

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРИ (ДАВАЧІ)**

Вибрані і проаналізовані тензорезистори (давачі) постійного опору для еластичних елементів різних конструкцій (як найраціональніший елемент апаратури для дослідження тензорезистивних характеристик). Представлені конструкція і принцип роботи чутливих елементів апаратури для досліджень.

*Ключові слова:* тензорезистор, температура, деформація, вологість

Выбраны и проанализированы тензорезисторы постоянного сопротивления для эластичных элементов различных конструкций (как самый рациональный элемент аппаратуры для исследования тензорезистивных характеристик). Представлены конструкция и принцип работы чувствительных элементов аппаратуры для исследований.

*Ключевые слова:* тензорезистор, температура, деформация, влажность

The console beam of equal resistance of bending from different constructions of elastic elements (as the most rational element of the apparatus for investigation of strain-resistive characteristics) has been chosen and analyzed. The construction and the principle the work of apparatus for the investigation of strain-resistive sensing elements have been given in the present work.

*Keywords:* resistive-strain sensor, temperature, deformation, damp

**Вступ**

Якість вимірювальних систем (ВС) здебільшого визначається характеристиками використаних у них тензорезисторів. До цих характеристик ставлять дуже жорсткі вимоги. Так, наприклад, давачі повинні мати необхідні стабільні метрологічні характеристики, високу надійність роботи в умовах виробництва, бути технологічними і виготовлятися на недорогій елементній базі широкого застосування. Бажаємо, щоб вони були багатофункціональними, і водночас виборчими до величини, що вимірюється і не виборчими до всіх інших величин, що надходять на вхід ВС. Давачі повинні мати малі габарити і невелику масу, а їхня конструкція – чинити мінімальний вплив на досліджуваний об'єкт і на похибку виміру фізичної величини.

Під багатофункціональним тензорезистором (БТ) розуміється сукупність одного або декількох конструктивно об'єднаних чутливих елементів, розміщених в зоні дії декількох фізичних величин, що сприймають інформацію про розмір цих величин, і формують відповідні сигнали [1].

На сьогодні в країні не задоволений попит на давачі. Поряд з мікроелектронними давачами дискретні застосовують ширше. Наприклад, температуру газових потоків вимірюють серійними термперетворювачами ТСМ, ТСП і ін. Їх недолік – значні габарити, інерційність [2, 3]. Перевагою давачів, що розробляються сьогодні на основі мікрокристалів – ниткоподібних кри-

сталів (НК), є розширення робочого інтервалу вимірів, підвищення точності і швидкодії [4].

Можливість одержання з допомогою БТ інформації про декілька вхідних величин, дія яких зосереджена у відносно невеликому просторі, визначає їхнє широке використання при вирішенні багатьох науково-дослідних і виробничих завдань. Єдина технологія виробництва давача і вимірювально-перетворювальної частини БТ дозволяє створити інтелектуальні технічні засоби з розширеними функціональними можливостями.

БТ застосовують в машинобудуванні – при діагностиці різноманітних машин і механізмів; в сільському господарстві – при розробці засобів кількісної оцінки впливу різноманітних факторів на розвиток, стан і продуктивність посівів; в медицині – при діагностиці функціонального стану і різноманітних захворювань людини; в системах автоматичного контролю – при вимірюванні фізичних величин і видачі сигналів аварійної ситуації, інших областях науки і техніки. На сьогодні є роботи про багатофункціональні давачі, що опубліковані в 1989 [1] та 1990 рр. [5], розрізнені публікації. Розглянемо основні типи давачів БТ, поділивши їх на чотири групи:

- температури і деформації;
- температури і швидкості потоку, витрати;
- температури і вологості;
- температури і магнітного поля.

Після цього зупинимось на давачах тиску і витрати, наведемо опис давачів для виміру 3-х фізичних параметрів, а також – характеристики деяких функціональних матеріалів.

### Давачі температури і деформації

Для виміру температури і деформацій використовують тензотермодавачі (рис. 1) дротяні давачі, що складаються з тензочутливого і термочутливого елементів, які розташовані на одній основі. Термочутливий елемент, виконаний з термочутливого матеріалу, охоплює тензочутливий елемент з трьох сторін одним або декількома витками. Таке розташування термочутливого елемента дозволяє виміряти середню температуру поля навколо тензочутливого елемента, що буде найбільш близькою до середньої температури тензочутливого елемента тензодавача [6].

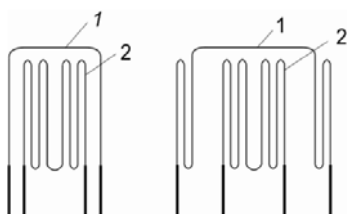


Рис. 1. Схема тензотермодавача:

1 – термочутливий елемент; 2 – тензочутливий елемент

Інший засіб монтажу тензо- і термодавачів полягає у виготовленні чутливого елемента (ЧЕ) з матеріалу деталі, на якій закріплюють давач з під'єднувальними вимірювальними дротинами. В деталі роблять заглиблення, встановлюють і закріплюють ЧЕ з давачем, а вимірювальні дротини пропускають через вивідний канал. З метою підвищення точності вимірів, у поверхневому шарі деталі при термоударних діях потоку робочого середовища, ЧЕ виготовляють у вигляді пластини, заглибленню в деталі надають східчастої форми. Причому розміри верхнього східця заглиблення відповідають розмірам пластини, а встановлюють пластину в заглиблення на одному рівні з поверхнею деталі давачем всередину [7].

Розроблено прилад для контролю тиску і температури [8]. Прилад РРТ реалізований на основі однокристалної мікро-ЕОМ і призначений для вимірювання і контролю допустимих значень температури, тиску, як нормального так і максимального.

На основі плівок ЦТС (цирконат титанату свинцю) [9] отримані давачі температури і динамічних деформацій поверхні з такими характеристиками: початкова ємність  $C_0 = 500$  нФ;

тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta < 0,02$ ; п'єзомодуль  $d_{33} = 8,10^{12}$  Кл/Н; чутливість 107 В/м; робочий діапазон частот від  $10^{-1}$  до  $10^8$  Гц; робочий діапазон температур  $-50 \dots +250$  °С і деформацій від  $10^{-8}$  до  $10^{-3}$  відносних одиниць; площа  $S = 3$  мм<sup>2</sup>; товщина  $h = 0,5$  мм.

У сучасній вимірювальній техніці важливе місце належить п'єзорезонансним давачам [10]. Серед багатофункціональних давачів часто виділяють такі, в яких підсумковий сигнал ЧЕ розділяється на складові, що несуть інформацію про відповідні входні величини БТ.

Параметричний БТ, описаний в роботі [11], виконаний на основі п'єзокераміки і дозволяє вимірювати температуру і тиск в діапазонах від 40 до 150 °С та від 0 до 2,42 МПа, відповідно. П'єзокерамічний елемент живиться від джерела постійного струму і зміна напруги на ньому несе інформацію про температуру. Вимірювання тиску ґрунтується на традиційному прямому п'єзо ефекті.

