

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ  
БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA,  
AS THE BASES OF SENSORS

УДК 681.586, 537.32

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ МЕХАНІЧНИХ  
ВЕЛИЧИН ДЛЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВІ  
МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ  
(За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)**

*А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, І. В. Павловський*

НУ “Львівська політехніка”, НДЦ “Кристал”, вул. Котляревського, 1, Львів, 79013  
тел. (032) 258-23-97, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

**Анотація**

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ НИЗЬКИХ  
ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ**

*А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, І. В. Павловський*

Проведено комплексне дослідження електропровідності, магнітоопору і п'єзоопору мікрокристалів кремнію р-типу, легованих бором, з орієнтацією  $\langle 111 \rangle$  в діапазоні температур 4,2–300 К і магнітних полях до 14 Тл. Досліджено вплив одновісної деформації на питомий опір і магнітоопір мікрокристалів Si з різною концентрацією бору при низьких температурах. В мікрокристалах р-Si з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД) з діелектричного боку при гелієвих температурах виявлено гігантський неklasичний п'єзоопір, коефіцієнт тензочутливості таких кристалів при 4,2 К дорівнює  $GF_{4,2K} = -5.7 \times 10^5$  при деформації стиску. Некласичний п'єзоопір зумовлений стрибковою провідністю в цих кристалах при низьких температурах; визначено енергії активації  $E_2$  і  $E_3$ , їх значення змінюються під дією деформації при криогенних температурах. Вимірювались тензометричні характеристики цих кристалів, закріплених на пружних елементах з інвару, в широкому діапазоні температур 4,2–300 К і деформацій  $\varepsilon = 0 - \pm 1,2 \times 10^{-3}$  відн. од. Одержані характеристики дозволяють прогнозувати параметри п'єзорезистивних сенсорів механічних величин на основі цих кристалів. Показано можливість створення надчутливих сенсорів механічних величин для роботи при криогенних температурах на основі неklasичного п'єзоопору в мікрокристалах Si(B). Наведено приклади розроблених сенсорів деформації, сенсора тиску та сенсора рівня криогенних рідин.

**Ключові слова:** п'єзоопір, кремній, мікрокристали, криогенні температури, сенсори механічних величин.

**The summary****PHYSICAL ASPECTS OF LOW-TEMPERATURE MECHANICAL SENSORS BASED ON SILICON MICROCRYSTALS***A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, O. P. Kutrakov, I. V. Pavlovskyy*

The complex studies of conductivity, magnetoresistance and piezoresistance of boron doped p-type silicon microcrystals with  $\langle 111 \rangle$  orientation in the temperature range 4.2–300 K and at the magnetic field up to 14 T were carried out. The influence of uniaxial strain on the resistivity and magnetoresistance of Si microcrystals with different boron doping at low temperatures was studied. The giant non-classic piezoresistance at helium temperatures was revealed in p-Si microcrystals with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) from the insulating side: gauge factor of such crystals at 4.2 K equals  $GF_{4.2\text{K}} = -5.7 \times 10^5$  at compressive strain. Non-classic piezoresistance is caused by hopping conductivity of these crystals at low temperatures; the activation energies  $E_2$  and  $E_3$  and their values under uniaxial strain were determined. Piezoresistive characteristics of Si(B) crystals, mounted on the invar spring elements, in the wide ranges of temperature 4.2–300 K and strain  $\varepsilon = 0 - \pm 1.2 \times 10^{-3}$  rel. un. were measured. The obtained characteristics gave the possibility to predict the characteristics of piezoresistive mechanical sensors based on these crystals at low temperatures. It was shown the possibility to develop high-sensitive mechanical sensors, operating at cryogenic temperatures, based on non-classic piezoresistance of Si(B) microcrystals. The examples of developed strain sensors, pressure sensor and sensor of level of cryogenic liquids are presented.

**Key words:** piezoresistance, silicon, microcrystals, cryogenic temperatures, mechanical sensors.

**Аннотация****ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ***А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, И. В. Павловский*

Проведено комплексное исследование электропроводности, магнитосопротивления и пьезосопротивления микрокристаллов кремния p-типа, легированных бором, с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  в диапазоне температур 4,2–300 К и магнитных полях до 14 Тл. Исследовано влияние одноосной деформации на удельное сопротивление и магнитосопротивление микрокристаллов Si с разной концентрацией бора при низких температурах. В микрокристаллах p-Si с концентрацией бора вблизи перехода металл-диэлектрик (ПМД) с диэлектрической стороны при гелиевых температурах выявлено гигантское неклассическое пьезосопротивление; коэффициент тензочувствительности таких кристаллов при 4,2 К равен  $GF_{4.2\text{K}} = -5,7 \times 10^5$  при деформации сжатия. Неклассическое пьезосопротивление обусловлено прыжковой проводимостью этих кристаллов при низких температурах; определены энергии активации  $E_2$  и  $E_3$  и их значения при воздействии деформации при криогенных температурах. Измерялись тензометрические характеристики этих кристаллов, закрепленных на упругих элементах из инвара, в широком диапазоне температур 4,2 — 300 К и деформаций  $\varepsilon = 0 - \pm 1,2 \times 10^{-3}$  отн. ед. Полученные характеристики позволяют прогнозировать параметры пьезорезистивных сенсоров механических величин на основе этих кристаллов при низких температурах. Показано возможность создания сверхчувствительных сенсоров механических величин для работы при низких температурах на основе неклассического пьезосопротивления в микрокристаллах Si(B). Приведены примеры разработанных сенсоров деформации, сенсоров давления и сенсоров уровня криогенных жидкостей.

