

А.О. Дружинін, І.П. Островський, Н.С. Лях

Магнітоопір ниткоподібних кристалів Ge-Si

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

Досліджено поведінку магнітоопору в діапазоні полів 0÷14 Тл, а також вплив температури та деформації на величину і характер від'ємного магнітного опору (ВМО) в ниткоподібних кристалах твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 0,01-0,05$) р-типу провідності, легованих бором до концентрацій, що відповідають близькості до переходу метал-діелектрик. Встановлено, що магнітоопір істотно залежить від рівня легування та деформації зразків в області низьких температур і описується теорією квантових поправок. У слабких магнітних полях в температурному діапазоні 7÷10 К виявлено ВМО, який зумовлений провідністю по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, перехід метал-діелектрик, магнітоопір, енергія активації, коефіцієнт тензочутливості.

Стаття постуила до редакції 19.05.2003; прийнята до друку 23.08.2003

I. Вступ

Провідність легованих напівпровідників і вплив магнітного поля на явища переносу широко досліджені у роботах [1-3]. У таких кристалах виявлено явище ВМО в області слабких магнітних полів до 3 Тл. Зокрема, в роботі [4] досліджувався ВМО та вплив температури на його величину і область існування в магнітному полі (0÷0,8 Тл) для сильно легованого n-Ge. Більшість досліджень магнітоопору легованих напівпровідників обмежується металевою чи діелектричною стороною переходу метал-діелектрик (ПМД). Однак, в роботі [5] досліджено ВМО з обох боків ПМД, а також описано вплив ступеня легування на зміну знаку магнітоопору у полях вище 1 Тл.

Виникнення ВМО у зразках з металевим типом провідності пояснюється теорією квантових поправок [5]. На діелектричному боці ПМД це явище описується теорією слабкої локалізації [4], а у роботі [6] як альтернатива слабкої локалізації для пояснення виникнення ВМО пропонується кінетична теорія магнітоопору для зразків, легованих до концентрацій, що відповідають як діелектричному, так і металевому боку ПМД. Однак, на сьогоднішній день не існує єдиного пояснення щодо виникнення явища ВМО.

Метою нашої роботи є дослідження впливу температури та деформації на поведінку магнітоопору та виникнення ВМО у ниткоподібних кристалах (НК) твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ р-типу провідності, легованих до концентрацій, що відповідають обом сторонам ПМД.

II. Методика експерименту

НК Ge-Si вирощували методом хімічних транспортних реакцій в закритій бромідній з використанням золота як ініціатора росту. Концентрацію Ge в шихті змінювали від 1 до 5 мол.%. Вміст Ge у кристалах контролювався за допомогою методу мікрозондового аналізу. Встановлено, що молярний вміст Ge у вирощених НК $x = 0,01\pm 0,05$. Для досліджень вибиралися НК з діаметрами 20÷50 мкм.

Вимірювання залежності магнітоопору від магнітного поля (0÷14 Тл) проводились при фіксованих температурах в області 4,2÷30 К. Дослідження впливу рівня деформації на характер магнітоопору в інтервалі магнітних полів з індукцією:

0÷14 Тл - для слабких рівнів деформації в діапазоні $+4\cdot 10^{-4} \div -4\cdot 10^{-3}$;

0÷3 Тл - для високих рівнів деформації - $\pm 1,4\cdot 10^{-2}$ здійснювалося при температурі 4,2 К.

Деформація зразків обох знаків, як стиску, так і розтягу, створювалась в напрямку росту кристалів <111> двома способами:

– з допомогою консольної балки, виготовленої з інварного сплаву ($\pm 1,4\cdot 10^{-2}$). За допомогою спеціального пристрою балка піддавалась деформації згину, а закріплені на ній зразки – деформації стиску і розтягу;

– за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення (КТР) твердого розчину Ge-Si та матеріалу підкладок (Al, Cu, кварц), на яких

закріплювалися зразки НК, при охолодженні до температури рідкого гелію 4,2 К ($+4 \cdot 10^{-4} \div -4 \cdot 10^{-3}$).

