на высоте 1,5 м от пола и не ближе 1 м от нагревательных приборов и других источников, излучающих тепло, а также от наружных стен [2].

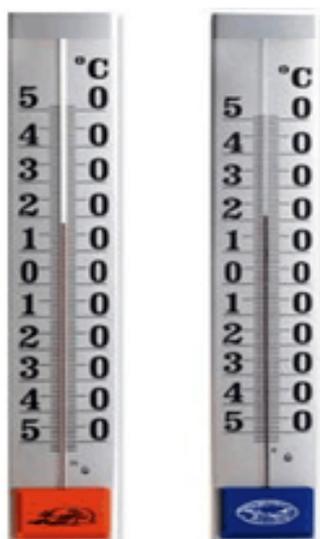


Рис. 1.3. Спиртовые и ртутные термометры.

Спиртовые термометры применяют главным образом для измерения низких температур до  $-100^{\circ}\text{C}$ , а ртутные - для измерения температур в широком

диапазоне: от  $-38^{\circ}\text{C}$  ( температура затвердевания ртути) до  $500^{\circ}\text{C}$ .

**Термометр сопротивления** (электронный термометр) работает, используя изменение электропроводности металлических или полупроводниковых датчиков при изменениях температуры. Термометр сопротивления применяют, например, для измерения температуры внутри газовых котлов на теплоэлектростанциях. Датчик термометра на длинной ручке помещают внутрь бушующего в котле голубого пламени сгорающего газа, а корпус термометра держат в руках и видят температуру на табло, рис. 1.4.



Рис. 1.4. Электронные термометры различного вида.

Среди всех термометров наиболее точными считаются спиртовые термометры (погрешность  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ ) и термометры сопротивления (погрешность  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ), однако наибольшее распространение получили цифровые термометры, так как такой термометр невозможно разбить, мало время измерения (30-60 сек.), лёгкость чтения результатов, автоматическое отключение, они помнят последние показания, есть сменная шкала «Цельсий-Фаренгейт» и их можно использовать в полной темноте.

**Газовый термометр** измеряет температуру по расширению образца какого-либо газа или по увеличению давления в фиксированном объеме. В этом термометре нам не грозят трудности ртутного, связанные с расширением стекла, т.к. расширение газа в 20 раз больше, чем ртути, следовательно, влияние стекла минимально. А в силу того, что газы ведут себя практически одинаково, то и показания различных газовых термометров практически идеально согласуются, что удобно с методической точки зрения, рис. 1.5.

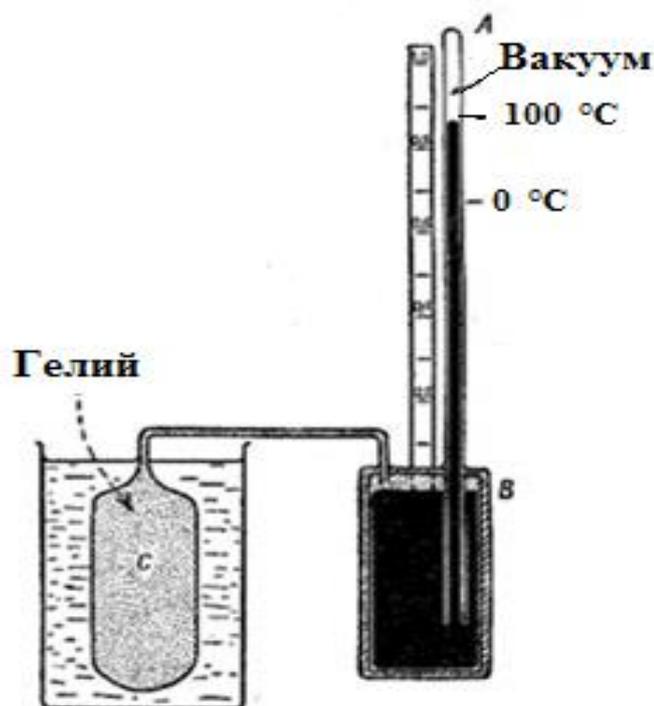


Рис. 1.5. Газовый термометр.

При градуировке такого термометра мы погружаем баллон С в тающий лед и наносим на термометре риску 0. Потом помещаем баллон С в кипящую воду и наносим риску 100. Отмечаем данные точки на графике и соединяем их прямой линией. Пользуясь определенной таким образом шкалой, строим график зависимости давления от температуры. Теперь газовый термометр позволит нам

измерить температуру, если мы знаем давление газа в баллоне при этой температуре, рис. 1.6.

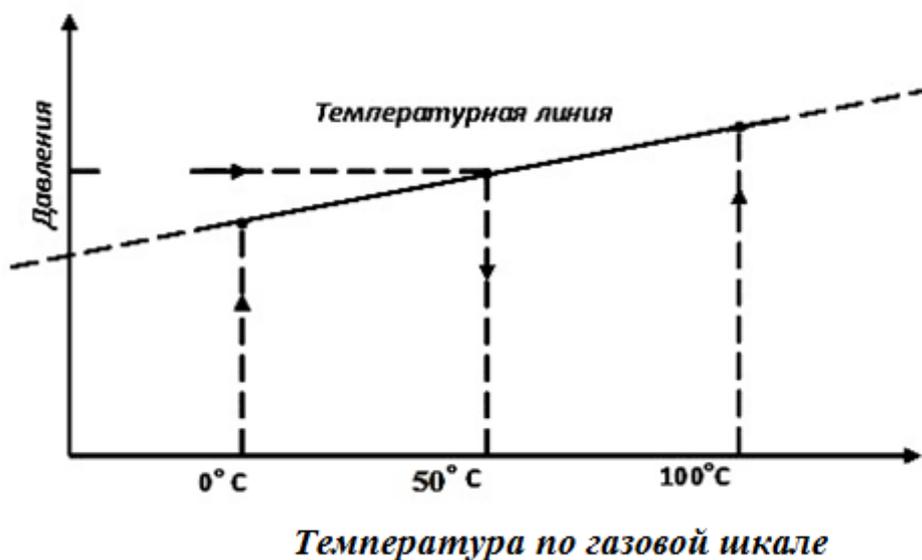


Рис. 1.6. Зависимость давления газа от температуры.

Шкала Цельсия-Андерс Цельсий принял, что точки замерзания и кипения воды будут отделены 100 градусами, и закрепил точку замерзания за 100 градусами. (Позже его шкала была перевернута, так что точка кипения воды стала соответствовать 100 градусам, и точка замерзания - 0 градусам.) Перевод температуры по шкале Фаренгейта ( $T[^\circ\text{F}]$ ) в температуру по шкале Цельсия ( $T, ^\circ\text{C}$ ) осуществляется по формуле:  $T(^{\circ}\text{C}) = 5/9 (T[^\circ\text{F}] - 32^\circ\text{F})$  [3].

Таким образом, мы не можем сказать, что ртуть дает "правильную" температурную шкалу, а глицерин - "неправильную". Мы можем выбрать любую жидкость и объявить: эта жидкость дает стандартную шкалу. Получается, что ни одна шкала жидкостного термометра не показывает истинную, или *правильную*, температуру. Это обескураживает, но позволяет сделать ряд выводов, один из которых говорит: мы вправе остановиться на ртутном термометре из практических соображений. Попытки найти истинную температуру или более общую, изначальную, чем

температура, основанная на произвольном выборе ртути, не увенчались успехом. Самое интересное, что нечто похожее дает **газовый** термометр.

**Оптические термометры** (пирометры) позволяют регистрировать температуру благодаря изменению светимости или спектра излучения тел. Оптические термометры применяют для измерения температуры поверхности объектов в труднодоступных (и жарких) местах.

Принцип работы **биметаллического термометра** состоит в том, что различные металлы при нагревании расширяются по-разному. Спаяв два различных металла вместе, Вы можете сделать простой электрический контроллер, который может использоваться при довольно высоких температурах. Этот контроллер можно найти в духовках. Примерная схема устройства, рис. 1.7.

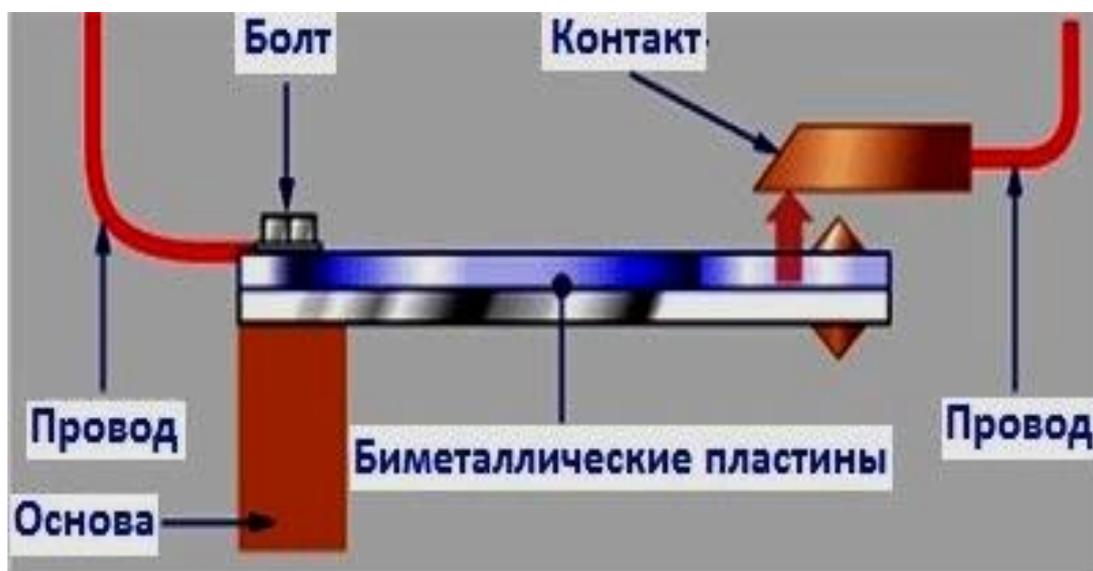


Рис. 1.7. Схема биметаллического термометра.

Два металла составляют биметаллическую пластину (отсюда и название). На этом рисунке пластина с черным металлом подобрана так, чтобы расширялась сильнее, чем пластина с синим металлом, такое устройство используется в духовке. В холодильнике используется другое устройство, такое, чтобы при повышении температуры синий металл расширился

быстрее, чем черный. Это расширение заставляет пластину сгибаться вверх, соприкасаться с контактом, для того, чтобы потек ток по пластине. Регулируя размер промежутка между пластиной и контактом, можно управлять температурой, при которой пойдет ток по пластинам.

## 1.2. Функциональные характеристики термодатчиков на основе термопар

Термопары состоят из двух разнородных проводников, концы которых имеют спай в виде шарика. При изменении температуры наконечника на концах возникает электродвижущая сила – напряжение.

В основе принципа действия термопары лежит эффект Зеебека. Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи, составленной из разных проводников (M1 и M2), возникает термоэдс, если места контактов (A, B) поддерживаются при разных температурах [4]. Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (так называемый термоток, причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рис.1.8а).

В небольшом интервале температур величина термоЭДС,  $U$ , пропорциональна разности температур:

$$U = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент термоЭДС, составляющий для Si около 0,5 мВ/К.

Коэффициент термоЭДС,  $\alpha$ , складывается из трех составляющих:

$$\alpha = \alpha_{\text{диф}} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{фон}} \quad (1.2)$$

где  $\alpha_{\text{диф}}$  – составляющая термо ЭДС, обусловленная диффузией носителей тока от нагретого спая;  $\alpha_{\text{к}}$  – составляющая термоЭДС, обусловленная температурной зависимостью контактной разности потенциалов, возникающей между полупроводниками  $p$ - и  $n$ - типа проводимости;  $\alpha_{\text{фон}}$  – составляющая термоЭДС, возникающая вследствие увлечения носителей заряда квантами тепловой энергии – фононами.

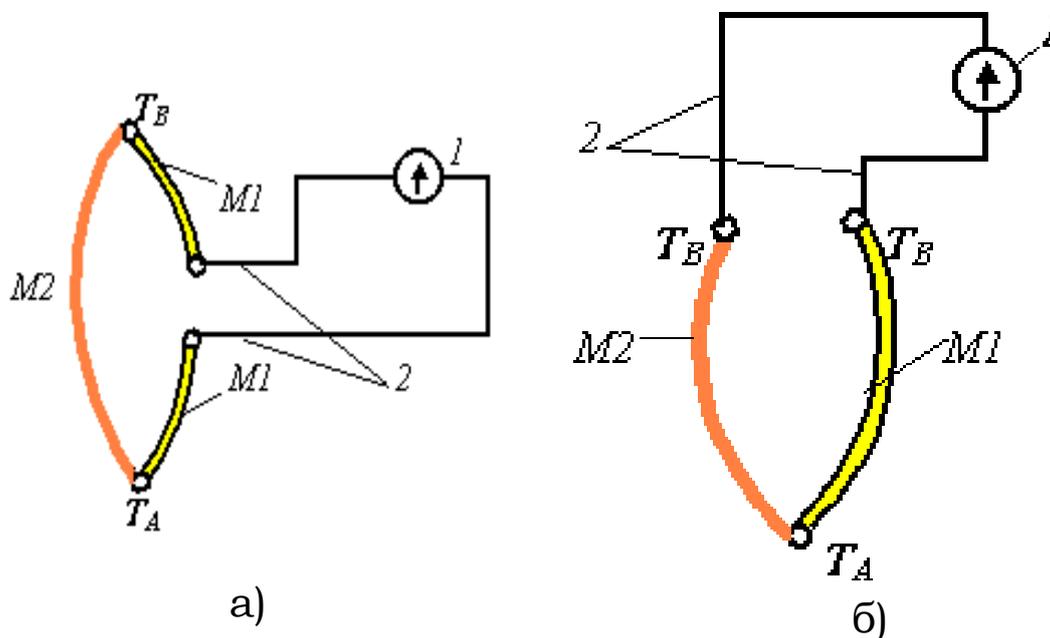


Рис. 1.8. Типичная схема включения термоэлектрического датчика с термостатированным контактом (а) и (б) с нетермостатированным "холостым" контактом.

Зона электрического соединения ветвей полупроводникового термоэлемента называется *спаем*. Горячий спай – теплопоглощающий, холодный спай – тепловыделяющий.

Величина термоэдс напрямую зависит от металла, из которого изготовлена термопара. Использование разнородных сплавов приводит к генерации различных напряжений, эти напряжения увеличиваются с ростом температуры и составляют от

1 до 70 микровольт на градус Цельсия ( $\text{мкВ}/^\circ\text{C}$ ) для стандартных сочетаний металлов. Типичная схема включения термоэлектрического датчика с нетермостатированным "холостым" контактом приведена на рис. 1.8б.

Выпускаемые промышленностью на основе термоэлектрических материалов различного типа термопарные преобразователи приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

**Таблица 1.1**

<b>Диапазон температур, К</b>	<b>Материалы термоэлектродов</b>
4-270	Золото – медь
70-800	Медь – константан
220-900	Хромель – копель
220-1400	Хромель – алюмель
250-1900	Платинородий – платина
300-2800	Вольфрам – рений

Термопары используются для контроля температур разнообразных объектов, а также для преобразования температуры в энергию, в частности, в электрический ток. В отличие от большинства других методов измерения градусов, термопары с автономным питанием не требуют внешнего возбуждения. Основным ограничением при работе термопар является точность; при этом ошибки доходят до одного градуса по Цельсию, что не достаточно для стандартного измерителя [5].

Для удовлетворения различных требуемых измеряемых параметров промышленностью выпускаются разного типа термопарные преобразователи, некоторые из них приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Тип термопары	Буквенное обозначение НСХ	Материал термоэлектродов		Коэффициент термоЭДС, мкВ/°С (в диапазоне температур, °С)	Диапазон рабочих температур, °С	Пределная температура при кратком применении, °С
		Положительного	Отрицательного			
ТЖК	J	Железо (Fe)	Сплав константен (45% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	50-64 (0-800)	от -200 до +750	900
ТХА	K	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	35-42 (0-1300)	от -200 до +1200	1300
ТМК	T	Медь (Cu)	Сплав константан (55% Си + 45% Ni, Mn, Fe)	40-60 (0-400)	от -200 до +350	400
ТХКн	E	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	59-81 (0-600)	от -200 до +700	900
ТХК	L	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав копель (56% Си + 44% Ni)	64-88 (0-600)	от -200 до +600	800
ТНН	N	Сплав никросил (83,49% Ni + 13,7% Cr + 1,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,01% Mg)	Сплав нисил (94,98% Ni + 0,02% Cr + 4,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,05% Mg)	26-36 (0-1300)	от -270 до +1300	1300

ТПП1 3	R	Сплав платина- родий (87%Pt + 13%Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТПП 10	S	Сплав платина- родий (87% Pt - 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТПР	B	Сплав платина- родий (70% Pt - 30% Rh}	Сплав платина- родий (94% Pt-6%Rh)	10- 14(1000- 1800)	от 600 до+1700	1800
ТВР	A-1 A-2 A-3	Сплав вольфрам- рений (95% W - 5% Re)	Сплав вольфрам- рений (80% W-20% Re)	14-7 (1300- 2500)	от 0 до +2200 от 0 до +1800 от 0 до +1800	2500
ТСС	I	Сплав сильд	Сплав силин	-	от 0 до + 800	900

При наличии соответствующих металлов можно изготовить термопару, но для этого необходимо знать, какие бывают виды данных устройств, в частности, чем отличаются модели ТХА, ТХК, ТПП, ТВР, ТЖК, ТПР, ТСП. Они распределяются как:

### 1. Тип E

Сплав хромель – константан. Данный сплав имеет высокую производительность (68 мкВ/°С), что делает его подходящим для криогенного использования. Кроме того, он является немагнитным. Диапазон температур составляет от -50°С до +740°С.

### 2. Тип J

Это железо – константан. Здесь область работы немного уже от -40°С до +750°С, но выше чувствительность – около 50 мкВ/°С.

### 3. Тип К

Это термопары, которые созданы из сплава хромель алюминий (рис. 1.9) являются наиболее распространенными устройствами общего назначения с чувствительностью около  $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$ . Эти приборы могут работать в пределах  $-200^\circ\text{С}$  до  $1350^\circ\text{С}/-330^\circ\text{F}$  до  $+2460^\circ\text{F}$ .



Рис.1.9. Фотография термопары хромель-алюмель.

Термопары типа К могут быть использованы включительно до  $1260^\circ\text{С}$  в неокисляющих или инертных атмосферах без появления быстрого старения. В незначительно окислительной среде (например, углекислом газе) между  $800^\circ\text{С}$ - $1050^\circ\text{С}$ , проволока из хромеля быстро разъедается и становится намагниченной, также это явление известно как «зелена гниль». Это вызывает большое и постоянное ухудшение работы регулятора.

### 4. Тип М

Класс термопар М (Ni/Mo 82%/18%-Ni/Co 99,2%/0,8%, по весу) используется в вакуумных печах. Максимальная температура составляет до  $1400^\circ\text{С}$ .

### 5. Тип N

Никросил-нисиловые термопары являются подходящими для использования между  $-270^\circ\text{С}$  и  $1300^\circ\text{С}$ , вследствие его стабильности и стойкости к окислению. Чувствительность около  $39 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$ .

## 6. Сплавы родия и платины

Платиновые термопары типа В, R, и S являются одними из самых стабильных термопар, но имеют более низкую термоЭДС, чем другие типы, всего около  $10 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ . Класс В, R, и S обычно применяется только для измерения высоких температур из-за их высокой стоимости и низкой чувствительности.

## 7. Тип В, S, С

Обозначение В у термопары означает, что в её состав входят такие металлы, как Pt / Rh 70% / 30% — Pt/Rh 94%/6%, подходят для использования в среде до  $1800^\circ\text{C}$ . Класс S применяются до 1600 градусов, в то время как С до 1500.

## 8. Сплавы рения и вольфрама.

Термопары на их основе хорошо подходят для измерения очень высоких температур. Типичная область их применения – это автоматика промышленных процессов, производство водорода, вакуумные печи (особенно перед выходом обрабатываемого материала). Но ими нельзя работать в кислотных средах [6].

На практике при измерении температур широко используется техника "компенсации холодного спая": температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термоЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары (рис. 1.10).

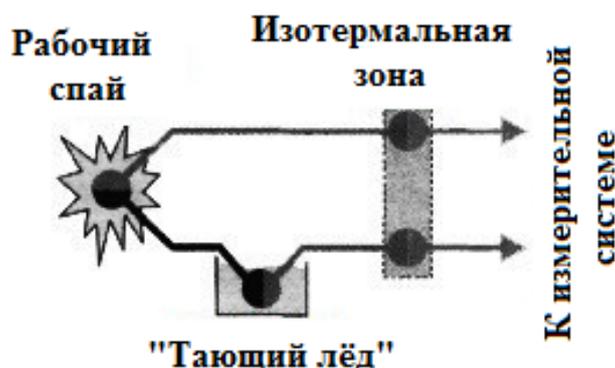


Рис. 1.10. Техника компенсации холодного спая

Места подключения термопары к измерительной системе должны иметь одинаковую температуру, то есть находиться в изотермальной зоне. Кроме того, в схеме с компенсацией холодного спая в этой же зоне должен находиться и датчик температуры холодного спая. Разработчик должен учитывать эти требования при конструировании измерительной системы.

Основные характеристики выпускаемых промышленностью термопар приведены в таблице 1.2 (ГОСТ 6616-94 "Преобразователи термоэлектрические").

На рис. 1.11 представлены зависимости ЭДС от температуры наиболее распространенных типов термопар, у которых температура холодного спая поддерживается равной  $0^{\circ}\text{C}$ . Из него видно, что термопары типа E наиболее чувствительны и развивают наибольшее выходное напряжение при одном и том же изменении температуры, чем другие.

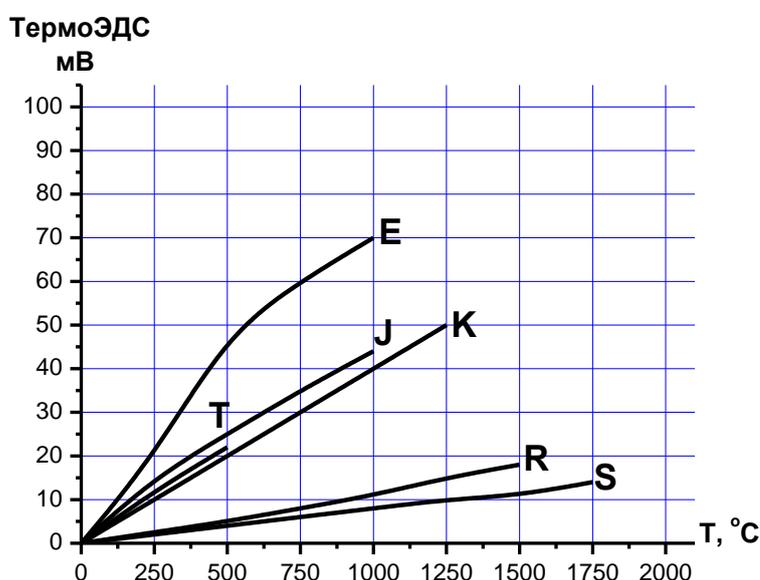


Рис. 1.11. Зависимости ЭДС от температуры наиболее распространенных типов термопар.

С другой стороны, термопары типа S являются наименее чувствительными. К сожалению, у

большинства термопар эти зависимости в некоторых диапазонах температур носит нелинейный характер.

При выборе термопары для производства замеров температуры в некотором диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона. Для достижения высокой точности измерений термопарного термометра во всем диапазоне рабочих температур необходима его калибровка. В ГОСТ 50431-92 "Термопары" приведены вид и порядок полинома, а также коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимости выходного напряжения термопар от температуры, которые определяются по градуировочным таблицам для каждого типа термопар.

В табл. 1.3 приведены особенности и области применения некоторых типов термопар.

**Таблица 1.3**

Тип термопары	Особенности применения
ТХА	Обладают: наиболее близкой к прямой характеристикой. Предназначены для работы в окислительных и инертных средах
ТХК	Обладают: наибольшей чувствительностью;- высокой термоэлектрической стабильностью при температурах до 600°С. Предназначены для работы в окислительных и инертных средах. Недостаток: высокая чувствительность к деформациям
ТПП	Обладают: хорошей устойчивостью к газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах;- высокой надежностью при работе в вакууме (но менее стабильны в нейтральных средах). Предназначены для длительной эксплуатации в окислительных средах. Недостаток: высокая чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар
ТВР	Обладают: возможностью длительного применения при температурах до 2200°С в неокислительных средах; - устойчивостью в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте. Термопары с термоэлектродами из сплава платины с 10% родия относительно электрода из чистой платины могут использоваться как стандартные для установления

	номинальных статических характеристик термопар методом сравнения. Недостаток - плохая воспроизводимость термоЭДС, вынуждающая группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками А-1, А-2, А-3
ТНН	Обладают: - высокой стабильностью термоЭДС (по сравнению с термопарами ТХА, ТПП, ТПР); - высокой радиационной стойкостью; - высокой стойкостью к окислению электродов. Предназначены в качестве универсального средства измерения температур в диапазоне температур 0-1230°С

В зависимости от конструкции и назначения различают термопары погружаемые и поверхностные; с обыкновенной, взрывобезопасной, влагонепроницаемой или иной оболочкой (герметичной или негерметичной), а также без оболочки; обыкновенные, вибротряскоустойчивые и ударопрочные; стационарные и переносные и т.д. Внешний вид некоторых конструкций термодатчиков представлен на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Внешний вид некоторых конструкций термодатчиков.

Материалы, применяемые для термопар. В табл. 1.4 приведены термо-э.д.с., которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температуре рабочего спае  $100^{\circ}\text{C}$  и температуре нерабочих спаев  $2\pm 0^{\circ}\text{C}$ . Зависимость термо-э.д.с. от температуры в широком диапазоне температур обычно нелинейна, поэтому данные таблицы нельзя распространить на более высокие температуры [7].

При пользовании данными таблицы следует иметь в виду, что развиваемые термоэлектродами термо-э.д.с. в значительной степени зависят от малейших примесей, механической обработки (наклеп) и термической обработки (закалка, отжиг).

Таблица 1.4

Материал	Термо-эдс, мВ	Материал	Термо-эдс, мВ
Кремний	+44	Свинец	+0,44
Сурьма	+4,7	Олово	+0,42
Хромель	+2,4	Магний	+0,42
Нихром	+2,2	Алюминий	+0,40
Железо	+1,8	Графит	+0,32
Сплав	+1,3	Уголь	+0,30
Молибден	+1,2	Ртуть	+0
Кадмий	+0,9	Палладий	-0,57
Вольфрам	+0,8	Никель	-1,5
Манганин	+0,76	Алюмель	-1,7
Медь	+0,76	Сплав	-2,31
Золото	+0,75	Константан	-3,4
Цинк	+0,75	Копель	-4,5
Серебро	+0,72	Пирит	-12,1
Иридий	+0,65	Молибден	-69
Родий	+0,64	Сплав	+0,64

При конструировании термопар, естественно, стремятся сочетать термо-электроды, один из которых развивает с платиной положительную, а другой-

отрицательную термо-э.д.с. При этом необходимо учитывать также пригодность того или иного термоэлектрода для применения в заданных условиях измерения (влияние на термоэлектрод среды, температуры и т. д.).

Для повышения выходной э.д.с. используется несколько термопар, образующих термобатарею. Рабочие спаи термопар расположены на черненном лепестке, поглощающем излучение, холодные концы — на массивном медном кольце, служащем теплоотводом и прикрытым экраном. Благодаря массивности и хорошей теплоотдаче кольца температуру свободных концов можно считать постоянной и равной комнатной.

### 1.3. Термометры сопротивления

**Термометр сопротивления** - это измерительный прибор, который изготавливается из металлической проволоки или пленки, намотанной на жесткий каркас, выполненный из кварца, фарфора или слюды, и заключенной в защитную оболочку (металлическую, кварцевую или стеклянную). Используется такой термометр для измерения температуры в жидких и газообразных средах, в нагревательной технике, климатической и холодильной, а также в машиностроении, печестроении и т.п., поскольку имеет прямую зависимость электрического сопротивления от температуры. Иными словами такие термометры еще называют терморезисторами, а также терми-сторами, так как основным чувствительным компонентом такого термометра является именно резистор, который изготавливается из различных материалов, что позволяет определить технические параметры термометра сопротивления, к примеру, область применения прибора или диапазон его рабочих температур.

Принцип действия такого агрегата заключается в изменении электрического сопротивления сплавов,

чистых металлов (т.е. без примесей) и полупроводников с температурой.

Самыми распространенными термометрами сопротивления являются те, у которых установлены резисторы из платины. Это объясняется рядом преимуществ, которыми владеет этот материал. Во-первых, плюсом есть высокий температурный коэффициент сопротивления, что значительно облегчает работу с таким термометром. Во-вторых, преимуществом платинового резистора является высокая стойкость платины к окислению, что обеспечивает долгий срок службы прибора.

Платиновые терморезисторы отличаются минимальной погрешностью, именно поэтому такие агрегаты часто используют как инструмент для проверки. Эталонные термометры сопротивления изготавливаются из платины максимальной чистоты с коэффициентом температуры не менее 0,003925. Модельный ряд таких приборов достаточно широкий: существуют как модели различных размеров, так и модификации увеличенных температурных диапазонов. Кроме этого, для использования такого термистора на промышленных объектах, они производятся во взрывозащитном исполнении.

**Термометры сопротивления**, изготовлены на основе напыленной пленки на подложку отличаются особой повышенной вибропрочностью и меньшим диапазоном рабочих измеряемых температур. Так, максимальный диапазон воспринимаемых температур для пленочных чувствительных элементов платиновых термисторов составляет 600°C, а проволочных - 660°C.

**Термометры сопротивления** используются, как правило, для измерения температуры в среде в диапазоне от -263°C до +1000°C. Важно, чтобы конструкция такого термистора была чувствительной и стабильной, чего будет достаточно для проведения замеров необходимой точности в определенном

диапазоне температур при определенных условиях использования термометра (к примеру, благоприятные условия или неблагоприятные, такие как вибрации, агрессивные среды и т.п.).

Как правило, терморезисторы работают вместе с логометрами, потенциометрами и измерительными мостами. От точности работы этих вспомогательных приборов зависит точность показаний термометра сопротивления. Существуют также и различные виды таких термометров: поверхностные, ввинчивающиеся, вставные, с присоединительными проводами и байонетными соединениями [9].

**Термопреобразователи сопротивления.** Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на использовании зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры. У большинства чистых металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается приблизительно на 0,4 % град-1. Зная зависимость сопротивления от температуры, можно судить о температуре среды, в которой находится термометр. Измерительный комплект состоит из термопреобразователя сопротивления, вторичного прибора, подсоединительных проводов, источника питания. Чаще всего применяют металлические термопреобразователи сопротивления, чувствительные элементы которых изготавливают из чистых металлов. Металлы для термопреобразователей сопротивления должны обладать следующими свойствами: не окисляться и не вступать в химическое взаимодействие с измеряемой средой; иметь большой и по возможности постоянный температурный коэффициент электрического сопротивления; изменять свое сопротивление с изменением температуры по прямой или плавной кривой; иметь большое удельное сопротивление; легко технологически производиться. Наиболее полно указанным требованиям отвечают платина и медь.

Платина Pt имеет достаточно большой температурный коэффициент электрического сопротивления ( $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ) и высокое удельное сопротивление ( $0,099 \text{ Ом-мм}^2/\text{м}$ ). Она обладает химической инертностью в окислительной среде и может быть легко получена в чистом виде. Сопротивление  $R_t$  платины в зависимости от температуры в интервале  $0-650^\circ\text{C}$  выражается формулой  $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ , где  $R_0$  - сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  $A$  и  $B$  - постоянные, определяемые при градуировке термопреобразователя.

