МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

 ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

 КУРСОВАЯ РАБОТА

 ПО СХЕМОТЕХНИКЕ

 ТЕМА: «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ»

 ВЫПОЛНИЛИ СТУДЕНТЫ ФПК 3-2

 Мазилина Е.А.

 Мазилин С.В.

 Москва 2001г.

 ПЛАН КУРСОВОЙ РАБОТЫ.

1. ВВЕДЕНИЕ.
2. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.
3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ.
4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ.
	1. Датчики температуры на основе диодов и транзисторов.
	2. Датчики температуры на основе терморезисторов.
	3. Пленочные полупроводниковые датчики температуры.
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ
6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказа­лось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, в научных исследованиях, в быту. Реализация этой предпо­сылки в значительной мере определялась возможностями устройств для получе­ния информации о регулируемом параметре или процессе, т.е. возможностями датчиков. Датчики, преобразуя измерительный параметр в выходной сигнал, который можно измерить и оценить количественно, являются как бы органами чувств современной техники.

1. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Среди широкого разнообразия измерительных параметров одним из основных является температура. Ее измерение необходимо во всех сложных технологических процессах. Большое разнообразие датчиков температуры, работающих на различных физических принципах и изготовленных из различных материалов, позволяет измерять ее даже в самых труднодоступных местах – там, где другие параметры измерить невозможно. Так например, в активной зоне атом­ных реакторов установлены только датчики температуры, измерение которой поз­воляет оценить другие теплоэнергетические параметры, такие как давление, плот­ность, уровень теплоносителя и т.д. [1].

В повседневной жизни, в быту также применяются датчики температуры, например для регулирования отопления на основании измерения температуры теплоносителя на входе и выходе, а также температуры в помещении и наружной температуры; регулирование температуры нагрева воды в автоматических сти­ра­льных машинах; регулирование температуры электроплит, электродуховок и т.п.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Любой датчик, в том числе и датчик температуры, может быть описан рядом характеристик, совокупность которых позволяет сравнивать датчики между

собой и целенаправленно выбирать датчики, наиболее соответствующие конкретным задачам.

Перечислим основные из этих характеристик [2]:

1. Функция преобразования (градуировочная характеристика) представ­ляет собой функциональную зависимость ее выходной величины от измеряемой величины:

 y = f(x) (1)

Зависимость представляется в именованных величинах: y – в единицах выходного сигнала или параметрах датчика, x – в единицах измеряемой вели­чины. Для датчиков температуры – Ом/°С или мВ/К.

1. Чувствительность – отношение приращения выходной величины датчика к приращению его входной величины:

 S = dy/dx (2)

Для линейной части функции преобразования чувствительность датчика постоянна. Чувствительност датчика характеризует степень совершенства про­цесса преобразования в нем измеряемой величины.

1. Порог чувствительности – минимальное изменение значения входной величины, которое можно уверенно обнаружить. Порог чувствительности связан как с природой самой измеряемой величины, так и с совершенством процесса преобразования измеряемой величины в датчике.
2. Предел преобразования – максимальное значение измеряемой величи­ны, которое может быть измерено без необратимых изменений в датчике в резуль­тате рабочих воздействий. Верхний предел измерений датчика обычно меньше предела преобразования по крайней мере на 10%.
3. Метрологические характеристики – определяются конструктивно-технологическими особенностями датчика, стабильностью свойств применяемых в нем материалов, особенностями процессов взаимодействия датчика с измеряе­мым объектом.

Метрологические характеристики, в свою очередь, определяют характер и величины погрешностей измерения датчиков. Часть погрешностей могут быть случайными и они учитываются методами математической статистики. Система­тические погрешности могут быть аналитически описаны и исключены из резуль­татов измерения.

