

А.О.Дружинін<sup>1</sup>, І.П.Островський<sup>1</sup>, Ю.М.Ховерко<sup>1</sup>, В.М.Цмоць<sup>2</sup>, Ю.В.Павловський<sup>3</sup>,  
Н.Т.Павловська<sup>3</sup>, В.Ю.Поварчук<sup>4</sup>

## Вплив опромінення $\gamma$ -квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge

<sup>1</sup>НУ "Львівська політехніка, вул. Котляревського, 1, Львів, 79013  
тел. (0322) 721632, e-mail: [druzh@polynet.lviv.ua](mailto:druzh@polynet.lviv.ua)

<sup>2</sup>Дрогобицький ДПУ імені Івана Франка, Дрогобич

<sup>3</sup>Інститут ядерної фізики НАН України, Київ

<sup>4</sup>Інститут фізики НАН України, Київ

Вивчено вплив магнетного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення  $\gamma$ -квантами (випромінювання  $^{60}\text{Co}$ ) з дозами до  $2,63 \times 10^{17}$   $\gamma$ -кв/см<sup>2</sup> на електропровідність НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) з питомим опором  $\rho = 0,08 \div 0,025$  Ом $\times$ см в інтервалі температур 4,2  $\div$  300 К. Встановлено, що опір кристалів слабо змінюється в процесі опромінення, тоді як спостерігаються істотні зміни магнетопору. Показано, що виявлені зміни магнетопору пов'язані з виникненням дефектів у процесі опромінення, які зумовлюють делокалізацією носіїв заряду у домішковій зоні кристалу.

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали,  $\gamma$ -кванти, магнетоопір, кремній-германій.

*Стаття постуила до редакції 01.06.2009; прийнята до друку 15.12.2009.*

### Вступ

Ниткоподібні кристали (НК) твердого розчину Si-Ge широко використовуються для створення сенсорів механічних та теплових величин, дієдатних в екстремальних умовах експлуатації (низькі температури, сильні магнетні поля, тощо) [1,2]. Крім того, твердий розчин Si-Ge володіє підвищеною радіаційною стійкістю в порівнянні з кремнієм [3]. Це відкриває перспективу створення радіаційно стійких сенсорів на основі ниткоподібних кристалів. На сьогодні існує достатньо робіт, присвячених впливу опромінення  $\gamma$ -квантами на монокристалічний кремній та твердий розчин Si-Ge; проте такі дослідження проводились, здебільшого, на високоомних монокристалах [4,5]. На відміну від них дана робота спрямована на дослідження впливу опромінення  $\gamma$ -квантами на властивості легованих ниткоподібних кристалів мікронних розмірів твердих розчинів  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  з концентрацією домішки, яка відповідає області переходу метал-діелектрик (ПМД).

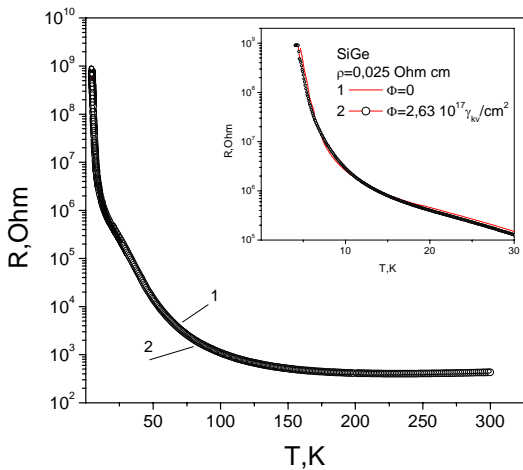
В роботі вивчено вплив магнетного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення  $\gamma$ -квантами (випромінювання  $^{60}\text{Co}$ ) з дозами до  $2,63 \times 10^{17}$   $\gamma$ -кв/см<sup>2</sup> на електропровідність НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) з питомим опором  $\rho = 0,08 \div 0,025$  Ом $\times$ см в інтервалі температур 4,2  $\div$  300К.