Схема БТ, де як чутливий елемент використано ниткоподібний монокристал кремнію з орієнтацією росту <III>, із сформованим на ньому *p-n*-переходом і точковими контактами наведена на рис. 2 [12]. Ділянка з провідністю *p*-типу такого монокристала служить тензочутливим елементом. Ділянка з *p-n*-переходом використовується для виміру температури.

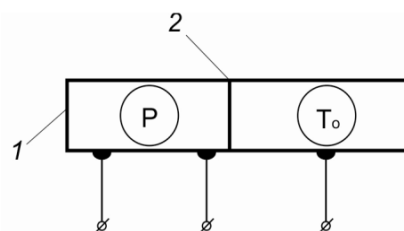


Рис. 2. Схема БТ для вимірювання зусиль  $F$  та температури:

1 – монокристал кремнію; 2 – *p-n* перехід

Конструкція, що наведена в роботі [13], має вигляд двох п'єзокварцевих резонаторів на одній пластині. БТ призначений для виміру температури і механічних зусиль.

П'єзорезонансні давачі застосовують для одночасного виміру тиску і температури рідини, газу і т.д. [14]. Пристрій містить давачі, виконані у вигляді п'єзорезонаторів, що з'єднані відповідно з одним і двома автогенераторами, опорний генератор, формувач сигналу різницевої частоти, блок відображення. На п'єзорезонаторі 1 водночас впливають тиск і температура, на п'єзорезонатор 2 – тільки температура. За умови, що п'єзорезонатори і тер-

мостатований п'єзрезонатор опорного генератора зроблені з однієї заготовки і мають один і той же зріз і однакові резонансні частоти, на виходах формувача різницевої частоти отримаємо сигнали, пропорційні на одному – тиску, а на іншому – температурі вимірюваного середовища. Досліджувані вхідні величини можуть бути незалежні одна від одної і тоді можливе їхнє сприймання за допомогою давачів, селективних до окремих величин БДС.

Зупинимось на конструкціях давачів з ниткоподібних кристалів.

У [15] наведений опис БДС для одночасного виміру зусилля і температури, що виготовлений на базі ниткоподібних кристалів кремнію діаметром 30...70 мкм з орієнтацією осі росту  $\langle 111 \rangle$  (рис. 3.) Центральна частина такого давача має провідність  $n$ -типу, а навколишній її зовнішній шар –  $p$ -типу. До кристала з провідністю  $n$ -типу (термоелемент) приварювались контакти з платиного мікродроту, легованого сурмою, а до шару з провідністю  $p$ -типу, тензоелемент – мікродроту з чистої платини. Початковий опір термоелемента складає 100...1000 Ом при температурі  $T = 20 \pm 5$  °С. Давач має малий показник теплової інерції 50...80 мс, високий коефіцієнт тензочутливості дорівнює 65. Малі габарити (1...4×0,05×0,05 мм) дозволяють вимірювати деформацію і температуру в просторово обмежених ділянках об'єкту досліджень.

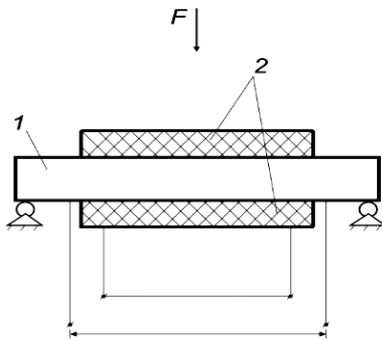


Рис. 3. Схема БДС для вимірювання зусилля  $F$  та температури  $T$ :

1 – ниткоподібний кристал  $n$ -типу; 2 – шар  $p$ -типу.

У [16] розглядається можливість створення первинного перетворювача на основі ниткоподібного кристала кремнію з аксіальним  $p$ - $n$ -переходом для незалежного і одночасного виміру деформації і температури. Це стало можливим, оскільки в мікрооб'ємі ниткоподібного кристала (НК) містяться області  $n$  і  $p$ -типу провідності, розділені  $p$ - $n$ -переходом. Шар  $p$ -типу володіє тензочутливістю  $K_p = 60...65$ , а  $n$ -

типу  $K_{11} = 5...7$ . Зміщений в зворотному напрямі  $p$ - $n$ -перехід має опір  $10^8...10^{10}$  Ом, високу чутливість до температури ( $10^4$  Ом. К<sup>-1</sup>) і малу величину  $K_{p11} = 0,3$ . Тому області  $n$  і  $p$ -типу провідності надійно ізолюються одна від одної зворотно зміщеним  $p$ - $n$ -переходом. Взаємний вплив  $p$ - і  $n$ -областей одна на одну складає  $10^{-2}...10^{-3}$  %. Центральна область  $n$ -типу і  $p$ -шар використовуються для виміру деформації, а зворотно зміщений  $p$ - $n$ -перехід – для виміру температури.

Робочий діапазон температур 77...400 К, деформацій дорівнює 0,3. Габарити ЧЕ 3...6×0,06×0,06 мм. Схема наведена на рис. 4.

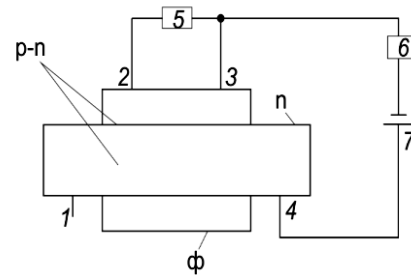


Рис. 4. Схема давача на основі НК кремнію з аксіальним  $p$ -переходом для незалежного вимірювання деформації і температури:

1-4 – відповідні контакти; 5, 6 – вимірювальні прилади; 7 – джерело струму.

У [17] визначені оптимальні розміри і форма такого перетворювача. При зміні температури перетворювач має практично нульову чутливість до деформації. Розраховані розміри перетворювача і подані рекомендації для практичного застосування.

Розроблений тензодавач для одночасного виміру деформації і температури, що містить тензо- і термочутливі елементи, ізоляційне покриття (рис. 5). Тензочутливий елемент виконаний у вигляді ниткоподібного кристала трубчатого форми, всередині якого встановлений у вільному стані термочутливий елемент. Як тензочутливий елемент використаний ниткоподібний кристал телуру, а як термочутливий – НК твердого розчину арсено-фосфіду галію, що легований сіркою [18].

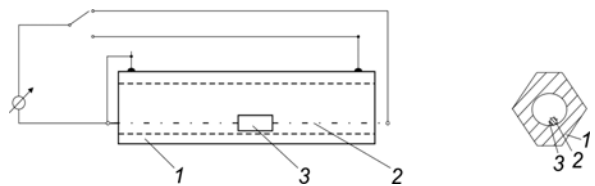


Рис. 5. Тензотермодавач:

1 – тензочутливий елемент трубчатого форми; 2 – ізоляційне покриття; 3 – термочутливий елемент

## Давачі температури і швидкості потоку

Основну групу датчиків для виміру швидкості потоку і температури складають терморезистивні давачі.

Анемометром називають прилад для виміру потоку, що базується як на електричному (терморезисторний анемометр, або анемометр з підігрівною спіраллю), так і на механічному (анемометр з крильчаткою) принципі дії.

