

А.О. Дружинін¹, І.П. Островський¹, Ю.М. Ховерко¹, П.Г. Литовченко³,
Н.Т. Павловська³, Ю.В. Павловський², Р.М. Корецький¹

Вплив протонного опромінення на властивості легованих НК Si_{1-x}Ge_x р-типу

¹Національний університет „Львівська політехніка”, Львів

²Дрогобицький ДПУ імені Івана Франка, Дрогобич

³Інститут фізики НАН України, Київ

Вивчено вплив протонного опромінення з енергією 6,8 MeV та дозами до $1 \times 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ та відпалу за температур 100 – 300 °C на електропровідність ниткоподібних кристалів Si_{1-x}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 $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ практично не змінює провідності кристалів, тоді як опромінення дозою $1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ та відпал приводить до істотного зменшення опору та зміни магнітоопору НК Si_{1-x}Ge_x в інтервалі температур 4,2 – 40 К. Отримані результати пояснюються в рамках аналізу стрибкової провідності по домішкової 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_{1-x}Ge_x вивчався лише у роботі [4]. Однак, ці дослідження обмежені малими дозами опромінення кристалів (до $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$), 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 $1 \times 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ та відпалу за температур 100 – 300 °C на електропровідність ниткоподібних кристалів Si_{1-x}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.

I. Результати експерименту та їх обговорення

Ниткоподібні кристали Si_{1-x}Ge_x 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_{1-x}Ge_x ($x = 0,03$) 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 $5 \times 10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ та $1 \times 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Опромінення мінімальною дозою не викликало істотних змін опору та магнітоопору НК. Опромінення дозою $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ практично не змінило вигляд залежності R(T) (рис. 1, рис. 2), однак привело до істотних змін магнітоопору (див. рис. 3, 4). Опромінення дозою $1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ привело до істотного зменшення опору НК Si_{1-x}Ge_x 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 $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом} \times \text{см}$ (рис. 5), тоді як він зменшується лише на 10 % у кристалах з $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом} \times \text{см}$ (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 зупинимось на аналізі відпаду зразків за температур 100 °С та 280 °С, опромінених дозою $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$. Наведені температури відпаду, 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 $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом} \times \text{см}$ і $\rho_{300\text{K}} = 0,028 \text{ Ом} \times \text{см}$, 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 $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом} \times \text{см}$ 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 $\rho_{300\text{K}} = 0,028 \text{ Ом} \times \text{см}$ 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 відпаду 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 $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. 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 ВМО в інтервалі температур 13 – 30 К.

- [1] А.А. Дружинин, И.И. Марьямова, Е.Н. Лавитская, А.П. Кутраков От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // *Датчики и системы*, **6**, сс. 2-7 (2001).
- [2] Я.І. Лепіх, Ю.О. Гордієнко, С.В. Дзядевич, А.О. Дружинін, А.А. Євтух, С.В. Ленков, В.Г. Мельник, Г.О. Романов *Створення мікроелектронних сенсорів нового покоління для інтелектуальних систем*. Астопринт, Одеса, 296 с. (2010).
- [3] Lasse Vines, E.V. Monakhov, Yu. Kuznetsov, R. Kozłowski, P. Kaminski, and B.G. Svensson Formation and origin of the dominating electron trap in irradiated *p*-type silicon // *Phys. Rev. B.*, **78**, p. 085205 (2008).
- [4] А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.М. Ховерко, П.Г. Литовченко, Н.Т. Павловская, Ю.В. Павловский, В.М. Цмоць, В.Ю. Поварчук Радиационная стойкость нитевидных кристаллов SiGe, используемых для сенсоров физических величин // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **1-2**(90), сс. 10 - 12 (2011).
- [5] Н.В. Агринская, В.И. Козуб, Т.А. Полянская, А.С. Саидов Проявление E_2 -проводимости в магнитосопротивлении многодолинных полупроводников // *ФТП*, **33**(2), сс. 161-169 (1999).

А.А. Druzhinin ¹, I.P. Ostrovskii ¹, Yu.M. Khoverko ¹, P.G. Litovchenko ³,
Yu.V. Pavlovskyj ², N.T. Pavlovska ³, R.M. Koretsky ¹

Influence of Proton Irradiation on Si-Ge Whiskers Properties

¹Lviv National Polytechnic University, 1 Kotlyarevskii st. , 79013, Lviv, Ukraine

²Drohobych pedagogic university, 24 Ivana Franka st., 82100, Drohobych, Ukraine

³Institute of Physics, NASU, pr. Nauki, 47, Kiev, Ukraine

An influence of and proton irradiation with 6,8 MeV energy and dose up to $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ as well as annealing at 100 – 280 °С on conductance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) 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 $5 \times 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ does not change the whisker conductance, while irradiation with dose $1 \times 10^{16} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ and annealing leads to substantial changes of resistance and magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers in temperature range 4,2 - 40 K. The results obtained are explained according to hopping conductance on impurity zone in the crystals.

Key words: whiskers, proton irradiation, magnetoresistance.