**Ключевые слова:** пьезосопротивление, кремний, микрокристаллы, криогенные температуры, сенсоры механических величин.

## Вступ

На сучасному етапі для різних галузей науки і техніки, таких як авіакосмічна техніка, кріоенергетика та інших, необхідні сенсори механічних величин, працездатні при кріогенних температурах до температури рідкого гелію. Наші дослідження спрямовані на розробку фізичних основ створення таких сенсорів на основі легованих напівпровідників. Для цього використовувались мікрочастинки кремнію у вигляді вирощених ниткоподібних кристалів (НК), оскільки вони, завдяки своїй структурній досконалості, механічній міцності і морфології, успішно використовуються як чутливі елементи сенсорів механічних величин [1, 2].

Для оцінки можливості створення сенсорів було проведено комплексне дослідження як кінетичних (електропровідність, магнітоопір), так і деформаційно-стимульованих ефектів, таких як п'єзоопір і п'єзомагнітоопір, в цих кристалах при низьких температурах і в сильних магнітних полях. Найбільша увага приділялась дослідженням мікрочастинки кремнію з концентрацією домішки (бору), яка відповідала фазовому переходу метал-діелектрик (ПМД), оскільки в роботі [3] згадується про гігантський п'єзоопір напівпровідників з концентрацією домішок, яка відповідає діелектричному боку ПМД, коли має місце стрибкова провідність по локалізованих домішкових станах. В роботі [4] наведено експериментальні результати по впливу одновісного механічного напруження на опір Si p-типу при кріогенних температурах, а в [5] досліджується стрибкова провідність в одновісно деформованих кристалах p-Si<B> при низьких температурах 0,05–0,75 К. Але у жодній роботі не визначається величина п'єзо-

опору в цих кристалах при низьких температурах, не визначається, при яких концентраціях домішки спостерігається максимальний некласичний п'єзорезистивний ефект, не досліджувались температурні залежності п'єзоопору і не розглядаються можливості застосування цього ефекту для створення сенсорів механічних величин для низьких температур.

## Об'єкт дослідження і методика експерименту

Проведено комплекс досліджень п'єзорезистивного ефекту в мікрочастинках кремнію, легованих бором, в діапазоні температур 4,2–300 К та магнітного поля з індукцією до 14 Тл, метою яких було вивчення особливостей п'єзорезистивного ефекту при низьких температурах та з'ясування механізмів провідності поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД). Мікрочастинки Si вирощувались методом хімічних газотранспортних реакцій у формі ниткоподібних кристалів (НК) з кристалографічною орієнтацією <111> довжиною 2–5 мм та діаметром 20–60 мкм. Під час росту НК легувались акцепторною домішкою — бором, а як ініціатори росту вводились домішки Au і Pt, які створюють глибокі домішкові рівні і забезпечують слабку (<1%) компенсацію акцепторної домішки.

Мікрочастинки кремнію підбирались таким чином, щоб концентрація основного домішкового рівня відповідала як діелектричному, так і металевому боку ПМД, беручи до уваги, що для кремнію, легованого бором, критична концентрація ПМД відповідає концентрації домішки  $N_c = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [4]. В таблиці 1 наведено основні параметри досліджуваних мікрочастинки кремнію.

Таблиця 1

Параметри досліджуваних мікрочастинки кремнію

Позначення групи зразків	Концентрація бору, $\text{см}^{-3}$	Питомий опір $\rho_{300\text{K}}$ , Ом $\times$ см	$R_{77\text{K}}/R_{300\text{K}}$	Ступінь наближення до ПМД
Si:B1	$1 \times 10^{19}$	0,0055	0,870	Область металевої провідності
Si:B2	$7 \times 10^{18}$	0,008	1,012	Металева область ПМД
Si:B3	$5,5 \times 10^{18}$	0,010	1,375	Поблизу ПМД з металевого боку
Si:B4	$3 \times 10^{18}$	0,013	2,865	Поблизу ПМД з діелектричного боку
Si:B5	$8 \times 10^{17}$	0,020	4,015	Діелектрична область

Деформація досліджуваних НК при кріогенних температурах створювалась двома способами. Згідно методики, що описана в роботі [6], деформація НК створювалась шляхом закрі-

плення їх на спеціально підібрані підкладки з матеріалів з відмінним від кремнію коефіцієнтом термічного розширення (КТР) за рахунок термічної деформації, яка діє на закріпленій

кристал. Використовувались два типи матеріалів підкладок: мідь та кварц, що забезпечували відповідно деформацію стиску ( $\varepsilon = -3,8 \times 10^{-3}$  відн. од. при 4,2 К) та розтягу ( $\varepsilon = 4,7 \times 10^{-4}$  відн. од. при 4,2 К). Розраховані величини термічної деформації НК кремнію, що закріплені на підкладках з різних матеріалів, при різних температурах наведені в [6].