Опір терморезистора з негативним ТКО типу М85 (фірма Siemens) змінюється від 10 кОм при 20 °С до 3 кОм при 100 °С. Опір моста складає 1 кОм [19].

Пристрій для одночасного виміру температури і швидкості потоку (рис. 6), містить термоанемометр постійної температури і термометр опору, вихід якого з'єднаний із входом змінного резистора, включеного в міст термоанемометра через блок компенсації. Відрізняється прилад тим, що з метою розширення частотного діапазону виміру температурних пульсацій потоку, в нього введений додатковий термоанемометр постійної температури, в вимірювальний міст якого включений терморезистор і змінний резистор, при цьому вихід термометра опору з'єднаний зі змінним резистором додаткового термоанемометра [20].

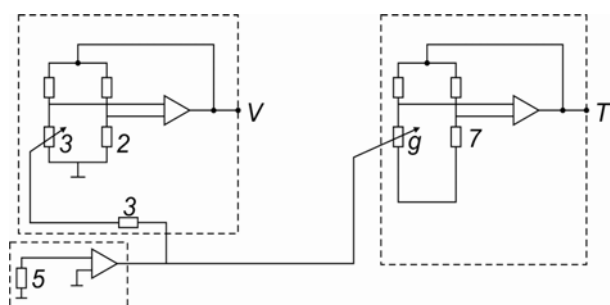


Рис. 6. Пристрій для одночасного вимірювання температури та швидкості потоку

Поліпшення метрологічних характеристик часто досягають схемними рішеннями. Наприклад, з метою підвищення точності виміру шляхом поліпшення частотної корекції термодавача вимірювального перетворювача температури в нього введено сустратор, квадрататор, помножувач, інтегратор, перший і другий резистори, коректуючий підсилювач та інвертор. До входу інвертора підключені вихід коректуючого підсилювача і другий резистор, що послідовно з'єднаний з першим резистором і першим входом помножувача, другий вхід якого через послідовно з'єднаний сустратор і квадрататор підключений до входу термоанемометра постійної температури. При цьому вихід помно-

жувача з'єднаний через інтегратор з першим резистором і першим входом коректуючого підсилювача, другий вхід якого з'єднаний з виходом вимірювального перетворювача температури [21].

З метою підвищення точності виміру швидкості потоку в схему термоанемометра введений дільник сигналів, один вхід якого під'єднаний до давача термоанемометра, інший – до високостабільного резистора, а вихід – до інвертуючого входу підсилювача зворотнього зв'язку, неінвертуючий вхід якого з'єднаний з виходом блоку компенсації [22].

Відомий термоанемометр [23], у якого ЧЕ виконаний з графіту. Графітові волокна (ГВ) одержуються піролізом, що дешевше від одержання металевих волокон протяжкою і травленням. Графіт має вищу межу міцності на розтяг – до 50000 кН/см<sup>2</sup>, що дозволяє робити більш тонким ГВ – до 2 мкм а, отже, зменшує постійну масу термоанемометра. Для збільшення термостійкості ГВ покривають карбідом кремнію, товщиною 0,1...5 мкм. Можуть застосовуватися ГВ, насичені бором від 0,001 % до 1 % по вазі, що збільшує температурний коефіцієнт електричного опору (ЕО) і робить ЕО постійним в робочому діапазоні температур. Використовують графіт з такими додатками, як FeCl<sub>3</sub>CoCl<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>, що збільшують температурний коефіцієнт ЕО. ГВ одержують піролітичною декомпозицією вуглеводів: бензолу, ацетилену або метану. ГВ має при 20 °С ЕО від 50 до 100 мкОм.см і температурний коефіцієнт ЕО не нижче 0,001С<sup>-1</sup>. ГВ має високу теплопровідність (500 Вт/м.К) і низьку теплоємність – 2,5 кал/моль. К при 20 °С.

У [24] розглядається можливість створення малоінерційного ЧЕ термоанемометра на основі НК Si, що вирощували методом хімічних газотранспортних реакцій. На рис. 7 показана блок-схема термоанемометра, терморезистор 1 виконаний з одного НК. Електроди 2 виконані з мідного дроту  $d = 0,3$  мм, і жорстко закріплені в утримувачі 3, що в свою чергу кріпиться на трубі 4,  $d_{\text{внутр}} = 10$  мм. Утримувач влаштований так, що терморезистор переміщується вздовж осі  $x$  паралельно своєму початковому положенню. Це дозволяє виміряти градієнт швидкості потоку по перетину труби 4. Конструкція термоанемометра дає можливість контролювати температуру газового потоку тим же терморезистором, працює в режимі малого робочого струму і не більше  $2 \cdot 10^{-4}$  А.

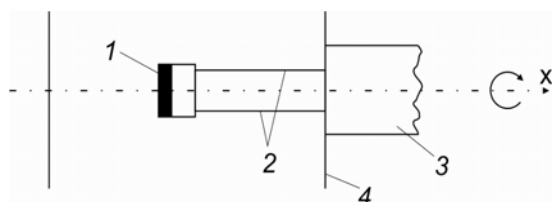


Рис. 7. Термоанемометр з ЧЕ на основі НК:  
1 – терморезистор; 2 – електроди; 3 – утримувач;  
4 – труба

В [25] описаний термоанемометр, що містить два паралельно розташовані, жорстко скріплені і електрично-ізовані ниткоподібні кристали напівпровідника (рис. 8), один з яких служить термоелементом, інший – підігрівачем, тиристорний генератор імпульсів з накопичувальним конденсатором, включеним паралельно з тиристором, до керуючого електроду якого приєднаний один з виводів термоелемента.

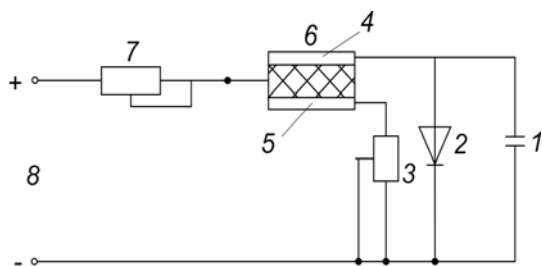


Рис. 8. Вимірвальна схема термоанемометра з НК:  
1 – конденсатор; 2 – тиристор; 3 – регулюючий резистор;  
4, 5 – виводи НК; 6 – термодатчик; 7 – резистор навантаження; 8 – джерело живлення

Анод тиристора, з метою підвищення чутливості, з'єднаний через підігрівач з термоелементом, а його керуючий вхід через змінний резистор з'єднаний з мінусом джерела живлення.

Розроблені термоанемометри [26] для вимірювання як малих 0...1,5 м/с, так і великих до 15 м/с швидкостей потоку повітря, чутливими елементами яких є ниткоподібні кристали твердого розчину  $GaP_xAs_{1-x}$  складу  $x = 0,4$ . Основні параметри термоанемометра визначаються характеристиками терморезистора (ТР): опір ТР в інтервалі 293...473K описується, як  $R = R_0 \exp(\Delta\varepsilon/kT)$ , де  $\Delta\varepsilon = 0,3B$ , а температурний коефіцієнт опору (ТКО) досягає значення 6,3 %/K (300K).

