

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

## SENSOR MATERIALS

---

---

УДК 681.586, 537.32

### ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

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

НУ “Львівська політехніка”, НДЦ “Кристал”, вул. Котляревського, 1, Львів, 79013  
тел.: +38 0322 721632, факс: +38 0322 742164, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

#### Анотація

#### ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

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

Для створення сенсорів деформації, працездатних при криогенних температурах, досліджено тензометричні характеристики легованих бором ниткоподібних кристалів (НК) Si p-типу, закріплених на пружних елементах, виготовлених зі сталі, при фіксованих температурах 4,2, 77 і 300 К. Показано, що термічна деформація, яка виникає внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення (КТР) кремнію і матеріалу пружного елемента (сталі) при закріпленні кристала на балці, дуже сильно впливає на тензометричні характеристики кристалів кремнію, особливо при криогенних температурах. Це необхідно враховувати при розробці сенсорів на основі мікрочисталів Si для вимірювання деформацій в конструкціях, виготовлених з різних матеріалів. Показано, що НК Si p-типу з  $\rho_{300K}=0,010 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик з металевого боку з коефіцієнтом тензочутливості  $K_{4,2K}=-1020$  при деформації стиску найбільш придатні для створення сенсорів деформації для криогенних температур, зокрема для 4,2 К. Для створення сенсорів деформації для температури рідкого азоту найбільш придатні НК p-Si з  $\rho_{300K}=0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  з коефіцієнтом тензочутливості  $K_{77K}=263$ .

**Ключові слова:** кремній, ниткоподібні кристали, криогенні температури, сенсори деформації, п'єзорезистивний.

## The summary

### PIEZORESISTIVE CHARACTERISTICS OF SILICON MICROCRYSTALS AT CRYOGENIC TEMPERATURES

*A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, O. P. Kutrakov, I. V. Pavlovskyy*

To create strain sensors operating at cryogenic temperatures piezoresistive characteristics of boron doped p-type Si whiskers, mounted on spring elements fabricated of steel, were studied at fixed temperatures 4.2, 77 and 300 K. It was shown that the effect of thermal strain that appears due to the difference between thermal expansion coefficients of silicon and material of the spring element (steel), when the crystals are mounted on the beam, on the piezoresistive characteristics of silicon crystals is very strong, especially at cryogenic temperatures. This fact should be accounted to develop sensors for strain measurements of constructions, fabricated from different materials. P-type Si whiskers with  $\rho_{300K}=0.010 \text{ Ohm}\times\text{cm}$  with boron concentration near metal-insulator transition (MIT) from the metallic side of MIT with gauge factor  $GF_{4.2K}=-1020$  at the compressive strain are most suitable to create strain sensors for cryogenic temperatures, particularly, for 4.2 K. To create strain sensors for the temperature of liquid nitrogen the most suitable are p-Si whiskers with  $\rho_{300K}=0.025 \text{ Ohm}\times\text{cm}$  with gauge factor  $GF_{77K}=263$ .

**Key words:** silicon, whiskers, cryogenic temperatures, strain sensor, piezoresistive.

## Аннотация

### ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, И. В. Павловский*

Для создания сенсоров деформации, работоспособных при криогенных температурах, исследованы тензометрические характеристики легированных бором нитевидных кристаллов (НК) Si p-типа, закрепленных на упругих элементах, изготовленных из стали, при фиксированных температурах 4,2, 77 и 300 К. Показано, что термическая деформация, которая возникает в результате различия коэффициентов термического расширения кремния и материала упругого элемента (стали) при закреплении кристалла на балке, очень сильно влияет на тензометрические характеристики кристаллов кремния, особенно при криогенных температурах. Это необходимо учитывать при разработке сенсоров на основе микрокристаллов Si для измерения деформаций в конструкциях, изготовленных из разных материалов. Показано, что НК Si p-типа с  $\rho_{300K}=0,010 \text{ Ом}\times\text{см}$  с концентрацией бора вблизи перехода металл-диэлектрик с металлической стороны с коэффициентом тензочувствительности  $K_{4,2K}=-1020$  при деформации сжатия наиболее пригодны для создания сенсоров деформации для криогенных температур, в частности, для 4,2 К. Для создания сенсоров деформации для температуры жидкого азота наиболее пригодны НК p-Si с  $\rho_{300K}=0,025 \text{ Ом}\times\text{см}$  с коэффициентом тензочувствительности  $K_{77K}=263$ .

