

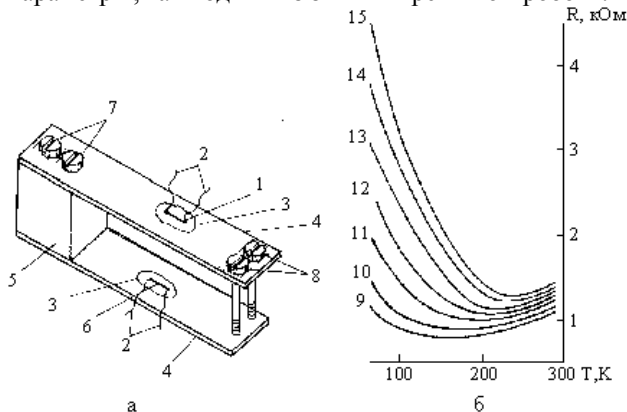
НОВІ ТИПИ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СЕНСОРІВ

© Байцар Р. І., Варшава С. С., Гінгін М. П., Дем'ян М. Л., 2000
Національний університет "Львівська політехніка"

Описані нові типи багатофункціональних сенсорів (і відповідних пристроїв) для вимірювання температури і деформації, температури і магнітного поля, вологості і температури. Як чутливі елементи сенсорів розглянуті ниткоподібні кристали напівпровідників Si, Ge, Si-Ge, Te, а також аморфні сплави, магнітні напівпровідники.

Ниткоподібні напівпровідникові кристали (НК) є доброю базою для створення сучасних вимірювальних засобів. Вони високочутливі, мініатюрні, технологічні, дешеві. Лідерство серед напівпровідникових матеріалів займає кремній. Так сенсори деформації-температури мають коефіцієнт тензочутливості ≈ 500 , температурну чутливість ≈ 400 Ом/К (77 К) [1].

В розглянутих нижче сенсорах можуть використовуватися як два (три) чутливих елементи (ЧЕ), кожен з яких незалежно вимірює один з фізичних параметрів, так і один – із змінним режимом роботи.



1 – ЧЕ, 2 – струмовідводи, 3 – зв'язувач, 4 – пружні елементи, 5 – опорна колодка, 6 – тензочутливий елемент, 7 – гвинти кріплення, 8 – деформуючі гвинти
Рис. 1. Конструкція давача (а) та його градувальні характеристики при різних рівнях деформації (б).

Сенсор температури і деформації, конструкція якого показана на рис. 1а, а градувальна характеристика – на рис. 1б, містить два ЧЕ – терморезистор 1 і тензорезистор 6, до яких під'єднані струмовідводи 2, прошарки клею 3, пружні елементи 4, опорну колодку 5, гвинти 7 і 8. Пружні елементи узгоджено деформуються за допомогою гвинтів 8. ЧЕ виготовлені з НК Ge n-типу, легованих Sb і Au; концентрація домішок становить $10^{17} \dots 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (терморезистор) і 10^{19} см^{-3} (тензорезистор).

Задаючи певний рівень деформації, отримуємо ту чи іншу термометричну характеристику $R(T)$. На

рис. 1б криві 9...15 відповідають рівням деформації: 0; (-0,3; -0,6; -0,9; -1,2; -1,5; -1,8) $\cdot 10^{-3}$ відн. од. Таким чином, маємо змогу задавати градувальну характеристику терморезистора, а також змінювати положення точки мінімуму характеристики (253...163 К). Контроль рівня деформації виконує тензорезистор, тензочутливість якого практично не залежить від температури [2].

