

А.О. Дружинін, Ю.М. Ховерко, Ю.Р. Когут, А.М. Вуйцик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ТА КНІ-СТРУКТУР

© Дружинін А.О., Ховерко Ю.М., Когут Ю.Р., Вуйцик А.М., 2010

Створено багатофункціональну вимірювальну систему з використанням сенсорів деформації, тиску і температури на основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів твердого розчину $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$. Запропоновано схемне вирішення об'єднання їх в мережу ETHERNET з використанням програмно-апаратних засобів.

Multichannel measuring system based on strain, pressure and temperature sensors on the basis of silicon-on-insulator structures and $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ whiskers has been made. Schematic diagram for their ETHERNET network integration using programmed hardware solutions has been proposed.

Вступ. Інтелектуальні вимірювальні системи належать до нових науково-технічних досягнень, які мають перспективу застосування фактично в усіх галузях народного господарства та спроможні кардинально змінити організацію і структуру різних видів виробництва, тестування і контроль в системах охорони здоров'я та моніторингу довкілля, вимірювання, контролю та управління процесами, що використовуються у виробництві, екології, медицині, космічній техніці тощо [1]. Однак ефективна робота інтелектуальних систем можлива лише за умови забезпечення їх високоякісною первинною інформацією. Це вимагає створення сенсорів на основі нових функціональних матеріалів, застосування сенсорних масивів та високочутливих, точних і стабільних вимірювальних каналів, широкого використання інформаційних мереж та впровадження високих технологій для реалізації цих засобів.

Сенсорні пристрої є основними елементами інформаційно вимірювальних інтелектуальних систем будь-якого призначення і визначають, крім метрологічних і експлуатаційних, економічні характеристики систем. При цьому за метрологічними характеристиками вимоги до датчиків наблизились до граничних значень [2].

Серед основних вимог до сучасних сенсорних пристроїв можна відзначити: багатофункційність, високу точність перетворення, термостабільність, простоту у застосуванні, мінімальне енергоспоживання за можливості функціонування з низьковольтними джерелами живлення, можливість об'єднання в мережу. Забезпечення розглянутих вимог визначається структурними та схемотехнічними рішеннями, розвиток яких за останній період набув значної актуальності [3–5].

Для створення сенсорів фізичних величин сьогодні широко використовуються нитчасті кристали (НК) твердих розчинів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та структур кремній-на-ізоляторі (КНІ-структур), що дасть змогу отримати інформацію про вимірювальні параметри, зокрема такі, як температура, деформація, тиск тощо [6, 7].

Створення сенсорних вимірювальних систем з використанням мікропроцесорів дає змогу зробити різке зменшення спотворення вимірювальної інформації на шляху від чутливого елемента до контролера; збільшення надійності виміру завдяки самодіагностиці датчиків; побудову багатофункційних сенсорів, що одержують і переробляють сигнали багатьох однотипних або різнотипних чутливих елементів; передачу в систему автоматизації не тільки поточного значення вимірюваної величини, але й додаткових сигналів про вихід його за межі заданих норм, а також можливість передачі по мережі не кожного поточного вимірюваного значення, а тільки того, що змінилось порівняно з попереднім значенням, або значення, що вийшло за межі заданих норм, що вимагає керуючого впливу тощо [8].

Мета роботи – створити багатофункціональну вимірювальну систему, використовуючи вихідні сигнали сенсорів деформації, тиску, різниці температур створених на основі ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та КНІ-структур, з одночасним корегуванням їхніх температурних залежностей.

Інтелектуальні сенсорні системи, що поєднують електронний вимірювальний канал, являють собою послідовність функціональних ланок, які розуміють чутливий елемент сенсора з засобами інтелектуальної обробки отриманої інформації (комп'ютером). У розроблених приладах сенсор може бути конструктивно відокремлений від наступних вимірювальних перетворювачів або може включати вторинний аналоговий та аналого-цифровий вимірювальні перетворювачі, а також мікроконтролер, що керує процесом вимірювань і виконує підготовку даних для інтелектуальної обробки. Отже, в сучасних інтелектуальних системах сенсор як джерело первинної інформації являє собою невід'ємну і ключову ланку інтегрованого комплексу апаратних і програмних засобів. Загалом схему перетворень вимірювального каналу інтелектуальної системи схематично показано на рис.1.

