

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

PACS: 61.82.FK, 72.20. — I, 72.20.MY
УДК 621.315.592, 537.312.8

ВПЛИВ ПРОТОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si-Ge

*Н. Т. Павловська^{1,3}, П. Г. Литовченко¹, А. О. Дружинін², І. П. Островський²,
Ю. М. Ховерко², А. Я. Карпенко¹, В. М. Цмоць³, Ю. В. Павловський³*

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки, 47, Київ

²Національний університет «Львівська політехніка», 79013 Львів

³Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
вул. І. Франка, 36, Дрогобич, 82100, tsmots@drohobych.net

ВПЛИВ ПРОТОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si-Ge

*Н. Т. Павловська, П. Г. Литовченко, А. О. Дружинін, І. П. Островський, Ю. М. Ховерко,
А. Я. Карпенко, В. М. Цмоць, Ю. В. Павловський*

Анотація. Вивчено вплив протонного опромінення та сильних магнітних полів на електропровідність та магнітоопір ниткоподібних кристалів (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) з питомим опором $\rho = 0,008\text{--}0,025$ Ом·см в інтервалі температур 4,2–300 К. Виявлено зменшення опору кристалів у температурній області 4,2–40 К в процесі опромінення малими дозами протонів та істотне збільшення опору у всій дослідженій температурній області при опроміненні дозою $1 \cdot 10^{17}$ р⁺/см². Запропоновано інтерпретацію виявлених змін фізичних параметрів ниткоподібних кристалів.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній-германій, протонне опромінення, електропровідність, магнітоопір

IMPACT OF PROTON IRRADIATION ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF Si-Ge WHISKERS

*N. T. Pavlovska, P. G. Litovchenko, A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovskyy, Yu. M. Khoverko, A. Ya. Karpenko,
V. M. Tsmots, Yu. V. Pavlovskyy*

Abstract. The impact of proton irradiation and high magnetic field on the electroconductivity and magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) whiskers with resistance of $\rho = 0,008\text{--}0,025$ Ohm·cm in the temperature range of 4,2–300 K. is studied. It is found a decreasing of resistance of the crystals in the temperature range of 4,2–40 K upon radiation with low dose of protons and a significant increasing

of resistance in the whole temperature range examined at the irradiation dose of $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. The interpretation of the observed changes in the physical parameters of the whiskers is proposed.

Keywords: whiskers, silicon-germanium, proton irradiation, electroconductivity, magnetoresistance

ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Si-Ge

Н. Т. Павловская, П. Г. Литовченко, А. О. Дружинин, И. П. Островский, Ю. М. Ховерко, А. Я. Карпенко, В. М. Цмоць, Ю. В. Павловский

Аннотация. Изучено влияние протонного облучения и сильных магнитных полей на электропроводимость и магнитосопротивление нитевидных кристаллов (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) с удельным сопротивлением $\rho = 0,008\text{--}0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в интервале температур 4,2–300 К. Обнаружено уменьшение сопротивления кристаллов в температурной области 4,2–40 К в процессе облучения малыми дозами протонов и существенное увеличение сопротивления во всей исследуемой температурной области при облучении дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$. Предложено интерпретацию обнаруженных изменений физических параметров нитевидных кристаллов.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний-германий, протонное облучение, электропроводность, магнитосопротивление

Вступ

Ниткоподібні кристали (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ широко використовуються для створення сенсорів фізичних величин [1, 2]. З іншого боку, висока досконалість структури вихідних НК дозволяє моделювати дефекти, які утворюються у кристалах у процесі опромінення. Так у роботах [3] та [4] досліджували радіаційні дефекти, які утворюються в сильно легованих НК $\text{p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ за впливу опромінення електронами і γ -квантами (до 10^{18} см^{-2}), відповідно. Як показали проведені дослідження, основними дефектами у кристалах є вторинні радіаційні дефекти міжвузлових атом бору — вакансії. Вплив протонного опромінення на електрофізичні властивості НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ раніше не вивчався.

Метою роботи є вивчення впливу протонного опромінення з дозами до $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ та магнітного поля з індукцією до 14 Тл 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 для створення радіаційно стійких сенсорів, дієздатних в умовах сильних магнітних полів.

Експериментальні результати та їх обговорення

Для досліджень використано НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) з питомим опором $\rho = 0,008\text{--}0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, вирощені методом хімічних транспортних реакцій у закритій бромідній системі з використанням золота як ініціатора росту. Діаметри кристалів становили $40 \pm 2 \text{ мкм}$, довжина — 2–3 мм. Склад твердого розчину визначався методом мікро-зондового аналізу на установці САМЕВАХ і становив 0,03 мольних процентів. Опромінення зразків 6 МеВ протонами здійснювалося при 40°C на циклотроні У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України. Після опромінення зразків здійснювалося вимірювання температурної залежності їх електропровідності в інтервалі температур 4,2–300 К та низькотемпературні вимірювання магнітоопору в полях до 12 Тл у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

Зразки були опромінені різними дозами протонів: $5 \cdot 10^{13} \text{ p}^+/\text{см}^2$, $10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$, та $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$. Опромінення мінімальною дозою не викликало істотних змін опору та магнітоопору НК. Опромінення дозою $10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ привело до істотного зменшення опору НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в інтервалі температур 4,2–40 К (див. рис. 1, 2) та незначних

змін магнітоопору кристалів (рис. 3). Слід відзначити, що зміни опору більше виражені при 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. 1), тоді як у кристалах з $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ він зменшується лише на 10 % (рис. 2). За вищих доз опромінення спостерігається зростання опору опромінених НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) порівняно з неопроміненими зразками (рис. 4), а також істотні зміни магнітоопору (рис. 5). Як видно з рисунку, для зразків з діелектричного боку переходу метал-діелектрик з $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ магнітоопір опромінених НК зростає в сильних магнітних полях.