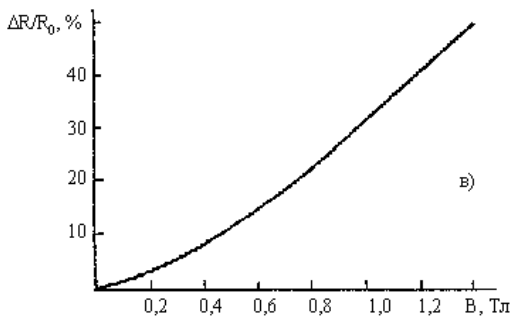
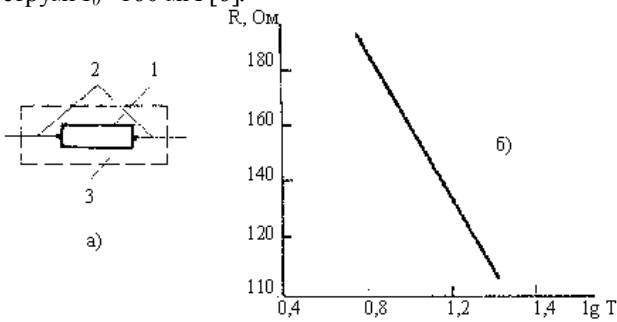
Низькотемпературний сенсор, який виконаний з НК телуру з питомим опором $\rho=0,6$ Ом·см при 300 К і з відношенням діаметра до довжини 0,05...0,1 дозволяє вимірювати як температуру (1...20 К), так і магнітне поле.

На рис. 2а показано схему конструкції сенсора, на рис. 2б і 2в відповідно градувальні характеристики при вимірюванні температури і магнітного поля (4,2 К). При вимірюванні температури сенсор розташовується вздовж ліній магнітної індукції. Залежність опору від температури має вигляд $R_0 = A - B \lg T$, де A і B – константи. У цьому випадку нехтують величиною поздовжнього магнітоопору, а, повернувши його на 90° , по величині поперечного магнітоопору визначають індукцію магнітного поля. Тут поперечний магнітоопір досягає 60 % в полях $B=1,5$ Тл. Залежність $\Delta R/R_0=f(B)$ близька до квадратичної [3].

Наступний тип сенсора використовується для одночасного вимірювання як магнітного поля ($B=0 \dots 0,5$ Тл), так і температури (233...333 К). Він по суті є удосконаленим варіантом раніше розробленого сенсора, який містив перетворювач магнітного поля (елемент Холла) і терморезистор, що виконані з НК [4]. Тут як сенсор магнітного поля використано магніторезистор з кристала InSb з $\rho=0,01$ Ом·см, а терморезистор – з твердого розчину Si-Ge легovanого Zn з $\rho \approx 0,6 \dots 1,0$ Ом·см, який забезпечує лінійність термометричної характеристики $R(T)$ (рис. 3б). Величина магнітоопору в ньому мінімальна (0,02 %).

Схема конструкції сенсора наведена на рис. 3а, де 1 – магніторезистор, 2 – терморезистор, 3 – підкладка з Mn-Zn фериту, 4 – струмовідводи. Феритова підкладка служить, головним чином, концентра-

тором магнітного потоку [5]. Рис. 3в показує, що чутливість сенсора до поля на підкладці (крива 1) більша від його чутливості без підкладки (крива 2). Тут ΔU – приріст напруги на ЧЕ за рахунок магнітного поля $\Delta U = U_B - U_0$ при стабілізованому робочому струмі $I_0 = 160$ мА [6].



1 – ЧЕ, 2 – струмопідводи, 3 – підкладка.

Рис. 2. Схема (а) і градувальні характеристики давача температури (б) та давача магнітного поля (в).

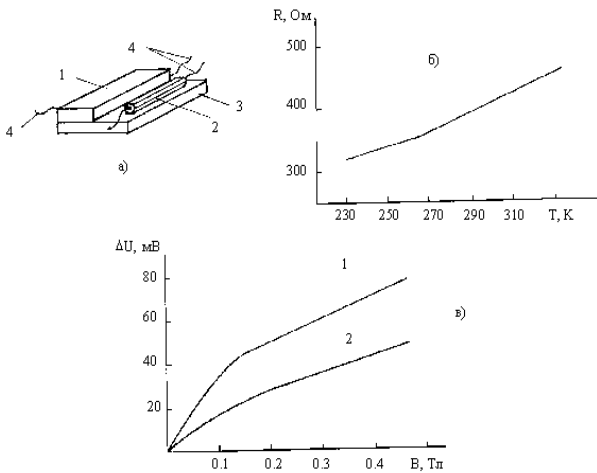


Рис. 3. Вимірювач магнітного поля і температури (а), градувальна характеристика терморезистора (б) та градувальна характеристика магнеторезистора (в).

