

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН PHYSICAL SENSORS

УДК 621.315.592

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуї

НУ «Львівська політехніка», НДЦ «Кристал», вул. Котляревського, 1, м. Львів, 79013, Україна,
тел. (032)2582144, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуї

Анотація. Проведено комплексні дослідження, спрямовані на створення тензорезистивних сенсорів тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію, працездатних в умовах криогенних та високих температур. В основу конструкції сенсора покладено систему мембрана — шток — балка з універсальним тензомодулем, який, завдяки своїй універсальності, дозволив створити тензорезистивні сенсори для вимірювання статичних і динамічних тисків у діапазоні від 100 кПа до 20 МПа, працездатні у широкому діапазоні температур. Розроблена методика закріплення кремнієвих тензорезисторів склоприпоєм С51-1 на пружних елементах з коварового сплаву забезпечує роботу сенсорів тиску в діапазоні температур +20...+350°C. На основі НК кремнію, легованих бором, з питомим опором 0,005–0,006 Ом×см створено сенсори тиску, працездатні за низьких температур у діапазоні –269...+20°C, а на основі НК Si з концентрацією бору поблизу переходу метал діелектрик (ПМД) — високочутливі сенсори тиску рідкого гелію. Створено також різноманітні сенсори тиску для медичної діагностики.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, кремній, тензорезистор, сенсор тиску, криогенні температури, високі температури

PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS BASED ON SILICON WHISKERS

A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, A. P. Kuttrakov, N. S. Liakh-Kaguy

Abstract. Complex studies aimed at the creating of piezoresistive pressure sensors based on silicon whiskers operating at cryogenic and high temperatures were carried out. The sensor's design is based on the diaphragm — rod — beam system with the universal strain unit that, due to its universality, gives the possibility to create piezoresistive sensors to measure static and dynamic pressures from 100 kPa to 20 MPa operating in the wide temperature range.

Developed method of silicon strain gauges, mounted by glass adhesive C51-1 on the spring elements of covar alloy provides the operating pressure sensors in the temperature range +20...+350°C. Pressure sensors based on boron doped silicon whiskers with resistivity 0,005 - 0,006 Ohm×cm, operating at low

temperatures in the range $-269...+20^{\circ}\text{C}$, and with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) high sensitive liquid helium pressure sensors were created. Different pressure sensors for medical diagnostics were also developed.

Keywords: whisker, silicon, strain gauge, pressure sensor, cryogenic temperatures, high temperatures

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СЕНСОРЫ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, Н.С. Лях-Кагуй

Аннотация. Проведено комплексные исследования, направленные на создание тензорезистивных сенсоров давления на основе нитевидных кристаллов кремния, работоспособных в условиях криогенных и высоких температур. В основу конструкции сенсора положено систему мембрана — шток — балка с универсальным тензомодулем, который, благодаря своей универсальности, разрешил создать тензорезистивные сенсоры для измерения статических и динамических давлений в диапазоне от 100 кПа до 20 МПа, работоспособные в широком диапазоне температур. Разработанная методика крепления тензорезисторов стеклоприпоем С51-1 на упругих элементах из коварового сплава обеспечивает работу сенсоров давления в диапазоне температур $+20...+350^{\circ}\text{C}$. На основе НК кремния, легированных бором, с удельным сопротивлением $0,005-0,006 \text{ Ом}\times\text{см}$ созданы сенсоры давления, работоспособные при низких температурах в диапазоне $-269...+20^{\circ}\text{C}$, а на основе НК Si с концентрацией бора вблизи перехода металл диэлектрик (ПМД) – высокочувствительные сенсоры давления жидкого гелия. Созданы также разнообразные сенсоры давления для медицинской диагностики.

Ключевые слова: нитевидный кристалл, кремний, тензорезистор, сенсор давления, криогенные температуры, высокие температуры.