Для дослідження тензометричних характеристик НК Si p-типу кристали закріплювались на пружному елементі (консольній балці). За допомогою спеціального пристрою консольна балка піддавалась деформації, а закріплені на ній досліджувані НК Si p-типу — деформації стиску та розтягу. В зв'язку з тим, що КТР інвару близький до КТР кремнію консольну балку було виготовлено з інвару. Пристрій з консольною балкою з інвару дозволяв створювати шість рівнів деформації від 0 до  $\pm 1,25 \times 10^{-3}$  відн. од. [7].

Вимірювання питомого опору та магнітоопору НК Si p-типу як вільних, так і деформованих, в широкому діапазоні температур та магнітних полів проводились в Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (Вроцлав, Польща). Зразки розміщались на спеціальній вставці; вставку із зразками або пристрій з консольною балкою охолоджували до 4,2 К у гелієвому кріостаті типу ГКОП. Для нагрівання зразків до кімнатної температури застосовували спеціальну насадку з нагрівачем. Стабілізований електричний струм у вимірювальній схемі задавався джерелом струму Keithley 224, електричну напругу на потенціальних контактах зразків та вихідний сигнал термодари Fe-Fe<Cu> вимірювали цифровими вольтметрами типу Keithley 199 з одночасним автоматичним записом показів приладів. Вимірювання магнітоопору в сильних магнітних полях з індукцією до 14 Тл проводили на біттерівському магніті при температурі рідкого гелію.

## Результати досліджень та їх обговорення

### 1. Дослідження п'езоопору легованих мікрокристалів Si<B> при низьких температурах

Досліджувались температурні залежності питомого опору НК Si з різною концентрацією бору, вільних та закріплених на підкладках, в діапазоні температур 4,2 — 300 К. Коефіцієнт

тензочутливості мікрокристалів при фіксованих температурах розраховувався за відомою формулою:

$$GF = \frac{[R(\varepsilon) - R(\varepsilon = 0)]}{R(\varepsilon = 0) \cdot \varepsilon}, \quad (1)$$

Результати вимірювань температурної залежності питомого опору зразків Si, вільних та деформованих, наведено на рис. 1 а — 1 в, а температурні залежності коефіцієнта тензочутливості на рис. 2 а — 2 в.

Для низькоомних мікрокристалів Si:B1 у всьому температурному діапазоні 4,2— 300 К спостерігається металевий характер провідності як для вільних кристалів, так і деформованих (рис. 1 а); величина коефіцієнту тензочутливості додатня і становить  $GF_{4,2K} = 60$  при деформації стиску (рис. 2 а), що вказує на існування класичного п'езоопору в цих кристалах при кріогенних температурах.

Особливості п'езорезистивного ефекту в Si p-типу проявились в області концентрації бору, що відповідає близькості до ПМД. Під впливом деформації стиску (мідна підкладка) провідність мікрокристалів Si:B3 при низьких температурах змінює свій характер з металевого на напівпровідниковий, що приводить до зростання питомого опору (рис. 1 б), а коефіцієнт тензочутливості цих кристалів при низьких температурах стає від'ємним і значно зростає за величиною:  $GF_{4,2K} = -2600$  (рис. 2 б).

Найбільш наочно поява некласичного п'езоопору спостерігається в кристалах поблизу ПМД з діелектричного боку. Питомий опір кристалів Si:B4 під дією деформації зростає на кілька порядків при кріогенних температурах (рис. 1 в), а коефіцієнт тензочутливості при гелієвих температурах досягає високих значень:  $GF_{4,2K} = -5,7 \times 10^5$  (рис. 2 в), що свідчить про появу гігантського некласичного п'езоопору. При зменшенні концентрації бору в кремнії, тобто при віддаленні від ПМД в діелектричну область цей ефект зменшується.

Поява некласичного п'езоопору в кристалах Si p-типу з концентрацією бору поблизу ПМД при низьких температурах пояснюється стрибковою провідністю.