Розроблено одноелементний сенсор для вимірювання температури і магнітного поля. Такі температурочутливі магнітні напівпровідники відомі. Проте для вимірювання температури і магнітного

поля в них використовують роздільно два пристрої, що ускладнює процес вимірювання [7].

В даному сенсорі ЧЕ 1 виготовлено з пресованого марганець-цинкового фериту $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ складу $x = 0,5$ з питомим опором $500 \dots 1000$ Ом·см (рис. 4а), контакти 2 створені з привареного лудженого мідного дроту 3, закріпленого індієм. Задаючи через ЧЕ малі робочі струми ($I_0 \leq 50$ мкА), використовуємо сенсор для вимірювання температури (рис. 4б). При цьому похибка $\approx 0,1\%$ при струмах $I_0 > 5$ мА, що є необхідними для вимірювання індукції магнітного поля (рис. 4в). Тут залежність $\Delta U = f(B)$ відповідає температурі 300 К при $I_0 \approx 5$ мА, а в разі необхідності - в дану залежність вноситься відповідна температурна поправка [8].

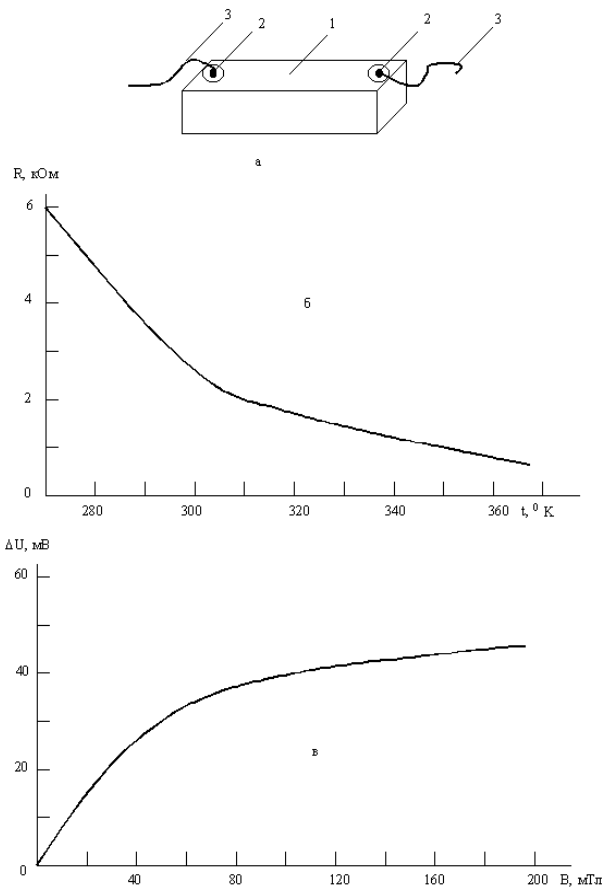


Рис. 4. Одноелементний сенсор для вимірювання температури і магнітного поля (а), градувальна характеристика давача температури (б) та градувальна характеристика давача магнітного поля (в).

Зупинимось на багатофункціональному сенсорі, який служить для вимірювання трьох параметрів: деформації, температури і магнітного поля. Як чутливий елемент в ньому використовується голчастий напівпровідниковий кристал твердого розчину $Si_{1-x}Ge_x$ складу $x=0,05$, легований Zn з питомим опором $0,5$ Ом·см. ЧЕ 1 (рис. 5) складається з трьох частин,

утворених чотирма точковими контактами так, що частина зі сторони більшого поперечного перерізу (2-3) використовується для вимірювання деформації, середня (3-4) – для вимірювання температури і частина зі сторони вістря (4-5) – для вимірювання магнітного поля.