III. Результати експерименту

Для проведення експериментів було відібрано ряд партій НК, легованих бором до концентрацій $N_a = 10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$, що відповідають близькості до переходу метал-діелектрик (ПМД) ($N_c = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), оскільки в цьому концентраційному діапазоні спостерігається зміна провідності та пов'язані з нею цікаві ефекти п'єзо- [7] та магнітоопору. Можна виділити чотири основні чинники, котрі істотно впливають на магнітоопір НК твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$: 1) температура; 2) рівень легування; 3) деформація; 4) вміст германію.

Проаналізуємо вплив кожного з перелічених чинників на магнітоопір НК.

3.1. Вплив температури

Для вивчення впливу температури на поведінку магнітоопору досліджували залежності магнітоопору $\Delta R (B)/R$ від магнітного поля B , одержані при фіксованих температурах в інтервалі магнітних полів з індукцією 0÷14 Тл у зразках з різною концентрацією легуючих домішок, як з металевого – $\rho = 0,008 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 1), так і з діелектричного боку ПМД – $\rho = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 2), $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 3).

Як видно з рис. 1 – 3, в сильних магнітних полях (14 Тл) величина магнітоопору зменшується при збільшенні температури, а у слабких магнітних полях (до 2 Тл) у певній температурній області спостерігається від'ємний магнітоопір (ВМО). Цікавою особливістю зразків є відсутність ВМО при температурі рідкого гелію і його поява при вищих температурах у вузькому діапазоні (7÷10 К). Для зразків із металевим типом провідності (рис. 1) область спостереження ВМО досягає температури 10 К, тоді як для діелектричних зразків ВМО існує лише у діапазоні 7÷8 К (рис. 2, 3).

3.2. Вплив рівня легування

Встановлено, що рівень легування істотно впливає на величину магнітоопору. Для металевих зразків з $\rho = 0,008 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при температурі 4,2 К у магнітному полі з індукцією 14 Тл магнітоопір становить ~ 6 % (рис. 1). У зразках з діелектричного боку ПМД з $\rho = 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ величина магнітоопору становить ~ 30 %. В міру віддалення від ПМД з діелектричного боку (при збільшенні питомого опору зразків від 0,01 Ом·см до 0,025 Ом·см) магнітоопір НК зростає, досягає максимального значення $\Delta R (B)/R = 70 \%$ при рівні легування, що відповідає зразкам з $\rho = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 2), а далі зменшується: $\Delta R (B)/R = 50 \%$ для зразків з $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 3), а у кристалах з $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ магнітоопір прямує до нуля (рис. 4, 5).

Аналогічно, при зміні ступеня легування змінюється як величина ВМО, так і діапазон його існування у магнітному полі. Так для зразків з $\rho = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 2) спостерігаються максимальні значення магнітоопору ~ 1 %, а область його існування досягає 2,5 Тл.

При зміні ступеня легування відбувається зміна характеру залежності магнітоопору від магнітного поля. У металевих зразках спостерігається експоненційний характер зміни магнітоопору з полем. У НК твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ з ізолюючого боку ПМД із низьким рівнем легування виявлений квадратичний закон зміни магнітоопору з полем.

3.3. Вплив деформації

Як ми вже зазначали вище для зразків з $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 4, 5) магнітоопір практично рівний нулю. У таких НК досліджувався вплив на магнітоопір слабких деформацій ($+4 \cdot 10^{-4} \div -4 \cdot 10^{-3}$), створених за рахунок різниці КТР твердого розчину Ge-Si та матеріалу підкладок (Cu, кварц), на яких закріплювалися зразки при охолодженні до температури рідкого гелію 4,2 К. Як видно з рис. 4, при 4,2 К ВМО у вільних зразках відсутній, а деформація як стиску (мідна підкладка, крива 1, $\epsilon = 3,8 \cdot 10^{-3}$ в.о.), так і розтягу (кварцова підкладка, крива 2, $\epsilon = 4,7 \cdot 10^{-4}$ в.о.) приводить до появи ВМО. Варто зауважити, що при деформації розтягу спостерігаються значно вищі значення ВМО, а також збільшується область його існування в магнітному полі.

