

А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, О.П. Кутраков, І.В. Павловський
 Національний університет "Львівська політехніка",
 Лабораторія сенсорної електроніки та лазерної технології НДЦ "Кристал"

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ НА ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ П'ЄЗОРЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ

© Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Павловський І.В., 2004

A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, O.P. Kutrakov, I.V. Pavlovsky

LOW-TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SILICON MICROCRYSTALS ON THE SPRING ELEMENT FOR DEVELOPMENT OF PIEZORESISTIVE SENSORS

© Druzhinin A.A., Maryamova I.I., Kutrakov O.P., Pavlovsky I.V., 2004

Досліджувались характеристики ниткоподібних кристалів (НК) кремнію р-типу, закріплених на пружних елементах з інвару, в широкому діапазоні деформацій $\epsilon=0\div\pm 1,26\times 10^{-3}$ відн. од. і температур 4,2÷300 К з різною концентрацією бору: сильно-леговані кристали з металевою провідністю; поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД) з металевого боку; поблизу ПМД з діелектричного боку. В НК Si поблизу ПМД при гелієвих температурах спостерігався значний неklasичний п'єзоопір. Отримані характеристики НК Si, закріплених на пружних елементах, дозволяють прогнозувати параметри п'єзорезистивних сенсорів механічних величин, створених на їх основі, для низьких температур.

Characteristics of p-type silicon whiskers with different boron doping: heavily doped crystals with metallic conductivity; in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) from the metallic side and in the vicinity of MIT from the insulating side, mounted on the invar spring elements were studied in the wide range of strains $\epsilon=0\div\pm 1.26\times 10^{-3}$ rel. un. and temperatures 4.2÷300 K. In Si whiskers in the vicinity of MIT the great non-classic piezoresistance at helium temperatures was observed. Obtained characteristics of Si whiskers mounted on the spring elements allowed to forecast the performance of piezoresistive mechanical sensors created on their basis, operating at low temperatures.

Вступ

Проблема створення чутливих сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах, є актуальною для різних галузей науки й техніки, зокрема, для космічної техніки, криоенергетики тощо. У напівпровідникових сенсорах механічних величин переважно використовується п'єзорезистивний ефект [1, 2]. Проведені нами дослідження п'єзорезистивного ефекту в ниткоподібних кристалах (НК) кремнію р-типу, легованих бором, з орієнтацією [111], показали наявність високого неklasичного п'єзоопору при криогенних температурах у цих кристалах з концентрацією, яка відповідала фазовому переходу метал-діелектрик [3–7]. Для того, щоб оцінити можливість використання цього ефекту для створення сенсорів механічних величин для криогенних температур, необхідно провести дослідження характеристик таких мікрокристалів кремнію на пружних елементах у широкому діапазоні деформацій при низьких температурах. Проведено експериментальні дослідження п'єзорезистивних характеристик мікрокристалів кремнію р-типу з різною концентрацією бору в діапазоні температур 4,2–300 К і деформацій $0\div\pm 1,26\times 10^{-3}$ відн. од.

Методика експерименту

Для дослідження характеристик НК кремнію були відібрані три групи кристалів з різними концентраціями бору, а саме: 1) перша група сильнолегованих НК р-Si із $\rho_{300K} \approx 0,005 \text{ Ом} \times \text{см}$ з металевим типом провідності; 2) друга група НК р-Si з $\rho_{300K} \approx 0,01 \text{ Ом} \times \text{см}$ з концентрацією бору, що відповідає близькості до фазового переходу метал-діелектрик (ПМД) з металевого боку; 3) третя група НК р-Si з $\rho_{300K} \approx 0,013 \text{ Ом} \times \text{см}$ з концентрацією бору, що відповідає близькості до ПМД з діелектричного боку.

Вимірювання п'єзорезистивних характеристик НК кремнію в діапазоні температур $4,2 \div 300 \text{ К}$ проводили за допомогою спеціально розробленого пристрою (рис. 1) з пружним елементом у вигляді консольної балки 1, на якій закріплювались мікрокристали. Закріплені на балці мікрокристали зазнають деформації стиску або розтягу залежно від місця розташування. Обидва мікрокристали підбирались ідентичними за своїми параметрами.