Як відомо [4], при кріогенних температурах питомий опір легованих напівпровідників р може бути записаний як сума трьох доданків з відповідними енергіями активації  $E_i$ :

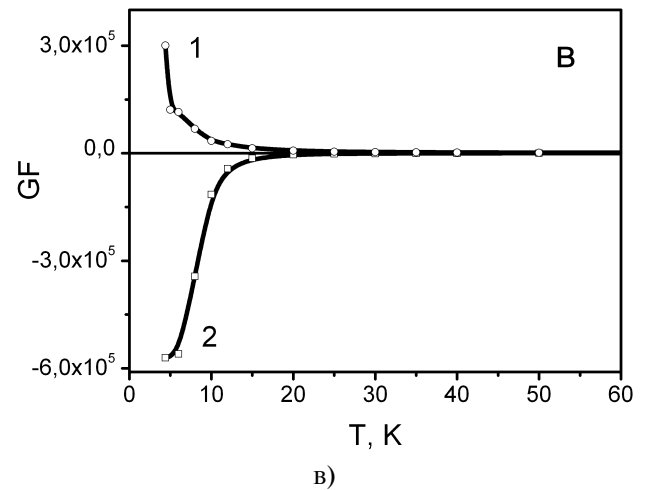
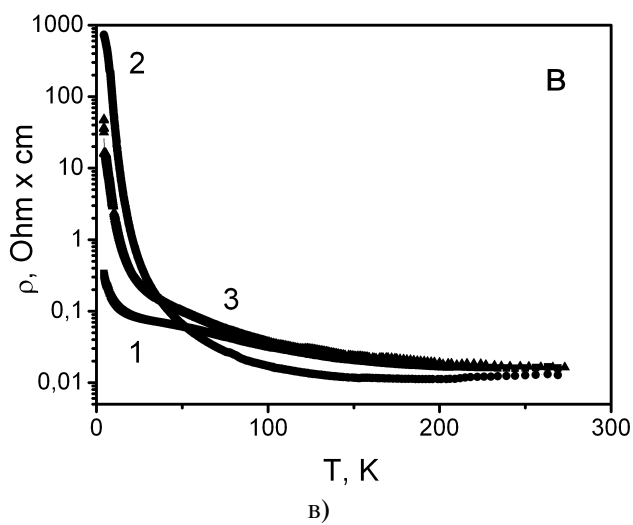
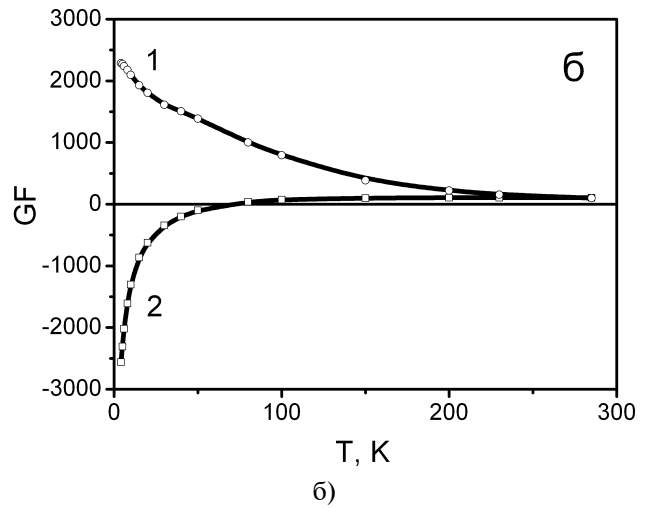
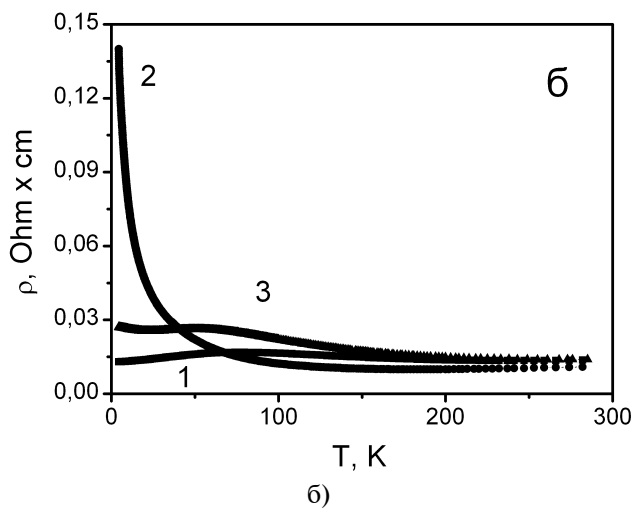
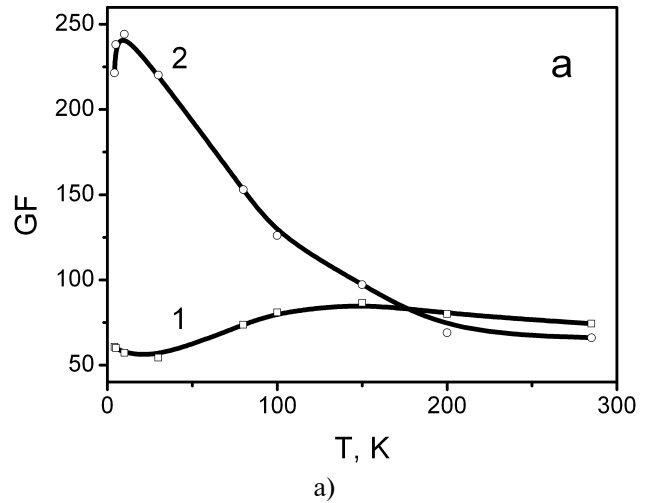
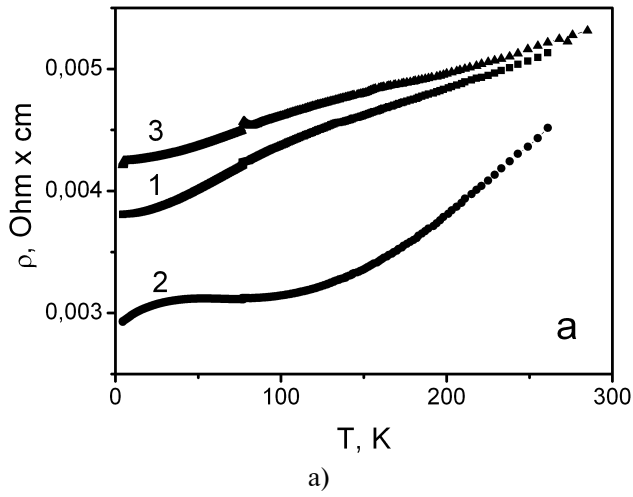