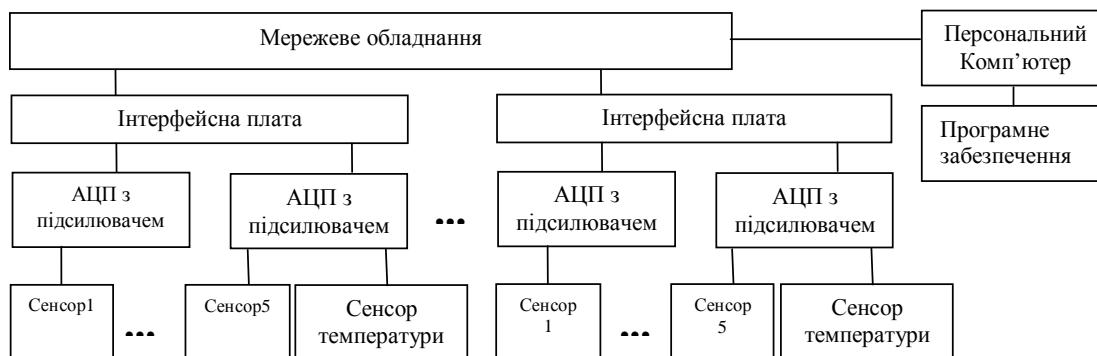


Рис. 1. Структурна схема інтеграції сенсорів у вимірювальну систему

Під час розроблення багатофункціональної вимірювальної системи значна увага звертається на розв'язання таких конструкційно-технологічних задач, які забезпечують ефективність поєднання інтелектуальних систем з сенсорами різних типів.

Чутливі елементи сенсорів. Для можливості дослідження розподілу деформації, тиску, температури вздовж масивних конструкцій в різних температурних середовищах було використано сенсори на основі КНІ-структур та ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Так, для визначення тиску вибраний сенсор на основі КНІ-структур, загальний вигляд топології і вихідних характеристик якого зображено на рис. 2.

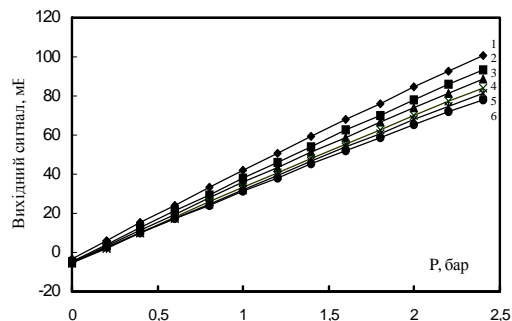
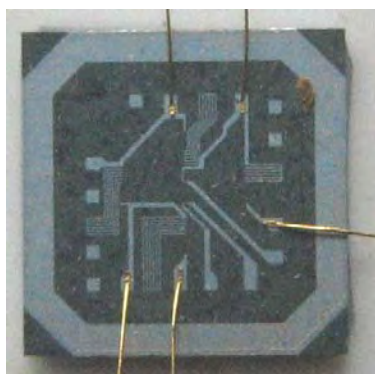


Рис. 2. Загальний вигляд чутливого елемента сенсора тиску-температури на основі КНІ-структур (а) та його вихідні характеристики (б) за різних температур: 1–23 °С, 2–55 °С, 3–75 °С, 4–100 °С; 5–125 °С, 6–165 °С

Особливістю створеного сенсора є те, що чутливий елемент містить чотири полі-Si тензорезистори, розташовані на мембрані і з'єднані у мостову схему, і терморезистор, які уможливають одночасне вимірювання тиску і температури. Технологія виготовлення такого сенсора описана у [9].

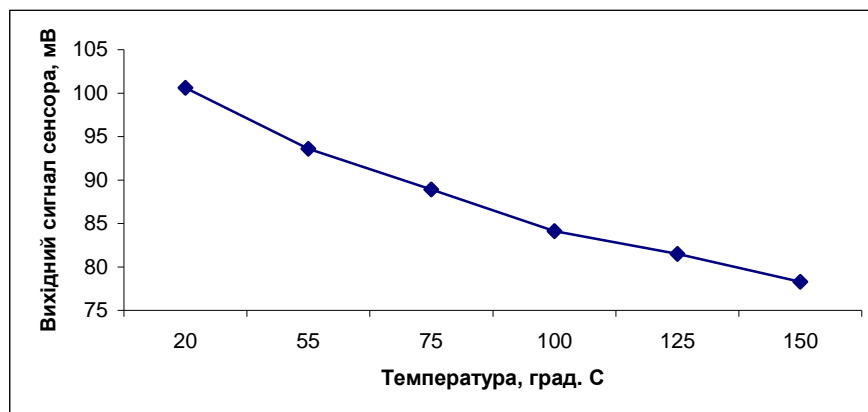


Рис. 3. Залежність вихідного сигналу сенсора тиску від температури $p=2.4$ бар, напруга живлення 5 В

