

А.О. Дружинін, І.П. Островський, Н.С. Лях-Кагуй, Ю.Р. Когут

Поведінка електропровідності ниткоподібних кристалів Si-Ge в полях ефективного зовнішнього впливу

НУ "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал", вул. Котляревського, 1, Львів, 79013 тел. (0322) 721632,
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Досліджено вплив деформації та магнітного поля на поведінку електропровідності ниткоподібних кристалів твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,05$) з концентрацією бору $(1-4) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при низьких температурах 4,2-50 К. У кристалах встановлено негативний магнітоопір та максимум коефіцієнта тензочутливості при температурах $T = 15-18 \text{ К}$. Виявлені ефекти пояснюються особливостями стрибкової провідності по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, низькі температури, магнітне поле, перехід метал-діелектрик.

Стаття постуила до редакції 16.05.2005; прийнята до друку 15.01.2006.

Вступ

Дослідження електропровідності сильно легованих ниткоподібних кристалів (НК) Si-Ge в області переходу метал-діелектрик (ПМД) дозволило виявити ряд ефектів: гігантський п'єзорезистивний ефект, який спостерігається при низьких температурах [1], досить значний для алмазоподібних напівпровідникових кристалів магніторезистивний ефект [2], специфічний термоелектричний і п'єзотермоелектричний ефекти [3]. Фізичні механізми вищезгаданих ефектів досить ґрунтовно вивчені у зразках з концентрацією домішки у безпосередній близькості до ПМД [1-3]. Однак, низькотемпературний транспорт носіїв заряду у легованих кристалах Si-Ge, у яких домішковий рівень починає вироджуватися в домішкову зону, поки що вивчений недостатньо. Дослідження провідності по домішковій зоні в таких кристалах в полях ефективного зовнішнього впливу (деформаційне, магнітне, теплове поле) дозволяє розширити уявлення про природу ПМД в сильно легованих НК Si-Ge.

В роботі досліджено вплив деформації та магнітного поля на поведінку електропровідності ниткоподібних кристалів твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,05$) з концентрацією домішки бору $(1-4) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при низьких температурах 4,2-50 К.

І. Методика експерименту

НК Si-Ge вирощувались методом хімічних

транспортних реакцій в закритій бромідній системі [4]. Склад твердого розчину контролювався методом мікро-зондового аналізу і становив від 1 до 5 ат. %. Легування кристалів здійснювалося бором в процесі їх росту до концентрацій $(1-4) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (тобто, досліджувалися кристали з діелектричного боку ПМД). Для створення деформації зразків їх наклеювали на латунну балку, рівень деформації якої задавали гвинтовим механізмом в межах $\varepsilon \pm 3 \cdot 10^{-4}$ відн.од. Однак, при охолодженні зразків до низьких температур внаслідок різниці коефіцієнтів температурного розширення матеріалу балки та кристалу виникає термічна деформація стиску порядку $-3,4 \cdot 10^{-3}$ відн.од. Тому в результаті одночасної дії обох деформацій до кристалу прикладалася деформація стиску $\varepsilon \approx (-3,1 \cdot 10^{-3}) - (-3,7 \cdot 10^{-3})$ відн.од.

ІІ. Результати експерименту та їх обговорення

Температурні залежності електропровідності вільних та деформованих кристалів Si-Ge досліджувалися в інтервалі 4,2-300 К. Відповідні залежності для НК Si-Ge з концентрацією домішки 10^{18} см^{-3} наведені на рис.1. Як видно, температурний хід електропровідності для вільних і деформованих зразків незначно відрізняється в температурній області 50-300 К, в той час як в низькотемпературному інтервалі 4,2-50 К виявлена істотна різниця. Така специфічна поведінка в області низьких температур пов'язана з наявністю стрибкової

провідності по домішковій зоні, яка має місце в сильно легованих кристалах.

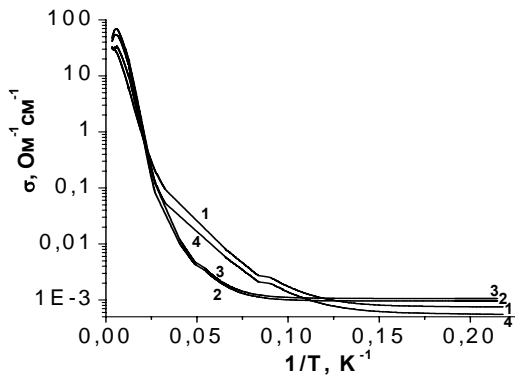


Рис. 1. Температурна залежність електропровідності НК Si-Ge при різних рівнях деформації: 1 – $\varepsilon = 0$; 2 – $\varepsilon = -3,81 \cdot 10^{-3}$ відн.од, 3 – $\varepsilon = -4,3 \cdot 10^{-3}$ відн.од, 4 – $\varepsilon = +4,3 \cdot 10^{-4}$ відн.од,