Рис. 1. Температурні залежності питомого опору НК Si:B1 (а), Si:B3 (б), Si:B4 (в): 1 — недеформований кристал, 2 — при деформації стиску, 3 — при деформації розтягу.

Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта тензо-чутливості НК Si:B1 (а), Si:B3 (б), Si:B4 (в): 1 — при деформації стиску, 2 — при деформації розтягу.

$$\rho^{-1} = \sum_{i=1}^3 \rho_i^{-1} \exp(-E_i / kT), \quad (2)$$

де  $E_1$  — енергія активації основного домішкового стану (акцепторного або донорного),  $E_2$  — енергія активації домішкової провідності по двічі окупованих домішкових станах (по  $A^+$  — зоні для напівпровідників, легованих акцепторними домішками),  $E_3$  — енергія активації стрибкової провідності з незалежними

(некорельованими) стрибками по парах домішкових центрів,

Дослідження температурної залежності електропровідності НК Si дозволяють визначити значення енергії активації. Значення енергії активації  $E_2$  і  $E_3$  у відповідних температурних діапазонах для зразків Si:B3–Si:B5 наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення енергій активації  $E_2$  і  $E_3$  для НК Si з концентрацією бору в області ПМД.

Тип зразка	Енергія активації, меВ (діапазон температур)		
	Si:B3	Si:B4	Si:B5
Недеформований ( $\varepsilon=0$ )	—	$E_3=0,589$ (4,4–5,8 К)	$E_3=0,750$ (4,4–6,1 К)
При деформації стиску $\varepsilon=-3,8\times 10^{-3}$ відн. од.	$E_3=0,33$ (4,5–7 К)	$E_3=0,443$ (4,4–6 К)	$E_3=0,015$ (4,4–6,9 К)
	—	$E_2=6,452$ (10–22,7 К)	—
При деформації розтягу $\varepsilon=+4,7\times 10^{-4}$ відн. од.	—	$E_3=0,099$ (4,5–5,4 К)	$E_3=0,198$ (4,4–5,8 К)
	—	$E_2=3,279$ (8–26,6 К)	—

Як видно з табл. 2, деформація кристалів із слабким та проміжним рівнем легування призводить до зменшення енергії активації  $E_3$  та звуження температурного діапазону її дії, що пояснюється зростанням впливу кореляційних ефектів. Порівняння даних для зразків, закріплених на підкладках, свідчить про те, що енергія активації  $E_2$  зростає зі збільшенням рівня деформації.

Дослідження магнітоопору вільних і деформованих мікрокристалів Si при гелієвих температурах в полях до 14 Тл підтвердили наявність стрибкової провідності в цих кристалах з концентрацією бору поблизу ПМД [8].

## 2. Тензометричні характеристики мікрокристалів Si на пружних елементах при низьких температурах

Дослідження тензометричних характеристик НК Si на пружних елементах проводились для оцінки можливості створення п'єзореzистивних сенсорів механічних величин для низьких температур на основі цих кристалів.

Експериментально визначались температурні залежності опору НК Si, закріплених на пружних елементах (балках) з інварного сплаву при різних деформаціях балки, з яких розраховувались залежності відносної зміни опору кристалів від деформації балки при фіксованих температурах 4,2 К, 77 К, 300 К і температурні залежності коефіцієнта тензочутливості.

Тензометричні характеристики кристалів Si:B1 мали характер, типовий для класичного п'єзореzистивного ефекту в кремнії р-типу. Для кристалів Si:B3 і Si:B4 в температурному діапазоні 77–300 К спостерігався класичний п'єзоопір (рис. 3 а, б), а при гелієвих температурах тензометричні характеристики суттєво відрізняються за своїм характером (криві 1 на рис. 3 а, б). Характерною особливістю цих характеристик є стрімке зростання опору цих кристалів при деформації. Коефіцієнт тензочутливості для НК Si:B3 дорівнює  $GF_{4,2K} \geq 900$  при  $\varepsilon=1 \times 10^{-3}$  відн. од., а при деформації стиску стає від'ємним —  $GF_{4,2K} = -320$ ; для кристалів Si:B4 коефіцієнт тензочутливості досягає значень  $GF_{4,2K} = 6400$  при  $\varepsilon=1 \times 10^{-3}$  відн. од. та  $GF_{4,2K} \geq -10000$  при  $\varepsilon=-1 \times 10^{-3}$  відн. од.