Для вимірювання температури або самодіагностування сенсора чутливий елемент містить термочутливий полі-Si резистор (R5), який розташований на планарній стороні поза межами пружного елемента – мембрани. Завдяки цьому при навантаженні сенсора тиском деформація термочутливих полі-Si резисторів є незначною, і відповідно вони реагують тільки на зміну температури.

На основі попередніх експериментальних досліджень p-езорезистивних та терморезистивних характеристик шарів полікремнію на діелектричних підкладках були підібрані відповідні рівні легування бором полі-Si тензорезисторів, що використовуються в сенсорах тиску, і полі-Si терморезисторів до таких концентрацій, які забезпечують максимальний коефіцієнт тензочутливості тензорезисторів та максимальний температурний коефіцієнт опору (ТКО) терморезисторів у робочих діапазонах температур [10].

Так, для рекристалізованого полікремнію в структурах кремній-на-ізоляторі отримано коефіцієнт тензочутливості $K=42$ для концентрації $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та $K=26$ для концентрації $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Вимірювання температурної залежності опору досліджуваних зразків проводились в різних температурних діапазонах. На основі аналізу одержаних температурних залежностей відносної зміни опору зразків полі-Si з різною концентрацією носіїв заряду запропоновано терморезистори для інтервалу $-40 \div +140 \text{ }^\circ\text{C}$ на основі нерекристалізованих шарів полі-Si з концентрацією $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і температурним коефіцієнтом опору $\text{ТКО} = -0,28 \text{ \% град}^{-1}$. Меншою чутливістю ($\text{ТКО} = 0,15 \text{ \% град}^{-1}$), але кращою стабільністю характеризуються сенсори температури на основі рекристалізованих лазером шарів полі-Si з концентрацією $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Для визначення розподілу деформації вздовж конструкцій, споруд та їх температурного корегування або самодіагностування завдяки універсальності вимірювання у важкодоступних місцях вибрано чутливі елементи на основі ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Оскільки електричні властивості кристалів значною мірою визначаються специфікою їхнього легування, то дослідження процесів легування НК твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ відкриває перспективи щодо їх використання як чутливих елементів сенсорів у різноманітних перетворювачах фізичних величин, зокрема у сенсорах деформації, температури [11]. Нитчасті кристали Si-Ge мають високий коефіцієнт тензочутливості, велику механічну міцність, яка для найтонших мікрокристалів діаметром $\sim 1\text{--}5 \text{ мкм}$ сягає 780 кг/мм^2 і зменшується до 500 кг/мм^2 у кристалах діаметром $\sim 15\text{--}20 \text{ мкм}$. Пружні деформації мікрокристалів діаметром $40\text{--}50 \text{ мкм}$ досягають значень $\sim 0,5\text{--}0,7 \text{ \%}$.

Сенсор деформації на основі ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та його тензорезистивні характеристики зображено на рис. 2 і 3.



Рис. 2. Зовнішній вигляд сенсора деформації на основі ниткоподібних кристалів $Si_{1-x}Ge_x$

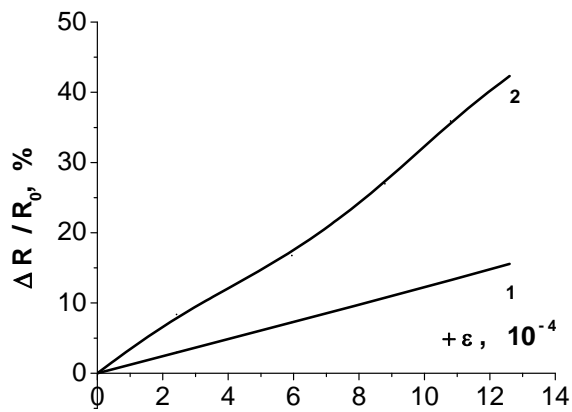


Рис. 3. Залежність відносної зміни опору НК $Si_{1-x}Ge_x$ ($x = 0,01$), $\rho_{300\text{ K}} = 0,018\text{ Ом}\cdot\text{см}$ від деформації за температур: 300 К (1); 77 К (2)