Основными видами систематических погрешностей являются:

* погрешности, обусловленные нелинейностью функции преобразования, что характерно для полупроводниковых датчиков температуры [3];
* погрешности, обусловленные вариацией функции преобразования вследствие изменения направления действия входной величины (для датчиков температуры это нагрев-охлаждение);
* погрешности, обусловленные несоответствием динамических воз­можностей датчика скорости воздействия входной величины. Может быть учтено введением коэффициента термической инерции;
* дополнительные погрешности, обусловленные отличием условий работы датчика от тех, в которых определялась его функция преобра­зования;
* погрешности, обусловленные нестабильностью функции преобра­зо­вания вследствие процессов старения материала.
1. Надежность – рассматривается в двух аспектах: механическая надеж­ность и метрологическая надежность.
2. Эксплуатационные характеристики – к их числу могут быть отнесены: масса, габаритные размеры, потребляемая мощность, прочность электрической изоляции, номиналы используемых электрических напряжений, а также стойкость к агрессивным средам, всевозможным излучениям, искробезопасность и т.д.
3. Стоимость и возможность серийного производства.
4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ

 ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Влияние температуры на электрофизические параметры полупроводников в основном проявляются в изменении концентрации носителей заряда, что при­водит к соответствующему изменению электрической проводимости [4]. На этом принципе работают полупроводниковые терморезисторы. В качестве полупровод­-

никовых датчиков температуры также используются диоды и транзисторы, где изменение концентрации носителей заряда приводит к изменению тока, протека­ю­щего через полупроводниковый прибор [4].

* 1. Датчики температуры на основе диодов и транзисторов.

В датчиках температуры на основе диодов и транзисторов используют зависимость параметров p-n перехода в полупроводнике от температуры.

Исторически первым температурозависимым параметром был обратный ток диодов и транзисторов. Значение тока растет с температурой по экспонен­ци­альному закону со скоростью порядка 10%.К-1. Однако, диапазон температур, в пределах которых возможно использование обратных токов, весьма ограничен. Верхний температурный предел применения определяется температурой их теплового пробоя.

Наибольшее распространение получило использование прямых параметров диодов и транзисторов [5]. Их существенными преимуществами перед обратными являются линейность температурной зависимости, широкий диапазон рабочих температур, высокая стабильность. Чаще всего для измерения температуры ис­пользуется прямое напряжение на p-n переходе при почти постоянном токе эмит­тера. Изменение прямого напряжения составляет порядка 2,5 мВ.К-1. При повы­шении температуры транзисторов p-n-p типа напряжение эмиттер-база из области положительных значений переходит в область отрицательных.

Так например, датчик TS-560, разработанный ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН (г.Санкт-Петербург) представляет собой полупроводниковый диод на основе ар­сенида галлия. Диапазон измерения такого датчика (4,2…500) К, основная пог­реш­ность ±0,1%, чувствительность (2…3) мВ/К, габаритные размеры 3×3 мм [2].

Известны случаи использования в качестве температурозависимого пара­метра коэффициента усиления по току на низких и высоких частотах [5]. Однако невысокая чувствительность коэффициента усиления к температуре и его зависи­мость от предыстории, а также необходимость индивидуальной градуировки во всем диапазоне рабочих температур ограничивают применение этого параметра при создании термодатчиков.

На основе транзисторов, эмиттерный переход которых включен в одно из плеч моста, созданы термодатчики типа ТЭТ-1, ТЭТ-2 [5]. Первый тип исполь­зу­ется для измерения температуры в полевых условиях в диапазоне (-10…+40) °С с основной погрешностью не более ±1 К, второй – в диапазоне (-40…+80) °С с погрешностью не более (0,3…2) К.

Температурные пределы применимости транзисторов в термодатчиках значительно шире, чем при использовании транзисторов по прямому назначению. Ограничение применимости со стороны высоких температур наступает вслед­ст­вие перехода примесного полупроводника в собственный, уменьшения пробивно­го напряжения и повышения генерации носителей в базовой области при отрица­тельных напряжениях. Применимость при низких температурах определяется уменьшением концентрации основных носителей из-за дезактива­ции легирующих примесей и уменьшения коэффициента усиления по току.