Медь достаточно дешева, может быть легко получена в чистом виде, имеет высокий температурный коэффициент электрического сопротивления ( $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ). Зависимость сопротивления меди от температуры в интервале  $-50-180^\circ\text{C}$  выражается уравнением  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$  где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления меди. Помимо металлов для термопреобразователей сопротивления применяются полупроводниковые материалы, которые изготавливают из смесей оксидов меди, марганца, магния, никеля, кобальта и других металлов. Смесей двух-трех оксидов со связывающими добавками спекают и придают им нужную форму (цилиндра, шайбочек, бусинок). В торцы таких элементов заделывают контакты.

**Платиновые датчики температуры** Heraeus [10], схематическая конструкция которая приведена на рис.1.13.

Компания **Heraeus Sensor Technology** (Германия) хорошо известна на рынке **датчиков температуры**. Она выпускает только тонкопленочные платиновые датчики. Датчики можно условно разделить на следующие группы:

- **выводные датчики температуры** общего применения;

- **безвыводные (SMD) датчики температуры** общего применения;
- **корпусированные датчики температуры** для автомобильного применения;

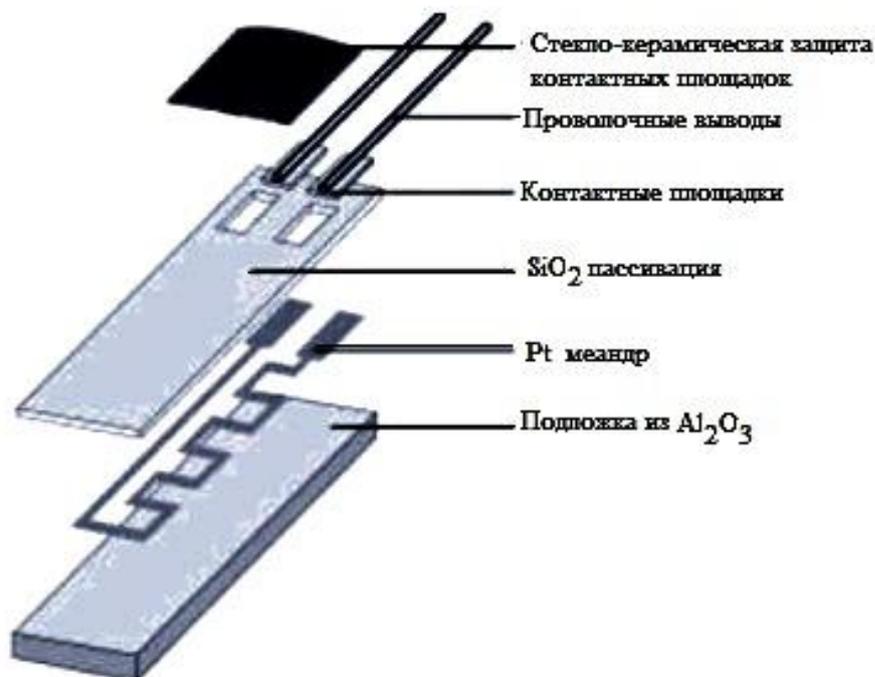


Рис. 1.13. Схематическая конструкция чувствительного элемента датчика "Heraeus"

**датчики температуры специального назначения** (на высокие – более 1000°С и низкие – менее -100°С).

**Преимуществами датчиков на основе платины являются:**

- высокая точность;
- долгий срок службы;
- долговременная стабильность параметров;
- линейность характеристики во всем рабочем диапазоне;

**Основные области промышленности, которые стабильно потребляют платиновые датчики температуры - это:**

- системы промышленной автоматизации;

- автомобильная электроника (исключая отечественную, где массово используются устаревшие и деградирующие, но дешевые термисторы);
- системы вентиляции и кондиционирования;
- пищевая и фармацевтическая промышленность;
- нефтехимия и органический синтез;
- медицина;
- метеорология;
- бытовая техника (плиты, стиральные машины, кондиционеры и т.д.);
- авиация.

Тонкопленочные **датчики температуры** изготавливаются методом вакуумного напыления платины на подложку из  $Al_2O_3$  с последующей фотолитографией по полученной пленке, рис. 1.13. Термочувствительные дорожки представляют собой протяженный плоский меандр. Electroды и термочувствительные дорожки, таким образом, состоят из одного и того же материала и не имеют дополнительных переходных контактов.

После создания рисунка на контактные площадки наносится припойный материал, остальная площадь пассивируется окислом  $SiO_2$ . Область контактных площадок дополнительно пассивируется стекло-керамической отверждаемой пастой. Конструкция датчика зависит от его целевого назначения. Технологические допуски при изготовлении не превышают 3-х микрон.

Платиновые термо сопротивления для своего функционирования требуют, чтобы по ним был пропущен измерительный ток. В связи с тем, что ток  $I$  текущий по активному сопротивлению величины  $R$ , в соответствии с законом Ома производит выделение мощности, равное

$$P = I^2 R . \quad (1.3)$$

Изменение температуры при этом равно

$$\Delta t = P \cdot S , \quad (1.4)$$

где  $S$  – коэффициент само нагрева в  $K/mW$ . Для каждого типа датчиков он имеет свою величину и зависит от конструкции и материала датчика.

Для того, что бы эта мощность не приводила к заметному увеличению температуры, она не должна превышать мощность рассеяния, которую может передать во внешнюю среду термо выделяющая часть датчика. В руководствах по применению указывается максимальная величина измерительного тока. Общие рекомендации таковы; которые приведена в табл. 1.5.

**Таблица 1.5**

100 Ом:	max. 1 мА
500 Ом:	max. 0.7 мА
1000 Ом:	max. 0.3 мА
2000 Ом:	max. 0.25 мА
10000 Ом:	max. 0.1 мА

Следующим важным параметром датчика считается время ответа на изменение температуры. В связи с тем, что существует тепловая инерция датчик прогревается не мгновенно, а с некоторой скоростью, которая зависит от перепада температур и конструкции. Время ответа зависит так же от теплового потока, который может обеспечить внешняя среда. В руководствах приводятся времена ответа для изменения температуры на уровне 50% и 90% изменения от допустимого диапазона. Они называются  $t_{0.5}$  и  $t_{0.9}$  и различаются для воды и потока воздуха в пределах 0.4 м/с или 2.0 м/с. В том случае, когда конкретные условия применения отличаются от табличных, время ответа можно пересчитать по методике, приведенной в руководстве VDI/VDE 3522.

У датчиков на основе платиновых термосопротивлений практически отсутствует термоэлектрический эффект, поэтому применять дополнительные

меры по его компенсации нет необходимости. Поскольку платиновые термосопротивления фактически являются твердотельными, допустимые воздействия на них мало отличаются от аналогичных параметров для микросхем. Что позволяет устанавливать их в конструкцию совместно. Допустимая вибрация: 40 g в диапазоне от 10 Гц до 2 кГц. Сопротивление ударным нагрузкам: 100 g, при 8 мс полусинусном воздействии. Общие электрические характеристики выглядят следующим образом:

Таблица 1.6 (а)

индуктивность:	< 1 мкГн
емкость:	От 1 до 6 пкФ
Сопротивление изоляции	> 10 МОм при 20°C > 1 МОм при 500°C
Стойкость к пробое:	> 1000 В при 20°C > 25 В при 500°C

Двуокись алюминия, на которую напылена платина материал хрупкий, поэтому сосредоточенные механические воздействия могут привести к его разрушению, и выходу датчика из строя. Это необходимо учитывать при монтаже и эксплуатации прибора. Одними из основных характеристик датчиков является воспроизводимость характеристик и класс точности.

**Датчики Heraeus** выпускаются 2-х основных классов точности А и В, и двух дополнительных, которые изготавливаются в меньших количествах.

Таблица 1.6 (б)

<b>Класс В:</b>	$\Delta t = \pm(0.3^\circ\text{C} + 0.005 Itl)$
<b>Класс А:</b>	$\Delta t = \pm(0.15^\circ\text{C} + 0.002 Itl)$
<b>Класс 1/3 DIN:</b>	$\Delta t = \pm 1/3 (0.3^\circ\text{C} + 0.005 Itl)$
<b>Класс 2В:</b>	$\Delta t = \pm 2(0.3^\circ\text{C} + 0.005 Itl)$

Дополнительные классы это 2В и 1/3DIN. Ниже приводятся формулы расчета погрешности для разных классов точности.

Данные соотношения хорошо иллюстрируются следующим графиком на рис.1.14.

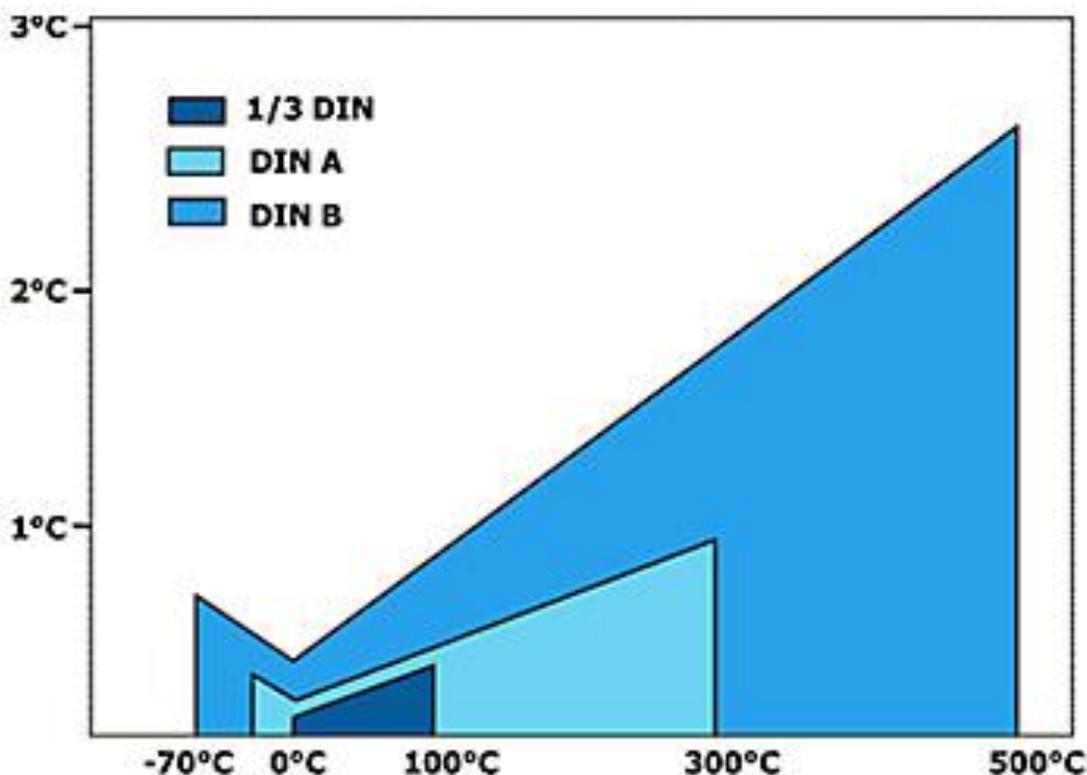


Рис. 1.14. Зависимость погрешности от температуры для разных классов точности.

В табличном виде та же зависимость для наиболее употребляемых классов А и В приведена в таблице 1.7.

**Таблица 1.7**

**Табличная зависимость погрешности от температуры для классов А и В**

Температура, °C	Класс А		Класс В	
	С	Ом	С	Ом
-200	±0.55	±0.24	±1.3	±0.56
-100	±0.35	±0.14	±0.8	±0.32
0	±0.15	±0.06	±0.3	±0.12
100	±0.35	±0.13	±0.8	±0.30
200	±0.55	±0.20	±1.3	±0.48

300	±0.75	±0.27	±1.8	±0.64
400	±0.95	±0.33	±2.3	±0.79
500	±1.15	±0.38	±2.8	±0.93
600	±1.35	±0.43	±3.3	±1.06
650	±1.45	±0.46	±3.6	±1.13
700			±3.8	±1.17
800			±4.3	±1.28
850			±4.6	±1.34

Платиновые тонкопленочные датчики также могут подразделяться на группы точности с максимальным значением  $\Delta t = 0.1$  К в диапазоне  $0^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$ . Для приложений, требующих более высокой чувствительности, производятся специальные датчики. Так же производятся датчики на расширенные диапазоны температур.

Производственную линейку можно представить следующим образом:

- **проводные платиновые датчики температуры:**
- датчики сверхнизкой температуры ( $-196^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}$ );
- низкотемпературные датчики ( $-50^{\circ}\text{C} \dots +400^{\circ}\text{C}$ );
- датчики измерения средних температур ( $-70^{\circ}\text{C} \dots +600^{\circ}\text{C}$ );
- **высокотемпературные датчики ( $-70^{\circ}\text{C} \dots +1000^{\circ}\text{C}$ ):**
- датчики температуры для поверхностного монтажа;
- датчики температуры для автомобильной электроники;

#### **Проводные датчики:**

**Датчики сверхнизкой температуры ( $-196^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}$ ).** Датчики температуры серии С являются тонкопленочными платиновыми резистивными элементами, имеющими широкий рабочий диапазон от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ , отличаются высокой стабильностью параметров в течение всего срока службы и стойкостью к чрезмерным температурным нагрузкам. Корпус датчиков позволяет выдерживать механичес-

кие нагрузки до 100 г. Рабочие характеристики датчиков серии С соответствуют стандарту DIN EN 60751 (IEC 751) и не имеют гистерезиса. Они наиболее пригодны для использования в авиакосмической, химической и установках по производству электроэнергии и тепла, а также в аналитическом оборудовании, таблица 1.8.

Таблица 1.8

Серия	Сопро. Ом	Темп. коэф-т	Размеры, мм			Диапазон темпера- туры измерения, °С
			дли- на	шири- на	высо- та	
<u>С</u> <u>220</u>	100	3850	2,3	1,9	1	-196...150
<u>С</u> <u>416</u>	100	3850	3,9	1,5	1,0	-196...500
<u>С</u> <u>420</u>	1000	3850	3,9	1,9	1	-196...150

### Низкотемпературные датчики (-50°С...+400°С).

Серия L низкотемпературных платиновых термо сопротивлений предназначена для широкого применения, где существенными являются требования длительной стабильной работы, взаимозаменяемость и точность измерений во всем рабочем диапазоне температур. Стабильность сопротивления составляет 0.04% после 1000 часов эксплуатации при температуре +400°С. Датчики этого типа применяются в автомобильной промышленности, бытовой техники, устройства контроля и вентиляции воздуха, при контроле расхода энергии, медицинском и промышленном оборудовании, таблица 1.9.

Таблица 1.9

Серия	Соп- рот-е, Ом	Темп. коэф-т	Размеры, мм			Диапазон темпера- туры измере- ния, °С
			дли- на	ши- ри- на	Высо- та	
<b><u>L 220</u></b>	100	3850	2,3	1,9	1	-50...+400
<b><u>L 220 P</u></b>	100	3850	2	2,3	1,4	-50...+400
<b><u>L 410</u> <u>ах</u></b>	100	3850	3,7	0,9	1	-50...+400
<b><u>L 416</u></b>	100	3850	3,9	1,5	1	-50...+400
<b><u>L 420</u></b>	100/500 /1000	3850	3,9	1,9	1	-50...+400
<b><u>L 1020</u></b>	100/500 /1000	3850	9,5	1,9	1	-50...+400

### **Датчики измерения средних температур (-70°С ...+600°С).**

Платиновые резистивные датчики имеют широкий круг применений и отличаются высокой стабильностью рабочих параметров, взаимозаменяемостью без дополнительной калибровки и точностью измерений во всем диапазоне температур. Стабильность выходного сопротивления составляет 0.04% после 1000 часов эксплуатации при температуре +500°С. Также, датчики выдерживают механическую нагрузку до 100g. Возможные области применения: автомобильная промышленность, бытовая техника, системы вентиляции, кондиционирования и обогрева воздуха, контроль расхода энергии, медицинское и промышленное оборудование, таблица 1.10.

Датчики температуры соответствуют стандарту DIN EN 60751 (IEC 751).

Таблица 1.10

Серия	Сопрот-е, Ом	Темп. коэф-т	Размеры, мм			Диапазон темпера- туры измере- ния, °С
			дли- на	ши- рина	высо- та	
<b><u>M213</u></b>	100/1000	3850	1,7	1,2	0,9	-70...+500
<b><u>M219</u></b>	100/1000	3750	2,1	1,9	0,9	-70...+500
<b><u>M220</u></b>	100	3850	2,3	1,9	0,9	-70...+500
<b><u>M222</u></b>	100/500/ 1000	3850	2,3	2,1	0,9	-70...+500
<b><u>M310</u></b>	100/1000	3850	3,0	1,0	0,9	-70...+500
<b><u>M410 ax*</u></b>	100	3850	3,7	0,9	0,9	-70...+500
<b><u>M416</u></b>	100	3850	3,9	1,5	0,9	-70...+500
<b><u>M422</u></b>	100/500/ 1000	3850/37 50	3,9	2,1	0,9	-70...+500
<b><u>M622</u></b>	1000/2000	3850	5,9	2,1	0,9	-70...+500
<b><u>M622</u></b>	10000	3850	5,9	2,1	0,9	-70...+500
<b><u>M1020</u></b>	100/500/ 1000	3850	9,5	1,9	0,9	-70...+500
<b><u>MH220</u></b>	100	3850	2,3	1,9	0,9	-70...+600
<b><u>MH410 ax*</u></b>	100	3850	3,7	0,9	0,9	-70...+600
<b><u>MH416</u></b>	100	3850	3,9	1,5	0,9	-70...+600
<b><u>MH420</u></b>	100/500/ 1000	3850	4	2	1,3	-70...+600
<b><u>MH1020</u></b>	100/500/ 1000	3850	9,5	1,9	0,9	-70...+600
<b><u>M220DB S*</u></b>	100/1000	3850	2,3	1,9	0,9	-70...+500
<b><u>M420DB S*</u></b>	100/1000	3850	3,9	1,9	0,9	-70...+500
<b><u>M420DB W*</u></b>	100/1000	3850	3,9	1,9	0,9	-70...+500

\* DBS: Direct Bonding Strip (плоские выводы прямоугольной формы)

*DBW: Direct Bonding Wire (прямые проволочные выводы)*  
*ax: Аксиальные выводы*

### **Высокотемпературные датчики (-70°С...+1000°С)**

Датчики для измерения высоких температур имеют стабильность и точность выходного сигнала во всем рабочем диапазоне. Дополнительным преимуществом датчиков является их компактный дизайн. Терморезистивные датчики высоких температур используются для специальных приложений, в бытовой технике, в системах высокотемпературного нагрева и в других технологических процессах, таблица 1.11.

Датчики, содержащиеся в маркировке – А предназначены для автоэлектроники.

**Таблица 1.11**

Серия	Сопрот-е, Ом	Темп. коэф-т	Размеры, мм			Диапазон температуры измерения, °С
			длина	ширина	высота	
<u>HL</u> <u>220</u>	100/1000	3850	2,3	1,9	0,9	-70...+750
<u>HL</u> <u>220</u> <u>DBS*</u>	1000	3850	2,3	1,9	0,9	-70...+750
<u>HL</u> <u>420</u>	1000	3850	4,0	1,9	0,8	-70...+750
<u>HD</u> <u>421</u>	100	3850	3,9	2,2	1,2	-70...+850
<u>HDA</u> <u>421</u>	200	3770	3,9	2,2	1,2	-70...+850
<u>HDA</u> <u>2421</u>	200	3770	24,0	2	1,2	-70...+850
<u>HA</u> <u>421</u>	200	3770	3,9	2,2	1,2	-70...+1000
<u>HA</u> <u>2421</u>	200	3770	24	2	1,2	-70...+1000

\* *DBS: Direct Bonding Strip (плоские выводы прямоугольной формы)*

Датчики температуры для поверхностного монтажа, таблица 1.12

Таблица 1.12.

Серия	Сопротивление, Ом	Темп. коэф-т	Размеры, мм			Диапазон температуры измерения, °С
			длина	ширина	высота	
<b>SMD 0603</b>	1000	3850	1,6	0,85	0,45	-50...+150
<b>SMD 0805</b>	100 / 1000	3850	2,2	1,35	0,52	-50...+150
<b>SMD 0805</b>	10000	3850	2,15	1,35	0,5	-50...+150
<b>SMD 1206</b>	100/1000	3850	3,25	1,65	0,6	-50...+150
<b>SOT 223</b>	1000	3850	7	3,5	1,7	-50...+150
<b>TO 92</b>	100 / 1000	3850	4,2	4,1	2,6	-50...+150

**Датчики температуры** для автомобильной электроники представляют собой законченные изделия, созданные по спецификации производителей авто техники и предназначены для измерения температуры технологических жидкостей, воздуха и поверхностей в автомобиле. Они имеют конструктив, зависящий от их назначения и требований заказчика. Датчики Heraeus применяют практически все европейские производители автомобилей, табл. 1.13.

### Сравнение датчиков температуры

Способность выдерживать высокие температурные нагрузки, устойчивость к химическим воздействиям, биологическая инертность и высокая стабильность делают платину уникальным материалом для терморезистивных измерительных элементов,

нагревателей и электродов. В связи с особыми свойствами платины, температурные резисторы 1, 2 и 10 кОм имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными полупроводниковыми датчиками (КТУ) и термисторами (NTC).

Таблица 1.13

Серия	Соп- рот-е, Ом	Темп. ко- эф-т	Размеры, мм			Диапазон температуры измерения, °С
			дли- на	шири- на	высо- та	
<b><u>HT-Tip HDA</u></b>	200	3770	62	5,4	5,4	-70 до +850
<b><u>HT-Tip HA</u></b>	200	3770	62	5,4	5,4	-70 до +1000
<b><u>MP HT-Tip HDA</u></b>	200	3770	120	4,5	4,5	-70 до +850
<b><u>MP HT-Tip HA</u></b>	200	3770	120	4,5	4,5	-70 до +1000
<b><u>Microbridge</u></b>	100 / 200	3850	на заказ			-40 до +500
<b><u>W-CTS 100</u></b>	100	3770	см. документацию			-40 до +750
<b><u>W-CTS 200</u></b>	200	3770	см. документацию			-40 до +750
<b><u>W-CTS 200 tipped end</u></b>	200	3770	см. документацию			-40 до +750

К преимуществам относятся: высокая точность низкий дрейф параметров долгий срок службы высокая линейность выходных характеристик стандартизация характеристик гарантирует взаимозаменяемость датчиков малое время отклика высокая стойкость к температурным перегрузкам широкий диапазон измеряемых температур (-196...+1000°C). Электрическое сопротивление платиновых терморезисторов зависит от длины токопроводящей дорожки. Выпускается два типа

Глава I. Типы и назначения термочувствительных датчиков новые датчики по спецификации заказчика, табл. 1.14.

### Применения терморезисторов

Таблица 1.14

Тип	Номинальное сопротивление при 0 °С	Условное обозначение характеристики преобразования	Допустимое отклонение сопротивления от номинального при 0°С, %	Диапазон измеряемых температур
ТСП	50 100	50П 100П	±0,05 до ±0,8	-250°С...+1000 °С то же
ТСМ	50 100	50М 100М	±0,1 до ±1,0	-50°С...+200°С 200°С...+200 °С

### Температурная зависимость сопротивления.

Сопротивление датчика изменяется с температурой линейно:

$$R_D = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad (1.5)$$

где  $R_0$  - сопротивление при температуре  $T_0$ ,  $\alpha$  - ТКС. Для учета более тонких эффектов, вызывающих небольшие отклонения температурной зависимости сопротивления от прямой линии, используют

$$R_D = R_0 \cdot \left[ 1 + \alpha \Delta T + bT^2 + C(T - 100)^3 \right] \quad (1.6)$$

где коэффициенты находятся, например, методом наименьших квадратов.

Схемы измерения температуры представлена на рис.1.18. Ток возбуждения  $I_{ex}$  задается с помощью источника тока, чтобы его внутреннее сопротивление и сопротивление подводящих проводов не влияло на величину тока через термопреобразователь [18]. В этом случае напряжение на выходе дифференциального усилителя будет равно

$$V_{out} = R_D I_{ex} \quad (1.7)$$

независимо от сопротивления подводящих проводов, поскольку входное сопротивление дифференциального усилителя в этих условиях нетрудно сделать практически бесконечным. Тогда искомое значение измеряемой температуры может быть получено в виде выражения

$$T = T_0 + \frac{\frac{V_{out}}{I_{ex}} - R_0}{\alpha \cdot R_0} \quad (1.8)$$

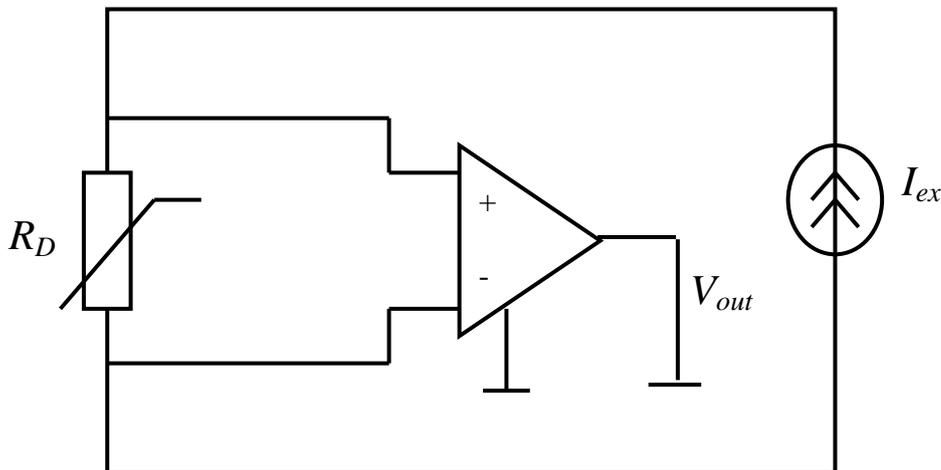


Рис.1.15. Четырехпроводная схема измерения температуры.

Можно сэкономить один провод из четырех, если использовать для компенсации сопротивлений подводящих проводов  $R_{L1}$  и  $R_{L2}$  мост Ватсона (рис.1.16.). При закороченном термодатчике напряжение на выходе моста подбирают равным нулю. Это достигается соответствующим выбором отношения сопротивлений  $R_1/R_2$ .

При невысоких требованиях к точности измерения и в случае, когда термодатчики расположены недалеко один от другого, удобна схема их включения с одним общим источником тока возбуждения (рис.1.17.). Недостаток этой схемы в том, что

напряжение нижнего по схеме датчика является синфазной помехой для всех датчиков, расположенных выше. Поэтому для получения хороших результатов в этой схеме необходимо использовать инструментальный усилитель с большим коэффициентом подавления синфазного сигнала.

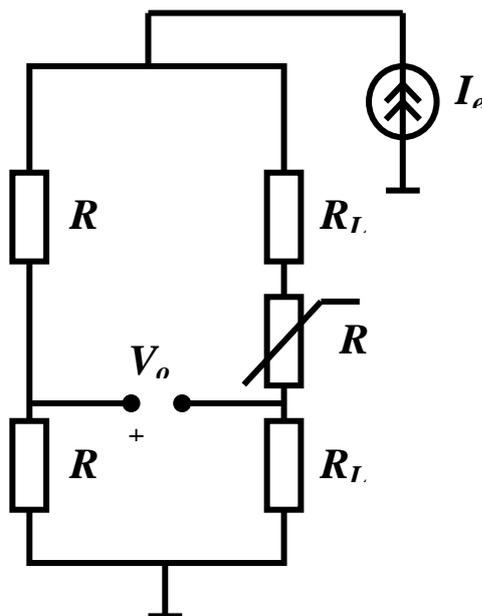


Рис.1.16. Трехпроводная схема включения термопреобразователя.

Для устранения уровня шумов в сигнале от термодатчика используют фильтр нижних частот с полосой 4...10 Гц. Для эффективного подавления помех с частотой питающей сети 50 Гц фильтр должен иметь по крайней мере третий порядок. Серия *RealLab!* включает в себя фильтр RL-8F3 с названными характеристиками.

При токе возбуждения 1 мА и ТКС 0,4 Ом/°С температурный коэффициент напряжения на термодатчике будет равен 0,4 мВ/°С. Поэтому для достижения потенциальной разрешающей способности термодатчика 0,026 °С и при использовании 12-разрядного АЦП с величиной МЗР 2,5 мВ необходим

усилитель с коэффициентом усиления 240. Этот усилитель желательно располагать в непосредственной близости от термопреобразователя, чтобы передавать по проводам уже усиленный сигнал. Описанным требованиям удовлетворяет четырехканальный дифференциальный усилитель RL-4A200 из серии *RealLab!* Усилитель выполнен в отдельном корпусе, что позволяет располагать его рядом с термопреобразователем.

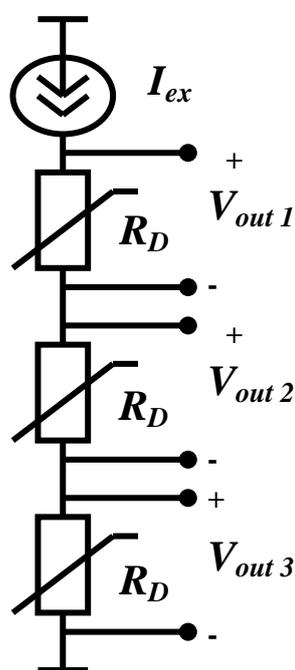


Рис.1.17. Схема включения термопреобразователей с общим источником тока возбуждения

**Схемы включения термопреобразователей сопротивления.** При подключении термопреобразователей существуют различные варианты. При измерении сопротивления датчика температуры со стороны тепловычислителя к сопротивлению самого датчика добавляется сопротивление соединяющих проводов. Для учета сопротивления проводов существуют различные варианты подключения термопреобразователей.

На рис. 1.18. (а) представлена двухпроводная схема подключения. Данная схема не позволяет учитывать сопротивление проводов. Применяется для небольших длин проводов до 3 м с термопреобразователями Pt 500 и сечением провода не менее 0,75 мм<sup>2</sup>. На рис.1.18 (б) приведена трехпроводная схема подключения. Применяется в большинстве случаев с контроллерами с трехпроводными схемами подключения. Провода должны быть одного сечения. На рис.1.18 (в) приведена четырехпроводная схема подключения. Применяется в различных теплосчетчиках. Для термопреобразователя Pt 100 сопротивление в 3 Ом увеличивает значение показания температуры примерно на 10 градусов для Pt 500 на 3 градуса. **Важное замечание!** Подключение термопреобразователей должно соответствовать схеме, указанной в документации на тепловычислитель.

В основной состав теплосчетчика входит тепловычислитель, расходомеры и термопреобразователи сопротивления, дополнительно могут быть подключены датчики давления.

Рассмотрим принцип действия датчиков температуры термопреобразователями сопротивления. Конструктивно термопреобразователь выполнен в виде переменного резистора (рис.1.18.(а)).