Також досліджувався вплив високих рівнів деформації, створених балкою виготовленої з інварного сплаву ($\pm 1,4 \cdot 10^{-2}$) на характер зміни магнітоопору з полем. Деформація стиску у зразках, закріплених на такій балці з концентрацією домішки близькою до ПМД з ізоляторного боку з $\rho = 0,011 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 6), приводить до появи ВМО при температурі 4,2 К у діапазоні магнітних полів до 2 Тл. Величина ВМО зростає до 2 % (рис. 6) при збільшенні рівня деформації. У цих зразках при високих рівнях деформації ($1,08 \cdot 10^{-2} \div 1,4 \cdot 10^{-2}$) характер магнітоопору різко відрізняється: в області слабких полів $< 0,01$ Тл спостерігається різкий стрибок магнітоопору (висота стрибка становить 0,5-2 %).

Порівнявши рис. 2, б (крива 2, $T = 8,5 \text{ К}$) та рис. 6 (крива 4, $\epsilon_4 = 8,8 \cdot 10^{-3}$ в.о.), можна константувати, що температура та деформація створюють подібний вплив на характер зміни ВМО у слабких магнітних полях (0 ÷ 3 Тл).

3.4. Вплив вмісту германію

Порівняння залежностей магнітоопору від поля у зразках з однаковим рівнем легування $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і різним вмістом германію ($x = 0,03$ для п.376 та $x = 0,05$ для п.2) дозволяє дослідити залежність поведінки магнітоопору від вмісту германію (рис. 4, 5). Як видно з цих рисунків, при збільшенні вмісту германію величина ВМО зростає. Також дещо збільшується область існування ВМО.

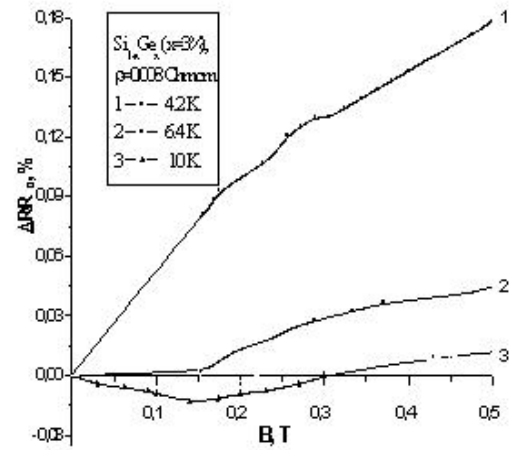
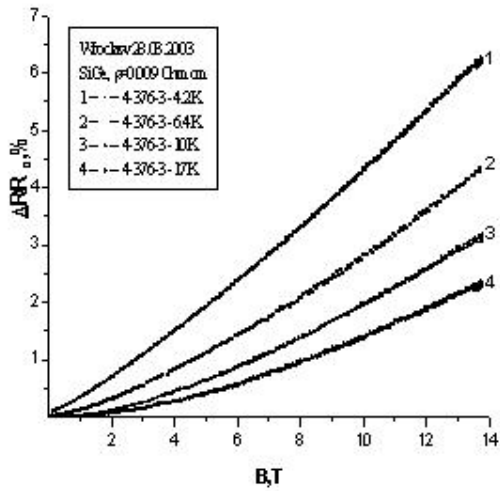


Рис. 1. Залежності магнітоопору НК Ge_xSi_{1-x} ($x=3\%$, $\rho=0,008$ Ом·см від магнітного поля при різних температурах: а) – сильні магнітні поля; б) – слабкі магнітні поля.