Основным недостатком рассматриваемых термодатчиков является слож­ность получения их номинальной статистической характеристики из-за разброса основных параметров транзисторов: коэффициента усиления по току, сопротив­ления базовой области, тока утечки и др. Анализ и оценка влияния разброса ука­занных параметров на точность измерения температуры при использовании номи­нальной статистической характеристики, выполненные в [5], показали, что для прямых параметров транзисторов с градуировкой при одной температуре погреш­ность измерения в схеме с общим эмиттером – не более 2 и 50% при коэффици­енте усиления по току β≤30 и β≥200 соответственно.

Важной характеристикой для широкого внедрения термодатчиков на осно­ве транзисторов и диодов является стабильность их параметров. Результаты ис­сле­­до­вания долговременной стабильности термодатчиков на основе транзисторов с температурозависимым параметром – прямым напряжением на p-n переходе в зависимости от температуры и длительности эксплуатации, приведенные в [6] показывают, что погрешность измерения ими может составлять (0,01…0,15) К в первый год эксплуатации и (0,002…0,04) К - во второй год. Основными причина­ми нестабильности следует считать обратимый процесс гидратации-дегидратации оксидного слоя на поверхности полупроводникового кристалла и возникновение остаточных деформаций в нем вследствие неодинаковости температурных коэф­фициентов линейного расширения материалов деталей транзисторов [6].

* 1. Датчики температуры на основе терморезисторов.

Наиболее широкое распространение получили датчики на основе термо­резисторов. Принцип терморезистивного преобразования основан на температур­ной зависимости активного сопротивления металлов, сплавов и полупроводников, обладающих высокой воспроизводимостью и достаточной стабильностью по от­но­шению к дестабилизирующим факторам. Температурную чувствительность термометрического материала принято характеризовать температурным коэффи­циентом сопротивления (ТКС). Типичные случаи поведения термометрической зависимости представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, полупроводниковые терморезистивные преобра­зо­ватели отличаются достаточно большой чувствительностью (на порядок и боль­ше) нежели металлические.

Достаточно давно разработаны и выпускаются отечественной промыш­ленностью полупроводниковые датчики температуры с чувствительными эле­ментами, созданными на основе окислов переходных металлов с неполностью заполненной 3d электронной оболочкой. Достоинством таких датчиков (обычно называемых терморезисторами) является большое значение температурного коэффициента сопротивления и сравнительно малые размеры [2,6,7]. В зави­симости от применяемого полупроводникового материала терморезисторы раз­деляют на кобальто-марганцевые (КМТ и СТ1), медно-марганцевые (ММТ и СТ2), медно-кобальтовые (СТ3 и СТ4) и титано-бариевые, имеющие малый до­пуск по сопротивлению и ТКС (позисторы СТ5 и СТ6).

Изменяя состав материала чувствительного элемента, можно получить терморезисторы как с положительным, так и с отрицательным значением ТКС в пределах от –6,5 до +20 %/К [7]. Номинальные сопротивления чувствительных элементов зависят от их состава и размеров и могут находиться в пределах от 1 до 106 Ом. Высокое номинальное сопротивление терморезисторов упрощает требо­вания к системе терморегулирования, что позволяет ограничиться двухпроводной линией связи датчика с системой регулирования и уменьшает погрешность преоб­разования, обусловленную длиной линией связи.

Зависимость сопротивления от температуры описывается выражением [6]:

Рис.1. Зависимость ТКС от температуры для различных терморезисторов.

 1 – металлические терморезисторы;

 2 – полупроводниковые терморезисторы (термисторы);

 3 - сегнетоэлектрические керамики (позисторы).

 RT = Aexp(B/T), (3)

где RT – сопротивление терморезистора при температуре Т; А,В – постоянные коэффициенты, зависящие от материала терморезистора и номинального значения его сопротивления. Это соотношение обеспечивает высокую точность аппрокси­мации только в узком диапазоне температур. Так например, для терморезисторов типа СТ4-16 погрешность аппроксимации не более ±0,05 К обеспечивается только в диапазоне (15…55) °С. Лучшие результаты дают уравнения типа:

 RT = A1exp(B1/T + C1/T2) ; (4)

 1/T = A2 + B2lgRT + C2(lgRT)3, (5)

где А1, А2, В1, В2, С1, С2 – постоянные. Уравнение (4) обеспечивает точность аппроксимации ±(0,2…0,4) К в интервале (-60…+100) °С, а уравнение (5) – точность ±0,1 К в интервале (-20…+120) °С.