### I. Експериментальні результати та їх обговорення

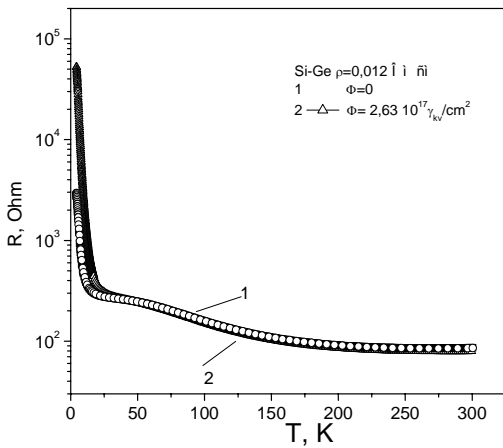
Ниткоподібні кристали Si-Ge вирощували методом хімічних транспортних реакцій в закритій бромідній системі з використанням домішок бору, золота та платини [6]. Температура зони джерела становила 1370К, температура зони кристалізації – 1070 $\div$ 1150К. Склад твердого розчину контролювався за допомогою методу мікрозондового аналізу: вміст Ge в НК становив 3 ат.%. Діаметр НК становив 40-50 мкм. Перевірка типу провідності, здійснена за знаком термо-е.р.с., показала, що всі зразки були р-типу. Досліджували кристали з концентрацією акцепторної домішки, що перекривала діапазон концентрацій як з діелектричного, так і з металевого боку ПМД ( $\rho = 0,08 \div 0,025$  Ом $\times$ см).

Вимірювалися температурні залежності (4,2  $\div$  300 К) опору НК Si-Ge та їх магнетоопір в інтервалі магнетних полів з індукцією 0  $\div$  14 Тл при температурах 4,2-30 К.

Типові температурні залежності опору вихідних та опромінених  $\gamma$ -квантами з дозою  $2,63 \times 10^{17}$   $\gamma$ -кв/см<sup>2</sup> НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  наведена на рис.1. Результати експериментальних досліджень вказують на те, що температура залежність опору кристалів не значно



а

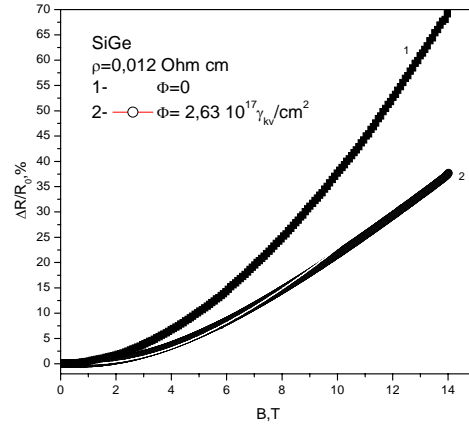


б

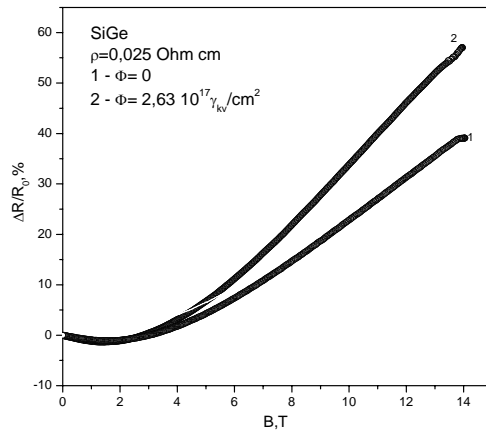
**Рис. 1.** Температурна залежність опору опроміненних  $\gamma$ -квантами НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) з питомим опором  $\rho = 0,025 \text{ Ом}\times\text{см}$  (а) та  $\rho = 0,012 \text{ Ом}\times\text{см}$  (б).

змінюється після опромінення. Ця тенденція спостерігається для кристалів з рівнем легування домішкою бору, що відповідає як металевому, так і діелектричному боку ПМД. Виняток становить зразок з концентрацією домішки поблизу переходу метал-діелектрик з  $\rho = 0,012 \text{ Ом}\times\text{см}$ , у якому після опромінення спостерігалось різке зростання опору за низьких температур (див. рис. 1б).

На основі температурних залежностей опору (рис.1) з врахуванням геометрії НК були побудовані температурні залежності провідності  $\sigma = f(1/T)$ , з яких пораховані енергії активації стрибкової ( $\varepsilon_3$  та  $\varepsilon_2$ ) та домішкової ( $\varepsilon_1$ ) провідності як для вихідних, так і для опромінених кристалів. Під  $\varepsilon_3$  та  $\varepsilon_2$  ми розуміємо енергії активації стрибків електронів у домішковій зоні між, відповідно, одно- та двократно зайнятими носіями домішковими центрами. Результати оцінок значень енергій активації провідності наведені у таблиці 1. Проведені оцінки показали, що енергії активації незначно відрізняються у вихідних та



**Рис. 2.** Магнетоопір НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) опроміненого  $\gamma$ -квантами з питомим опором  $\rho = 0,012 \text{ Ом}\times\text{см}$  за 4,2 К.