**Ключевые слова:** кремний, нитевидные кристаллы, криогенные температуры, сенсор деформации, пьезорезистивный.

## Вступ

Необхідність створення чутливих мініатюрних сенсорів для вимірювання деформацій при низьких температурах зумовлена потребами таких галузей техніки як авіакосмічна техніка, машинобудування, криоенергетика та інші.

Для вимірювання деформацій при низьких температурах, зокрема при криогенних, вико-

ристовуються дротяні та фольгові тензорезистори, виготовлені з різних металевих сплавів. Недоліком цих тензорезисторів є низький коефіцієнт тензочувствителості, значення якого при 4,2 К становлять 1,83 і 2,16 відповідно для дротяних і фольгових тензорезисторів [1]. Використання напівпровідникових матеріалів, зокрема кремнію, для виготовлення чутливих еле-

ментів п'єзореzystивних сенсорів механічних величин дозволило значно підвищити чутливість таких сенсорів [2]. Механізм дії таких сенсорів базується на класичному п'єзореzystивному ефекті в напівпровідниках [3].

Виявлення некласичного п'єзореzystивного ефекту в кремнії при низьких температурах, який характеризується екстремально великими змінами електричного опору кремнію під впливом одновісного механічного напруження (деформації) [4, 5], відкриває, на нашу думку, можливість створення п'єзореzystивних напівпровідникових сенсорів механічних величин з високою чутливістю при низьких температурах, зокрема при 4,2 К.

Виходячи з цього, ми провели дослідження п'єзореzystивних характеристик мікрокристалів кремнію р-типу з різною концентрацією бору в широкому діапазоні температур 4,2–300 К [6, 7]. Найбільш висока тензочутливість (чутливість до деформації) була досягнута при 4,2 К в мікрокристалах Si, легованих бором до концентрацій поблизу фазового переходу метал-діелектрик (ПМД) з діелектричного боку, які мають стрибкову провідність при гелієвих температурах внаслідок виникнення в кремнії при цих температурах некласичного п'єзореzystивного ефекту. Для моделювання роботи п'єзореzystивних сенсорів тиску на основі мікрокристалів кремнію при низьких температурах досліджувались п'єзореzystивні характеристики цих кристалів, закріплених на консольній балці з інварного сплаву з коефіцієнтом термічного розширення (КТР), максимально близьким до КТР кремнію при низьких температурах [8, 9]. Було показано можливість створення надчутливих сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах [10]. Відомі напівпровідникові сенсори тиску на основі структур кремній на сапфірі можуть використовуватись при низьких температурах [11], проте їх чутливість на кілька порядків менша чутливості сенсорів деформації на основі НК Si, в яких використовується некласичний п'єзореzystивний ефект.

Для створення сенсорів деформації на основі НК кремнію для криогенних температур необхідно провести дослідження тензометричних характеристик цих кристалів, закріплених на сталевих пружних елементах, при низьких температурах. Необхідність таких досліджень зумовлена тим, що вимірювання деформацій

проводиться в елементах конструкцій, виготовлених, переважно, із різних сортів сталі. При закріпленні мікрокристалів кремнію на пружних елементах, виготовлених з різних матеріалів, на кристал діє так звана термічна деформація, яка зумовлена різницею КТР кремнію і матеріалу пружного елемента [7]. При низьких температурах в області некласичного п'єзореzystивного ефекту вплив термічної деформації на характеристики НК кремнію, закріплених на пружних елементах, стає дуже суттєвим. Тому метою роботи було дослідження тензометричних характеристик мікрокристалів кремнію, закріплених на пружних елементах, виготовлених із сталі, у широкому діапазоні температур 4,2–300 К з метою створення на їх основі сенсорів деформації, придатних для роботи при криогенних температурах.

