

мікросистеми на базовому матричному кристалі з КНІ-структурою // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2009. – № 646: Електроніка. – С. 86–95. 6. Kogut I.T., Druzhinin A.A., Holota V.I., Dovhij V.V. Simulation of non-standard multilayer 3D SOI -Structures and Microcavities // Conf. Proc. "EUROSOI-2011", Granada, Spain, 17-19.01.2011. – P. 63–64. 7. Kogut I.T., Druzhinin A.A., Golota V.I. 3D SOI elements for system-on-chip applications / Proc. Of the 1-st Ukrainian-French Seminar "Semiconductor-on-Insulator Materials, Devices and Circuits: Physics, Technology and Diagnostics" and 6-th International SemOI Workshop "Nanoscaled Semiconductor-on-Insulator Materials, Sensor and Devices". – 25–29.10.2010. – Kyiv, Ukraine. – P. 46–47. 8. Козут І.Т., Дружинін А.А., Голота В.І. Конструктивно-технологічні властивості КМОН КНІ БМК з мікрозонною лазерною рекристалізацією полі кремнію // Вісн. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1999. – № 362: Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки. – С. 25–30. 9. Наумова О.В., Ільницький М.А., Сафронов Л.Н., Попов В.П. КНІ нанотранзистори с двумя независимо управляемыми затворами // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 1. – С. 104–111. 10. Ya-Li Tai, Jam Wen Lee, Chen-Hsin Lien. Local oxidation Fin-Field-Effect-Transistor Structure for Nanodevices Applications // JJAP – 2010. – Vol. 49, 044301. – P. 1–5.

УДК 621.315.592

А.О. Дружинін, О.П. Кутраков, І.Й. Мар'ямова
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ДЛЯ ШИРОКОГО ДІАПАЗОНУ ТЕМПЕРАТУР

© Дружинін А.О., Кутраков О.П., Мар'ямова І.Й., 2011

A.A. Druzhinin, A.P. Kuttrakov, I.I. Maryamova

PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS BASED ON SILICON WHISKERS FOR THE WIDE TEMPERATURE RANGE

© Druzhinin A.A., Kuttrakov A.P., Maryamova I.I., 2011

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. Наведено вихідні характеристики розроблених сенсорів.

Ключові слова: тензорезистивні сенсори тиску, ниткоподібні кристали.

Complex studies aimed at the creating of piezoresistive pressure sensors on the basis of 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. Output characteristics of the developed sensors are presented.

Key words: piezoresistive pressure sensors, whiskers.

Вступ

Розвиток багатьох галузей техніки, таких, як авіаційна, ракетно-космічна, хімічна тощо, вимагає постійного вдосконалення сенсорів, причому, велика увага приділяється сенсорам

механічних величин, працездатних в екстремальних умовах, зокрема, в області високих та низьких температур. Завдяки технологічності та можливості роботи у широкому діапазоні температур, кремній є основним матеріалом для виготовлення таких сенсорів

Проведені дослідження механічних та тензорезистивних властивостей ниткоподібних монокристалів (НК) кремнію, вирощених з газової фази методом хімічних транспортних реакцій, показали, що ці мікрочастинки, завдяки своїй великій механічній міцності, зумовленої структурною досконалістю, та морфології, є ідеальною елементною базою для створення сенсорів механічних величин: деформації, зусилля, тиску тощо [1]. Тензорезистори на основі НК Si p-типу, легованих бором, характеризуються великим коефіцієнтом тензочутливості $K = 80 - 140$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, широким діапазоном робочих температур від -269 до $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$; вони витримують максимальну деформацію розтягу до $0,5-1\%$ та 10^8 циклів знакозмінної деформації [2].

Метою роботи було створення тензорезистивних сенсорів тиску на основі НК кремнію, придатних для роботи в різних температурних діапазонах від криогенних до високих температур.

Технологічні основи створення сенсорів тиску для різних температурних діапазонів.

