

ТЕРМОМЕТРИ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ SI-GE ДЛЯ КРЮГЕННОГО ДІАПАЗОНУ ТЕМПЕРАТУР

© Дружинін А., Островський І., Лях Н., 2003

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра напівпровідникової електроніки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Досліджено терморезистивні та тензорезистивні характеристики спеціально деформованих ниткоподібних кристалів $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,01+0,05$) при температурах $4,2 \pm 50$ К. Показано, що з використанням таких кристалів можна створити такі типи низькотемпературних термометрів: високочутливий термометр (температурна чутливість 600 K^{-1}), роботоздатний у температурній області 5 ± 20 К за відсутності магнітного поля; термометр з середньою чутливістю ($\sim 40 \text{ K}^{-1}$), роботоздатний в інтервалі температур 5 ± 45 К і стійкий до впливу магнітного поля.

Исследованы терморезистивные и тензорезистивные характеристики специально деформированных нитевидных кристаллов $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,01+0,05$) при температурах $4,2 \pm 50$ К. Показано, что на основании таких кристаллов можно создать следующие типы термометров: высокочувствительный термометр (температурная чувствительность 600 K^{-1}), работоспособный в температурной области 5 ± 20 К при отсутствии магнитного поля; термометр со средней чувствительностью ($\sim 40 \text{ K}^{-1}$), работоспособный в интервале температур 5 ± 45 К и стойкий к влиянию магнитного поля.

Thermoresistor and piezoresistor performances of specially strained $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,01+0,05$) whiskers at temperature $4,2 \pm 50$ K were investigated. On the base of these crystals the following types of thermometers were shown to design: high sensitive thermometer (temperature sensitivity $\sim 600 \text{ K}^{-1}$) operating in temperature range 5 ± 20 K without magnetic field as well as thermometer with middle sensitivity ($\sim 40 \text{ K}^{-1}$) operating in temperature range 5 ± 45 K and stable at magnetic field action.

1. Вступ. Сильно леговані напівпровідники використовують для розробки термометрів, роботоздатних в інтервалі низьких температур [1–3]. Зокрема, в [1] описано термометр на основі ниткоподібного кристала (НК) InSb з робочим інтервалом температур $0,5 \pm 10$ К. Його недоліком є велика похибка вимірювання температури в магнітному полі внаслідок високої рухливості носіїв заряду та значного магнітоопору матеріалу InSb, а також обмежений діапазон робочих температур. Кращі термометричні характеристики мають сенсори на основі НК GaP і твердого розчину Te-Se [2–3]. Так, термометри на основі НК GaP практично нечутливі до впливу магнітного поля – похибка вимірювань за рахунок поля не перевищує $0,01$ К. У твердих розчинах Te-Se спостерігається лінійна температурна залежність магнітоопору, яку легко врахувати, конструюючи пристрій.

У всіх названих термометрах використано терморезистивний принцип дії – у чутливому елементі (ЧЕ) пристрою при низьких температурах спосте-

рігалась стрибова провідність за домішковою зоною, яка забезпечувала лінійність характеристики термоопору:

$$R = A - B \lg T \text{ для термометра з НК Te-Se;}$$

$$\lg R \sim \lg T \text{ для ЧЕ з НК GaP.}$$

Недоліками розглянутих термометрів є обмежений інтервал робочих температур (1 ± 20 К для сенсора з НК Te-Se) та порівняно низька чутливість, наприклад, температурна чутливість термометра з НК GaP $\Delta \lg R / \Delta \lg T \approx 1,6$. Розширення робочого інтервалу температур та підвищення температурної чутливості сенсорів можна досягти, застосовуючи деформації їх ЧЕ [4].

Нині виконано серію досліджень впливу деформації на поведінку п'єзоопору напівпровідникових кристалів при низьких температурах [4–7]. Однак переважно ці дослідження були спрямовані на з'ясування фізики процесів та механізмів стрибової провідності у сильнолегованих кристалах поблизу переходу метал-діелектрик.

Метою роботи є розроблення низькотемпературних термометрів на підставі дослідження терморезистивних характеристик спеціально деформованих НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,01\div 0,05$). Запропоновано терморезистивний та тензорезистивний принципи створення сенсорів на основі таких кристалів.

2. Вплив деформації на термометричні характеристики ЧЕ сенсорів. Ниткоподібні кристали Si-Ge широко використовують як ЧЕ сенсорів фізичних величин, зокрема у сенсорах температури [8]. Це пов'язано, насамперед, з малими розмірами, масою НК, досконалою структурою їх об'ємних та поверхневих шарів, які забезпечують добре відтворення вимірювальних параметрів.