Конструктивно термоанемометр [27] містить утримувач, чутливий і компенсаційний елементи, джерело постійного струму, блок виміру і реєстрації. Особливістю його є те, що з метою зменшення похибки шляхом лінеаризації вихідної характеристики і підвищення чутливості, чутливий елемент виконаний з нитко-

подібного кристала  $GaAs_{0,6}P_{0,4}$  легованого Cu і Si, концентрація яких складає відповідно  $5 \cdot 10^{17}$  або  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  і  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

### Давачі температури і вологості

Для виміру вологості газів застосовують різноманітні типи давачів: електричні психрометри, гігрометри точки роси, гігрометри з підігрівними давачами, електролітичні давачі, зокрема сорбційні і ін.

Для електричних гігрометричних давачів з оксидним шаром розроблений [28] засіб температурної компенсації. Схема такого гігротермодатчика показана на рис. 9. На внутрішній і зовнішній циліндричних поверхнях тонкостінної алюмінієвої трубки 1 є оксидні шари 2 і 3; поверх цих шарів нанесені графітові шари, що проводять струм (електроди) 4.

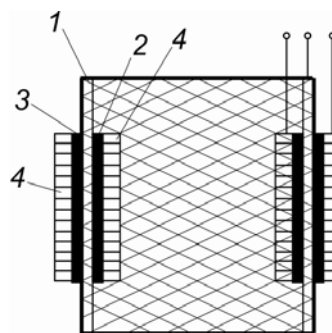


Рис. 9. Гігротермодавач:  
1 – трубка алюмінієва; 2, 3 – оксидні шари; 4 – електроди

Внутрішня поверхня трубки 1 заповнена вологоізолюючим лаком 5, внаслідок чого вологочутливий шар 3 перебуває в гігротермічній, а шар 2 тільки в термічній рівновазі з навколишнім середовищем. Такий гігротермодавач дозволяє водночас вимірювати вологість і температуру.

Відомо [29] про використання чутливого до температури фериту для виміру температури і вологості повітря.

Проведені дослідження деяких фізичних параметрів одного з феритів, який поєднує феромагнітні і напівпровідникові властивості. Досліджували зразок (рис. 10) у формі кільця із зовнішнім діаметром 13 мм і внутрішнім 9 мм при товщині 4,5 мм. Опір зразка  $R$  змінюється з температурою  $T$  за законом  $R = R_{0\text{exp}}(B/T)$ , де  $R_0, B$  – параметри матеріалу. Опір падає в інтервалі температур 0...60 °C від 900 до 10 кОм. Магнітний опір росте з температурою до точки Кюрі 35 °C. Пориста структура фериту призводить до адсорбції парів води з навко-

лишнього середовища. В результаті опір зразка при температурі 10 °С падає із зростанням відносної вологості від 55 до 95 % в межах від 14 до 12 кОм. Відзначимо, що магнітні елементи – ферити можна використовувати, як комплексні перетворювачі температури і вологості повітря.

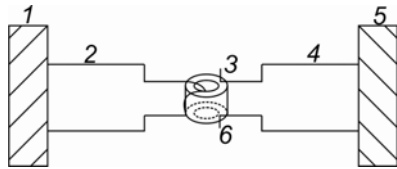


Рис. 10. Структура термоволожної вимірювальної системи

У [30] описується прилад, призначений для виміру вологості і температури повітря. Він складається з напівпровідникового термоелемента – високочутливого малоінерційного вологочутливого первинного перетворювача і перетворювача температури – напівпровідникового терморезистора. В [31] описується комплект апаратури, призначений для виміру температури і відносної вологості в звичайних і вибухонебезпечних газових середовищах. В нього входять первинні хлористо-літєві перетворювачі в звичайному виконанні ДВ-1К і в вибухоіскробезпечному виконанні ДВ-1В, та нормуючий перетворювач. Прилад забезпечує вимір відносної вологості в діапазоні 30...98 % при температурі середовища 5...50 °С з похибкою <1,5 %, і температури від 0 до 100 °С з похибкою <0,1 °С.

У [32] запропонований малогабаритний давач для виміру температури і відносної вологості. На підкладці з електроізоляційного матеріалу, наприклад, корунда, виконаної в формі тонкої прямокутної пластини, в відповідних її областях сформовані перший гребінчастий електрод для фіксації температури і давач відносної вологості, що містить два гребінчастих лінійних електроди, які покриті органічною високополімерною плівкою, електричний опір якої змінюється при зміні вологості.

Давач фірми Numicerat (Японія) побудований на базі кераміки з пористого напівпровідника *p*-типу [33]. БДП для виміру температури і вологості складається з кераміки (структура  $BaTiO_3-SrTiO_3$ ) з оксидно-рутенієвими електродами, до яких приварені відводи нагрівача і підкладки (рис. 11).

У цьому випадку використовується явище адсорбції вологи керамікою з відповідною зміною її активного опору. При вимірі ж темпера-

тури використовується залежність ємнісної складової.

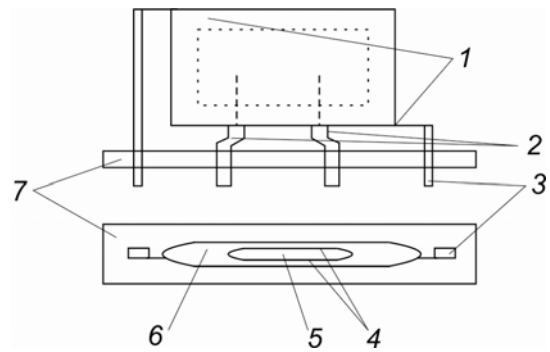


Рис. 11. Схема БДП фірми «Numicera»: 1 – відводи нагрівача; 2 – відводи кераміки; 3 – клеми; 4 – оксидно-рутенієві електроди; 5 – кераміка; 6 – нагрівач; 7 – підкладка

Одна з японських фірм пропонує БДС для виміру температури і відносної вологості повітря (рис. 12) з пористої керамічної підкладки з електродами, чутливим елементом до вологості, на одну з поверхонь якої додатково нанесений термочутливий елемент [34].

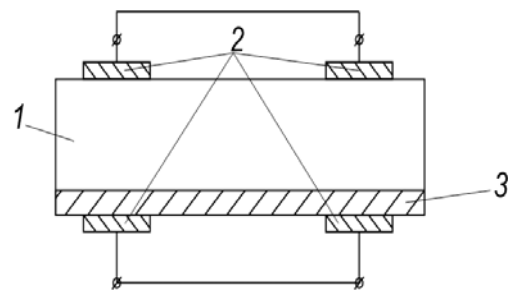


Рис. 12. Схема БДС для вимірювання температури та відносної вологості повітря: 1 – підкладка; 2 – контактні площадки; 3 – термочутливий елемент

Давач фірми Numicera (Японія) [35] призначений для виміру температури від -4 до +80 °С і відносної вологості від 0 до 100 %. Він виконаний у вигляді тонкоплівкового конденсатора. Вимір вологості ґрунтується на використанні залежності діелектричної проникливості полімерної плівки від вологості. В якості чутливого елемента температури застосований мініатюрний напівпровідниковий терморезистор.