Вступ

Сучасний розвиток науки та різних галузей промисловості вимагає широкого впровадження автоматизованих систем управління та контролю різноманітних технологічних і фізичних процесів. У свою чергу, вдосконалення систем контролю та управління висуває більш жорсткі вимоги до сенсорів тиску як первинних засобів отримання інформації. Постійно зростаючі вимоги до сенсорів тиску поставили ряд задач із забезпечення надійності і стабільності їх роботи у складних умовах експлуатації, зокрема, при низьких та високих температурах.

Проведені дослідження показали, що вирощені ниткоподібні кристали (НК) кремнію мають цілий набір властивостей, які відкривають можливості для створення на їх основі різноманітних сенсорів механічних величин. У НК кремнію р-типу, легованих бором, була виявлена висока тензочутливість, що дозволило створити на їх основі мініатюрні чутливі

напівпровідникові тензорезистори [1]. Необхідно відзначити переваги використання НК кремнію р-типу як чутливих елементів сенсорів механічних величин: розміри НК відповідають розмірам чутливих елементів сенсорів; висока механічна міцність НК, зумовлена їх структурною досконалістю; напрям росту кристалів [111] співпадає з напрямком максимального тензорезистивного ефекту в кремнії р-типу; можливість легування НК безпосередньо в процесі їх вирощування, що забезпечує можливість виготовлення тензорезисторів із заданими параметрами.

Метою роботи було створення тензорезистивних сенсорів тиску на основі НК кремнію, працездатних у широкому діапазоні температур від криогенних до високих, а також у різних динамічних режимах.

Конструктивні і технологічні основи створення сенсорів тиску

Серед багатьох конструкцій сенсорів тиску найбільш універсальною є конструкція, в якій

використано систему мембрана — шток — балка. Перевагами такої конструкції перед мембранною є краща лінійність деформаційної характеристики пружного елемента і можливість зменшення впливу температури на напівпровідникові тензорезистори, що дає змогу зменшити температурну похибку сенсора.

При створенні сенсорів тиску використовувалась розроблена тензомодульна конструкція з універсальним пружно-чутливим елементом із закріпленими на ньому тензорезисторами. Конструкція такого тензомодуля показана на рис. 1. Основу конструкції становить кільцевий елемент 2 з консольною балкою 1, по обидва боки якої закріплено тензорезистори 4. Використання тензомодуля дозволяє уніфікувати конструкцію сенсорів незалежно від діапазону вимірюваних тисків та умов застосування. Крім того, використання тензорезисторів на основі НК Si р-типу з високою тензочутливістю дає можливість значно підвищити власну частоту сенсорів та зменшити їх габарити.

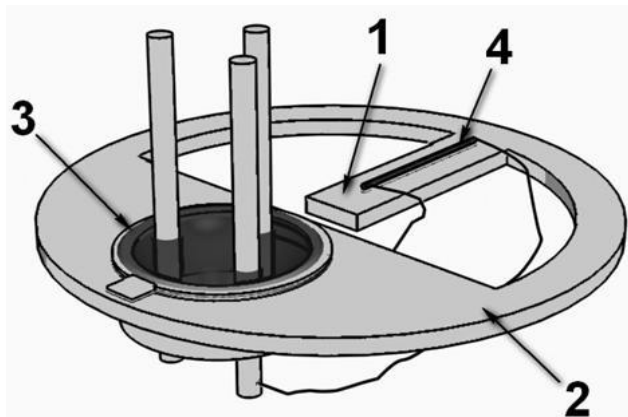


Рис. 1. Схематичне зображення універсального тензомодуля: 1 — балка; 2 — кільцевий елемент; 3 — струмовиводи; 4 — тензорезистор.