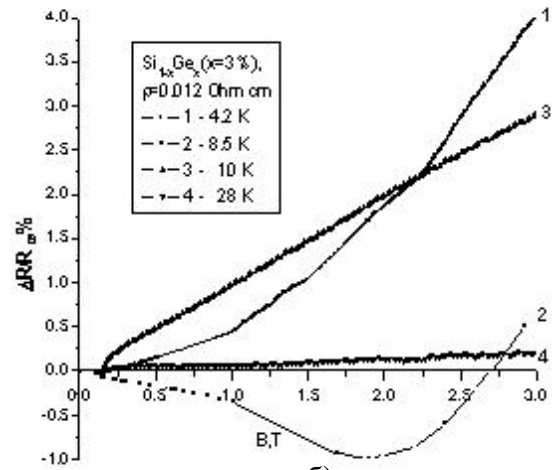
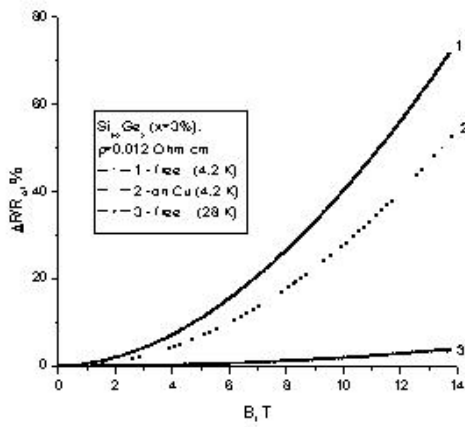


Рис. 2. Залежності магнітоопору НК Ge_xSi_{1-x} ($x = 3\%$, $\rho = 0,012$ Ом·см від магнітного поля при різних температурах: а) – сильні магнітні поля; б) – слабкі магнітні поля.

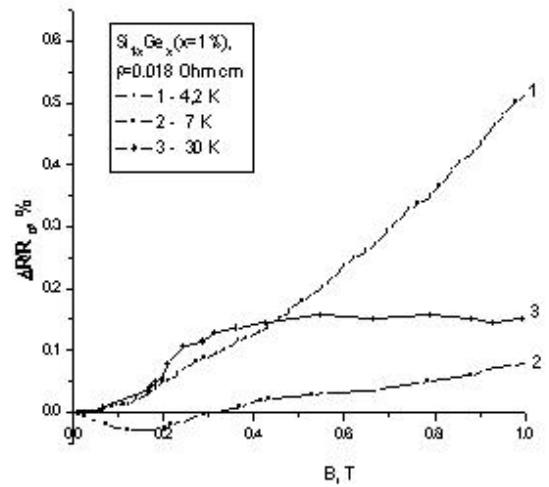
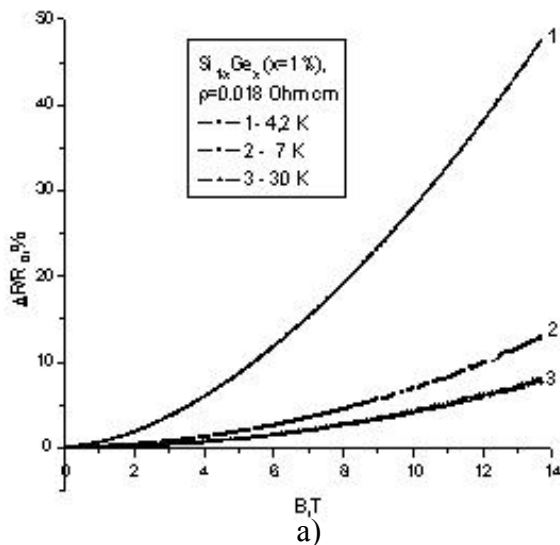


Рис. 3. Залежності магнітоопору НК Ge_xSi_{1-x} ($x = 1\%$, $\rho = 0,018$ Ом·см від магнітного поля при різних температурах: а) – сильні магнітні поля; б) – слабкі магнітні поля.

