

59. Vasylechko L., Savytskii D., Schmidt H., Bismayer U., Matkovskii A., Loutts G., Paulmann C. // *HASYLAB Annual Report*. – 2000. – 1. – P. 599–600.
60. Vasylechko L., Akselrud L., Matkovskii A., Sugak D., Durygin A., Frukacz Z., Lukaszewicz T. // *J. Alloys and Comp.* – 1996. – 242 (1–2). – P. 18–21.
61. Janovec V. // *Czech. J. Phys. B*. – 1972. – 22. – P. 974–994.
62. Sapriel J. // *Phys. Rev. B*. – 1975. – 12 (11). – P. 5128–5140.
63. Класен-Неклюдова М.В. *Механическое двойникование кристаллов*. – М., 1960.

УДК 621.315.592

А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, О.М. Лавитська,
О.П. Кутраков, Ю.М. Панков, Ю.М. Ховерко
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки,
Науково-дослідний центр “Кристал”

П'ЄЗОРЕЗИСТИВНІ СЕНСОРИ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ І КНІ-СТРУКТУР

© Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Лавитська О.М., Кутраков О.П.,
Панков Ю.М., Ховерко Ю.М., 2002

A.O. Druzhinin, I.I. Maryamova, O.M. Lavitska,
O.P. Kuttrakov, Y.M. Pankov, Y.M. Khoverko

PIEZORESISTIVE MECHANICAL SENSORS BASED ON SEMICONDUCTOR WHISKERS AND SOI-STRUCTURES

© Druzhinin A.O., Maryamova I.I., Lavitska O.M., Kuttrakov O.P.,
Pankov Y.M., Khoverko Y.M., 2002

Описано розроблені напівпровідникові тензорезистори на основі вирощених з газової фази ниткоподібних кристалів (НК) кремнію, германію і сполук A^3B^5 (антимоніду галію, арсеніду галію, фосфіду галію) та наведено їх характеристики. Розглянуто деякі типи розроблених п'єзорезистивних сенсорів тиску з тензорезисторами на основі НК кремнію, зокрема, сенсори для вимірювання пульсацій тиску, сенсори з універсальним тензомодулем, високотемпературні сенсори, сенсори для криогенних температур, для медичної діагностики, а також сенсори гідростатичного тиску на основі НК GaSb. Подано мікроелектронні сенсори тиску на основі шарів полікремнію-на-ізоляторі, рекристалізованих лазерним опроміненням.

Developed semiconductor strain gauges based on silicon, germanium and A^3B^5 compounds (GaSb, GaAs, GaP) whiskers grown from the vapour phase are described, and their performance are presented. Some types of developed pressure sensors with

strain gauges based on Si whiskers are presented, i.e. sensors to measure pressure pulsation, sensors with universal strain unit, high-temperature sensors, sensors for cryogenic temperatures, sensors for medical diagnostics, and sensors to measure hydrostatic pressure based on GaSb whiskers. Microelectronic sensors based on laser-recrystallized polysilicon layers-on-insulator are described.

Вступ

Основи Львівської наукової школи напівпровідникової тензометрії закладались ще в 60-х роках у науково-дослідній лабораторії кафедри напівпровідникової електроніки. Тоді під керівництвом проф. Г.В. Сандулової проводились роботи із вирощування напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК), зокрема НК кремнію, методом хімічних газотранспортних реакцій та дослідженню їх властивостей. Вирощені НК кремнію являли собою структурно досконалі шестигранні призми завдовжки 3–10 мм з шириною грані 20–60 мкм, що витягнуті вздовж кристалографічного напрямку [111].

Проведені дослідження показали, що одержані НК кремнію мають цілий набір властивостей, які відкривають можливості для створення на їх основі різноманітних сенсорів механічних величин. Так, дослідження механічних властивостей вирощених НК кремнію, які були проведені у Фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Йоффе АН СРСР, м. Ленінград, показали їх надзвичайно високу механічну міцність, яка наближається до теоретичної для кремнію. В НК кремнію р-типу, легованих бором, була виявлена висока тензочутливість [1], що дало підстави зробити висновок про можливість створення на основі цих кристалів мініатюрних чутливих напівпровідникових тензорезисторів [2].

Вперше про створення напівпровідникових тензорезисторів на основі НК кремнію доповідалось на I Всесоюзній конференції з напівпровідникової тензометрії у Новосибірську в 1965 році. Після того дослідження п'єзорезистивних властивостей напівпровідникових НК, вирощених в лабораторії, з метою створення сенсорів механічних величин розгорнулись широким фронтом. Пізніше в кінці 80-х років почались дослідження п'єзорезистивних властивостей шарів полікремнію-на-ізоляторі, рекристалізованих лазерним опроміненням, для створення на їх основі мікроелектронних сенсорів.

Основні напрямки наших досліджень і розробок:

- теоретичне і експериментальне дослідження тензорезистивного ефекту в НК кремнію, германію, їх твердих розчинах і деяких сполуках A^3B^5 (GaSb, GaAs, GaP);
- розробка чутливих тензорезисторів на основі напівпровідникових НК, працездатних в різних температурних і амплітудно-частотних діапазонах;
- розробка високочастотних сенсорів механічних величин (деформації, тиску, прискорення) для дослідження швидкодіючих процесів;
- розробка сенсорів тиску нового покоління з універсальним пружно-чутливим елементом (тензомодулем) з тензорезисторами на основі напівпровідникових НК;
- розробка високотемпературних сенсорів тиску;
- розробка сенсорів механічних величин, працездатних при низьких температурах і криогенних температурах;
- розробка напівпровідникових сенсорів гідростатичного тиску;
- розробка сенсорів для медичної діагностики;
- розробка сенсорів тиску для гірничо-шахтного обладнання, нафтових свердловин, газопроводів та ін.;

- розробка багатофункціональних сенсорів фізичних величин на основі напівпровідникових НК;
- розробка мікроелектронних сенсорів механічних і теплових величин на основі рекристалізованих лазером шарах полікремнію-на-ізоляторі (КНІ-структурах).

Розглянемо деякі типи сенсорів, які становлять найбільший інтерес і знайшли практичне застосування.

Напівпровідникові тензорезистори на основі ниткоподібних кристалів

Напівпровідникові НК, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій є ідеальною елементною базою для створення чутливих напівпровідникових тензорезисторів.

Відмітимо основні переваги використання цих кристалів як елементної бази тензорезисторів:

- розміри НК відповідають розмірам чутливих елементів тензорезисторів;
- унікальна механічна міцність НК, яка зумовлена їх структурною досконалістю, дає змогу значно розширити діапазон деформацій, які вимірюються тензорезисторами;
- напрямок росту кристалів [111] збігається з напрямком максимального п'єзорезистивного (тензорезистивного) ефекту в кремнії р-типу, германії n- і р-типів, антимоніду галію n- і р-типів, арсеніду галію р-типу, фосфіду галію р-типу, що дозволяє реалізувати максимальну тензочутливість для цих матеріалів;
- можливість легування НК різними домішками безпосередньо під час їх вирощування дає можливість отримати кристали із заданими параметрами і, відповідно, змінювати параметри тензорезисторів на їх основі;
- малий відхід напівпровідникового матеріалу, відсутність проміжних технологічних операцій із виготовлення чутливих елементів, які використовуються для виготовлення дискретних тензорезисторів, оскільки самі НК безпосередньо без будь-яких операцій використовуються як чутливі елементи тензорезисторів.