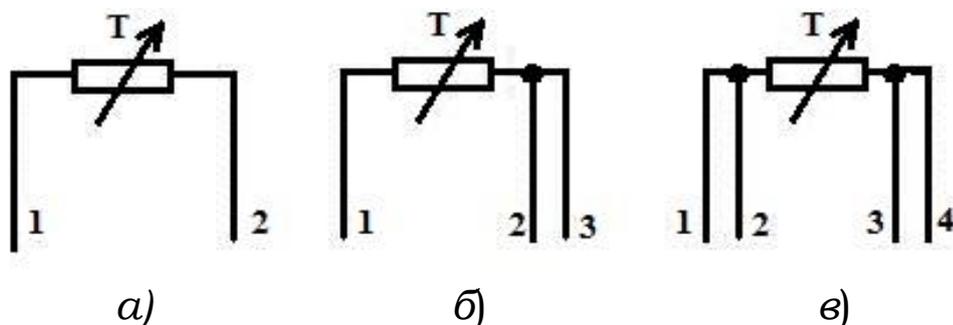


Рис.1.18. Принцип действия датчика температуры (термопреобразователя сопротивления.)

Изменение температуры вызывает изменение сопротивления датчика, т.е.  $R = f(t)$ , где  $R$  - сопротивление датчика в Ом,  $t$  - значение температуры среды в °С, которую измеряет датчик. Зависимость сопротивления платиновых термопреобразователей от температуры является квадратичной и описывается уравнением, называемым нормальной статической характеристикой НСХ (для диапазона температур от 0 до 600 градусов)  $R = (1 + At_1 + Bt_2)R_0$ , где  $A$ ,  $B$  - коэффициенты уравнения,  $R_0$  - сопротивление датчика при нуле градусов. Значение отношения сопротивлений  $W_t = R/R_0$  определяет коэффициенты уравнения  $A$  и  $B$ .

В соответствии с ГОСТ 6651-94 - "Термопреобразователи сопротивления" преобразование сопротивления в значение температуры можно свести в следующую таблицу 1.15 (для платиновых термопреобразователей Pt 100, Pt 500, 100П от 0 до 600 градусов)

"Термопреобразователи сопротивления" преобразование сопротивления в значение температуры.

**Таблица 1.15**

	$W_{100}=1,3910$	$W_{100}=1,3850$
$A$	$3,9692 \cdot 10^{-3}$	$3,9083 \cdot 10^{-3}$
$B$	$-5,829 \cdot 10^{-7}$	$-5,775 \cdot 10^{-7}$
$R_0=100$	$R=(1+3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,829 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \cdot 100$	$R=(1+3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,775 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \cdot 100$
$R_0=500$	$R=(1+3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,829 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \cdot 500$	$R=(1+3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,775 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \cdot 500$

Маркировка термопреобразователей определяет их НСХ. Например, Pt 100 обозначает платиновый термопреобразователь с  $R_0=100$  Ом (сопротивление 100 Ом при 0°С), Pt 500 обозначает платиновый термопреобразователь с  $R_0=500$  Ом (сопротивление 500

Ом при  $0^{\circ}\text{C}$  ). Отношение сопротивлений  $W_{100}=R/R_0$  при 100 градусах указывается в документации на датчик.

Диагностирование или проверка работы датчика температуры. Для определения температуры по сопротивлению датчика и обратного преобразования при нахождении сопротивления датчика по температуре можно воспользоваться таблицами указанными в ГОСТ 6651-94.

**Пример 1.** Необходимо определить сопротивление термопреобразователя Pt 500 ( $R_0=500$ ) с  $W_{100}=1,385$  при 65 градусах целсия.

1. Находим в ГОСТ 6651-94 соответствующую таблицу с  $W_{100}=1,385$  и определяем  $W_t$  при 65 градусах:  $W_t=1,2516$ .
2. Находим сопротивление датчика  $R=W_t \cdot R_0=1,2516 \cdot 500 = 625,8$  Ом

**Пример 2.** Необходимо определить температуру термопреобразователя Pt100 ( $R_0=100$ ) с  $W_{100}=1,391$  при сопротивлении датчика  $R=131,77$  Ом.

1. Находим отношение сопротивлений  $W_t=R/R_0=131,77/100 = 1,3177$
2. Находим в ГОСТ 6651-94 соответствующую таблицу с  $W_{100}=1,391$  и определяем температуру при  $W_t=1,3177$ :  $t=81$  градус.

#### 1.4. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления

Кроме металлических термопреобразователей сопротивления в последние годы применяют полупроводниковые, предназначенные для измерения температуры от  $-90^{\circ}\text{C}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ . Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления называются термисторами и терморезисторами. При  $50^{\circ}\text{C}$  и ниже

терморезисторы обладают значительно большим (в 5-10 раз) температурным коэффициентом электрического сопротивления, чем металлы, и вследствие этого намного превосходят по чувствительности медные и платиновые термометры сопротивления. Терморезисторы подразделяются на кобальто-марганцевые (типа КМТ) и медно-марганцевые (типа ММТ). Устройство стержневого полупроводникового сопротивления показано на рис. 1.19. Полупроводниковый элемент 6 покрыт снаружи эмалевой краской, имеет на концах контактные колпачки 2, к которым припаяно два вывода 1. Полупроводник, обмотанный металлической фольгой 3, помещен в защитный металлический чехол 5, в верхней части которого имеется стеклянный изолятор 4. Термосопротивление имеет диаметр 4 мм и длину 20 мм. Широкое внедрение терморезисторов в промышленность ограничивается слабой воспроизводимостью свойств полупроводников, что исключает их взаимозаменяемость [13].

Электрические платиновые и медные термопреобразователи сопротивления являются одними из основных измерительных устройств при осуществлении автоматизации технологических процессов пищевых производств и применяются для измерения температуры в диффузионных и выпарных установках сахарного производства, в дезодораторах, барометрических конденсаторах, холодильных барабанах масложирового производства, в темперирующих машинах кондитерского производства, в вакуум-аппаратах и сушилках макаронного производства, в

мучных силосах и пекарных камерах хлебопекарного и кондитерского производств.

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления применяются в системах температурной компенсации, в сигнализаторах и регуляторах температуры, автоматических установках контроля температуры плавления саломаса при гидрогенизации жиров.

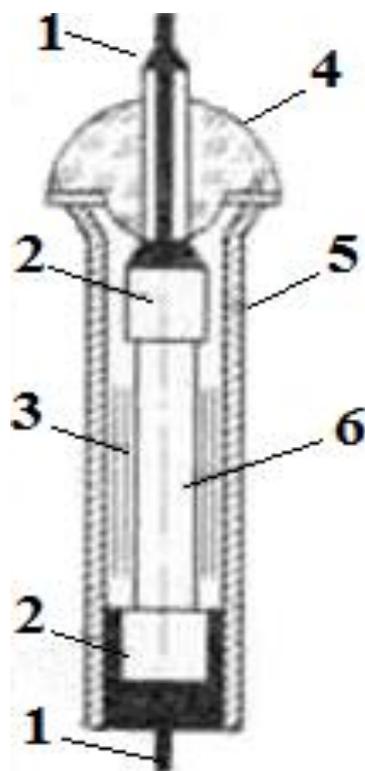


Рис.1.19. Стержневой полупроводниковый термопреобразователь сопротивления.

**Терморезистор** - это полупроводниковый прибор (его изготавливают из полупроводниковых материалов с большим отрицательным температурным коэффициентом), в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводников от температуры [14].

Изменение сопротивления  $R_T$  полупроводника при изменении температуры характеризуется зависимостью:

$$R_t = A_{\text{exp}} \cdot (B/T), \quad (1.9)$$

где:  $A$  - постоянная, зависящая от физических свойств полупроводника, размеров и формы терморезистора;  $B$  - постоянная, зависящая от физических свойств полупроводника;  $T$  - температура терморезистора, °С. Температурный коэффициент  $\alpha$  полупроводникового терморезистора отрицательный. Он достигает значений от 2,5 до 4, что в 6-10 раз больше температурного коэффициента металлов, и зависит от температуры:

На рис. 1.20 показано устройство терморезисторов серий ММТ и КМТ. Терморезисторы типов ММТ-1 и КМТ-1 (рис. 1.20 а) представляют собой полупроводниковый стержень 1, покрытый эмалевой краской, с контактными колпачками 2 и выводами 3. Эти выводы терморезисторов могут быть использованы только в сухих помещениях. Терморезисторы типов ММТ-4 и КМТ-4 (рис. 1.20. б) смонтированы в металлический корпус 6 и герметизированы. Они могут быть применены в условиях любой влажности и любой среды, не являющейся агрессивной по отношению к корпусу. Герметизация осуществляется стеклом 8 и оловом 9. Стержень 5 в терморезисторе типа ММТ-4 обернут металлической фольгой 4. Токоотвод 7 выполнен из никелевой проволоки. Эти терморезисторы выпускаются на номинальные значения сопротивления от 1 до 200 кОм (при 20°С) и могут быть использованы для работы в диапазоне температур от -100 до 129°С.

$$\alpha = B/T^2 \quad (1.10)$$

Принцип действия термометров сопротивления основано на свойстве проводников, менять электрическое сопротивление, при изменении температуры. В качестве материала для изготовления термометров сопротивления используют только чистые металлы: платину в виде тонкой проволоки диаметром 0,05- 0,07 мм для измерения температур до 630°С и медь, никель или железо в виде проволоки диаметром 0,1 мм для измерения температур 100-150°С.

Существуют следующие способы намотки материала термометров сопротивления:

- на стеклянную пластинку в целях сохранности элемента, имеющего остроугольные вырезы по бокам, расстояние между зубцами которых равно 0,5-1 мм;

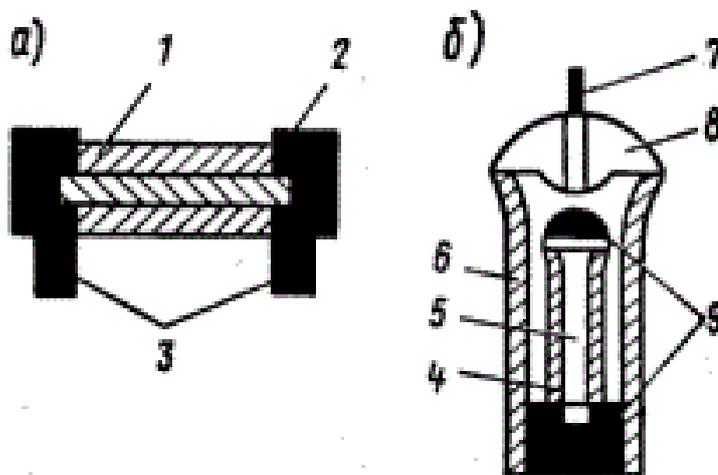


Рис.1.20. Терморезисторы типа ММП и КМТ.

- на стеклянную трубку в целях сохранности элемента его заключают в тонкостенную пружинящую металлическую трубку с асбестовыми подушками;
- на слюдяную или фарфоровую крестовину.

Наиболее широко применяют платину и медь. Термометры сопротивления имеют следующее обозначение:

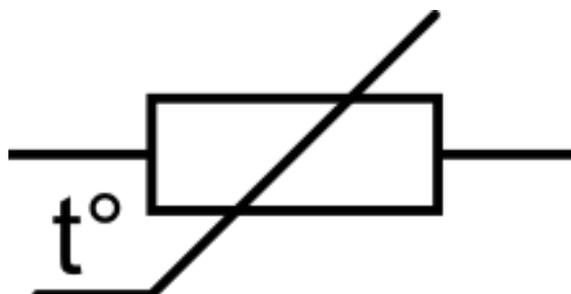


Рис. 1.21. Условное графическое обозначение термометра сопротивления.

**Термометры сопротивления** используют в приборах контроля и автоматического регулирования температуры. В них, кроме чувствительного элемента, есть источник тока и измерительный мост. Схема уравновешенного моста постоянного тока показана на рис. 1.22.

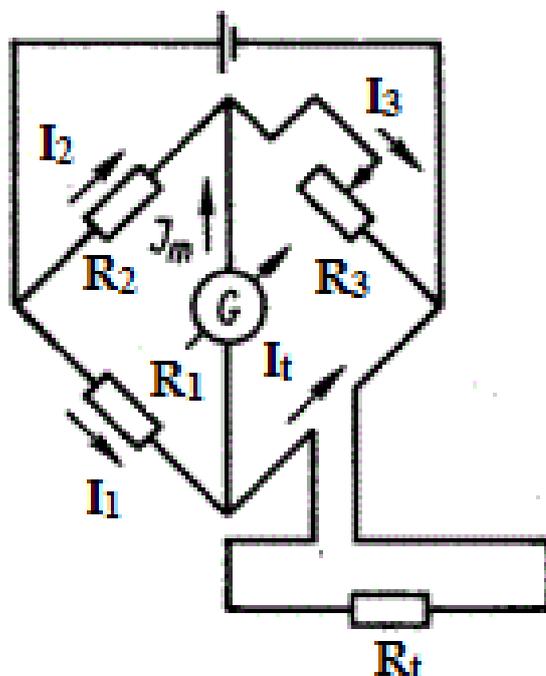


Рис.1.22. Схема включения терморезистора.

Перемещая движок реостата  $R_3$ , приводят мост в уравновешенное состояние, при котором гальванометр  $G$  фиксирует отсутствие тока в диагонали моста ( $I_T=0$ ).  $R_3 = \text{const}$ .

Таким образом, на равнозначных режимах величина  $R_3$  пропорциональна измеряемому сопротивлению  $R_t$ , зависящему от температуры. Уравновешивания моста может быть осуществлено автоматически. Для этого сопротивление резистора меняется под воздействием стрелки нуля гальванометра  $G$ .

Наряду с уравновешенными измерительными мостами применяются и неуравновешенные, характеризующиеся большей надежностью, но меньшей точностью из-за влияний колебаний напряжения источника.

Термометр сопротивления платиновый типа ТСП-972 (рис.1.23.) предназначен для измерения температуры от  $-10$  до  $+120^\circ\text{C}$  при относительной влажности до 98%.

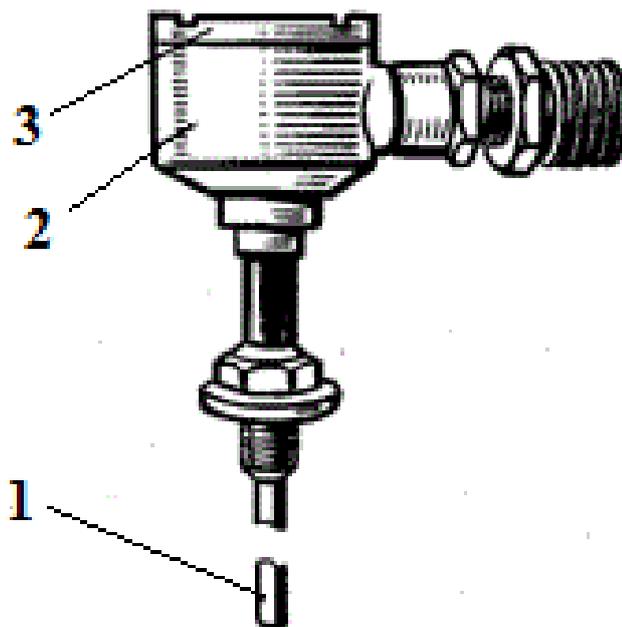


Рис. 1.23. Термометр сопротивления платиновый типа ТСП-972.

Принцип действия основан на свойстве платины изменять свое сопротивление в зависимости от температуры. Измерение сопротивления термометра фиксируется вторичным прибором, имеющим шкалу в градусах Цельсия. Термометр типа ТСП-972 состоит из термоэлемента 1 и головки 2. Чувствительный элемент термометра представляет собой спираль из платиновой проволоки марки Пл-2 диаметром 0,05 мм, помещенную в канал каркаса. Каналы каркаса заполнены порошком безводной окиси алюминия и залиты глазурью. Концы спирали припаяны серебром к выводам из сплава, состоящего из иридия и родия.

Головка термометра сопротивления состоит из корпуса и крышки 3, соединенных болтами. Конструкция защитной арматуры сварная.

Термометр виброустойчивый и ударопрочный.

**Принцип действия и характеристики полупроводниковых термодатчиков.** Значительная зависимость сопротивления полупроводников от температуры позволила сконструировать чувствительные терморезисторы (термисторы, термосопротивления), представляющие собой объемные полупроводниковые сопротивления с большим температурным коэффициентом сопротивления. В зависимости от назначений терморезисторы изготавливаются из веществ с различным значением удельного сопротивления. Для изготовления терморезисторов могут применяться полупроводники как с электронным, так и с дырочным механизмом проводимости и беспримесные вещества. Основными параметрами вещества терморезистора, определяющими его качество, являются: величина температурного коэффициента, химическая стабильность и температура плавления.

Большинство типов термисторов надежно работает лишь в определенных температурных пределах. Всякий перегрев свыше нормы пагубно

действует на терморезистор (термосопротивление), а иногда даже может привести к его гибели.

Для предохранения от вредного влияния окружающей среды, и в первую очередь кислорода воздуха, терморезисторы иногда помещаются в баллон, наполненный инертным газом.

Конструкция терморезистора весьма несложна. Кусочку полупроводника придается форма нити, бруска, прямоугольной пластинки, шарика или какая-нибудь иная форма. На противоположных частях терморезистора смонтированы два вывода. Величина омического сопротивления термистора, как правило, заметно больше величин сопротивлений других элементов схемы и, что самое главное, резко зависит от температуры. Поэтому когда в схеме течет ток, его величина в основном определяется величиной омического сопротивления термистора или в конечном счете его температурой. С повышением температуры термистора ток в схеме увеличивается, и, наоборот, с понижением температуры ток уменьшается.

Нагрев термостата может осуществляться передачей тепла от окружающей среды, выделением тепла в самом термисторе при прохождении через него электрического тока или, наконец, при помощи специальных подогревных обмоток. Способ нагрева терморезистора непосредственным образом связан с его практическим использованием.

Сопротивление термистора с изменением температуры может изменяться на три порядка, т.е. в 1000 раз. Это характерно для термисторов, изготовленных из плохо проводящих материалов. В случае хорошо проводящих веществ отношение находится в пределах десяти.

Всякий терморезистор обладает тепловой инерционностью, которая в одних случаях играет положительную роль, в других - либо не имеет практически никакого значения, либо отрицательно

сказывается и ограничивает пределы использования терморезисторов. Тепловая инерция проявляется в том, что термистор, подвергающийся нагреву, не сразу принимает температуру нагревателя, а лишь через некоторое время. Характеристикой тепловой инерции терморезистора может служить так называемая постоянная времени  $\tau$ . Постоянная времени численно равна тому количеству времени, в течение которого термистор, ранее находившийся при 0 °С, а затем перенесенный в среду с температурой 100 °С, уменьшит свое сопротивление на 63%.

Для большинства полупроводниковых терморезисторов зависимость сопротивления от температуры имеет нелинейный характер (рис.1.24 А). Тепловая инерция терморезистора мало отличается от инерции ртутного термометра. При нормальном режиме эксплуатации параметры терморезисторов с течением времени меняются мало, а поэтому срок их службы достаточно велик и в зависимости от марки терморезистора колеблется в интервале, верхний предел которого исчисляется несколькими годами.

На рис.1.24. В показаны принципиальное устройство и конструкции этих терморезисторов. Терморезистор ММТ-1 покрыт снаружи эмалевой краской и предназначен для работы в сухих помещениях; терморезисторы ММТ-4 и ММТ-5 смонтированы в металлических капсулах и герметизированы. Поэтому они не подвержены вредному влиянию окружающей среды, предназначены для работы в условиях любой влажности и даже могут находиться в жидкостях (не действующих на корпус терморезисторов Омическое сопротивление терморезисторов находится в диапазоне от 1000 - 200000 ом при температуре 20°С, а температурный коэффициент  $\alpha$  около 3% на 1°С.

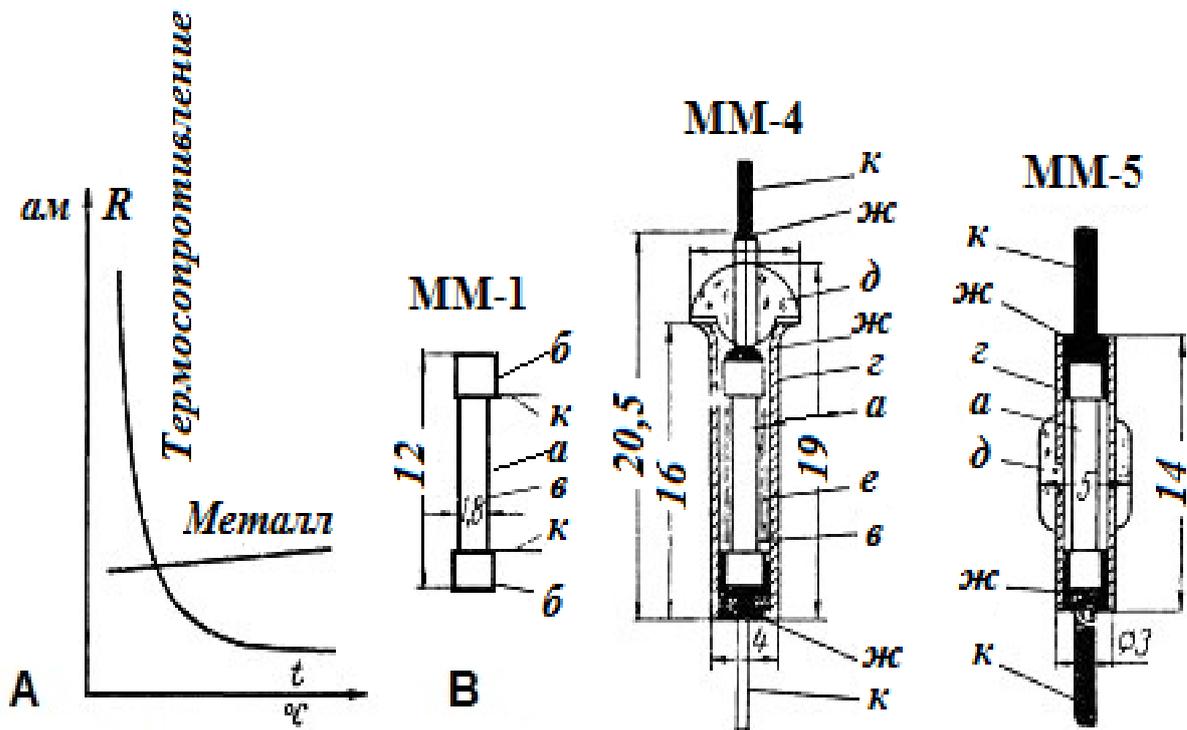


Рис.1.24. Полупроводниковых терморезисторов

А - Температурная зависимость сопротивления термосопротивления и металла;

В - Конструкция термосопротивлений и их размеры:

а-тело термосопротивления, б - контактные колпачки, в - слой эмалистой краски, г - защитный металлический чехол, д - стеклянный изолятор, е - металлическая фольга, ж - слой олова, к - выводы

На рис.1.25 изображена кривая, показывающая в процентах изменение омического сопротивления термистора в зависимости от его температуры. На этом графике за начальное значение принято сопротивление при  $20^{\circ}\text{C}$ .

Описываемые типы терморезисторов рассчитаны на работу в температурном интервале от  $-100$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ . Перегрев их недопустим.

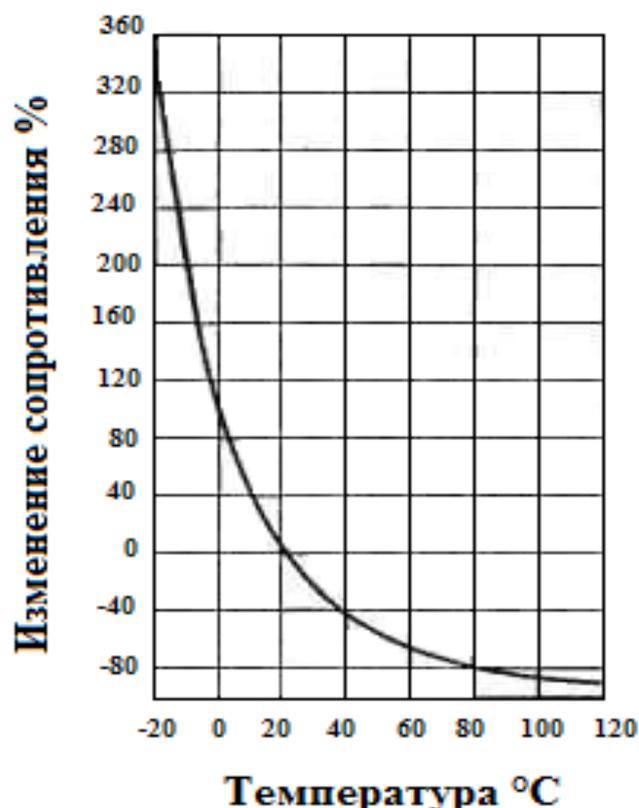


Рис.1.25. Температурная зависимость сопротивления терморезистора типа ММТ. Рассмотрим для примера кратко три типа терморезисторов (термосопротивления): ММТ-1, ММТ-4 и ММТ-5.

Термосопротивления (термисторы, терморезисторы) упомянутых типов весьма стабильны, т. е. сохраняют практически неизменным свое "холодное" сопротивление, величина которого определяется при 20°C в течение весьма длительного времени. Высокая стабильность терморезисторов типа ММТ определяет их большой срок службы, который, как указано в паспорте, в нормальном режиме их работы практически безграничен. Термосопротивления (термисторы, терморезисторы) типа ММТ обладают хорошей механической прочностью.

## 1.5. Датчики температуры на основе диодных и транзисторных структур

Измерение температуры с помощью полупроводниковых диодов представляет особый интерес для массового применения, так как они доступнее и дешевле других датчиков и имеют хорошую повторяемость параметров.

Для измерений используется прямая ветвь ВАХ диодов, поскольку обратная ветвь менее стабильна. Нелинейность показаний легко учитывается двумя программными методами. Во-первых, можно плавно аппроксимировать температурную характеристику эмпирической формулой, во-вторых, можно использовать дискретную таблицу поправок с сохранением коэффициентов в ПЗУ МК.

В термодатчиках выгодно применять германиевые (а не кремниевые) диоды, поскольку у них сильнее проявляется зависимость параметров от температуры. Однако устаревшие германиевые диоды типа Д2Б, Д7Ж, выпущенные 40...50 лет назад, уже не обладают заявленными техническими параметрами. Сточки зрения надёжности они давно выработали ресурс хранения и эксплуатации, что в любой момент грозит выходом элемента из строя [15].

Считается, что термодатчики на диодах обеспечивают приемлемую линейность измерения температуры в диапазоне  $0...+100^{\circ}\text{C}$  (по некоторым оценкам  $-60...+150^{\circ}\text{C}$ ). Для достоверности достаточно откалиброваться в двух крайних точках диапазона по образцовому термометру ТЛ-4 ГОСТ 28498-90. Если таковой отсутствует, то используют ... обычную очищенную воду. Известно, что температуру  $0^{\circ}\text{C}$  можно получить в момент образования льда (смесь воды с льдинками в морозильной камере

холодильника). Температура  $+100^{\circ}\text{C}$  соответствует кипящей воде в кухонном чайнике. Контрольная проверка - температуры тела человека.

Электрический режим работы диодов должен быть стабильным во времени и максимально не нагруженным по току (Рис. 1.26, а,б,в,г,д), в связи с чем уменьшаются ошибки измерений, связанные с саморазогревом кристалла:

а) высокоомный резистор служит своеобразным генератором стабильного тока для термодатчика VD1. Напряжение на входе МК пропорционально температуре окружающей среды в диапазоне  $-50...+100^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент преобразования составляет  $2...2.5 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ , погрешность меньше 1%. Конденсатор С/снижает уровень помех при большом удалении диода VD1 от МК;

б) к двум каналам АЦП МК подключаются одинаковые цепи, но измеряемые напряжения будут разными, поскольку VD1 служит термодатчиком, а VD2-обычным диодом. Используется дифференциальный режим работы АЦП. Фиксируются не абсолютные температуры, а их разность в двух удалённых местах, например, в помещении (VD2) и на улице (VD1). Диоды могут быть не только германиевыми, но и кремниевыми. Их можно зашунтировать конденсаторами  $0.1 \text{ мкФ}$ ;

в) усилитель DA1 расширяет динамический диапазон сигнала, поступающего от термодатчика на диоде VD1. Резистором R2 калибруется начальное значение, резистором R6 - диапазон температур. Чтобы повысить линейность по краям, (OYZ) следует применить «rail-to-rail»;

а) «нижнее» включение диодов Шоттки VDI...VD4, выступающих в качестве термодатчиков. Их последовательное соединение повышает чувствительность в четыре раза. Температура определяется табличным методом по замерам напряжений АЦП МК. Резистор R1 имеет высокое сопротивление, что снижает протекающий через термодатчики ток и устраняет их саморазогрев. Резистор обеспечивает оптимальное входное сопротивление для АЦП МК;

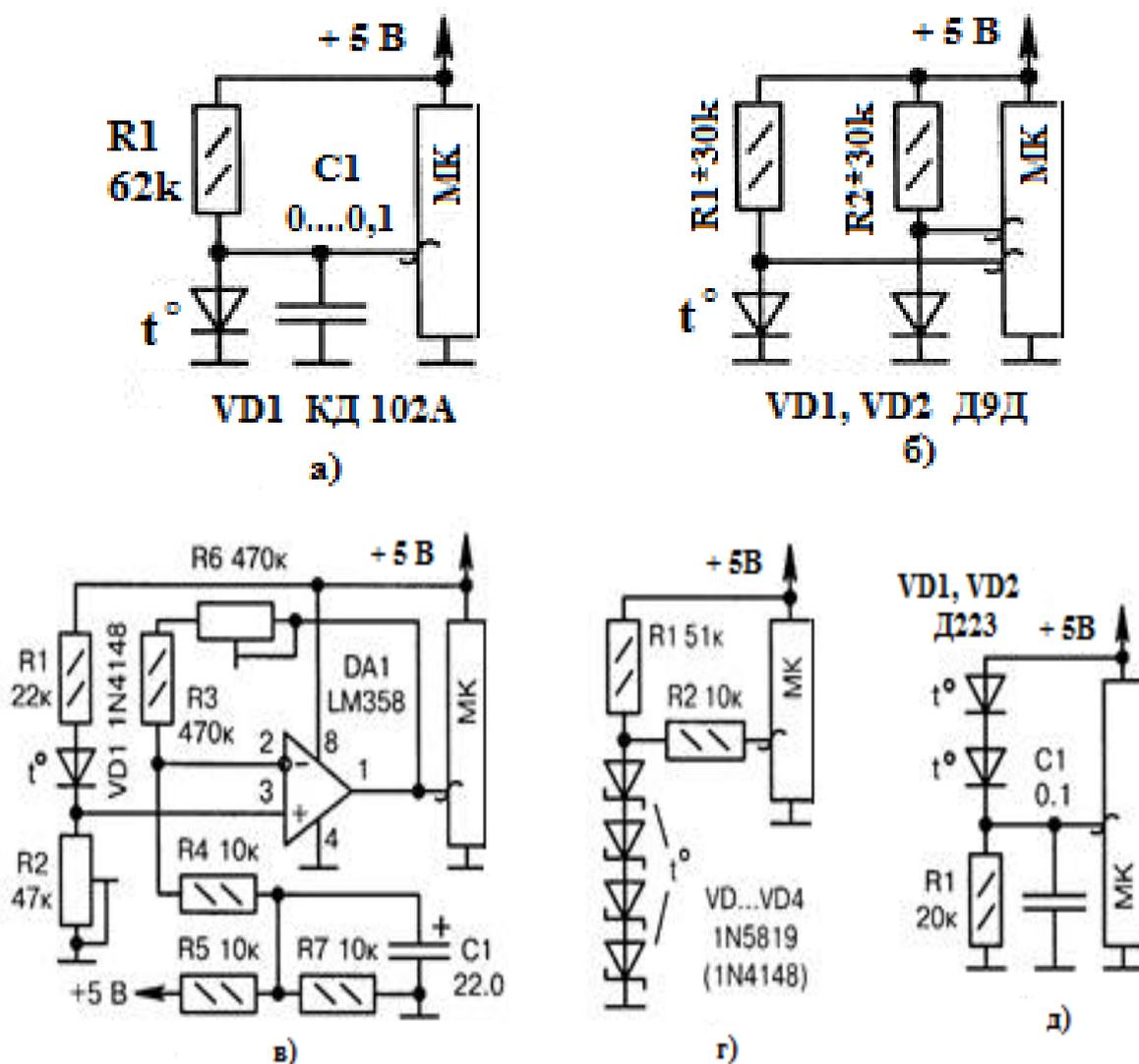


Рис.1.26. Схемы подключения диодных термодатчиков МК.