При роботі сенсор розташовують на пружному елементі, приклеюючи частину 2-3 до цього елемента. Дана частина служить тензорезистором з коефіцієнтом тензочутливості $K = \Delta R/R_0 \varepsilon$ більшим 100 ($\Delta R/R_0$ – відносна зміна опору, ε – відносна деформація розтягу або стиску). Терморезистор (частина 3-4) має лінійну залежність $R(T)$ з температурним коефіцієнтом опору (ТКО) $\approx +0,4$ %/К. Для вимірювання індукції магнітного поля використовується нелінійна S – подібна ВАХ контакту 4. Оптимальна чутливість та лінійна залежність приросту напруги $\Delta U = f(B)$ при $I_0 = \text{const}$ забезпечується таким співвідношенням частин ЧЕ: 3:2:1.



Рис. 5. Багатофункціональний сенсор.

Температурна зміна тензочутливості сенсора в інтервалі 293...353 К не перевищує 10 %, магнітоопір ЧЕ $< 0,1$ %. Тому магнітне поле не впливає на покази перетворювачів деформації і температури [9].

Для побудови багатофункціональних сенсорів використовують різні фізичні та конструкційно-технологічні принципи, а також способи отримання напівпровідникового матеріалу [10]. Перспективними в сенсоричі вважаються аморфні матеріали. Наприклад, на основі аморфних плівок телуриду германію (α - GeTe) створені температурні сенсори [11].

Проте аморфний сплав GeTe можна отримати простіше за допомогою лазерного випромінювання. В цьому випадку пластину Te розташовують на підкладці n - Ge і пропускають зверху неперервне випромінювання CO₂ - лазера протягом 5...15 с з густиною потужності 200...400 Вт/см². Утворений сплав відокремлюють від підкладки і наносять на нього з протилежних сторін In - контакти [12].

Схема отримання аморфного сплаву GeTe показана на рис. 6а, де 1 – підкладка з n-Ge, 2 – пластина Te, 3 – лазерна установка ЛГ-25, 4 – аморфний сплав, 5 – індієві контакти, 6 – струмовідводи.

Терморезистивні параметри отриманого сенсора: $R_{\text{ном}} = 100 \text{ кОм} \dots 1 \text{ МОм}$ (300 К), ТКО ≈ 5 %/К, температурний діапазон 123...373 К. Даний сенсор може вимірювати також такий фізичний параметр, як відносну вологість повітря (20...100 %). Градувальні криві для цього випадку наведені на рис. 6б.

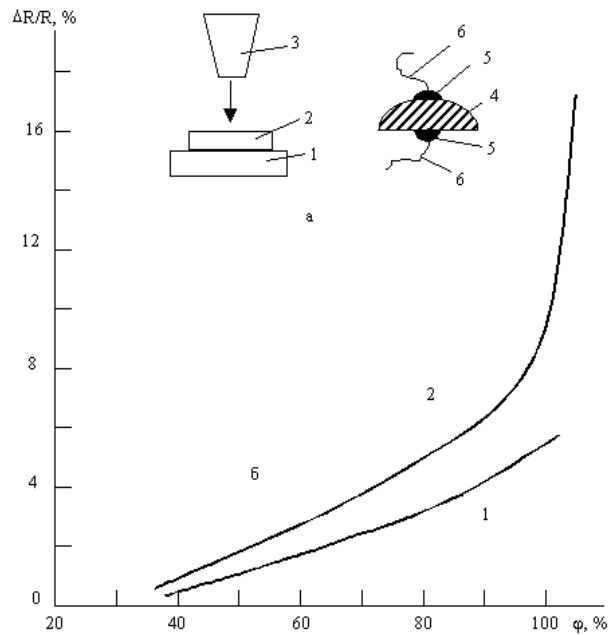


Рис. 6. Схема отримання аморфного сплаву (а), градувальна характеристика датчика вологості (б), при 25⁰ С (1), і 50⁰ С (2).