У [36] розглядається термоелектричний давач вологості (рис. 13), що містить ЧЕ у вигляді гілок напівпровідникового матеріалу, що утворюють мікромодуль; на поверхні одних спаїв розміщений піддон з теплопровідного матеріалу з розташованою в ньому пластинкою з пористого матеріалу, що змочується; ресстрований сигнал складає 0...10 мВ; діапазон відносної вологості 20...90 %, температура +5...+50 °С. Число гілок

64, розміри 4,9×4,9×2,6 мм. Інерційність 12...35 с.

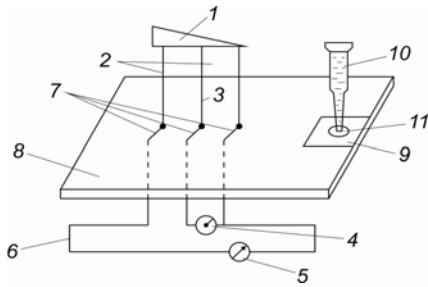


Рис. 13. Термоелектричний давач вологості:

1 – чутливий елемент; 2, 3 – контактні гілки;  
4 – перемикач; 5 – вимірювальний прилад;  
6 – струмовідводи; 7 – ламельки; 8 – тримач; 9 – паперова стрічка; 10 – зволожувач; 11 – отвір

З метою підвищення швидкодії і мініатюризації ЧЕ давача виконаний з монокристала телура голчастої форми, до вістря якого притиснутий пористий матеріал, що змочується, у вигляді паперової стрічки, а контактні гілки утворені приваркою до ЧЕ золотого мікродропу. Давач містить ЧЕ 1, контактні гілки 2 і 3, перемикач 4, вимірювальний прилад 5, струмовідводи 6, ламельки 7, тримач 8, паперову стрічку 9, зволожувач 10, отвір 11. Розміри ЧЕ 5,0×0,20×0,35 мм [37]. В цьому випадку частина кристала використовується, як давач вологості (вимірюється термо-е.р.с.), а частина, як термо-резистор. В [38] описаний вимірювальний перетворювач температури і вологості. Вказано його особливості і переваги над існуючими. Дано основні характеристики, похибка складає 2 %. Наведений зовнішній вигляд і розміри конструкції.

#### Давачі температури і магнітного поля

В нинішній час окрім традиційних гальваномагнітних приладів: магніторезисторів, магніто-діодів, магніотранзисторів та інших [39] широко використовуються давачі на магніточутливих інтегральних схемах, гетероструктурах, надрешітках. Виявлений гігантський магніторезистивний ефект в пермалоевих плівках NiFe, багатокомпонентних сполуках  $La_{1-x}Ga_xMnO_3$  [40].

Виходячи з вимоги мініатюризації і підвищення точності вимірів, виникає необхідність об'єднати функції виміру магнітного поля і температури в одному приладі, що має істотне значення в вузьких щілинах і обмеженому просторі магнітних систем. У [41] описаний такий давач температури і магнітного поля. Система складається з двох шарів *n-p*-напівпровідників

епітаксійного GaAs, нанесених з двох сторін напівізолюючої підкладки. Оскільки постійна Холла для GaAs *n*-типу слабо залежить від температури, то він може служити давачем магнітного поля. Чутливість датчика 5,2 мВ/кГс. Коефіцієнт нелінійності в межах 40 кГс – 0,26 %. Шар GaAs *p*-типу служить давачем термометра опору. Температурний коефіцієнт його рівний 0,05 град.<sup>-1</sup> в діапазоні 4,2...25 °С. Система може служити для одночасного визначення температури і магнітного поля.

Пропонується давач з НК [42] (рис. 14, А), що складається також з двох активних елементів, розташованих на одній підкладці. В якості давача магнітного поля використаний давач Холла з ниткоподібного монокристала InSb з питомим опором  $2 \cdot 10^{-3}$  Ом.см і концентрацією носіїв  $4,1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, температурний дрейф сигналу не перевищує 0,01 %К в діапазоні 77+200К, а в діапазоні (200...350)К максимальна величина температурного дрейфу чутливості <2,0 %К.

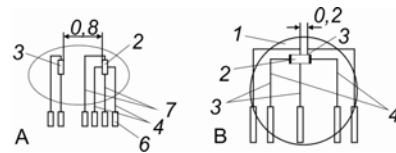


Рис. 14. Давачі магнітного поля і температури:

1 – підкладка; 2 – датчик Холла; 3 – датчик температури;  
4 – холлівські електроди; 5 – температурно-чутливий контакт; 6 – мідні відводи; 7 – струмові електроди

Як давач температури використовують терморезистор з ниткоподібного монокристала GaAs з концентрацією дірок  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> і питомим опором 0,1 Ом.см при  $T = 300K$ . Похибка, обумовлена магнітним полем  $B = 30$  кГс, складає 2 % в інтервалі температур (77...200)К і 0,2 % в діапазоні (200...350)К. Таке спільне застосування двох датчиків дозволило підвищити точність виміру магнітного поля і температури, завдяки тому, що в діапазоні 77+200К температурною похибкою виміру магнітного поля можна знехтувати, а в показання давача температури внести відповідну поправку по відомому магнітному полю. В діапазоні температур (200...350)К, нехтуючи впливом магнітного поля на опір давача температури, початково вимірюємо температуру, а індукцію магнітного поля визначаємо по вихідній напрузі давача Холла і значенню його чутливості при даній температурі.

Наступний тип приладу, що поєднує функції давача Холла і давача температури, це давач з GaAs, до якого приварено п'ять золотих елект-

родів, причому чотири електроди разом з кристалом утворюють елемент Холла, а п'ятим електродом (контакт GaAs-Au) вимірюється температура. Температурний коефіцієнт опору контакту  $\gamma = \frac{\Delta R_k \cdot 100}{R_{K_{300\Delta T}}}$  % може складати 2,5 % K.

Для зменшення впливу магнітного поля на опір контактів, останній легують акцепторною домішкою, що дозволяє знизити до 1 % похибку у вимірі температури (див. рис. 14, B).

Була розглянута технологія виготовлення давачів Холла з монокристалів GaAs *n*-типу, одержуваного технікою епітаксії, і їхні властивості в магнітних полях до 8T при температурі рідкого гелію і кімнатній температурі. Порівнювалися властивості датчиків, виготовлених з GaAs з концентрацією електронів  $1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $4,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , з точки зору їхнього застосування, для виміру сильних магнітних полів при низьких температурах [43].

Описані властивості мікромініатюрних датчиків Холла, виготовлених з плівок InAs методом групової технології, що базується на багатопаровому напиленні і фотолітографії [44].

Елементи Холла описані і в інших джерелах [45-47]. Розглядаються засоби підвищення чутливості, а також різноманітні конструктивні рішення. Датчики застосовуються, для виміру температури, а також напружень, зусиль переміщення тощо.