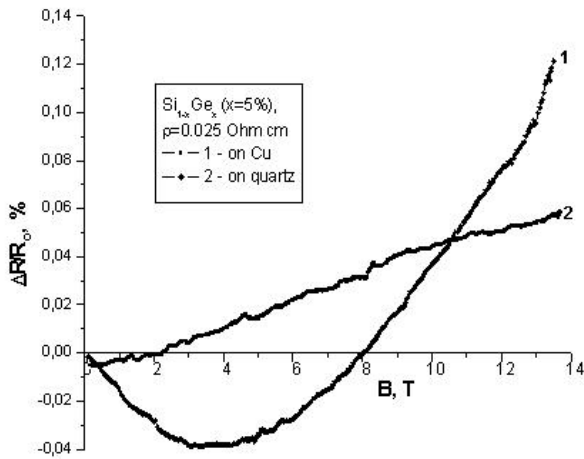


Рис. 4. Залежності магнітоопору НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 5\%$), $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ від магнітного поля при 4,2 К при різних рівнях деформації: мідна підкладка, крива 1, $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ в.о.; кварцова підкладка, крива 2, $\epsilon = +4,7 \cdot 10^{-4}$ в.о.

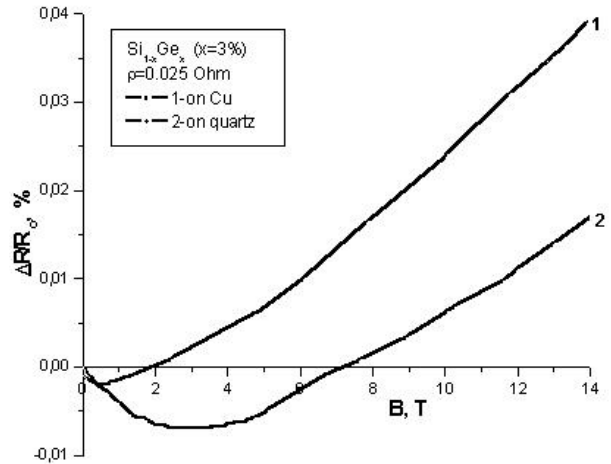


Рис. 5. Залежності магнітоопору НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 3\%$), $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ від магнітного поля при 4,2 К при різних рівнях деформації: мідна підкладка, крива 1, $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ в.о.; кварцова підкладка, крива 2, $\epsilon = +4,7 \cdot 10^{-4}$ в.о.

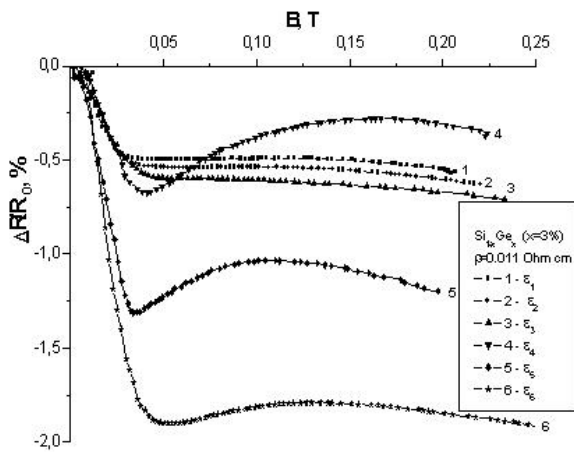


Рис. 6. Залежності магнітоопору НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 3\%$), $\rho = 0,011 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ від магнітного поля при 4,2 К при високих рівнях деформації стиску, створених інварною балкою: 1 – $\epsilon = 5,8 \cdot 10^{-3}$; 2 – $5,95 \cdot 10^{-3}$; 3 – $8,79 \cdot 10^{-3}$; 4 – $1,08 \cdot 10^{-2}$; 5 – $1,26 \cdot 10^{-2}$; 6 – $1,4 \cdot 10^{-2}$