Також за допомогою ниткоподібних кристалів $Si_{1-x}Ge_x$ можна вимірювати градієнт температури вздовж досліджуваної конструкції. Нове використання як чутливого елемента ниткоподібного кристала твердого розчину $Si_{1-x}Ge_x$, одночасно легованого домішками бору та золота, дає змогу підвищити чутливість сенсора до 12500 Ом/К під час вимірювання температури та забезпечити стабільність вимірювання температури завдяки високому і сталому значенню коефіцієнта термо-ЕРС, що дорівнює 0,75 мВ/К в інтервалі температур 350–525 К. Термоелектрична добротність сенсора $Z = 1,6 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$.

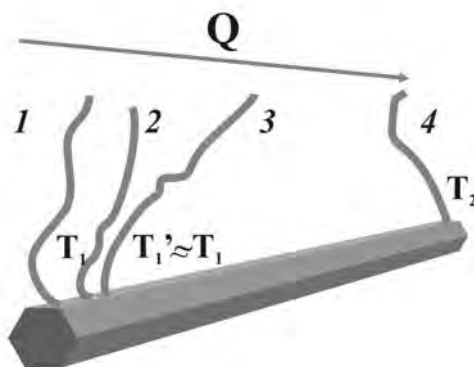


Рис. 4. Конструкція чутливого елемента сенсора теплових величин для підвищених температур на основі НК $Si_{1-x}Ge_x$ <В, Au>

Виготовляють запропонований сенсор теплових величин так. До чутливого елемента з напівпровідникового ниткоподібного кристала $Si_{1-x}Ge_x$ складу $x = 0,03$, легованого домішками бору та золота, з питомим опором (0,03–0,05) Ом·см, завдовжки 10–15 мм, діаметром 30–60 мкм і формою шестигранної призми, з гладкою дзеркальною поверхнею (вісь росту кристала збігається з напрямом <111>), створюють чотири точкових контакти 1, 2, 3, 4 методом електроімпульсного приварювання платиного мікродроту діаметром 30 мкм (рис. 4). Чутливий елемент складається з трьох частин, утворених чотирма точковими контактами 1, 2, 3, 4. Довжини частин кристала 1–2, 2–3, 3–4 співвідносяться як (10:3:135) і становлять відповідно: (0,6–1) мм, (200–300) мкм та (9–13,5) мм.

За допомогою контактів 1-2 (рис. 4) визначають абсолютну температуру гарячого кінця T_1 . Зазначимо, що в інтервалі температур 300–550 К опір НК $Si_{1-x}Ge_x$ з вмістом германію $x = 0,03$ і

питомим опором 0,03–0,05 Ом×см лінійно зростає з температурою. Між контактами 3 і 4 вимірюють термо-ЕРС і за відомим коефіцієнтом Зеебека α (рис. 5) контролер розраховує різницю температур між гарячим і холодним кінцями кристала за формулою

$$\Delta T = \frac{E}{\alpha}.$$

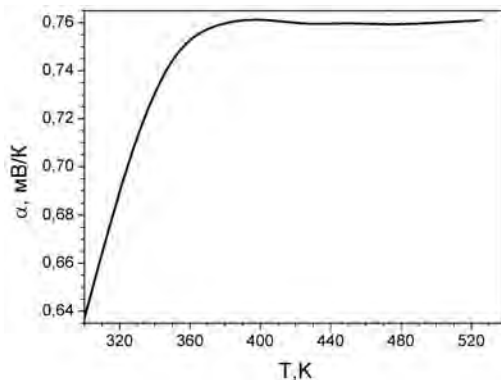


Рис. 5. Високотемпературна залежність коефіцієнта Зеебека після оптимізації легування системою «В–Аи» для НК Si1-xGex з вмістом германію 3 % (ат.) та питомим опором 0,03 Ом×см

Запропонований сенсор забезпечує вимірювання температури з високою чутливістю та стабільністю в інтервалі температур 320–525 К, забезпечуючи високу термоелектричну добротність сенсора на рівні $1,6 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Точність вимірювання температури сенсора не гірша за 0,3 К, а висока термоелектрична добротність чутливого елемента за підвищених температур порівняльна з відомими термоелектриками [12].