д) «верхнее» включение кремниевых диодов VD1, VD2, выступающих в качестве термодатчиков. Для нормальной работы АЦП МК требуется, чтобы на вход подавалось напряжение, близкое к питанию +5 В. Для сравнения, в схемах с «нижним» включением диодов можно подавать на вход более низкое (а значит и более стабильное) напряжение +1.2...+2.5 В от внешнего ИОН. Возможная замена диодов VD1, VD2-1N4148 [16].

**Измеритель температура для диапазона от 0 до 100°C с точностью в 1 градус.** В качестве датчика температуры в схеме применяется недорогой диод 1N4148. Для калибровки схемы датчик (диод) нужно поместить в среду с температурой 0°C и потенциометром "ZERO" установить на выходе 0 В; затем диод следует поместить в среду с температурой 100°C и потенциометром "FULL SCALE" установить на выходе напряжение 10 В. Этот процесс калибровки нужно повторять до тех пор, пока обе установки не будут больше влиять друг на друга.

Полупроводниковые датчики температуры на основе р-п перехода. Характеристики полупроводникового р-п перехода в диодах и биполярных транзисторах довольно сильно зависят от температуры [11]. Если прямосмещенный переход соединить с генератором постоянного тока выходное напряжение, снимаемое с него, будет прямо пропорционально изменению его температуры (рис. 1.27). Достоинством такого датчика является его линейность, что дает возможность проводить его калибровку только по двум точкам для определения наклона прямой и ее

пересечения с координатной осью (наклон прямой характеризует чувствительность детектора).

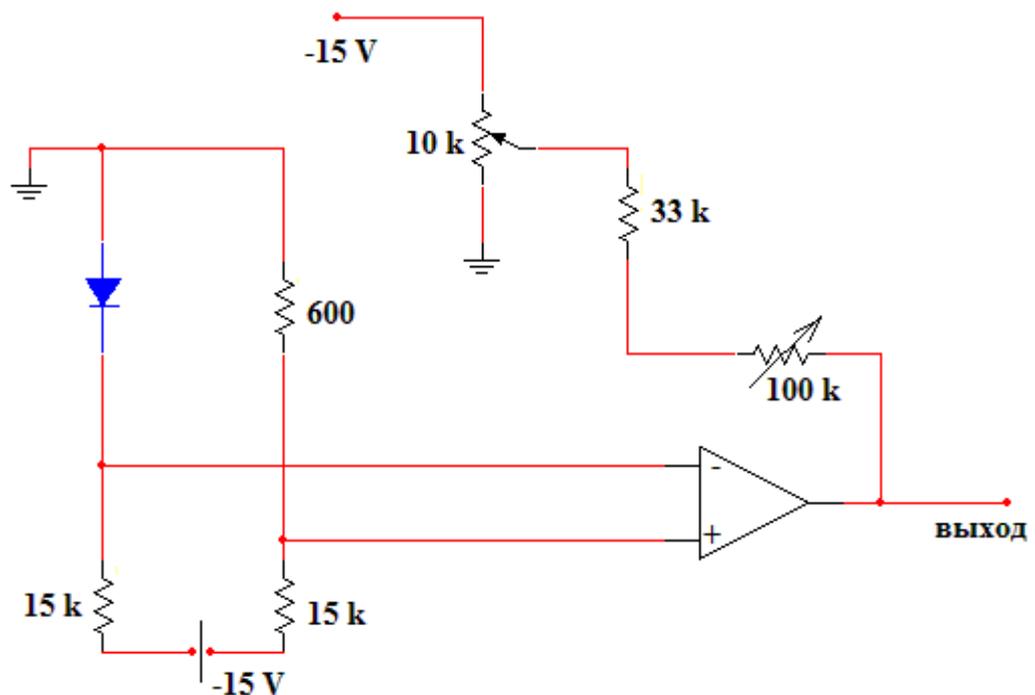


Рис.1.27. Измеритель температура для диапазона от 0 до 100°C.

К примеру, для кремниевого перехода, работающего при токе 10 мкА, температурная чувствительность равна - 2.3 мВ/°С, а при токе 1 мА, она падает до - 2.0 мВ/°С, рис. 1.28. Любой диод или биполярный транзистор могут быть использованы в качестве сенсоров температуры. Благодаря простоте и очень низкой стоимости, транзисторные (диодные) датчики температуры получили довольно широкое распространение. На рис. 1.29. отображена зависимость погрешности измерений датчика температуры, реализованного на основе транзистора PN100, от температуры при рабочем токе 100 мкА. Как видно из рисунка, погрешность измерений

довольно мала, и во многих случаях можно даже обойтись без коррекции нелинейности.

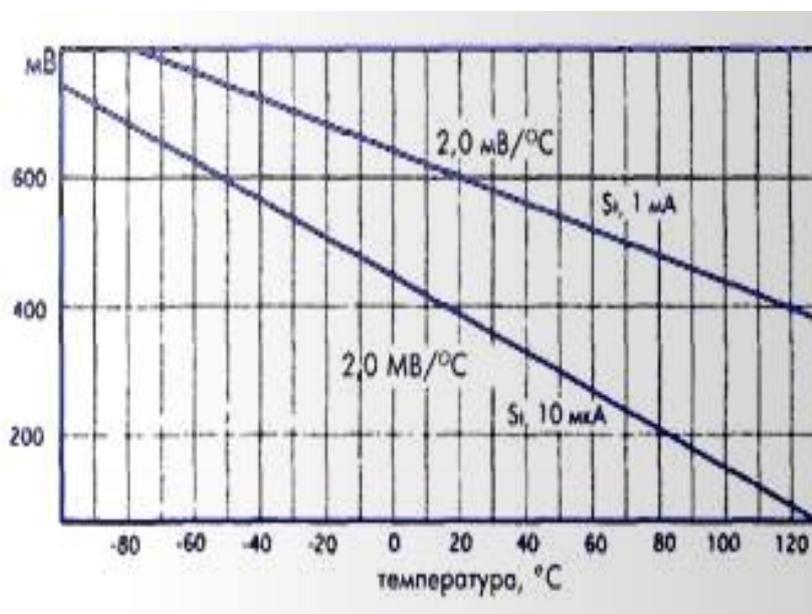


Рис.1. 28. Зависимость напряжения от температуры для прямосмещенного полупроводникового перехода, снятая в условиях постоянного тока.

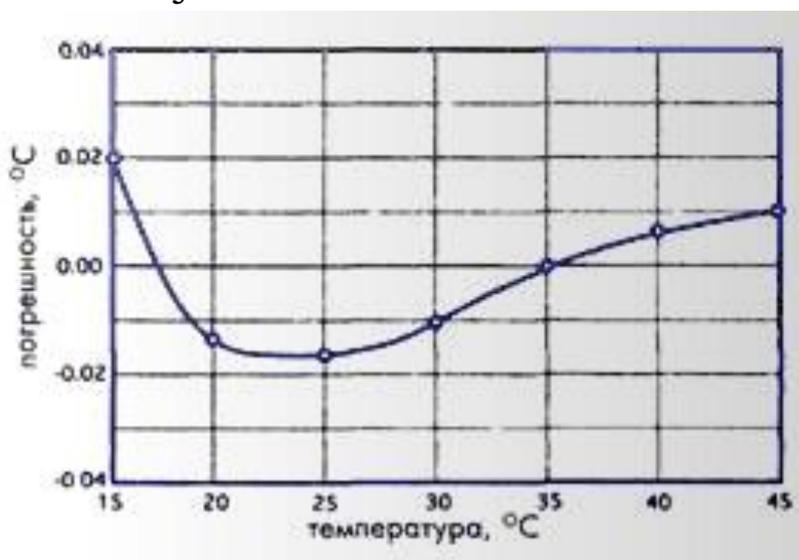


Рис. 1.29. Зависимость погрешности измерений от температуры, построенная для датчика температуры, реализованного на основе кремниевого транзистора PN100.

Детекторы температуры на основе диодов часто встраиваются в кремниевую подложку монокристаллических сенсоров для осуществления температурной компенсации. К примеру, такие детекторы методом диффузии формируются на мембранах кремниевых микросенсоров давления для компенсации температурной зависимости пьезорезистивных элементов. Напряжение на транзисторах всегда пропорционально абсолютной температуре в Кельвинах. На основе этого свойства можно реализовать недорогой, но достаточно точный датчик температуры. В этом датчике можно либо непосредственно измерять напряжение, либо предварительно преобразовать напряжение в ток, по величине которого определять температуру [12].

Такой полупроводниковый датчик температуры построен на основе зависимости между напряжением база-эмиттер ( $V_{BE}$ ) и коллекторным током биполярного транзистора. На рис. 1.30 А изображена упрощенная схема детектора температуры. В этом датчике транзисторы  $Q_1$  и  $Q_4$  формируют, так называемое, токовое зеркало, вырабатывающее два одинаковых тока которые поступают на транзисторы  $Q_x$  и  $Q_r$ . Величина коллекторных токов определяется сопротивлением  $R$ . В монолитной схеме транзистор  $Q_2$ , как правило, состоит из нескольких идентичных транзисторов (к примеру, 8), включенных параллельно.

Поэтому плотность тока в  $Q$  будет в восемь раз больше, чем на каждом из транзисторов, входящих в состав  $Q_r$ . Разность напряжений база-эмиттер двух транзисторов  $Q_x$  и  $Q_2$ .

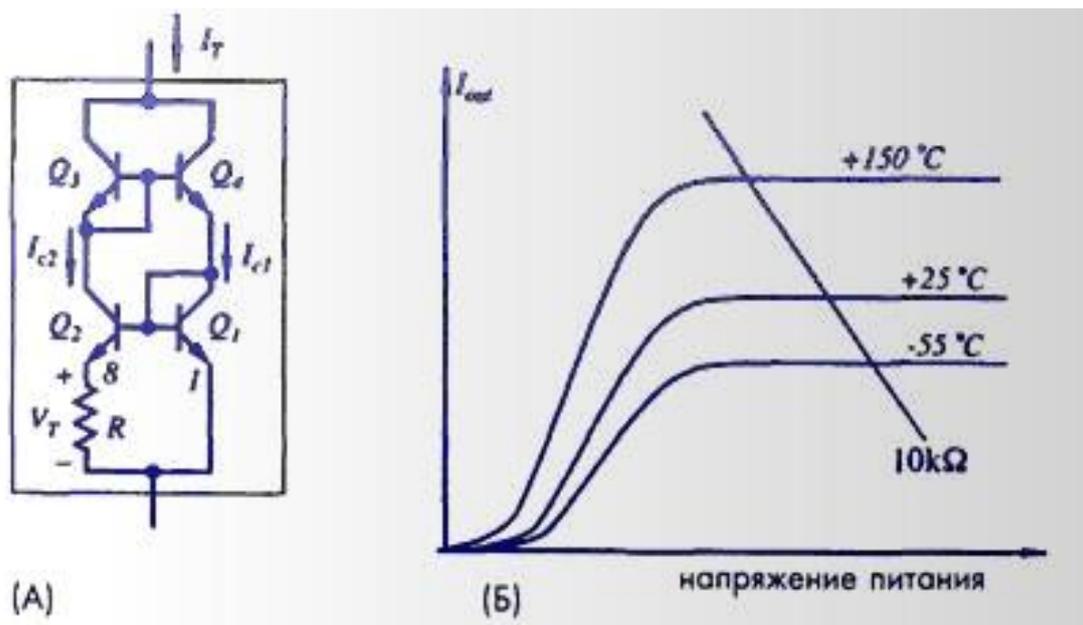


Рис. 1.30. Упрощенная схема полупроводникового датчика температуры (А) и зависимости тока от напряжения (Б)

Здесь  $r$ -множитель тока (8 в нашем примере),  $k$  - постоянная Больцмана,  $q$  - заряд электрона,  $T$  - температура в Кельвинах. Ток  $I$  одинаков для обоих транзисторов. Ток, протекающий через резистор  $R$ , создает на нем напряжение  $V = 179 \text{ мкВ/К}$ , величина того не зависит от токов на коллекторах. Исходя из этого, можно найти выражение для суммарного тока, протекающего через датчик:

$$I_T = 2 \frac{V_T}{R} = \left( 2 \frac{k}{qR} \ln r \right) T. \quad (1.11)$$

При  $r=8$  и  $R = 358 \text{ Ом}$ , данный датчик обладает линейной передаточной функцией:  $I/T = 1 \text{ мкА/К}$ .

На рис. 1.30. Б отображены зависимости тока от напряжения, построенные для разных температур. Отметим, что значение выражения в круглых скобках в уравнении в данном конкретном случае является

постоянной величиной и может быть точно подстроено в процессе изготовления для получения требуемого наклона. Ток легко преобразуется в напряжение. к примеру, если последовательно с датчиком включить резистор номиналом 10 кОм, напряжение на нем будет прямо пропорционально абсолютной температуре.

Поскольку таких транзисторов не бывает, в схемы, применяемые на практике, приходится вводить много дополнительных компонентов. Многие фирмы выпускают датчики температуры, реализованные на этом принципе. Среди них LM35 (National Semiconductors) - с выходом по напряжению и AD590 (Analog Devices) - с токовым выходом.

На рис. 1.31. отображена передаточная функция датчика LM35Z, чувствительность того настроена на уровень 10 мВ/°С. Погрешность нелинейности такого датчика невелика, обычно она не выходит за пределы.

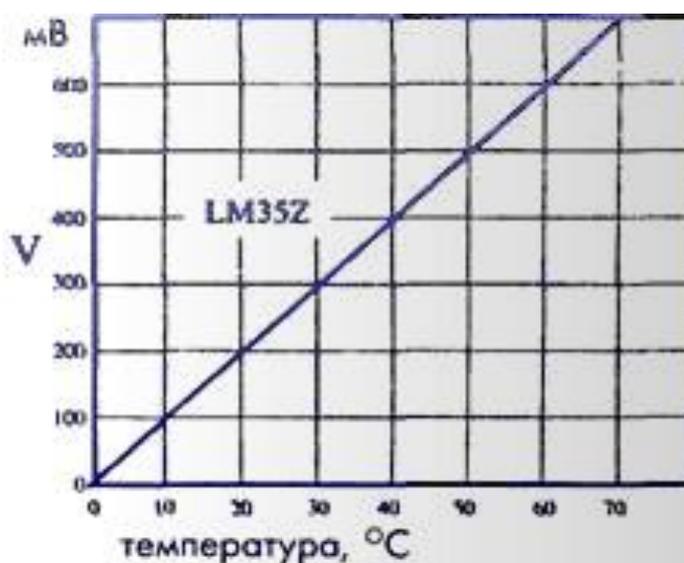


Рис. 1.31. Типовая передаточная функция полупроводникового датчика температуры LM35DZ (Напечатано с разрешения National Semiconductors, Inc).

**Датчик температуры на транзисторе.**

Зависимость падения напряжения на р-п переходе от температуры было замечено сразу после создания самого этого перехода. Это свойство полупроводников используется в электронных термометрах, датчиках температуры, термореле и т.д.

Простейшим датчиком температуры является р-п переход кремниевого диода, температурный коэффициент напряжения, которого равен, примерно,  $2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , а прямое падение напряжения находится в районе  $0,7\text{В}$ . Работать с таким маленьким напряжением неудобно, поэтому в качестве термозависимого элемента лучше использовать р-п переходы транзистора, добавив к нему базовый делитель напряжения. Полученный двухполюсник обладает свойствами цепочки диодов, т.е. падение напряжения на нем можно устанавливать намного больше, чем  $0,7\text{В}$  [18].

Интегральные диодные датчики температуры – самые современные и быстро развивающиеся температурные датчики (рис. 1.32), которые встраиваются в микросхемы и широко используются в электронике [19].

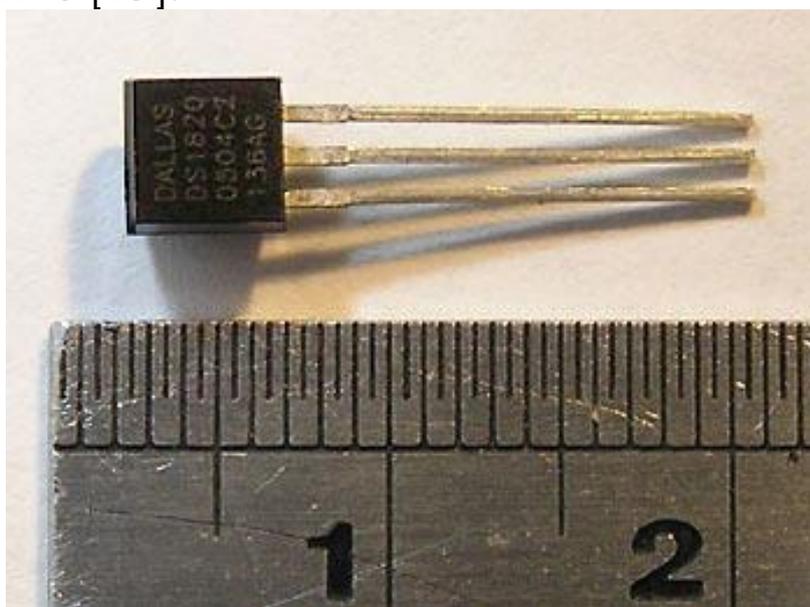


Рис. 1.32. Общий вид диодного термометра.

Международная аббревиатура – IC (Integrated Circuit temperature sensors). Принцип работы датчиков основан на зависимости вольт-амперной характеристики полупроводникового диода от температуры. Температурный диапазон диодных термометров довольно ограниченный, по сравнению с платиновыми термометрами сопротивления и термопарами - они работают только до 150 °С. Однако датчики имеют ряд преимуществ перед термометрами сопротивления. Они очень компактны, относительно дешевы, и, как уже отмечалось, могут легко встраиваться в усилители, регуляторы, микроконтроллеры и др. электронные приборы. При этом диодные термометры обладают высокой чувствительностью и достаточно высокой точностью.

Сфера их применения непрерывно расширяется, они могут использоваться в системах измерения локальной температуры процессоров, измерительных плат, в сложных системах многопараметрического контроля, в которых производится одновременный мониторинг давления, расхода и др. параметров. Важное значение приобретает применение микродатчиков для систем дистанционного мониторинга температуры и пожарной безопасности, где сигнализация срабатывает при превышении определенного температурного порога.

Даже самые ранние разработки IC термометров имели большое преимущество перед термисторами в том, что исключали необходимость линеаризации выходной характеристики, которая, как известно, у термисторов крайне не линейна. Существует два основных типа диодных датчиков – аналоговый и цифровой, и несколько вариаций каждого из типов. Аналоговые датчики выдают сигналы тока или напряжения, пропорциональные температуре. Аналоговые IC термометры все еще довольно широко применяются, преимущество таких IC - широкий

диапазон напряжений – от 4 до 30 В и нечувствительность к падению напряжения на длинных линиях передачи сигнала. Большинство современных приборов требуют преобразования сигнала в цифровой формат данных, что может быть осуществлено преобразованием аналогового сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП. С развитием технологии изготовления диодных датчиков встраивание функции АЦП стало технически и экономически эффективным способом решения многих измерительных и мониторинговых задач. Выходной сигнал с цифрового IC термометра выдается в цифровом формате в виде «0» и «1», таким образом, делая удобным их применение с микроконтроллерами. Цифровые термометры могут иметь дополнительные функции: регистрировать температуры удаленных объектов, отслеживать изменение напряжения, скорости потока, сигнализировать о превышении заданной температуры.

Наиболее популярными компонентами 1-Wire-сетей являются цифровые термометры типа DS18S20 (фирма Dallas Semiconductor), более известные под обозначением уже давно снятого с производства устройства DS1820, успевшего стать международным брендом. Преимущества этих цифровых термометров с точки зрения организации магистрали, по сравнению с любыми другими интегральными температурными сенсорами, а также неплохие метрологические характеристики и хорошая помехоустойчивость, уже на протяжении полутора десятков лет неизменно выводят их на первое место при построении многоточечных систем температурного контроля в диапазоне от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Они позволяют не только осуществлять непосредственный мониторинг температуры в режиме реального времени, но и благодаря наличию встроенной энергонезависимой памяти температурных установок,

могут обеспечивать приоритетную оперативную сигнализацию в 1-Wire-линию о факте выхода контролируемого параметра за пределы заданных значений. Более совершенные термометры – модель DS18B20, их скорость преобразования определяется разрядностью результата, программируемой непосредственно по 1-Wire-линии. Цифровой код, считываемый с такого термометра, является прямым результатом измеренного значения температуры и не нуждается в дополнительных преобразованиях. Некалиброванная, но в тоже время более дешевая версия DS18B20 под обозначением DS1822 представляется оптимальным решением для разработчиков недорогих многоточечных систем контроля температурных процессов. Для потребителей, использующих только паразитный режим питания однопроводной линии, компания Dallas Semiconductor выпускает экономичные двухвыводные устройства - DS18S20-PAR, DS18B20-PAR, DS1822-PAR. Кроме того, фирма Dallas Semiconductor поставляет однопроводные термометры DS1825, которые имеют четыре отдельных адресных вывода, что позволяет формировать до 16 локальных адресов на 1-Wire-линии. Благодаря такой особенности, мастер может оперативно определять место положения до 16 термометров такого типа в 1-Wire-сети многоточечного температурного контроля, без использования таблиц соответствия 64-битных индивидуальных адресов, что значительно увеличивает производительность системы в целом.

## **Глава II.**

# **Влияние теплового и деформационного воздействий на характеристики диодных и транзисторных структур**

- 2.1. Многофункциональные датчики на основе полупроводниковых резисторных структур.
- 2.2. Датчики на основе полупроводниковых диодных структур.
- 2.3. Универсальные датчики на основе транзисторных структур.

## **Глава II. Влияние теплового и деформационного воздействий на характеристики диодных и транзисторных структур**

В настоящее время интенсивные исследования ведутся по поиску новых возможностей использования традиционных полупроводниковых структур, например, традиционных диодных и транзисторных структур по новому назначению. В частности, транзисторные структуры используются в качестве элемента интегральных схем, дополнительно выполняя функции резисторов и емкостей.

Представляет также интерес их использование в качестве датчика температуры или фотоприемника. В зависимости от режимов включения и материала, из которого изготовлен полупроводниковый прибор его фото-электрические и температурные характеристики меняются существенным образом. В этом аспекте можно сказать, что стало традицией использование кремниевых диодов или транзисторов для измерения температуры [15,16,18,19], в которых пропусканием фиксированного прямого тока через р-п-переход, регистрируют падающее напряжение, которое линейно меняется с изменением температуры.

В этой главе рассматриваются известные работы по влиянию температуры на электрофизические характеристики полупроводниковых резисторных, диодных и транзисторных структур, особенности чувствительности тензодатчиков на основе полевого транзистора.

## 2.1. Многофункциональные датчики на основе полупроводниковых резисторных структур

Полупроводниковые резисторные структуры представляют собой полупроводниковый кристалл с двумя омическими контактами. В зависимости от параметров базовой области они приобретают свойства термо, фото, тензо-и магниторезисторных датчиков.

Принцип действия полупроводниковых резисторных датчиков основывается на изменении сопротивления полупроводниковых материалов под воздействием различных управляющих факторов: электрического напряжения, температуры, светового и теплового излучения, магнитного поля. Физика работы полупроводниковых терморезисторов основана на зависимости проводимости от температуры [20]. Так, нагрев полупроводника приводит к увеличению проводимости. Температурная зависимость проводимости полупроводника связан с изменением концентрации от температуры:

$$\sigma = e(n_- \cdot \mu_- + n_+ \cdot \mu_+). \quad (2.1)$$

С повышением температуры подвижность носителей заряда уменьшается. При этом повышение температуры приводит к увеличению столкновений за время, что приводит к уменьшению скорости движения носителей заряда в электрическом поле.

В донорном полупроводнике имеет место классическая статистика Максвелла-Больцмана. При низких температурах для электронов в зоне проводимости с примесями справедливо:

$$m = AT^{3/2} e^{-\Delta W/kT}, \quad (2.2)$$

где  $A$  - коэффициент, не зависящий от  $T$ ;  $\Delta W$  - энергия активации примеси  $k$ - постоянная Больцмана.

В связи с тем, что подвижность  $\mu$  и множитель  $T^{3/2}$  в формуле (2.2) с температурой меняется экспоненциально в противоположные стороны, то при низких температурах экспоненциально меняются удельная проводимость полупроводника:

$$\sigma = B e^{-\Delta W/kT}, \quad (2.3)$$

где,  $B$ -величина постоянная. После логарифмирования уравнения (2.3), получим:

$$\ln \sigma = \ln B - (\Delta W/k)(1/T). \quad (2.4)$$

Зависимости  $1/T$ , в логарифмическом масштабе  $\ln \sigma$ , при низких температурах (область I на рис. 2.1) дают прямую линию, наклон которого определяется энергией активации примеси.

При повышении температуры носители тока с донорных уровней переходят в зону проводимости, при этом остается неизменной концентрация свободных электронов. Область II (рис.2.1) представляет собой область "истощенной примеси". При этом уменьшение подвижности носителей приведет к падению проводимости.

При переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости имеет место:

$$n_+ = n_- = AT^{3/2} e^{-\Delta E/2kT} \quad (2.5)$$

или графически в полулогарифмическом масштабе дает прямая (область III на рис. 2.1) с наклоном, которой связан с шириной запрещенной зоны [21].

$$\Delta E/2k = \operatorname{tg} \beta. \quad (2.6)$$

Первый терморезистор был изобретён в 1930 году Самюэлем Рубеном (Samuel Ruben) [22]. Полупроводниковые терморезисторы изготавливают из

материалов на порядки высоким коэффициентом температурного сопротивления (ТКС), по сравнению, чем у металлов и металлических сплавов.

Терморезисторы с рабочей точкой, расположенной на линейном участке ВАХ, используются для измерения температуры и компенсации параметров (напряжения или тока) электрических цепей, связанных с изменением температуры.

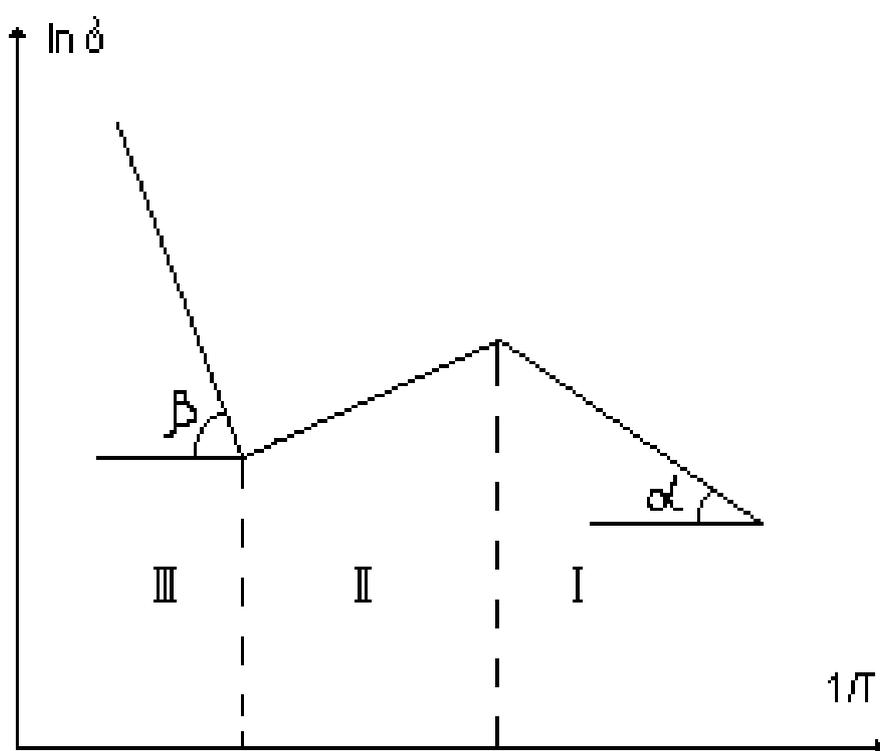


Рис. 2.1. Зависимости от температуры удельного сопротивления полупроводника с одним видом примеси.

Терморезисторы с отрицательным сопротивлением выполняют роль пусковых реле, реле времени, для измерения и контроля мощности электромагнитного излучения, и в системах теплового контроля и пожарной сигнализации. А также для регулирования расхода жидких и сыпучих сред.

На основе кремния легированного золотом изготовлены термодатчики с отрицательным ТКС на температурный диапазон (273...330) К [23]. Его

температурный коэффициент изменяется от  $-8\%/K$  при 273 К до  $-(2...3)\%/K$  при 330 К. Конструктивно термодатчик выполнен в виде параллелепипеда.

Так же созданы кремниевые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления от 0,5 до 0,7  $\%/K$ , сопротивление которых линейно изменяется. Они используются в системах охлаждения и температурной стабилизации рабочего режима транзисторов в РЭА. Зарубежными фирмами (Volvo, Siemens (Германия), Philips (Нидерланды), ITT Components Group (Великобритания), Rodan Industries Inc, Texas Instruments (США) разрабатываются и выпускается серийно термодатчики с положительным температурным коэффициентом сопротивления для различных целей. Датчики на основе кремния n-типа имеют конфигурацию в виде брусков и кубиков, меняя размеры которых получают требуемое значение сопротивления тензорезистора [24].

Рабочий диапазон датчиков из кремния n-типа находится в интервале от 223 до 423 К. Монтирование этих тензорезисторов в герметичный стеклянный корпус (фирмам Volvo, Philips) позволил повысить верхний диапазон температур до 570 К [25].

Следует отметить, что на основе кремния, разрабатываются и выпускаются различные термодатчики, работающие в широком диапазоне температур. Эти датчикам свойственны такие недостатки, как: разброс исходных сопротивлений (5...10)%, связанный с различием удельного сопротивления и размеров структуры.

А германиевые термодатчики по сравнению с кремниевым обладают высокой стабильностью параметров и преимущественно используются для низких температур. Однако, им свойственно крайне низкая стабильность и устойчивость к деформациям. Кроме того, узкая ( $E_g \approx 0,74$  эВ) [26] (ширина запрещенной зоны) германия ограничивает

температурный диапазон до  $T > (300...400)$  К теряет свои свойства термодатчика при этих температурах. Легируя германий элементами III и IV групп, в частности галлием и сурьмой, с низкими энергиями активации, можно изготавливать термометры для работы при низких температурах от 1 до 40 К с низкой погрешностью 0,005 К [27].

Еще одна категория термодатчиков, так называемые терморезисторы с косвенным нагревом. Они в корпусе одновременно содержат терморезистор и нагревательный элемент, который задает температуру терморезистора и его сопротивление. Такие термодатчики могут быть использованы как переменный резистор, управляемый напряжением, приложенным к терморезистору. Режим работы терморезисторов определяется рабочей точкой на вольт-амперной характеристике, которая зависит от прикладываемой температуры и конструкции терморезистора.