На кремнієвий тензорезистор, закріплений на пружному елементі сенсора, діє термічна деформація, зумовлена різницею коефіцієнтів термічного розширення (КТР) кремнію і матеріалу пружного елемента. Традиційно для закріплення тензорезисторів на пружних елементах сенсорів використовують різні клеї та лаки [2], зокрема, лак ВЛ—931 (температура

полімеризації — 180 °С), який зберігає свої пружні властивості при низьких температурах. Для розширення температурного діапазону роботи сенсорів в область низьких температур до температури рідкого гелію, щоб уникнути великих термічних деформацій, які діють на тензорезистор, необхідно було вибрати матеріал пружного елемента, узгоджений по КТР з кремнієм при таких температурах. Дослідження в діапазоні температур $-269 \div +25^{\circ}\text{C}$ характеристик тензорезисторів на основі НК Si, закріплених на різних матеріалах, показали, що для цього температурного діапазону доцільно використовувати як матеріал пружних елементів інварний сплав 36Н з $\text{КТР} = 1,8 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ при 20°C [3], що добре узгоджується з КТР кремнію, який становить $2,5 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ при 20°C [4].

Для розширення температурного діапазону роботи сенсорів на основі НК кремнію в сторону високих температур необхідно перейти до принципово нових методів закріплення тензорезисторів, які здатні забезпечити мінімальну повзучість при підвищених температурах. Після проведених досліджень для закріплення кремнієвих тензорезисторів було обрано склоприпою С51-1 з $\text{КТР} = 4,9 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, близьким до КТР кремнію, який дорівнює $(2,5 - 4,2) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ в діапазоні температур від кімнатної до $+550^{\circ}\text{C}$. Температура розм'якшення склоприпою С51-1 становить $+570^{\circ}\text{C}$. Як матеріал пружного елемента сенсора було обрано коваровий сплав 29НК з $\text{КТР} = 4,6 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [3], оскільки при цьому утворюється з'єднання кремній — склоприпою — ковар, узгоджене по КТР [4].

Використання комбінації матеріалів з близькими КТР дозволило мінімізувати термічні деформації, які діють на тензорезистор, та забезпечити стабільність вихідних характеристик сенсорів при роботі до $+350^{\circ}\text{C}$.

Низькотемпературні сенсори тиску

Проведені дослідження тензорезистивного ефекту в легованих бором НК Si р-типу в діапазоні температур $-269 \div +25^{\circ}\text{C}$ показали, що при гелієвих температурах у кремнії з концентрацією бору поблизу переходу метал

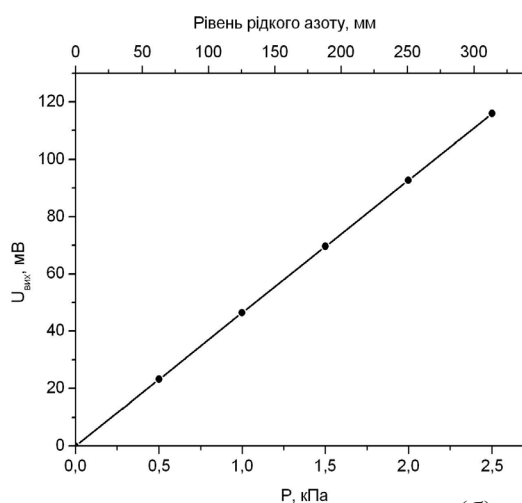
— діелектрик (ПМД) з діелектричного боку спостерігається неklasичний тензорезистивний ефект [5], викликаний зміною механізму переносу носіїв. За таких умов величина коефіцієнта тензочутливості НК р-Si при температурі -269°C може досягати значень $K \approx -5,7 \times 10^5$ при деформації стиску. Використання неklasичного тензорезистивного ефекту відкриває можливості для створення високочутливих сенсорів тиску для криогенних температур.