Чувствительные элементы изготавливают самых различных конфигураций – от бусинок диаметром 0,2 мм, дисков и шайб диаметром (3…25) мм до стерж­ней диаметром 12 и длиной до 40 мм. Бусинковые чувствительные элементы обычно заливают стеклом или помещают в стеклянные и пластмассовые корпуса. Дисковые чувствительные элементы часто защищают изоляционными пленками из лака или эпоксидных смол, монтируют на металлических пластинах и гермети­зируют в металлические или пластмассовые корпуса [2].

Однако, термодатчики такого типа обладают рядом недостатков.

Температурная зависимость сопротивления носит нелинейный характер, поскольку величина ТКС в рабочем диапазоне температур изменяет свою вели­чину, иногда даже на несколько порядков. Технология изготовления чувстви­тель­ных элементов не позволяет получать номинальные значения сопротивлений даже для одного типа с разбросом меньше (10…20)%. Кроме того, значения темпера­тур­ного коэффициента сопротивления терморезисторов одной конфигурации могут отличаться почти в два раза [7], вследствие чего отсутствует их взаимоза­меняемость.

Но основным недостатком термометров этого типа является то, что они, несмотря на проведение в процессе изготовления искусственного старения, обладают низкой временной стабильностью и воспроизводимостью.

Значительно большей стабильностью электрофизических свойств по ставнению с аморфными веществами обладают монокристаллы. Для создания монокристаллических чувствительных элементов термометров широкое примене­ние получили кремний и германий. В чмстом виде германий и кремний исполь­зуются выше 20 К.

В области более низких температур наиболее часто используется леги­ро­ванный германий, как хорошо изученный полупроводниковый материал, техноло­гия получения кристаллов которого хорошо отработана. При легировании герма­ния элементами III и IV групп, такими как галлий и сурьма, являющимися мелки­ми примесями с энергией активации порядка 0,01 эВ, можно изготавливать высо­кочувсвительные термометры для работы в диапазоне от 1 до 40 К с погреш­нос­тью 0,005 К [8]. Конструкция такого термодатчика разработки ВНИИФТРИ при ведена на рис.2 [2]. Датчики выпускаются в двух модификациях в расчете на двухпроводную (рис.2а) или четырехпроводную (рис.2б) схему включения. Чувствительный элемент – тонкая пластина легированного германия 3, к которой припаяны золотые выводы 2. Чувствительный элемент помещен в мельхиоровую гильзу 4, заканчивающуюся стеклянной головкой 6 с платиновым пояском и при­паяными через нее платиновыми выводами 7, сваренными внутри гильзы с золо­тыми выводами от чувствительного элемента. Изнутри гильза датчика покрыта фторопластовой защитной пленкой 5, противоположный выводам конец герме­тизирован оловянной пробкой 1. Гильза термометра заполнена газообразным гелием. Такие термометры имеют нелинейную температурную зависимость сопротивления. Их статистическая характеристика бизка к экспоненциальной и аппроксимируется полиномами вида [6]:

 LnR = Σ ai(lnT)i (6),

где ai – коэффициенты.

Рис.2. Низкотемпературные датчики температуры на основе Ge.

Выбор степени полинома i зависит от требуемой точности измерения и диапазона измеряемых температур. С ростом температуры чувствительность таких термометров быстро уменьшается до уровня, меньшего чем у металлов. При этом происходит изменение сопротивления термометра от сотен мегом до десятых долей ома. Для сохранения высокой чувствительности вплоть до 300 К авторами работ [9,10] предлагается многокомпонентное легирование германия мелкими и глубокими примесями или донорными и акцепторными примесями.

