

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук

МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ
ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

УНІВЕРСУМ – Вінниця
2007

УДК 621.38
О 72

Рецензенти:

Р. Н. Квстний, доктор технічних наук, професор
В. М. Лисогор, доктор технічних наук, професор
В. О. Поджаренко, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 29.06.2006 р.)

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук

О 72 Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом.
Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. — 163 с.

ISBN 978-966-641-214-3

В монографії подано основи побудови мікроелектронних перетворювачів температури з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Проведено аналіз і визначено фізичні явища, які відповідають за реактивні властивості біполярних та МДН-транзисторів. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів перетворювачів температури.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів температури, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 621.38

ISBN 978-966-641-214-3

© В. Осадчук, О. Осадчук, Н. Кравчук, 2007

ЗМІСТ

Вступ	5
1. СУЧАСНИЙ СТАН МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ.....	6
1.1. Переваги частотного принципу і мікроелектронної технології при побудові перетворювачів температури.....	6
1.2. Інтегральні перетворювачі температури.....	9
1.3. Оптичні температурні перетворювачі.....	17
1.4. П'єзокварцові перетворювачі температури.....	18
1.5. Електронні перетворювачі температури.....	21
1.6. Термосенсиори для вимірювання температури з частотним виходом.....	23
1.7. Цифрові перетворювачі температури.....	26
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРМОЧУТЛИВИХ МДН-ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР.....	39
2.1. Закономірності, які отримані в результаті дослідження імпедансу структури метал-діелектрик-напівпровідник.....	39
2.2. Розробка математичних моделей фізичних процесів на поверхні МДН-структури.....	42
2.3. Розробка математичних моделей фізичних процесів у каналі з урахуванням напруги зміщення на затворі.....	48
2.4. МДН-структура як еквівалентне RC-коло.....	53
2.5. Моделювання імпедансу ділянки "Витік-Стік" двозатворного МДН-транзистора.....	55
2.6. Розробка еквівалентної схеми досліджуваної структури.....	64
2.7. Розрахунок імпедансу активної області двозатворного МДН-транзистора.....	67
2.8. Елементи теорії термореактивного ефекту в біполярних транзисторах.....	71
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР.....	77
3.1. Огляд сучасних методів дослідження реактивних властивостей напівпровідникових приладів.....	77
3.2. Розробка методики вимірювання імпедансу досліджуваної структури.....	78
3.3. Обґрунтування вибору методики визначення параметрів поверхневих станів.....	85

4. ЧАСТОТНІ ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР	88
4.1. Резонансні первинні вимірювальні перетворювачі.....	88
4.2. Обґрунтування методики розрахунку автогенераторних вимірювальних перетворювачів на основі методу Ляпунова.....	91
4.3. Розрахунок перетворювачів температури з резонансним контуром на основі двозатворного МДН-транзистора.....	92
4.4. Перетворювачі температури на основі МДН-транзисторних структур.....	98
4.5. Напівпровідникові вимірювачі температури на основі двох МДН-транзисторів.....	105
4.6. Частотні перетворювачі температури на основі біполярних транзисторів.....	119
4.7. Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з термоопором.....	128
4.8. Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом.....	133
5. РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ПРОЕКТУВАННЮ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	138
5.1. Вибір критеріїв оцінювання технічного рівня розроблених перетворювачів.....	138
5.2. Рекомендації по проектуванню автогенератора на основі транзисторних структур з від'ємним опором.....	141
5.3. Рекомендації по проектуванню частотних температурних перетворювачів.....	147
Література.....	153

ВСТУП

Використання досягнень сучасної мікроелектронної технології привело до значних успіхів у створенні різноманітних пристроїв контролю і керування. Проте часто отримання високих метрологічних характеристик апаратури досягається за рахунок підвищення її складності, габаритів, маси і вартості. Для подальшого суттєвого підвищення якості первинних перетворювачів необхідно використовувати нові фізичні явища і пошук нових принципів реалізації пристроїв, які відзначаються багатofункціональністю, малою споживаною потужністю, стабільністю характеристик, високою чутливістю, підвищеною швидкістю і надійністю. На сучасному рівні розвитку функціональної мікроелектроніки її досягнення можна використати для створення нового класу частотних перетворювачів температури, які відповідають цим вимогам.

Одним із таких наукових напрямків у розробці вимірювальних перетворювачів є використання залежності реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових пристроїв від впливу зовнішніх фізичних величин і створення на цій основі нового класу мікроелектронних перетворювачів температури з частотним виходом. У пристроях такого типу відбувається перетворення температури на частоту, що дозволяє виконувати перетворювачі за інтегральною технологією, і дає можливість підвищити швидкість, точність і чутливість, розширити діапазон вимірюваних величин, поліпшити надійність, заводськійкість і довготривалу стабільність параметрів. Крім того, поєднання на одному кристалі первинного вимірювального перетворювача із схемами обробки інформації уможливило створення "інтелектуальних" сенсорів. Використання в якості інформативного параметра частоти дозволяє уникнути застосування аналогоцифрових перетворювачів при обробці інформації, що знизить вартість систем контролю і керування.

Дослідження і розробка мікроелектронних перетворювачів температури з частотним виходом виконані на кафедрі електроніки Вінницького національного технічного університету і на кафедрі фізики Вінницького державного педагогічного університету ім. М. М. Коцюбинського.

Мета монографії полягає в тому, щоб надати допомогу в розробці аналітичних та експериментальних методів з реалізації мікроелектронних перетворювачів температури з частотним виходом.

Автори вдячні рецензентам доктору технічних наук, професору Кветному Р. Н., доктору технічних наук, професору Лисогору В. М. і доктору технічних наук, професору Поджаренку В. О., корисні зауваження яких сприяли поліпшенню змісту книги.