Для створення низькотемпературних сенсорів тиску проведено експериментальне моделювання роботи сенсорів з тензорезисторами на основі НК р-Si з різним питомим опором в діапазоні температур $-269 \div +25^{\circ}\text{C}$ [6, 7]. Для цього тензорезистори закріплювались лаком ВЛ-931 на балках з інвару 36Н, які піддавались деформації у діапазоні $\epsilon = \pm 1,2 \times 10^{-3}$ відн. од. Вимірювання показали, що на основі сильнолегованих НК Si з питомим опором $0,005 \div 0,006 \text{ Ом} \times \text{см}$ на пружних елементах з інвару можна створити сенсори тиску на основі класичного тензорезистивного ефекту для роботи у широкому діапазоні температур від температури рідкого гелію до кімнатної. Для збільшення чутливості сенсорів тиску в області гелієвих температур доцільно використовувати тензорезистори на основі НК Si р-типу з концентрацією бору поблизу ПМД з діелектричного боку з питомим опором $0,013 \text{ Ом} \times \text{см}$.

При створенні сенсорів для вимірювання тиску криогенних середовищ використовувалась тензомодульна конструкція з тензорезисторами на основі НК кремнію р-типу з питомим опором $0,005 \text{ Ом} \times \text{см}$. Розроблено декілька варіантів сенсорів тиску криогенних рідин, зокрема, сенсор тиску рідкого азоту на діапазон $0 - 2,5 \text{ кПа}$ та сенсор рівня рідкого азоту (рис. 2,а). Чутливість сенсора тиску становить 46 мВ/кПа при живленні тензорезисторів постійним струмом 10 мА . Розроблений сенсор тиску можна використовувати і як сенсор для вимірювання рівня рідкого азоту; його чутливість становить 4 мВ/мм . Градувальні характеристики цих сенсорів наведено на рис. 2,б.



(а)



(б)

Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) та градувальна характеристика (б) сенсорів тиску та рівня рідкого азоту.

Для вимірювання малих перепадів тиску криогенних рідин (рідкого азоту і рідкого кисню) на фоні великого статичного тиску було розроблено спеціальний сенсор із використанням тензомодульної конструкції. Для покращення лінійності вихідної характеристики сенсорів перепаду тиску була запропонована спеціальна конструкція пружного елемента 5 (рис. 3,а). Пружний елемент являє собою суцільну конструкцію постійного *перетину*, одним кінцем закріплений у корпусі сенсора тиску, а другим — до мембрани. Точка кріплення пружного елемента до мембрани зміщена відносно її центру. Оскільки сенсор встановлювався у перегородку паливних баків з криогенними рідинами, щоб уникнути спотворень під час вимірювань, товщина сенсора повинна була співпадати з товщиною перегородки, яка не перевищувала 3 мм . Розміри розробленого

сенсора становили: висота — 3 мм, діаметр — 27 мм. На рис. 3,б наведено градувальну характеристику сенсора при температурі рідкого азоту (-196 °С). Як видно з рисунка, розроблений сенсор забезпечує лінійність градувальної характеристики у всьому діапазоні вимірюваних перепадів тиску рідкого азоту $\Delta P = \pm 6 \times 10^{-3}$ Па.

