

А.О. Дружинін<sup>1</sup>, І.П. Островський<sup>1</sup>, Ю.М. Ховерко<sup>1</sup>, П.Г. Литовченко<sup>3</sup>,  
Н.Т. Павловська<sup>3</sup>, Ю.В. Павловський<sup>2</sup>, Р.М. Корецький<sup>1</sup>

## Вплив протонного опромінення на властивості легованих НК Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> р-типу

<sup>1</sup>Національний університет „Львівська політехніка”, Львів

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

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

Вивчено вплив протонного опромінення з енергією 6,8 MeV та дозами до  $1 \times 10^{17}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> та відпалу за температур 100 – 300 °С на електропровідність ниткоподібних кристалів Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x = 0,03) з концентрацією домішок поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі температур 4,2 – 300 К у магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Встановлено, що опромінення дозою  $5 \times 10^{15}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> практично не змінює провідності кристалів, тоді як опромінення дозою  $1 \times 10^{16}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> та відпал приводить до істотного зменшення опору та зміни магнітоопору НК Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> в інтервалі температур 4,2 – 40 К. Отримані результати пояснюються в рамках аналізу стрибкової провідності по домішкочивій зоні у кристалах.

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, протонне опромінення, магнітоопір

*Стаття постуила до редакції 23.02.2012; прийнята до друку 15.06.2012.*

### Вступ

Вивчення поведінки кристалів під дією радіаційного, зокрема протонного опромінення є цікавим з точки зору створення радіаційно стійких сенсорів [1, 2]. З іншого боку, висока досконалість структури ниткоподібних кристалів (НК) дозволяє моделювати дефекти, які утворюються у кристалах у процесі опромінення [3]. Необхідно відзначити, що вплив протонного опромінення на електрофізичні властивості НК Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> вивчався лише у роботі [4]. Однак, ці дослідження обмежені малими дозами опромінення кристалів (до  $5 \times 10^{15}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>), за яких провідність практично не змінювалася. Крім того, утворення стійкої дефектної підсистеми можливе лише за наявності високотемпературного відпалу кристалів, який не досліджувався авторами [4]. Тому метою роботи було вивчення впливу протонного опромінення з дозами до  $1 \times 10^{17}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> та відпалу за температур 100 – 300 °С на електропровідність ниткоподібних кристалів Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x = 0,03) з концентрацією домішок поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі температур 4,2 - 300 К у магнітних полях з індукцією до 14 Тл.

### I. Результати експерименту та їх обговорення

Ниткоподібні кристали Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> вирощувались з

газової фази в закритій системі у формі гексагональних призм з поздовжньою віссю в кристалографічному напрямку <111> та поперечним розміром 20 – 60 мкм. Для вивчення електропровідності НК твердого розчину Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x = 0,03) р-типу провідності за низьких температур було відібрано низку партій кристалів із концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає близькості до ПМД з діелектричного боку. Дослідження температурної залежності опору зразків проводилося в широкому інтервалі температур (4,2 ÷ 300) К із використанням установки на базі гелієвого кріостату в інтервалі магнітних полів з індукцією до 14 Тл. Опромінення зразків протонами здійснювалося в ядерному реакторі (енергія протонів 6,8 MeV). Доза опромінення оцінювалася у порівнянні з еталоном і набиралася пропорційно часу опромінення. Слід відзначити, що наведені нижче дози опромінення відповідають дозі еталону, в НК ці дози будуть дещо нижчими завдяки неповному поглинанню опромінення у зразках малого розміру.

Зразки були опромінені протонами з дозами  $5 \times 10^{13}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>,  $5 \times 10^{15}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>,  $1 \times 10^{16}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> та  $1 \times 10^{17}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>. Опромінення мінімальною дозою не викликало істотних змін опору та магнітоопору НК. Опромінення дозою  $5 \times 10^{15}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> практично не змінило вигляд залежності R(T) (рис. 1, рис. 2), однак привело до істотних змін магнітоопору (див. рис. 3, 4). Опромінення дозою  $1 \times 10^{16}$  р<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> привело до істотного зменшення опору НК Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> в інтервалі

температур 4,2 - 40 К (див. рис. 5, 6) та незначних змін магнітоопору кристалів (рис. 7). Слід відзначити, що зміни опору більше виражені за 4,2 К у зразках з більшою концентрацією вільних носіїв: опір зменшується майже у два рази в НК з питомим опором  $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (рис. 5), тоді як він зменшується лише на 10 % у кристалах з  $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (рис. 6). За вищих доз опромінення спостерігається істотне зростання опору опромінених  $\text{HKSi}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) порівняно з неопроміненими зразками (рис. 8).