Відгуки про книгу, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою видавництва: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, "УНІВЕРСУМ-Вінниця".

1. СУЧАСНИЙ СТАН МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Використання досягнень сучасної мікроелектронної технології привело до значних успіхів у створенні різноманітних пристроїв контролю і керування. Проте часто отримання високих метрологічних характеристик апаратури досягається за рахунок підвищення її складності, габаритів, маси і вартості. Для подальшого суттєвого підвищення якості первинних перетворювачів необхідно використовувати нові фізичні явища і пошук нових принципів реалізації пристроїв, які відзначаються багатofункціональністю, малою споживаною потужністю, стабільністю характеристик, високою чутливістю, підвищеною швидкістю і надійністю. На сучасному рівні розвитку функціональної мікроелектроніки її досягнення можна використати для створення принципово нового класу частотних перетворювачів температури, які відповідають цим вимогам.

1.1. Переваги частотного принципу і мікроелектронної технології при побудові перетворювачів температури

Використання від'ємного опору мікроелектронних приладів створює умови для побудови генераторів, які є основним елементом перетворювачів з частотним вихідним сигналом. Такі перетворювачі поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і заводостійкістю, що характеризують перетворювачі з кодовим виходом. Подальше перетворення частотно-модульованого сигналу зводиться в основному до підрахунку періодів сигналу у продовж певного часу-операції, що за простотою і точністю перевищує всі інші методи аналого-цифрового перетворення. Використання частотного принципу роботи дозволяє отримати такі переваги:

1. При використанні частотних перетворювачів відкривається принципова можливість досягнення значно більшої точності вимірювання у порівнянні з амплітудними перетворювачами з цифраторами. Ця об'єктивна властивість високої заводостійкості, яку має частотна модуляція, є головною передумовою перспективності частотних перетворювачів у порівнянні з амплітудними.
2. З енергетичної точки зору найважливішою ділянкою вимірювального каналу для проходження інформації є ділянка від виходу вхідного перетворювача до входу підсилювально-перетворювальної апаратури, де інформація передається найменшим потоком енергії. Втрати інформації на цій ділянці не можна компенсувати ніякими наступними операціями. У зв'язку з цим, помилки, які виникають, наприклад, при використанні релаксативних, індуктивних, тензорезистивних і п'єзоелектричних амплітуд-

них перетворювачів дорівнює відповідно 0,02; 0,1; 1,0 і 10 %, розташовані у такому ж порядку, як і потужності вихідних сигналів перетворювачів, які дорівнюють відповідно 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-5} і 10^{-7} Вт. Вихідні потужності частотних перетворювачів, як правило, бувають значно більшими. При цьому потужність, яка визначає стабільність частоти генерації, необхідно вважати коливальною (реактивною) потужністю резонатора, яка тим більша, чим більша його добротність. Для порівняння покажемо, що у сенсорів з вібруючими пластинами або язичками вона складає (0,1 – 0,2) ВА, в сенсорах з LC-резонаторами – (0,01 – 0,1) ВА, в акустичних резонаторах або низькодобротних RC-генераторах – (10^{-4} – $3 \cdot 10^{-4}$) ВА.

- Зразкові міри частоти, наприклад, у вигляді кварцового генератора, можливо виконати із значно більшою стабільністю, ніж зразкові міри електричної напруги у вигляді нормальних елементів або напівпровідникових стабілізаторів напруги. Це пояснюється об'єктивною різницею інформаційних властивостей амплітудно-модульованих і частотно-модульованих процесів.
- У випадку застосування в інформаційних системах амплітудних сенсорів побудова комутаторів, які не вносять значних помилок у результати вимірювань, є найскладнішою проблемою. Паразитні Е.Р.С., перехідні опори і взаємний вплив каналів у таких комутаторах приводять до появи великих помилок, радикальної боротьби з якими не знайдено до теперішнього часу. При використанні сенсорів з частотно-модульованим вихідним сигналом, які практично не чутливі до вище перерахованих факторів, комутатори можна будувати за найпростішими схемами, не вносячи при цьому ніяких помилок у результати вимірювань.
- Точне інтегрування за часом вихідного сигналу частотних сенсорів виконується виключно просто. При цьому інтегруючий пристрій у вигляді сумуючого лічильника електричних імпульсів є ідеальним інтегратором з необмеженим часом інтегрування.

З другого боку, видатні досягнення мікроелектронної схемотехнології в основному були реалізовані у засобах обробки інформації та обчислювальної техніки, в яких значна номенклатура функціональних елементів вийшла на 7-8 рівень інтеграції із застосуванням базових технологічних процесів. Електронна система керування та контролю також потребує впровадження досягнень мікроелектронної схемотехнології, насамперед для первинних перетворювачів фізичних величин. Створення інтегральних первинних перетворювачів, які на одному кристалі об'єднують чутливий елемент і мікропроцесорну систему обробки вимірювальної інформації є одним із перспективних напрямків мікроелектронного приладобудування.

За останні десятиліття спостерігається інтенсивний розвиток сенсорів на основі мікроелектроніки, причинами якого є:

По-перше, безупинне удосконалювання технології і швидкі темпи розвитку науково-технічного прогресу, що вимагає відповідного розвитку

контрольно-вимірювальних систем, основою яких є сенсори. Крім того, протікання технологічних процесів і контроль їхніх параметрів здійснюється тільки за допомогою високоточних і надійних сенсорів.

По-друге, мікроелектроніка – могутній прискорювач індустрії сенсорів, вона є єдиною технологією, що на даному етапі розвитку науково-технічного прогресу може забезпечити необхідну масовість виробництва сенсорів.