Одержані результати свідчать про можливість створення надчутливих сенсорів механічних величин на основі цих кристалів. При використанні НК Si:B1 як чутливих елементів п'єзореzистивних сенсорів вихідний сигнал при 4,2 К становить  $\sim 100$  мВ при застосуванні мостової схеми з двома активними тензореzисторами (рис. 4). В той же час вихідний сигнал сенсорів з одним активним тензореzистором на основі НК Si:B4 може досягати при 4,2 К величини  $\sim 900$  мВ (без підсилення) при струмі через тензореzистор 100 мкА (рис. 5).

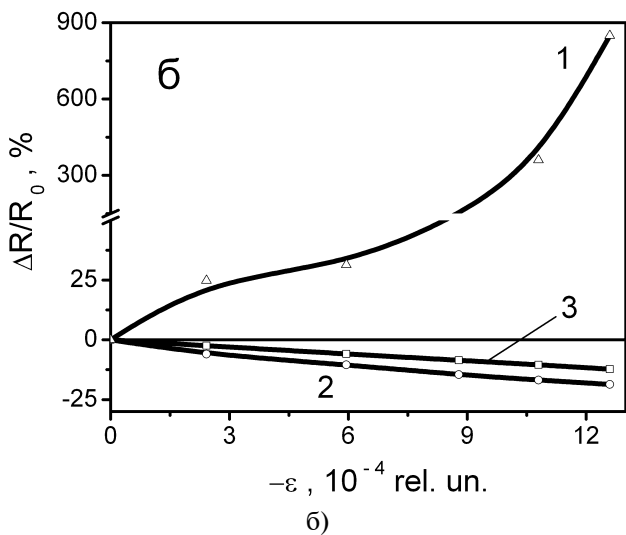
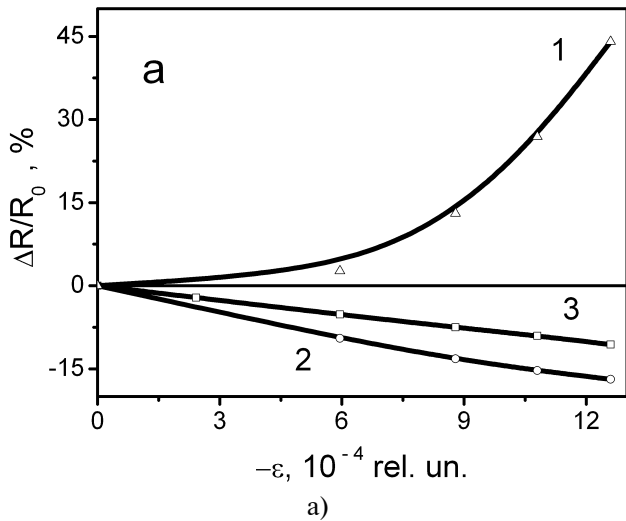


Рис. 3. Тензометричні характеристики НК Si:B3 (а), Si:B4 (б) при деформації стиску при різних температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

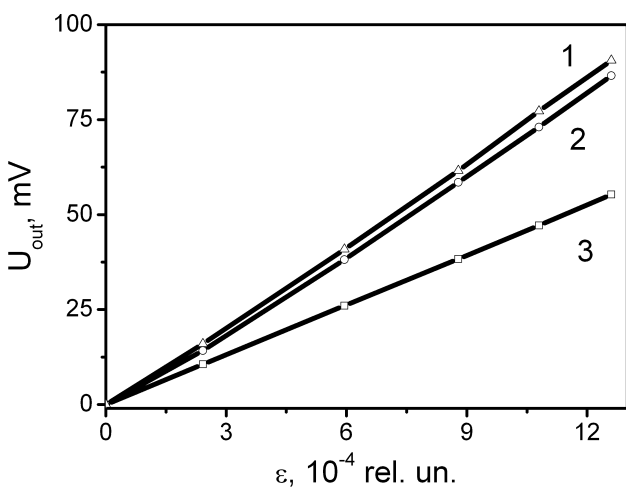


Рис. 4. Вихідний сигнал сенсора з двома тензорезисторами (НК Si:B1), з'єднаних у напівмостову схему, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

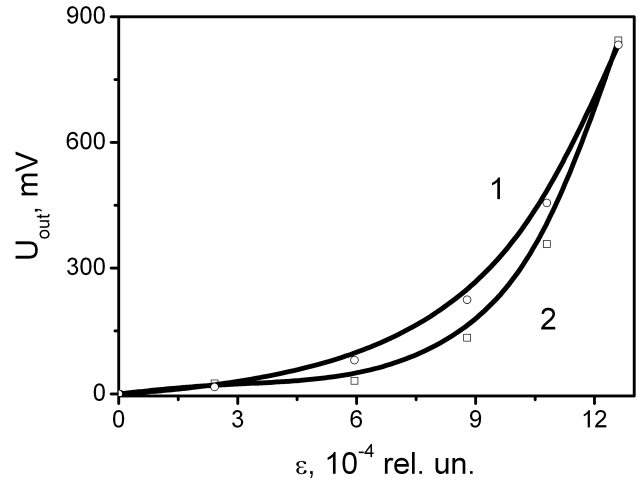


Рис. 5. Вихідний сигнал сенсора із одним тензорезистором (НК Si:B4) при 4,2 К: 1 — при деформації стиску, 2 — при деформації розтягу.