К категории резисторных структур также относятся варисторы – это полупроводниковые резисторы, сопротивление которых управляется приложенным напряжением [28]. Его токовые характеристики являются нелинейными и описывается приближенным уравнением:

$$I = BU^b, \quad (2.7)$$

где,  $B$  – постоянный коэффициент,  $b$  – коэффициент нелинейности.

Нелинейность ВАХ варистора на основе карбида кремния, обусловлена: эмиссией электронов из острых зубцов и граней кристаллов, микронагревом контактов между отдельными кристаллами, приводящими к увеличению проводимости контактов, частичным пробоем оксидных пленок на поверхности кристаллов, наличием поверхностных  $p-n$  переходов,

обусловленных различным типом электропроводности поверхности и ядра каждого кристалла.

Следует отметить, что наряду с полупроводниковыми терморезисторами, созданы также датчики деформации (тензодатчики), которые отличаются большой чувствительностью по сравнению с металлическими датчиками.

**Тензорезисторы** преобразует деформацию в электрический сигнал. Известные к настоящему времени проволочные и пленочные тензодатчики для надежного функционирования требуют компенсации температурной зависимости выходного сигнала [34]. В случае проволочных тензодатчиков для получения большого выходного сигнала увеличивают рабочее напряжение. Однако при увеличении напряжения выше допустимой чувствительность тензодатчика будет снижаться за счет разогрева.

К настоящему времени ведутся работы по получению тензодатчиков в виде резисторных структур на основе монокристаллического кремния, а также с компенсированной базовой областью: применением диффузионной технологии путем легирования примесями переходных металлов (марганец, никель и других), а также разрабатываются пленочные тензодатчики. У всех этих полупроводниковых тензодатчиков базовые области являются высокоомными, порядка  $10^4 \div 10^5$  Ом·см, и функционируют при напряжении  $5 \div 10$  В, превышение значения которого может привести к их произвольному саморазогреву и отклонению результатов измерений [35].

В резисторных датчиках улучшение одного параметра приводит к ухудшению другого параметра. Например, добавление в состав металлического тензодатчика полупроводникового материала, увеличивая его чувствительность на несколько порядков, может привести к определенной

нелинейности передаточной характеристики, что решается схемотехническим решением.

Таким образом, на основе полупроводниковых резисторных структур, подбирая параметры базовой области можно создавать датчики температуры, а также тензодатчики.

## **2.2. Датчики на основе полупроводниковых диодных структур**

Диодные датчики с выпрямляющим переходом от резисторных датчиков отличаются большей чувствительностью и быстродействием, за счет формирования временных характеристик инжектированными в базовую область неосновными носителями, концентрация носителей которых намного меньше основных носителей, что позволяет за короткое время восстановить исходное состояние (обратное сопротивление).

Необходимость использования диодных структур по новому назначению диктуется возможностью расширения их функциональных свойств. Так, использование структур с выпрямляющим *p-n*-переходом в качестве термочувствительного элемента позволяет решить проблему измерения температуры в труднодоступных местах двигателей и определить области безопасной работы мощных диодов и светодиодов.

В ряде работ [36-39] в качестве термочувствительного параметра выбрано прямое падение напряжения. Например, для образцов светодиодов с рабочими токами от 5 до 50 мА в заданном интервале температур 20÷70°C определены прямые падающие напряжения как калибровочные. На основе построенных калибровочных кривых определены зависимости между напряжением прямого смещения

и температурой  $p$ - $n$ -перехода в заданном интервале токов, рис. 2.2.

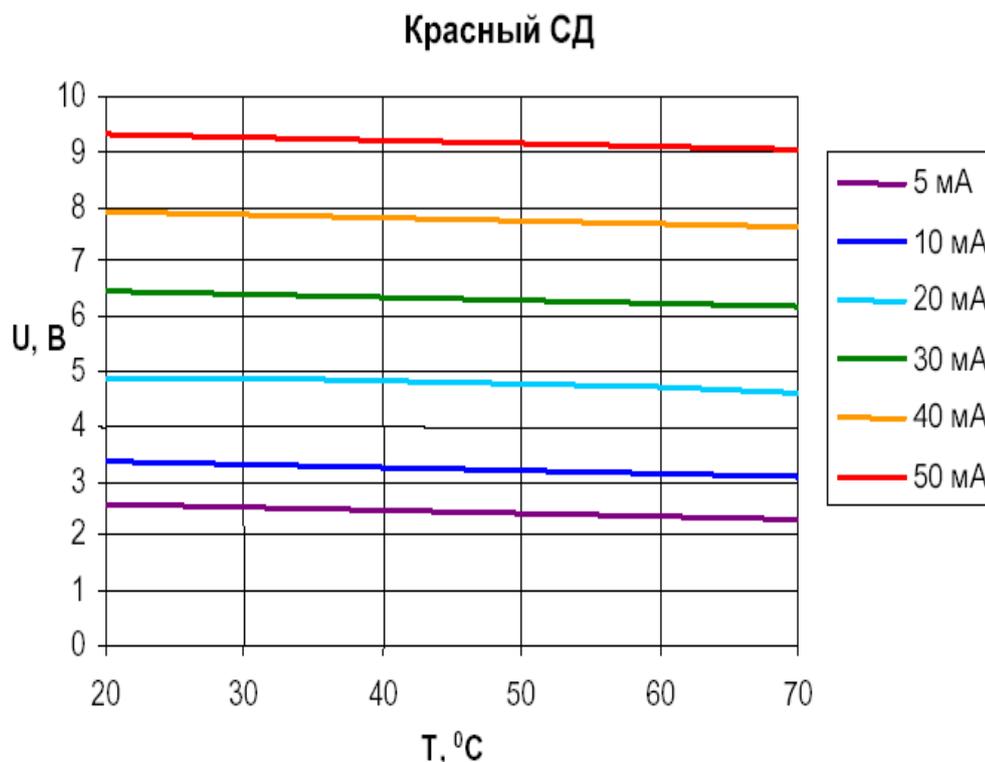


Рис. 2.2. Зависимости прямого напряжения от температуры в термостате (калибровочные кривые) [16].

Исследованием промышленных диодов типа Д220, КД522А и ГД507А [16], а также типа КД503А и КД102А в качестве датчиков температуры установлено, что в них температурный коэффициент преобразования составляет  $0.6 \div 0.7$  мВ/°C, что представляет интерес для измерения температуры электродвигателя [15]. Их большие габариты и емкости ограничивают возможность их применения в приборах автоматики, в устройствах современной измерительной техники.

В области разработки датчиков температуры на основе диодных структур с помощью Комплементарной МОП технологии изготовлены кремниевые термодиодные датчики для высоких температур до 600°C [39,40]. Они имеют малые размеры, отличаются малым потреблением энергии и широким

температурным диапазоном. В научных исследованиях и при решении технических задач возникает необходимость измерения температуры в динамическом режиме. Для этих целей приемлемыми являются диодные структуры на основе кремния. Они могут быть изготовлены в виде чипа [41,42]. В частности, кремниевые диоды, с p-n-переходом обеспечивая высокую точность измерения и совместимость с интегральной технологией, требуют малой затраты [43].

В работах [44,45] на основе нового подхода созданы высокотемпературные микросенсорные датчики температуры для газовых систем. А именно, для изготовления датчиков температуры для криогенного диапазона температур использовали тонкие кремниевые слои, то есть кремний на изоляторе. Авторы работы [46] продемонстрировали возможность использования в качестве диодного датчика температуры CMOS (КМОП) систему. Аналогично M. de Souza и другие [47] использовали тонкопленочные латеральные p-i-n-диоды в качестве датчиков температуры для криогенного диапазона (2÷600 K). Также термодатчики для температур до 573 K с линейной характеристикой получены на основе 4H-SiC p-i-n-диоде.

Японскими учеными разработаны датчики температуры на основе p-n-перехода в виде микрочипа [49], школой академика М.К. Бахадирханова на основе компенсированного кремния изготовлены термочувствительные структуры.

В работе [50-51] показано, что арсенидгаллиевые фотодиоды обладают широким спектральным диапазоном с максимумом при 800 нм. Интегральная чувствительность составляет 0.5 А/Вт, а при 300 нм равна 0.04 А/Вт. Диаметр фотоприемной площади составляет 1 мм. Быстродействие при диаметре подложки 300 мкм составляет 100 нс. Рабочий

диапазон температур находится в интервале  $-40 \div +80^\circ\text{C}$ . Основные параметры фотоприемников на основе соединений арсенида галлия представлены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1**

**Основные параметры фотоприемников с диаметром чувствительной площадки 1 мм при  $25^\circ\text{C}$**

Параметры	Фотоприемник		
	на основе GaP	на основе GaAs	на основе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$
Спектральный диапазон, нм	200-510	250-900	250-680 (740)
Длина волны в максимуме чувствительности, нм	430-440	800	550(650)
Токовая чувствительность, А/Вт: при $\lambda_{\text{max}}$ при $\lambda = 300$ нм	0,15 0,06	0,50 0,04	0,22 0,03
Монохроматический порог чувствительности при $\lambda_{\text{max}}$ , Вт·Гц <sup>-1/2</sup>	$2 \cdot 10^{-15}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$< 1 \cdot 10^{-15}$
Динамический диапазон, Вт·см <sup>2</sup>	$10^{-15} - 10^{-2}$	$10^{-12} - 10^{-5}$	$10^{-12} - 10^{-2}$
Емкость, пФ	$< 300$	$< 40$	$< 150$
Динамическое сопротивление (при 10 мВ), Ом	$> 10^{10}$	$10^8 - 10^9$	$> 10^{10}$

Таким образом, возможность использования диодных структур по новому назначению можно обеспечить и на промышленных диодах, выбором измерительного параметра, а также введением конструктивных (геометрических) изменений.

Например, выполнение диодной структуры в виде микросенсорных датчиков позволяет создать многоэлементные структуры, а уменьшение фотоприемных площадей способствует повышению частотного диапазона.

### 2.3. Универсальные датчики на основе транзисторных структур

В транзисторной структуре возможность изменения измерительного параметра позволяет управлять чувствительностью от воздействующего фактора. Автором работы [18] за счет удачного выбора измерительного параметра разработан многофунк-циональный датчик для электронных систем сбора данных, тензо, термо и фотодатчик на основе биполярного транзистора. На примере кремниевого р-п-р-транзистора получен температурный коэффициент напряжения  $2.3 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$  в диапазоне от  $-20$  до  $50/^\circ\text{С}$ , а при гидростатическом давлении  $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ мВ/кПа}$ , что больше чем в диодных структурах.

В датчиках температуры на основе транзисторов, как и на диодных структурах, также используют зависимость параметров р-п-перехода эмиттера или коллектора от температуры [20,48]. Исторически первым температура зависимым параметром был обратный ток транзисторов. Значение обратного тока р-п-перехода увеличивается с температурой по экспоненциальному закону на уровне  $10\% \cdot \text{К}^{-1}$ . Однако, температурный диапазон обратных токов, ограничивается. Максимальная температура определяется температурой теплового пробоя. Авторами работ [52,53] на основе NPN-структуры разработан температурный датчик с цифровой регистрацией на температурный диапазон от  $70$  до  $125^\circ\text{С}$ , который имеет рабочий ток порядка  $8.3 \text{ мкА}$  и падение напряжения  $1.2 \text{ В}$  при чувствительной площади  $0.1 \text{ мм}^2$ . Наибольшее распространение в качестве измерительного параметра получило использование прямых параметров переходов транзисторов [20,51]. Их преимущество заключается в линейности температурной зависимости, высокой стабильности. Обычно

для измерения температуры используется прямое напряжение на р-п-переходе при ограниченном токе. При этом температурная чувствительность составляет около  $2.5 \text{ мВ}\cdot\text{К}^{-1}$ . При повышении температуры р-п-р транзисторах падение напряжения меняет знак. Имеются случаи идентификации коэффициента усиления по току транзистора с температурой на низких и высоких частотах [20]. Однако такие приемы ограничивают возможности применения коэффициента усиления для термодатчиков. На основе транзисторов, эмиттерный переход которых используется для снятия данных, изготовлены термодатчики типа ТЭТ-1, ТЭТ-2 [20]. Первый тип предназначен для измерения температуры в автономном режиме в диапазоне  $(-10\dots+40) \text{ С}$  (с погрешностью менее  $1 \text{ К}$ , второй - в диапазоне  $(-40\dots+80) \text{ С}$  (с погрешностью порядка  $(0.3\dots2) \text{ К}$ ).

Температурные диапазоны в случае термодатчиках значительно шире, чем в при прямом назначении.

В случае базовой области с примесными уровнями ограничивается предельная температура за счет наступления собственной проводимости.

Основным недостатком рассматриваемых транзисторных термодатчиков является сложность получения идентичных параметров из-за технологического разброса концентрации носителей в объеме. Оценка влияния разброса основных параметров на точность измерения температуры в работе [54], показали, что для прямых падений напряжения для заданной температуры погрешность измерения в не более  $2$  и  $50\%$  для транзисторов с коэффициентом усиления по току  $\beta \leq 30$  и  $\beta \geq 200$  соответственно.

Результаты исследования стабильности параметров термодатчиков на транзисторах по данным в работе [40] могут составить  $(0,01\dots0,15) \text{ К}$  в первый год эксплуатации и  $(0,002\dots0,04) \text{ К}$  - во второй год

связанных с различием термического коэффициента расширения составляющих деталей транзистора.

Расширение круга датчиков различного назначения требует поиска новых типов датчиков, в том числе тензочувствительных элементов. Современные кремниевые тензочувствительные элементы с резистивным выходом составляют две группы: "монопольные" и "бипольные", в которых выходной сигнал формируется при направленном движении соответственно основных и неосновных носителей заряда.

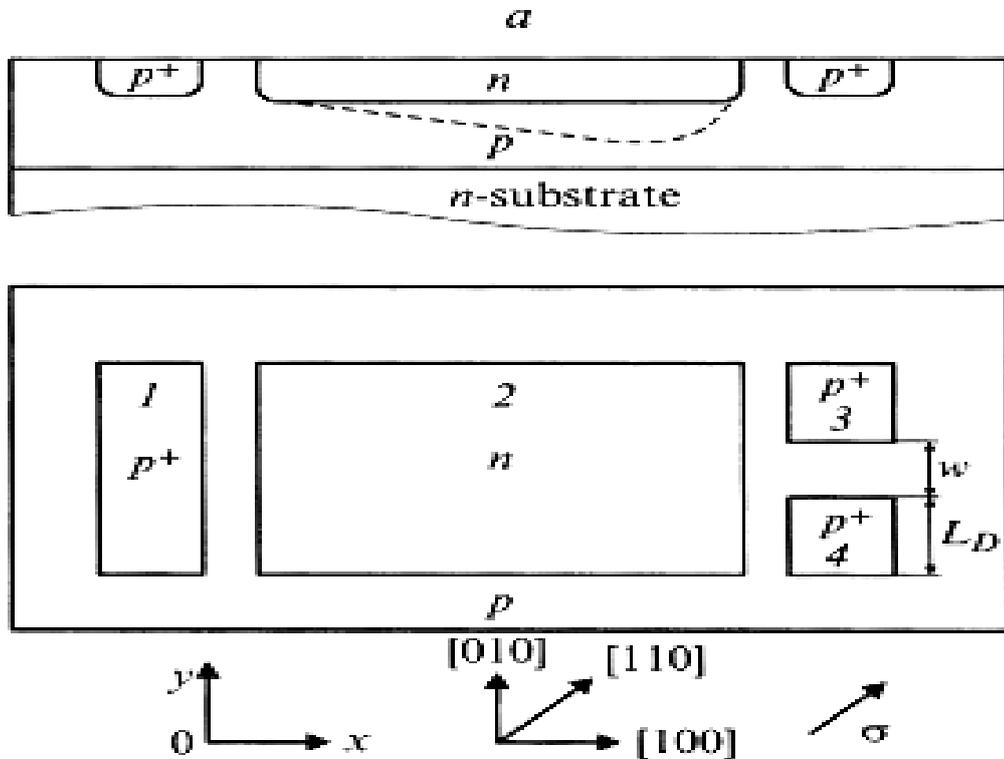
В первую категорию относятся тензорезисторные элементы на основе пьезорезистивного эффекта и на основе эффекта тензоэдс, ко второй группе относятся тензочувствительные элементы на основе бипольных тензотранзисторов [33]. Датчики с чувствительным элементом на основе бипольных тензотранзисторов обладают высоким уровнем выходного сигнала, высокой относительной чувствительностью, однако они требуют больших рабочих токов.

Малое потребление энергии при достаточно высоком уровне выходного сигнала может быть получено в тензодатчиках с чувствительным элементом на основе полевого эффекта, например, на двухстоковых полевых транзисторах [63].

На рис. 2.3. показаны геометрии р-канального полевого тензотранзистора с управляющим р-п-переходом (а) и схемы (b) включения полевых двухстоковых тензотранзисторов: р-канального обедненного МДП тензотранзистора и (рис.2.4.) [19,64].

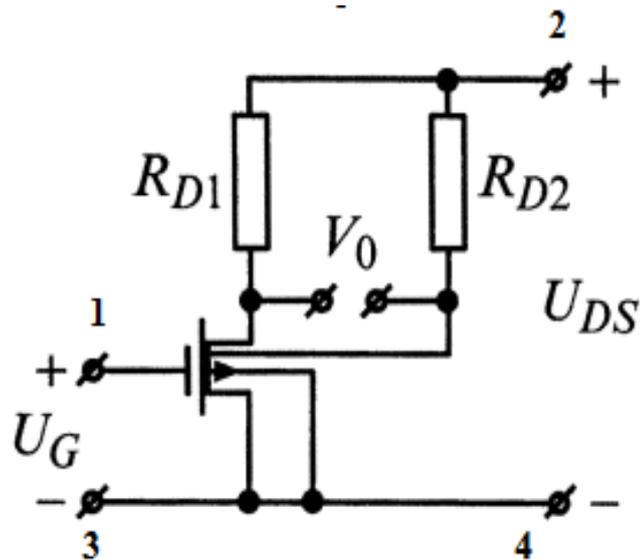
На рис. 2.5. представлены зависимости величины абсолютной и относительной чувствительностей полевых тензотранзисторов от геометрических размеров канала. Эти зависимости позволяют найти оптимальное соотношение  $L_y/L_x$ , а также ширину стоковых электродов, при которых величины  $S_R$  и  $S_A$  максимальны. Как видно, эффективность преобра-

зования и абсолютная чувствительность поразному зависят от величины отношения  $L_y/L_x$ .



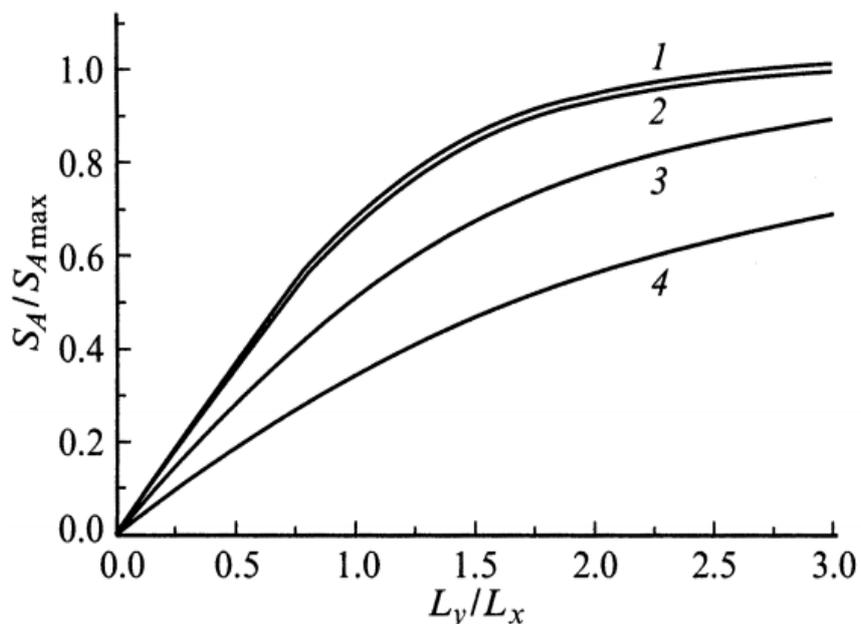
1 — исток, 2 — затвор, 3, 4 — стоки

Рис. 2.3. p-канальный полевой тензотранзистор с управляющим p-n-переходом.



1 — исток, 2 — затвор, 3, 4 — стоки

Рис. 2.4. Схема включения двухстокового полевого МДП тензотранзистора.



1 — 0.5, 2 — 0.4, 3 — 0.2, 4 — 0.1.

Рис. 2.5. Зависимость относительной чувствительности тензотранзистора от геометрических размеров канала  $L_y/L_x$ .

Интенсивные исследования ведутся также по разработке датчиков дистанционного управления технологическими процессами в различных объектах, в том числе биологических [3-6]. Первичным измеряемым параметром является температура [7,8], а датчик должен быть универсальным, и рассчитан на малое потребление энергии. Эти требования можно удовлетворить при использовании датчика на полевом транзисторе в режиме запирающего канала, когда рабочий ток будет составлять мизерные значения — обратные токи [65]. Возможности уменьшения потребляемого рабочего тока в полевом транзисторе с градиентом подвижности носителей в канале показаны в работе [66], где ток стока изменяется за счет модуляции сечения канала полем, определяемым температурной зависимостью контактной разности потенциалов  $p$ - $n$ -перехода [67].

В Узбекистане ведутся работы по получению термодатчиков в виде кремниевых терморезисторов с компенсированной базовой областью применением диффузионной технологии легирования примесями пере-ходных металлов (марганец, никель и других) [17], и путем терморационного легирования кремния [68]. У всех этих терморезисторов базовые области являются высокоомными, порядка  $10^4$ - $10^5$  Ом·см, и функционируют при напряжении 5-10 В, а сами термодатчики к измерительной системе подключаются с помощью кабеля, что приводит к потере полезного сигнала.

Делаются попытки создания термодатчиков на основе интегральных схем на комплементарных транзисторах состоящих из нескольких десятков транзисторов способных осуществлять измерение температуры различных объектов [69-71]. Однако данные интегральные термодатчики, имея низкую чувствительность, требуют питания от стабилизированного дорогого источника с малым дрейфом.

Известные диодные или транзисторные структуры в режиме запираания р-n-перехода хотя имеют высокую термочувствительность при сверхнизком потреблении мощности [49], однако они склонны к нелинейной зависимости выходного сигнала от температуры, что делает проблематичным их использование как стабильного термодатчика. Также отсутствуют сведения о способах линеаризации зависимости их выходного сигнала от температуры.

Известные к настоящему времени исследования проведены на выпрямляющих переходах диодных и транзисторных структур. Однако сведения об исследованиях, проведенных на основе полевого транзистора и механизмах управления их температурным коэффициентом, до сих пор отсутствуют.

Таким образом, **традиционный фоторезистор имеет** высокую чувствительность, самую низкую

термостабильность и самое низкое **быстродействие**, а **биполярный** фототранзистор отличается высокой чувствительностью, некоторой нелинейностью и средним **быстродействием**, при этом фотодиод с одним переходом обладает большим быстродействием и низкой чем у транзистора чувствительностью.

Применительно требуемого назначения за основу выбираются объемные кристаллические или пленочные варианты резисторных структур. В диодных и транзисторных структурах функциональный элемент – выпрямляющий р-п-переход практически определяет электрофизические свойства полупроводниковой структуры в выбранных режимах включения.

## **Глава III.**

# **Физико-технологические особенности многофункционального датчика**

- 3.1. Принципы повышения чувствительности транзисторной структуры к внешним воздействиям.
- 3.2. Обоснование выбора полевого транзистора в качестве чувствительного элемента.
- 3.3. Особенности ключевых параметров полевых транзисторов.

## **Глава III. Физико-технологические особенности многофункционального датчика**

В известной многофункциональной биполярной транзисторной структуре предложенной автором [18] за измерительный параметр, принят падающий потенциал на р-п-переходе. При этом обеспечение чувствительности структуры к внешним воздействиям, практически решено за счет конструктивных изменений. А именно за счет использования падающего на р-п-переходе биполярного транзистора потенциала обеспечена термочувствительность. Кроме того для обеспечения чувствительности к деформации введена мембрана позволяющая осуществлять локальное давление на р-п-переход эмиттера, а для приема оптического сигнала сформировано окно к эмиттерному переходу.

Однако биполярный транзистор по сравнению с полевым транзистором имеет большие токи утечки и емкости, что ограничивает его рабочие диапазоны. В отличие от него физико-технологические аспекты применения полевого транзистора остаются мало изученными. В связи с этим в данной главе рассмотрены принципы повышения чувствительности транзисторной структуры к внешним воздействиям, приведено обоснование выбора полевого транзистора в качестве чувствительного элемента, а также рассмотрены особенности ключевых параметров полевых транзисторов.

### 3.1. Принципы повышения чувствительности транзисторной структуры к внешним воздействиям

Принцип обеспечения многофункциональности структуры полевого транзистора основан на повышении эффективности модуляции канала слоем объемного заряда управляющего  $p$ - $n$ -перехода, в котором подбирается толщина модулируемой части канала сравнимой с толщиной области объемного заряда, также в зависимости от режима включения. На этой основе нами был разработан многофункциональный полупроводниковый датчик для преобразования и усиления давления, магнитного поля, радиационного, светового и теплового излучений в электрические сигналы в радио и оптоэлектронных устройствах [10]. Принцип действия многофункционального датчика основан на создании напряжения отсечки на  $p$ - $n$ -переходе между затвором и истоком. Для этого к переходу сток-затвор прикладывается рабочее напряжение с величиной большей напряжения отсечки канала. При этом объемный заряд  $p$ - $n$ -перехода охватывает весь канал, а величина напряжения на переходе затвор-исток примет неизменное значение равное напряжению отсечки.

Напряжение отсечки, фиксируемое высокоомным вольтметром, используется в качестве измерительного параметра. Например, данное напряжение отсечки соответствует первичному значению  $U_{отс}^1$ , а при изменении температуры (освещенности, давления) канала напряжение отсечки принимает новое значение  $U_{отс}^2$ . Отношение разности напряжения отсечки на воздействующий фактор представляет собой чувствительность полевого транзистора.

В частности, коэффициенты чувствительности определяются из выражений:

$$\alpha_{omc} = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (T_2 - T_1), \quad (3.1)$$

температурная чувствительность мВ/град; а фоточувствительность:

$$S = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (\Phi_2 - \Phi_1), \quad (3.2)$$

мВ/люкс или чувствительность к давлению

$$S_p = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (P_2 - P_1), \quad (3.3)$$

мВ/(гр/см<sup>2</sup>). Выбор толщины канала в предлагаемой взаимосвязи с заданной концентрацией носителей канала и толщиной области объемного заряда p<sup>+</sup>-n-перехода затвора дает оптимальное значение толщины канала и ее необедненной части сравнимой с модулируемой тепловым, световым излучением толщиной, что обеспечивает максимальную чувствительность для выбранной концентрации носителей канала.

Толщина обедненного слоя определяется выражением [14]:

$$W_{oоз} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0(U_D + U_{обр})(N_{зат} + N_{кан})}{qN_{зат}N_{кан}}}, \quad (3.4)$$

где  $U_D$  - диффузионный потенциал

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан}N_{зат}}{n_i^2} \quad (3.5)$$

В формулах (3.4) и (3.5):  $\varepsilon_0$  - диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума;  $U_{обр}$  - напряжение прикладываемое к p<sup>+</sup>-n-переходу затвора;  $N_{зат}$ , и  $N_{кан}$  - соответственно концентрации носителей низкоомной области затвора и высокоомной области

канала;  $q$  - заряд электрона;  $k$  - постоянная Больцмана;  $n_i$  - собственная концентрация носителей.

В данном случае механизм чувствительности к температуре связан с изменением контактной разности потенциалов  $p^+$ - $n$ -перехода. Так с повышением температуры контактная разность потенциалов уменьшается, увеличивая толщину проводящей части канала. В результате для его отсечки требуется тем большее напряжение, чем выше будет его температура.

Для обеспечения высокой чувствительности к деформации и к магнитному полю оптимальное соотношение ширины образца  $Z$  к длине  $L$  должна лежат в пределах  $1.25 < Z/L < 1.5$  [72.], в частности, толщина канала 1-2 мкм, ширина 40 мкм, длина 200 мкм. Эти условия экспериментально проверены на полевом тензотранзисторе. Можно полагать, что под воздействием деформации толщина канала уменьшается и для его отсечки по мере увеличения давления требуется все меньшее напряжение.

Предлагаемый многофункциональный датчик изготовлен на основе кремния. Для этого на подложке кремния  $p^+$ -типа проводимости с толщиной 200 мкм и концентрацией носителей  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  выращивался эпитаксиальный слой  $n$ -типа проводимости с концентрацией носителей  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  толщиной  $1 \div 1.5$  мкм (оптимальные значения которого приведены в таблице 2.1). Затем через окна в маске формировали контактные области из напыленного ванадия и серебра. Расстояние между стоком и истоком - длина канала равнялась 25-200 мкм. С тыльной стороны подложки формировали сплошной контакт напылением ванадия и серебра. В результате были получены приведенные полевые транзисторы.

**Таблица 3.1**

**Расчетные данные  $U_D$  и толщины канала  $a$ , мкм многофункционального датчика от концентрации носителей.**

$N_{зат}, см^{-3}$	$N_{канал}, см^{-3}$	$U_D, В$	$W_{ооз}, мкм$	$a, толщ. кан, мкм$
$1,0 \cdot 10^{19}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	0,760	2,245	3,165
$1,0 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{14}$	0,770	1,845	2,602
$1,0 \cdot 10^{19}$	$4,0 \cdot 10^{14}$	0,778	1,606	2,264
$1,0 \cdot 10^{19}$	$5,0 \cdot 10^{14}$	0,784	1,442	2,033
$1,0 \cdot 10^{19}$	$6,0 \cdot 10^{14}$	0,788	1,320	1,861
$1,0 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{14}$	0,792	1,225	1,728
$1,0 \cdot 10^{19}$	$8,0 \cdot 10^{14}$	0,796	1,148	1,620
$1,0 \cdot 10^{19}$	$9,0 \cdot 10^{14}$	0,799	1,085	1,530
$1,0 \cdot 10^{19}$	$1,0 \cdot 10^{15}$	0,802	1,031	1,454
$1,0 \cdot 10^{19}$	$2,0 \cdot 10^{15}$	0,820	0,737	1,039
$1,0 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{15}$	0,830	0,606	0,854
$1,0 \cdot 10^{19}$	$4,0 \cdot 10^{15}$	0,838	0,527	0,743
$1,0 \cdot 10^{19}$	$5,0 \cdot 10^{15}$	0,844	0,473	0,667

Испытания предложенного многофункционального датчика были проведены на кремниевых полевых транзисторах с толщиной канала  $\sim 1$  мкм и напряжением отсечки  $0.5 \div 1.0$  вольт.

Таким образом, многофункциональный датчик на основе полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом позволяет регистрировать температуру, интенсивность света, давление и по чувствительности превосходит аналогичные диодные структуры.

### **3.2. Обоснование выбора полевого транзистора в качестве чувствительного элемента**

Так как датчики температуры, оптического излучения и деформации изготавливаются на основе

резисторной, диодной и транзисторной структур, то для получения многофункционального датчика необходимо выбрать такую структуру, которая в себе сочетала бы свойства резистора, диода и транзистора. В этом плане в полевом транзисторе канал обладает свойствами резистора, а переход затвор-канал от приложенного к  $p$ - $n$ -переходу напряжения представляет собой диод, свойственные транзистору параметры входная емкость, время переключения, обратные токи имеют меньшие значения, чем в биполярном транзисторе. Режимы включения разнообразны: типичный общий исток, общий сток, общий затвор, кроме того режим запираания напряжением сток-затвор, а также режим полной отсечки канала.