НК Si-Ge вирощували методом хімічних транспортних реакцій у закритій бромідній системі з використанням золота як ініціатора росту. Вміст Ge у кристалах контролювали за допомогою методу мікрозондового аналізу. Встановлено, що молярний вміст Ge у вирощених НК $x=0,01\div 0,05$.

Для створення сенсорів було відібрано декілька партій НК з діаметрами $20\div 50$ мкм, легованих бором до концентрацій ($10^{18}\div 5\cdot 10^{18}$ см⁻³), що відповідають близькості до переходу метал-діелектрик з діелектричного боку. Вимірювали температурні залежності опору в інтервалі температур $4,2\div 300$ К на вільних та деформованих НК. Деформація зразків відбувалась в напрямку росту кристалів <111> двома способами:

– за допомогою консольної балки, виготовленої з інварного сплаву ($\epsilon=\pm 1,4\cdot 10^{-3}$ в.о.);

– за рахунок термічного розширення НК, наклеєних на підкладки (Al, Cu, кварц) з матеріалів з відмінним від твердого розчину Ge-Si коефіцієнтом термічного розширення, при їх охолодженні до 4,2 К ($\epsilon=-4\cdot 10^{-3}\div +4\cdot 10^{-4}$ в.о.).

На основі виконаних досліджень встановлено, що деформація відчутно впливає на термометричні характеристики кристалів. На рис. 1 наведено типову

температурну залежність опору для вільного та деформованих різними підкладками НК з $\rho=0,016$ Ом-см. Як видно з рис. 1, в температурній ділянці $4,2\div 30$ К спостерігається гігантський тензорезистивний ефект: опір деформованих мідною підкладкою кристалів ($\epsilon=-3,8\cdot 10^{-3}$) на 2–3 порядки перевищує опір вільних НК. Ефект оцінювався за розрахунком коефіцієнтом тензочутливості $K=\Delta\rho/\rho_0\epsilon$, де ρ_0 – опір недеформованих зразків; $\Delta\rho$ – зміна питомого опору під дією деформації; ϵ – відносна деформація. Використовуючи одержані температурні залежності опору деформованих та недеформованих зразків (рис. 1), визначили коефіцієнти тензочутливості кристалів K в інтервалі температур $4,2\div 300$ К. Отримана залежність коефіцієнта тензочутливості від температури при деформації НК мідною підкладкою ($\epsilon=-3,8\cdot 10^{-3}$) наведена на рис. 2. Як зрозуміло з рис. 2, в області температур $T > 30$ К коефіцієнт тензочутливості НК дорівнює 200, в той час як при зниженні температури значення K істотно зростає – якщо 4,2 К $K \approx 35000$.

Значне зростання коефіцієнта тензочутливості в діапазоні низьких температур пов'язано з тим, що деформація сильно змінює характер стрибкової провідності, яка виникає в кристалах за цих температур. Зокрема, прикладаючи деформацію, можна переводити кристал через перехід метал-діелектрик (зі стану з металевою провідністю у діелектричний стан), що і забезпечує різку зміну його опору.

3. Розробка термометрів

3.1. Терморезистивний принцип роботи сенсора. Розроблено одноелементний сенсор, основою якого є терморезистивний принцип дії. Первинним перетворювачем такого пристрою є НК Si-Ge, наклеєний на підкладку з міді. Термометричну характеристику такого кристала зображено на рис. 1. Порівняння термометричних характеристик сенсорів з деформованих та недеформованих НК наведено в таблиці.

Порівняльна характеристика термометричних параметрів деформованих та недеформованих НК Si-Ge

Діапазон робочих температур, К	ТКО, %/К	Температурна чутливість при $T=7$ К, Ом/К	Зразки
4.2÷10	13÷16	300	Недеформований
4.2÷50	6÷16	12 500	Деформований