По-третє, використання мікроелектроніки дозволяє отримати ряд переваг для сучасних сенсорів: довгострокову стабільність; високу надійність; великий термін служби; жорсткі умови експлуатації; високу точність; високу чутливість до вимірюваного параметра і нечутливість до інших факторів, що впливають; малі габаритні розміри, масу й енергоспоживання; інформаційну, конструктивну і технологічну сумісність з мікроелектронними засобами обробки інформації; низьку трудомісткість і вартість у мало- і багатосерійному виробництві.

Сьогодні на ринку в Західній Європі можна придбати 50 000 моделей сенсорів для вимірювання близько 100 параметрів. Виготовлені мікроелектронні сенсори у процентному відношенні складають: для вимірювання тиску – 49 %; температури – 18 %; параметрів руху – 12 %; рівня рідини – 10 %; витрат – 10 %.

До існуючих мікроелектронних сенсорів відносяться: напівпровідникові, тонко- і товстоплівкові, п'єзоелектричні, оптоелектронні, волоконно-оптичні. У загальному обсязі виробництва мікроелектронних сенсорів домінують перші три типи сенсорів, а за даними західної статистики в якості мікроелектронних фігурують часто тільки напівпровідникові сенсори, тому що це обумовлено високою розвиненістю твердотільної технології і широким можливостям, що надає кремній для розробок і виробництва сенсорів найрізноманітніших величин. Зараз кремнієві сенсори випускаються для вимірювання тиску, температури і магнітного поля, а за даними фірми ERA Technology Ltd (Англія), щорічний приріст європейського ринку споживання кремнієвих сенсорів складе більше 19 % до 2006 р., а вимірюваними величинами будуть тиск, оптичні параметри систем штучного зору, переміщення, температура, вологість, прискорення, концентрація хімічних речовин та інші.

Крім того, розробка мікроелектронних сенсорів – наукомістка область, тому що створення їх можливе тільки на визначеному етапі розвитку науки і технології мікроелектроніки [1, 2].

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що подальший розвиток первинних перетворювачів і інтелектуальних сенсорів лежить на шляху об'єднання переваг мікроелектронної схмотехнології і частотного принципу їх роботи.

Таким чином, частотний принцип і мікроелектронну технологію можна використати для створення первинних перетворювачів лише на основі

мікроелектронних приладів з від'ємним опором, реактивні властивості яких залежать від впливу різноманітної фізичної інформації. Використання від'ємного опору дозволяє створювати мікроелектронні генератори, частота генерації яких залежить від зовнішніх впливів різноманітної інформації, а параметри коливального контуру можна значно покращити регулюванням величини від'ємного опору.

1.2. Інтегральні перетворювачі температури

Для вимірювання температури в даний час використовуються напівпровідникові або мікроелектронні сенсори, що виконані у вигляді мікросхем, інфрачервоні сенсори, термометри опору, термістори, термопари. На рис. 1.1, в залежності від типу сенсора, наведений діапазон вимірювання температури. Мікроелектронні сенсори призначені для вимірювання температури в діапазоні від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони знаходять широке застосування у вимірювальних приладах, промислових установках, системах керування, медичній апаратурі, комп'ютерах, засобах зв'язку, блоках живлення та інше [3].

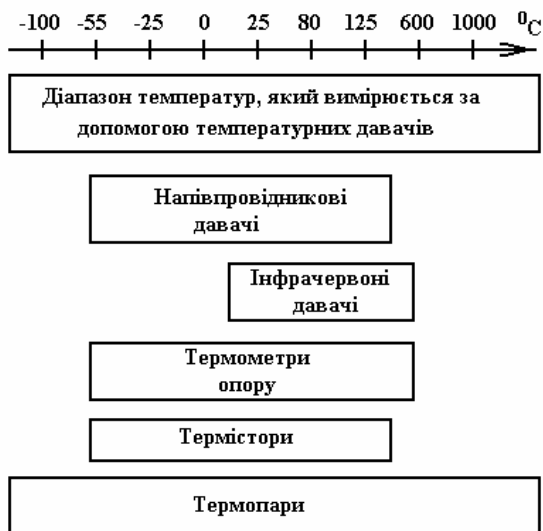


Рис. 1.1. Залежність діапазону вимірюваної температури від типу сенсора

У табл. 1.1 наведені обсяги виробництва сенсорів за останні шість років. У даний час випуск мікроелектронних сенсорів температури збільшується зі зростанням виробництва наведених вище приладів і, як випливає з табл. 1.1, обсяг виробництва цих сенсорів зріс за шість років на 60 %.

Таблиця 1.1.

Обсяг виробництва сенсорів температури

Рік	Типи сенсорів температури					
	Напівпровідникові, %	Інфрачервоні, %	Термометри опору, %	Термістори, %	Термопари, %	Загальний обсяг продажу, \$ млрд.
2000	12	16	19	37	16	2,02
2001	13	17	19	36	16	2,18
2002	14	17	19	35	15	2,34
2003	16	17	18	34	15	2,52
2004	17	17	18	33	14	2,71
2005	18	18	18	33	14	2,89
2006	19	18	18	32	13	3,09

До основних виробників напівпровідникових сенсорів температури відносять такі відомі фірми, як Analog Devices, National Semiconductor, Dallas Semiconductor та інші. Лідером серед них є Analog Devices, що зайнята розробкою і випуском температурних сенсорів з виходом по струму або напрузі, сенсори з перетворенням температури в часовий інтервал або цифровий код, сенсори з функціями контролера, вимірювальні вторинні перетворювачі для підключення термопар і термометрів опору [3].