### Інші типи давачів

Зупинимось на багатофункціональних датчиках, призначених для виміру 3-х фізичних параметрів.

Схема БДС для виміру трьох фізичних величин (рис. 15) включає в себе мембрану, виконану у вигляді кремнієвої пластини, отриманої анізотропним травленням, ситалову підкладку, на яку засобом вакуумного напилення нанесена шарова структура, що складається з металевого електрода, гігроскопічного матеріалу на основі окису алюмінію і платинового плівкового термометра опорного, виконаного в формі меандра [48].

Давач, описаний в роботі [49] містить (рис. 16) п'єзокерамічний елемент у вигляді пустотілого циліндра, на внутрішній поверхні якого засобом впалювання створений суцільний шар срібного струмопровідного електрода, а на зовнішній – два інших шари, для забезпечення диференційного включення п'єзоелемента в підсилювально-перетворювальний при-

стрій. На п'єзоелемент нанесений шар гігроскопічного матеріалу і шар струмопровідного електрода, проникливого для молекул води.

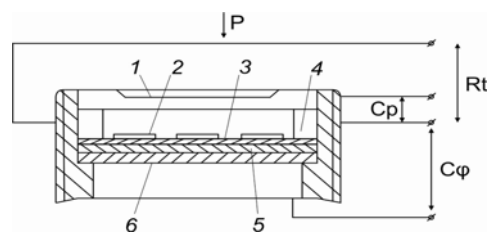


Рис. 15. Схема БДС для вимірювання тиску, температури і відносної вологості повітря:  
1 – кремнієва мембрана; 2 – плівковий терморезистор; 3 – окис алюмінію; 4 – контактна площадка; 5 – алюмінієвий електрод; 6 – ситалова площадка

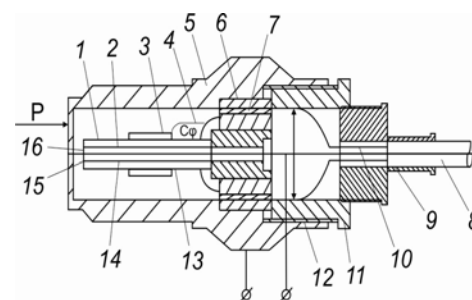


Рис. 16. Конструкція БДС для вимірювання тиску, температури і відносної вологості:  
1, 2 – електроди перетворювача тиску; 3 – гігроскопічний матеріал; 4 – електроди перетворювача вологості;  
5, 11, 13 – електричні відводи; 6 – корпус; 7 – опорна втулка; 8 – різьбова втулка; 9 – вихідний кабель; 10 – хвостовик; 12 – перехідна гайка; 14 – п'єзоелемент;  
15 – електрод перетворювача тиску; 16 – термоелектрон;  
17 – струмознімач; 18 – мембрана

Мідний струмознімач, що контактує з внутрішньою поверхнею п'єзоелемента, виконує додаткову функцію одного з термоелектродів термоелектричного термометра і має електричний контакт з струмопровідною металевою мембраною. До нього припаяний константановий термоелектрод. Вузол підтискування п'єзоелемента складається з різьбової і опорної втулок та перехідної гайки. Для виміру тиску використовують циліндричний п'єзоелемент, що працює з деформацією зсуву. Інформацію про температуру знімають з термоелектрода і електричного відводу, з'єданого з корпусом. При вимірі вологості молекули води, проникаючи в корпус, абсорбуються гігроскопічним матеріалом і змінюють його електричні характеристики.

У [50] описується багатофункціональний давач, що дозволяє вимірювати швидкість в потоках рідини або газу, температуру і розрідження. Використовується принцип теплопередачі при постійній температурі кристала. При



вимірах швидкості потоку відзначаються висока чутливість і значний рівень вихідного сигналу до 500 мВ. Чутливість датчика при вимірах температури 64 мВ/°С. При вимірах розрідження від атмосферного тиску до 102 мм рт. ст. вихідний сигнал змінювався на 300 мВ.

Мікроструктура перетворювача для виміру витрати і диференційного тиску описана в [51]. Розроблений фірмою Honeywell Inc., однокристальний тонкоплівковий інтегральний перетворювач (П), призначений для виміру масової і об'ємної витрат, диференційного тиску і потоку енергії газоподібних середовищ і наведені характеристики П, який має дві мостові резистивні вимірювальні схеми (МС), дві перетворювальні схеми (ПС), термокомпенсаційний нагрівний резистивний елемент і одну кремнієву підкладку. Одна МС використовується для виміру витрати або тиску, інша МС – для виміру температури. Чутливі резистивні елементи МС виробляються з металевих сплавів з високим питомим опором. Товщина елементів 1 мкм; ширина 5 мкм. Вихідні сигнали з МС подаються на ПС. Робочий діапазон виміру диференційного тиску від 0 до 250 Па. Постійна часу П рівна 0,005 с. Відзначено, що П відрізняється високою чутливістю і низькою вартістю і може виготовлятися засобом групової технології.

Фірмою Fisher and Potter, випускаються перетворювачі П, придатні для виміру статичного тиску  $P$  до 500 бар, абсолютного  $P$  до 2 бар, різниці  $P$  до 80 бар. Поріг чутливості по  $P$  0,6 Мбар. Врахована новітня технологія в області електроніки. Забезпечується коригування «нуля» П. Похибка  $\pm 0,25\%$ . Перетворювачі придатні для роботи практично з будь-якими рідинами і газами. Вихідний сигнал П: 4...20 або 10...50 мА. Завдяки модульному блоку з диференційним конденсатором, що включений в П, вони мініатюрні і дешеві [52].

Як чутливий елемент БТ часто використовують прилади різноманітного принципу дії, наприклад, тензорезистори із  $p$ - $n$  переходи [53]. Цікавий тип давача, оснований на ефектах тензорезистивному і фоторезистивному, фототензорезистор описаний в [58].

Мікросенсори виготовляються на основі гетеросистеми Ge/GaAs.

Кожний з таких мікросенсорів повинен мати високу чутливість, тільки до впливу одного з параметрів, будучи практично не чутливим до впливу інших. У плівках германію на арсеніді галію це досягається шляхом варіювання рівнів легування від  $10^{17}$  до  $10^{21}$  см<sup>-3</sup> і ступеня компе-

нсації  $K = N_D / N_A$  від нуля до одиниці, де  $N_D$  і  $N_A$  – концентрація донорів і акцепторів. При цьому можливе одержання плівок як  $n$ -, так і  $p$ -типу провідності [54].

У [55] розглянута концепція приладних структур чутливих до вологості матеріалів для інтеграції в мікросхеми в рамках пленарної кремнієвої технології. Мембрани з гігроскопічного полімерабутират ацетату целюлози з внутрішніми зв'язками, що є одним з чутливих до вологості матеріалів, придатних для інтеграції, значно більш прийнятні порівняно з реактивами, що використовуються при фотолітографії за термостабільністю, поглинанням води і інших параметрах. Розроблена мікросхема з вбудованою, чутливою до вологості, мембраною з цього матеріалу та з транзисторами з ізолюваним затвором.