Разработанные ВНИИФТРИ германиевые термодатчики обладают высокой стабильностью характеристик и широко используются в криогенной области. Однако, они имеют крайне низкую устойчивость к механическим воздействиям. К недостаткам германиевого термодатчика следует отнести сложность получения стабильной пленки двуокиси германия, что при разработке термодатчиков требует специальных мер по защите поверхности чувствительного элемента от окружа­ю­щей среды. Кроме того, из-за узкой (Ey ≅ 0,74 эВ [11] ) запрещенной зоны гер­ма­ний уже при Т>(300…400) К становится собственным полупровод­ником, что не позволяет использовать его при высоких температурах.

К этой же группе условно могут быть отнесены угольные термодатчики, которые по характеру проводимости занимают промежуточное положение между металлами и полупроводниками, но обладают высоким отрицательным ТКС и нашли широкое применение в криогенной технике. В качестве чувствительного элемента углеродных термодатчиков часто используются углеродные радиотехни­ческие сопротивления. Для широкого интервала температур статические характе­ристики преобразования углеродных термодатчиков предлагается представлять соотношением типа:

 lnR = A/Tm + B (7),

где A, B и m – постоянные.

Это уравнение позволяет в диапазоне (3…60) К получить аппроксимацию экспериментальных данных с погрешностью не более ±0,03 К [6]. Углеродные термодатчики требуют индивидуальной градуировки. Они не дороги, однако в эксплуатации требуют аккуратного обращения, т.к. весьма чувствительны к меха­ническим нагрузкам как на сам угольный элемент, так и на электрические выво­ды, которые запрессованы в элемент.

Известны пленочные углеродные термодатчики, чувствительный элемент которых изготавливают из коллоидной суспензии графита в воде, нанесенной на тонкие стеклянные пластинки [12]. Эти датчики предназначены для интервала температур (0,03…4,2) К.

В интервале (4,2…273) К используют также стеклоуглеродные термодат­чики [12]. Для изготовления их чувствительного элемента щелочно-боросили­катное стекло подвергают выщелачиванию, удаляя из него фазу, богатую бором. Образуется пористое стекло. Поры заполняют тонко измельченным углем высо­кой чистоты. Полученный материал после высушивания разрезают на пластины. На концы пластин в вакууме напыляют электроды. Затем пластины с выводами помещают в платиновые гильзы. Гильзы напоняют гелием и герметизируют. Статические характеристики преобразования стеклоуглеродных термодатчиков могут быть аппроксимированы уравнением (7).

В настоящее время в области практического использования никакой полупроводниковый материал не может конкурировать с кремнием по степени изученности характеристик и, особенно, по степени разработанности и осво­ен­ности технологии изготовления. Поскольку кремний имеет достаточно широкую (Ey ≅ 1,17 эВ [11]) зону проводимости и, кроме того, интенсивное окисление поверхности кремния происходит при температурах, больших 1000 К, то на его основе могут создаваться высокотемпературные термодатчики. На основе моно­кристаллического кремния можно изготавливать термодатчики как с положи­тельным, так и с отрицательным значением ТКС в области средних температур. Отрицательное значение ТКС получают при легировании кремния такими при­месями, ка золото и железо, которые создают в запрещенной зоне “глубокие “ уровни, т.е. уровни, энергия активации которых близка к 0,5.Ey [13].