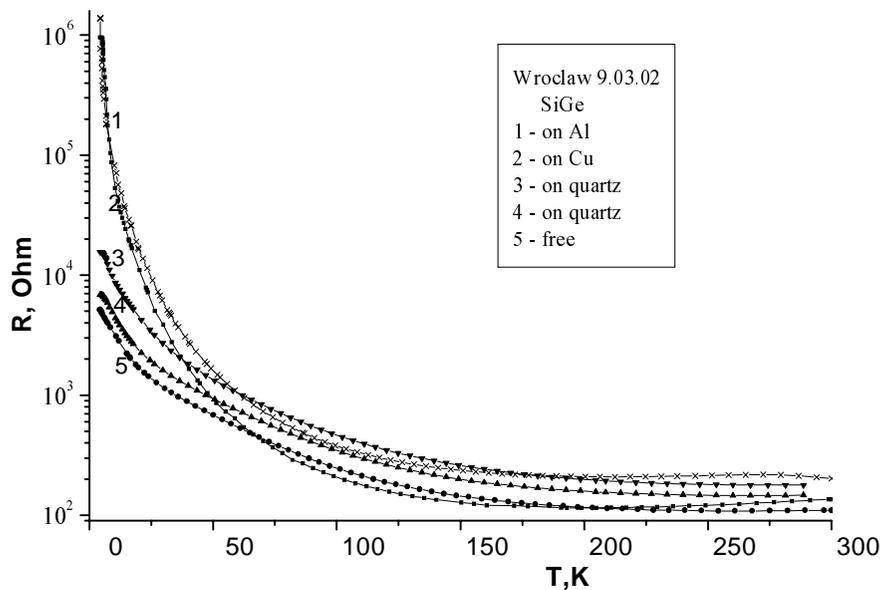


Рис. 1. Температурні залежності опору НК Si-Ge ($\rho=0,016$ Ом·см), деформованих різними підкладками

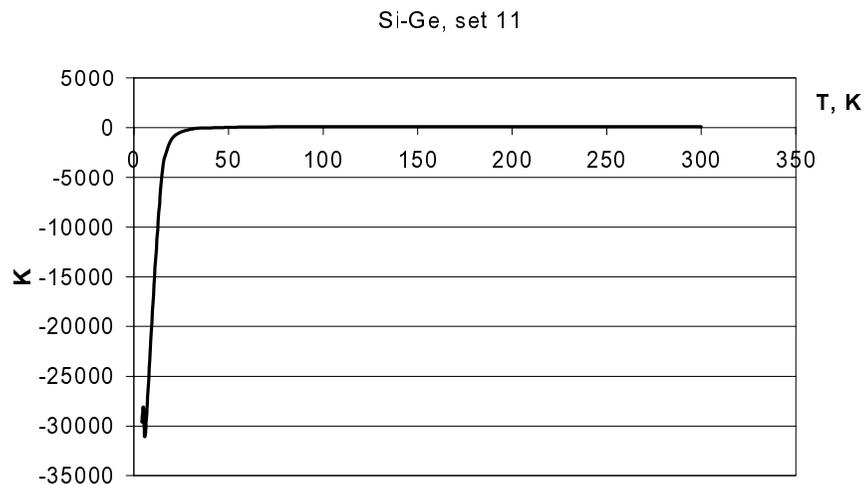


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості НК $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,03$) з $\rho=0,016$ Ом·см при їх деформації мідною підкладкою $\epsilon=-3,8 \cdot 10^{-3}$

Як видно з таблиці, використання деформованих НК Si-Ge значно розширяє робочий діапазон температур та підвищує температурну чутливість сенсорів. Такі НК можуть застосовуватись для вимірювання криогенних температур.

З рис. 1 видно, що опір НК ($\rho=0,016$ Ом·см), деформованого мідною підкладкою ($\epsilon=-3,8 \cdot 10^{-3}$) змінюється приблизно на 3 порядки в діапазоні

температур 10+50 К. Крім того, у цьому діапазоні температур спостерігається лінійна залежність $\ln R=f(T)$. Для вільних НК з низьким рівнем легування ($\rho=0,025$ Ом·см) також відзначається різка зміна опору (на 3–4 порядки), однак нелінійність залежності $\ln R=f(T)$ значно більша. Отже, використання спеціально деформованих сильнолегованих НК має значні переваги у вимірюванні криогенних температур.