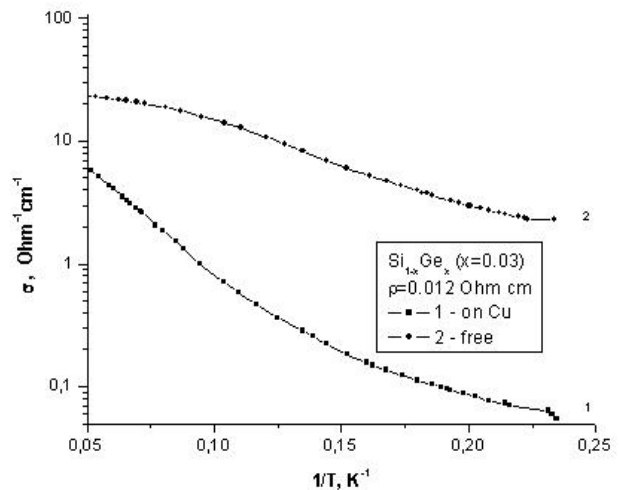


Рис. 7. Температурна залежність електропровідності НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 3\%$), $\rho = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ для вільного та деформованого мідною підкладкою зразків.

IV. Обговорення результатів

Залежність магнітоопору від температури можна пояснити в рамках теорії квантових поправок. Згідно з цією моделлю

$$\frac{\Delta R}{R} \approx T^{-\alpha}, \quad (1)$$

де $\alpha = 3/2$ [5]. Наші експериментальні результати (рис. 1, 2, 3) дають значення $\alpha = 1,35$ в діапазоні сильних магнітних полів. Тобто, спостерігається задовільна кореляція теорії та експерименту. Однак,

теорія квантових поправок виявилася зовсім не придатною для пояснення залежності $\Delta R/R = f(T)$ в області слабких магнітних полів. Це особливо чітко проявляється при аналізі температурної поведінки ВМО. Цікавою особливістю виявлених нами температурних залежностей є відсутність ВМО при $T = 4,2 \text{ К}$ і його існування при вищих температурах ($7 \div 10 \text{ К}$) (рис. 1, 2, 3). Натомість більшість літературних даних свідчить про те, що величина ВМО повинна зростати при зниженні температури [5].

Для аналізу одержаних результатів ми дослідили температурні залежності провідності в

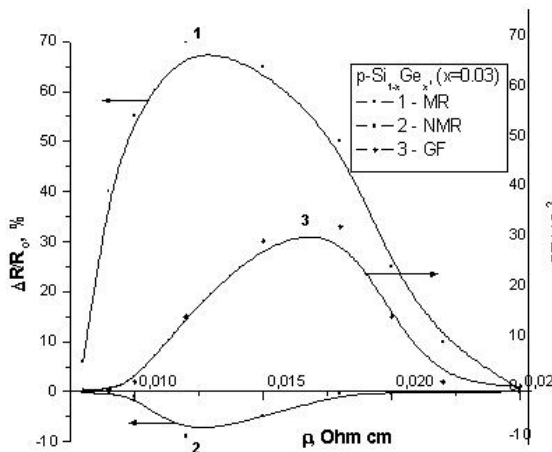


Рис. 8. Залежності параметрів НК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 3\%$) від їх питомого опору: 1 – магнітоопір; 2 – ВМО (значення ВМО збільшені в 10 раз); 3 – коефіцієнт тензочутливості.