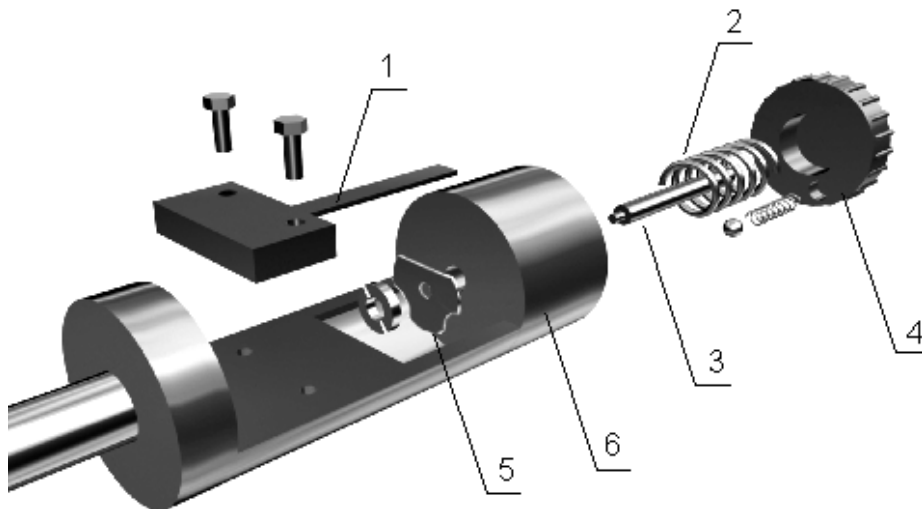


Рис. 1. Зовнішній вигляд пристрою для дослідження п'єзорезистивних характеристик мікрокристалів при криогенних температурах: 1 – балка з кристалами; 2 – пружина; 3 – вісь перемикача рівня деформації; 4 – ручка; 5 – кулачковий механізм; 6 – корпус

Вимірювання характеристик мікрокристалів проводилось у гелієвому кріостаті з внутрішнім діаметром $\sim 19 \text{ мм}$, що накладало певні обмеження на розміри цього пристрою, зокрема, його діаметр не перевищував 17 мм . Пружний елемент був виготовлений з інварного сплаву 36Н, оскільки коефіцієнт термічного розширення (КТР) інвару найбільш близький за своєю величиною до КТР кремнію при низьких температурах [8]. Пружний елемент у вигляді балки деформувався за допомогою кулачкового механізму 5, який дозволяв здійснювати деформування балки, а отже, і закріплених на ній кристалів, ступенями в діапазоні деформацій стиску-розтягу $\varepsilon = 0 \div \pm 1,26 \times 10^{-3}$ відн. од. Такий діапазон деформацій відповідає діапазону деформацій пружного елемента, який використовується в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин, зокрема, сенсорах тиску. Вимірювання проводились при різних рівнях деформації балки: $\varepsilon_1 = 2,42 \times 10^{-4}$ відн. од., $\varepsilon_2 = 5,95 \times 10^{-4}$ відн. од., $\varepsilon_3 = 8,79 \times 10^{-4}$ відн. од., $\varepsilon_4 = 1,08 \times 10^{-3}$ відн. од., $\varepsilon_5 = 1,26 \times 10^{-3}$ відн. од., що відповідали одновісній деформації стиску або розтягу НК залежно від місця його закріплення на балці. Пристрій для деформування пружних елементів із мікрокристалами поміщався в спеціальний гелієвий кріостат, живлення кристалів здійснювалося постійним струмом. Одночасно автоматично реєструвалися покази сенсора температури й спад напруги на потенційних контактах досліджуваних кристалів.

Вимірювання п'єзорезистивних характеристик НК кремнію на пружних елементах в діапазоні температур $4,2 \div 300 \text{ К}$ проводились в Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур у Вроцлаві (Польща).