#### Об'єкт дослідження і методика експерименту

Досліджувались ниткоподібні кристали Si р-типу провідності, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій, з кристалографічною орієнтацією  $\langle 111 \rangle$ , яка відповідає напрямку максимального п'єзореzystивного ефекту в Si р-типу. НК Si були обрані для досліджень тому, що ці кристали використовуються як чутливі елементи п'єзореzystивних сенсорів механічних величин, зокрема, сенсорів деформації [12, 13]. Для досліджень було відібрано чотири групи мікрокристалів кремнію з різною концентрацією бору, а саме:

- 1) сильно леговані НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,006$  Ом $\times$ см з металевим типом провідності;
- 2) НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,01$  Ом $\times$ см з концентрацією бору поблизу фазового переходу метал-діелектрик з металевого боку;
- 3) НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,0136$  Ом $\times$ см з концентрацією бору поблизу фазового переходу метал-діелектрик з діелектричного боку;
- 4) НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,025$  Ом $\times$ см з концентрацією бору, що відповідає глибокій діелектричній області.

Дослідження тензометричних характеристик НК кремнію в діапазоні температур 4,2–300 К проводились у гелієвому кріостаті за допомогою спеціально розробленого пристрою з пружним елементом у вигляді сталеві консольної балки, на якій закріплювались мікро-

кристали. НК Si товщиною 30–50 мкм і довжиною 2–3 мм наклеювались по всій довжині на сталеву балку клеєм ВЛ-931 з температурою полімеризації +180°C. Оскільки при низьких температурах клеї мають добрі пружні властивості, це забезпечує максимальну передачу деформації від балки до закріпленого на ній мікрокристалу. Розміри розробленого пристрою, обмежувались внутрішнім діаметром гелієвого кріостату, який дорівнював 19 мм. Пружний елемент (консольна балка) деформувався за допомогою спеціального механізму, який дозволяв деформувати балку з кристалами ступенями, в діапазоні деформацій стиску-розтягу  $\epsilon=0\text{--}\pm 1,25\times 10^{-3}$  відн. од.

Під час досліджень живлення кристалів здійснювалось постійним струмом від джерела струму Keithley 224. Електричну напругу на зразках та вихідний сигнал сенсора температури вимірювали цифровими вольтметрами Keithley 199 та Keithley 2000 з одночасним автоматичним записом показів приладів на комп'ютер через паралельний порт.

Дослідження тензометричних характеристик НК кремнію на сталевих балках при низьких температурах проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур у Вроцлаві (Польща) в рамках міжнародної співпраці.

### Тензометричні характеристики НК кремнію на сталевих пружних елементах

Для закріплених на сталевих балках НК кремнію експериментально визначались залежності опору кристалів від деформації балки при фіксованих температурах: 300, 77 і 4,2 К. Одержані залежності відносної зміни опору цих кристалів від деформації балки  $\Delta R(\epsilon_\sigma)/R_0 = f(\epsilon_\sigma)$  при фіксованих температурах визначають тензометричні характеристики мікрокристалів Si при цих температурах. З одержаних залежностей розраховуються значення коефіцієнта тензочутливості при фіксованих температурах за формулою

$$K = \frac{\Delta R(\epsilon_\sigma)/R(\epsilon_\sigma = 0)}{\epsilon_\sigma}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_\sigma$  — деформація балки,  $R(\epsilon_\sigma = 0)$  — опір кристала на недеформованій балці,  $\Delta R(\epsilon_\sigma)$  —

зміна опору кристала внаслідок деформації балки.

Проте при закріпленні мікрокристала на пружному елементі з КТР, відмінним від КТР мікрокристалу, на кристал діє термічна деформація  $\epsilon_t$ , яка визначається за формулою

$$\epsilon_t(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_{кр}(T) - \alpha_\sigma(T)] dt, \quad (2)$$

де  $\alpha_{кр}$  і  $\alpha_\sigma$  — відповідно КТР мікрокристала і матеріалу пружного елемента (балки),  $T$  — температура дослідження,  $T_0$  — температура полімеризації адгезиву, який використовується для закріплення мікрокристалів на балці,  $\gamma$  — розмірний фактор, що пов'язаний з передачею деформації від балки до кристалу.

Якщо  $\alpha_\sigma > \alpha_{кр}$ , як у нашому випадку, то на мікрокристал Si, закріплений на сталевій балці, діє деформація стиску, значення якої зростає при низьких температурах. Знаючи опір “вільних” мікрокристалів Si (до закріплення на балці) при заданій температурі і виходячи з одержаних експериментально значень опору НК Si, закріплених на сталевій балці, визначено значення термічної деформації для таких мікрокристалів, що становлять відповідно:  $\epsilon_t = -(4,5 \div 5) \times 10^{-4}$  відн. од. при 300 К;  $\epsilon_t \approx -1,85 \times 10^{-3}$  відн. од. при 77 К;  $\epsilon_t \approx -2,3 \times 10^{-3}$  відн. од. при 4,2 К.