В тоже время в нем должны отсутствовать свойственные резистору недостатки. Такие как нелинейность характеристики, температурная нестабильность параметров, длительность переходных процессов.

По сравнению с классическими диодами отличаться малыми обратными токами и емкостью.

Как транзисторная структура обладать высокими коэффициентами чувствительности, температурной стабильностью параметров. Следует отметить, что каждый из режимов включения полевого транзистора придает ему свойства резистора, диода и транзистора.

Следовательно, кроме прямого назначения – выпрямления и усиления электрических сигналов, полевой транзистор можно использовать по новому назначению для измерения температуры и при соответствующем подборе параметров базовой области для измерения светового излучения и другого воздействия.

Особое отличие полевого транзистора состоит в том, что на непокрытую контактным материалом базовую (канальную) область управляющего  $p$ - $n$ -перехода можно осуществить непосредственно

воздействие. В зависимости от напряжения отсечки канала толщина базы может иметь различные значения. Что важно для проведения сопоставительного анализа полученных данных согласно режимам включения. Сам р-n-переход можно включить в диодном режиме и использовать как датчик температуры или в качестве фотодиода.

Для создания многофункционального датчика полевой транзистор предлагается включать в режиме отсечки канала, а в качестве измерительного параметра предлагается использовать напряжение отсечки [10, 73,74]. В данном режиме внешнее воздействие (температура, свет, давление) будет приводить к изменению толщины проводящей части канала слоем объёмного заряда затвора, что в свою очередь приведет к соответствующему изменению напряжения отсечки, который идентифицируется с воздействующим фактором (температура, свет, давление). Этому принципу соответствует предлагаемый многофункциональный датчик.

Под многофункциональностью подразумевается, например, возможность регистрации теплового и светового излучения, преобразование магнитного поля, радиационного, светового и теплового излучений в электрические сигналы одним полупроводниковым элементом. То есть один элемент полевой транзистор используется для различных целей. Столь широкие функциональные возможности полевого транзистора связаны с возможностями его различными режимами включений, придающими ему новые свойства, которые нельзя реализовать в обычных режимах включения.

В отличие от него биполярный транзистор можно включать как диод и транзистор [75,76]. Так, в диодном режиме он может выполнять функции измерителя температуры, давления, света и т.д. за

счет использования в качестве измерительного параметра плавающего потенциала эмиттера.

Полевой транзистор по физике управляется электрическим полем, создаваемым управляющим р-п-переходом. В нем более чувствительной областью является канал, рис. 3.1.

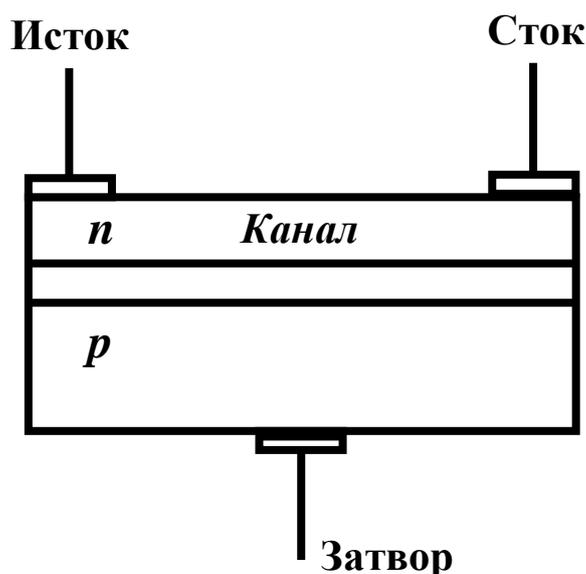


Рис. 3.1. Геометрия полевого транзистора

Особенность конструкции полевого транзистора такова, что он может быть включен в режиме диода образуемого между затвором и каналом или в транзисторном режиме. То есть питающим напряжением между стоком и истоком, а также запирающим напряжением между затвором и истоком. Для заданного типа полевого транзистора в зависимости от задаваемой толщины канала будет изменяться величина напряжения отсечки канала.

Что же касается режимов включения, то он может быть включен: как резистор при подаче напряжения между истоком и стоком; как диод с питанием между затвором и истоком: как полевой транзистор с напряжением питания канала и затвора; а также в режиме запираения напряжением сток-затвор.

Улучшение тех или иных свойств определяется конкретными физико-технологическими параметрами транзисторной структуры, удачным сочетанием геометрических размеров с электрофизическими параметрами.

Известные полевые транзисторы с р-п-переходом [77], содержат низкоомную подложку первого типа с нижним электродом затвора, эпитаксиальный высокоомный слой второго типа со сформированными на ее поверхности омическими контактными областями стока и истока. Толщина канала независимо от типономинала имеет широкий разброс от 0.6 до 3 мкм, а напряжение отсечки от 0.5 до 3.0 вольт [78]. Транзистор имеет типичные триодные сублинейные вольтамперные характеристики.

Недостатками этого типа транзистора являются наличие  $p^+-n^+$ -переходов между затворной областью и областями стока и истока, что приводит к увеличению токов утечки затвора и снижению коэффициентов чувствительности.

Кроме того, превалирующая односторонняя способность усиливать электрические сигналы и противоречивый характер его температурно-чувствительных свойств ограничивает область его применения. То есть, при малых напряжениях на затворе ток стока с температурой уменьшается, а при напряжениях близких к отсечке канала ток стока - увеличивается. Для придания одностороннего характера и однозначной температурной чувствительности параметры полевого транзистора необходимо корректировать в сторону уменьшения напряжения отсечки.

В известном кремниевом полевом транзисторе с р-п-переходом типа КП102 с каналом р-типа ток насыщения составляет  $I_{сн} = 0.18 \div 6$  мА, крутизна  $S = 0.25 \div 0.7$  мА/В, напряжение отсечки при токе стока 20 мкА составляет  $2.8 \div 10$  В, рабочее напряжение сток - исток до 15 В [79].

Недостатками этого транзистора являются неоптимизированность толщины канала, высокие значения напряжения отсечки (больше 2.8 В) непригодность для приема световых сигналов. Сравнительно низкое значение выходного динамического сопротивления, за счет положительного градиента примесей в канале, полученного диффузией легирующей примеси и на 20-30% большее значение напряжения отсечки канала по сравнению с эпитаксиальными структурами, разброс параметров связанный с технологическими условиями.

Это указывает на то, что канал сравнительно толстый, а напряжение отсечки в четыре и более раза больше диффузионного потенциала. Изменение сечения канала от температуры определяемое контактной разностью потенциалов  $p-n$ -перехода по сравнению с общей толщиной канала очень мало. То есть, изменение его сечения с температурой на фоне общей толщины мало различим. Следовательно, он в качестве датчика температуры с высокой чувствительностью не может быть использован. Также он не может быть использован в качестве фотоприемника.

В соответствии с физикой работы полевого транзистора напряжение отсечки есть напряжение на затворе (затвор-исток), при котором ток стока будет равен нулю. Но его невозможно точно измерить, так как при этом будет течь большой ток через переход сток-затвор. Поэтому в паспортных данных за напряжение отсечки берется напряжение на затворе при токе стока равном 20 мкА, а для реальной отсечки канала придется прилагать большее напряжение.

Известно, что от температуры ток стока уменьшается максимум на 10%, то есть ток стока не может быть использован в качестве измерительного параметра. Точно также в качестве измерительного параметра невозможно использовать коэффициент усиления при классических режимах включения:

общей исток, общей сток, общий затвор. При этом коэффициенты усиления доходят от одного до десяти, максимум до двадцати. Данная работа нацелена на получение большой чувствительности и стабильности по температуре в отличие от диодов, используемых в прямом смещении как датчики температуры ( $2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ ). Этому основанием служит возможность включения полевого транзистора в диодном режиме.

Что касается напряжения отсечки, определяемого классическим способом, то он дает приближенные значения [80]. В отличие от него предложенный ранее Ведлоком способ определения напряжения отсечки дает значения с высокой точностью [81], так как он позволяет напрямую измерять напряжение, падающее на переходе затвор-исток в режиме запираения перехода сток-затвор имеющего большее значение напряжения. В полевом транзисторе-аналоге напряжение отсечки канала имеет большие значения (больше  $2.8 \text{ В}$ ), поэтому необходимо выбрать полевые транзисторы с параметрами, позволяющими, по крайней мере, определить температуру. Для этого толщина канала должна модулироваться за счет изменения контактной разности потенциала от температуры. То есть, для получения максимального изменения параметров канала толщина ее непокрытой части должна быть сравнима с толщиной модулируемой температурой. Тогда напряжение отсечки, определяемое данным методом, можно будет использовать в качестве измерительного параметра. То есть напряжение (отсечки) порядка одного вольта можно измерить со вторым, третьим знаком точности. При этом от внешнего воздействия будем иметь изменение толщины проводящей части канала слоем объёмного заряда затвора. На этом принципе основано действие предлагаемого многофункционального датчика.

### 3.3. Особенности ключевых параметров полевых транзисторов

Ключевыми параметрами полевого транзистора являются, динамическое сопротивление канала (стока), ток стока в режиме запираения, напряжение запираения (отсечки), напряжение пробоя.

Исследования статических характеристик полевого транзистора осуществляются в схеме с общим истоком. Рабочее напряжение прикладывается между стоком и истоком, а запирающее к переходу исток-затвор. Путем увеличения запирающего напряжения до отсечки создается семейство выходных стоковых характеристик.

Как приведено на рис. 3.2 от приложенного напряжения между стоком и истоком ток стока увеличивается, приобретая насыщающийся характер. При нулевом смещении на затворе ток стока имеет максимальное значение и по мере увеличения запирающего напряжения затвора канал охватывается областью объемного заряда, уменьшая толщину непокрытой части канала. При достижении напряжения отсечки ток стока становится минимальным.

Зависимости тока стока от запирающего напряжения формируют передаточную характеристику (рис.3.2, левый квадрант), где его наклон отражает крутизну:

$$S = \frac{I_{2cu} - I_{1cu}}{U_{2zu} - U_{1zu}} = \frac{\Delta I_{cu}}{\Delta U_{zu}} . \quad (3.6)$$

Выходное динамическое сопротивление определяется из наклона стоковой характеристики

$$R_{дин}^{cu} = \frac{U_{2cu} - U_{1cu}}{I_{2cu} - I_{1cu}} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} . \quad (3.7)$$

Характеристика перехода затвор – исток, то есть

p-n-перехода подобна характеристикам полупроводникового диода, рис. 3.3. При этом зависимости прямого тока от напряжения затвора носят экспоненциальный характер. В области напряжений до 0.5В ток минимален и далее при напряжениях свыше 0.65В ток линейно возрастает.

Динамическое сопротивление канала определяет усилительные свойства полевого транзистора и степень стабилизации тока в режиме ограничителя, который представляет собой отношение приращения напряжения стока к приращению тока стока [82]:

$$r_{дин} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} \Big|_{U_{зи} = const} . \quad (3.8)$$

Для полевого транзистора с напряжением отсечки 0.6В и током стока 580 мкА (рис. 3.2) динамическое сопротивление при нулевом смещении составляет 164 кОм и по мере увеличения запирающего напряжения до 0.4В его величина увеличивается до 625 кОм.

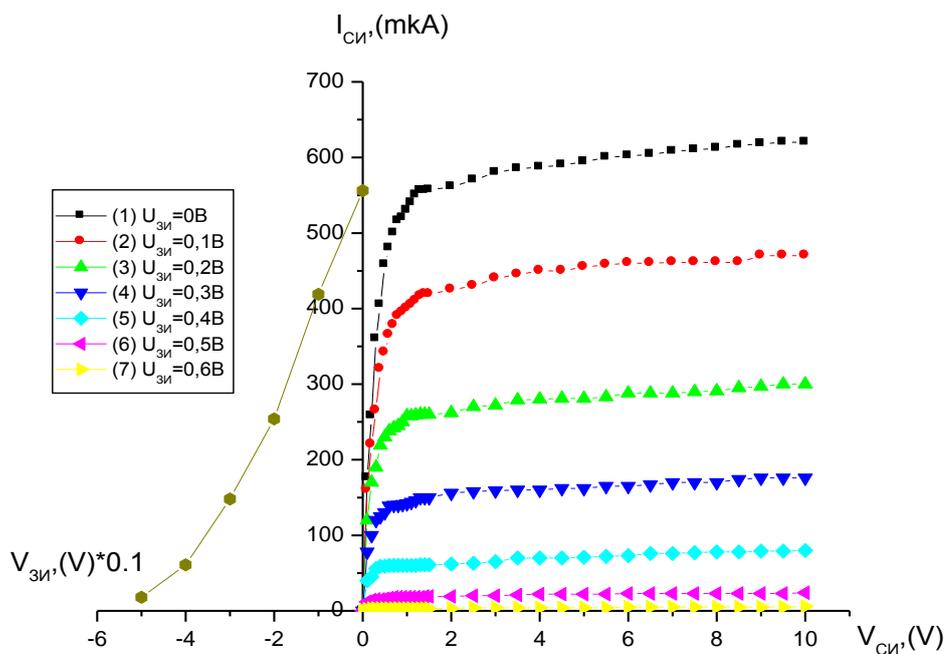


Рис. 3.2. Передаточная и стоковая вольтамперные характеристики полевого транзистора.

Как будет показано ниже его коэффициент усиления будет улучшаться с увеличением запирающего напряжения за счет увеличения выходного сопротивления.

Соответственно, чем выше будет динамическое сопротивление, тем выше будет уровень сигнала, поскольку выходное сопротивление усилительной схемы определяется сопротивлением нагрузки  $R_H$  и динамическим сопротивлением стока  $R_{дин}$ , как параллельно включенные [81]:

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_D R_H}{R_D + R_H} \quad (3.9)$$

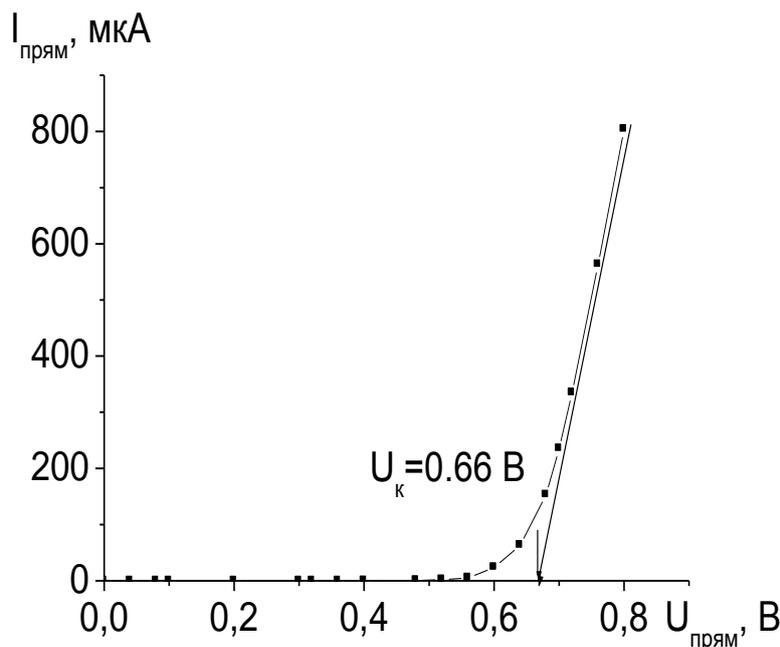


Рис. 3.3. Прямая ветвь вольтамперной характеристики перехода затвора полевого транзистора.

Коэффициент усиления по напряжению равен:

$$K_H = \frac{S_{МАКС} R_D R_H}{R_D + R_H} = \frac{\mu R_H}{R_D + R_H}, \quad (3.10)$$

где  $\mu$  - собственный коэффициент усиления транзистора по напряжению.

$$\mu = S_{\text{МАКС}} \cdot R_{\text{Д}} . \quad (3.11)$$

Обычно собственный коэффициент усиления полевого транзистора рассчитывается из статических стоковых вольтамперных характеристик как произведение статической крутизны на сопротивление нагрузки или выходное сопротивление. Темновой ток затвора должен быть как можно малым в пределах пико-наноампер, тогда регистрируемый полезный сигнал будет на уровне десятков наноампер. Напряжение отсечки должно быть порядка контактной разности потенциалов выпрямляющего р-п-перехода, то есть в пределах 0.5-1.0 В. Если напряжение отсечки принимаем на уровне 1.0 В, тогда по расчетным данным [83] его приращение от внешнего воздействия будет определяться с учетом контактной разности потенциалов:

$$U_{\text{отс}} = \frac{N_{\text{кан}} q a^2}{2 \varepsilon_0} \left( 1 + \frac{N_{\text{кан}}}{N_{\text{зат}}} \right) - U_{\text{к}} , \quad (3.12)$$

где  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона;  $a$  - толщина канала;  $\varepsilon_0 = 8.84 \cdot 10^{-14}$  Ф/см-диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon = 11$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника - базы,  $n_i$  - собственная концентрация носителей материала базы. Для одного из полевых транзисторов с напряжением отсечки 0.6 В и током стока 580 мкА (рис. 3.2.) принимая значение напряжения отсечки  $U_{\text{отс}} = 2U_{\text{Д}}$ , по экспериментально расчетным данным, определяемого выражением по (3.4) формуле как приведено в таблице 3.2 при нулевом смещении имеем толщину объемного заряда равную 0,65 мкм с контактной разностью потенциалов 0.61 В. Тогда для напряжения отсечки 0.61 В  $x2 = 1.22$  В или для запирающего канал

обратного напряжения  $U_{обр}=0.6$  В имеем толщину  $W_{003}=0.90$  мкм. То есть при увеличении напряжения в два раза область объемного заряда увеличивается в  $\sqrt{2}$  раза, что соответствует оптимальной толщине канала.

Таблица 3.2

**Данные толщины слоя объемного заряда от обратного напряжения**

$U_{обр},$ В	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,3	1,6
$W_{003},$ МКМ	0,65	0,70	0,74	0,83	0,90	0,97	1,04	1,13	1,22

Для данного полевого транзистора напряжение отсечки (0.6В) канала практически совпадает с контактной разностью потенциалов, что обеспечивает однозначное изменение толщины канала от внешнего воздействия.

Именно полевой транзистор с низким напряжением отсечки представляет интерес также для использования в качестве датчика температуры в режиме ограничения прямого тока [80-84], в которых пропусканием фиксированного прямого тока через  $p-n$ -переход, регистрируют падающее напряжение, которое линейно меняется с изменением температуры.

Однако еще больший практический интерес представляет, возможность использования температурной зависимости обратного тока запираемого перехода для измерения температуры.

## **Глава IV.**

# **Электрофизические параметры полевого транзистора при воздействии температуры**

- 4.1. Температурные свойства полевого транзистора в диодном режиме включения.
- 4.2. Температурные свойства полевого транзистора в режиме ограничения токов.
- 4.3. Температурная зависимость напряжения отсечки.
- 4.4. Особенности температурной чувствительности транзисторной структуры в двухполюсном режиме.

## Глава IV. Электрофизические параметры полевого транзистора при воздействии температуры

За счет придания линейной зависимости, чувствительным к внешним воздействиям, параметрам диодной или транзисторной структуры, путем подбора режима включения создаются условия для их применения по новому назначению. Например, существование линейной зависимости между фотонапряжением и интенсивностью излучения позволяют использовать фотоэлементы в приборах, применяемых для измерения освещенности [85,86], в том числе в качестве датчиков, реагирующих на изменение интенсивности света; в приборах автоматики; в измерительной и вычислительной технике; и в других устройствах современной техники [87-90]. Возможность возбуждения избыточных носителей в  $p-n$ -переходе не только светом [91], но и ионизирующим излучением: быстрыми электронами, альфа частицами, гамма лучами делают возможным применение приборов на основе  $p-n$ -перехода в качестве индикаторов радиоактивного излучения [92,93] или для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую.

### 4.1. Температурные свойства полевого транзистора в диодном режиме включения

Несмотря на то, что полевой транзистор работает в режиме запирающих переходов входная характеристика отдельно взятого перехода затвор-исток совпадает с характеристикой диодного  $p-n$ -перехода [94,95]. При этом в режиме отсечки канала превращается в обратно включенные диоды. Поэтому полевой транзистор можно рассматривать как диод с

отсекаемой слоем объемного заряда базой, что до сих пор остается малоизученным, в особенности в новых приложениях как фотоприемник, датчик температуры [17]. Для этого рассмотрим его входные вольтамперные характеристики.

От приложенного напряжения прямой ток р-п-перехода увеличивается экспоненциально. Основные носители диффундируя через переход границы раздела становятся неосновными и далее рекомбинируют с основными носителями другой области, и ток через переход поддерживается постоянным за счет поступления электронов из внешней цепи в п-область и уходом их из р-области во внешнюю цепь. При этом происходит инжекция носителей через р-п-переход в базовую область, где эти носители являются неосновными. В п область инжектируются дырки, а из п области, в дырочную-электроны.

При подаче прямого напряжения на переход затвор-исток ток экспоненциально будет увеличиваться:

$$I_{np} = I_0 \exp \frac{qV}{nkT} , \quad (4.1)$$

переходя на линейную зависимость, рис. 4.1.

Коэффициент не идеальности равен 1.82, что указывает на механизм токопереноса связанный с генерацией носителей в области объемного заряда [14]. В режиме запираания р-п-перехода обратный ток до напряжений 1.0 В возрастает и затем выходит на насыщение с током  $2 \cdot 10^{-9}$  А. То есть, протекает очень маленький ток, обусловленный перебросом

(экстракцией) неосновных носителей под действием электрического поля. Этот ток является дрейфовым и представляет собой обратный ток  $p$ - $n$ -перехода.

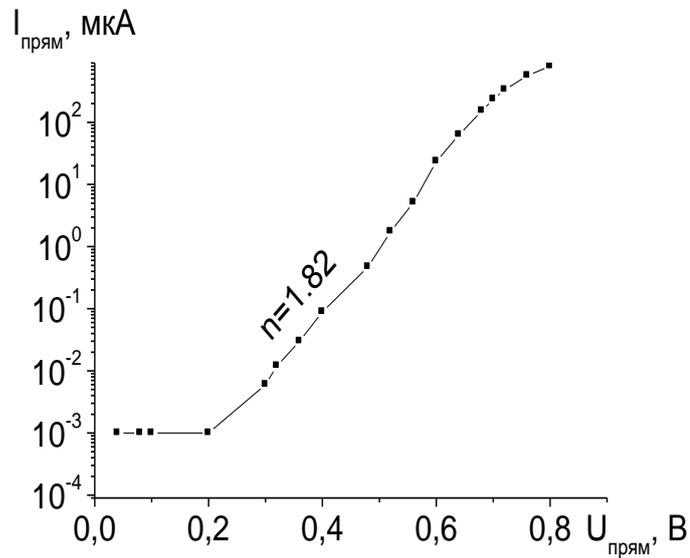


Рис. 4.1. Прямая ветвь вольтамперной характеристики затвора в полулогарифмическом масштабе.

Расчет вольтамперной характеристики в предположении генерационного механизма свойственного  $p$ - $n$ -переходам на основе полупроводников типа кремния и арсенида галлия осуществляется с помощью формулы приведенной в работе [14]:

$$I_{ген} = \frac{n_i S_{p-n}}{\tau} \left( \sqrt{\frac{q \varepsilon_0}{2 N_{кан}}} \right) \cdot \sqrt{U_D + U_{обр}}, \quad (4.2)$$

где  $n_i$  - собственная концентрация носителей;  $S_{p-n}$  - площадь  $p$ - $n$ -перехода затвора;  $\tau$  - время жизни неосновных носителей  $p$ - $n$ -перехода. Результаты расчета (рис. 4.2, кривая 1) и экспериментальные данные (рис. 4.2, кривая 2). отличаются. В соответствии с экспериментальной кривой-2 в области напряжений от 1 до 10 В обратный ток не зависит от

величины запирающего напряжения, что объясняется диффузионно-дрейфовым механизмом токопереноса.

Исследования вольтамперных характеристик перехода затвор-исток показывают, что они отличаются в прямом направлении малыми токами продолжающихся до 0.55 В и затем сравнительно резко переходящих на рост тока. В обратном направлении участок роста тока расположен в узком диапазоне до 1.0 В и далее выходит на насыщение с малыми токами порядка 2 нА. Это обстоятельство создает условия для работы в режиме прямого смещения.

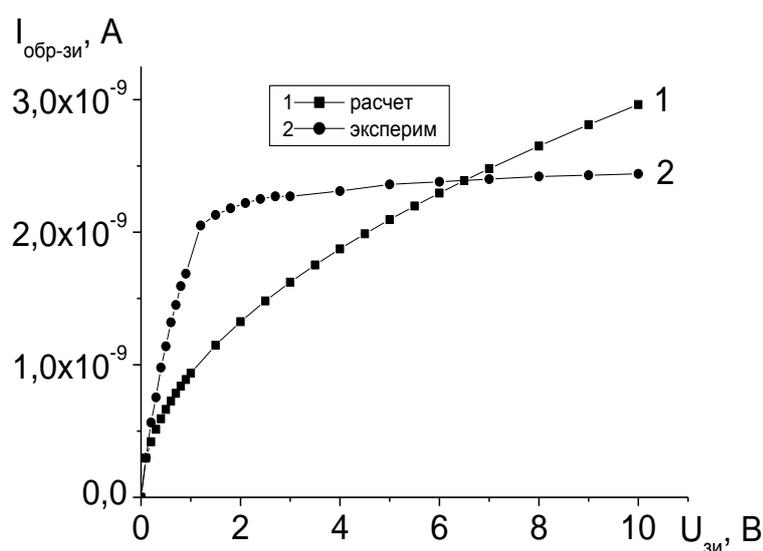


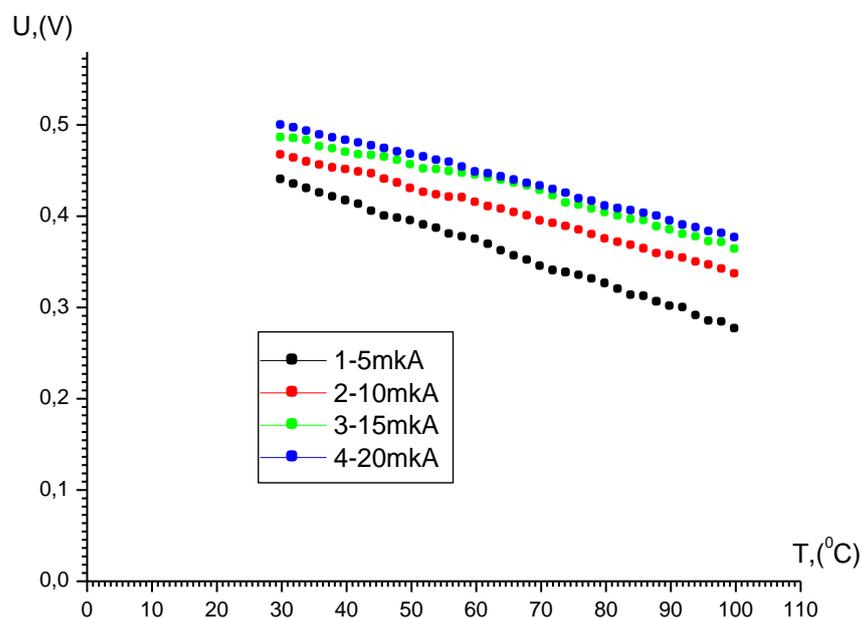
Рис. 4.2. Зависимость обратного тока от запирающего напряжения полевого транзистора.

Увеличение температуры в режиме прямого смещения приводит к смещению вольтамперной характеристики в область меньших напряжений. Для заданного тока ограничения, например 10 мкА, создаваемого ограничителем тока на полевом транзисторе, температурный коэффициент представляет собой отношение разницы падающих напряжений на разность температур:

$$\alpha = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad (4.3)$$

В измеренном интервале температур от -90 до +60 градусов Цельсия имеем падение напряжения от 0.85 В до 0.51 В для разности температур 150 градусов, соответственно температурный коэффициент напряжения составляет 0.0023 В, то есть 2.3 мВ/град, что в два и более раза больше чем в диодных структурах. Как видно из рис. 4.3 данные значения температурного коэффициента остаются неизменными в интервале токов от 5 до 10 мкА.

Температурные коэффициенты чувствительности по мере увеличения рабочего тока от 5 мкА до 20 мкА уменьшаются от 2.33 мВ/°С до 1.76 мВ/°С, рис. 4.3.



- 1 -  $U_{пр}=0,439$  В,  $I_{пр}=5$  мкА,  $\tau =2,33$  мВ/°С
- 2-  $U_{пр}=0,467$  В,  $I_{пр}=10$  мкА,  $\tau =1,86$  мВ/°С
- 3-  $U_{пр}=0,485$  В,  $I_{пр}=15$  мкА,  $\tau =1,75$  мВ/°С;
- 4-  $U_{пр}=0,499$  В,  $I_{пр}=20$  мкА,  $\tau =1,76$  мВ/°С;

Рис. 4.3. Зависимости падения напряжения от температуры при различных рабочих токах.

Такая тенденция связана с увеличением прямого дифференциального сопротивления с повышением температуры. Наиболее оптимальным током для использования исследуемого полевого транзистора в качестве датчика температуры является интервал токов  $5 \div 10$  мкА, рис. 4.4. Таким образом, в режиме ограничения прямого тока полевой транзистор с  $p-n$ -переходом обладает температурной чувствительностью определяемой процессом формирования тока и в определенной степени уровнем инжекции носителей. Полученное значение температурной чувствительности напряжения прямого смещения не уступает значениям, имеющим место в диодных структурах, а миниатюрная конструкция полевого транзистора позволяет использовать его для определения температуры в узких зазорах различных устройств и оборудования.

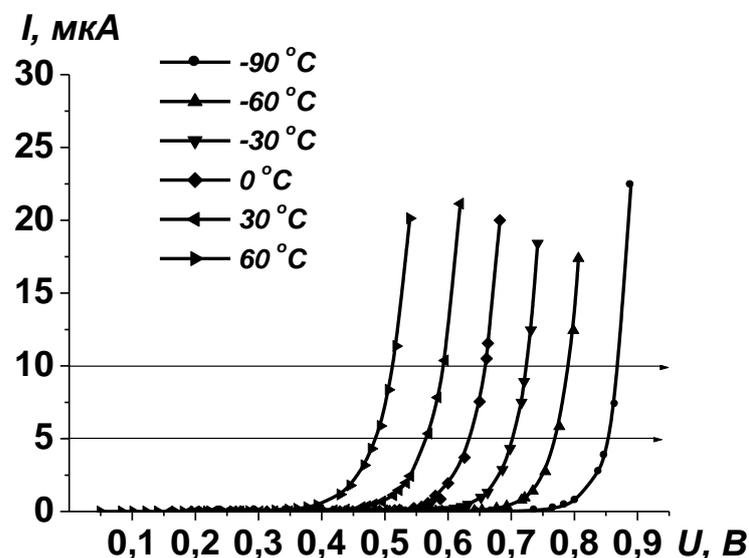


Рис. 4.4. Прямая ветвь вольтамперной характеристики  $p-n$ -перехода затвор-канал полевого транзистора.

## 4.2. Температурные свойства полевого транзистора в режиме ограничения токов

Известные к настоящему времени исследования проведены на выпрямляющих диодах и биполярных транзисторах. На основе исследования полупроводниковых диодов типа КД503А и КД102А установлено, что в них температурный коэффициент крутизны преобразования составляет  $0.6 \div 0.7$  мВ/°С и их можно использовать в качестве преобразователя температуры электродвигателя [16]. В другой работе [15] в качестве датчика температуры предлагается использовать *p-n*-переходы промышленных диодов типа Д220, КД522А и ГД507А. Однако эти диоды имеют большие габариты и емкость, что ограничивает возможность их применения в приборах автоматики, в устройствах современной измерительной техники. Наилучшие показатели температурного коэффициента на основе полупроводниковых диодов и дискретном биполярном транзисторе составляют  $2.3 \div 2.6$  мВ/°С [17].