При закріпленні кремнієвих тензорезисторів на пружних елементах сенсорів виникають термічні деформації, які зумовлені різницею температурних коефіцієнтів розширення (КТР) кремнію та матеріалу пружного елемента, що істотно впливає на вихідні характеристики сенсорів. Термічна деформація ϵ_t визначається за формулою

$$\epsilon_t(T) = \gamma \int_{T_0}^T [a_s(T) - a_c(T)] dt,$$

де α_c та α_s – температурні коефіцієнти лінійного розширення кремнію та матеріалу пружного елемента; T – робоча температура; T_0 – температура полімеризації зв'язуючого; γ – коефіцієнт передачі деформації від пружного елемента до тензорезистора.

Традиційно для закріплення тензорезисторів на пружних елементах сенсорів використовуються різні клеї та лаки, наприклад, лак ВЛ – 931 з температурою полімеризації $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, який зберігає свої пружні властивості за низьких температур. 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 за таких температур. Дослідження характеристик тензорезисторів на основі НК Si в діапазоні температур $4,2-300\text{ K}$, закріплених на різних матеріалах, показали, що для цього температурного діапазону доцільно використовувати як матеріал для пружних елементів інварний сплав 36Н з $\text{КТР} = 1,8 \times 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3], що добре узгоджується з КТР кремнію, який становить $2,5 \times 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. На рис. 1, а наведено розраховану термічну деформацію ϵ_t , яка діє на кремнієвий тензорезистор, закріплений на пружному елементі з інвару 36Н, у діапазоні температур $4,2-470\text{ K}$. Як видно з наведеного графіка, за низьких температур на Si-тензорезистор діє термічна деформація стиску, яка не перевищує $-1,1 \times 10^{-3}$ відн. од.

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 за підвищених температур. Для цього був обраний склоприпой 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 $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура розм'якшення С51-1 становить $+570\text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості матеріалу пружного елемента сенсора був обраний коваровий сплав 29НК з $\text{КТР} = 4,6 \times 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ [3], оскільки при цьому створюється з'єднання кремній – склоприпой – ковар, узгоджене по КТР. На рис. 1, б наведено розраховану термічну деформацію, яка діє на кремнієвий тензорезистор, закріплений склоприпоєм на пружному елементі з ковару 29НК, у діапазоні температур $300-800\text{ K}$. Як видно з рис. 1, б, термічна деформація стиску, яка діє на Si-тензорезистор, навіть зменшується з підвищенням температури.

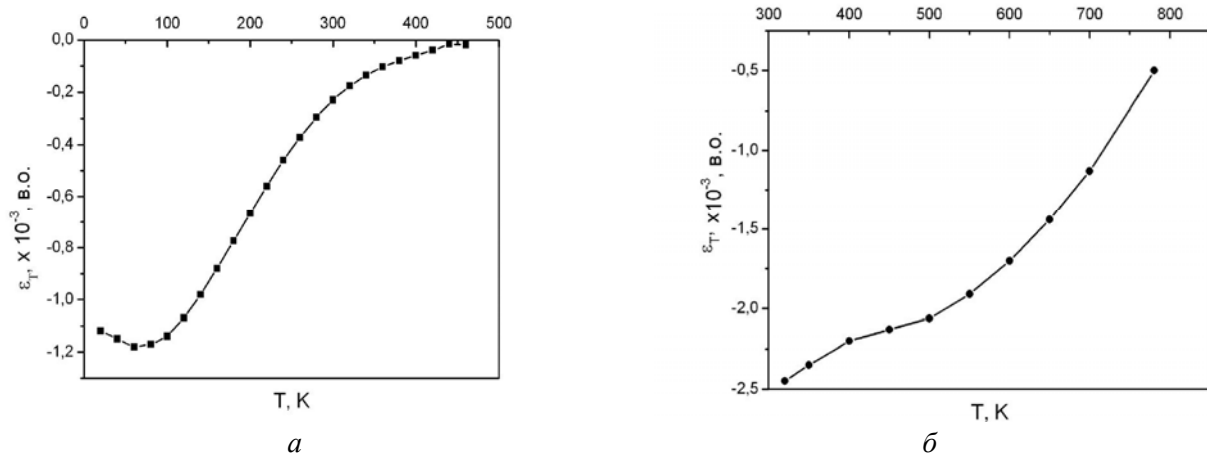


Рис. 1. Температурна залежність термічної деформації Si тензорезистора, закріпленого на пружних елементах з різних матеріалів:
а – інвару 36Н; б – ковару 29НК

Використання комбінації матеріалів з близькими КТР дозволило мінімізувати термічні деформації та забезпечити стабільність вихідних характеристик сенсорів під час роботи до $+350^{\circ}\text{C}$.