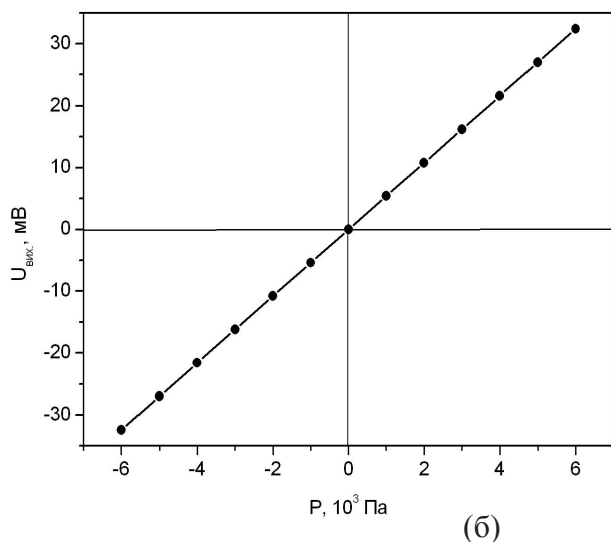
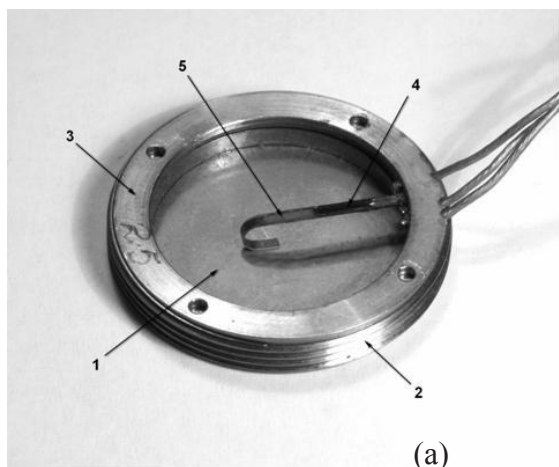


Рис. 3. Зовнішній вигляд (а) та градувальна характеристика (б) сенсора перепадів тисків криогенних рідин: 1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — ущільнюоче кільце; 4 — тензорезистори; 5 — пружний елемент.

Для вимірювань статичних і динамічних параметрів гелієвого потоку в криогенних циркуляційних системах охолодження надпровідних магнітів розроблялись сенсори тиску на діапазон 0...10 МПа [6]. Такі сенсори розроблялись у двох модифікаціях. Для роботи у діапазоні температур -269...+20 °С

використовувались тензорезистори на основі НК р-Si з питомим опором 0,005 Ом×см, з'єднані в мостову схему, а для вимірювань при температурі рідкого гелію (-269 °С) — одиночний тензорезистор з питомим опором 0,013 Ом×см, який характеризується високою тензочутливістю за гелієвих температур. На рис. 4 наведено зовнішній вигляд і вихідні характеристики розробленого сенсора тиску рідкого гелію. Як видно з наведених графіків, використання кремнієвих тензорезисторів, у яких при температурі рідкого гелію проявляється неklasичний тензорезистивний ефект, дозволяє суттєво збільшити чутливість таких сенсорів тиску (рис. 4,б, крива 2): їх вихідний сигнал досягає 470 мВ (без підсилення) при струмі живлення 100 мкА.

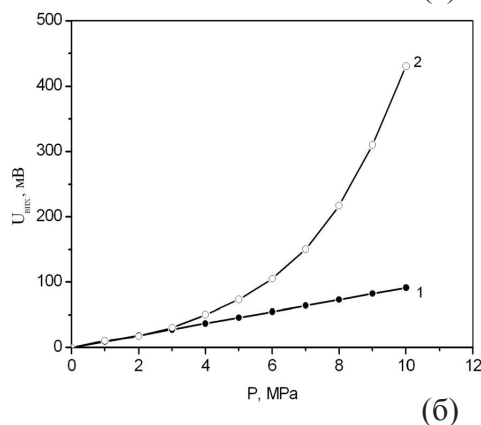


Рис. 4. Зовнішній вигляд (а) та вихідні характеристики (б) сенсора тиску рідкого гелію: 1 — мостова схема з двома активними тензорезисторами на основі НК р-Si з $\rho = 0,005$ Ом×см, 2 — схема з одним активним тензорезистором на основі НК р-Si з $\rho = 0,013$ Ом×см.

У таблиці 1 наведено основні характеристики розроблених сенсорів тиску криогенних середовищ у порівнянні з характеристиками аналогічних сенсорів світових виробників. Як видно з таблиці, розроблені сенсори тиску з тензорезисторами на основі НК Si за своїми основними характеристиками не поступаються сенсорам тиску відомих виробників, але мають більш широкий діапазон робочих температур до температури рідкого гелію.