Експериментальні результати

Характеристики сильнолегованих бором НК кремнію з питомим опором $\rho_{300K}=0,005 \text{ Ом}\times\text{см}$ при різних рівнях деформації стиску і розтягу показані на рис. 2, а, б. Як і передбачалось, у цих кристалах у всьому дослідженому діапазоні температур і деформацій спостерігається класичний п'єзорезистивний ефект: опір кристалів зростає при деформації розтягу і зменшується при деформації стиску. На рис. 3, а, б показані розраховані з експериментальних даних залежності відносної зміни опору цих кристалів від деформації $\Delta R(\varepsilon)/R_0 = f(\varepsilon)$ при фіксованих температурах: 4,2 К, 77 К і 300 К. Як видно з рис. 3, а, б, ці залежності мають монотонний характер, їх нелінійність збільшується при криогенних температурах, що зумовлено природою п'єзорезистивного ефекту в кремнії р-типу. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості цих кристалів, розраховані з експериментальних даних для рівня деформації пружного елемента (балки) $\varepsilon=\pm 1,02\times 10^{-3}$ відн. од., показані на рис. 4а. Ці графіки дозволяють оцінити величину коефіцієнта тензочутливості сильнолегованих НК р-Si с $\rho_{300K}=0,005 \text{ Ом}\times\text{см}$, закріплених на пружному елементі з інвару, в кожній точці температурного діапазону 4,2÷300 К.