**Рис. 3.** Магнетоопір НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) опроміненого  $\gamma$ -квантами з питомим опором  $\rho = 0,025 \text{ Ом}\times\text{см}$  за 4,2 К.

опромінених кристалах.

Результати дослідження магнетоопору НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) з різним рівнем легування зображені на рис. 2 та рис. 3. З рисунків видно, що характер зміни магнетоопору у зразках, опроміненних  $\gamma$ -квантами, відрізняється в міру віддалення кристалів від ПМД. Так у зразках поблизу ПМД з питомим опором  $\rho = 0,08 \div 0,012 \text{ Ом}\times\text{см}$  магнетоопір зменшується після опромінення (див. наприклад, рис. 2). Для зразків з діелектричного боку ПМД з  $\rho = 0,018 \div 0,025 \text{ Ом}\times\text{см}$ , навпаки, магнетоопір опромінених НК зростає (рис. 3) в сильних магнетних полях, тоді як у слабких полях (до 2,5 Тл) спостерігається поява від'ємного магнетоопору.

Виявлені зміни магнетоопору в результаті опромінення у сильнолегованих мікрочастинках Si-Ge можна пояснити особливостями стрибкової провідності носіїв по домішковій зоні за низьких температур. Як видно з таблиці 1, у ниткоподібних кристалах з концентрацією домішки поблизу ПМД ( $\rho = 0,01 \div 0,012 \text{ Ом}\times\text{см}$ ) спостерігається стрибкова

Таблиця 1

Енергії активації стрибкової провідності вихідних та опромінених  $\gamma$ -квантами НК Si-Ge

$\rho$ , Ом·см	$\Phi$ , см <sup>2</sup>	$\varepsilon_3$ , меВ	$\varepsilon_2$ , меВ	$\varepsilon_1$ , меВ
0,01	0	0,8		6,6
	$2,6 \cdot 10^{17}$	0,75	–	6,8
0,012	0	0,7		7,6
	$2,6 \cdot 10^{17}$	0,8	–	7,8
0,018	0	0,5	2,7	12,2
	$2,6 \cdot 10^{17}$	0,45	2,9	12,4
0,025	0	2,1	8,0	19,5
	$2,6 \cdot 10^{17}$	2,2	8,5	20,2

провідність з енергією активації  $\varepsilon_3$ . У міру зменшення концентрації домішки (незначного віддалення від ПМД,  $\rho = 0,018 \div 0,025$  Ом·см) має місце стрибова провідність з енергіями активації  $\varepsilon_3$  та  $\varepsilon_2$ . Наявність додаткового механізму стрибкової провідності з енергіями активації  $\varepsilon_2$  зумовлює істотні зміни магнетопору в неопромінених зразках: в міру зменшення ступеня легування зразків (віддалення концентрації легуючої домішки від ПМД) польова залежність магнетопору змінюється від експоненційної до квадратичної [7]. Очевидно ці ж закономірності зміни магнетопору проявляються у кристалах під час їх опроміненні  $\gamma$ -квантами.

З отриманих результатів слідує, що в процесі опромінення у кристалах створюються нейтральні дефекти, які не вносять прямий вклад в провідність. Інакше ми спостерігали б великі зміни опору та енергій активації носіїв заряду. Однак, ймовірно припустити, що ці дефекти впливають на густину станів у домішкочій зоні, зокрема приводять до делокалізації енергетичних рівнів. Заповнення делокалізованих станів у домішкочій зоні може приводити до утворенням діркових пар внаслідок антиферромагнітної обмінної взаємодії магнетних моментів носіїв заряду [8,9]. Наслідком цього може

бути 1) зменшення абсолютної величини магнетопору; та 2) виникнення явища від'ємного магнетопору (ВМО) [8,9].

Аналіз отриманих експериментальних результатів показав, що в опромінених кристалах Si-Ge:

а) із ступенем легування поблизу ПМД ( $\rho = 0,01 \div 0,012$  Ом·см) спостерігається значне зменшення абсолютної величини магнетопору;

б) з меншим ступенем легування ( $\rho = 0,018 \div 0,025$  Ом·см) в слабких полях спостерігається наявність ВМО.