Як видно з наведених значень  $\epsilon_t$  для НК р-Si, закріплених на сталевій балці, при криогенних температурах 4,2–77 К термічна деформація, якої зазнають ці кристали, значно більше деформації балки, тому термічна деформація дуже сильно впливає на тензометричні характеристики цих кристалів при криогенних температурах.

На рис. 1 наведено одержані експериментально тензометричні характеристики сильно легованих НК Si р-типу на сталевій балці при фіксованих температурах 300, 77 і 4,2 К, а на рис. 2 показано залежності відносної зміни опору цих мікрокристалів від сумарної деформації  $\epsilon = \epsilon_t + \epsilon_\sigma$ , яка діє на ці мікрокристали під час деформації балки, при різних температурах. Під дією деформації в сильнолегованих мікрокристалах Si у всьому досліджуваному діапазоні температур 4,2–300 К проявляється класичний п'єзорезистивний ефект. Як видно з рис. 1, при низьких температурах при дефор-

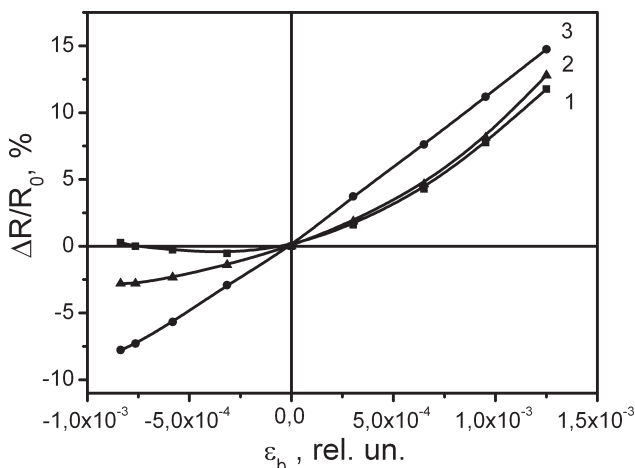


Рис. 1. Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , закріпленого на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

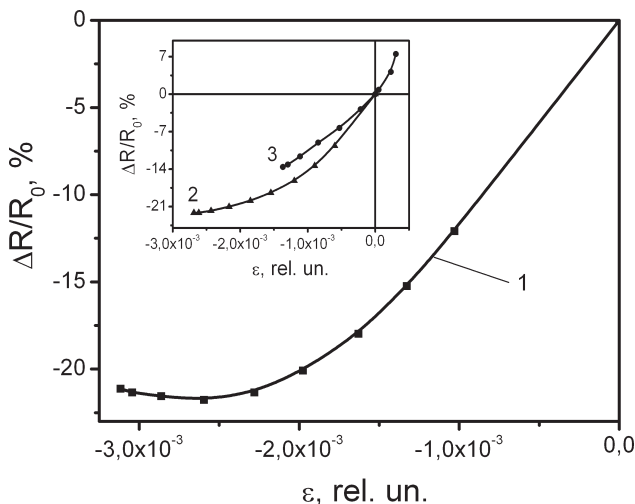


Рис. 2. Залежності відносної зміни опору НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  від сумарної деформації, яка діє на мікрокристал, закріплений на сталевій балці, при фіксованих температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

мації стиску залежність опору кристалів від деформації стає нелінійною, а при 4,2 К опір кристалів слабо змінюється з деформацією балки. Це явище пояснюється графіками на рис.2, з яких чітко видно, що реальна деформація, яка діє на мікрокристали Si, закріплені на сталевій балці, є деформацією стиску (за рахунок великої термічної деформації стиску) навіть при деформації розтягу балки. Ця реальна деформація  $\epsilon$  зростає за абсолютним значенням зі зниженням температури і досягає максимального значення  $\epsilon \approx -3,1 \times 10^{-3}$  відн. од. при деформації стиску балки  $\epsilon_b = -8,37 \times 10^{-4}$  відн. од. Як ві-

домо [3], при великих рівнях деформації стиску опір кристалів Si р-типу слабо залежить від деформації, а залежності  $\Delta R(\epsilon)/R(0) = f(\epsilon)$  характеризуються насиченням в області великих деформацій стиску, що і спостерігається у даному випадку (рис. 1). Тому такі кристали Si р-типу, на наш погляд, недоцільно використовувати як чутливі елементи сенсорів для вимірювання при криогенних температурах деформації конструкцій та виробів, виготовлених з матеріалів з КТР, значно більшим КТР кремнію (наприклад, сталі).