Вимірювальна система. Необхідність одночасного вимірювання кількох параметрів, а також їх температурного корегування, тобто самодіагностування, призвела до збільшення кількості вимірювальних каналів, що змусило об'єднати сенсори у локальну мережу з використанням стандартного мережевого обладнання. Для цього було використано плату адаптера і розроблено програмне забезпечення для її роботи (рис. 6).

Основними компонентами цієї системи є мікроконтролер Atmega і перетворювач інтерфейсів Ethernet-SPI ENC28J60 [13] фірми Microchip. Мікроконтролер зберігає у flash-пам'яті поправкові коефіцієнти для сенсорів і здійснює первинну обробку сигналу сенсорів. Цей модуль також має додаткові аналогові входи меншої розрядності (10 біт) для контролю стану системи: напруги живлення тощо.

Сьогодні у промислових мережевих технологіях все частіше використовується інтерфейс локальних комп'ютерних мереж. Це зумовлено не лише великим вибором обладнання, вартість якого постійно знижується, але й тим, що лідери ринку прикладають значні зусилля для перетворення інтерфейсу локальних комп'ютерних мереж в технологію передачі даних у реальному масштабі часу. Для цього слугує протокол IEEE 1588 (протокол реального часу), що дає змогу синхронізувати територіально розподілені пристрої із субмікросекундною точністю.

Температурне корегування сигналів з сенсорів деформації здійснюється так: контролер, отримавши значення від термочутливого елемента, вибирає в пам'яті програм, наприклад, значення коефіцієнта тензочутливості для цього діапазону. За отриманим значенням обчислюється значення деформації.

Аналогові сигнали від сенсорів перетворюються у цифровий вигляд за допомогою сигма-дельта аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), що добре підходять для перетворення малих сигналів з високою роздільною здатністю. Використання сигма-дельта АЦП (рис. 7) з вбудованим

інструментальним підсилювачем дає змогу перетворити вихідний сигнал сенсора в ~ 16–18 розрядів АЦП вільних від шумів з частотою $f \approx 4,7$ Гц. Під час використання двох таких мікросхем в одному адаптері отримуємо п'ять вимірювальних каналів для вимірювання деформації і один канал для вимірювання температури.

Такі АЦП мають вбудований інструментальний підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення (4-128), що дає змогу отримати необхідний рівень вихідного сигналу. Основні технічні характеристики вимірювальної системи зведені у таблицю.