1. Тензорезистори на основі НК кремнію. Розроблена гнучка технологія одержання чутливих елементів тензорезисторів у вигляді НК кремнію, легованих бором та іншими домішками, методом хімічних газотранспортних реакцій в закритій системі, яка забезпечує одержання достатньо великої кількості структурно досконалих кристалів з певною концентрацією домішок [3–5] (рис. 1).

Розроблено також технологію створення омичних контактів до цих кристалів методом імпульсного зварювання платиного мікродроту з НК. Виготовлені таким методом контакти задовольняють усі вимоги до контактів напівпровідникових тензорезисторів і забезпечують їх надійну роботу в різних динамічних режимах і при підвищених температурах до +500 °С, оскільки температура евтектики Si-Pt дорівнює 830 °С.

Проведені механічні випробування розроблених кремнієвих тензорезисторів показали, що вони витримують більше ніж 10^7 циклів навантаження-розвантаження при рівні деформації не менше ніж $\pm 1 \times 10^{-3}$ відн. од. без поломок і утворення тріщин [5, 6]. Тензорезистори на

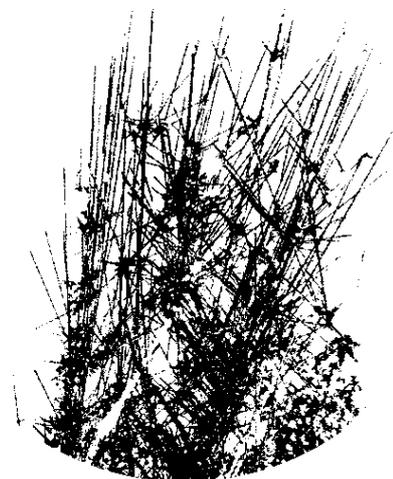


Рис. 1. Мікрофотографія НК кремнію, вирощених з газової фази

основі НК кремнію витримують деформації розтягу-стиску $\varepsilon = \pm 5 \times 10^{-3}$ відн. од. (0,5 %), а тензорезистори з НК завтовшки 10 мкм витримують деформації до 1 %. Вони робоздатні під час дії великих відцентрових прискорень, добре переносять перевантаження, вібрації, ударні прискорення тощо.

Проведені дослідження тензорезистивних властивостей НК кремнію р-типу, легованих бором до концентрацій $5 \times 10^{17} \dots 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, в широкому діапазоні температур і деформацій дозволили встановити оптимальні рівні легування для створення на їх основі тензорезисторів, працездатних в різних температурних діапазонах [4–6].

Тензорезистори на основі НК кремнію р-типу з концентрацією бору $(1-5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ мають найбільш оптимальні характеристики в діапазоні температур $+20 \dots +450 \text{ }^\circ\text{C}$. При $20 \text{ }^\circ\text{C}$ їх коефіцієнт тензочутливості дорівнює $K = 100-140$, а температурний коефіцієнт опору (ТКО) дорівнює $+(0,08-0,12) \% \cdot \text{град}^{-1}$. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості в діапазоні температур $+20 \dots +500 \text{ }^\circ\text{C}$ наведена на рис. 2.

Найбільш придатними для створення тензорезисторів, робоздатних при низьких і криогенних температурах до температури рідкого гелію виявились сильно леговані НК кремнію р-типу з питомим опором $\rho \approx 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [7]. На рис. 3 показані залежності відносної зміни опору цих тензорезисторів від деформації. При 77 K їх коефіцієнт тензочутливості дорівнює 120, а при $4,2 \text{ K}$ становить ≈ 140 . Такі тензорезистори мають невеликі номінали опору при криогенних температурах, а також лінійну температурну залежність опору в діапазоні $77 \dots 300 \text{ K}$. Крім того, вони працездатні в сильних магнітних полях до 5 T , зміна їх коефіцієнта тензочутливості у цьому випадку не перевищує 3 %.

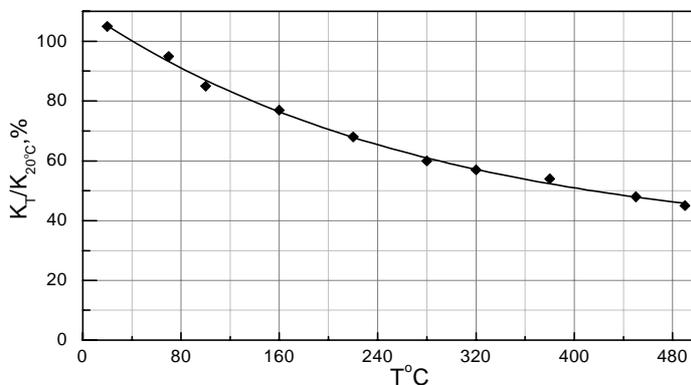


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості тензорезисторів на основі НК кремнію р-типу

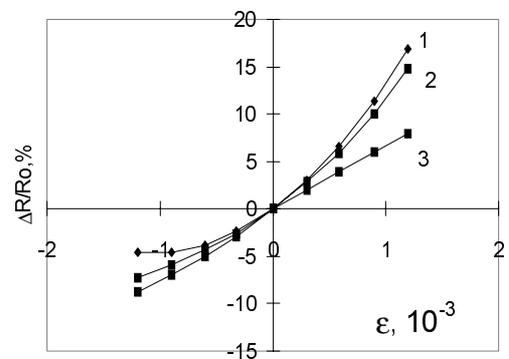


Рис. 3. Залежність відносної зміни опору від деформації для тензорезисторів з НК р-Si з $\rho = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при різних температурах :
1 – 4,2 K; 2 – 77 K; 3 – 300 K

Основні параметри розроблених кремнієвих тензорезисторів наведені в табл. 1.

Розроблені тензорезистори на основі НК кремнію не поступають за своїми параметрами дискретним кремнієвим тензорезисторам провідних фірм і перевершують їх за своїми механічними властивостями і діапазоном робочих температур. Так, якщо для відомих Si-тензорезисторів максимальна робоча температура обмежується температурою утворення евтектики Si-Au і не перевищує $+320 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$, в нашому випадку тензорезистори

працездатні при температурах до +500 °С (початок пластичності кремнію), зберігаючи при цьому високу тензочутливість.

Таблиця 1

Параметри тензорезисторів на основі НК кремнію

Назва параметра	Значення
Діапазон робочих деформацій, відн. од.	$\pm (1 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-3})$
Гранична деформація, відн. од.	$\pm (0,8 \dots 1) \times 10^{-2}$
Номінальний опір при 20 °С, Ом	50...400
Коефіцієнт тензочутливості при 20 °С	+80...+150
Температурний коефіцієнт опору (ТКО) в діапазоні +20...+120 °С, %·град ⁻¹	$\approx +0,1$
Температурний коефіцієнт тензочутливості в діапазоні +20...120 °С, %·град ⁻¹	$\approx -0,2$
Робочі діапазони температур, °С	-60...+450, -269...+20
Розміри тензорезистора, мм ³	(0,02–0,04)×(0,02–0,04)×(1–5)

Останні дослідження, проведені нами у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур (Вроцлав, Польща), показали [8], що тензорезистори на основі НК р-Si з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик при температурі рідкого гелію мають гігантську тензочутливість, яка на декілька порядків перевищує відомі значення коефіцієнта тензочутливості для кремнію р-типу з іншою концентрацією домішок. Коефіцієнт тензочутливості для таких тензорезисторів сягає аж до $K \approx -570450$ при 4,2 К при деформації стиску, що відкриває широкі можливості створення надчутливих тензорезисторів і сенсорів на їх основі для криогенних температур.