експериментальних зразках в області температур $4,2 \pm 30$ К. Типова залежність $\sigma = f(1/T)$ наведена на рис. 7 для НК з $\rho = 0,012$ Ом·см. На цій залежності спостерігаються два характерні нахили, з яких були визначені енергії активації стрибкової провідності 1,4 меВ та 0,56 меВ, що відповідають ε_2' – провідності по локалізованих та ε_2'' – провідності по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда, відповідно. Як видно з рис. 7, при температурі 10 К спостерігається різкий перехід від стрибкової провідності з енергією активації ε_2' до провідності ε_2'' . В той же час температура 10 К є критичною для існування ВМО (див. рис. 2). При температурах вищих 10 К ВМО зникає. ВМО також не спостерігається при 4,2 К. В цій температурній області електропровідність практично не залежить від температури (рис. 7). Очевидно, при цих температурах спостерігається область насичення стрибкової провідності по нижній зоні Хаббарда ε_3 , яка, як правило, проявляється у цих кристалах при нижчих температурах. Таким чином, область існування ВМО відповідає стрибковій провідності дірок ε_2'' по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда. Таким типом провідності пояснюється поява ВМО у зразках n-Ge [2]. Тобто, наші результати добре узгоджуються з відомими літературними даними.

Цікавою особливістю поведінки магнітоопору НК є залежність його величини при $T = 4,2$ К, $B = 14$ Тл від рівня легування. Як показали проведені експерименти, ця залежність має максимум у зразках з $\rho = 0,012$ Ом·см. (рис. 8). На цьому ж рисунку наведені залежності величини ВМО від питомого опору зразків у збільшеному масштабі. У роботі [5] для кристалів Ge:As у слабких магнітних полях (до 3 Тл) виявлений ВМО, який мав високі значення для зразків з металевим ходом провідності і дуже низькі – для зразків з напівпровідниковим ходом провідності. Ми спостерігаємо максимальні значення

ВМО (до 1 %) для діелектричних зразків (рис. 8), тоді як у металевих зразках величина ВМО набагато нижча.

Варто порівняти одержані залежності магнітоопору від рівня легування з відповідними залежностями інших параметрів НК, зокрема коефіцієнта тензочутливості [8] (ця залежність також наведена на рис. 8.). З рис. 8 видно, що практично всі параметри НК мають екстремуми при рівні легування, що відповідає зразкам з $\rho = 0,012$ – $0,016$ Ом·см. Встановлено, що деформація істотно впливає на магнітоопір сильно легуваних НК. Заслугує уваги поява стрибка ВМО (0,5-2 %) у слабких магнітних полях (до 0,01 Тл) при високих рівнях деформації НК з $\rho = 0,011$ Ом·см (рис. 6). Подібний стрибок магнітоопору спостерігали автори роботи [1] у зразках n-Ge. Аналіз експериментальних даних (рис. 6) показав, що висота стрибка ВМО експоненційно зростає при збільшенні рівня деформації. Наявність стрибка ВМО в ниткоподібних кристалах, на нашу думку, вказує на феромагнітне впорядкування спінів в умовах слабкої локалізації носіїв на іонах домішки.

V. Висновки

Досліджено вплив температури та деформації на поведінку магнітоопору та виникнення ВМО в ниткоподібних кристалах твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ р-типу провідності, легуваних до концентрацій, що відповідають як металевому, так і діелектричному боку ПМД.

Встановлено, що величина магнітоопору істотно залежить від рівня легування зразків. Магнітоопір зростає при переході від металевих (3-6 %) до діелектричних зразків (30-70 %). В міру віддалення від ПМД з діелектричного боку (при збільшенні питомого опору зразків від 0,01 Ом·см до 0,025 Ом·см) магнітоопір НК зростає, досягає максимального значення $\Delta R(B)/R = 70$ % при рівні легування, що відповідає зразкам з $\rho = 0,012$ Ом·см, а далі зменшується: $\Delta R(B)/R = 50$ % для зразків з $\rho = 0,018$ Ом·см, а у кристалах з $\rho = 0,025$ Ом·см магнітоопір прямує до нуля. Цікавою особливістю досліджуваних кристалів є те, що практично всі параметри НК – магнітоопір, ВМО, коефіцієнт тензочутливості – мають екстремуми при рівні легування, що відповідає зразкам з $\rho = 0,012$ – $0,016$ Ом·см.