З температурних залежностей електропровідності визначені енергії активації стрибкової провідності легованих НК Si-Ge для різного інтервалу температур. В області 20-40 К провідність здійснюється по локалізованих станах верхньої зони Хаббарда з енергією активації ε_2 . В інтервалі 4,2-10 К провідність носіїв має місце по нижній зоні Хаббарда з енергією активації ε_3 . Для НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) з концентрацією домішки 10^{18} см^{-3} величини енергій активації стрибкової провідності становлять: $\varepsilon_2 = 3,6 \text{ меВ}$ та $\approx 5 \text{ меВ}$; $\varepsilon_3 = 0,1$ та $0,2 \text{ меВ}$ для вільних та деформованих ($\varepsilon \approx -3,8 \cdot 10^{-3}$ відн.од.) зразків, відповідно.

На практиці для визначення рівня деформації ширше використовується зміна вимірювального параметру – опору кристалів. Тобто при прикладенні до НК деформації в інтервалі температур 50-300 К спостерігається класичний, а в області низьких температур – “некласичний” п’єзорезистивний ефект [1]. Величину цього ефекту можна оцінити за коефіцієнтом тензочутливості K:

$$K = (R_\varepsilon - R) / R_\varepsilon \quad (1)$$

де R_ε і R – опір деформованого та вільного кристалу, відповідно. Для класичного п’єзорезистивного ефекту зміна опору від деформації є практично лінійною, тому величина K не залежить від деформації і в залежності від ступеня легування змінюється від 100 до 150. Для “некласичного” п’єзорезистивного ефекту, що спостерігається в області низьких температур, опір нелінійно змінюється з деформацією (як правило така залежність є експоненційною [5]). Тому коефіцієнт тензочутливості є функцією рівня деформації. Крім того, він сильно (на декілька порядків більше, ніж у випадку класичного п’єзоэффекту) залежить від рівня легування зразків. Наприклад, при заданій деформації стиску $\varepsilon \approx -3,8 \cdot 10^{-3}$ відн.од. при збільшенні концентрації легуючої домішки від 10^{18} см^{-3} до $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ коефіцієнт тензочутливості

збільшується від 1000 до 30000.

Особливо цікавими є зразки $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$), у

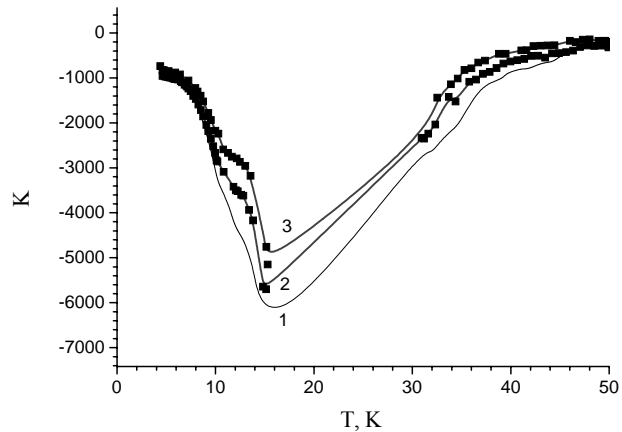


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості НК Si-Ge при різних рівнях деформації: 1 – $\varepsilon = -3,03 \cdot 10^{-3}$ відн.од.; 2 – $\varepsilon = -3,81 \cdot 10^{-3}$ відн.од.; 3 – $\varepsilon = -4,37 \cdot 10^{-3}$ відн.од.

яких домішковий рівень починає вироджуватися в домішкову зону. Для НК Si-Ge це зразки з концентрацією $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості таких НК наведена на рис. 2. Як видно з рисунка, це крива з максимумом, який припадає на температурний інтервал 15-17 К. Для з’ясування локальних станів носіїв заряду, які відповідають за даний тип провідності, була досліджена поведінка магнітоопору таких НК.

Необхідно зазначити, що магнітоопір НК Si-Ge з концентрацією домішки поблизу ПМД з діелектричного боку переходу в основному залежить від магнітного поля квадратично [2]. Однак, для зразків з концентрацією $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ польова залежність магнітоопору суттєво відрізняється від типової. Така залежність наведена на рис. 3. Як видно з рисунка, в інтервалі магнітних полів 0,5–13 Тл спостерігається від’ємний магнітопір (ВМО). Максимальне значення ВМО припадає на діапазон магнітного поля 7-8 Тл і становить $\approx 3 \%$. Така специфічна поведінка магнітоопору проявляється в температурному інтервалі 10-20 К, тобто в тому ж інтервалі, де спостерігається зростання коефіцієнта