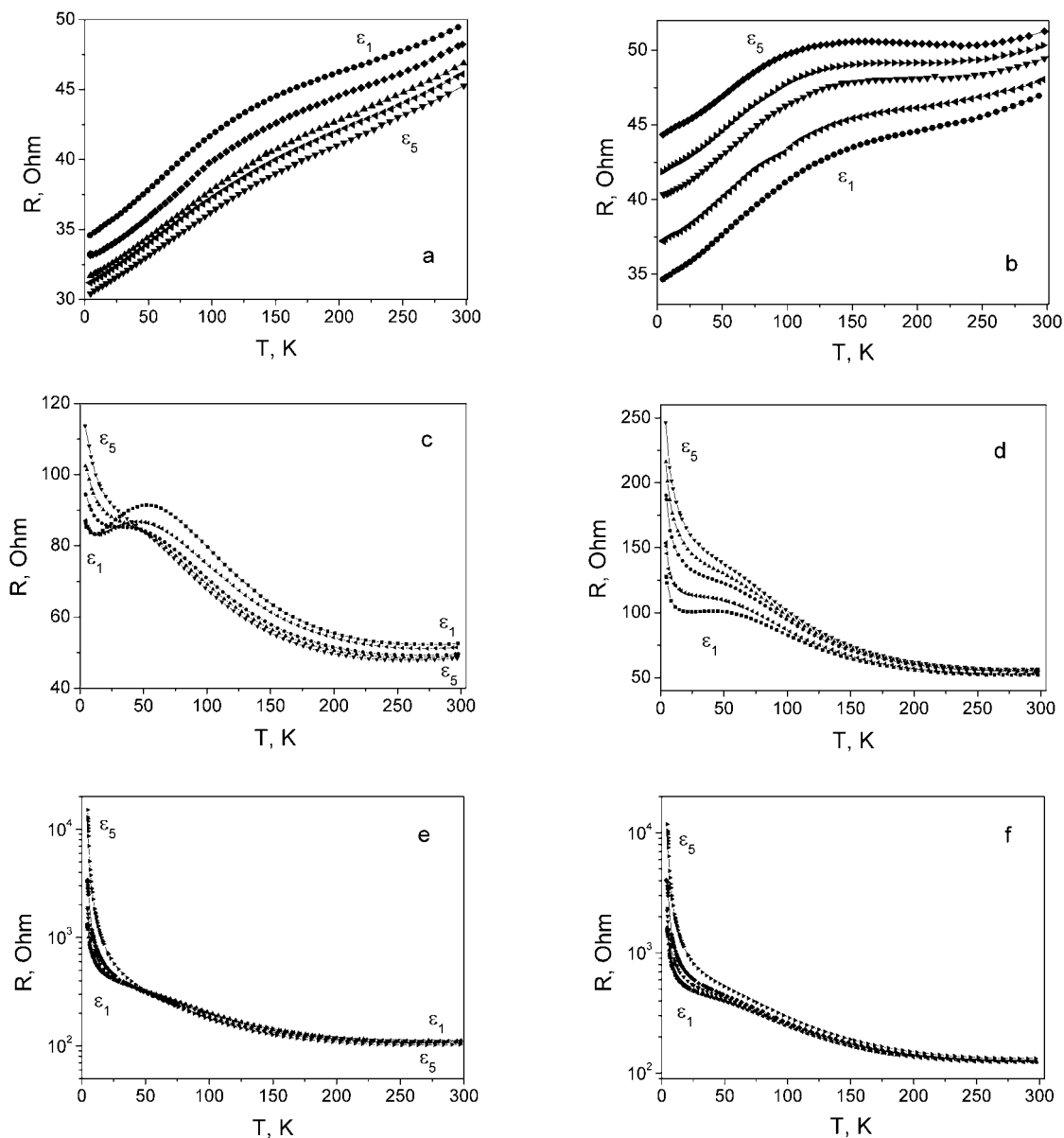


Рис. 2. Характеристики мікрокристалів р-Si(B) з різним питомим опором (а, б – 0,005; с, д – 0,010; е, ф – 0,013 Омхсм) на інварній балці при різних рівнях деформації стиску (а, с, е) та розтягу (б, д, ф)

Експериментальні результати дослідження характеристик з другої групи НК р-Si ($\rho_{300K}=0,010$ Ом×см) з концентрацією бору, що відповідає близькості до ПМД з металевого боку переходу, закріплених на пружних елементах з інвару, проілюстровані графіками температурних залежностей опору кристалів при різних рівнях деформації стиску (рис. 2с) і розтягу (рис. 2д). На рис. 2с чітко видно, що при криогенних температурах відбувається перехід від класичного до неklasичного п'єзорезистивного ефекту (опір кристалів зростає при деформації стиску), причому цей перехід відбувається тим раніше, чим більший рівень деформації, що діє на кристал, і чим нижча температура. Отже, поява неklasичного п'єзорезистивного ефекту пов'язана з наближенням до переходу метал-діелектрик, причому саме деформація стимулює наближення до фазового переходу.

Ще наочніше появу неklasичного п'єзорезистивного ефекту видно на рис. 3с, 3д, на яких показано залежності відносної зміни опору цих кристалів від деформації при фіксованих температурах: 4,2, 77 і 300 К. Якщо при температурах 77 і 300 К залежності $\Delta R(\varepsilon)/R_0 = f(\varepsilon)$ для цих кристалів мають звичайний вигляд, то при температурі рідкого гелію при деформації стиску ця залежність показує сильне зростання опору кристалів при деформації стиску, що характерно для неklasичного п'єзорезистивного ефекту, при цьому опір дуже сильно залежить від рівня деформації.