Підвищення температури від 4,2 до 30 К, з одного боку, приводить до зменшення магнітоопору у сильних магнітних полях за законом $\frac{\Delta R}{R} \approx T^{-\alpha}$,

$\alpha = 1, 3$, що задовільно узгоджується з теорією квантових поправок. З другого боку, у слабких магнітних полях спостерігається поява ВМО в температурній області 7-10 К. Аналіз температурної залежності електропровідності НК показав, що область існування ВМО відповідає стрибковій

провідності по делокалізованих станах верхньої зони Хаббарда.

Встановлено також, що деформація істотно впливає на магнітоопір сильно легованих НК: спостерігається поява стрибка ВМО (0,5-2 %) у слабких магнітних полях (до 0,01 Тл) при високих рівнях деформації НК з $\rho = 0,011$ Ом·см. Наявність стрибка ВМО в ниткоподібних кристалах Si-Ge, на нашу думку, вказує на феромагнітне впорядкування спінів в умовах слабкої локалізації носіїв на іонах домішки.

Дружинін А.О. – д.т.н., професор кафедри напівпровідникової електроніки НУ “Львівська політехніка”, завідувач лабораторією сенсорної електроніки НДЦ “Кристал”;

Островський І.П. – к.ф.м.н., доцент каф. напівпровідникової електроніки НУ “Львівська політехніка”;

Лях Н.С. – аспірант каф. напівпровідникової електроніки НУ “Львівська політехніка”.

- [1] А.Г. Андреев, С.В. Егоров, А.Г. Забродский, Р.В. Парфеньев и др. Гистерезис магнитосопротивления нейтронно-легированного Ge в области прыжкового транспорта по состоянию кулоновской щели // *ФТП*, **34**(7), сс. 796-802 (2000).
- [2] И.Е. Трофимов, А.И. Денин, В.П. Мурзин. *Магнетосопротивление по D зоне*. Препринт 25, М., ФИАН (1989).
- [3] А.Н. Ионов, И.С. Шлимак, А.Л. Эфрос. Отрицательное магнитосопротивление в области прыжковой проводимости моттовского типа // *ФТП*, **17**(11), сс. 2763-2765 (1975).
- [4] Н.Г. Жданова, М.С. Каган, Е.Г. Ландсберг. Локализация электронов в невырожденном полупроводнике со случайным потенциалом заряженных примесей // *ЖЭТФ*, **117**(4), сс. 761-770 (2000).
- [5] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек. Магнитосопротивление компенсированного Ge:As на сверхвысоких частотах в области фазового перехода металл-изолятор // *ФТП*, **34**(7), сс. 774-782 (2000).
- [6] В.Э. Каминский. Кинетическая теория отрицательного магнитосопротивления как альтернатива слабой локализации в полупроводниках // *ФТП*, **36**(11), сс. 1360-1366 (2002).
- [7] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova et al. Studies of piezoresistance and piezomagneto-resistance in Si whiskers at cryogenic temperatures. // *Cryst. Res. Technol.*, **37**(2-3), pp. 243-257 (2002).
- [8] А.О. Дружинін, О.М. Лавитська, І.П. Островський, Н.С. Лях. Вплив деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів твердих розчинів Ge-Si // *Вісник НУ "Львівська політехніка" "Електроніка"*, 455, сс. 126-133 (2002).

A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, N.S. Liakh

Magneto-resistance Ge-Si Whiskers

National University “Lvivska politechnika”, Sci.-Research Center “Crystal”, 1, Kotlyarevsky Str.,
Lviv, 79013, Ukraine, Phone: 38 0322 721632, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Magneto-resistance as well as temperature and strain influence on the magnitude of negative magneto-resistance (NMR) of p-Ge_xSi_{1-x} (x = 0.01-0.05) whiskers doped with boron to concentrations closed to metal – insulator transition in magnetic fields 0-14 T were investigated. Magneto-resistance was shown to depend on doping level and strain of the whiskers at low temperatures and can be explained by Altshuler’s theory. NMR was observed in weak magnetic field at temperature range 7-10 K. It appears due to conduction on delocalized states of the Upper Hubbard Band.