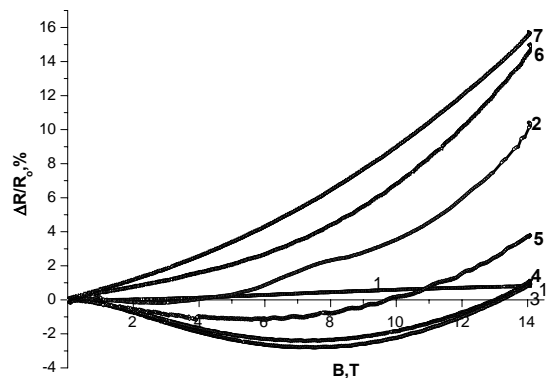


Рис. 3. Польова залежність магнітоопору НК Si-Ge при фіксованих температурах: 1 – 4,2 К; 2 – 11,4 К; 3 – 16,4 К; 4 – 20,6 К; 5 – 28,5 К; 6 – 33,5 К; 7 – 37,1 К.

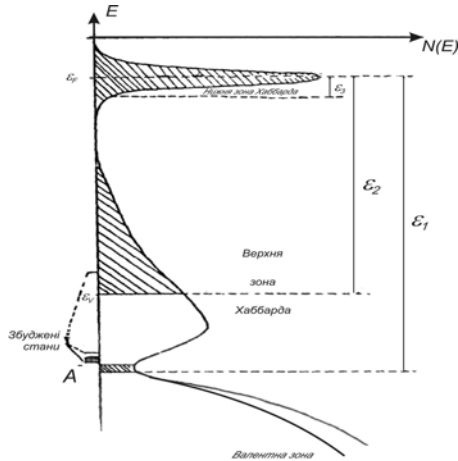


Рис. 4. Діаграма енергетичних рівнів НК Si-Ge р-типу провідності.

тензочутливості (рис.2). Отже, можна припустити, що причиною обох ефектів – гігантського п'єзоопору та ВМО – є провідність по однакових станах домішкової зони. У роботі [6] також спостерігався ВМО у легованих напівпровідникових кристалах, який пов'язувався з провідністю по делокалізованих станах A^- верхньої зони Хаббарда. Можна припустити, що в нашому випадку також має місце провідність по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда. Тоді, враховуючи енергію термічної активації $kT \approx 1,4$ меВ, яка відповідає максимуму коефіцієнта тензочутливості та ВМО, енергія активації цієї провідності $\varepsilon_2^d = 1,4$ меВ. Виходячи з такого припущення, можна побудувати діаграму енергетичних рівнів сильно легованих НК Si-Ge (рис. 4).

На рис. 5 наведена експериментально виміряна температурна залежність магнітоопору НК Si-Ge з концентрацією $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На цій залежності можна виділити три екстремуми: два максимуми при температурах 8 К і 25 К та мінімум при $T = 15$ К. Екстремуми залежності рис. 5 відповідають провідності по відповідних станах верхньої та нижньої зон Хаббарда (рис. 4): 8 К – провідності по нижній зоні Хаббарда з енергією активації ε_3 ; 25 К – провідності по локалізованих станах верхньої зони Хаббарда з енергією активації ε_2 ; 15 К – провідності по делокалізованих станах A^- верхньої зони Хаббарда з енергією активації ε_2^d . Таким чином, запропонована модель енергетичної структури домішкової зони легованих НК Si-Ge (рис. 4) виявилася вірною.

Відкритим залишається питання впливу складу твердого розчину на характер енергетичних рівнів у домішковій зоні. Ми досліджували поведінку електропровідності та магнітоопору НК Si-Ge з обмеженим вмістом германію 1 – 5 %. Необхідно зазначити, що в межах досліджуваних складів характер температурних залежностей електропровідності та магнітоопору, а відповідно і структура енергетичних рівнів домішкової зони істотно не змінювалися. Однак, слід відзначити скачкоподібну зміну відповідних залежностей при

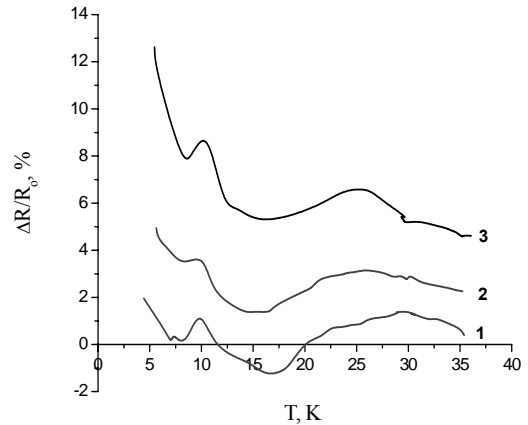


Рис. 5. Температурна залежність магнітоопору НК Si-Ge при фіксованих магнітних полях: 1 – 4 Тл; 2 – 7 Тл; 3 – 10 Тл.