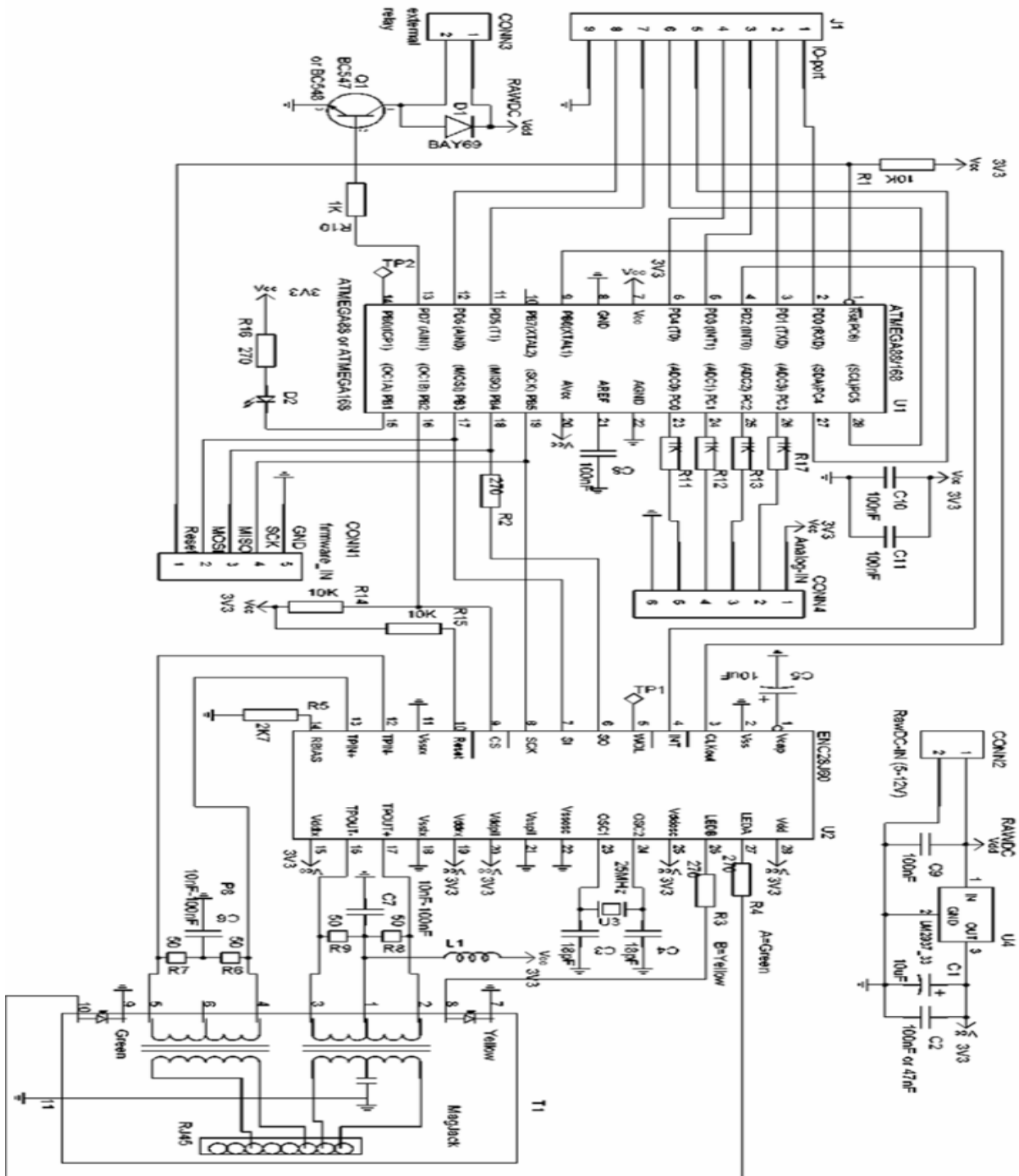


Рис. 6. Принципова схема мережевого адаптера вимірювальної системи

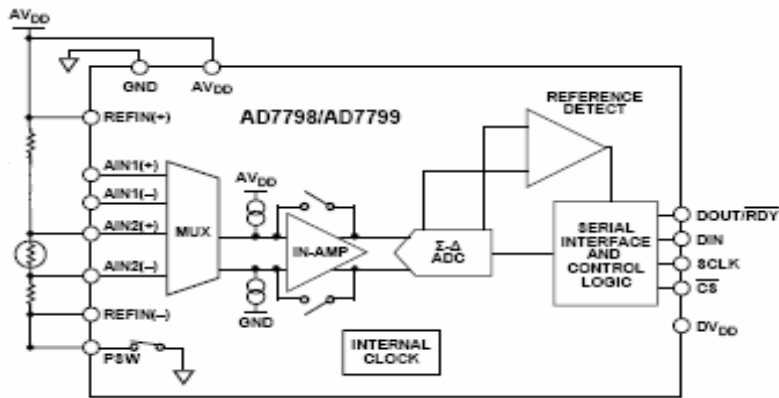


Рис. 7. Блок-схема аналогового-цифрового перетворювача AD7799 [14]

Характеристики вимірювальної системи

Параметр	Значення	Примітка
Напруга живлення пристрою	5 В	
Споживаний струм	<70 мА	з під'єднаним сенсором
Кількість вимірювальних каналів	6	з них один для вимірювання температури
Розрядність ЦАП	24 біт	
Частота дискретизації ЦАП	5 сек ⁻¹	
Коефіцієнт аналогового підсилення	4-128	налаштовується програмно

Висновки. На основі експериментальних досліджень створено багатофункціональну вимірювальну систему на основі сенсорів з ниткоподібними кристалами $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та КНІ-структурами із одночасним корегуванням їхніх температурних залежностей. Для перетворення малих сигналів використано підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення аналогового-цифрового перетворювача з високою роздільною здатністю. Запропоновано шляхи об'єднання сенсорів у багатофункціональну систему у вигляді модульної конструкції з під'єднанням у локальну мережу та відзначено перспективність використання цифрових методів обробки для вихідних сигналів сенсорів.