Досліджені магнітні і основні електричні властивості температурно-чутливих магнітних напівпровідників (ТМП) [56]. Встановлено, що в області низьких температур ТМП виявляють температурну залежність і напівпровідникові властивості, аналогічні термісторам. З підвищенням температури провідність їх збільшується. Ця властивість використовується при виготовленні напівпровідникових приладів. При високих температурах спостерігається явище нелінійної провідності, відбувається різка зміна опору. Встановлено також, що з одного ТМП можна виготовити магнітні давачі і електричні давачі. При цьому можна отримати стабільний сигнал, коли обидва датчики діють водночас або роздільно. Означені властивості ТМП дозволяють використати їх в різноманітних багатофункціональних напівпровідникових приладах.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Алейтков, А. Ф. Многофункциональные датчики [Текст] / А. Ф. Алейтков, М. В. Цапенко // Измерения, контроль, автоматизация. – 1990. – № 2. – С. 50-57.
2. Болванович, Э. Й. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи [Текст] / Э. Й. Болванович. – Минск: Наука и техника, 1987. – 214 с.
3. Аналитическая справка по микроэлектронным датчикам [Текст]. – М.: Информприбор, 1990. – 50 с.
4. Байцар, Р. И. Электромеханические, терморезистивные и фотоэлектрические преобразователи на основе монокристаллов системы SiGe [Текст] / Р. И. Байцар, С. С. Варшава, Е. П. Красножен-

- нов // Неорган. материалы. – 1996. – т. 3 – № 7. – С. 789-793.
5. Использование термочувствительного феррита для измерения температуры и влажности [Текст] // Экспресс-информация: Аналитические приборы и приборы для научных исследований. – 1989. – № 7. – С. 5-7.
  6. Клокова, Н. П. Тензодатчики для экспериментальных исследований [Текст] / Н. П. Клокова, и др. – М.:Машиностроит, 1972. – 152 с.
  7. Сенин, В. С. А.с. 1456770 СССР. Способ монтажа тензо- и термодатчиков [Текст] / С. В. Сенин, В. В. Поднебесьев. – № 4267720/25-28; Заявлено 24.06.87; Оpubл. 07.02.89; Бюл. № 5.
  8. Прибор для контроля давления и температуры [Текст]. // Druck und Temperaturmeßgerät mit Überwachungsfunktion. – Handlich und flexibel, 1990. – 1 12 – С. 21. – Нем.
  9. Свиридов, Е. В. Сегнетоэлектрические свойства тонких пленок Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> полученных ВЧ катодным распылением [Текст] / Е. В. Свиридов, В. П. Дудкевич, В. В. Мухармое. – ЖТФ, 1985. – Т. 55. – М 5. – С. 959-961.
  10. Молов, В. В. Пьезорезонансные датчики [Текст] / В. В. Молов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
  11. Стипсон, В. Г. Комбинированный датчик давления и температуры [Текст] / В. Г. Стипсон, М. Хас // Приборы и элементы автоматизации и вычислительной техники: ЭИ. – 1988. – № 9. – С. 11-18.
  12. Дрожжин, А. М. А.с. 1024697 СССР. Малобазный термодатчик [Текст] / А. М. Дрожжин, А. П. Ермаков // М 3402374/25-28; Заявлено 22.03.83; Оpubл. 23.06.83; Бюл. № 23. – С. 3.
  13. Колнаков, Ф. Ф. А.с. 979903 СССР. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь [Текст] / Ф. Ф. Колнаков, В. А. Шевелев, В. М. Читова и др. // № 3319640/18-10; Заявлено 17.07.82; Оpubл. 07.12.82; Бюл. № 45. – 55 с.
  14. Бирюков, В. Я. А.с. №1509650 СССР. Устройство для измерения давления и температуры [Текст] / В. Я. Бирюков, А. Э. Вязнов // № 3972831/24-10; Заявлено 4.11.85; Оpubл. 23.09.89; Бюл. № 35.
  15. Дрожжин, А. И. Малогабаритные датчики температуры и деформации [Текст] / А. И. Дрожжин, А. А. Щетинин, Н. К. Седых // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 5. – С. 216-218.
  16. Дрожжин, А. И. Нитевидные кристаллы кремния с аксиальным p-n-переходом / А. И. Дрожжин // Дэн ВИНТИ № 2932-84. – Воронеж. – 1984. – 128 с.
  17. Дрожжин, А. И. Расчет оптимальных размеров первичного преобразователя на основе нитевидного кристалла кремния с аксиальным p-n-переходом [Текст] / А. И. Дрожжин, В. А. Родин, Я. К. Седых // Известия высших учебных заведений: Приборостроение. – 1989. – Т. 32. – № 1. – С. 93-95.
  18. Варшава, С. С. Первичные измерительные преобразователи механических и тепловых величин на основе полупроводниковых нитевидных кристаллов [Текст] / С. С. Варшава и др. // тез. докл. Всес. конф. по инф. изм. системам ИИС-81. – Львов. – 1981. – Т. 2 – С. 63-65.
  19. Виглеб, Г. Датчики [Текст] / Виглеб Г. – М.:Мир, 1989. – 196 с.
  20. Повз, И. Л. А.с. 905865 СССР. Устройство для одновременного измерения температуры и скорости потока [Текст] / И. Л. Повз, Г. П. Еремин, Ю. Д. Бебко.
  21. Савостенко, П. И. А. с. 1315834 СССР. Устройство для измерения температуры и скорости потоков [Текст] / П. И. Савостенко, С. П. Сербии // № 4015011/24 – 10; Заявлено 30.01.86; Оpubл. в Б.И., 1987; № 21.
  22. Кузнецов, В. И. А.с. 1307345 СССР. Устройство для одновременного измерения температуры и скорости потока [Текст] / В. П. Кузнецов и др. // № 3944948/24-10; Заявлено 23.08.85; Оpubл. в В.И., 1987; № 16.
  23. Пат. 4648271 США. Термоанемометр с чувствительным элементом из графита. Anemometer having a graphite fiber hot wire [Текст] / Woolf Laurence. – № 806761; Заявлено 09.12.83; Оpubл. 10.03.87.
  24. Дрожжин, А. И. Термоанемометр для малых скоростей потока [Текст] / А. И. Дрожжин и др. // Измерительная техника. – 1980. – № 10. – С. 33-35.
  25. Дрожжин, А. И. А.с. 1571512 СССР. Термоанемометр [Текст] / А. И. Дрожжин, А. П. Ермаков. – Воронежский политехнический и-т.
  26. Варшава, С. С. Разработка термоанемометров на основе нитевидных кристаллов арсено-фосфида галлия [Текст] / С. С. Варшава и др. // Материалы III научно-техн. семинара по электронным датчикам, сентябрь 1989. – М.:ЦНИИ «Электроника». – 1989. – 165 с.
  27. Варшава, С. С. А.с. 1569858 СССР. Термоанемометр [Текст] / С. С. Варшава и др. – 1990. – № 21.
  28. Берлинер, М. А. Измерение влажности [Текст] / М. А. Берлинер. – М.: Энергия. – 1973. – 400 с.
  29. Seni, Kyoshiro Использование чувствительного к температуре феррита для измерений температуры и влажности воздуха [Текст] / Seni Kyoshiro, Snida Jun-Achi, Murakami Koichi // IEEE Trans. Instrum. and meas. – 1988. – 37, № 3. – С. 466-470. – Англ.
  30. Исмаилов, Т. А. Полупроводниковый термоэлектрический измеритель влажности и температуры воздуха [Текст] / Т. А. Исмаилов // Приборы и техн. эксперим. – 1989. – № 4. – С. 249.
  31. Циделко, В. Д. Комплект аппаратуры для измерения температуры и относительной влажности