Тензорезистори для вимірювання великих деформацій до стадії руйнування виробів чи конструкцій виготовлялись на основі НК кремнію завтовшки не більше 10 мкм. У цьому випадку контакти створювались напиленням платини, а самі кристали монтувались на спеціальних підкладках [9]. Діапазон робочих деформацій таких сенсорів становив $\varepsilon = (0,01-1)\%$, коефіцієнт тензочутливості $K = 90 \dots 110$ при 20 °С, діапазон робочих температур -100 ...+150 °С [10]. На рис. 4 наведено градуювальні характеристики цих сенсорів при різних температурах. Вони успішно застосовувались

для випробувань на міцність різних виробів, у тому числі для вимірювання великих ударних деформацій з тривалістю фронту наростання деформації в кілька мілісекунд.

Варто зауважити високу радіаційну стійкість розроблених тензорезисторів. Показано, що тензорезистори на основі НК кремнію р-типу з $\rho = 0,01-0,02$ Ом·см не змінюють свої характеристики після опромінення їх електронами високих енергій (до 14 МеВ) з дозою, яка не перевищує 1×10^{17} ел/см² [6].

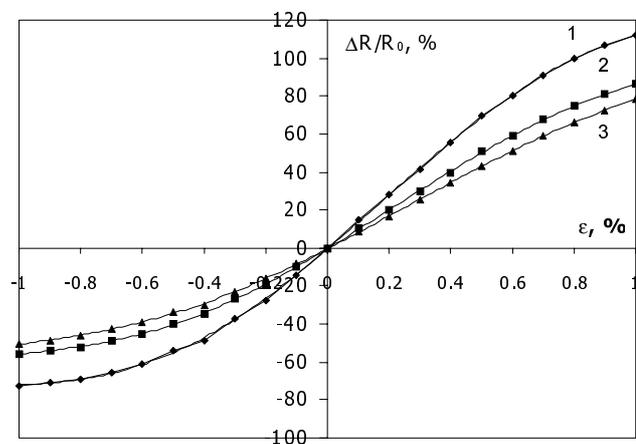


Рис. 4. Градуювальні характеристики тензорезисторів з НК р-кремнію при великих рівнях деформації при різних температурах: 1 – -100 °С; 2 – +20 °С; 3 – +150 °С

Отже, тензорезистори на основі НК кремнію відрізняються від відомих дискретних кремнієвих тензорезисторів унікальними механічними властивостями, які дозволяють вимірювати статичні і динамічні деформації в широкому амплітудному діапазоні, розширеним діапазоном робочих температур від криогенних до +450 °С, а також гнучкою технологією їх виготовлення з мінімальним відходом напівпровідникового матеріалу.

2. Германієві тензорезистори. Розроблені германієві тензорезистори двох типів: тонкоплівкові і на основі вирощених НК.

Дослідження тензометричних властивостей плівок германію, одержаних методом іонно-плазмового напилення на підкладки з сіталу, показали [11], що їх параметри суттєво залежать від різних технологічних факторів, зокрема, від температури підкладки. Були одержані тонкоплівкові германієві тензорезистори з коефіцієнтом тензочутливості $K=50$ при кімнатній температурі. Перевагою цих тензорезисторів є дуже малий температурний коефіцієнт опору, який дорівнює $0,01\% \cdot \text{град}^{-1}$ в діапазоні температур $-60...+60\text{ }^\circ\text{C}$ [11].

Розроблені тензорезистори на основі НК германію n- і p-типів провідності з орієнтацією [111] відрізняються високою тензочутливістю, особливо при низьких температурах [12]. Легуючи ці кристали під час вирощування різними домішками, можна суттєво змінювати їх деформаційні і температурні характеристики [13]. Параметри тензорезисторів, виготовлених з НК германію n-типу, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри тензорезисторів на основі НК Ge n-типу

Параметр	КГТР-1	КГТР-2	КГТР-3
Діапазон робочих деформацій, відн. од.	$\pm (5 \times 10^{-5} \dots 5 \times 10^{-3})$	$\pm (1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3})$	$\pm (1 \times 10^{-5} \dots 2,5 \times 10^{-4})$
Діапазон робочих температур, К	4,2...300	77...100	4,2
Коефіцієнт тензочутливості	-400...-600 при 4,2 К	-1000...-1400 при 77К	$-(9...10) \times 10^{-3}$ при 4,2 К
Номинальний опір, Ом	30...100 при 4,2 К	100...500 при 77К	$(1...5) \times 10^4$ при 4,2К

Екстремально високі значення коефіцієнта тензочутливості $K = -(9...10) \times 10^3$ при температурі рідкого гелію для тензорезисторів КГРТ-3 пов'язані з тим, що рівень легування НК германію n-типу, на основі яких виготовлені ці тензорезистори, відповідає області переходу метал-діелектрик. Аналогічне явище спостерігалось під час дослідження характеристики тензорезисторів на основі НК германію p-типу при 4,2 К [14]. Для НК p-Ge з концентрацією легуючих домішок поблизу переходу метал-діелектрик $K = 8240$ при гелієвих температурах, що в кілька десятків разів більше від коефіцієнта тензочутливості для p-Ge з іншою концентрацією акцепторних домішок домішок.

3. Тензорезистори на основі НК сполук A^3B^5 . Для розширення діапазона робочих температур напівпровідникових тензорезисторів були проведені дослідження тензорезистивних властивостей НК антимоніду галію, арсеніду галію і фосфіду галію, вирощених з газової фази з орієнтацією [111]. Ці дослідження закінчились розробкою тензорезисторів на основі НК антимоніду галію n- і p-типів провідності [15], арсеніду галію n- і p-типів [16] і фосфіду галію p-типу [17]. Основні технічні характеристики розроблених тензорезисторів подані у табл. 3.