На основі наведених результатів неможливо побудувати дозові залежності. Однак, можна припустити, що дози опромінення ( $\sim 1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{см}^2$ ) приводять до виникнення електрично активних радіаційних дефектів, які зумовлюють появу додаткових носіїв заряду у домішковій зоні кристалу. В результаті опір НК повинен зменшуватися. Незрозумілим у цій ситуації залишається факт виявлення більших змін опору за низьких температур в сильніше легованих кристалах (можна порівняти рис. 5 та рис. 6).

Виникнення додаткових носіїв за рахунок опромінення повинно викликати більші зміни у високоомних кристалах. Ми ж спостерігаємо протилежну картину. Тому логічно припустити, що опромінення не приводить до виникнення надлишкових носіїв заряду, а швидше сприяє перерозподілу густини станів у домішковій зоні кристалу. В результаті за цих доз опромінення утворюються збуджені атоми домішки, які одночасно захоплюють два носії заряду з антипаралельними спінами. Наслідком опромінення може бути інверсна заселеність збуджених рівнів домішки. За таких умов переважаючим типом провідності повинна бути стрибова провідність по верхній зоні Хаббарда з енергією активації  $E_2$  [5]. У цьому разі опромінення повинно привести до більших змін опору у зразках з більшою концентрацією домішок, що і спостерігається нами експериментально.

Особливості динаміки радіаційних дефектів можна дослідити, проводячи різноманітні відпали опромінених кристалів. Нижче зупинимося на аналізі відпалу зразків за температур 100 °С та 280 °С, опромінених дозою  $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ . Наведені температури відпалу, зокрема 280 °С вибирались з умови розпаду А-центрів в радіаційних кристалах. Як видно з рис. 1, 2 відсутність змін на залежностях  $R(T)$  вказує на відсутність змін концентрації електрично активних радіаційних дефектів, зумовлених опроміненням кристалів. Зміни значень магнітоопору (рис. 3, 4) свідчать про зміну густини станів у домішко вий зоні кристала за низьких температур.

В експериментах розглядалися дві серії зразків з питомим опором  $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  і  $\rho_{300\text{K}} = 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , для яких виявлена квадратична польова залежність МО (рис. 3) та від'ємний магнітоопір (ВМО) (рис. 4), відповідно. Як для одного, так і для іншого зразка відпал зменшує значення МО за 4,2 К (рис. 9 та рис. 10, відповідно),

дещо збільшує значення МО в інтервалі температур 13 - 30 К (рис. 11 та рис. 12, відповідно) та зменшує значення МО за температури 50 К (рис. 13 та рис. 14 відповідно). Тут доцільно підкреслити, що у зразках, де проявляється ВМО, в області гелієвих температур, а також за температури  $> 40 \text{ К}$  спостерігається квадратична польова залежність магнітоопору.

Квадратична залежність МО від поля пояснюється або зонною провідністю, або провідністю по локалізованих станах нижньої зони Хаббарда. Перевірити механізм провідності у кристалі за низьких температур можна за допомогою визначення енергії активації. Визначені з температурних залежностей опору (рис. 1, рис. 2) енергії активації вказують на те, що для зразка з  $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  в області низьких температур 4,2 - 40 К реалізується стрибова провідність по локалізованих станах нижньої зони Хаббарда з енергією  $E_3 = 3,5 \text{ меВ}$  тоді як для зразка з  $\rho_{300\text{K}} = 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  в інтервалі температур 4,2 - 8 К має місце стрибова провідність по нижній ( $E_3 = 0,1 \text{ меВ}$ ), а в інтервалі температур 13 - 30 К - по верхній зоні Хаббарда ( $E_2 = 3,6 \text{ меВ}$ ).

Ці результати ще раз підтверджують раніше висунуте припущення, що опромінення приводить до виникнення двічі зайнятих носіями домішкових станів, яке супроводжується зростанням провідності кристалів. Відпал зразків, в свою чергу, руйнує ці стани - на домішці залишається по одному носію. В результаті зменшується провідність по верхній зоні Хаббарда, що приводить до зростання МО та зменшення значення ВМО в інтервалі температур 13 - 30 К. З іншого боку, зростає провідність по нижній зоні Хаббарда, що веде до зменшення опору НК за 4,2 К.