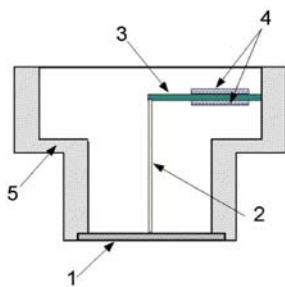


Рис. 2. Принципова конструкція сенсора тиску:

1 – мембрана; 2 – шток;
3 – балка; 4 – тензорезистори; 5 – корпус

Конструктивні засади створення сенсорів тиску

Серед багатьох конструкцій сенсорів тиску найбільшу універсальність, на наш погляд, має конструкція, в якій використано систему мембрана – шток – балка (рис. 2).

Прогин мембрани 1 під дією тиску передається через шток 2 на консольну балку 3 з закріпленими на ній тензорезисторами 4, викликаючи її прогин. Оскільки товщина тензорезисторів набагато менша від товщини балочки, при її прогині вони відчувають одновісну деформацію розтягу (на верхній стороні балочки) і стиску (на нижній стороні). Обидва тензорезистори утворюють напівміст, вихідний сигнал якого пропорційний тиску.

Перевагами такої конструкції перед мембранною є краща лінійність деформаційної характеристики пружного елемента, можливість зменшення впливу температури на напівпровідникові тензорезистори, що дає можливість зменшити температурну похибку сенсора.

Під час створення сенсорів тиску використовувалась розроблена нами тензомодульна конструкція сенсора з універсальним пружно-чутливим елементом з закріпленими на ньому тензорезисторами [5]. Конструкція такого тензомодуля показана на рис. 3. Основу конструкції становить кільцевий елемент 4 з консольною балкою 1, з обох боків якої закріплено два тензорезистори 2. Спеціальна форма пружного елемента дала змогу зменшити нелінійність вихідного сигналу сенсорів до 0,01 %, а застосування тензорезисторів на основі НК Si p-типу як чутливих елементів значно підвищило власну частоту сенсорів та зменшило їх габарити.

Розроблений універсальний тензомодуль дає змогу створювати на його основі сенсори для різних діапазонів тисків,

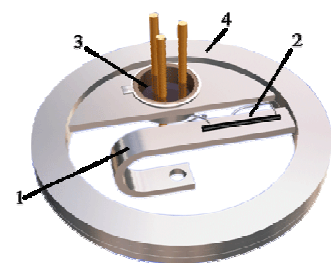


Рис. 3. Схематичне зображення універсального тензомодуля:

1 – балка; 2 – тензорезистор
3 – струмовиводи;
4 – кільцевий елемент

змінюючи тільки геометричні розміри мембрани. Використовуючи вибрані матеріали, зокрема, ковар 29НК та інвар 36Н, для виготовлення тензомодуля і закріплення тензорезисторів, можна виготовляти сенсори, працездатні в різних температурних діапазонах.

Високотемпературні сенсори тиску

Експериментальне моделювання роботи сенсорів тиску з тензорезисторами на основі НК р-Si з різною концентрацією бору в діапазоні температур 20...+350 °С показало, що застосування тензорезисторів на основі сильно легованих НК кремнію р-типу з питомим опором 0,005 – 0,006 Ом·см забезпечує оптимальні характеристики сенсорів [6].

На основі проведених досліджень та конструкторських розробок були створені високотемпературні сенсори тиску з тензорезисторами на основі НК кремнію, призначені для застосування у різних галузях, таких, як авіаційна, моторобудування, нафтодобувна та інші. На рис. 4 наведено розроблені високотемпературні сенсори тиску різного призначення, а в табл. 1 наведено їхні основні параметри.