Параметри напівпровідникових тензорезисторів на основі НК А³В⁵

Параметри	ТР на основі НК GaSb n-типу	ТР на основі НК GaSb р-типу	ТР на основі НК GaAs р-типу	ТР на основі стрічкових кристалів GaAs n-типу	ТР на основі НК GaP р-типу
Діапазон деформації, відн.од.	$\pm(10 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3})$	$\pm(1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3})$	$\pm(1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3})$	$1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3}$	$\pm(1 \times 10^{-5} \dots 3 \times 10^{-3})$
Номинальний опір при 20°C, Ом	50-200	200-600	40-100	200-600	150-600
Коефіцієнт тензочувливості при 20°C	-97...-110	+50...+60	+30...+40	-75...-90	+80...+95
ТКО вільних тензорезисторів, %град ⁻¹	+ (0,33...0,38) в діапазоні -100...+100 °C	+ (0,18...0,21) в діапазоні -75...+100 °C	+ (0,12...0,18) в діапазоні -60...+180 °C	-0,01...+0,03 в діапазоні +20...200 °C	+ (0,15...0,17) в діапазоні +200...500 °C
ТКО приклеєних до сталі тензорезисторів, %град ⁻¹	+ (0,20...0,23) в діапазоні -100...+100°C	+ (0,23...0,24) в діапазоні -50...+100 °C	-	-	+ 0,25 в діапазоні +200...+400 °C
Температурний коефіцієнт тензочувливості, %град ⁻¹	≈±0,02 в діапазоні -100...+100 °C	- (0,16...0,20) в діапазоні -120...+100 °C	- 0,03 в діапазоні -120...+80 °C	- 0,16 в діапазоні +20...+300 °C	- (0,02...0,03) в діапазоні +300...+550 °C
Робочий діапазон температур, °C	-160...+100	-160...+100	-120...+300	+20...+400	+300...+550
Максимальна температура, °C	+110	+110	+350	+450	+550
Розміри, мм ³	(0,03-0,04)×(0,03-0,04)×(4-6)				
	(0,02-0,04)×(0,02-0,04)×(4-6)				
	(0,005-0,015)×(4-6) × (0,02-0,04)×(4-7)				

Як видно з табл. 3, тензорезистори з антимоніду галію n-типу поряд з високою тензочутливістю, близькою за величиною до кремнію, мають дуже слабку температурну залежність коефіцієнта тензочутливості (на порядок нижче ніж у кремнієвих) в діапазоні температур $-100...+100$ °С.

Тензорезистори на основі стрічкових кристалів GaAs n-типу мають достатньо велику тензочутливість і можуть працювати при підвищених температурах до $+400...+450$ °С. Завдяки своїй формі, вони прекрасно передають деформацію з досліджуваного об'єкта, їх мінімальний радіус згину досягає 0,2–0,6 мм.

Створення тензорезисторів на основі НК фосфіду галію дозволило ще більше розширити температурний діапазон роботи напівпровідникових тензорезисторів у бік високих температур, оскільки GaP має найбільшу ширину забороненої зони з досліджуваних нами сполук A^3B^5 . Ці тензорезистори мають велику тензочутливість в області високих температур: $K = +40...50$ при 500 °С і слабку температурну залежність тензочутливості в діапазоні температур $+300...+500$ °С.

Сенсори тиску з напівпровідниковими тензорезисторами на основі НК

Оскільки розроблені кремнієві тензорезистори поєднують в собі мініатюрність, великий коефіцієнт тензочутливості, високу механічну міцність та можливість роботи в широкому діапазоні температур, це дозволило створити на їх основі чутливі сенсори механічних величин (деформації, зусилля, тиску, прискорення), які знайшли застосування в різних галузях техніки.

Розглянемо деякі типи розроблених сенсорів тиску.

Сенсори для вимірювання пульсації тиску. Основою конструкції сенсорів тиску першого покоління з кремнієвими тензорезисторами була мембрана, яка сприймала тиск. Тензорезистори закріплювалися безпосередньо на мембрані згідно з розподілом механічних напружень (деформацій) на мембрані таким чином, щоб один з тензорезисторів знаходився в зоні деформації розтягу, а інший – деформації стиску. Використання мініатюрних тензорезисторів на основі НК кремнію з високою тензочутливістю дозволило зменшити

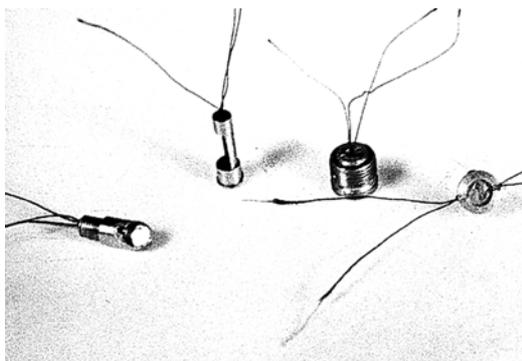


Рис. 5. Сенсори для вимірювання пульсації тиску: перший праворуч – сенсор тиску по профілю лопатки компресора; другий праворуч – сенсор тиску для двигунів внутрішнього згоряння; два сенсори ліворуч – для дослідження локальних течій газу по тракту компресора газотурбинного двигуна

розміри мембрани і підвищити власну частоту сенсора, що відкрило можливості створення високочастотних сенсорів тиску для дослідження процесів швидкого перебігу.

Перші розроблені сенсори тиску з тензорезисторами на основі НК кремнію призначались для вимірювання пульсації тиску в газах. Так, на замовлення Центрального інституту авіаційного моторобудування (ЦІАМ) був розроблений високочастотний сенсор для вимірювання тиску в різних точках по профілю лопатки компресора турбореактивного двигуна [18]. Основу сенсора становила металева мембрана завтовшки 0,02 мм з двох боків приварена до кільця, встановленого в обойму (рис. 5). Тензорезистори з базою 1,8 мм приклеювались до мембрани з обох сторін по центру. Діапазон

вимірюваних сенсором тисків дорівнював $0...5 \times 10^4$ Па, частотний діапазон пульсації тиску 0–500 Гц, власна частота сенсора становила 35–37 кГц; вони виявились ротоздатними при відцентрових прискореннях до 36 000 “g”, похибка сенсора не перевищувала 1,5 %. Розміри сенсора: зовнішній діаметр – 6 мм і висота – 1 мм дозволили встановити їх в різних точках лопатки і вперше провести вимірювання тиску по профілю лопатки компресора. Розроблені сенсори успішно працювали на стендах ЦІАМ протягом 15 років.

Для дослідження надзвукових потоків розроблений сенсор типу ТМТ-1 для діапазону температур +20...+180 °С [19]. Основу конструкції сенсора становила мембрана, виготовлена зі сплаву 44НХТЮ, завтовшки 0,2 мм і робочим діаметром 9 мм. Розміри сенсора: 16×16 мм, власна частота сенсора ~17 кГц. Один і той самий сенсор міг використовуватись для вимірювання тиску в різних діапазонах від $0... \pm 1 \times 10^4$ Па до $0... \pm 1 \times 10^5$ Па. Сумарна похибка сенсора в діапазоні $0... \pm 1 \times 10^5$ Па не перевищувала 1 %.

Для дослідження локальних течій газу по тракту компресора газотурбінного двигуна розроблений сенсор-зонд оригінальної конструкції (рис. 5) [20]. Розміри сенсора повинні бути мінімальними, щоб не вносити спотворень у досліджуваний газовий потік. Зовнішній діаметр сенсора становив 3,6 мм при робочому діаметрі мембрани 3 мм; товщина мембрани – 0,05 мм, вага сенсора – менше ніж 2 г. Розроблені сенсори двох типів: торцевий (мембрана розташована перпендикулярно до потоку) для вимірювання пульсації повного тиску та кутовий (мембрана розташована вздовж потоку) для вимірювання пульсації статичного тиску. Чутливість сенсора (разом з вимірювальним комплексом) дорівнювала $2,5 \times 10^2$ Па (25 мм вод. ст.). За допомогою таких сенсорів вдалось записати пульсаційну складову тиску в елементарному струмені на перерізі сопла, їх застосування дозволило значно підвищити надійність та економічність газотурбінних двигунів.