### 3. Сенсори механічних величин для низьких температур

Розроблено сенсори деформації для низьких температур на основі мікрочисталів Si p-типу. Для створення сенсорів деформації, працездатних при низьких температурах, зокрема при температурі рідкого гелію, найбільш придатними виявились НК Si:B3 з коефіцієнтом тензочутливості  $GF_{4.2K} = -1 \times 10^3$  при деформації стиску  $\epsilon = -8,4 \times 10^{-4}$  відн. од. [9] на основі неklasичного п'єзорезистивного ефекту. Градувальні характеристики таких сенсорів наведено на рис. 6. Для роботи при температурі рідкого азоту розроблено сенсори деформації на основі НК Si:B5 з коефіцієнтом тензочутливості  $GF_{77K} = 260$  при деформації розтягу  $\epsilon = 8,4 \times 10^{-4}$  відн. од. на основі класичного п'єзоопору (рис. 7).

Для визначення рівня криогенних рідин розроблено п'єзорезистивний сенсор, конструкцію якого показано на рис. 8. Сенсор використовувався для вимірювання рівня рідкого азоту, його чутливість становила  $\sim 0,3$  мВ/см.

Для вимірювання тиску рідкого гелію в циркуляційних трубопроводах систем охолодження надпровідних магнітів було розроблено сенсор тиску на основі мікрочисталів Si p-типу. На рис. 9 наведено градувальні характеристики такого сенсора з тензорезисторами на основі сильно легованих НК Si:B1 (класичний п'єзоопір) та на основі НК Si:B4 (неklasичний п'єзоопір). Як видно з рис. 9, вихідний сигнал сенсора з одним активним тензорезистором на основі неklasичного п'єзорезистивного ефекту в кілька разів перевищує вихідний сигнал сенсора на основі класичного п'єзорезистивного ефекту.

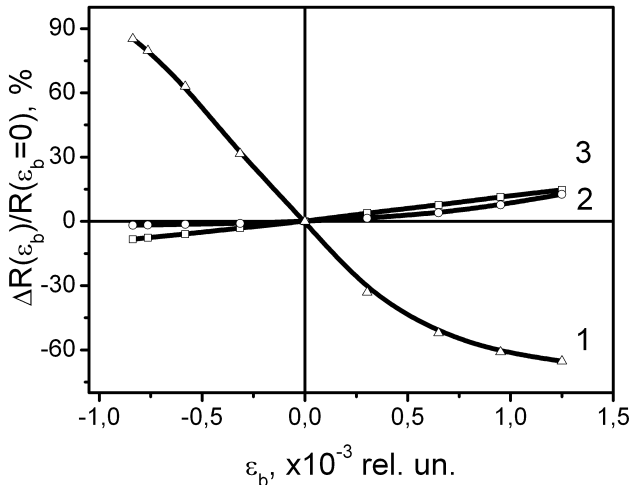


Рис. 6. Характеристики сенсорів деформації на основі НК Si:B3 при різних температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

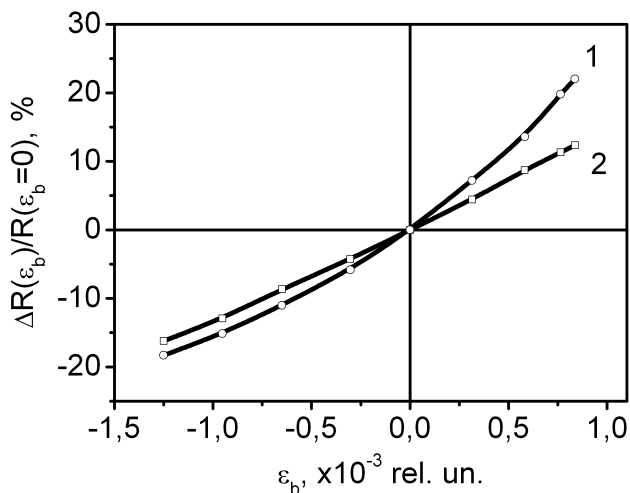


Рис. 7. Характеристики сенсорів деформації на основі НК Si:B5 при різних температурах: 1 — 77 К, 2 — 300 К.