На основе кремния, легированного золотом, разработан термодатчик с отрицательным ТКС для измерения температуры поверхности с рабочим диапа­зоном (273…330) К [2,14]. Температурный коэффициент такого термодатчика изменяется от –8%/К при 273 К до –(2…3)%/К при 330 К. Чувствительный элемент 1 термодатчика (рис.3) в виде параллелепипеда из монокристаллического кремния нижней широкой гранью прикреплен к контактной площадке 3, нане­сен­ной на пластину из монокристаллического сапфира 2. Второй контакт находится на верхней грани чувствительного элемента и соединен золотыми микропро­вод­никами 5 с другой контактной площадкой 4. Сверху чувствительный элемент залит смолой 6. Малый рабочий диапазон таких термодатчиков объясняется тем, что с ростом температуры ТКС уменьшается пропорционально величине 1/Т2. Поскольку значение номинального сопротивления (Rн) термодатчика зависит от размеров чувствительного элемента, а при разделении пластины кремния на отдельные чувствительные элементы невозможно добиться их полной иден­тичности, то разброс значений Rн в партии составляет ≈20%. Кроме того, наб­людается разброс значений ТКС в пределах 5%, обусловленный различной сте­пенью легирования кремния в процессе производства. Большое значение пока­зателя тепловой инерции разработанного термодатчика (≈10 с) ограничивает его использование в динамике.

Расширить измеряемый температурный диапазон можно, если включить параллельно кремниевому терморезистору пассивный резистор (независящий от температуры) при питании схемы постоянным током или последовательно – при питании схемы от источника постоянного напряжения. НПО Измерительной техники г.Королев разработан кремниевый датчик ТЭ-260 [2], работающий при температурах от 223 до 523 К.

Положительным значением температурного коэффициента удельного сопротивления в широком диапазоне температур обладает кремний, легиро­ван­ный примесями с малой энергией активации. На рис.4 показаны температурные зависимости удельного сопротивления кремния, легированного бором и фос­фо­ром, с различной концентрацией носителей тока [15]. Видно, что область собст­венной проводимости кремния с концентрацией носителей тока p, n ≅ 1020 м-3 начинается при температурах Т>450 К, а кремния с p, n ≅ 1023 м-3 – при Т>600 К. При меньших температурах и соответствующей концентрации носителей тока

Рис.3. Схема устройства кремниевого термодатчика с отрицательным ТКС.

 1 – кремниевый чувствительный элемент;

 2 – пластина из сапфира;

 3, 4 – металлизированные контактные площадки;

 5 – микропроводник;

 6 – смола;

 7 – выводы.

Рис. 4. Температурные зависимости удельного сопротивления кремния n- и

 p-типов проводимости.

 Концентрация носителей тока, м-3:

 1 – 1020; 2 – 1021; 3 – 1022; 4 – 1023.

температурный коэффициент удельного сопротивления имеет положительное значение.

На базе кремниевых чувствительных элементов с положительным ТКС рядом зарубежных фирм (Volvo, Siemens (Германия), Philips (Нидерланды), ITT Components Group (Великобритания), Rodan Industries Inc, Texas Instruments (США) и др. разработано и выпускается серийно большое количество термодат­чиков различного назначения. Чувствительные элементы этих приборов одно­типны и представляют собой кристаллы кремния n-типа проводимости, изготов­ленные в виде брусков или кубиков. Размеры чувствительных элементов могут несколько варьироваться для получения требуемого сопротивления.

Конечные стадии технологического процесса изготовления термодатчиков отличаются у различных фирм и зависят от предпочтительной конфигурации прибора. Общими операциями являются припаивание выводов к контактным поверхностям и герметизация чувствительных элементов смолой или стеклом. В некоторых конструкциях кремниевых датчиков брусок или пластину снабжают механи­ческими контактами, положение которых фиксируют частично расплав­ленной стеклянной трубкой или заливкой смолой. Луженые медные выводы присоеди­няют к торцевым металлическим контактам. На рис.5 показаны различ­ные конструкции таких термодатчиков. Рабочий диапазон датчиков с чувстви­тель­ными элементами на основе кремния n-типа чаще всего составляет интервал от 223 до 423 К. При помещении кремниевых чувствительных элементов в гер­метичный стеклянный корпус некоторым фирмам (Volvo, Philips) удается уве­личить верхний диапазон рабочих температур до 570 К [16,17].