Сенсори тиску з універсальним тензомодулем. На певному етапі виникла необхідність у створенні сенсорів тиску нової конструкції, яка б задовольняла такі вимоги:

- мінімальний розмір мембрани і одночасна можливість використання двох або чотирьох робочих тензорезисторів, з'єднаних у мостову схему, при цьому самі тензорезистори можна було винести за межі мембрани для розширення області застосування сенсорів (агресивні середовища, високі температури тощо);
- містила універсальний пружно-чутливий елемент з тензорезисторами, що дозволило б уніфікувати конструкцію сенсора незалежно від діапазону тисків і умов застосування;
- забезпечила достатню простоту виготовлення сенсора і автоматизацію ряду операцій під час виготовлення партій сенсорів, а також добрі метрологічні характеристики, в тому числі амплітудно-частотні.

Конструкція такого сенсора тиску з універсальним тензомодулем була розроблена під керівництвом канд. техн. наук Ю.Й. Заганяча [21, 22].

Основу конструкції сенсора (рис. 6) становить тензомодуль 5, який складається з кільцевого елемента з консольною балочкою 7, з обох боків якої закріплені напівпровідникові тензорезистори, з'єднані в мостову схему. Прогин мембрани 3 під дією тиску передається через шток на консольну балочку тензомодуля, викликаючи її прогин і, відповідно, деформацію закріплених на ній тензорезисторів, що приводить до появи вихідного сигналу в мостовій схемі. Струмививоди тензорезисторів під'єднуються до контактної вузла 6, встановленої на кільці тензомодуля. Шток методом зварювання з'єднується з вільним кінцем балочки 7 тензомодуля. Розрахунок системи мембрана–шток–балочка дав

зможу вибрати оптимальну конфігурацію і розміри штока, щоб забезпечити необхідні частотні характеристики системи, а також зменшити її нелінійність. Розміри мембрани, що сриймає тиск, визначаються діапазоном тиску, який вимірює сенсор, і умовами роботи сенсора. Для підвищення частотного діапазону сенсора всі елементи конструкції з'єднуються між собою і з корпусом сенсора за допомогою зварювання.

Зовнішній вигляд сенсора тиску тензомодульної конструкції показано на рис. 7. В такому сенсорі зовнішній діаметр мембрани не більше ніж 3,5 мм, власна частота сягає 30–40 кГц, діапазон тисків, що вимірюються, від $0 \dots 1 \times 10^5$ Па до $0 \dots 10$ МПа.

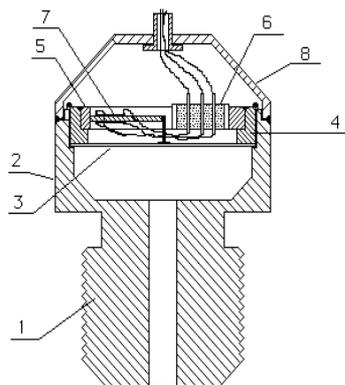


Рис. 6. Конструкція сенсора тиску з універсальним тензомодулем:

1 – штуцер; 2 – корпус; 3 – мембрана; 4 – обойма тензомодуля; 5 – тензомодуль; 6 – контактний вузол; 7 – балочка з тензорезисторами; 8 – кришка корпусу

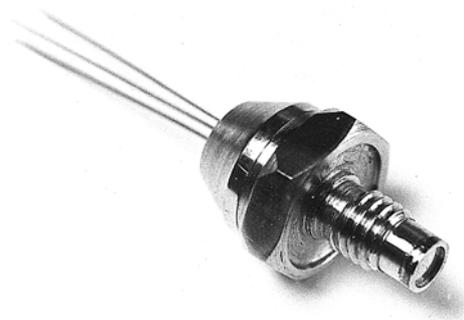


Рис. 7. Сенсор тиску тензомодульної конструкції

Використання тензомодульної конструкції сенсорів тиску виявилось дуже перспективним. Були розроблені сенсори тиску нового покоління, які поєднували в собі малі розміри і високу власну частоту з великою чутливістю і добрими метрологічними характеристиками. Значно спростилась і технологія виготовлення таких сенсорів, з'явилась можливість попереднього тарювання і розбракування сенсорів по тензомодулях, що дало змогу зменшити розкид характеристик в партії сенсорів.

Високотемпературні сенсори тиску. Розвиток ряду областей нової техніки, зокрема авіаційно-космічної, висунув задачу створення чутливого малогабаритного високотемпературного сенсора тиску. Концепція створення такого сенсора на основі кремнієвих тензорезисторів була розроблена нами [23, 24].

Оскільки розроблені тензорезистори на основі НК кремнію працездатні при температурах до $+450 \dots 500$ °С, виникла необхідність вибору відповідних конструктивних матеріалів для виготовлення пружних елементів сенсора і методів закріплення тензорезисторів, які б забезпечували роботу сенсора при таких температурах. Після проведення комплексних досліджень запропоновано повністю відмовитись від полімерних клеїв і перейти на склоприпої і склоцементи для закріплення тензорезисторів. Як матеріал для виготовлення пружних елементів вибрано коваровий сплав 29НК з коефіцієнтом термічного розширення $KTR = (4,6-5,5) \times 10^{-6}$ град⁻¹. Під час нагрівання на поверхні ковару утворюється окисна

плівка, яка добре взаємодіє зі склом. Технологія створення міцних вакуум-щільних з'єднань ковар-скло широко використовується в електронній промисловості.

Для закріплення тензорезисторів на пружних елементах з ковару використовувався склоприпій С51-1 з $KTR=4,9 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$, близьким до КТР кремнію, який дорівнює $(2,5-4,2) \times 10^{-6}$ град $^{-1}$ у діапазоні температур від +20 до +550 °С. Температура розм'якшення склоприпю становить $\approx +570$ °С. Використання комбінації кремнієвий тензорезистор–склоприпій–ковар з близькими КТР дозволило уникнути виникнення великих термічних напружень і забезпечило стабільність роботи сенсора при високих температурах.

У розроблених високотемпературних сенсорах тиску було реалізовано тензомодульну конструкцію, при цьому пружний елемент тензомодуля, корпус сенсора та інші елементи конструкції виготовлялись з ковару. Для забезпечення високої власної частоти сенсора всі елементи його конструкції з'єднувались між собою за допомогою лазерного зварювання. Перевагою тензомодульної конструкції було і те, що перехід з одного діапазону тисків на інший здійснюється зміною розмірів сприймаючої мембрани, в той час як розміри самого тензомодуля залишаються незмінними.

Розроблені різні модифікації високотемпературних сенсорів тиску [25], зокрема для вимірювання пульсацій тиску газів у авіаційних двигунах. Завдяки малим розмірам мембрани такі сенсори можна встановлювати у важкодоступних місцях.

Залежності вихідного сигналу сенсора від тиску при різних фіксованих температурах показані на рис. 8.

Основні параметри розроблених високотемпературних сенсорів тиску наведено в табл. 4.