У термосенсорах, що випускаються фірмою Analog Devices, які виконані за інтегральною технологією, як термочутливий сенсор використовується інтегральна мостова диференціальна схема. Кремнієві транзистори, що працюють у нижніх плечах моста, є термочутливими елементами (струм колекторного р-п переходу залежить від температури). Якщо зазначені транзистори працюють у режимі постійного відношення колекторних струмів r , то різниця напруг їхніх емітерно-базових переходів буде визначатися співвідношенням $(kT/q)/\ln r$, де k – постійна Больцмана, q – заряд електрона [4]. Крім того, величина r , обумовлена опорами в ланцюгах емітерів термочутливих транзисторів, також постійна, а різниця напруг емітерно-базових переходів буде пропорційна температурі середовища T , у якій працюють транзистори. Зауважимо, що в інтегральній схемі, в якій містяться термочутливі транзистори, здійснюється перетворення різниці напруг емітер-база у вихідний струм, величина якого пропорційна температурі (через крутість перетворення або коефіцієнт чутливості). Шляхом лазерного припасування відповідних опорів у технологічному процесі виробництва інтегральної схеми, забезпечуються необхідна точність перетворення температури у вихідний сигнал і вихідні параметри термочутливої схеми.

Розглянемо інтегральні термосенсори фірми Analog Devices, що працюють за даним принципом. Сенсори “температура – струм” являють

собою такі термочутливі інтегральні схеми. Схема цього термосенсора має два виводи і може бути зображена як термозалежний високоомний опір. На рис. 1.2 показані характеристики сенсора температура – струм, з якої випливає, що струм мікросхеми в діапазоні напруг $E = 4...30$ В не залежить від напруги і є лінійною функцією температури з крутістю перетворення $k = I_{ввих} / T = 1$ мкА/°С.

Такими схемотехнічно ідентичними один одному є термосенсори AD590 і AD592, що розрізняються каліброваними характеристиками і діапазоном робочих температур. Термосенсори типу AD590 використовуються звичайно як первинні перетворювачі, а вторинними перетворювачами застосовуються різні операційні підсилювачі, вхідний сигнал для яких подається з послідовно включеного з термосенсором опору.

Сенсори “температура – напруга” являють собою інтегральну схему, що містить термочутливий сенсор (аналогічний термосенсору AD590) і операційний підсилювач. На рис. 1.3 показана структурна схема такого сенсора. Характеристики розглянутого термосенсора визначаються термочутливим елементом і коефіцієнтом підсилення операційного підсилювача.

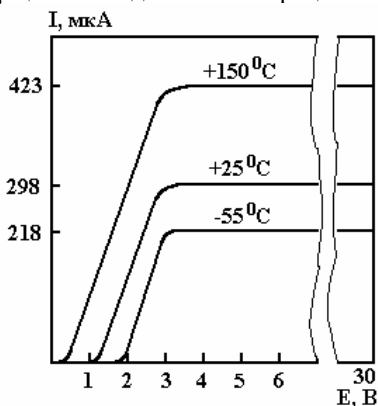


Рис. 1.2. Характеристики термочутливої частини інтегральної схеми (термосенсора)

Сенсори “температура – тривалість імпульсу” – це інтегральна схема, що здійснює перетворення температура-напруга, і включає широтно-імпульсний модулятор. Структурна схема розглянутого термосенсора представлена на рис. 1.4. Шляхом перерахування тривалості імпульсу і пази в температуру, визначається температура контрольованого термосенсором середовища (температура термосенсора). Зовнішній генератор стабільної частоти і мікропроцесор здійснюють вимірювання тривалості. Окрім того, мікропроцесор застосовується і для обчислення вимірюваної температури. Фірмою Analog Devices у даний час випускаються інтеграль-

ні сенсори “температура – тривалість імпульсу” типів TMP03, TMP04, що працюють за розглянутим принципом [4].

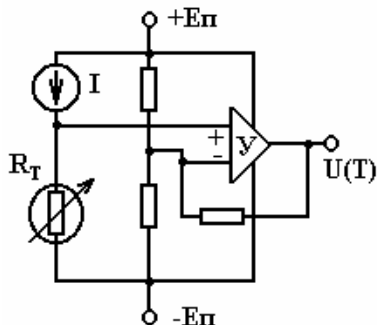


Рис. 1.3. Структурна схема сенсора “температура – напруга”:
 I – внутрішнє джерело живлення термосенсора;
 R_T – термосенсор; U – операційний підсилювач

До останніх розробок фірми Analog Devices відносяться цифрові температурні сенсори AD7814, AD7414 і AD7415, виконаних у корпусі SOT-23. До складу сенсорів входять АЦП порозрядного зрівноважування з потужністю споживання не більше 3 мкВт при частоті перетворення 1 Гц. Ці цифрові температурні сенсори мають малі розміри, низьку вартість, що дозволяє їх використовувати в пристроях із жорсткими обмеженнями габаритів і вартості [5, 6].

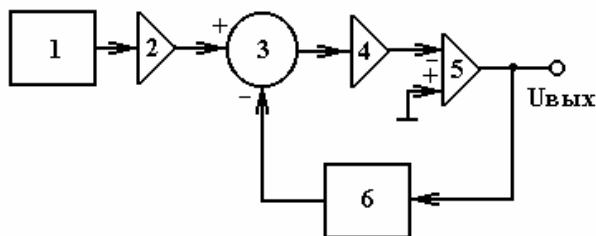


Рис. 1.4. Структурна схема сенсора “температура – тривалість імпульсу”:
 1 – термосенсор; 2, 4 – операційні підсилювачі; 3 – суматор;
 5 – компаратор; 6 – однорозрядний перетворювач аналог – код

Фірма Dallas Semiconductor, у даний час випускає цифрові температурні сенсори DS1620/21/23/24/25 і DS1820/21, що призначені для вимірювання температури навколишнього середовища в діапазоні від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони відрізняються високою точністю вимірювань ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ді-

апазоні температур від 0 до +70 °С і роздільною здатністю перетворення 0,5 °С) [6].