роботу тензорезисторів у різних динамічних режимах і при підвищених температурах до +500 °С, оскільки, температура евтектики Si – Pt становить +830 °С. Експериментальне моделювання роботи сенсорів тиску з тензорезисторами на основі НК p-Si з різною концентрацією бору в діапазоні температур +20 ÷ +350 °С показало, що застосування тензорезисторів на основі сильнолегованих НК кремнію р-типу з питомим опором

Виробник	Bell @ Howell США	Kulite	"Львівська політехніка" на основі НК p-Si
Робочий тиск, МПа	0...0,1; 0...7	0...0,017; 0 ... 34	від 0...0,1 до 0...10
Нелінійність	±0.25	±0.25	±0.1
Діапазон температур, °С	-196...+20	-196...+20	-269...+20
Вихідний сигнал, мВ	30	100	80...100*

* За температури -269⁰С $U_{\text{вих.}} = 470$ мВ

Таблиця 1. Порівняльні характеристики сенсорів тиску криогенних середовищ.

Високотемпературні сенсори тиску

Розроблена технологія створення омичних контактів кремнієвих тензорезисторів методом імпульсного зварювання платиного мікродроту з НК кремнію забезпечує надійну

0,005 ÷ 0,006 Ом×см забезпечує оптимальні характеристики високотемпературних сенсорів тиску [8].

На основі проведених досліджень та конструкторських розробок було створено ви-

Параметр	Числове значення
Діапазон тисків	Від 0...300 кПа до 0...20 МПа
Діапазон температур	-60...+350 ⁰ С
Вихідний сигнал при 20 ⁰ С	32 мВ; 60 мВ
Температурний коефіцієнт вихідного сигналу	≤ -0,14 %·град ⁻¹
Власна частота	17 - 40 кГц
Основна похибка	0,1 – 0,25%
Розміри: діаметр мембрани	3,8 - 9 мм
висота сенсорів	2 - 10 мм

Таблиця 2. Основні характеристики розроблених мініатюрних високотемпературних сенсорів тиску.

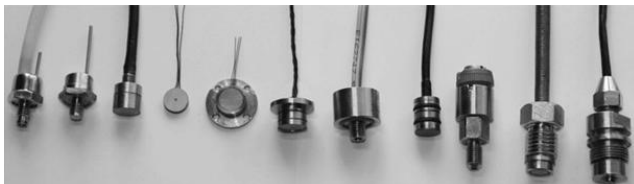


Рис. 5. Високотемпературні сенсори тиску тензомодульної конструкції на основі НК кремнію.

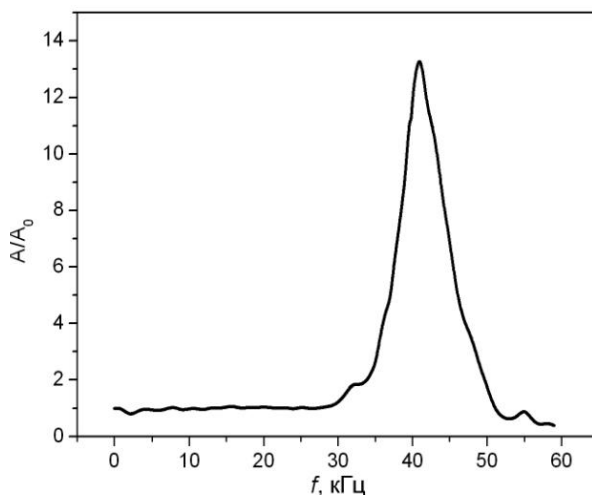
сокотемпературні сенсори тиску з тензорезисторами на основі НК кремнію для застосування у різних галузях, таких як авіаційна, моторобудування, нафтодобувна та інші (рис. 5). У таблиці 2 наведено основні параметри розроблених сенсорів тиску.