Отже, виявлені зміни магнетопору в обох групах зразків добре пояснюються делокалізацією станів домішкочій зони у процесі опромінення кристалів.

## Висновки

Досліджено вплив магнетного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення  $\gamma$ -квантами (випромінювання <sup>60</sup>Co) з дозами до  $2,63 \times 10^{17}$   $\gamma$ -кв/см<sup>2</sup> на електропровідність НК Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ( $x = 0,03$ ) з питомим опором  $\rho = 0,08 \div 0,025$  Ом·см в інтервалі температур 4,2  $\div$  300 К. В залежності від рівня легування виділено дві групи зразків з відмінним характером зміни магнетопору у процесі опромінення: зменшення величини магнетопору у НК з  $\rho = 0,01 \div 0,012$  Ом·см та поява ВМО в НК з  $\rho = 0,025$  Ом·см. Показано, що виявлені зміни магнетопору пов'язані з виникненням дефектів у процесі опромінення, які зумовлюють делокалізацією носіїв заряду у домішкочій зоні кристалу.

- [1] А.А. Дружинин, И.П. Островский, С.Н. Матвиенко, А.М. Вуйцик. Многофункциональный датчик давления и температуры на основе твердых растворов SiGe // *Технология в электронной аппаратуре*, **6(60)**, сс. 24-26 (2005).
- [2] А.О. Дружинин, И.П. Островский, Ю.Р. Когут. Фізичні основи створення сенсорів низьких температур на базі ниткоподібних кристалів Si-Ge // *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, **1**, pp. 8-13 (2007).
- [3] М.Я. Бакиров. Электронные приборы на основе твердых растворов Si-Ge. - Баку: Электромаш, 1986.- 140с.
- [4] L.F. Makarenko. Do we know the energy levels of radiation defects in silicon? // *Physica B*, **308–310**, pp. 465-469 (2001).
- [5] I. Pintilie, E. Fretwurst, G. Kramberger, G. Lindstroem, Z.L. Stah. Second-order generation of point defects in highly irradiated float zone silicon—annealing studies // *Physica B*, **340–342**, pp. 578–582 (2003).
- [6] А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.М. Ховерко, Я.В. Гиж. Peculiarities of Si-Ge whisker growing by CTR method. // *Functional materials*, **12** (4), pp.738-741 (2005).
- [7] А.О. Дружинин, И.П. Островский, Н.С. Лях. Магнітоопір ниткоподібних кристалів Ge-Si. // *Фізика і хімія твердого тіла*, **4** (3), сс. 485-490 (2003).
- [8] И.Е. Трофимов, А.И. Денин, В.П. Мухин. Магнитосопротивление в D' зоне. Препринт, Москва, 1989.
- [9] А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.Р. Когут and J.K. Warchulska. Magnetoresistance and magnetic susceptibility of doped Si-Ge whiskers. // *Functional Materials*, **14**, P. 4 (2007).

A.A. Druzhinin<sup>1</sup>, I.P. Ostrovskii<sup>1</sup>, Yu.M. Khoverko<sup>1</sup>, V.M. Tsmots<sup>2</sup>, Yu.V. Pavlovskyj<sup>3</sup>,  
N.T. Pavlovska<sup>3</sup>, V.Yu. Povarchuk<sup>4</sup>

## Influence of $\gamma$ -Irradiation on Si-Ge Whiskers Properties

<sup>1</sup> Lviv National Polytechnic University, 1 Kotlyarevskii st. , 79013, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup> Drohobych pedagogic university, 24 Ivana Franka st., 82100, Drohobych, Ukraine

<sup>3</sup> Institute of Nuclear Physics, Kiev, Ukraine

<sup>4</sup> Institute of Physics, NASU, pr. Nauki, 47, Kiev, Ukraine

An influence of magnetic field (up to 14 T) and  $\gamma$ -irradiation (<sup>60</sup>Co) with dose up to  $2,63 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  on resistance of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x=0,03$ ) whiskers with  $\rho = 0,08 \div 0,025 \text{ Om} \times \text{cm}$  ( $T = 300 \text{ K}$ ) in temperature range  $4,2 \div 300 \text{ K}$  have been studied. It was shown that resistance hardly depends on irradiation, while the whisker magnetoresistance changes substantially in the vicinity to metal-isolator transition. The changes of magnetoresistance is explained by appearance of defects resulting in delocalization of charge carriers in impurity band of the whiskers.

**Key words:** whisker,  $\gamma$ -irradiation, magnetoresistance, silicon-germanium.