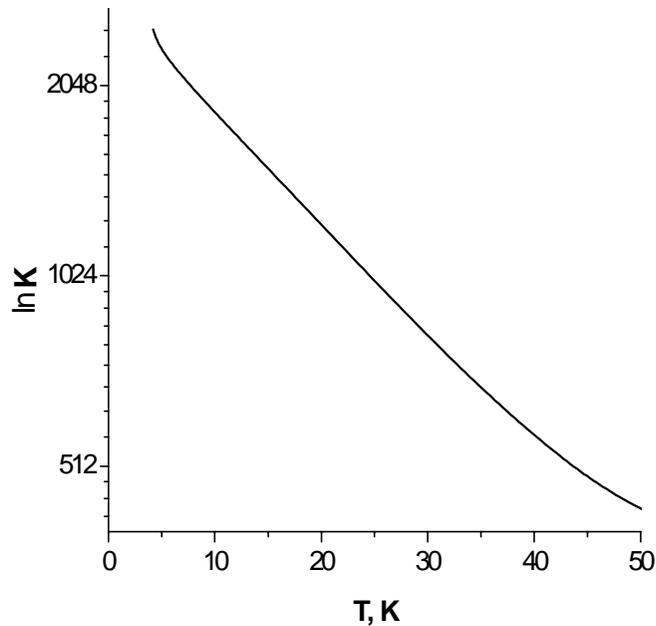


Рис. 3. Температурна залежність логарифма коефіцієнта тензочутливості НК $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,03$) з $\rho=0,012$ Ом-см, деформованих інварною балкою ($\epsilon=+1,4 \cdot 10^{-3}$ в.о.)

3.2. Тензорезистивний принцип роботи сенсора. Розроблено термометр, основою якого є тензорезистивний принцип дії. Термометр виконано у конструкції з двома ЧЕ, одержаними з одного НК Si-Ge (це забезпечує ідентичність характеристик обох ЧЕ). Перший ЧЕ – недеформований, другий – деформований за допомогою інварної балки ($\epsilon=\pm 1,4 \cdot 10^{-3}$ в.о.) або мідної підкладки (якщо $4,2$ К $\epsilon= -4,3 \cdot 10^{-3}$ в.о.). В останньому випадку термометричні характеристики цих ЧЕ відповідають кривим 1–5 (рис. 1).

Конструкція вторинного перетворювача досить проста: обидва чутливі елементи входять в електричне коло з логарифмічним помножувачем, на виході якого

одержують сигнал вигляду $\ln \frac{R_\epsilon - R_0}{R_0}$. Цей сигнал

відповідає логарифму коефіцієнта тензочутливості. Наші дослідження показали, що залежність $\ln K=f(T)$ прямолінійна в інтервалі температур $5 \div 45$ К при деформації НК за допомогою інварної балки при $\epsilon=1,4 \cdot 10^{-3}$ в.о. (рис. 3). Отже, за допомогою такого пристрою можна легко вимірювати температуру. Робочий інтервал температур сенсора $5 \div 45$ К, температурна чутливість 40 К $^{-1}$. Підвищення температурної чутливості термометра можна досягти:

- 1) збільшуючи ступінь деформації ЧЕ;
- 2) змінюючи рівень легування ЧЕ.

На рис. 4 наведено залежність максимального значення коефіцієнта тензочутливості від питомого опору ЧЕ (крива 2) при $\epsilon= -4,3 \cdot 10^{-3}$ в.о. Як видно з рис. 4, максимум коефіцієнта тензочутливості $K \approx 30000$ відповідає НК з $\rho=0,016$ Ом-см. Використання таких ЧЕ істотно збільшує температурну чутливість сенсора: $d \ln K / dT = 600$ К $^{-1}$. Однак водночас значно звужується інтервал робочих температур сенсора $5 \div 20$ К (рис. 2).

3.3. Вплив магнітного поля на характеристики сенсорів. Термометри для вимірювання низьких температур, як правило, працюють у присутності сильних магнітних полів. Тому дуже важливим параметром термометра є слабка залежність його термометричних характеристик від магнітного поля.

Ми досліджували вплив сильних магнітних полів (до 14 Тл) на магнітоопір ЧЕ сенсорів при $4,2$ К. Зі зростанням температури магнітоопір зменшується за законом $\frac{\Delta R_B}{R} \approx A T^{-1,3}$, де A – константа. Тому найбільша похибка при вимірюванні температури за рахунок впливу магнітного поля виникала при температурах близько $4,2$ К.