- газовых сред [Текст] / В. Д. Циделко и др. // Приборы и техн. эксперим. – 1981. – № 5. – 228 с.
32. Симидзу, Акира Датчик температуры и влажности [Текст] / Акира Симидзу, К. К. Сяпу // Заявка 62-156551, Япония. Заявл. 28.12.85. № 60-297455; Оpubл. 11.07.87. МКИ G 01 №27 / 12, G 01 K7/16.
  33. Цунэдзи, Нитта. Керамические многофункциональные датчики [Текст] / Нитта Цунэдзи // Автоматика, телемеханика и вычислительная техника: РЖ. – 1981. – № 7. – С. 12.
  34. Пат. 57-56719, Япония. Датчик температуры и влажности [Текст] / Мацусита Дэнки Санге К. К. – № 53-9103; Заявлено 30.01.78; Оpubл. 01.02.82 // Изобретения в СССР и за рубежом. – 1983. – № 14. – С. 89.
  35. Messamformer fur Tenchte und Temperature [Текст] // Regelungstechnische Praxis. – 1977. – Vol. 19. – № 5. – P. 151.
  36. Исмаилов, И. А. Полупроводниковый термоэлектрический измеритель влажности и температуры воздуха [Текст] / И. А. Исмаилов // Приборы и техн. эксперим. – 1989. – № 4. – С. 249.
  37. Варшава, С. С. А.с. 1784901, СССР. Термоэлектрический датчик влажности [Текст] / С. С. Варшава, З. И. Возный, В. Р. Григорова // Заявл. 15.06.90; Оpubл.
  38. Измерительные преобразователи температуры и влажности [Текст] / Jamada Masaru // Кэйссоку гидззюйд. Instrum and Autom. – 1989. – L7, № 1,86-87. – Яп.
  39. Викулин, И. М. Гальваномагнитные приборы [Текст] / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь. – 1983. – 104 с.
  40. Розенблат, М. Новые достижения и направления в развитии магнитных датчиков [Текст] / М. Розенблат // Приборы и системы управления. – 1996. – № 9. – С. 42-50.
  41. Kordos, P. Датчик температуры и магнитного поля из эпитаксиального GaAs [Текст] / P. Kordos, L. Jansok, V. Вепс // Cryogenics. – 1973. – T. 13. – № 9. – 312 с.
  42. Большакова, И. А. Датчики для одновременного измерения магнитного поля и температуры [Текст] / И. А. Большакова, С. С. Варшава, Т. А. Московец // Приборы и техн. эксперим. – 1980. – № 2. – С. 212-214.
  43. Kordos, P. Некоторые свойства датчиков Холла из GaAs при низких температурах [Текст] / P. Kordos, P., M. Polak // Elektrotechn. Cas. – 1989 – 32 – № 1. – С. 3-14. – Словац.
  44. Балванович, Э. И. Исследование свойств микроминиатюрных датчиков Холла из пленок [Текст] / Э. И. Балванович, К. С. Константинов, Э. М. Колесник // Весте АН БССР. Сер. физ.-мат. и. Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. н. – 1981. № 11. – С. 100-105.
  45. Пат. № 4315273, США. Элемент Холла на соединении АЗВ5 [Текст].
  46. Исмаилов, Т. К. Высокотемпературные арсенидгалиевые преобразователи Холла [Текст] / Т. К. Исмаилов и др. // Известия АН СССР, Сер. физ.-техн. и мат. – 1982. – № 2. – 143 с.
  47. Хара, Тору Высокочувствительные элементы Холла на GaAs и их применение [Текст] / Хара Тору // Electron Pans and Mater. – 1981. – № 3. – С. 73-84.
  48. Алейников, А. Ф. А. с. 1224626 СССР. Устройство для измерения давления [Текст] / А. Ф. Алейников // СССР – № 13796100/24-10, Заявл. 02.10.84; Оpubл. 15.04.86, Бюл, № 14. – 4 с.
  49. Алейников, А. Ф. А.С. 1348674 СССР. Датчик давления [Текст] / А. Ф. Алейников // СССР – № 3993398/24-10; Заявл. 24.12.85, Оpubл. 30.10.87; Бюл. ШО. – 2 с.
  50. Huang, Jin-Biao Многофункциональный датчик для измерения скорости потока, температуры и разряжения. Integrated multi – sensor for flow velocity, temperature and vacuum measurements [Текст] / Huang Jin-Biao, Jong Qin // Sens. And Actuators. 1989. – 19. M 91. – С. 3-Н. – Англ.
  51. Higashi, R. Микроструктура преобразователя для измерения расхода и дифференциального давления. Microstrature sensor for flow, differential pressure and energy measurement [Текст] / R. Higashi and other // Natur. Gas Energy Meas: 1 st and 2 rd IGT. Symp, Chicago, 1985-1986. – London; Chicago, 1987. – С. 263-278. – Аиув. Место хранения ГННТБ СССР.
  52. Измерительные преобразователи давления и расхода. Druck und Durchflub – mtbumformer. [Текст] / Verfahrenstecnik. – 1989. – 23. jNfe 5. – С. 60-62. – Нем.
  53. Пен, Х. Б. Одновременное измерение деформации и температуры полупроводниковыми тензорезисторами и р-п-переходами [Текст] / Х. Б. Пен // В сб. «Физика и техника полупроводников». – Новосибирск. – 1976.
  54. Мишин, В. Ф. Микросенсоры физических величин на основе пленок германия на арсениде галлия [Текст] / В. Ф. Мишин, Ю. А. Тхорик // Петербургский журнал электроники. – 1993. – № 3. – С. 48-51.
  55. Датчики влажности: чувствительные материалы и кремниевая планарная технология. Humidity sensors: sensing materials and silicon planar technology [Текст] / Nijikgawa M. // 2 Jnt. Meet. Chem. Sen. – Bordeaux. 1986. – С. 101-108. – Англ.
  56. Свойства многофункциональных температурочувствительных проводников с нелинейной проводимостью [Текст] / Seki Kyoghiro, Shida. // Jun-Ichi. «Murakami Koichs». – «Дэнки гаккай ромбука, Irans. Inst. Elec. End. Jap.», 1987. – 107 № 3 – Яп.

Надійшла до редколегії 14.04.2011.

Прийнята до друку 28.04.2011.