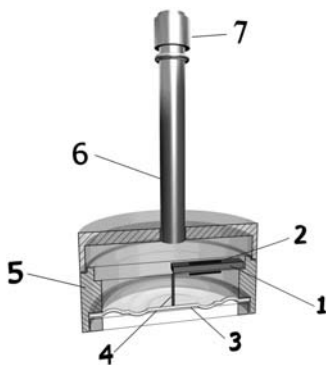


Рис. 8. Конструкція сенсора рівня криогенних рідин: 1 — консольна балочка, 2 — мікрокристали, 3 — мембрана, 4 — шток, 5 — корпус, 6 — трубка, 7 — електричний роз'єм.

### Висновки

Проведені дослідження електропровідності та магнітоопору деформованих та недеформованих мікрокристалів Si при низьких температурах показали, що в кремнії з концентрацією бору поблизу ПМД має місце стрибова провідність з енергіями активації  $E_2$  та  $E_3$ , величина яких змінюється під впливом одновісної деформації.

При температурі рідкого гелію виявлено гігантський п'єзоопір в мікрокристалах кремнію р-типу з концентрацією бору, що відповідає близькості до переходу метал-діелектрик (ПМД) з діелектричного боку. При деформації стиску коефіцієнт тензочутливості таких кристалів досягає значення  $GF_{4,2K} = -5,7 \times 10^5$  при 4,2 К, що відкриває можливості використання цього ефекту для створення надчутливих сенсорів механічних величин для низьких температур.

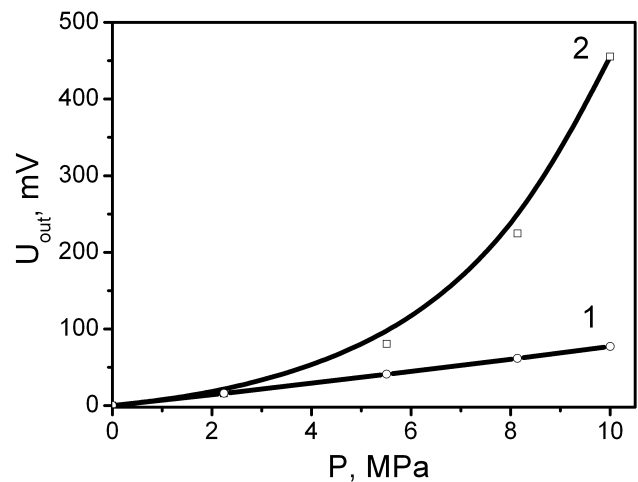


Рис. 9. Вихідний сигнал сенсора тиску рідкого гелію на основі НК Si р-типу: 1 — мостова схема з двома активними тензорезисторами на основі НК Si:B1, 2 — схема з одним активним тензорезистором на основі НК Si:B4 із джерелом струму  $I=100$  мкА.

Проведені дослідження тензометричних характеристик мікрокристалів Si(B) на пружних елементах в широкому діапазоні температур дозволяють прогнозувати характеристики п'єзорезистивних сенсорів на основі цих кристалів. Показано, що при використанні кристалів Si з концентрацією бору поблизу ПМД можуть бути створені надчутливі сенсори механічних величин для низьких температур з вихідним сигналом до 900 мВ (без підсилення) при 4,2 К.

На основі неklasичного п'єзоопору в кремнії розроблено чутливі сенсори деформації для



кріогенних температур з коефіцієнтом тензо-чутливості  $GF_{4,2K} = -1 \times 10^3$ , сенсор тиску рідкого гелію та сенсор рівня кріогенних рідин.

### Список літератури

1. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Лавитская Е.Н., Кутраков А.П., Панков Ю.М. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. — С. 3-8.
2. 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.
3. Шкловский В.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979. — 416 с.
4. Chrobochek J.A., Pollak R.H., Staunton H.F. Impurity conduction in silicon and effect of uniaxial compression on p-type silicon // Philosophical Magazine B. — 1984. — Vol. 50, No. 1. — P. 113-156.
5. Bogdanovich S., Sarachik M.P., Bhatt R.N. Conductivity of metallic Si:B near the metal-insulator transition: comparison between unstressed and uniaxially stressed samples // Phys. Rev. B — 1999. — Vol. 60, No. 4. — P. 2292-2298.
6. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. Studies of piezoresistance and piezomagneto-resistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // Crystal Research and Technology. — 2002. — Vol. 37, No. 2-3. — P. 243-257.
7. Druzhinin A.A., Maryamova I.I., Kuttrakov O.P., Pavlovskyy I.V. Silicon microcrystals with high piezoresistance at cryogenic temperatures for sensors application // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2004. — № 1. — С. 69-77.
8. Дружинін А.О., Павловський І.В. Деформаційні залежності магнітоопору ниткоподібних кристалів кремнію в області фазового переходу метал-діелектрик // V Міжнародна школа-конференція “Актуальні проблеми фізики напівпровідників”. Тези доповідей. — Дрогобич: НВЦ “Каменяр”. — 2005. — С. 216-217.
9. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Павловський І.В. Тензометричні характеристики мікрокристалів кремнію при кріогенних температурах // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2005. — № 3. — С. 74-81.