Однако сведения об исследованиях, проведенных на основе полевого транзистора, и механизмах управления температурным коэффициентом их параметров до сих пор отсутствуют. Также малоисследованными остаются возможности использования полевого транзистора по новому назначению при нетрадиционных режимах включения. В качестве термочувствительного параметра принято изменение величины прямого смещения, падающее на переходе затвор-исток, как показано на схеме рис. 4.5.

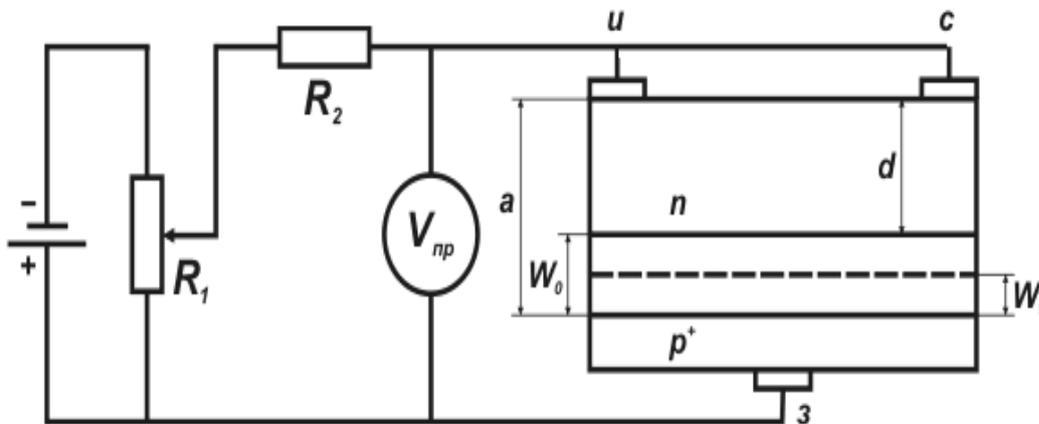
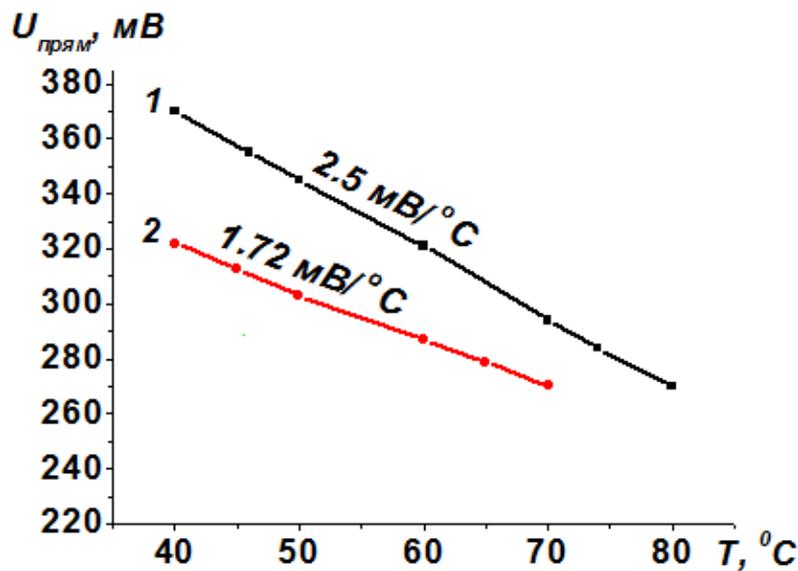


Рис. 4.5. Схема измерения термочувствительного параметра перехода затвор-исток.

Величина рабочего напряжения регулируется резистором  $R_1$ , а ток через выпрямляющий переход ограничивается резистором  $R_2$ . Отличие полевого транзистора от диодных и биполярных транзисторных структур состоит в том, что толщина базовой области (канала) имеет фиксированное значение, а концентрация носителей в затворной области ( $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) на два-три порядка выше по сравнению, чем в канальной области ( $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), что гарантирует резкость  $p$ - $n$ -перехода.

На рис. 4.6 приведены зависимости падающего напряжения при различных напряжениях питания диода через сопротивление  $R_2$  - ограничитель тока. Кривая 1 получена на образце с напряжением отсечки 1.2 В при напряжении питания 4.9 В, а кривая 2 при напряжении питания 2.3 В. Кривая 3 получена на образце с напряжением отсечки 2.2 В при напряжении питания 4.9 В.



1 – напряжение отсечки 1.2 В и напряжение питания 4.9 В;  
 2 – напряжение отсечки 1.2 В и напряжение питания 2.3 В;

Рис. 4.6. Зависимости прямого падающего напряжения диодно-включенного полевого транзистора от температуры.

Как видно из рис. 4.6 при одинаковых напряжениях питания (4.9 В) температурные коэффициенты падающего напряжения (кривые 1 и 3) имеют одинаковые значения  $\alpha=2.5$  мВ/°C, а уменьшение напряжения питания приводит к снижению температурной чувствительности. При этом величина падающего напряжения больше в образце с меньшим напряжением отсечки (кривая 1).

Наблюдаемое различие температурных коэффициентов можно объяснить на основе механизма токопереноса через  $p-n$ -переход затвора описываемого выражением [14]:

$$I_{\text{прям}}^{\text{const}} = I_{\text{нас}} (\exp(qU_{p-n}/nkT) - 1). \quad (4.4)$$

Сохранение неизменности тока через структуру приводит к зависимости падающего напряжения от температуры. Соответственно:

$$nkT = \frac{qU_{p-n}}{\ln\left(\frac{I_{\text{прям}}^{\text{const}}}{I_{\text{нас}}} + 1\right)}. \quad (4.5)$$

Согласно формулы (4.5) изменение отношения прямого тока к обратному создаваемое путем изменения величины напряжения смещения на  $p-n$ -переходе приведет к различию температурных коэффициентов  $\alpha = (U_{\text{прям}}^{T_2} - U_{\text{прям}}^{T_1}) / (T_2 - T_1)$  (рис. 4.6, кривые 1 и 2).

В частности, при уменьшении напряжения смещения температурный коэффициент  $\alpha$  уменьшается от 2.5 мВ/°С до 1.72 мВ/°С. Соответственно уменьшаются токи рекомбинации. При этом, так как прямой ток ограничен и имеет фиксированное значение  $I_{\text{прям}}^{\text{const}} = I_{\text{огр}}$ , то напряжение, падающее на  $p-n$  переходе  $U_{p-n}$ , будет изменяться пропорционально температуре диодно-включенного полевого транзистора.

По величине прилагаемое (положительное) напряжение будет равно диффузионному (отрицательного знака) потенциалу  $p-n$ -перехода затвора  $U_d$  определяемого заданной температурой [14]:

$$U_d = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{кан}} N_{\text{зат}}}{n_i^2}, \quad (4.6)$$

уменьшение, которого обусловлено с увеличением собственной концентрации носителей  $n_i$  с повышением температуры [96].

Отличие полевого транзистора от диода заключается в фиксированности значения толщины базовой области – канала, что способствует охвату базовой области слоем объемного заряда в режиме запираения. То есть, в режиме прямого смещения тоже имеем процессы, обусловленные рекомбинацией носителей в конкретной базовой области. В обычном

диоде толщина базы не ограничена и относительно  $p$ - $n$ -перехода создает последовательное сопротивление, что из-за дополнительного падения напряжения на нем при изменении рекомбинационных токов ослабляет чувствительность структуры по отношению к контактной разности потенциалов. Применительно к полевому транзистору в случае толщины базовой области определяемой величиной контактной разности потенциалов позволило бы добиться максимальной температурной чувствительности. Соответственно, при использовании материала с большей (шириной запрещенной зоны) величиной контактной разности потенциалов точность измерения будет возрастать и одновременно повысится температурный коэффициент.

В связи с тем, что прямой ток через  $p$ - $n$ -переход задается ограниченным ( $I_{\text{прям}}^{\text{const}}$ ), то увеличение температуры приводит к уменьшению падающего напряжения. При этом изменение соотношения прямого тока к току насыщения обеспечивает управляемое изменение температурного коэффициента (см. формулу 4.6). При этом появляется возможность идентификации температурных коэффициентов из набора образцов.

Таким образом, в режиме ограничения прямого тока полевой транзистор с  $p$ - $n$ -переходом обладает температурной чувствительностью определяемой механизмом токопереноса и управляемым уровнем инжекции носителей. Полученное значение температурной чувствительности прямого падающего напряжения (2.5 мВ/°С) не уступает значениям, имеющим место в диодных и транзисторных структурах, а миниатюрная конструкция полевого транзистора позволяет использовать его для определения температуры в узких зазорах различных

устройств и оборудования. Сравнение температурных коэффициентов напряжения отсечки с температурным коэффициентом падающего напряжения указывает на то, что в обоих случаях они связаны с величиной напряжения отсечки. В режиме прямого смещения температурный коэффициент определяется отношением прямого тока к обратному, то есть ее величина управляема. При этом в образцах с меньшим напряжением отсечки падающее напряжение имеет большее значение, что повышает точность измерения.

Таким образом, температурные коэффициенты полевого транзистора обратно пропорционально связаны с толщиной базовой области и они физически управляемы. В режиме ограничения прямого тока полевой транзистор с  $p$ - $n$ -переходом обладает температурной чувствительностью определяемой процессом формирования тока и в определенной степени уровнем инжекции носителей.

### **4.3. Температурная зависимость напряжения отсечки**

Электрическая схема включения полевого транзистора для измерения падения напряжения на переходе исток-затвор приведена на рис. 4.7. Рабочее напряжение с блока питания, к которому подключен первый вольтметр, через микроамперметр подается к переходу сток-затвор. При этом потенциал, создаваемый на переходе исток-затвор, фиксируется вторым вольтметром. По мере увеличения напряжения на стоке, до достижения отсечки канала, падение напряжения на истоке линейно увеличивается и, с наступлением момента отсечки канала слоем объемного заряда, становится равным напряжению отсечки и далее в рабочем режиме сохраняется на этом уровне. При заданном рабочем напряжении (2 В и 4 В) воздействие на канал какого-либо фактора

(давления, света или температуры), приводит к изменению потенциала на переходе исток-затвор, который идентифицируется как измерительный параметр. При этом относительно рабочего напряжения переход затвор-канал, можно сказать, включен в диодном режиме, или при подсветке он действует аналогично фотодиоду.

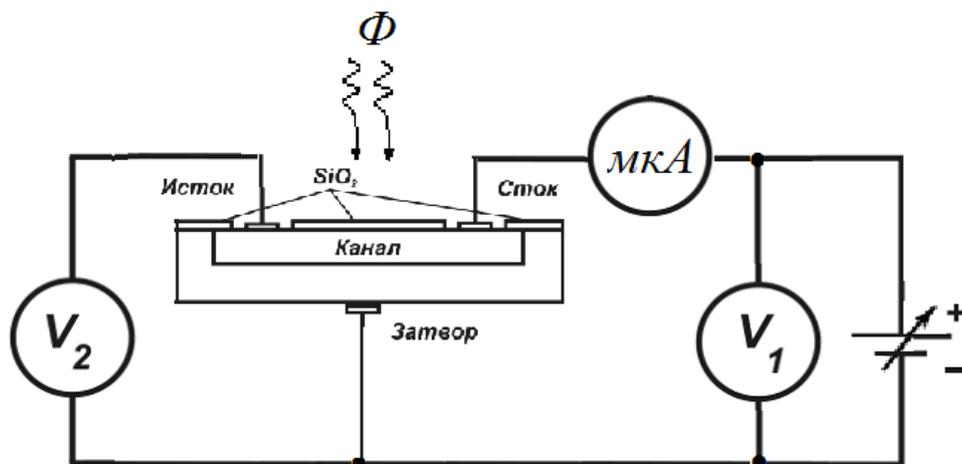


Рис. 4.7. Схема измерения падения напряжения на переходе исток-затвор в режиме запирания канала напряжением сток-затвор

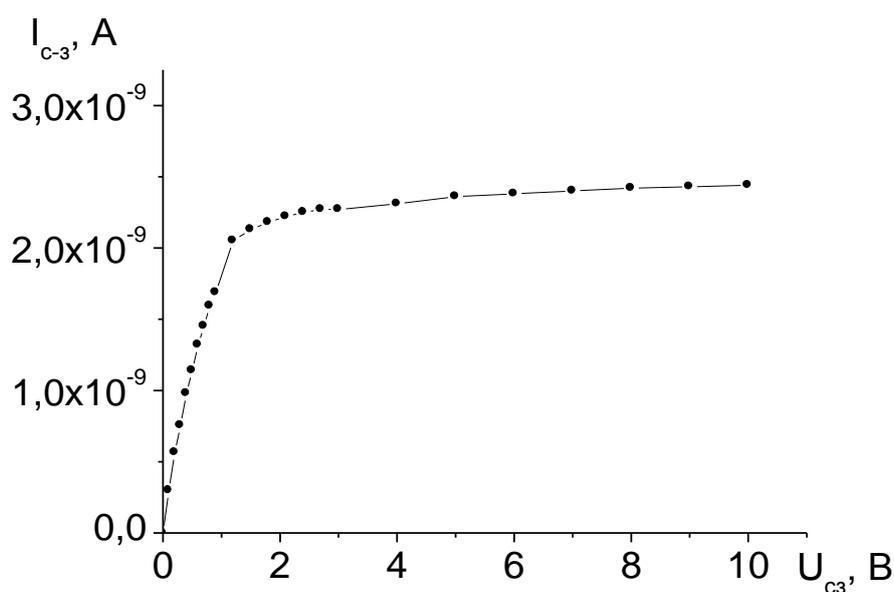


Рис. 4.8. Зависимости тока стока от напряжения сток-затвор.

Однако он принципиально отличается от фотодиода. Так, в предлагаемом рабочем режиме запирания канала напряжение на переходе сток-затвор в два и более раза больше, чем на переходе исток-затвор. В случае, когда вывод истока замкнут со стоком (диодный режим) он превращается в диод с тонкой базой.

В режиме запирания канала напряжением сток-затвор ток стока выходит на насыщение, имея низкие значения (нА), столь незначительное значение рабочего тока практически не будет оказывать влияния на генерируемый от подсветки канала фототок (рис. 4.8).

Исследования показали, что повышение температуры (рис. 4.9) приводит к увеличению напряжения отсечки с температурным коэффициентом напряжения отсечки (мВ/°С):

$$\alpha_{omc} = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (T_2 - T_1). \quad (4.7)$$

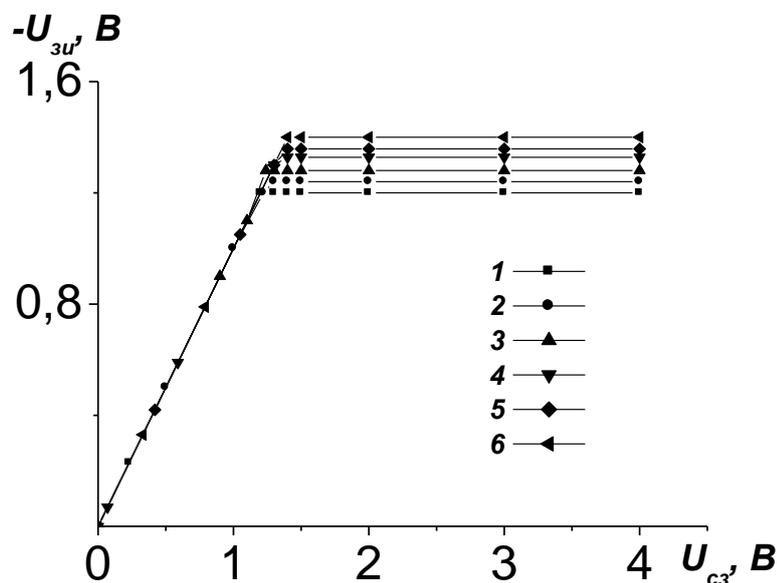


Рис.4.9. Зависимости напряжения затвор-исток от напряжения сток-затвор 1-20 °С, 2-40, 3-50, 4-60, 5-70, 6-80 °С.

Полученное значение температурного коэффициента (2.3 мВ/град) в два раза больше по сравнению, чем в заводских диодных структурах (рис. 4.10).

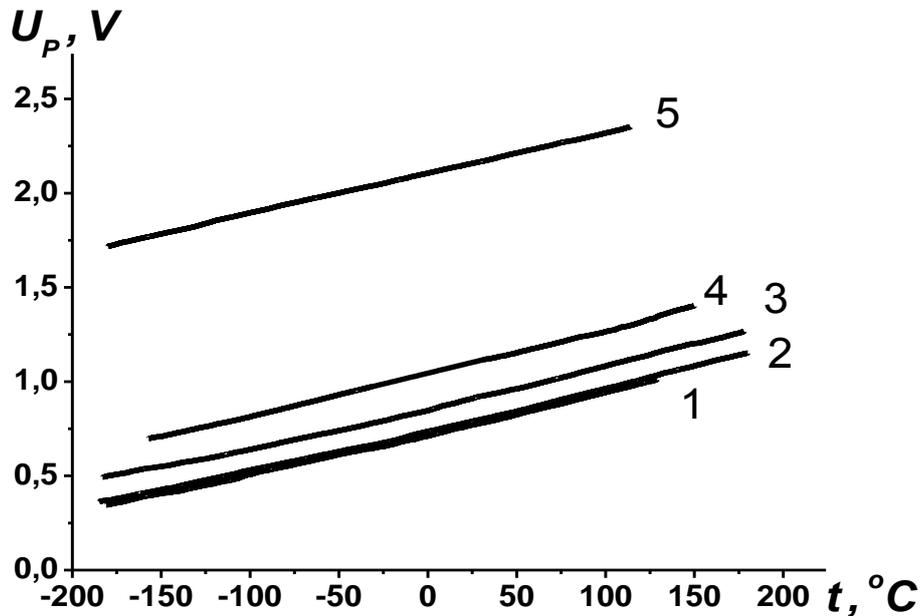


Рис.4.10. Зависимости напряжения отсечки канала полевых транзисторов от температуры с различными технологическими параметрами.

Наблюдаемое увеличение напряжения отсечки канала с температурой можно связать с уменьшением контактной разности потенциалов  $p$ - $n$ -перехода, обусловленной увеличением собственной концентрации носителей при повышении температуры

В результате исходная толщина области объемного заряда для  $U_{зи} = 0$  уменьшится

$$W_{ооз} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 U_d (N_{кан} + N_{зат})}{q \cdot N_{кан} \cdot N_{зат}}}, \quad (4.8)$$

а емкость  $p$ - $n$ -перехода увеличится:

$$C_{p-n} = \frac{\varepsilon_0 A}{W_{ooz}}, \quad (4.9)$$

что приведет к увеличению толщины проводящей части канала:

$$U_D = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан} N_{зам}}{n_i^2}, \quad (4.10)$$

$$\Delta d = a - W_{ooz}. \quad (4.11)$$

Поэтому для отсечки канала требуется еще большее запирающее напряжение  $U_{обр}$ .

$$U_{отс} = \frac{N_{кан} q a^2}{2\varepsilon_0} \left( 1 + \frac{N_{кан}}{N_{зам}} \right) = U_{обр} + U_D. \quad (4.12)$$

В данном режиме исследуемый полевой транзистор обладает температурной чувствительностью, не уступающей чувствительности диодным структурам, но с тем преимуществом, что практически не потребляет энергии. При этом температурный коэффициент напряжения отсечки

$$\alpha_{отс} = (U_{отс}^2 - U_{отс}^1) / (T_2 - T_1), \quad (4.13)$$

составляет 2.2 мВ/градус, что находится на уровне значений имеющих место в диодных структурах в режиме ограничения прямого тока  $\sim 10$  мА [97].

Экспериментально показано, что температурный коэффициент чувствительности полевого транзистора в режиме отсечки канала обусловлен процессом прироста толщины базы от температуры и подчиняется одному и тому же закону для всех полевых транзисторов независимо от технологических параметров транзисторной структуры.

#### **4.4. Особенности температурной чувствительности транзисторной структуры в двухполюсном режиме**

Представляет интерес проведение аналогичных исследований в качестве датчика температуры германиевого биполярного транзистора при различных режимах включения, так как он содержит два выпрямляющих перехода  $(+)p-n-p^+(-)$ . А технологии получения каждого перехода отличаются, что позволит получить новые данные по его применению в качестве датчика температуры. Выбор германиевой структуры обусловлен тем, что в отличие от кремниевой она обладает большей температурной чувствительностью, что позволяет обеспечить высокую точность измерения и регулирования температуры.

Как известно в транзисторной  $p-n-p^+$ -структуре  $p-n$ -переход (коллектор-база) имеет большую площадь, чем  $n-p^+$ -переход (база-эмиттер) и протекающий через него ток из-за малой плотности не вызывает дополнительного разогрева перехода, что способствует стабильности температурных характеристик. На основе измерения температурной зависимости вольтамперной характеристики для выбранного режима включения перехода определяются коэффициенты температурной чувствительности полупроводниковой структуры.

На рис. 4.11 и 4.12 приведены экспериментальные зависимости тока от прямого и запирающего напряжения перехода база - коллектор германиевого транзистора. В режиме прямого смещения перехода база-коллектор с повышением температуры прямая

ветвь смещается параллельно в область меньших напряжений.

Зависимость тока от напряжения описывается экспоненциальной функцией [14]:

$$I_{p-n} = I_0 \exp \frac{qU}{nkT}, \quad (4.14)$$

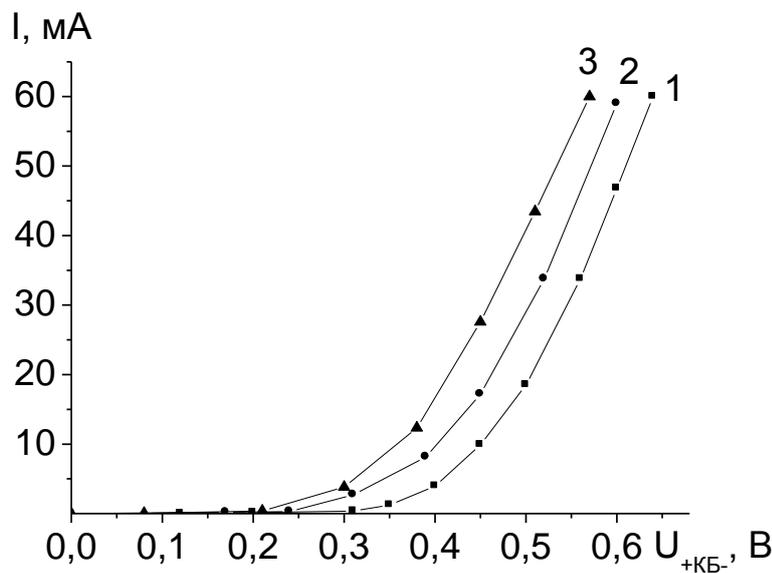


Рис. 4.11. Зависимости тока от напряжения в режиме прямого смещения перехода коллектор-база при различных температурах:  
1  $-20^\circ\text{C}$ , 2  $-40^\circ\text{C}$ , 3  $-60^\circ\text{C}$ .

с показателем экспоненты -  $n$  равным единице, что обусловлено рекомбинацией носителей в толще базовой области. С повышением температуры ток насыщения  $I_0$  растет быстрее, по сравнению со снижением экспоненты из-за увеличения теплового потенциала  $\varphi_T = kT/q$ . В результате противоположного влияния этих двух факторов входные характеристики транзистора, для выбранных токов  $I_\Delta$ , смещаются влево на величину  $\Delta U \approx (1 \div 2)$  мВ (рис. 4.11). При этом можно заметить, что в исследуемом транзисторе для

заданного фиксированного тока температурный коэффициент напряжения,

$$\alpha_U = \frac{U_1 - U_2}{\Delta T} \quad (4.15)$$

как и в диодных структурах, составляет 2 мВ/град. В этом режиме фиксированный рабочий ток необходимо выбирать больше 7 мА, где температурная чувствительность падения напряжения на переходе база-коллектор принимает неизменные значения. В частности, при этих токах с повышением температуры падение напряжения линейно уменьшается, что подтверждает возможность его использования в качестве параметра для измерения температуры.

В режиме запирания р-п-перехода коллектор-база для заданной температуры с увеличением напряжения ток остается неизменным (рис. 4.12), а по мере повышения температуры значение тока увеличивается с возрастающим токовым температурным коэффициентом

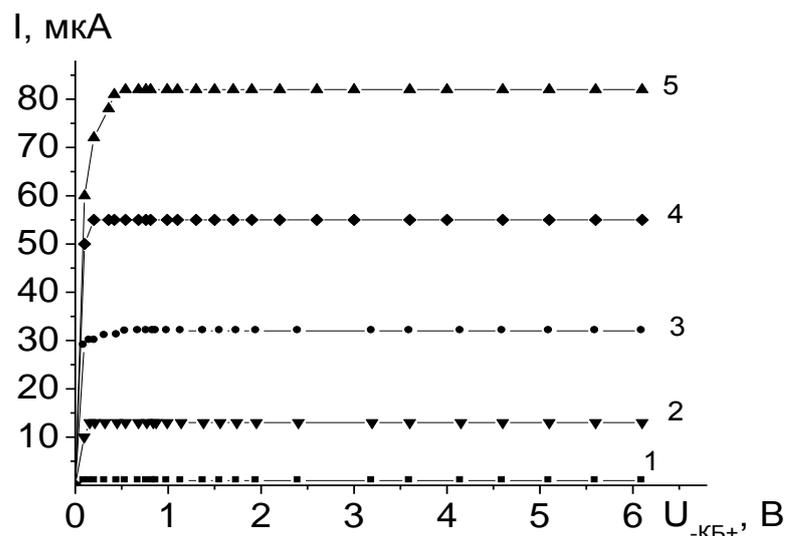


Рис. 4.12. Зависимости тока от напряжения в режиме запирания перехода коллектор-база при различных температурах:  
1 -20°C, 2 -30°C, 3 -40°C, 4 -50°C, 5 -60°C.

$$\alpha_I = \frac{I_2 - I_1}{\Delta T} . \quad (4.16)$$

Следовательно, обратный ток коллектора также можно использовать в качестве измерительного параметра. Результаты расчета значений температурного коэффициента, полученные на основе, приведенных на рис. 4.13, данных для заданных интервалов температур, приведены в табл. 4.1.

**Таблица 4.1**

**Данные токового температурного коэффициента  
перехода коллектор-база.**

Интервал температуры, °С	20-30	30-40	40-50	50-60
$\alpha_I$ , мкА/град	1.2	1.9	2.3	2.7

Как видно из таблицы токовый температурный коэффициент запираемого перехода с повышением температуры от 20 до 60°С увеличивается с 1.2 мкА/град до 2.7 мкА/град.

При использовании отдельно взятого запираемого коллекторного р-п-перехода для измерения коэффициента температурной чувствительности рабочее напряжение целесообразно задавать от генератора напряжения. В данном случае при уменьшении рабочего напряжения от 6 до 1 вольта чувствительность практически остается неизменной. Кроме того в данном режиме он может функционировать от автономного источника питания с малым потреблением энергии (мкА вместо мА).

В двухполюсном режиме включения (+)р-п-р<sup>-</sup>(-) транзистора с плавающей (свободной) базой по мере запираания эмиттера формируется обратная вольтамперная характеристика эмиттерного перехода, рис. 4.13.

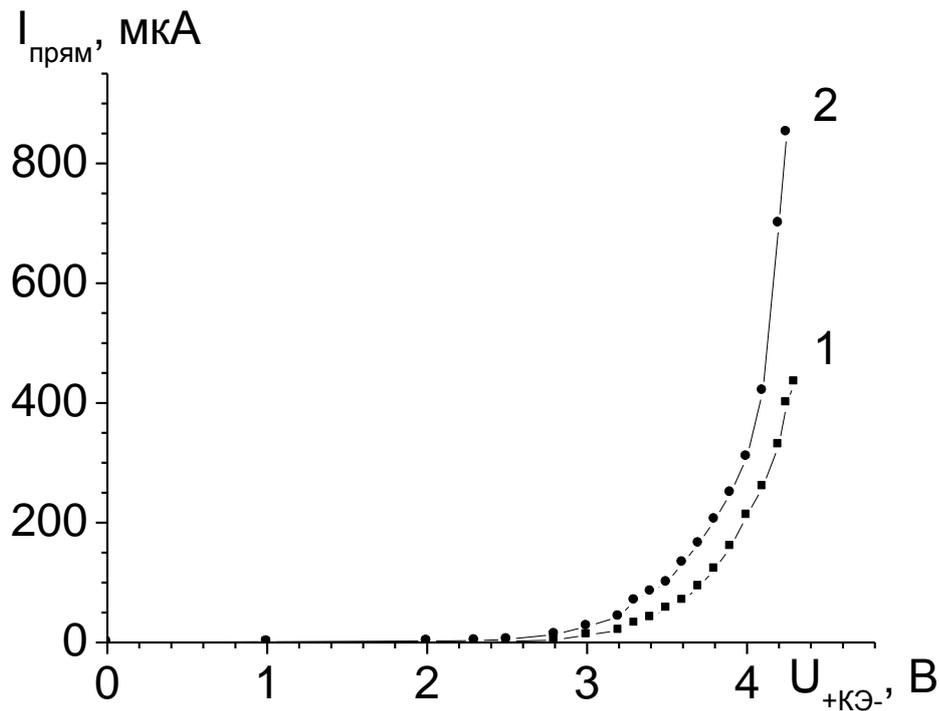


Рис. 4.13. Зависимости тока от напряжения в двухполюсном режиме включения (+)p-n-p<sup>-</sup>(-) с плавающей (свободной) базой при запираии эмиттерного перехода: 1 -30°C, 2 -50°C.

С повышением температуры вольтамперная характеристика смещается в область меньших напряжений, что связано с туннельными процессами в предпробойной области. Температурный коэффициент напряжения при ограниченном токе в интервале 200÷400 мкА составляет 10 мВ/град, что в пять раз больше температурной чувствительности по сравнению с режимом прямого смещения отдельно взятого перехода база-коллектор, рис. 4.12. То есть, в данном случае для получения температурной чувствительности 10 мВ/град требуется на два порядка меньший рабочий ток [9].

При смене полярности рабочего напряжения ((-)p-n-p<sup>+</sup>(+)) в режиме запираии коллекторного перехода (рис. 4.14) при 30°C ток коллектора при малых напряжениях (менее 0.5В) достигает максимального

значения и далее с увеличением напряжения возрастает незначительно. Однако при увеличении температуры до 50°C зависимость тока от напряжения приобретает линейно нарастающий характер. Соответственно, по сравнению с режимом запираания отдельно взятого перехода база-коллектор (рис. 4.12) режим запираания коллекторного перехода при двухполюсном режиме включения обеспечивает большую температурную чувствительность, управляемую рабочим напряжением.