1. Войтович І.Д., Корсунський В.М. *Інтелектуальні сенсори*//Інститут кібернетики НАН України. – К., 2007. – 514 с. 2. Дружинин А.А., Мар'ямова І.І., Кутраков А.П., Павловский І.В. *О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур* // Датчики и системы. – 2005. – № 7. – С. 17-21. 3. Вуйцик В., Голяка Р., Каліта В., Лопатинський І., Невмержицька О. *Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв* / За ред. З. Готри, Р. Голяки. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 1999. – 364 с. 4. Дружинин А.А., Островский І.П., Матвиенко С.Н., Вуйцик А.М. *Многофункциональный датчик давления и температуры на основе твердых растворов SiGe*. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2005. – № 6(60). – С. 24–26 5. Дружинин А.А., Матвиенко С.М., Вуйцик А.М., Кутраков А.П., Ховерко Ю.Н. *Универсальная система для измерения усилия-перемещения* // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2006. – № 5(65). – С. 46–49. 6. Дружинин А.О., Островський І.П., Козут Ю.Р. *Фізичні основи створення сенсорів низьких температур на базі ниткоподібних кристалів Si-Ge* // *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*. – 2007. – № 1. – С. 8–13. 7. Дружинин А.О., Мар'ямова І.І., Козут І.Т., Ховерко Ю.М. *Сенсори фізичних величин на основі структур "кремній на ізоляторі" з рекристалізованим шаром полікремнію* // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. – 2008. – N 4. – С. 17–26. 8. Кестер У. *Какая архитектура АЦП подходит для вашей*

задачи// Современная электроника. – 2008. – №3. – С.14–21. 9. Дружинин А.О., Лавитська О.М., Мар'ямова І.Й., Панков Ю.М., Ховерко Ю.М. Мікроелектронні сенсори на основі шарів КНІ, рекристалізованих лазерним опроміненням // Вісник НУ "Львівська політехніка". –2000. – №393. – С.7–11. 10. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Kogut I., Khoferko Y.. On possibility to extend the operation temperature range of SOI sensors with polysilicon piezoresistors// Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2001. – №1. – P. 40–45. 11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Liakh N., Study of piezoresistance in Ge_xSi_{1-x} whiskers for sensor application. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2005. – № 8. – P.193–196. 12. Druzhinin A.A., Dolgolenko A.P., Ostrovskii I.P., Khoferko Yu.M., Kogut Iu.R. Thermoelectric sensors based on Ge_xSi_{1-x} whiskers // Journal of Thermoelectricity. – №4. – 2009. – P. 82–85. 13. http://ww1.microchip.com/downloads/en/Device_Doc/39662c.pdf 14. http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/AD7798_7799.pdf

УДК 621. 319.

М.Д. Матвійків, А.І. Петрушка, В.М. Петрушка

Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ПИТОМОГО ОПОРУ ПЛІВКОВИХ ПРОВІДНИКІВ

© Матвійків М.Д., Петрушка А.І., Петрушка В.М., 2010

Проаналізовано вплив пружних деформацій на температурний коефіцієнт питомого опору плівкових провідників.

The analysis of resilient deformation's influence on the temperature coefficient of specific resistance of the film conductores is given.

Вступ. Сьогодні плівкові провідники широко використовуються під час виготовлення друкованих плат, шлейфів, плоских джгутів та кабелів, інтегральних мікросхем, функціональних пристроїв тощо [1–3]. Сучасна електронна техніка ставить до їх параметрів все жорсткіші вимоги. Однак відмінності в температурних коефіцієнтах лінійного розширення плівок і підкладок, температурах виготовлення і експлуатації плівкових елементів усадження та структурні дефекти призводять до виникнення в них пружних деформацій [4, 5], які, змінюючи відстані між атомами, молекулами та іонами, змінюють енергію взаємодії між ними, а разом із нею і параметри плівкових елементів. Зокрема, температурний коефіцієнт питомого опору (ТКр) α , яким, як відомо, визначається температурна стабільність плівкових структур. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу пружних деформацій на величину ТКр плівкових провідників.

Основна частина. Плівкові провідники найчастіше отримують з алюмінію, міді, нікелю, срібла, золота тощо. Для їх виготовлення переважно використовують методи гальванічного або хімічного осадження, термічного напилення або іонного розпилення, випалювання тощо. Якщо для цього на підкладці формуються монокристалічні плівки, то згідно з класичною теорією, їх питомий опір ρ визначається масою m та зарядом вільних електронів e , їх середньою швидкістю руху \bar{V} , концентрацією n та середньою довжиною вільного пробігу $\bar{\lambda}$ [5], тобто

$$\rho = \frac{2m\bar{V}}{e^2 n \bar{\lambda}}. \quad (1)$$