Зовсім інша картина спостерігається при дослідженні тензометричних характеристик НК Si р-типу з концентрацією бору поблизу фазового переходу метал-діелектрик при низьких температурах, коли проявляється дія неklasичного п'єзореzистивного ефекту в цих кристалах. На рис. 3 показано одержані експериментально залежності відносної зміни опору НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,010 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (поблизу ПМД з металевого боку переходу), закріплених на сталевій балці, від деформації балки  $\epsilon_b$  при різних температурах, а на рис. 4 — залежність відносної зміни опору цих кристалів від реальної деформації, яка діє на такий кристал, закріплений на балці. Як слід було очікувати, внаслідок неklasичного п'єзореzистивного ефекту при 4,2 К тензометричні характеристики таких мікрокристалів мають зовсім інший характер (рис. 3, крива 1), який можна пояснити за допомогою рис. 4. Оскільки НК Si, закріплені на сталевій балці, увесь час знаходяться під дією деформації стиску  $\epsilon$  (навіть при деформації розтягу балки  $\epsilon_b > 0$ ), реальна залежність зміни їх опору від деформації  $\epsilon$  при 4,2 К визначається кривою 1 на рис. 4. Згідно цього графіка на рис. 4, опір НК Si р-типу з  $\rho_{300\text{K}}=0,010 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при 4,2 К дуже сильно зростає під впливом реально діючої на кристал деформації стиску  $\epsilon$  (неklasичний п'єзореzистивний ефект), що знаходить своє відображення у залежності  $\Delta R(\epsilon)/R(0) = f(\epsilon)$ , яка фактично відповідає залежності зміни опору кристала при деформації стиску, навіть при деформації розтягу балки.

Найбільш наочно зміна опору таких НК Si р-типу під впливом деформації в інтервалі температур 4,2–300 К ілюструється графіками на рис. 5, на яких зображено температурні залежності опору таких мікрокристалів, вільного та

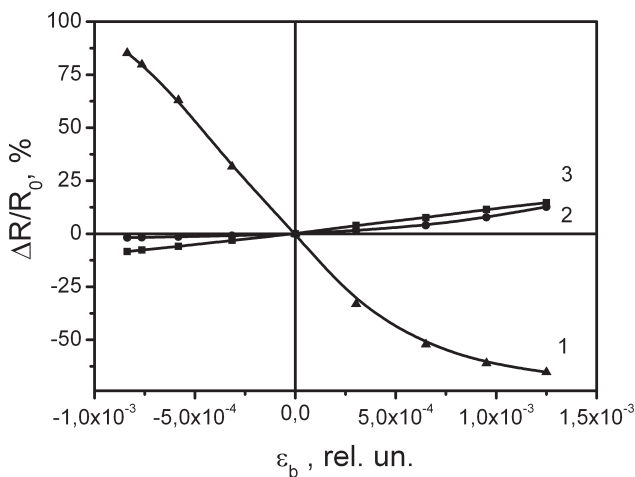


Рис. 3. Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см, закріпленого на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

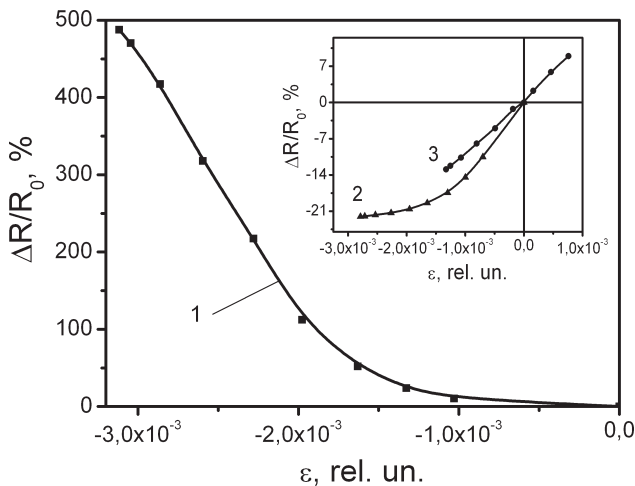


Рис. 4. Залежності відносної зміни опору НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см від сумарної деформації, яка діє на мікрокристал, закріпленний на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