Зупинимося на способі визначення точки роси і температури. Переважно точку роси визначають шляхом збудження незатухаючих коливань резонатора, при термоелектричному охолодженні якого вимірюють частоту коливань резонатора і температуру. Якщо резонатор є п'єзокварцевим, то наявність гістерезису та висока частота власних коливань (5...30 МГц) ускладнюють вимірювальний процес та знижують точність [13].

Автори запропонували нове виконання резонатора зі струною з НК Si-Ge, жорстко закріпленою в деформованому стані на дзеркальній кремнієвій підкладці [14], що забезпечує нижчу резонансну частоту (20...50 кГц), достатньо високу температурну чутливість частоти власних коливань і, при пониженні температури за рахунок конденсації вологи на дзеркальній кремнієвій підкладці, стрибкоподібну зміну частоти коливань (так званий "зрив"), яку з високою точністю фіксують. Схема пристрою для визначення точки роси даним способом показана на рис. 7, де 1 – електромеханічний резонатор, що включає струну з НК 2, контакти з струмовідводами 3, вузли кріплення 4, кремнієву підкладку 5, електрод збудження 6, автогенератор 7, частотомір 8, осцилограф 9, лінію зворотного зв'язку 10. Як ЧЕ 2 використовують НК Si-Ge (1 ат. % Ge) р-типу провідності з $\rho \approx 0,01$ Ом · см, довжиною ≈ 3 мм, діаметром ≈ 25 мкм. Контакти створюють приварюванням Pt-мікродроти. Розміри полірованої кремнієвої підкладки 5: діаметр 6 мм, товщина $\approx 0,5$ мм. ЧЕ закріплюють у вузлах 4 склоцементом СЦН-52 на відстані від підкладки ≈ 50 мкм. Для створення попередньо де-

формованого стану струни здійснюють нагрів її (або підкладки) в момент закріплення до температури ≈ 373 К.

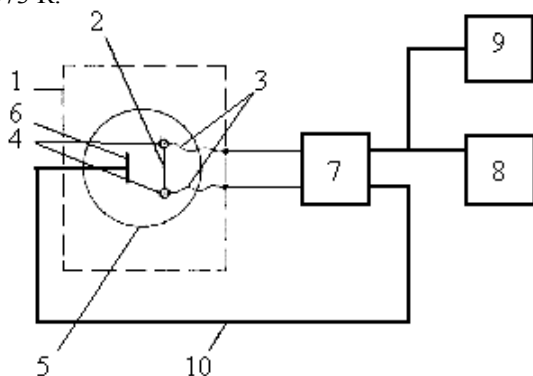


Рис. 7. Схема пристрою для вимірювання точки роси.

Власна резонансна частота забезпечується параметрами і геометрією кристала, а також технологією його закріплення. Охолоджуючи резонатор 1 за допомогою термоелектричного холодильника і, використовуючи для реєстрації частотомір марки ЧЗ-34А і осцилограф С1-83, одержують чутливість до температури ≥ 20 Гц/К, що дозволяє визначити точку роси з точністю $>0,05$ К [14]. Попередньо деформований стан ЧЕ може забезпечити як додатний, так і від'ємний температурний коефіцієнт зміни частоти власних коливань резонатора [15]. Для вимірювання відносної вологості можна також використовувати терморезистори з НК в режимі перегріву [16].

Прикладом успішного вирішення задачі одночасного вимірювання комплексу фізичних параметрів за допомогою сенсорів з напівпровідникових НК є створення давача стану атмосфери [17]. Вимірювання таких параметрів як атмосферний тиск, температура та швидкість потоку повітря, здійснюється за допомогою трьох ЧЕ, що працюють на резонансному принципі.

Застосування НК як модельних об'єктів для створення перетворювачів фізичних величин подано в [18].