Таким образом, на основе чувствительных элементов, изготовленных из монокристаллического кремния, разработаны и выпускаются серийно термодатчики с широким набором номинальных сопротивлений Rн, работающих в диапазоне температур несколько сотен Кельвина. Для датчиков этого типа харак­терны такие недостатки, как:

* значительный разброс номинальных сопротивлений (5…10)%, выз­ванный разбросом удельного сопротивления и размеров кристалла кремния.

# Рис. 5. Конструкции термодатчиков с кремниевыми чувствительными

 элементами.

 1 – вывод; 2 – смола; 3 – кремниевый чувствительный элемент;

 4 – никелевое покрытие; 5 – припой; 6 – стекло;

 7 – молибденовый охладитель; 8 – керамика;

 9 – золоченый контакт.

Уменьшение разброса значений Rн до (1…2)% достигается лишь разбраковкой чувствительных элементов;

* разброс значений ТКС, обусловленный разбросом степени легирования кремния. Уменьшение разброса значений ТКС ограничено возможностями сов­ременной технологии;
* достаточно большое значение показателя термической инерции из-за необходимости размещения полупроводниковых чувствительных элементов в корпусах для их защиты от окружающей среды и обеспечения электрической изоляции от объекта.

Кроме того, процесс сборки термодатчиков такого типа трудно поддается автоматизации и, как правило, осуществляется с использованием большой доли ручного труда.

* 1. Пленочные полупроводниковые датчики температуры.

Улучшение характеристик полупроводниковых датчиков температуры и упрощение их конструкции может быть достигнуто при использовании чувстви­тельных элементов, изготовленных из тонких пленок полупроводника, нанесен­ного на полупроводниковую или диэлектрическую подложку. Изготовление таких датчиков осуществляется массовыми методами планарной технологии, которые обеспечивают получение значений номинальных сопротивлений с достаточно высокой точностью и, кроме того, позволяют использовать при изготовлении лазерные методы подгонки номинальных сопротивлений.

Основным недостатком датчиков на основе автоэпитаксиальных структур «кремний на кремнии», а также на основе чувствительных элементов с диффу­зи­онными кремниевыми тензорезисторами является низкий верхний предел рабочих температур, что обусловлено резким ухудшением изолирующих свойств p-n пе­рехода при температурах более (410…430) К [18].

Большие возможности по дальнейшему совершенствованию пленочных термодатчиков возникли с появлением в серийном производстве гетероэпитакси­альных структур «кремний на сапфире» (КНС), которые представляют собой тонкую (от долей до нескольких микрометров) пленку монокристаллического кремния, выращенную на подложке из монокристаллического сапфира [19]. Использование структур КНС позволяет создавать термодатчики, характеризу­ющиеся сочетанием достоинств датчиков с монокристаллическими и пленочными кремниевыми чувствительными элементами. Применение монокристаллической пленки кремния для изготовления терморезисторов обеспечивает повышенную стабильность характеристик термодатчиков. Хорошие изолирующие свойства сапфира вплоть до температур около 1300 К позволяют создавать термодатчики, верхний предел рабочих температур которых, в принципе, ограничен только физическими свойствами кремния. Высокий коэффициент теплопроводности сапфира способствует снижению показателя тепловой инерции термодатчика.

В настоящее время на основе чувствительных элементов из КНС-структур разработан ряд термодатчиков. Так датчик температуры ТЭЭ-295, разработанный в НПО измерительной техники г.Королев, работает в диапазоне температур от 73 до 473 К и имеет основную погрешность 0,25% [2].

В Государственном научном центре «НИИТЕПЛОПРИБОР» были раз­ра­ботаны аналогичные датчики с термочувствительными элементами ТЭ-1 и ТЭ-2, работающие в диапазоне температур от 73 до 723 К и имеющие погрешность 0,25% и выходной сигнал (4…20) мА [20]. В этих датчиках линеаризация выход­ного сигнала осуществлялась с помощью одного или двух термонезависимых резисторов, в зависимости от способа питания – от генератора тока или гене­ра­тора напряжения (рис.6).