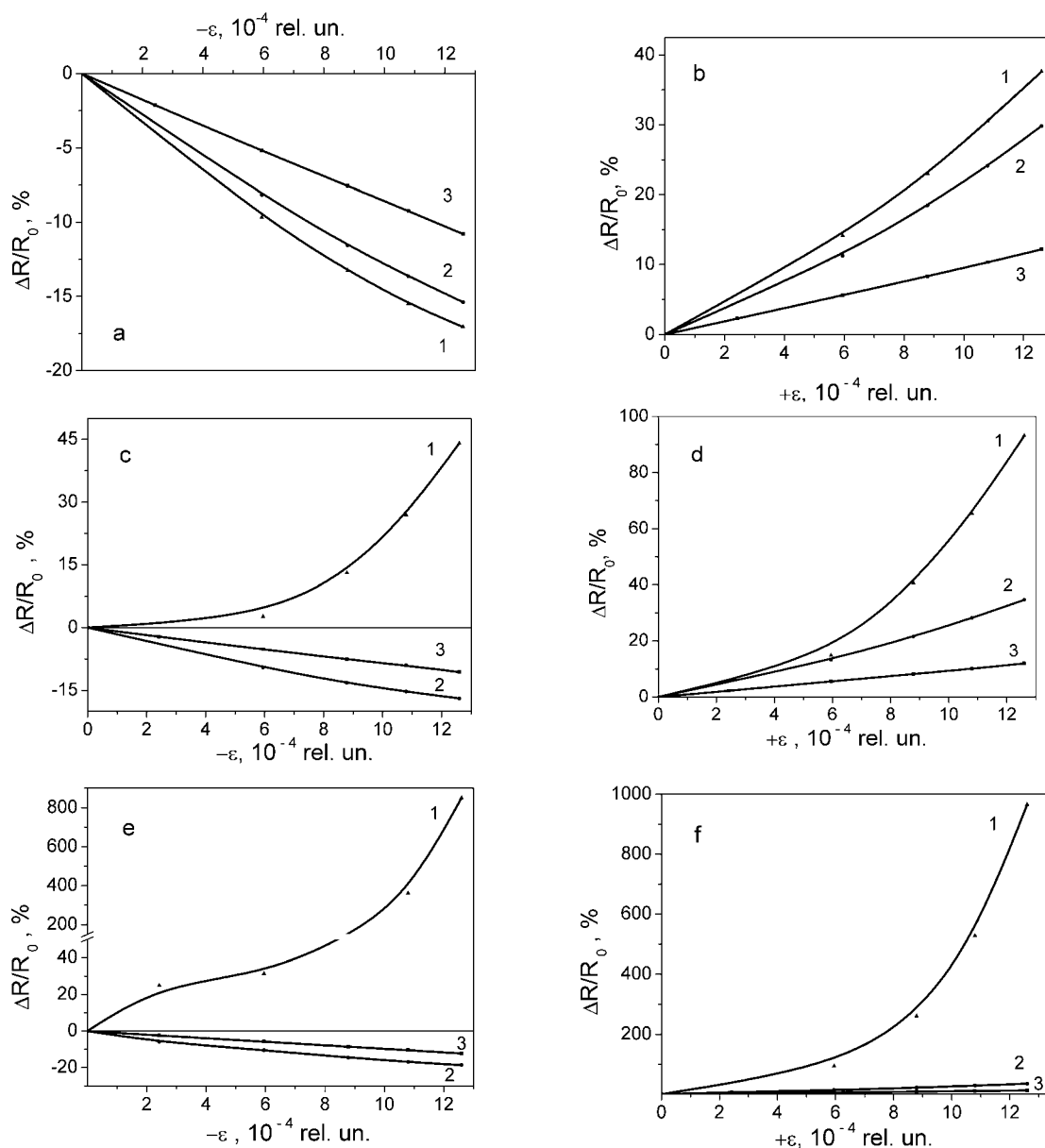


Рис. 3. Деформаційні характеристики мікрокристалів р-Si(B) з різним питомим опором (а, б – 0,005; с, д – 0,010; е, ф – 0,013 Ом×см) на інварній балці при різних температурах: 1 – 4,2 К, 2 – 77 К, 3 – 300 К

При гелієвих температурах коефіцієнт тензочутливості $GF = \Delta R / (R_0 \times \varepsilon)$ цих НК р-Si, закріплених на пружних елементах з інвару, сильно зростає: при деформації розтягу $\varepsilon = +1,02 \times 10^{-3}$ відн. од. він досягає значення $GF_{4,2K} \geq 900$, а при деформації стиску – змінює знак і стає негативним (крива 1 на рис. 4b).