Для вимірювання температури поверхні, швидкості потоку газів, рідин широко застосовуються терморезистори в якості термочутливих елементів, тому що вони мають малі габарити, високу чутливість і низьку вартість. Розглянемо терморезистори [7], що розроблені на основі тонких шарів напівпровідникових матеріалів зі змішаних окислів перехідних металів. Ці терморезистори виготовлені на ситалових підкладках магнетронним розпиленням в атмосфері ($Ar + O_2$) мішеней з напівпровідникових матеріалів, що використовуються в об'ємних терморезисторах і характеризуються величиною $(2...4) \cdot 10^6$ Ом/□. До необхідного значення опір заготовок підганяється лазерною різкою частини напівпровідникового шару між електродами з урахуванням температури підкладки, що дає можливість зменшити розкид опору до 1...2 %. Зауважимо, що розглянуті зразки терморезисторів зручні для виміру температури поверхні, тому що їхні виводи розташовуються з однієї сторони підкладки і вони можуть кріпитися до поверхні контролюваного об'єкта методом приклеювання. Розроблені терморезистори мають високу експлуатаційну стабільність і за максимальною робочою температурою +125 °С фактична зміна опору не перевищує ± 2 % за 8000 годин [7].

На основі базової мікроелектронної технології розроблені конструкції товстоплівкових терморезисторів з напівпровідникового матеріалу на основі оксидів марганцю, кобальту і нікелю, що формуються на підкладках з алюмооксидної кераміки, представником такої технології є терморезистор типу TP-5, що має різнонаправлені виводи довжиною 10^2 мм і товщиною 0,1 мм з мідного дроту, гальванічно покритого сплавом олова з вісмутом. Він в основному призначений для використання в гібридних інтегральних мікросхемах і пристроях мікроелектроніки для вимірювання, контролю і регулювання температури, термостабілізації, термокомпенсації, а також ефективно застосовується як чутливий елемент контактних сенсорів температури поверхні твердих тіл.

Для використання в радіоелектронній апаратурі спеціального призначення, на основі базової технології виготовлення TP-5, розробляється серія товстоплівкових терморезисторів, що призначені для використання при температурі від -60 до +125 °С. Ці терморезистори виконані у вигляді прямокутної пластини з однонаправленими дрововими виводами довжиною 10^2 мм і діаметром 0,1мм [8].

Терморезистори на основі синтетичного напівпровідникового алмазу ефективно застосовуються завдяки їхньому широкому діапазону номінальних значень початкового опору (від сотень Ом до десятків кОм), а також робочих температур (від 200 до 800 К) і з високою розсіюваною потужністю (до 150 мВт), малих розмірів (діаметр 0,4 мм). Крім того встановлено, що застосування алмазних терморезисторів з різним характером залежності

ті постійної матеріалу $B(T)$ розширює функціональні можливості вимірних ланцюгів і пристроїв на їхній основі [9].

Для вимірювання температури в діапазоні 4,2...300 К розроблено сенсор температури, що являє собою резистор на основі плівки твердого розчину свинець–олово–телур, отриманої методом молекулярно-променевої епітаксії. У порівнянні з аналогічними сенсорами на основі германію і благородних металів, розроблений сенсор має високу чутливість в межах кімнатної температури і меншу вартість [10].

В даний час для вимірювання температури широко застосовуються сенсори з лінійною вихідною характеристикою у вигляді монокристалічних напівпровідникових приладів з р-п переходами (діоди, транзистори, стабілітрони), робота яких основана на лінійній залежності напруги прямого зсуву (при постійній величині вимірюваного струму) від температури. Відомо, що температурний коефіцієнт напруги (ТКН) для діодів і транзисторів різних видів складає від 1 до 3,5 мВ/К і головним чином залежить від густини струму в р-п переході. З ростом струму і зі збільшенням температури в результаті впливу зворотного струму р-п переходу, величина ТКН зменшується, що й обмежує верхню границю робочого інтервалу температур 80 °С для германієвих і 130 °С для кремнієвих приладів. Збільшити ТКН можна послідовно з'єднуючи декілька р-п переходів, але при цьому значно зростають розміри сенсора і його інерційність, а схема сенсора, в результаті введення великої кількості резисторів для компенсації нелінійності вольт-амперної характеристики й узгодження роботи окремих елементів, значно ускладнюється [11]. Тому, для збільшення ТКН можливо використання як чутливих елементів сенсорів, твердотільних напівпровідникових приладів з нелінійною вольт-амперною характеристикою – полікристалічних варисторів (ПКВ), що мають форму дисків діаметром 8 мм і товщиною 1 мм. Вони виготовляються з більшості відомих керамічних матеріалів, що слугують основою для одержання ПКВ. Окрім того, введення V_2O_5 в $BaSnO_3$ дозволяє одержати сенсори, що мають широкий температурний інтервал (від -30 °С до +260 °С), в якому спостерігається лінійна залежність спаду напруги на варисторі від температури. Оскільки ТКН залежить від величини струму, то це надає можливість плавно керувати чутливістю сенсорів у процесі експлуатації шляхом зміни величини вимірюваного струму, що дозволяє застосовувати сенсори в устаткуванні зі змінюваним режимом роботи [11].

Для вимірювання температури, поряд з напівпровідниковими сенсорами, що використовують температурні властивості р-п переходів, застосовують термістори, що виготовлені з окисних напівпровідників. Вони забезпечують вимірювання у широкому діапазоні температур від -80 °С до 300 °С і мають високий від'ємний температурний коефіцієнт опору до -5 %/°С. BetaTHERM Corporation з центром у Shrewsbury (США, Massachusetts) і BetaTHERM Ireland Ltd у Galway (Ірландія) є відомою фі-

рмою, що зарекомендувала себе, як виробника термісторних сенсорів. Використаний фірмою технологічний процес виробництва термісторів починається з початкових матеріалів (окисних напівпровідників) високого ступеня очищення, з яких спікаються керамічні термісторні пластини, металізовані з двох сторін. Основою термісторів є чіпи, що виходять у результаті дроблення пластини (рис. 1.5). Вихідною продукцією фірми є дискретні компоненти – чіпи (Chip Thermistors) і сенсори (Discrete Sensors), що призначені для вимірювання температури навколишнього середовища, і зонди (“пробники”, Custom Probe Assemblies) різної конструкції, максимально пристосовані для “точкового” вимірювання температури [12].