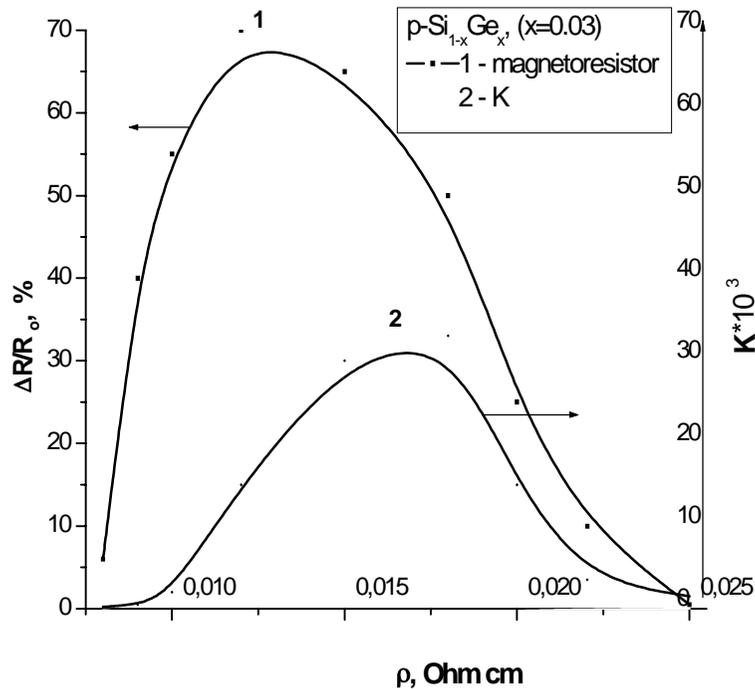


Рис. 4. Залежності параметрів НК Ge_xSi_{1-x} ($x=3\%$) від їх питомого опору:

1 – магнітоопір; 2 – коефіцієнт тензочутливості

Залежність максимальної величини магнітоопору (якщо $B=14$ Тл) від рівня легування (питомого опору) ЧЕ наведена на рис.4 (крива 1). Як видно з рис.4, НК з високими значеннями коефіцієнта тензочутливості ($\rho=0,014\pm 0,016$ Ом·см) можна використовувати як ЧЕ термометрів лише за умови відсутності магнітного поля, оскільки максимум K відповідає максимуму магнітоопору зразків. Натомість НК з $\rho=0,025$ Ом·см практично нечутливі до впливу магнітного поля. Цікаво, що вплив деформації ($\epsilon=-4,3\cdot 10^{-3}$ в.о.) зумовлює виникнення в них магнітоопору на рівні 0,1 % при $B=14$ Тл. Водночас такі кристали характеризують істотною температурною зміною опору (на 2–3 порядки) та досить високим значенням коефіцієнта тензочутливості ($K=1000\pm 2000$ залежно від знака та величини деформації). Отже, їх можна рекомендувати для використання як ЧЕ термометрів, стійких до дії магнітного поля. Температурна чутливість ~ 40 K^{-1} , робочий інтервал температур $5\div 45K$.

4. Висновки. Досліджено термометричні характеристики сенсорів температури з деформованих НК Si-Ge, робоздатних у діапазоні низьких температур

$5\div 50K$. Показано, що в цьому температурному діапазоні деформація істотно покращує характеристики сенсорів – значно розширює робочий діапазон температур та підвищує температурну чутливість.

Запропоновано два принципи створення термометрів:

- 1) одноелементний сенсор на основі термо-резистивного ефекту в деформованому НК Si-Ge;
- 2) двоелементний сенсор на основі гігантського тензорезистивного ефекту та його сильної температурної залежності.

Досліджено вплив магнітного поля як дестабілізуючого чинника роботи розроблених сенсорів. Наведена порівняльна характеристика магнітоопору та коефіцієнта тензочутливості зразків з різним рівнем легування дала змогу рекомендувати їх як ЧЕ термометрів:

- 1) високочутливого термометра (температурна чутливість $d\ln K/dT = 600$ K^{-1} , інтервал робочих температур $5\div 20$ К), робоздатного за відсутності магнітного поля;
- 2) термометра з середньою чутливістю (температурна чутливість ~ 40 K^{-1} , робочий інтервал температур $5\div 45$ К), стійкого до впливу магнітного поля.

1. Пат. США 3473385. *Thermometer for measuring very low temperature*/ К.Коматсубара, 1981. 2. Байцар Р.І., Варшава С.С. *Напівпровідникові мікросенсори*. – Львів, 2001. 3. Вайнберг В.В., Варшава С.С., Пелех Л.Н. // УФЖ. – 1993. – Т.38. – №12. – С. 1830. 4. Дружинін А.О., Лавитська О.М., Островський І.П., Лях Н.С. // Вісник НУ “Львівська політехніка”, 2002. – №455. – С. 126–133. 5. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. // *Cryst. Res.*

Technol. 2002. – Vol.37. – P.243–257. 6. Будзуляк С.И., Венгер Е.Ф., Даценко Ю.П. и др. // ФТП, 2000. – Т.34. – №9. – С.1063–1065. 7. Matveev G.A., Tsidilkovskii I.M., Lonchakov A.T. // *Phys.Stat.Sol.(b)*, 1989. – V.154. – P.703–711. 8. Baitsar R., Varshava S., Ostrovskii I., Stolyarchuk P. // *Abstract of the 7th Intern.Symp.on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, 1999, Delf, The Netherlands*, P.125.