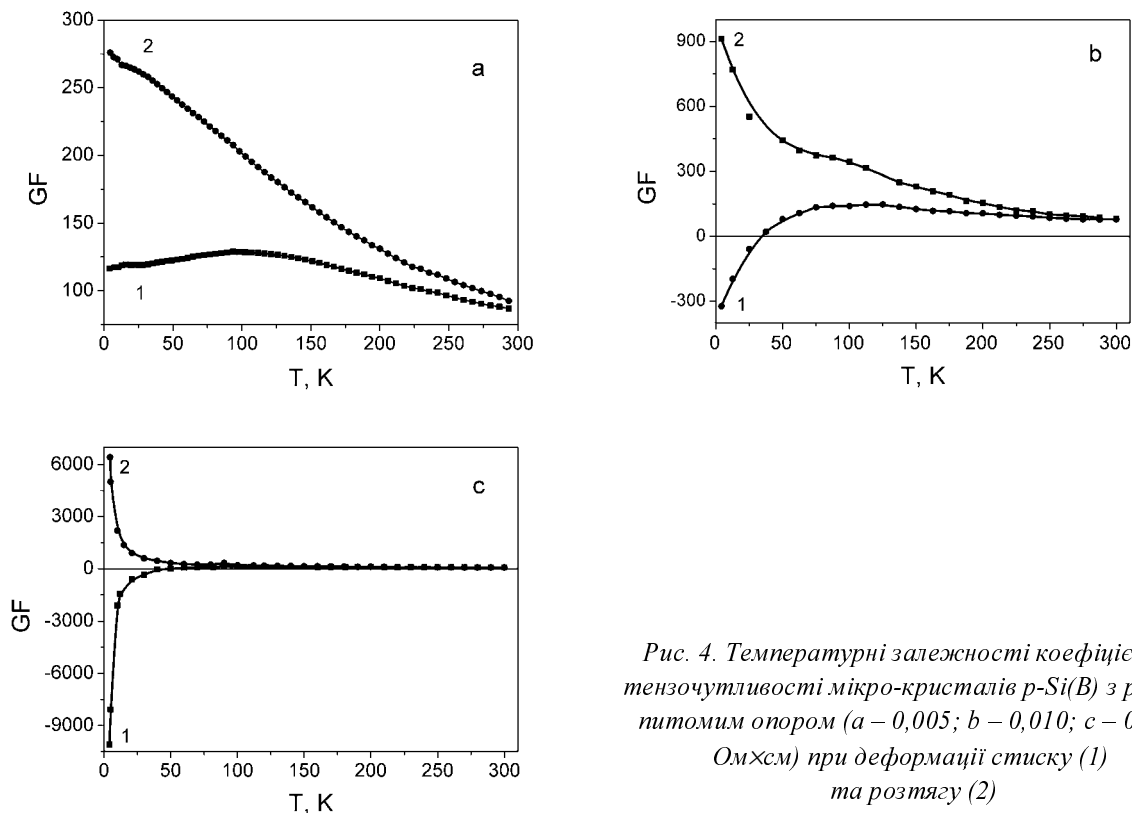


Рис. 4. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості мікро-кристалів р-Si(B) з різним питомим опором (а – 0,005; б – 0,010; с – 0,013 Ом×см) при деформації стиску (1) та розтягу (2)

Усі ці тенденції яскравіше проявляються при аналізі характеристик НК р-Si з $\rho_{300K} \approx 0,013$ Ом×см, концентрація бору в яких відповідала близькості до ПМД з діелектричного боку, закріплених на пружних елементах з інвару (рис. 2e, 2f, 3e, 3f, 4c). При гелієвих температурах при деформації стиску опір кристалів зростає більше ніж на порядок (рис. 2e), тобто в них спостерігається гігантський неklasичний п'єзоопір. При 4,2 К величина коефіцієнта тензочутливості при деформації стиску $\varepsilon = -1,02 \times 10^{-3}$ відн. од. досягає значення $GF_{4,2K} \approx -10000$, а при деформації розтягу – $GF_{4,2K} \geq 6400$ (рис. 4c), причому сама залежність $GF = f(T)$ в області криогенних температур має експоненційний характер.