Одна з модифікацій високотемпературних сенсорів тиску призначалась для стендових випробувань авіаційних двигунів у статичному та динамічному режимах. Розроблений сенсор тиску, зображений на рис. 6,а, має ряд переваг, зокрема, широкий температурний діапазон, високу власну частоту, добру амплітудно-частотну характеристику (рис. 6,б), малі розміри. На рис. 6,в наведено градувальні характеристики такого сенсора при різних температурах у діапазоні $+20 \div +320$ °С.

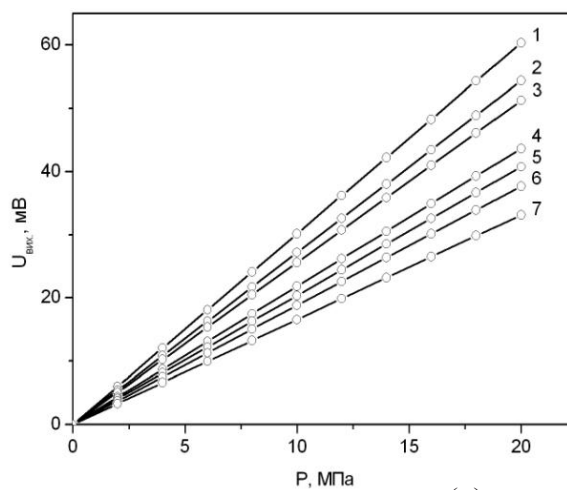
У таблиці 3 наведено порівняльні характеристики найбільш відомих серійних тензо-



(а)



(б)



(в)

Рис.6. Високотемпературний сенсор тиску: зовнішній вигляд (а), амплітудно-частотна характеристика (б) та градувальні характеристики (в) при різних температурах: 1 — $+20$ °С; 2 — $+100$ °С; 3 — $+150$ °С; 4 — $+200$ °С; 5 — $+250$ °С; 6 — $+300$ °С; 7 — $+320$ °С.

резистивних сенсорів тиску та розроблених сенсорів на основі НК кремнію. Як видно з таблиці 3, розроблені сенсори тиску за своїми основними характеристиками не поступаються сенсорам відомих виробників, але мають значно більш широкий робочий діапазон температур. Крім того, розроблені сенсори тиску вигідно відрізняються від наведених сенсорів своїми розмірами і вагою.

Сенсори медичного застосування

При створенні медичних сенсорів використовувалась, в основному, розроблена тензо-

Виробник	Метран	Honywell	Siemens	"Львівська політехніка" на основі НК p-Si
Діапазон тисків	0,1кПа – 60 МПа	0...20 кПа 0...70 МПа	10 кПа – 60 МПа	0,1 кПа – 250МПа
Діапазон температур, °С	-42...+70	-40...+85	-30...+120	+20...+320
Нелінійність, %	±0,25...±1	±0,1	±0,25	±0,1
Маса, кГ	1...6,5	4,1	0,25	0,0005...0,01

Таблиця 3. Порівняльні характеристики напів-провідникових сенсорів тиску.

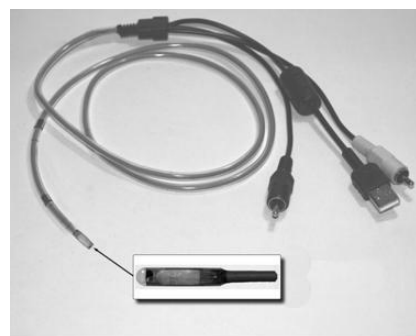
модульна конструкція. Для діагностики черепно-мозкових травм розроблено сенсор внутрішньочерепного тиску (рис. 7,а). Корпус сенсора виготовлений із нержавіючої сталі, форма корпусу у вигляді краплі зменшує пошкодження оточуючих тканин при імплантації. Висота сенсора — 2,5 мм, маса — 3 г. Діапазон вимірюваних тисків 0 ÷ 300 мм рт.ст., максимальний вихідний сигнал без підсилення — 60 мВ. Розроблений сенсор може безпосередньо вимірювати внутрішньочерепний тиск у різних ділянках мозку з подальшою реєстрацією тиску в аналоговій або цифровій формі. Сенсор успішно пройшов клінічні випробування і використовувався у нейрохірургічному відділенні Львівської лікарні швидкої допомоги.