закріпленого на сталевій балці, при різних рівнях деформації стиску-розтягу балки. Як видно з рис. 5, температурна залежність опору вільного (незакріпленого) НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см має металевий характер (крива 1), який після закріплення на сталевій балці змінюється на типовий напівпровідниковий (крива 3) внаслідок дії на мікрокристал термічної деформації стиску, що призводить до значного збільшення величини опору мікрокристала Si при гелієвих температурах внаслідок неklasичного п'езорезистивного ефекту. Деформація стиску балки призводить в інтервалі температур 4,2–50 К до подальшого

збільшення величини опору мікрокристала (крива 4) по відношенню до його значення при недеформованій балці ( $\epsilon_b = 0$ ), а при деформації розтягу балки до зменшення опору мікрокристала (крива 2) по відношенню до його значення при  $\epsilon_b = 0$ . Коефіцієнт тензочутливості НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см на сталевій балці при 4,2 К дорівнює  $K_{4,2K}=-1020$  при  $\epsilon_b=-8,37 \times 10^{-4}$  відн. од. і  $K_{4,2K}=-520$  при  $\epsilon_b=1,25 \times 10^{-3}$  відн. од., тоді як при 77 К  $K_{77K}=101,5$  при  $\epsilon_b=1,25 \times 10^{-3}$  відн. од. Такі НК Si р-типу можна успішно застосовувати як чутливі елементи сенсорів деформації, працездатних при криогенних температурах до 4,2 К.

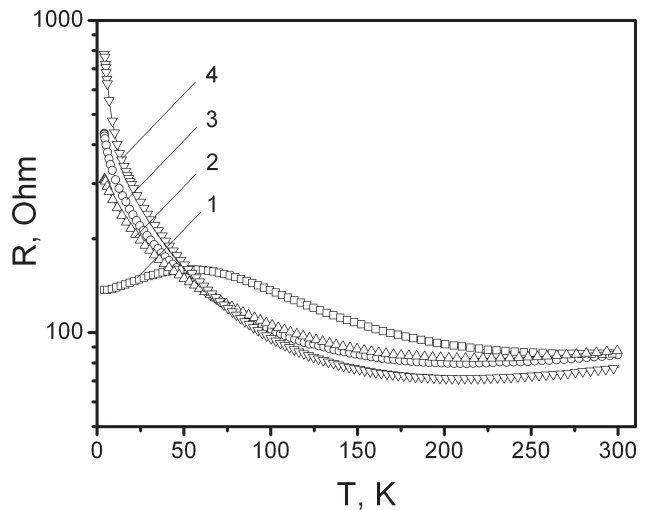


Рис. 5. Температурні залежності опору НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см, вільного (1) і закріпленого на сталевій балці при різних рівнях деформації балки: 2 —  $+3,03 \times 10^{-4}$ , 3 — 0, 4 —  $-8,37 \times 10^{-4}$  відн. од.

Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,0136$  Ом·см (поблизу ПМД з діелектричного боку переходу), закріплених на сталевій балці, (рис. 6) мають характер, подібний до характеристик НК Si р-типу поблизу ПМД з металевого боку переходу. Вони добре пояснюються залежностями відносної зміни опору цих мікрокристалів від реальної деформації, що показані на рис. 7. Такі мікрокристали також можна використовувати для створення високочутливих сенсорів деформації для криогенних температур ( $K_{4,2K}=-796$  і  $K_{77K}=159,3$  при  $\epsilon_b=1,25 \times 10^{-3}$  відн. од.), але їх характерною особливістю є високі значення опору (до кількох кОм) при низьких температурах, що не дуже зручно як для сенсорів деформації.