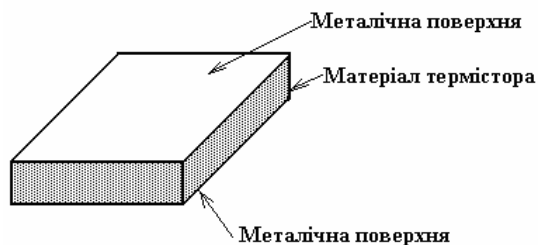


Рис. 1.5. Чіп-термістор

На основі тривимірної мікрообробки кремнію і поліаміду, розроблена технологія, що дозволяє виготовляти тонкоплівкові елементи для мікросенсорів різного призначення. Отримані зразки сенсорів перетворювачів тиску, температури, витрати, механічних імпульсів, акустичних коливань та інші, які знайшли широке застосування в різних технологічних процесах, геології, медицині, охороні навколишнього середовища, транспорті, зв'язку, побутовій техніці. Наприклад, термометр цифровий ТЦ-001 призначений для контролю температури в різних середовищах, діапазон вимірювання температури якого складає від -60 до $+200$ °С. Перетворювач температури рідини ПТЖ-01 призначений для контролю температури в агресивних рідких середовищах. Він застосовується в комплекті з цифровими приладами або в системах автоматичного керування, температурний діапазон вимірювань його складає від -60 до $+150$ °С [13].

Для створення чутливих елементів (ЧЕ) термометрів на основі кремнію, використовувався монокристалічний кремній р- і n-типів провідності, що мають як негативний температурний коефіцієнт опору (ТКО), так і позитивний [14]. На основі даного ЧЕ розроблено ряд сенсорів температури, частина з яких випускається серійно, вони мініатюрні, мають гарну швидкодію та успішно експлуатуються в системах терморегулювання при стендових іспитах. Наприклад, розроблено ЧЕ з позитивним ТКО на основі кремнію n-типу провідності з питомим опором $4,5$ Ом·см, що застосовуються в області температур $223...523$ К. Вони мають планарну структуру,

виготовлені у вигляді прямокутної пластини, розміри якої можуть складати 1×2; 2×4; 3×4 мм в залежності від конкретного типу сенсора. На рис. 1.6 представлена температурна залежність опору кремнієвого ЧЕ.

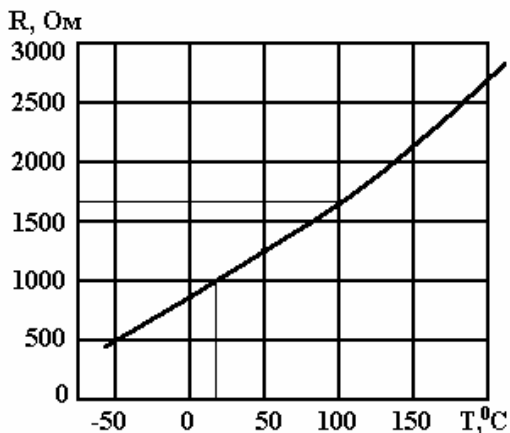


Рис. 1.6. Температурна залежність опору кремнієвого ЧЕ

Також на основі кремнієвого ЧЕ розроблені сенсори (ТЭ 260, 258, 286, 287) для вимірювання температури поверхні, повітряного середовища і для застосування в медицині. На рис. 1.7 показано зовнішній вигляд термометра ТЭ 260 у розрізі та його габаритні розміри. В термометрі ТЭ 260 крім кремнієвого терморезистора є ще пасивний резистор, виготовлений з резистивного сплаву, це дозволяє використовувати термометр, як активний елемент схеми (так звана схема “напівмоста”) з “вольтовим” виходом.

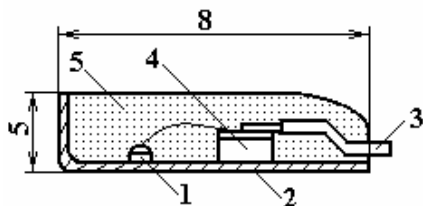


Рис. 1.7. Зовнішній вигляд термометра ТЭ 260 у розрізі:
1 – ЧЕ; 2 – корпус; 3 – провідники; 4 – плата; 5 – захисне покриття

Для роботи в діапазоні температур 73...573 К розроблено ЧЕ на основі використання плівкових кремнієвих структур – гетероепітаксціальних плівок кремнію, вирощених на сапфіровій підкладці (КНС). Використання структур КНС має ряд переваг перед монокристалічним кремнієм: більш широкий діапазон вимірюваних температур; наявність електроізоляційного шару між плівкою кремнію і вимірюваною поверхнею; спрощена констру-

кція термометра завдяки створенню гальванічних шарів під контактні області, що виключає перехідні плати від ЧЕ до вимірюваної схеми. Сенсори на основі КНС мають високу часову стабільність і стійкість до механічних і радіаційних впливів [14].