переході від Si до твердого розчину $\text{Si}_{0,99}\text{Ge}_{0,01}$: явище ВМО спостерігається лише в НК твердого розчину і зовсім нехарактерне для НК Si. Очевидно у кристалах чистого кремнію усі носії заряду є строго локалізовані, ймовірність заповнення делокалізованих станів є дуже низькою, тому ВМО не спостерігається. Уведені у кристал атоми германію, які можуть з рівною ймовірністю займати одну з чотирьох можливих позицій в елементарній комірниці при заміщенні атома кремнію, приводять до часткового розупорядкування ґратки. В результаті різко зростає ймовірність делокалізації носіїв заряду. Делокалізовані носії взаємодіють між собою. Наслідком такої взаємодії може бути виникнення магнітного впорядкування пар носіїв (ефект Кондо) та зростання їх провідності в орієнтованому магнітному полі (явище ВМО).

Висновки

Проведені дослідження впливу деформації та магнітного поля на поведінку електропровідності легованих ниткоподібних кристалів твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,05$) при низьких температурах.

Показано, що особливості неklasичного п'єзоопору (пов'язаного з наявністю стрибкової провідності по домішковій зоні) проявляються в температурному інтервалі 4,2-50 К. Виявлені специфічні особливості провідності у зразках з концентрацією домішки $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, у яких домішковий рівень вироджується в домішкову зону. Зокрема, у температурній залежності коефіцієнта тензочутливості виявлений максимум при $T = 15-18$ К. Дослідження провідності НК в магнітному полі також вказують на специфічну поведінку магнітоопору в температурному інтервалі 10-20 К – спостерігається явище ВМО. Максимальне значення ВМО припадає на діапазон магнітного поля 7-8 Тл і становить ≈ 3 %.

Встановлені ефекти пояснюються особливостями стрибкової провідності по делокалізованих станах

верхньої зони Хаббарда в легованих напівпровідникових кристалах Si-Ge.

Дружинін А.О. – д.т.н., проф., зав. кафедри НПЕ НУ „Львівська політехніка”;
Островський І.П. – к.ф.-м.н., доцент кафедри „Телекомунікацій” НУ „Львівська політехніка”;
Лях-Кагуй Н.С. – к.т.н., м.н.с. НДЦ “Кристал”, кафедри НПЕ НУ „Львівська політехніка”.
Когут Ю.Р. – аспірант кафедри НПЕ НУ „Львівська політехніка”

- [1] A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, N.S. Liakh. Study of piezoresistance in $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ whiskers for sensor application // *Mater. Sci. Semicond. Process*, **8**(1-3), pp. 193-196 (2005).
- [2] А.О. Дружинін, І.П. Островський, Н.С. Лях. Провідність і магнітоопір ниткоподібних кристалів Si-Ge в області переходу метал-діелектрик // *Вісник НУ “ЛП” “Електроніка*, **454**, с. 3-7 (2002).
- [3] А.А. Дружинин, И.П. Островский, С.М. Матвиенко, Ю.Р. Когут. Датчик для измерения криогенных температур на основе нитевидных кристаллов Si-Ge // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **1**(55), с. 26-27 (2005).
- [4] V.A. Voronin, I.I. Maryamova, A.S. Ostrovskaya, Morphology and structure especialities of semiconductor whiskers grown by CVD-method // *Cryst. Prop. and Prepar.*, **340**, с. 36-38 (1991).
- [5] А.О. Дружинін, І.П. Островський, Н.С. Лях, С.М. Матвієнко. Деформаційно-стимульовані ефекти у ниткоподібних кристалах твердого розчину Ge-Si // *Вісник НУ “ЛП” “Електроніка”*, **482**, с. 105-111 (2003).
- [6] Ф.М. Исмаилова, Л.Б. Литвак-Горская, Г.Я. Луговая, И.Е. Трофимов. Особенности отрицательного магнитосопротивления при проводимости по верхней зоне Хаббарда в p-Si // *Физика и техника полупроводников*, **25**(2), с. 255-261 (1991).

A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, N.S. Liakh-Kaguj, Yu.R. Kogut

Conductance Behaviour of Si-Ge Whiskers in the Fields of Effective External Influence

National university “Lvivska polytechnika”, Sci.-Research Center “Crystal”, Kotlyarevsky street 1, Lviv, Ukraine, 79013, Phone: 38 0322 721632, E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Influence of strain and magnetic fields on conductance behaviour in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,05$) solid solution whiskers with boron concentration $(1-4) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at low temperatures 4,2-50 K were investigated. Negative magnetoresistance and maximum of gauge factor were observed in the whiskers at temperatures $T = 15-18 \text{ K}$. These effects were explained by peculiarities of hopping conductance on delocalized states of upper Hubbard band.