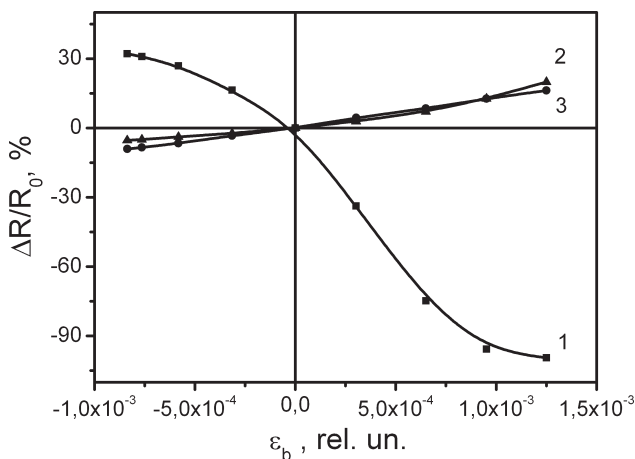


Рис. 6. Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,0136$  Ом·см, закріпленого на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

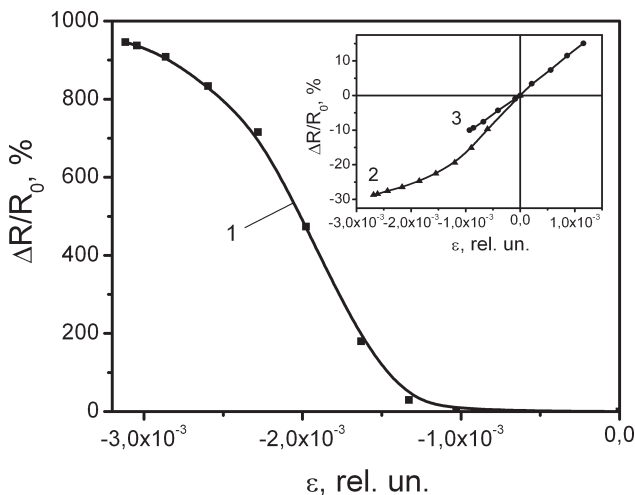


Рис. 7. Залежності відносної зміни опору НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,0136$  Ом·см від сумарної деформації, яка діє на мікрокристал, закріплений на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,025$  Ом·см (глибока діелектрична область), закріплених на сталевій балці, при температурах 77 і 300 К наведено на рис. 8. В інтервалі температур 77–300 К в таких мікрокристалах спостерігається класичний п'єзореzистивний ефект, коефіцієнт тензочутливості при 77 К  $K_{77K}=263$  при деформації балки  $\epsilon_b=-8,37 \times 10^{-4}$  відн. од., тоді як при 300 К  $K_{300K}=147,5$  при цьому ж рівні деформації балки. Однак при температурі рідкого гелію опір таких мікрокристалів, закріплених на сталевій балці, майже не змінюється під впливом деформації балки. Це можна пояснити, вихо-

дячи з того, що при великих значеннях деформації, що діє на мікрокристал при гелієвих температурах, в таких мікрокристалах внаслідок дії неklasичного п'єзореzистивного ефекту спостерігається насичення характеристик  $\Delta R(\epsilon)/R(0) = f(\epsilon)$  [14]. У нашому випадку при 4,2 К такі НК Si р-типу після закріплення на сталевій балці під дією великої термічної деформації  $\epsilon_t = -2,3 \times 10^{-3}$  відн. од. внаслідок неklasичного п'єзореzистивного ефекту дуже сильно змінюють свій опір, значення якого стає рівним  $1,1 \times 10^7$  Ом при 4,2 К при недеформованій балці. Тому такі мікрокристали доцільно використовувати як чутливі елементи сенсорів деформації для температури рідкого азоту.

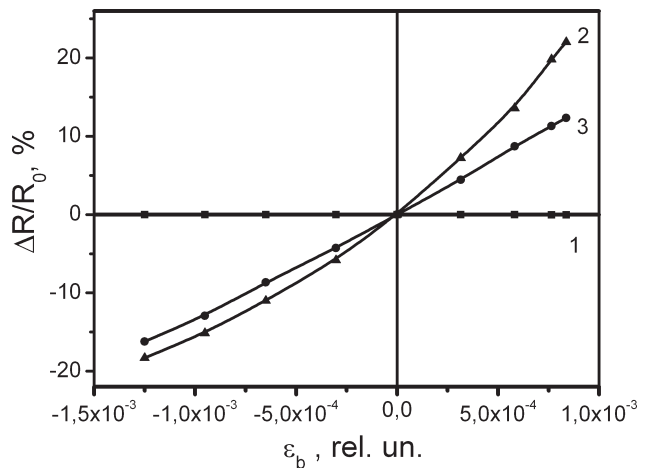


Рис. 8. Тензометричні характеристики НК Si р-типу з  $\rho_{300K}=0,025$  Ом·см, закріпленого на сталевій балці, при температурах: 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