Розроблено конструкцію сенсорів температури на перемикаючих елементах, виготовлених з аморфного плівкового халькогенідного напівпровідника (х.с.н.) [15], плівкова структура яких наноситься термоіонним напилюванням і модифікується в плазмі активного газу ($\text{Ar} + \text{H}_2$, $\text{Ar} + \text{H}_2 + \text{F}_2$) з високочастотним збудженням, що вигідно відрізняється від традиційного вакуумно-термічного, своєю гнучкістю і технологічністю. Робоча частина активного матеріалу розташована між двома електродами, при цьому міжелектродний зазор складає 20 мкм. Як активний матеріал використовували склад х.с.н. системи Ga-Si-Ge-As-Te , що має стійкий ефект перемикання. Ці сенсори працюють у температурному діапазоні від -40°C до $+150^\circ\text{C}$ із відносною похибкою $\leq 2\%$ і можуть знайти застосування в ланцюгах автоматичного терморегулювання, у системах теплового захисту радіоелектронних і електричних пристроїв.

1.3. Оптичні температурні перетворювачі

Для низько-температурних вимірювань використовують сенсор температури, який містить чутливий елемент з ниткоподібного монокристалу GaAs з електричними виводами, кожен з яких виконаний з двох провідників різного поперечного перерізу. Корпус сенсора виготовлений з монокристалічного корунду у формі паралелепіпеда. Завдяки високій теплопровідності монокристалічного корунду при низьких температурах (коефіцієнт теплопровідності при $T=30\dots 40\text{ K}$ досягає 6000 Вт/мК , а при $77\text{ K} - 1300\text{ Вт/мК}$), а також використанню порошку Al_2O_3 , як теплообмінного середовища, покращуються теплові характеристики сенсора, тобто підвищується швидкодія. Зауважимо, що покриття теплоприймальної поверхні чутливого елемента графітом, а також висока оптична прозорість монокристалічного корунду дозволяють використовувати розроблений сенсор як мікроболометр для вимірювань променивих теплових потоків у смузі пропускання корунду ($0,145\dots 6\text{ мкм}$). З метою вимірювання температури сенсор попередньо градуують. Виміряна залежність $R(T)$ встановлюється на досліджуваній поверхні чи в об'ємі, а при здійсненні вимірювання теплових потоків, сенсор градуують як болометр в В/Вт . Крім того, випромінювання повинно падати перпендикулярно до зачорненої поверхні чутливого елемента, який покритий графітовим шаром [16].

Для теплового контролю об'єктів, що знаходяться під електричною напругою і працюють в електромагнітному полі, в умовах підвищеної пожежовибухонебезпечності, розроблено пристрій для вимірювання температури [17]. Термочутливий елемент пристрою виконаний у вигляді опти-

чно неоднорідної структури із суміші речовин, що прозорі для випромінювання джерела світла, з різними показниками заломлення, відмінними один від одного в межах робочого температурного діапазону для всього спектра випромінювання джерела світла. У розробленому пристрої виключається гальванічний зв'язок з контрольованим об'єктом, що забезпечує безпеку теплового контролю в умовах впливу високої електричної напруги й електромагнітного поля, у тому числі і НВЧ-діапазону.

Розроблено оптоволоконний сенсор температури, у якому термочутливий оптичний елемент на хвилеводі виконаний у вигляді дифракційної ґратки Бреґа. Термочутливий елемент на хвилеводі виготовляють за допомогою ультрафіолетового лазера з $\lambda = 249$ нм, який паралельним пучком освітлює ґратку, що впритул наближена до хвилеводу. Крім того, період ґратки повинен бути в два рази більший від періоду ґратки на хвилеводі, а недифрагований пучок повинен бути по можливості мінімальним. Зауважимо, що за рахунок тривалої дії потужного ультрафіолетового опромінення в серцевині проходять хімічні процеси, що приводять у місцях освітлення хвилеводу до незворотної зміни показника заломлення, і в результаті на хвилеводі утворюється дифракційна ґратка Бреґа – термочутливий елемент. Принцип роботи термочутливого оптичного елемента базується на залежності коефіцієнта відбивання ґратки від температури при заданій довжині хвилі падаючого випромінювання, а період ґратки Бреґа Λ і коефіцієнт заломлення n_0 серцевини хвилеводу змінюється від температури [18].

1.4. П'єзокварцові перетворювачі температури

Перейдемо до розгляду п'єзокварцових перетворювачів температури. Розроблено п'єзокварцові перетворювачі температури з частотним виходом [19, 20], у яких використовується багатомодовий термочутливий гармоніковий кварцовий резонатор Y-зрізу чи LC-зрізу. Встановлено, що при виборі параметрів елементів реактивного ланцюга в п'єзокварцовому перетворювачі з частотним виходом збуджуються деякі частоти, що залежать від вимірюваної температури. Крім того, за рахунок нелінійності характеристики активного елемента – транзистора у вихідному сигналі перетворювача, крім основних частот є комбінаційні коливання, а як вихідне коливання перетворювача використовується друга гармоніка різницевої частоти, що залежить від температури. Для гармонікового чутливого кварцового резонатора на частоту 26,5 МГц по третій гармоніці температурний коефіцієнт чутливості $C_{T1} = 1000$ Гц/°С, а в перетворювачі температурний коефіцієнт чутливості складає ≈ 4440 Гц/°С. З цього випливає, що підвищення крутості характеристики перетворення досягається завдяки використанню лише одного кварцового резонатора, зменшується дрейф нуля і поліпшу-

ється довгострокова нестабільність частоти, що визначається в основному старінням кварцового резонатора.