Для получения унифицированного выходного сигнала использован элек­тронный преобразователь. Структурная электрическая схема датчика с чувстви­тельным элементом модели ТЭ-2 с двумя терморезисторами, в которую включены два термонезависимых резистора, показана на рис.6а. Мостовая схема питается от стабилизированного источника постоянного напряжения 4В. Информативный сигнал в виде разности напряжений ΔU на измерительной диагонали моста, пропорциональный изменению сопротивлений термочувствительных резисторов, поступает на вход дифференциального усилителя электронного преобразователя датчика и преобразуется в стандартный сигнал постоянного тока (4…20) мА.

Рис.6. Структурная электрическая схема датчика температуры с двумя (а) и

 одним (б) терморезисторами.

В диапазоне измерения температур от t1 до t2 термочувствительный мост ба­лан­сируется внешним потенциометром (на рис. не показан) таким образом, чтобы нижнему значению t1 измеряемой температуры соответствовало начальное зна­чение 4 мА выходного сигнала датчика. Настройкой коэффициента усиления диф­ференциального усилителя датчика обеспечивается соответствие величины 20 мА выходного сигнала значению t2 верхнего предела измерений температуры.

На рис. 6б показана электрическая схема датчика температуры, реализованная на базе чувствительного элемента ТЭ-1 с одним терморезистором. В этом случае терморезистор R(t) вместе с линеаризующим шунтом Rπ включены в цепь питания от стабилизированного источника постоянного тока 0,8 мА. Тер­мо­независимый резистор R включен в цепь питания от другого стабилизи­рован­ного источника постоянного тока 0,8 мА. Разность падения напряжения ΔU на этих резисторах, пропорциональная величине измеряемой температуры, посту­пает на вход дифференциального усилителя датчика и затем преобразуется в стандартный выходной сигнал постоянного тока (4…20) мА.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о все более широком использовании в системах регулирования полупроводниковых датчиков температуры, разнообразие которых позволяет решить множество сложных задач. Появившиеся в последнее время датчики на изолирующих подложках типа КНС-структур позволяют во многих специфических случаях заменить традиционные металлические (например платиновые) датчики и тем самым удешевить изме­ре­ния и повысить надежность систем.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов Н.А., Лаппо В.В. Измерение параметров теплофизических процессов в ядерной энергетике.- М.: Атомиздат, 1979.
2. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник, т.1, кн.1/ Под общ.ред. Коптева Ю.Н., под ред. Багдатьева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В.- М.: ИПЖР, 1998.
3. Виглеб Г. Датчики. М.: Мир, 1989.
4. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Сов.радио, 1969.
5. Фогельсон И.Б. Транзисторные термодатчики. М.: Сов.радио, 1972.
6. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
7. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973.
8. Орлова М.П. Низкотемпературная термометрия. М.: Изд.стандартов, 1975.
9. Зарубин Л.И., Немиш Ю.И. Полупроводниковая криогенная термометрия. Обзор в кн. Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка, 1974, вып.16.
10. 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.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.1, М.: Мир, 1984.
12. Велшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. М.: Энергия, 1980.
13. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977.
14. Соколова А.А., Смирнов Н.И., Ларионов И.Б. Высокочувствительные датчики температуры из кремния, легированного золотом. –В кн. Совершенствование средств и методики измерения температуры при стендовых испытаниях изделий. Тезисы отраслевого семинара. Загорск, 1978.
15. Silicon temperature sensors.- Electron.Appl.News, 1982, v.19, №2.
16. Raabe G. Silizium temperatur sensoren von –50 °C his 350 °C – NTG – Faahber, 1982, №79.
17. Entre –55 °C et 300 °C penser au copteur de temperature silizium composauts.- Techniques d`applications mesures – 15, №4, 1985.
18. Mallon I., Germantion D. Advances in high temperature solid pressure transducers – Adv. In Instrum., 1970, v.25, part 2.
19. Папков В.С., Цыбульников М.Б. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. М.: Энергия, 1979.
20. Суханова Н.Н., Суханов В.И., Юровский А.Я. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур. Датчики и системы, №7, 8, 1999.