1. Мар'ямова І. Й., Лавитська О. М., Гортинська І. Д., Кутраков О. П., Яцюк Ю. С. Застосування ниткоподібних кристалів кремнію і германію в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин // Вісник ДУ "Львівська політехніка". - № 297. - 1995. - С. 109-113. 2. Полупроводниковый датчик температуры: А.с. 1329334 СССР. МКИ G 01 K 7/00 / И. Д. Гортинская, С. С. Варшава. - Б. И. № 29. - 1987. 3. Заявка 97125970, МКИ G01K 7/22, H01L 43/08. Низькотемпературний сенсор / Варшава С. С., Вайнберг В. В., Венгер Є. Ф., Прохорович А. В. // Промислова власність. - 1999. - № 8. - С. 1.258. 4. Большакова И. А., Варшава С. С., Московец Т. А., Чекурин В. Ф. Датчик для одновремен-

ного измерения магнитного поля и температуры // Приборы и системы управления. - 1980. - № 2. - С. 212-214. 5. Датчик для измерения слабых магнитных полей: А.с. 1698854 СССР, МКИ G 01R 33/05. / А. А. Андарало, И. И. Васильев, В. И. Прошин, В. А. Ярмолевич. - Б.И. № 46. - 1991. 6. Заявка 96124637, Кл. G01K 7/32, H01L 43/00. Вимірювач магнітного поля і температури / Байцар Р. І., Варшава С. С., Венгер Є. Ф., Прохорович А. В., Ющук С. І. // Промислова власність. - 1998. - № 4. - С. 216. 7. Seki Kyosyiro, Shid Jun. Chi, Hirakami K. "Дэнки гаккай ромбуиси. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap." - 1987. - A 107. - № 3. - P. 149-155. 8. Заявка 98126714 МКИ G01K 7/00, H01L 43/00. Датчик для вимірювання температури і магнітного поля / Варшава С. С., Венгер Є. Ф., Прохорович А. В., Ющук С. І. 9. Заявка 96124638, МКИ G01B 7/18, G01K 7/22, H01L 43/00. Багатофункціональний датчик / Байцар Р. І., Варшава С. С., Венгер Є. Ф., Прохорович А. В. // Промислова власність. - 1998. - № 4. - С. 2.212. 10. Байцар Р. І., Варшава С. С., Венгер Є. Ф. Принципы построения многофункциональных сенсоров // Наука и предпринимательство. - Винница-Львов. - 1997. - С. 104. 11. Дуцяк И. С., Макаренко В. В., Макаренко С. В., Николайчук А. Г. Терморезистивные датчики температуры на основе аморфных пленок теллурида германия // ". Выборочные материалы IV конф "Электронные датчики "Сенсор-91". - Л. - 1991. - С. 32-33. 12. Варшава С. С., Пелех Л. М., Шкумбатюк П. С. Малоінерційні напівпровідникові давачі вологості // Вісник ДУ "Львівська політехніка". - № 362. - 1999. - С. 20-22. 13. Олейник Б. Н., Лаздина С. И., Лаздин В. П., Жагулло О. М. Приборы и методы температурных измерений. - М.: Изд-во стандартов, 1987. - 140 с. 14. Заявка 97125969, МКИ 01 25/56, 25/64. Спосіб визначення точки роси / Байцар Р. І., Варшава С. С., Венгер Є. Ф., Прохорович А. В., Рак В. С. // Промислова власність. - 1999. - № 8. - С. 1.263. 15. Байцар Р. І., Рак В. С. Особенности построения полупроводниковых вибрационно-частотных сенсоров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1998. - № 1. - С. 29-31. 16. Байцар Р. І., Бортнік Г. М., Варшава С. С., Столярчук П. Г. Вплив вологості на характеристики терморезисторів з напівпровідникових ниткоподібних кристалів // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5. - С. 69-71. 17. Красножонов Е. П., Байцар Р. І., Дмитрук Ю. В. Датчик состояния атмосферы // Матер. Всес. конф. "Датчики на основе технологии микроэлектроники". М.: МДНТП. - 1983. - С. 114-115. 18. Ермаков А. П., Яценко С. Н. Нитевидные кристаллы кремния как модельные объекты для создания первичных преобразователей физических величин // Датчики и системы. - 2000. - № 5. - С. 14-16.