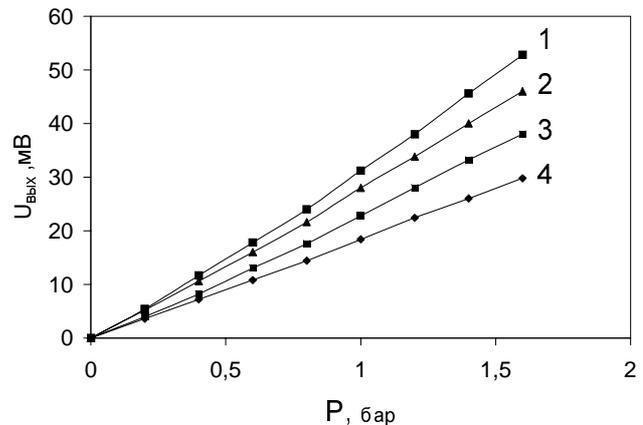


Рис. 8. Градувальні характеристики високотемпературного сенсора тиску при різних температурах:

1 – +20 °C; 2 – +103 °C; 3 – +218 °C; 4 – +320 °C

Таблиця 4

Параметри високотемпературного сенсора тиску

Назва параметра	Числове значення
Діапазон робочих тисків	від $0-1 \times 10^{15}$ до $0-20$ МПа
Діапазон робочих температур	$-60 \dots +350$ °C
Вихідний сигнал (без підсилення) $U_{\text{вих}}$ при $U_{\text{живл}}=2$ В (при 20 °C)	40–60 мВ
Температурний коефіцієнт вихідного сигналу	$\approx -0,2$ % · град $^{-1}$
Власна частота сенсора	10–40 кГц
Розміри сенсора:	
діаметр сприймаючої мембрани	3,8–9 мм
зовнішній діаметр	9–14 мм
висота	2–10 мм

Для діагностики двигунів внутрішнього згоряння розроблена оригінальна конструкція сенсора тиску з охолодженням рідиною, що дасть змогу забезпечити роботоздатність сенсора при температурі оточуючого середовища до $\sim +800$ °С.

Сенсори тиску для криогенних температур. Перші дослідження тензорезисторів на основі НК кремнію при температурі рідкого азоту проводились ще в 80-х роках [26, 27]. Було показано, що для розширення робочого діапазону температур кремнієвих тензорезисторів і сенсорів на їх основі у бік криогенних температур доцільно використовувати пружні елементи, виготовлені з інварного сплаву 36Н, який має КТР, близький до кремнію в області низьких температур, а закріплення тензорезисторів на пружних елементах здійснювати за допомогою лаку ВЛ-931, який має добрі пружні властивості при низьких температурах. В роботі [22] описано розроблений сенсор тензомодульної конструкції для вимірювання тиску в діапазоні $0...1 \times 10^5$ Па при температурі рідкого азоту.

На замовлення НВО “Енергія” був розроблений сенсор для вимірювання малих перепадів тиску криогенних рідин до 6×10^3 Па, роботоздатний при температурі рідкого азоту. Оригінальна конструкція сенсора (рис. 9) дала змогу зменшити його висоту до 3 мм при діаметрі 25 мм при збереженні високої чутливості.

На основі тензомодульної конструкції був розроблений сенсор тиску криогенних рідин (рідкого азоту і рідкого гелію) для діапазону тисків $0...10$ МПа [13]. На рис.10 показані залежності вихідного сигналу розробленого сенсора від тиску криогенної рідини. Розроблений сенсор використовувався, зокрема для вимірювання тиску рідкого гелію в циркуляційних системах охолодження надпровідного магніту в установці ТОКАМАК.



Рис. 9. Сенсор для вимірювання малих перепадів тиску криогенних рідин

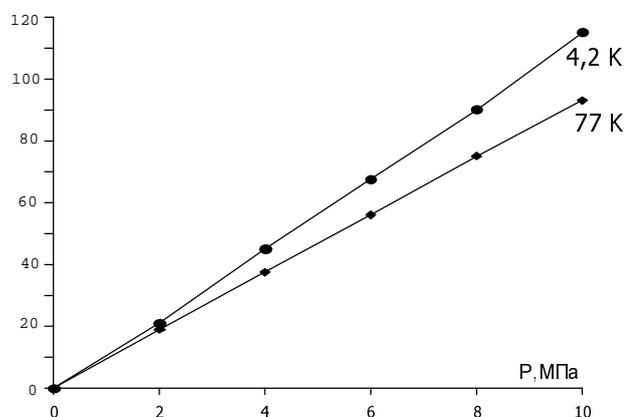


Рис. 10. Залежності вихідного сигналу сенсора від тиску криогенних рідин:
1 – рідкого гелію; 2 – рідкого азоту

На основі сенсора тиску розроблений також сенсор рівня криогенних рідин з чутливістю $\approx 0,25$ мВ/В на 1 мм рідкого азоту [13].

Сенсори для медичної діагностики. При створенні медичних сенсорів була використана, в основному, тензомодульна конструкція. Наведемо кілька прикладів розроблених сенсорів з тензорезисторами на основі НК кремнію.

Для діагностики черепно-мозкових травм створений сенсор для вимірювання внутрішньо-черепного тиску [28], показаний на рис. 11. Корпус сенсора виготовлений з нержавіючої

сталі, форма корпусу у вигляді краплі забезпечує мінімальне ушкодження оточуючих тканин. Висота сенсора менша за 2,5 мм, вага – 3 г. Діапазон тисків, які вимірює цей сенсор, становить 0–300 мм рт. ст., максимальний вихідний сигнал без підсилення – 60 мВ. Для узгодження з реєструючою апаратурою сенсор має підсилювач постійного струму, виконаний в окремому корпусі і з'єднаний гнучким кабелем з сенсором. Цей сенсор успішно пройшов клінічні випробування і використовувався в нейрохірургічному відділенні Львівської лікарні швидкої допомоги.

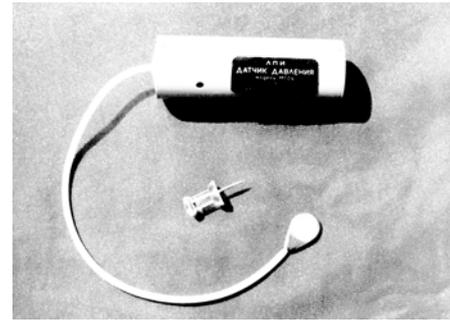


Рис. 11. Сенсор для вимірювань внутрішньочерепного тиску

Для гастроентерологічних досліджень розроблений мініатюрний сенсор для вимірювання тиску в порожнині [28]. Сенсор встановлювався на зонді разом з рН-метром для вимірювання кислотності. Основні параметри цього сенсора наведені у табл. 5. Сенсор використовувався для діагностики захворювань шлунка і дванадцятипалої кишки.