Великі дози опромінення (рис. 8) приводять до створення макродефектів у кристалі, що супроводжується значним розсіюванням носіїв заряду на цих дефектах та істотним збільшенням опору кристалів. Для з'ясування природи макродефектів необхідні додаткові дослідження кристалів.

## Висновки

Досліджено вплив протонного опромінення з енергією 6,8 МеВ та дозами до  $1 \times 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$  та відпалу за температур 100 - 300 °С на електропровідність ниткоподібних кристалів  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ) з концентрацією домішок поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі температур 4,2 - 300 К у магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Встановлено, що опромінення дозою  $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$  практично не змінює провідності кристалів, однак приводить до істотних змін магнітоопору (змінюються значення як додатного, так і від'ємного магнітоопору). Опромінення дозою  $1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{см}^2$  привело до істотного зменшення опору НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в інтервалі температур 4,2 - 40 К

Для уточнення механізму провідності у кристалах за низьких температур було проведено

серію відпалів зразків за температур 100 °С та 280 °С, опромінених дозою  $5 \times 10^{15}$  p<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>. Показано, що відпал зменшує значення МО за 4,2 К, дещо збільшує значення МО в інтервалі температур 13 – 30 К та зменшує значення МО за температури 50 К.

Отримані результати добре пояснюються в рамках висунутого припущення, що опромінення

приводить до збільшення концентрації двічі зайнятих носіями домішкових станів, яке супроводжується зростанням провідності кристалів. Відпал зразків, в свою чергу, руйнує ці стани, в результаті чого зменшується провідність по верхній зоні Хаббарда, що приводить до зростання МО та зменшення значення МО в інтервалі температур 13 – 30 К.

- [1] A.A. Druzhinin, I.I. Mar'jamova, E.N. Lavitskaja, A.P. Kuttrakov. *Datchiki i sistemy* 6, 2 (2001).
- [2] Ja.I. Lepih, Ju.O. Gordienko, S.V. Dzjadevich, A.O. Druzhinin, A.A. Єvtuh, S.V. Lenkov, V.G. Mel'nik, G.O. Romanov. *Stvorennja mikroelektronnih sensoriv novogo pokolinnja dlja intelektual'nih sistem* (Astoprint, Odesa, 2010).
- [3] Lasse Vines, E.V. Monakhov, Yu. Kuznetsov, R. Kozłowski, P. Kaminski, and B.G. Svensson. *Phys. Rev. B.* 78, 085205 (2008).
- [4] A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskij, Ju.M. Hoverko, P.G. Litovchenko, N.T. Pavlovskaja, Ju.V. Pavlovskij, V.M. Cmoc', V.Ju. Povarchuk. *Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature 1-2(90)*, 10 (2011).
- [5] N.V. Agrinskaja, V.I. Kozub, T.A. Poljanskaja, A.S. Saidov. *FTP* 33(2), 161 (1999).

A.A. Druzhinin<sup>1</sup>, I.P. Ostrovskii<sup>1</sup>, Yu.M. Khoverko<sup>1</sup>, P.G. Litovchenko<sup>3</sup>,  
Yu.V. Pavlovskij<sup>2</sup>, N.T. Pavlovskaja<sup>3</sup>, R.M. Koretskyy<sup>1</sup>

## Influence of Proton 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 Physics, NASU, pr. Nauki, 47, Kiev, Ukraine

An influence of and proton irradiation with 6,8 MeV energy and dose up to  $1 \times 10^{17}$  cm<sup>-2</sup> as well as annealing at 100 – 280 °C on conductance of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x=0,03) whiskers in temperature range 4,2 ÷ 300 K and magnetic field (up to 14 T) have been studied. It was shown that irradiation with dose  $5 \times 10^{15}$  p<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup> does not change the whisker conductance, while irradiation with dose  $1 \times 10^{16}$  p<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup> and annealing leads to substantial changes of resistance and magnetoresistance of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> whiskers in temperature range 4,2 - 40 K. The results obtained are explained according to hopping conductance on impurity zone in the crystals.

**Keywords:** whiskers, proton irradiation, magnetoresistance.