Рис. 4. Високотемпературні сенсори тиску тензомодульної конструкції на основі НК кремнію

Таблиця 1

Характеристики розроблених високотемпературних сенсорів тиску

Параметри	Числове значення
Діапазон тисків	Від 0...10 ³ Па до 0...20 МПа
Діапазон робочих температур	-60...+350 °С
Чутливість при 20 °С	40 – 60 мВ/В
Температурний коефіцієнт Uвих.	-0,2 %·град ⁻¹
Основна похибка	0,1–0,5 %
Резонансна частота	4 – 40 кГц

Одна з модифікацій розроблених сенсорів тиску призначалась для стендових випробувань авіаційних двигунів у статичному та динамічному режимах. На рис. 5 наведено градуювальні характеристики такого сенсора при різних температурах у діапазоні +20 ... +320 °С. Амплітудно-частотні характеристики розробленого сенсора порівняно з сенсором тиску типу РА822-15 фірми "Statham" (Голандія), які вимірювались на стендах Центрального інституту авіаційного моторобудування (ЦІАМ), наведено на рис. 6. Порівняльні характеристики цих сенсорів наведено у табл. 2.

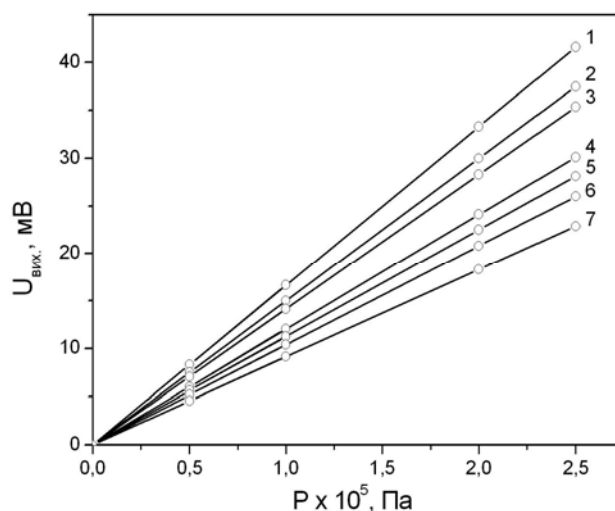


Рис. 5. Залежність вихідного сигналу сенсора тиску при різних температурах:
1 – 22 °С; 2 – 100 °С; 3 – 150 °С; 4 – 200 °С; 5 – 250 °С; 6 – 300 °С; 7 – 320 °С

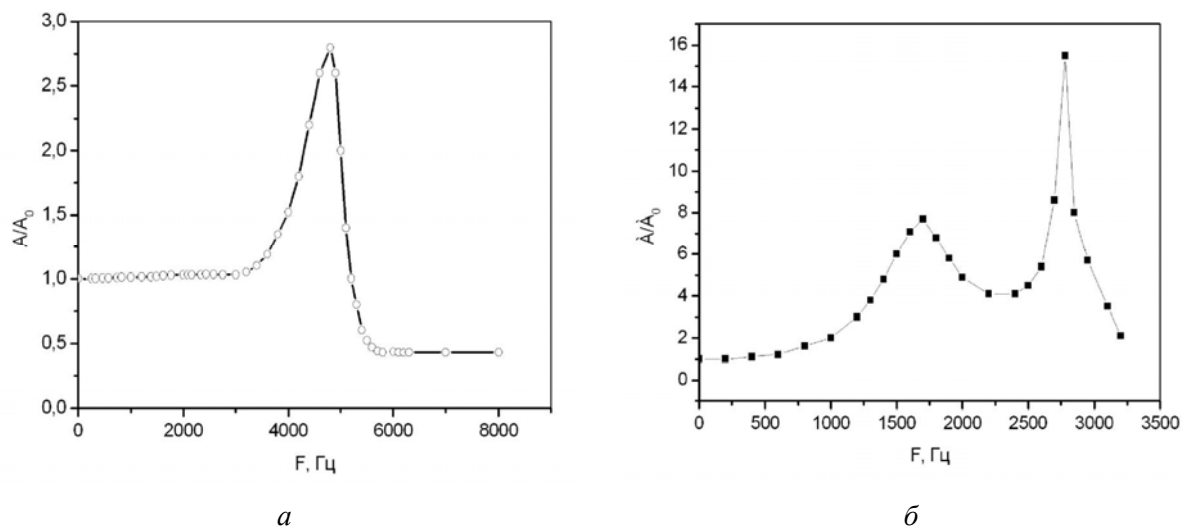


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики сенсорів тиску:

а – розроблений сенсор; б – п'єзковий тензометричний сенсор абсолютного тиску типу PA822-15

Таблиця 2

Порівняльні характеристики сенсорів тиску

Параметри	Розроблений сенсор	PA822-15
Діапазон робочих тисків	0...2,5×10 ⁵ Па	0...2,5×10 ⁵ Па
Діапазон робочих температур	-20 ... +320 °С	-40 ... +120 °С
Чутливість	20 мВ/В	3 мВ/В
Лінійність	0,1 %	∑ 0,5 %
Резонансна частота	4000 Гц	2800 Гц
Габарити	10×10 мм	71×25 мм

Як видно з наведених даних, розроблений сенсор тиску має певні переваги, зокрема, ширший температурний діапазон роботи, вищу власну частоту, кращу амплітудно-частотну характеристику, менші габаритні розміри.

Сенсори тиску для кріогенних температур

Проведені нами дослідження тензорезистивного ефекту в легованих НК р-Si у діапазоні температур 4,2–300 К показали, що при гелієвих температурах у кремнії з концентрацією бору поблизу переходу метал – діелектрик (ПМД) з діелектричного боку спостерігається неklasичний тензорезистивний ефект [7], викликаний зміною механізму переносу носіїв струму. За таких умов величина коефіцієнта тензочутливості НК р-Si при 4,2 К може досягати значень $K_{4,2K} \approx -5,7 \times 10^5$ при деформації стиску. Використання неklasичного тензорезистивного ефекту відкриває можливості для створення високочутливих сенсорів тиску для кріогенних температур.

Проведено експериментальне моделювання роботи сенсорів тиску з тензорезисторами на основі НК р-Si з різним питомим опором в діапазоні температур 4,2–300 К [8]. 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. одиниць. Вимірювання показали, що на основі сильно легованих НК з питомим опором 0,005–0,006 Ом·см на пружних елементах з інвару можна створити сенсори тиску на основі класичного тензорезистивного ефекту для роботи у широкому інтервалі температур від температури рідкого гелію до кімнатної. Для збільшення чутливості сенсорів тиску в області гелієвих температур доцільно використовувати тензорезистори на основі НК р-Si з концентрацією бору поблизу ПМД з діелектричного боку з питомим опором $\rho_{300K} = 0,013$ Ом·см.

Для вимірювання тиску рідкого гелію у циркуляційних системах охолодження магніту в установці ТОКАМАК був розроблений сенсор тиску на діапазон 0...10 МПа. Сенсор розроблявся у двох модифікаціях. Для роботи в інтервалі температур 4,2–300 К використовувались тензорезистори на основі НК р-Si з $\rho_{300K} = 0,005$ Ом·см, з'єднані у мостову схему, а для роботи при 4,2К – тензорезистори з $\rho_{300K} = 0,013$ Ом·см. На рис. 7 наведено зовнішній вигляд та вихідні характеристики сенсора.

Як видно з наведених градувальних характеристик розроблених сенсорів тиску (рис. 7, б), використання НК р-Si ($\rho = 0,013$ Ом·см), які проявляють неklasичний тензорезистивний ефект за низьких температур, дає змогу значно підвищити чутливість сенсорів тиску рідкого гелію. Вихідний сигнал у цьому випадку становить 470 мВ (крива 2 на рис. 7, б) без підсилення при струмі 100 мкА через тензорезистор.