Таблиця 5

Параметри зонда для гастроентерологічної діагностики

Назви параметрів	Числове значення
Діапазон тисків	0–300 мм вод.ст.
Максимальний вихідний сигнал без підсилення ($U_{живл} = 2 \text{ В}$)	60 мВ
Роздільна здатність	2 мм вод. ст.
Розміри сенсора	5 мм×10 мм×12 мм
Максимальний діаметр зонда	7 мм

Для діагностики захворювань в області отоларингології розроблені різноманітні сенсори [28], зокрема сенсор диференційного тиску для діагностики функцій слухової трубки з чутливістю $\sim 0,15 \text{ мВ/мм вод. ст.}$ і сенсор тиску-розрідження на діапазон $\pm 500 \text{ мм вод. ст.}$ ($\pm 49 \text{ кПа}$) з максимальним вихідним сигналом 80 мВ без підсилення. Сенсори застосовувались у Львівському медінституті та інших лікувальних закладах.

Сенсори гідростатичного тиску. При вимірюванні великих тисків ($P > 100 \text{ МПа}$) у деяких випадках доцільно відмовитись від відомої конструкції мембранного сенсора тиску із закріпленими на ній тензорезисторами і перейти до використання напівпровідникових елементів, чутливих до гідростатичного тиску (всєбічного тиску).

Для розроблення таких сенсорів проводились дослідження впливу гідростатичного тиску на різні напівпровідникові матеріали, зокрема, НК антимоніду галію n-типу провідності, в діапазоні тисків до 5 кбар (500 МПа) в кліматичному діапазоні температур. На основі цих досліджень НК GaSb n-типу, леговані селеном або телуром, були рекомендовані як чутливі елементи сенсорів з коефіцієнтом гідростатичного тиску $K_T = (18-20) \times 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$ [29]. Конструктивно розроблений сенсор є металевим корпусом, в якому знаходиться чутливий елемент – НК GaSb. Порожнина сенсора ззовні закрита фторопластовим ковпачком, який виконує функцію мембрани, і заповнена маслом АМГ, яке передає тиск на чутливий

елемент – НК GaSb зі струмовиводами. Розміри сенсора: висота – 17 мм, діаметр – 12 мм. Розроблені сенсори на різні діапазони тисків від 0–1 кбар (100 МПа) до 0–5 кбар (500 МПа). Перевагою таких сенсорів є відносна простота їх конструкції, великий вихідний сигнал (до 1 В без підсилення) і постійна чутливість у вимірюваному діапазоні тисків.

Розроблені сенсори використовувались для океанографічних досліджень, в авіаційній техніці та інших галузях. Слід відмітити, що для океанографічних досліджень був розроблений сенсор тиску-температури на основі НК GaSb і кремнію.

Показано також можливість створення сенсора великих тисків для дослідження швидкодіючих процесів на основі плівок антимоніду індію з чутливістю $K_T = (25 - 70) \times 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$ залежно від ступеня легування.

В кінці 80-х років були започатковані роботи із створення мікроелектронних сенсорів тиску на основі структур кремній-на-ізоляторі, а саме на шарах полікремнію на діелектричних підкладках, рекристалізованих лазерним випромінюванням.

Вихідними структурами для виготовлення сенсорів є шари полікремнію, які одержуються методом осадження з газової фази в реакторі пониженого тиску на термічно окислені пластини кремнію р-типу. Легування шарів полікремнію здійснювалось методом іонної імплантації.

Розроблена технологія лазерної рекристалізації шарів полікремнію за допомогою скануючого опромінення ІАГ-лазера [30]. Для того, щоб створити оптимальні температурні градієнти в зоні лазерної рекристалізації, використовувалась композиція капсулюючих шарів SiO_2 і Si_3N_4 . Модифікуючи температурні поля в області фронту рекристалізації та інші технологічні фактори, можна змінювати структуру полікремнію і одержувати монокристалічні області розміром до $500 \times 30 \text{ мкм}$ [31].

Для створення сенсорів механічних величин були проведені дослідження, які дозволили встановити вплив структури шарів полікремнію-на-ізоляторі на їх електричні та п'єзорезистивні властивості [32]. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження п'єзорезистивних шарів полікремнію до і після лазерної рекристалізації з різною концентрацією домішок [33]. Показано, що лазерна рекристалізація дає змогу значно збільшити тензочутливість шарів полікремнію, зменшити їх опір та збільшити стабільність порівняно з нерекристалізованими шарами [30]. Для створення сенсорів вибрано оптимальні концентрації домішок у рекристалізованих шарах полікремнію.

Розроблено технологію мікроелектронного сенсора тиску з чотирма полікремнієвими тензорезисторами, які з'єднані у мостову схему і розташовані на кремнієвій мембрані, яка виготовлена методом анізотропного травлення [34]. Товщина мембрани визначається діапазоном тисків, які повинен вимірювати сенсор. Розміри самої мембрани становлять $2 \times 2 \text{ мм}$, а за необхідності можуть бути суттєво зменшені.

Разом з підприємством “Родон”, м. Івано-Франківськ, розроблено технологію виготовлення чутливих елементів мікроелектронних сенсорів тиску на основі рекристалізованих шарів полікремнію-на-ізоляторі [35]. Виготовлені експериментальні зразки сенсорів тиску на різні діапазони тисків і температур, які знайшли застосування у різних галузях, зокрема, в медицині, енергетиці, машинобудуванні та ін.

Основні параметри розроблених сенсорів тиску наведені у табл. 6.

Таблиця 6

Параметри мікроелектронних сенсорів тиску

Назва параметрів	Значення параметра
Діапазон робочих тисків	від $0-4 \times 10^4$ до $0-1$ МПа
Перевантаження по тиску	200 %
Живлення: напруга постійний струм	5–15 В 1–5 мА
Максимальний вихідний сигнал при 20 °С	(100 ± 10) мВ
Температурний дрейф нуля	$\approx 0,07$ мВ/°С
Температурний коефіцієнт вихідного сигналу	$-(0,04-0,05) \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Діапазон робочих температур	$-60 \dots +60$ °С; $+20 \dots +300$ °С
Власна частота	100–200 кГц

Розроблений також варіант мікроелектронного сенсора тиску-температури [36], в якому роль терморезистора виконує розташований на чіпі сенсора за межами мембрани відповідним чином легований полікремнієвий резистор з ТКО порядку $+0,35 \% \cdot \text{град}^{-1}$.

Перевагами розроблених сенсорів тиску є їх серійноздатність, мініатюрність, можливість роботи при підвищених температурах до $+300$ °С.

Передбачалось налагодити серійне виробництво розроблених мікроелектронних сенсорів тиску на підприємстві “Родон” для різних галузей народного господарства України, але економічні складності, які виникли на підприємстві, не дали можливості здійснити заплановане.

Колектив виконавців не зупиняється на досягнутому і продовжує розробляти нові типи сенсорів механічних величин, розширюючи елементну базу сенсорів. Проводяться дослідження із створення багатофункціональних сенсорів фізичних величин як на основі напівпровідникових НК, так і на КНІ структурах [37].

Висновки

1. Ниткоподібні кристали (НК) кремнію, германію і деяких сполук A^3B^5 (антимоніду галію, арсеніду галію та фосфіду галію), вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій, завдяки своїм властивостям, виявились ідеальною елементною базою для створення на їх основі п'єзорезистивних сенсорів механічних величин: тензорезисторів, сенсорів тиску, прискорення та ін. Розроблені на основі цих кристалів тензорезистори характеризуються високою чутливістю, прекрасними механічними властивостями, можливістю роботи в різних амплітудно-частотних і температурних діапазонах від температури рідкого гелію до $+500$ °С.