Для гастроентерологічних досліджень розроблено мініатюрний сенсор тиску (рис. 7,б), який встановлюється на зонді поряд з рН-метром для вимірювання кислотності шлунку. Сенсор тиску містить прямокутну полімерну мембрану 4×10 мм, яка з'єднана з консольною балкою за допомогою штока, а герметизований тензомодуль утворює корпус сенсора. Сенсор розрахований на вимірювання тисків у діапазоні 0-300 мм вод.ст. і використовується для діагностики захворювань шлунку та дванадцятипалої кишки.

Для діагностики захворювань в області отоларингології розроблені різноманітні сенсори тиску: сенсор диференціального тиску для діагностики функцій слухової труби з чутливістю ~ 0,15 мВ/мм вод. ст. і сенсор тиску — розрідження на діапазон ±500 мм вод. ст. (± 49 кПа) з максимальним вихідним



(а)



(б)



(в)

Рис. 7. Сенсори медичного застосування: а — внутрішньочерепного тиску; б — для гастроентерологічної діагностики; в — діагностики слуху.

сигналом 80 мВ (без підсилення) (рис. 7, в). Сенсори застосовувались у Львівському медінституті та інших лікувальних закладах.

Висновки

Розроблено концепцію та технологічні основи створення тензорезистивних сенсорів тиску на основі НК кремнію р-типу для різних температурних діапазонів від криогенних температур до підвищених.

Створені сенсори тиску тензомодульної конструкції на основі НК кремнію з різною концентрацією бору, завдяки використанню спеціальних сплавів для виготовлення пружних елементів і методів кріплення тензорезисторів, а також властивостей самих НК, працездатні у різних температурних діапазонах від $-269 \div +25^{\circ}\text{C}$ до $-20 \div +350^{\circ}\text{C}$. Висока власна частота і малі розміри розроблених сенсорів дозволяють використовувати їх для досліджень різних динамічних процесів у газах і рідинах, вносячи мінімальні спотворення у досліджуване середовище.

Для медичної діагностики розроблено ряд сенсорів, зокрема, сенсор для діагностики черепно-мозкових травм, мініатюрний сенсор тиску для гастроентерологічних досліджень і сенсор тиску для діагностики функцій слуху.

Розроблені сенсори тиску на основі НК кремнію р-типу знайшли застосування в авіа-космічній техніці, хімічній промисловості, криогенній техніці, медицині, тощо.

Список використаної літератури

1. Voronin V., Maryamova I., Zagan-yach Y., Karetnikova E., Kurtakov A. Silicon whiskers for mechanical sensors // Sensors and Actuators. — 1992. — Vol.30, No 1–2. — P.27-33.
2. Клокова Н. П. Тензорезисторы. — М.: Машиностроение, 1990. — 220 с.
3. Материалы в машиностроении. Справочник под ред. И. В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы. — М.: Машиностроение, 1968. — 446 с.
4. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 294 с.
5. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kuttrakov O.P., Pavlovsky I.V. Silicon microcrystals with high piezoresistance at cryogenic temperatures for sensors application // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2004, № 1. — С. 69–77.
6. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О.П., Павловський І. В. Фізичні основи створення сенсорів механічних величин для низьких температур на основі мікрокристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2006. — № 3. — С. 5-13.
7. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур // Датчики и системы. — 2005. — № 7. — С. 17–21.
8. Druzhinin A., Kuttrakov A., Lavitska E., Maryamova I. High temperature pressure sensors based on silicon microcrystals // Труды 6-ой междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». — Туапсе, Россия. — Харьков, ХТУРЭ. — 2000. — С. 451–453.