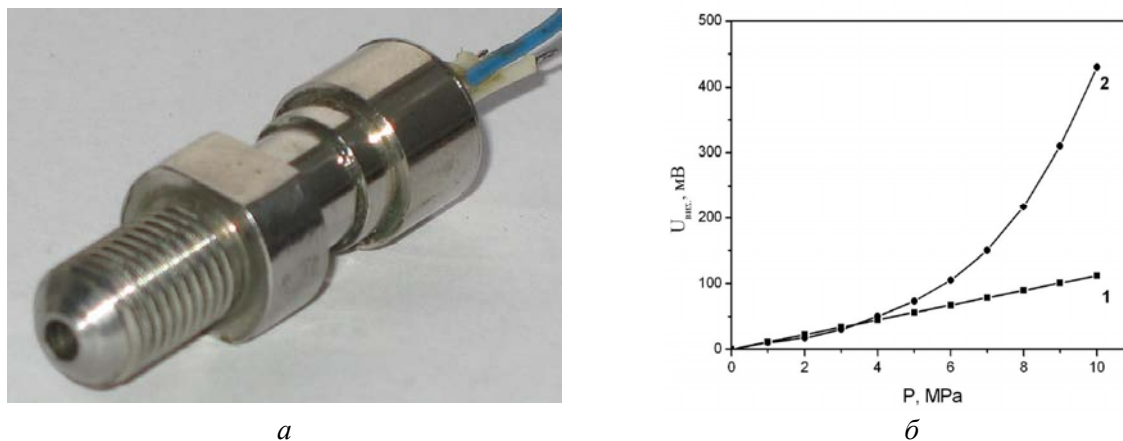


Рис. 7. Зовнішній вигляд (а) та вихідні характеристики (б) сенсора тиску рідкого гелію:

1 – мостова схема з двома активними тензорезисторами на основі НК р-Si з $\rho_{300K} = 0,005$ Ом·см;

2 – схема з одним активним тензорезистором на основі НК р-Si з $\rho_{300K} = 0,013$ Ом·см

Сенсори тиску – перепаду тисків кріогенних рідин для діапазону температур 77–100 К створювались на основі класичного тензорезистивного ефекту з використанням НК кремнію р-типу з питомим опором $\rho = 0,005 - 0,02$ Ом·см залежно від умов експлуатації. Для вимірювання тиску рідкого азоту у діапазоні 0–2,5 кПа був розроблений сенсор з тензорезисторами на основі НК р-Si. Зовнішній вигляд та градувальна характеристика такого сенсора наведені на рис. 8. Чутливість розробленого сенсора тиску становить 46 мВ/кПа при живленні тензорезисторів постійним струмом

10 мА. Розроблений сенсор тиску можна також використовувати для вимірювання рівня рідкого азоту; його чутливість становить 4 мВ/мм.

Для стендових випробувань паливних баків космічних апаратів необхідно проводити вимірювання перепаду тисків криогенних рідин: рідкого азоту та рідкого кисню. Для цього було розроблено спеціальний сенсор тензомодульної конструкції для вимірювання малих перепадів тиску ($\pm 6 \times 10^{-3}$ Па) на фоні великого статичного тиску у всіх досліджуваних рідинах в діапазоні температур 77–100 К. Оскільки сенсор встановлювався у перегородку паливних баків з криогенними рідинами, щоб уникнути спотворень під час вимірювань, товщина сенсора повинна була збігатися з товщиною перегородки, яка не перевищувала 3 мм. Габаритні розміри розробленого сенсора становили: висота – 3 мм, діаметр – 27 мм. На рис. 9 наведено зовнішній вигляд розробленого сенсора та його градувальну характеристику при 77 К.

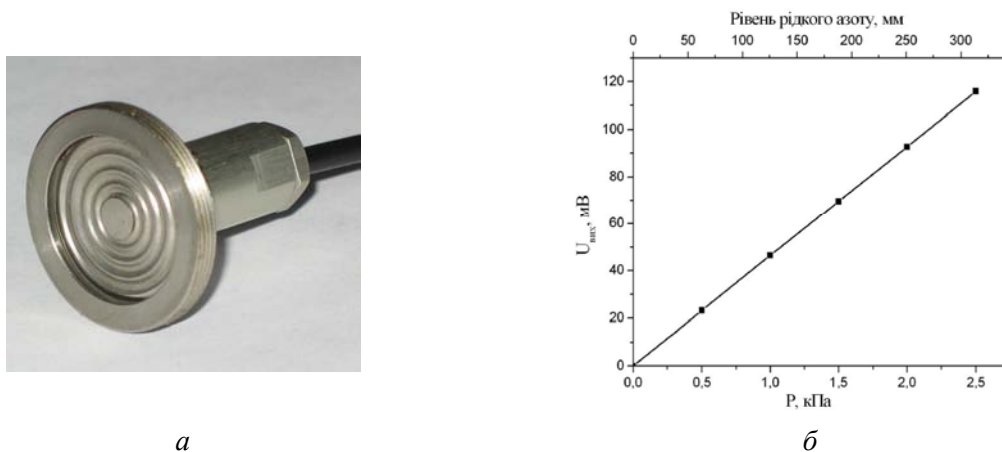


Рис. 8. Зовнішній вигляд (а) та градувальна характеристика (б) сенсора тиску – рівня рідкого азоту