Напряжения, падающие на нагрузочном сопротивлении при различных температурах ( $T_1$  и  $T_2$ ) равны:

$$U_{R_H}^{T_1} = I_1 \cdot R_H, \quad (4.17)$$

$$U_{R_H}^{T_2} = I_2 \cdot R_H. \quad (4.18)$$

При этом напряжения, падающие на эмиттере при различных температурах ( $T_1$  и  $T_2$ ) будут равны:

$$U_1^{T_1} = E_{num} - I_1 \cdot R_H, \quad (4.19)$$

$$U_2^{T_2} = E_{num} - I_2 \cdot R_H. \quad (4.20)$$

Разность напряжения будет представлять собой

$$\Delta U = U_1^{T_1} - U_2^{T_2}, \quad (4.21)$$

или температурная чувствительность будет равна

$$\alpha_U = \frac{U_1^{T_1} - U_2^{T_2}}{T_2 - T_1}. \quad (4.22)$$

Наблюдаемое на рис. 4.13 нарастание рабочего тока (-)р-п-р<sup>+</sup>(+)-структуры можно объяснить тем, что коэффициент передачи тока зависит от напряжения коллектор-эмиттер и увеличивается с повышением температуры, благодаря возрастающему количеству генерируемых в коллекторном переходе носителей [85]. При этом сопротивление эмиттерного перехода

становится более чувствительным к воздействию температуры, а сопротивление коллекторного перехода к запирающему напряжению.

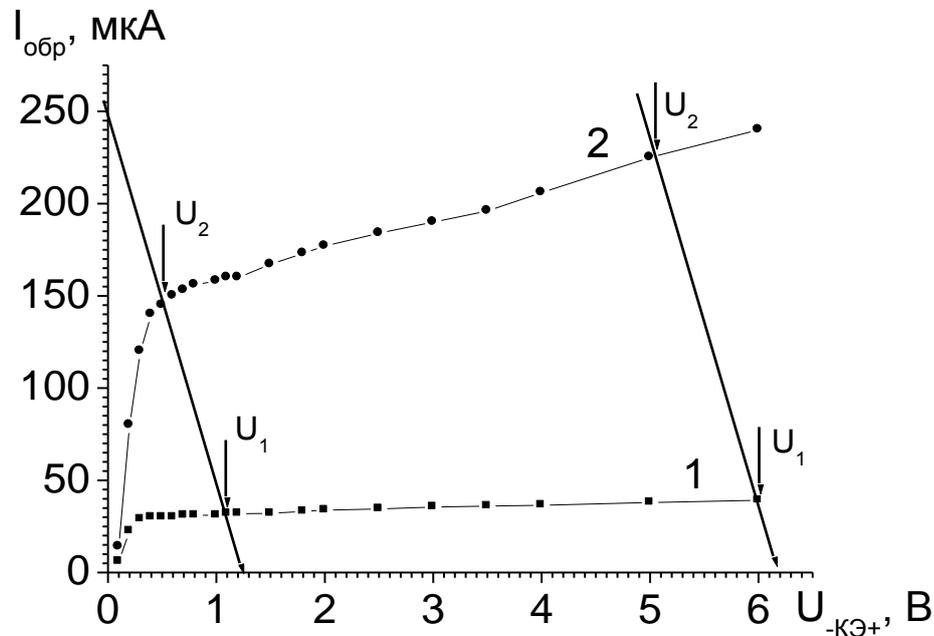


Рис. 4.14. Зависимости тока от напряжения в двухполюсном режиме включения (-)р-n-p<sup>+</sup>(+) с плавающей (свободной) базой при запираении коллекторного перехода: 1 -30 °С, 2 -50 °С.

При фиксированном рабочем напряжении коллекторный переход, находясь в режиме запираения, выступает в роли ограничителя тока (рис.4.13), а напряжение, падающее на эмиттерном переходе (эмиттер-база) с повышением температуры линейно уменьшается. Эти процессы совместно формируют вольтамперную характеристику двухполюсника с плавающей базой в режиме запираения коллекторного перехода (рис. 4.14). При питании транзисторной структуры от источника напряжения с нагрузочным сопротивлением в эмиттере 5 кОм по мере повышения напряжения падающего на эмиттерном переходе от

1.0 В до 6.0 В температурный коэффициент напряжения ( $\alpha_U$ ) увеличивается с 25 мВ/град до 50 мВ/град, что связано с возрастающим характером рабочего тока от напряжения. В частности, с учетом напряжения, падающего на нагрузочном сопротивлении рабочее напряжение можно выбирать в интервале от 2 до 7 В.

Таким образом, транзисторная (-)p-n-p^(+)-структура при двухполюсном режиме включения обладает высокой температурной чувствительностью и малым рабочим током в отличие от отдельно взятого диодного включения. Такие датчики представляют интерес для применения в авиационной, автомобильной и в других отраслях промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в мире в бурно развивающейся области физики полупроводников одному из перспективных направлений расширению функциональных свойств (чувствительности к давлению, световому и тепловому излучениям) полупроводниковых датчиков используемых по новому назначению уделяется особое внимание. В этом аспекте установление особенностей чувствительности к внешним воздействиям полевого транзистора в режиме отсечки канала является одним из важных задач.

Анализ состояния исследований в области термочувствительных датчиков показало, что с использованием современных полупроводниковых интегральных датчиков можно реализовать измерения температуры в диапазоне от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  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.

Транзисторная (-)p-n-p<sup>+</sup>(+)-структура при двухполюсном режиме включения обладает высокой температурной чувствительностью и малым рабочим током в отличие от отдельно взятого диодного включения. Такие датчики представляют интерес для применения в авиационной, автомобильной и в других отраслях промышленности.

Именно полевой транзистор с низким напряжением отсечки представляет интерес также для использования в качестве датчика температуры в режиме ограничения прямого тока, в которых пропусканием фиксированного прямого тока через p-n-переход, регистрируют падающее напряжение, которое линейно меняется с изменением температуры.

Для данного полевого транзистора напряжение отсечки (0.6В) канала практически совпадает с контактной разностью потенциалов, что обеспечивает

однозначное изменение толщины канала от внешнего воздействия.

Выявлено отличие  $p$ - $n$ -перехода затвора от классического диодного перехода, то есть они имеют меньшее дифференциальное сопротивление и влияние сопротивления базы на падение напряжения исключается. Именно, исходя из этих позиций, в качестве датчиков выбраны, не диффузионные, а эпитаксиальные структуры.

Определены оптимальные значения толщины канала в зависимости от толщины области объемного заряда  $p^+$ - $n$ -перехода затвора и концентрации носителей обеспечивающие высокую чувствительность.

Выявлено, что в зависимости от режимов включения полевого транзистора, его фотоэлектрические и температурные характеристики меняются существенным образом. Преимущественно, они используются для измерения температуры, однако практически остается неизученной возможность использования температурной зависимости обратного тока запираемого перехода для измерения температуры или светового излучения.

Установлено, что температурная чувствительность полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом в режиме ограничения прямого тока определяется процессами формирования тока и в определенной степени уровнем инжекции носителей.

Найдено, что с повышением температуры увеличение напряжения отсечки канала объясняется уменьшением контактной разности потенциалов  $p$ - $n$ -перехода за счет увеличения собственной концентрации носителей.

Установлено, что температурный коэффициент чувствительности полевого транзистора в режиме отсечки канала обусловлен процессом прироста толщины базы от температуры и подчиняется одному и тому же закону для всех полевых транзисторов независимо от технологических параметров транзисторной структуры.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галилей Г. Пробирных дел мастер – М., 1987.
2. Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в) М.: Высш. Шк., 1989.
3. Keikhosrokiani P., Zakaria N., Mustaffa N., Wan T.-Ch., Sarwar M.I., Azimi K. Wireless Networks in Mobile Healthcare // in the book “Mobile Health”, ed. S. Adibi. Springer, 2015. – PP. 687-726.
4. Jeong Gil Ko, Chenyang Lu. Wireless Sensor Networks for Healthcare // Proceedings of the IEEE, 2010. – Vol.98, No.11. – PP. 1947-1960.
5. Furtado H., Trobec R. Applications of wireless sensors in medicine / MIPRO 2011, Proceedings of the 34th International Convention, Croatia, 2011, May 23-27. – PP. 257-261.
6. El-Radhi A.S., Barry W. Thermometry in pediatrics practice // Archives of disease in childhood, 2006. – Vol. 91. – PP. 351-356.
7. Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A. Review of temperature measurement // Review of Scientific Instruments, 2000. – Vol. 71, No. 8. – PP. 2959-2978. <http://www.ngpedia.ru/id510302p1.html>
8. Mansoor M., Haneefa I., Akhtara S., De Lucac A., Udrea F. Silicon diode temperature sensors – A review of applications // Sensors and Actuators A: Physical, 2015. – Vol. 232. – PP. 63–74.
9. Karimov A.V., Dzhuraev D.R., Kuliev Sh.M., Turaev A.A. Distinctive features of the temperature sensitivity of a transistor structure in a bipolar mode of measurement // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016. – Vol. 89, No. 2. – PP. 514-517.
10. Патент РУз № IAP 05120 «Многофункциональный датчик на основе полевого транзистора» / Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Джураев Д.Р., Тураев А.А. Бюл. № 11 от 30.11.2015.
11. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulhaev O.A., Kamanov B.M., Turaev A.A. Features of the temperature properties

of a field-effect transistor in a current-limiting mode//Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013. – Vol. 86, No.1.– PP.248-254.

12. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под редакцией Н.Н. Горюнова. Энергия М. 1976. С.411-413.
13. Электронный поводырь. //Electronix Box. 2012 Powered by Wordpress <http://electronixbox.net/elektronnyuypovodyr/>
14. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken–New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. 3rd ed., P. 94.
15. Курашкин С.Ф. Применение полупроводникового диода в качестве измерительного преобразователя температуры // Праці ТДАТУ. 2001. Том 3, № 11. С. 173-178.
16. Зеленов Г.Я. Измерение температуры р-п-переходом // Современная электроника. 2007. № 2. С. 38-39.
17. Лыков А.И., Синицын В.С., Савельев А.А. Радиационное управление свойствами первичных преобразователей температуры//Труды Одесского политехнического университета. 2004. Вып. 1. С.1-2.
18. В. Громов. Многофункциональный датчик для электронных систем сбора данных // Электроника. Наука, Технология. Бизнес. 2006. № 5. С. 96-101.
19. Karimov A.V., Bakhronov Sh.N. The thermoelectric converter//Technical Physics Letters. 25, 101–102 (1999).
20. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений.//М.: Энергоатомиздат, 1992. с.27-41.
21. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973. С.96-101.
22. Патент США № 2021491 от 19 ноября 1935. Electrical pyrometer resistance.
23. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. // М.: Мир, 1977. с.71-73.
24. Shaelah Reidy, Don George, Masoud Agah, and Richard Sacks. Temperature-Programmed GC Using Silicon

- Microfabricated Columns with Integrated Heaters and Temperature Sensors. // American Chemical Society 2007, 79 (7), pp 2911–2917.
25. Giampiero de Cesare, Augusto Nascetti and Domenico Caputo. Amorphous Silicon p-i-n Structure Acting as Light and Temperature Sensor // Sensors (Basel). 2015 Jun; 15(6): 12260–12272.
  26. Вайнберг В.В., Воробкало Ф.М., Зарубин Л.И. Полупроводниковый материал для термометров сопротивления на диапазон (14...300) К. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника, Киев, 1979, вып.30. с.4-12.
  27. Орлова М.П. Низкотемпературная термометрия. // М.: Изд.стандартов, 1975. с.38-43.
  28. <http://stud.izhdv.ru/rir/34.htm>.
  29. Karimov M., Makhkamov Sh., Makhmudov Sh.A., Muminov R.A., Rakhmatov A.Z., Sandler L.S., Sattiev A.R., Sulaimanov A.A., Tursunov N.A. Peculiarities of influence of radiation defects on photoconductivity of silicon irradiated by fast neutrons // Applied Solar Energy, 2010. – Vol. 46, No. 4. – PP. 298–300.
  30. Приемники излучения <https://studopedia.org/4-161674.html>
  31. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Илиев Х.М., Исамов С.Б. Фотопроводимость кремния с нанокластерами атомов марганца // Микроэлектроника, 2010.- Том 39, №6.- С.426-429.
  32. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Магниточувствительные транзисторы (Обзор) // ФТП. 2001, том35, вып. 1., С.1-10.
  33. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Iliev Kh.M. Influence of Infrared Radiation on the Magnetic Properties of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Nanoscience and Nanotechnology 2017, Volume 7, Number 1, P. 1-3.
  34. Степанова Л.Н. Исследование характеристик проволочных и полупроводниковых тензодатчиков, используемых для измерения ударных процессов // Датчики и системы, 2013. – №1. – С. 28-33.

35. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций // Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2011. – 56 с.
36. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Зикриллаев Х.Ф. Влияние одноосного сжатия на фотопроводимость сильнокомпенсированного Si <В, Мп> // Письма в ЖТФ, 1998. – Т.24, №22. – С. 23-28.
37. Stefanescu D.M. Handbook of force transducers: principles and components // Berlin: Springer-Verlag, 2011. 612 p.
38. Сокольников А.В., Игошев С.О., Траксова В.В. Определение температуры перехода в гетероструктуре сверхяркого светодиода. // Электроника и информационные технологии. 2010. №2. С. 1-4.
39. M. Ansoor, I. Haneef, S. Akhtar, A.De Luca, F. Udrea, Silicon diode temperature sensors – A review of applications, Sensors and Actuators: A Physical (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.04.022>. P. 1-49.
40. S. Santra, F. Udrea, P. Guha, S. Ali, I. Haneef, Ultra-high temperature (> 300 °C) suspended thermodiode in SOI CMOS technology, Microelectronics Journal, 41(2010) 540-6.
41. T. Yang, S. Kim, P.R. Kinget, M. Seok. Compact and supply-voltage-scalable temperature sensors for dense on-chip thermal monitoring, IEEE J. Solid State Circ. 50 (11) (2015) 2773–2785.
42. Gardner, J. W., Guha, Prasanta K., Udrea, Florin and Covington, James A. (2010) *CMOS interfacing for integrated gas sensors : a review*. IEEE Sensors Journal, Vol. 10(No.12). pp. 1833-1848. doi:[10.1109/JSEN.2010.2046409](https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2046409)
43. S. Eminoglu, M.Y. Tanrikulu, T. Akin, A low-cost 128 × 128 uncooled infrared detector array in CMOS process, Journal of Microelectromechanical Systems, 17(2008) p.20-30.
44. Novel design and characterisation of SOI CMOS micro-hotplates for high temperature gas sensors P.K. Guha, S.Z. Ali, C.C.C. Lee , F. Udrea , W.I. Milne, T. Iwaki, J.A. Covington, J.W. Gardner // Sensors and Actuators B 127 (2007) 260–266

45. A. Valdes-Garcia, R. Venkatasubramanian, J. Silva-Martinez, E. Sánchez-Sinencio, A broadband CMOS amplitude detector for on-chip RF measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 57 (7) (2008) 1470–1477.
46. M. de Souza, B. Rue, D. Flandre, M.A. Pavanello, Thin-film lateral SOI PIN diodes for thermal sensing reaching the cryogenic regime, *Journal of Integrated Circuits and Systems*, 5(2010) 160-7.
47. Sandro Rao, Giovanni Pangallo, Francesco G. Della Corte. 4H-SiC p-i-n diode as Highly Linear Temperature Sensor. *IEEE Transactions on electron devices*, january 2016. vol. 63, no. 1, P. 414-418.
48. Bakhadyrkhanov M.K., Valiev S.A., Tachilin S.A., Nasriddinov S.S. Sensitive thermosensors on the bases of highly compensated silicon // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007. – Vol. 43, No. 6. – PP. 505-507.
49. Kimura M., Toshima K. Thermistor-like pn junction temperature-sensor with variable sensitivity and its combination with a micro-air-bridge heater // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003. – Vol. 108, No. 1-3. – PP. 239-243.
50. Chau, R. High- metal-gate stack and its MOSFET characteristics [Text] / R. Chau, S. Datta, M. Doczy, B. Doyle // *EDL*. - 2004. - Vol. 25. - P. 408-410.
51. N. Nenadovic, S. Mijalkovic, L.K. Nanver, L.K.J. Vandamme, V. d'Alessandro, H.Schellevis, J.W. Slotboom, Extraction and modeling of self-heating and mutual thermal coupling impedance of bipolar transistors, *IEEE J. Solid State Circ.* 39(10) (2004) 1764–1772.
52. S. Drago, F. Sebastiano, L. J. Breems and D. M. W. Leenaerts, K. A. A. Makinwa. NPN-based temperature sensor with digital output transistors has been realized. *DRAFT*. April 20, 2010. P.1-28.
53. F. Reverter, D. Gómez, J. Altet, On-chip MOSFET temperature sensor forelectrical characterization of RF circuits, *IEEE Sensors J.* 13 (9) (2013)3343–3344.

54. Fabio Sebastiano, Lucien J. Breems, Kofi A. A. Makinwa, Salvatore Drago, Domine M. W. Leenaerts, Bram Nauta, A 1.2-V 10-mW NPN-based temperature sensor in 65-nm CMOS with an inaccuracy of 0.2 °C (33/4) from -70 °C to 125 °C, *IEEE J. Solid-State Circuits* 45(12)(2010)2591–2601.
55. F. Reverter, J. Altet, On-chip thermal testing using MOSFETs in weak inversion, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(2015) 524-32.
56. F. Reverter, J. Altet, MOSFET temperature sensors for on-chip thermal testing, *Sensors and Actuators A: Physical*, 203(2013) 234-40.
57. F. Reverter, X. Perpiñà, M. León, X. Jordà, J. Altet, Characterization of MOSFET temperature sensors for on-chip dynamic thermal measurements, in: *EuroSensors XIX*, Freiburg, Germany, 2015, pp. 836–839 (September)..
58. Bockemuehl R.R. Cadmium Sulfide Field Effect Phototransistor. *Proc. IRE*. 1960. v48. #5. pp. 975-882.
59. Киселева Е.В., Китаев М.А., Оболенский С.В., Трофимов В.Т., Козлов В.А. Радиационная стойкость перспективных арсенид галлиевых полевых транзисторов Шоттки. *ЖТФ*. 2005. Т.75. Вып. 4. С. 136-138.
60. M.A. Pertijs, G.C. Meijer, J.H. Huijsing, Precision temperature measurement using CMOS substrate PNP transistors, *IEEE Sensors Journal*, 4(2004) 294-300.
61. Х.К.Арипов, Н.Б.Алимова, Х.Х.Бустанов, Е.В.Оъедков, Ш.Т.Тошматов. Инжекционно-вольтаический эффект на основе многослойных полупроводниковых структур. // *Гелиотехника*. 2009, №1 С.15-21.
62. Х.К.Арипов, Н.Б.Алимова, Х.Х.Бустанов, Е.В.Оъедков, Ш.Т.Тошматов. Инжекционно-вольтаический управляемый генератор тока. // *Гелиотехника* 2009, №2 С.22-28.
63. Каримов А.В. Полевой фототранзистор. Авторское свидетельство №1493031. 8.03.1989 г.
64. Бабичев Г.Г., Козловский С.И., Романов В.А. Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы

- // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. В. 10. С. 45-49.
- 65.** Abdel-Motaleb I.M., Sambaraju V.K. Development of a Wireless Cardiogram System for Acute and Long-term Healthcare Monitoring / Proceedings of IEEE International Conference on Electro/Information Technology, Indianapolis, USA, 2012, May 6-8. – PP. 1-6.
  - 66.** Wong A., Pun K.P., Zhang Y.T., Hung K. A Near-infrared heart rate measurement IC with very low cutoff frequency using current steering technique // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005. – Vol. 52, No. 12. – PP. 2642-2647.
  - 67.** Hennig A., Patzak A. Continuous blood pressure measurement using pulse transit time // Somnologie, 2013. – Vol. 17. – PP. 104-110.
  - 68.** Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А., Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулайманов А.А., Турсунов Н.А. Фото-резистор на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами / Материалы Международной конференции посвященной 80-летию академика Саидова М.С. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 24-25 ноября 2010 г. -Ташкент. -С. 207-208.
  - 69.** Tavakoli M., Turicchia L., Sarpeshkar R. An ultra-low-power pulse oximeter implemented with an energy-efficient transimpedance amplifier // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2010. – Vol. 4. – PP. 27-38.
  - 70.** Udrea F., Santra S., Gardner J.W. CMOS temperature sensors - concepts, state-of-the-art and prospects / CAS 2008, International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania, 2008, 13-15 October. – PP. 31-40.
  - 71.** Sourì K., Chae Y., Makinwa K.A.A. A CMOS Temperature Sensor With a Voltage-Calibrated Inaccuracy of  $\pm 0.15^\circ\text{C}$  ( $3\sigma$ ) from  $-55^\circ\text{C}$  to  $125^\circ\text{C}$  // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2013. – Vol. 48, No. 1. – PP. 292-301.
  - 72.** Тураев А.А. Майдон транзисторларининг хоссалари // Замонавий физика ва астрофизиканинг долзарб

- муаммолари. III республика илмий-амалий анжумани. 2015. Қарши. Б.82-85.
- 73.** Ёдгорова Д.М. Каримов А.В. Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлополупроводниковыми переходами Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Одесса.. -2005..№ 5, с.27-30.
- 74.** Ведлок В.Д. Непосредственное определение напряжения запираания полевого транзистора в режиме обеднения // ТИИЭР. 1969. Том 57, № 1. С. 95-98.
- 75.** A.G. McNamara, Semiconductor diodes and transistors as electrical thermometers, Review of Scientific Instruments, 33(1962) 330-3.
- 76.** Маркелов А. Датчики температуры, первичные преобразователи.//chip news.Si-sensors, Philips. Инженерная микроэлектроника. Москва, 2003.-№10.- С.83-85.
- 77.** Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Long Channel Field Effect Transistor with Short Channel Transistor Properties // Semiconductors, 2014. – Vol. 48, No. 4. –PP. 481-486.
- 78.** КП103  
<http://paratran.com/2paratranKRFET.php?tr=1095>
- 79.** КП102 <http://dragmetinform.ru/spravochnik-soderzhaniyadragmetallov /komp lektuiushchie-izdeliia/potentciometr.html>
- 80.** Ричман П. Физические основы полевых транзисторов с изолированных затвором. М.:Сов.Радио,1971.142 с.
- 81.** Милехин А.Г. Радиотехнические схемы на полевых транзисторах. «Энергия». Москва. -1976. -С. 15-29.
- 82.** Тураев А.А., Саидов К.С. Динамик юкламали схемада майдоний транзисторнинг кучайтириш хоссалари //Vuxoro davlat universiteti ilmiy axboroti . ISSN 2181-6875 2016/4(64) Б. 31-35.
- 83.** Каримов А. В. Многофункциональные арсенид галлиевые тонко переходные структуры. Ташкент: ФАН. 1992. С.94-99.

84. M.A. Huque, L.M. Tolbert, B.J. Blalock, S.K. Islam, A high temperature, high-voltage SOI gate driver IC with high output current and on-chip low-power temperature sensor, IMAPS International Symposium on Microelectronics, 2009, pp. 220-7.
85. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977., С.142-143.
86. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Kamanova G.O. Photovoltaic silicon structures with two Schottky barriers. Applied solar energy. -2013, -V.49, -№2, -pp.67-89.
87. Трищенко М.А., Фример А.И. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с р-п-переходом. В сб.: Полупроводниковые приборы и их применение. –М. Сов. радио 1971. Вып. 25. с.165-184.
88. Эгамбердиев Б.Э., Рахманов А.Т., Норов А.М. Микропроцессорный прибор на основе термодатчика для дистанционного контроля температуры. Москва, «Приборы» № 4, 2016. С. 15-18.
89. Iisu Rhee and Kiwon Yang. Inclination Angle Dependence of Magneto-resistance Signals in Thin Magnetic Films // Journal of the Korean Physical Society, Vol. 39, No. 4, October 2001, -P. 676-680.
90. Andreev V.M., Marshall Y.M. and Dimova-Malinovska D. (Eds.), Photovoltaic and Photoactive Materials–Properties, // Technology and Application 80, Kluwer Acad. Publ., London, 2002, p.131.
91. Сукач А.В., Тетеркин В.В. Процессы генерации и рекомбинации носителей в арсениде индия и фотодиодах на его основе.//Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Вып.42.2007.С.103-113.
92. Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Орлова М.Н. и др. Повышение быстродействия и радиационной стойкости силовых кремниевых диодов с применением радиационного технологического процесса//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. Вып. 1—2. С. 29-37.

93. Бахадырханов М.К., Валиев С.А., Насриддинов С.С., Эгамов У. Особенности термических свойств сильнокомпенсированного Si<В,Мn>././РАН, Неорганические материалы, 2009, Том. 45, №. 11, С. 1291-1293.
94. Камиллов Т.С., Кабилов Д.К., Самиев И. С., Хуснутдинова Х.Х. О возможности создания термоэлектрических приемников излучения на основе многоэлементных структур пленок высшего силицида марганца. // Журнал технической физики, 2005, том 75, вып. 10. -С.122-125.
95. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. Санкт-Петербург “Политехника” -1991, -С. 125-133.
96. Под ред. У. Тсанга. Техника оптической связи. Фотоприемники. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 526 с.
97. David A. Hodges. Darlington's Contributions to Transistor Circuit Design. IEEE transactions on circuits and systems // Fundamental theory and applications, V. 46.- No. 1, January 1999. P.102-105.
98. А.А. Боев, С.Н. Кузнецов, Б.И. Огнев, С.Ю. Поляков //Алгоритм определения центра пучка для системы наведения оборудования беспроводной оптической связи. Вестник РГРТУ. 2015. № 54. Часть 1. С. 55-59.

## Summary

**D.R.Djurayev, A.V.Karimov, A.A.Turayev, O.A.Abdulkhayev** “Sensors of temperature of new generation”

Now in the world in violently developing field of physics of semiconductors of the semiconductor sensors used for the new designated purpose special attention is paid to one of the perspective directions to expansion of functional properties (to sensitivity to pressure, light and thermal radiations). In this aspect establishment of features of sensitivity to external influences of the field transistor in the mode of a cut-off of the channel is one of important tasks.

Has shown the analysis of a condition of researches in the field of thermosensitive sensors that with use of modern semiconductor integrated sensors it is possible to realize measurements of temperature in the range from About  $0^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  with a margin error  $\pm 2,0$ . However, in science and the industry there is both a need, and the need for control and measurement of higher and lower temperatures with high precision.

Transistor (-)p-n-p+(+) -structure at the bipolar mode of inclusion has high temperature sensitivity and small working current unlike separately taken diode inclusion. Such sensors are of interest to application in aviation, automobile and in other industries.

Researches known so far are conducted on the straightening transitions of diode and transistor structures. However data on the researches conducted on the basis of the field transistor and mechanisms of management of their temperature coefficient, still are absent.

Field transistor with the low voltage of a cut-off is of interest also to use as temperature sensor in the mode of restriction of direct current in which transmission of the fixed direct current through p-n -transition, register the

falling tension which linearly changes with change of temperature.

For this field transistor cut-off tension (0.6V) of the channel practically coincides with contact potential difference that provides unambiguous change of thickness of the channel from external influence.

The difference p-n -transition of a lock from classical diode transition is revealed, that is they have the smaller differential resistance and influence of resistance of base on power failure is excluded. Proceeding from these positions, as sensors are chosen, not diffusive, but epitaxial structures.

Optimum values of thickness of the channel depending on thickness of area of a volume charge p<sup>+</sup>-n -transition of a lock and concentration of carriers providing high sensitivity are defined.

It is revealed that depending on the modes of turning on of the field transistor, his photo-electric and temperature characteristics change essentially. They are mainly used for measurement of temperature, however practically remains to the temperature dependence of the return current of the locked transition which isn't studied a possibility of use for measurement of temperature or light radiation.

It is established that the temperature sensitivity of the field transistor with p-n transition in the mode of restriction of direct current decides on p by processes of formation of current and to some extent level of injection of carriers.

It is found that increase in tension of a cut-off of the channel has a talk with temperature increase reduction of contact potential difference of p-n - transition due to increase in own concentration of carriers.

It is established that the temperature coefficient of sensitivity of the field transistor in the mode of a cut-off of the channel is caused by process of a gain of thickness of base from temperature and submits to the same law for all field transistors irrespective of technological parameters of transistor structure.

## Оглавление

Предисловие.....	<b>3</b>
Основные условные обозначения и сокращения .....	<b>9</b>
<b>Глава I. Анализ состояния исследований в области термочувствительных датчиков.....</b>	<b>11</b>
1.1. Виды термометров и их применение.....	<b>12</b>
1.2. Функциональные характеристики датчиков температуры на основе термопар.....	<b>21</b>
1.3. Термометры сопротивления.....	<b>32</b>
1.4. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления.....	<b>54</b>
1.5. Датчики температуры на основе диодных и транзисторных структур.....	<b>66</b>
<b>Глава II. влияние теплового и деформационного воздействий на характеристики диодных и транзисторных структур.....</b>	<b>79</b>
2.1. Многофункциональные датчики на основе полупроводниковых резисторных структур.....	<b>81</b>
2.2. Датчики на основе полупроводниковых диодных структур.....	<b>87</b>
2.3. Универсальные датчики на основе транзисторных структур.....	<b>91</b>
<b>Глава III. Физико-технологические Особенности многофункционального датчика.....</b>	<b>98</b>
3.1. Принципы повышения чувствительности транзисторной структуры к внешним воздействиям.....	<b>100</b>
3.2. Обоснование выбора полевого транзистора в качестве чувствительного элемента.....	<b>103</b>
3.3. Особенности ключевых параметров полевых транзисторов.....	<b>110</b>
<b>Глава IV. Электрофизические параметры полевого транзистора при воздействии температуры.....</b>	<b>115</b>
4.1. Температурные свойства полевого транзистора в диодном режиме включения.....	<b>116</b>
4.2. Температурные свойства полевого транзистора в режиме ограничения токов .....	<b>122</b>
4.3. Температурная зависимость напряжения отсечки....	<b>127</b>
4.4. Особенности температурной чувствительности транзисторной структуры в двухполюсном режиме.....	<b>132</b>
<b>Заключение.....</b>	<b>140</b>
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>142</b>

## Contents

Preface .....	<b>3</b>
Main symbols and reductions .....	<b>9</b>
<b>Chapter I. The analysis of the condition of researches in the field of thermosensitive sensors .....</b>	<b>11</b>
1.1. Types of thermometers and their application.....	<b>12</b>
1.2. Functional characteristics of sensors of temperature on the basis of thermocouples.....	<b>21</b>
1.3. Resistance thermometers.....	<b>32</b>
1.4. Semiconductor thermoconverters of resistance.....	<b>54</b>
1.5. Temperature sensors on the basis of diode and transistor structures.....	<b>66</b>
<b>Chapter II. Influence of thermal and deformation impacts on characteristics of diode and transistor structures .....</b>	<b>79</b>
2.1. Multipurpose sensors on the basis of semiconductor resistor structures .....	<b>81</b>
2.2. Sensors on the basis of semiconductor diode structures .....	<b>87</b>
2.3. Universal sensors on the basis of transistor structures	<b>91</b>
<b>Chapter III. Physicotechnological features of the multipurpose sensor .....</b>	<b>98</b>
3.1. The principles of increase in sensitivity of transistor structure to external influences .....	<b>100</b>
3.2. Justification of the choice of the field transistor as a sensitive element .....	<b>103</b>
3.3. Features of key parameters of field transistors.....	<b>110</b>
<b>Chapter IV. Electrophysical parameters of the field transistor at influence of temperature .....</b>	<b>115</b>
4.1. Temperature properties of the field transistor in the diode mode of inclu.....	<b>116</b>
4.2. Temperature properties of the field transistor in the mode of restriction of currents .....	<b>122</b>
4.3. Temperature dependence of tension of a cut-off .....	<b>127</b>
4.4. Features of temperature sensitivity of transistor structure in the bipolar mode .....	<b>132</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>140</b>
<b>The list of the used literature.....</b>	<b>142</b>

Джураев Даврон Рахманович

Каримов Абдулазиз Вахитович

Тураев Акмал Атаевич

Абдулхаев Ойбек Абдувахитович