На рис. 1.8 показана схема п'єзокварцового перетворювача температури з частотним виходом на двох кварцових резонаторах LC-зрізу, що мають лінійні температурно-частотні характеристики, вони як і резонатори АТ-зрізу, є багатомодовими з інтенсивними ангармонічними модами. Крім того, резонатори цього типу, як і резонатори АТ-зрізу, Y-зрізу, належать до п'єзорезонаторів з локалізацією товщинно-зсувових коливань. Збільшення інформаційних відходів різницево-різницевої частоти f_{pp} і зменшення її відходів, викликаних дестабілізуючими факторами, приводять до збільшення чутливості перетворювача, причому реальний виграш досягає (40...100) щодо перетворювачів з одним термочутливим резонатором. Підвищення точності перетворення відбувається як внаслідок збільшення чутливості перетворювача, так і внаслідок зменшення дрейфу нуля через старіння п'єзорезонаторів. Оскільки вихідним коливанням перетворювача є різницево-різницева частота $f_{pp} = (f_3 - f_2) - (f_2 - f_1)$, то відходи нуля взаємно компенсуються [20].

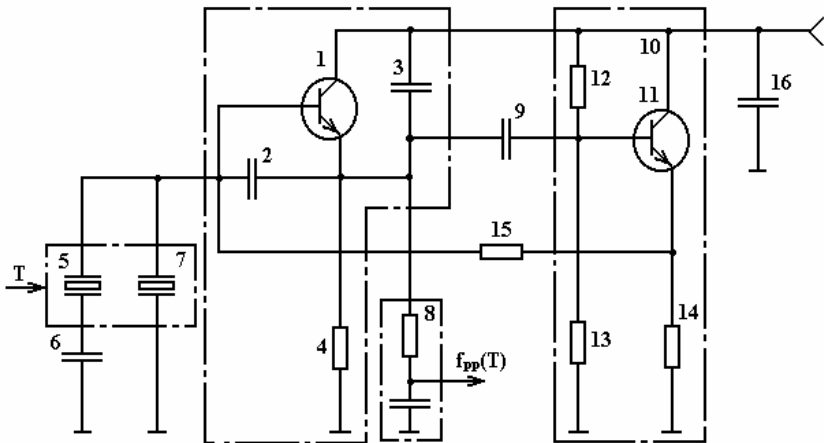


Рис. 1.8. Схема п'єзокварцового перетворювача температури з частотним виходом на двох кварцових резонаторах: 1, 11 – біполярні транзистори; 2, 3 – конденсатори зв'язку; 4, 14 – навантажувальні резистори; 5 – одночастотний термочутливий резонатор; 6 – перший конденсатор; 7 – двочастотний кварцовий термочутливий резонатор; 8 – вихідний RC-фільтр нижніх частот; 10 – емітерний повторювач; 12, 13, 15 – резистори; 16 – блокувальний конденсатор

Розглянемо пристрій для вимірювання температури, що містить термозалежний двочастотний генератор, у ланцюг якого, що частотно-задає, включений двочастотний термочутливий кварцовий резонатор з темпера-

турними коефіцієнтами різних знаків [21]. На емітерному навантаженні кварцового генератора формуються коливання, що містять широкий спектр складових комбінаційних частот. За допомогою фільтра низької частоти виділяється сигнал з різницевою частотою, що надходить на рахунковий вхід лічильника, а на опорний вхід якого подається сигнал з виходу дільника. Результат вимірювання, утворений на виході лічильника, пов'язаний з вимірюваною температурою.

Для вимірювання температури агресивних середовищ, високошвидкісних і рідинних потоків, розроблено пристрій для вимірювання температури (рис. 1.9). Пристрій містить термочутливий п'єзрезонатор, що розміщений у захисній капсулі, і включений у частотно-задавальний ланцюг вимірювального автогенератора. У пристрій введено електричний міст із двома плівковими терморезисторами, один із яких розміщений на поверхні термочутливого п'єзрезонатора поза зоною активних коливань, інший же – на зовнішній поверхні захисної капсули п'єзрезонатора через введenu термоізоляційну прокладку.

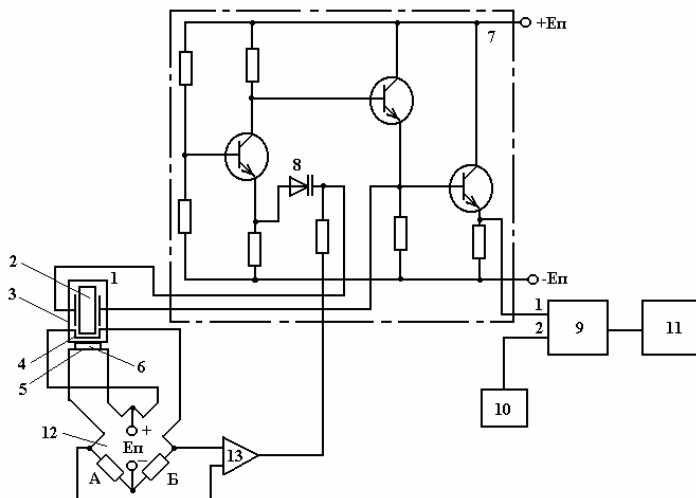


Рис. 1.9. Схема пристрою для вимірювання температури: 1 – чутливий елемент; 2 – термочутливий п'єзрезонатор; 3 – капсула; 4, 5 – терморезистор; 6 – термоізоляційна прокладка; 7 – вимірювальний автогенератор; 8 – варикап; 9 – блок формування різницевої частоти; 10 – опорний автогенератор; 11 – реєстратор; 12 – електричний міст; 13 – диференціальний підсилювач

Крім того, плівкові терморезистори диференційно підключено в суміжні плечі електричного моста, вимірювальна діагональ якого підключена до входів диференціального підсилювача. Перепад температур терморези-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-214-3>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-214-3>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-214-3>

Наукове видання

**Осадчук Володимир Степанович
Осадчук Олександр Володимирович
Кравчук Наталя Сергіївна**

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Редактор С. А. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. В. Осадчуком

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к.114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 14.03.2007 р.
Формат 29,7×42 ¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 9,47
Наклад 100 прим. Зам. № 2007-032

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к.114
Тел. (0432) 59-85-32