### Висновки

Дослідження тензометричних характеристик НК Si р-типу, легованих бором, закріплених на сталевих пружних елементах, в інтервалі температур 4,2–300 К показало, що:

1) НК Si р-типу з питомим опором  $\rho_{300K}=0,010$  Ом·см з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик з металевого боку найбільш придатні як чутливі елементи сенсорів деформації для роботи при криогенних температурах, зокрема при температурі рідкого гелію, їх коефіцієнт тензочутливості при 4,2 К дорівнює  $K_{4,2K}=-1020$  при деформації стиску  $\epsilon = -8,37 \times 10^{-4}$  відн. од. Така висока тензочутливість зумовлена неklasичним п'єзоре-

зистивним ефектом в цих кристалах при гелієвих температурах.

2) НК Si p-типу з питомим опором  $\rho_{300K} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  з концентрацією бору, що відповідає глибокій діелектричній області, виявились найбільш придатними як чутливі елементи сенсорів деформації, працездатних при температурі рідкого азоту з коефіцієнтом тензочутливості  $K_{77K} = 263$  при деформації розтягу  $\varepsilon = 8,37 \times 10^{-4}$  відн. од. Дія таких сенсорів базується на класичному п'єзорезистивному ефекті в цих кристалах.

3) Слід зауважити, що на тензометричні характеристики напівпровідникових кристалів, закріплених на пружних елементах, виготовлених з різних матеріалів з коефіцієнтом термічного розширення (КТР), відмінним від КТР кристалу, при низьких температурах сильно впливає термічна деформація, зумовлена різницею цих КТР. Особливо сильно цей вплив проявляється в кристалах кремнію поблизу ПМД при криогенних температурах в області дії некласичного п'єзорезистивного ефекту. Ці обставини необхідно врахувати при розробці сенсорів для вимірювання деформації в конструкціях і виробках, виготовлених з різних матеріалів.

### Література

1. Клокова Н.П.. Тензорезисторы. // Датчики и системы. — 2004. — № 3. — С. 10-12.
2. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. — М.: Мир, 1974. — 285 с.
3. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. — М.: Наука, 1972. — 584 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. et al., Semiconductor microcrystals with ultra-high sensitivity to mechanical strain at cryogenic temperatures. // J. Phys. IV France. — 2002. — Vol. 12. — Pr. 3-79-3-82.
7. Druzhinin A.A., Maryamova I.I., Pavlovskyy I.V., Palewski T., Piezoresistive properties of boron-doped silicon whiskers at cryogenic temperatures. / Functional Materials. — 2004. — Vol. 11, No. 2. — P. 268-272.
8. Druzhinin A., Maryamova I., Kuttrakov O., Pavlovskyy I., Palewski T., Experimental simulation of piezoresistive mechanical sensors based on Si microcrystals at cryogenic temperatures. // Materiały konferencyjne VIII Konferencji Naukowej "Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne" (COE 2004). — Wrocław: TINTA. — 2004. — S. 106-109.
9. 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 і мікросистемні технології. — 2004. — № 1. — С. 69-77.
10. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Кутраков А.П., Павловский И.В., О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур. // Датчики и системы. — 2005. — № 7. — С. 17-21.
11. Евдокимов В.И., Лурье Г.И., Стучебников В.М. Полупроводниковые тензопреобразователи для измерения давления криогенных сред. // Приборы и системы управления. — 1985. — № 8. — С. 19-20.
12. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al., Silicon whiskers for mechanical sensors. // Sensors and Actuators. — 1992. — Vol. A30, № 1-2. — P. 27-33.
13. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E. et al., Low temperature semiconductor mechanical sensors. // Sensors and Actuators. — 2000. — Vol. A85, № 1-3. — P. 153-157.
14. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П., Фізичні властивості кристалів кремнію і германію в полях ефективного зовнішнього впливу. — Луцьк: Надстир'я, 2000. — 280 с.