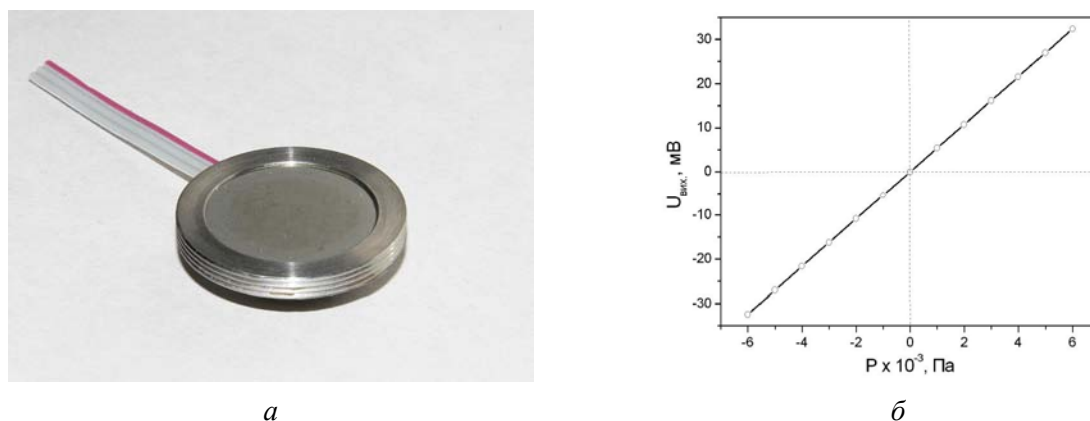


Рис. 9. Зовнішній вигляд (а) сенсора перепаду тисків криогенних рідин та його градувальна характеристика при 77К (б)

Як видно з рис. 9, б, розроблений сенсор забезпечує лінійність градувальної характеристики у всьому діапазоні вимірюваних перепадів тиску рідкого азоту $\Delta P = \pm 6 \times 10^{-3}$ Па.

Висновки

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

Створені сенсори тиску тензомодульної конструкції на основі НК кремнію, завдяки використанню спеціальних сплавів для виготовлення пружних елементів і методів кріплення тензорезисторів, а також властивостей самих НК, працездатні у різних температурних діапазонах від 4,2–300 К до -20...+ 350 °С. Висока власна частота і малі розміри розроблених сенсорів дозволяють використовувати їх для дослідження різних динамічних процесів у газах і рідинах, вносячи мінімальні спотворення у досліджуване середовище.

1. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Лавитская Е.Н., Кутраков А.П., Панков Ю.М. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам. // Датчики и системы. – 2001. – № 6, – С. 2–7. 2. Maryamova I., Lavitska E., Tykhan M., Kuttrakov A., Yatzuk Y. Semiconductor mechanical sensors for adverse and dynamic conditions. // XIV IMEKO World Congress, 1–6 June, 1997, Tampere, Finland, vol. IXA. – P. 99–103. 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. А. с. 1552797 от 22.11.1989 г. Датчики давления / Ю.И. Заганяч, М.А. Тухан, А.П. Кутраков. – По заявке № 4466535 от 21.06.1988 г. 6. Druzhinin A., Kuttrakov A., Lavitska E., Maryamova I. High temperature pressure sensors based on silicon microcrystals // 6 Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". – 17–19 сент. 2000 г., Туансе, Россия. Сб. науч. трудов. – Харьков, ХТУРЭ. – 2000. – С. 451–453. 7. 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. 8. Druzhinin A., Maryamova I., Kuttrakov O., Pavlovsky I., Palewski T. Experimental simulation of piezoresistive mechanical sensors based on Si microcrystals at cryogenic temperatures. // VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Wroclaw, 27–30 czerwca 2004. – Materiały konferencyjne. – S. 106–109.