2. Розроблені сенсори тиску з тензорезисторами на основі НК кремнію, завдяки характеристикам тензорезисторів та оригінальним конструктивним рішенням, зокрема з використанням універсального тензомодуля, мають високу чутливість до вимірюваного параметра, малі розміри, високу власну частоту, роботоздатні в різних динамічних режимах, придатні для роботи в екстремальних умовах (високі температури, криогенні температури, сильні магнітні поля, агресивні середовища тощо).

3. Використання шарів полікремнію-на-ізоляторі, рекристалізованих лазерним опроміненням як елементної бази мікроелектронних сенсорів механічних величин, зокрема сенсорів тиску, відкриває перспективи створення серійноздатних мініатюрних чутливих сенсорів, інтелектуальних і багатофункціональних сенсорів.

4. Дослідження впливу одновісної деформації на домішкову провідність НК кремнію і германію р-типу провідності при криогенних температурах виявили гігантський неklasичний п'єзоопір у цих кристалах поблизу переходу метал-діелектрик, що відкриває можливості створення на їх основі надчутливих сенсорів механічних величин для криогенних температур.

1. Сандулова А.В., Марьямова И.И., Заганяч Ю.И. // ФТТ. – 1965. – Т. 7. – С. 1581–1582.

2. Сандулова А.В., Марьямова И.И., Заганяч Ю.И. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. – К., 1966. – Вып. 1. – С. 114–121.

3. Сандулова А.В., Марьямова И.И., Заганяч Ю.И. // Полупроводниковые тензодатчики. – М., 1967. – С. 16–25.

4. Сандулова А.В., Заганяч Ю.И., Марьямова И.И. // Сб. трудов по полупроводниковым материалам, приборам и их применению. – Воронеж, 1968. – С. 149–158.

5. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y., Karetnikova E. and Kuttrakov A. // Sensors and Actuators. – 1992. – Vol. A30. – P. 27–33.

6. Maryamova I., Lavitska E., Tykhan M., Kuttrakov A. and Yatzuk Y. // Proceedings IMEKO World Congress. Finland. – 1997. – Vol. IX A. – P. 99–103.

7. Марьямова И.И., Яцюк Ю.С., Каретникова Е.Н. // Приборы и системы управления. – 1989. – № 1. – С. 27.

8. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M. et al. // Cryst. Res. Technol. – 2002. – Vol. 37. – P. 243–257.

9. Сандулова А.В., Марьямова И.И., Заганяч Ю.И., Ворошило Г.И., Панков Ю.М. // Приборы и системы управления. – 1976. – № 1. – С. 23–24.

10. Maryamova I., Pankov Y. // Proceed. 44th Intern. Scient. Colloquium TU Ilmenau, Germany. – 1999. – P. 248–250.

11. Марьямова И.И., Панков Ю.М. // Приборы и системы управления. – 1989. – № 7. – С. 31–32.

12. Марьямова И.И., Гортынская И.Д., Яцюк Ю.С. // Физическая электроника. – 1986. – Вып. 32. – С. 78–82.

13. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Gortynska I., Yatzuk Y. // Sensors and Actuators. – 2000. – Vol. A 85. – P. 153–157.

14. Druzhinin A., Hortynska I., Maryamova I., Lavitska E., Oszwaldowski M. // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4413. – P. 143–147.

15. А. с. 302589 СССР. Полупроводниковый тензорезистор / А.В. Сандулова, И.И. Марьямова, В.М. Рыбак, Ю.И. Заганяч // Открытия. Изобрет. – 1971. – Бюл. № 15.

16. А. с. 277359 СССР. Полупроводниковый тензодатчик / А.В. Сандулова, И.И. Марьямова, С.С. Варшава, К.С. Щербай, Ю.И. Заганяч // Открытия. Изобрет. – 1970. – Бюл. № 25.

17. А. с. 383121 СССР. Полупроводниковый тензорезистор / А.В. Сандулова, И.И. Марьямова, П.В. Левченко, П.И. Островский // Открытия. Изобрет. – 1973. – Бюл. № 23.

18. Попова Г.Л., Сандулова А.В., Заганяч Ю.И., Марьямова И.И. // Полупроводниковая тензометрия: Материалы III Всесоюз. научн.-техн. конф. – Новосибирск, 1969. – Кн. 2. – С. 337–347.

19. Сандулова А.В., Заганяч Ю.И., Яцюк Ю.С., Марьямова И.И. // Полупроводниковая тензометрия: Материалы IV Всесоюз. конфер. – Львов, 1970. – С. 204–209.
20. Сандулова А.В., Заганяч Ю.И., Яцюк Ю.С. и др. // Полупроводниковая тензометрия: Материалы IV Всесоюз. конфер. – Львов, 1970. – С. 192–197.
21. А. с. 883680 СССР. Преобразователь давления / Ю.И. Заганяч, В.А. Жилка, И.И. Марьямова и др // Открытия. Изобрет. – 1981. – Бюл. № 43.
22. Заганяч Ю.И., Марьямова И.И., Иващук Т.М., Кутраков А.П., Полищук О.А. // Приборы и системы управления. – 1984. – С. 31–32.
23. Заганяч Ю.И., Жилка В.А., Иващук Т.М. // Приборы и системы управления. – 1981. – № 1.
24. Заганяч Ю.И., Марьямова И.И., Яцюк Ю.С., Иващук Т.М. // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 25–26.
25. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Лавитская Е.Н., Кутраков А.П. // Датчики и системы. – 2001. – № 6. – С. 2–7.
26. Заганяч Ю.И., Марьямова И.И., Охрименко Ю.А. // Космические исследования на Украине. – К., 1981. – Вып. 15. – С. 40–44.
27. Марьямова И.И., Каретникова Е.Н., Яцюк Ю.С. // Физическая электроника. – 1983. – Вып. 26. – С. 28–32.
28. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. // Sensors and Actuators. – 1999. – Vol. B 58. – P. 415–419.
29. Марьямова И.И., Сыдир Б.И., Екимов Ю.С. // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 35.
30. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Kogut I.T. et al. // Physical and Technological Problems of SOI Structures and Devices. Klumer Acad. Publ. – 1995. – P. 101–105.
31. Voronin V., Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I., Pankov Y. // Sensors and Actuators. – 1992. – Vol. A 30. – № 1–2. – P. 143–147.
32. Лавитская Е.Н., Марьямова И.И., Дружинин А.А., Панков Ю.М. // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32. – С. 1162–1164.
33. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Voronin V. // Sensors and Actuators. – 1997. – Vol. A 61. – P. 400–404.
34. Voronin V., Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Pankov Y. // Physical and Technological Problems of SOI Structures and Devices. Klumer Acad. Publ. – 1995. – P. 281–286.
35. Пат. України № 23103А. П'єзорезистивний датчик / Ю.М. Панков, А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова. – 1996. – Бюл. №3.
36. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Kogut I., Khoverko Y. // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2001. – № 1. – P. 40–45.
37. Druzhinin A., Maryamova I., Lavitska E., Pankov Y. // Sensors and Actuators. – 1998. – Vol. A 68. – P. 229–233.