Обговорення результатів і висновки

Проведені дослідження дозволили виявити при криогенних температурах в НК Si р-типу, легованих бором до концентрацій, що відповідають близькості до фазового переходу метал-діелектрик у цих кристалах, неklasичний п'єзоопір. Причому величина неklasичного п'єзорезистивного ефекту в цих мікрокристалах пов'язаний зі зміною механізму транспорту носіїв заряду при низьких температурах з наближенням концентрації основної легуючої домішки до критичного значення N_c , що відповідає фазовому переходу метал-діелектрик [9]. Це підтверджується зростанням значення енергії активації стрибкової провідності ε_3 від 0,016 до 0,124 меВ в області температур 4,2–10 К [5] із зменшенням концентрації основної легуючої домішки (бору) і наближенням до ПМД та зростанням рівня деформації від 0 до $1,26 \times 10^{-3}$ відн. од., що добре узгоджується з експериментальними результатами досліджень, наведених у роботі [10].

Характеристики НК кремнію на пружних елементах, які вимірювались у широкому діапазоні температур і деформації, дають змогу прогнозувати параметри п'єзорезистивних сенсорів на основі цих кристалів. З аналізу цих характеристик випливає можливість створення сенсорів деформації (тензорезисторів) двох типів:

1) для широкого діапазону температур 4,2–300 К на основі сильнолегованих НК Si р-типу з питомим опором $\rho_{300K} \approx 0,005 \text{ Ом} \times \text{см}$;

2) працездатних при температурі рідкого гелію, на основі НК кремнію з концентрацією бору, що відповідає ПМД, із питомим опором $\rho_{300K} = 0,010\text{--}0,013 \text{ Ом} \times \text{см}$. Коефіцієнт тензочутливості таких сенсорів на кілька порядків вищий, ніж у звичайних кремнієвих тензорезисторах на основі класичного п'єзорезистивного ефекту.

Відповідно на основі НК кремнію р-типу, легованих бором, можуть бути створені різні види п'єзорезистивних сенсорів механічних величин, зокрема, сенсори тиску й сенсори рівня рідини для низьких температур. При використанні сильнолегованих НК р-Si як чутливих елементів сенсорів тиску робочий діапазон температур таких сенсорів буде досить широкий 4,2–300 К. При використанні мікрокристалів р-Si з концентрацією бору поблизу ПМД, які характеризуються великим неklasичним п'єзоопором, можуть бути створені високочутливі сенсори тиску для роботи при температурі рідкого гелію. Вихідний сигнал таких п'єзорезистивних сенсорів при 4,2 К досягатиме кількох сотень мілівольт (без підсилення), що дасть можливість використовувати їх у системах контролю і сигналізації.

1. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*. – М., 1972.
2. Головин П.Д., Блинов А.В. *Датчики и системы*. – 2003. – № 11. – С. 3–9.
3. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. // *Cryst. Res. Technol.* – 2002. – 37 (2-3). – P. 243–257.
4. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Palewski T. and Kuttrakov A. J. // *Phys. IV France*. – 2002. – 12. – Pr. 3–79 – 3–82.
5. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Павловський І.В. // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2003. – 4. – С. 720–728.
6. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Павловський І.В. // *Вісник НУ "Львівська політехніка": Електроніка*. – 2003. – № 482. – С. 98–104.
7. Дружинін А.О., Лавитська О.М., Мар'ямова І.Й., Павловський І.В. // *Фотоелектроніка*. – 2003. – № 12. – С. 80–84.
8. Новикова С.И. *Тепловые расширения твердых тел*. – М., 1974.
9. Шкловский В.И., Эфрос А.Л. *Электронные свойства легированных полу-проводников*. – М., 1979.
10. Chroboczek J.A., Pollak F.H., Staunton H.F. // *Phil. Mag. B*. – 1984. – 50. – P. 113–156.