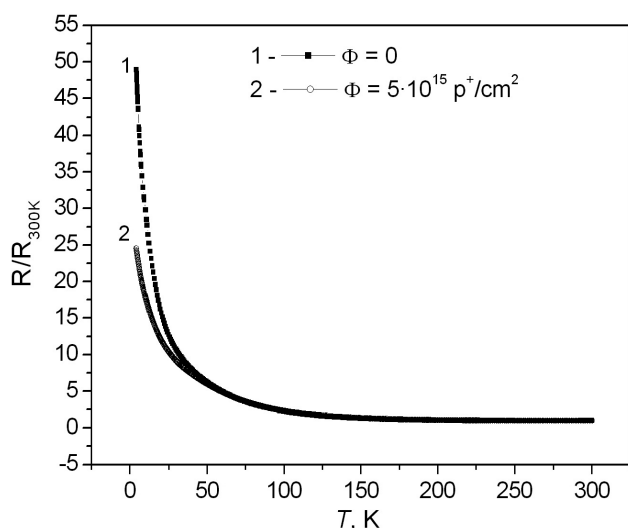


Рис. 1. Температурна залежність відносної зміни опору опромінених протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з питомим опором $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

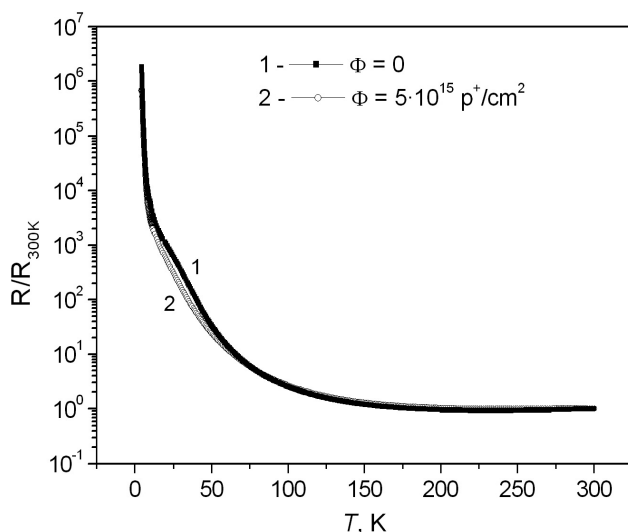


Рис. 2. Температурна залежність відносної зміни опору опромінених протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з питомим опором $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

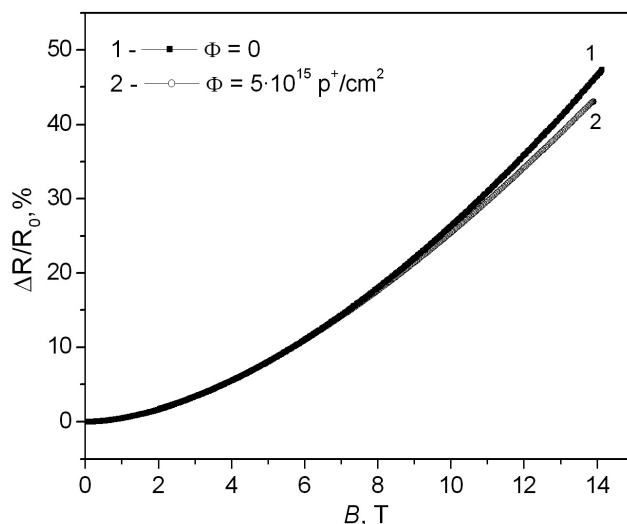


Рис. 3. Польова залежність магнітоопору опромінених протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з питомим опором $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

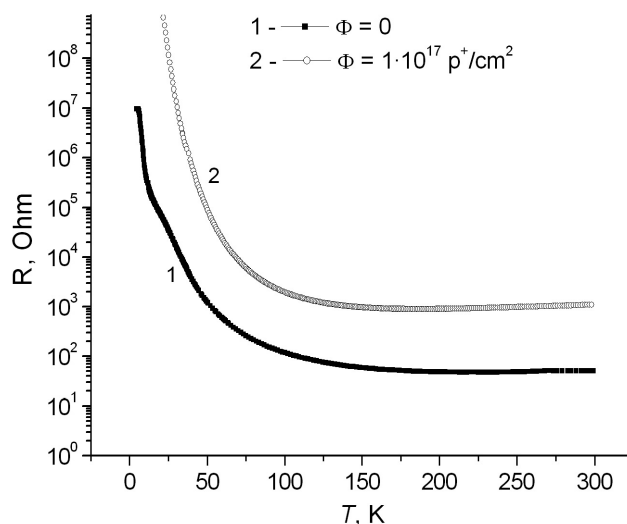


Рис. 4. Температурна залежність опору опромінених протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з питомим опором $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

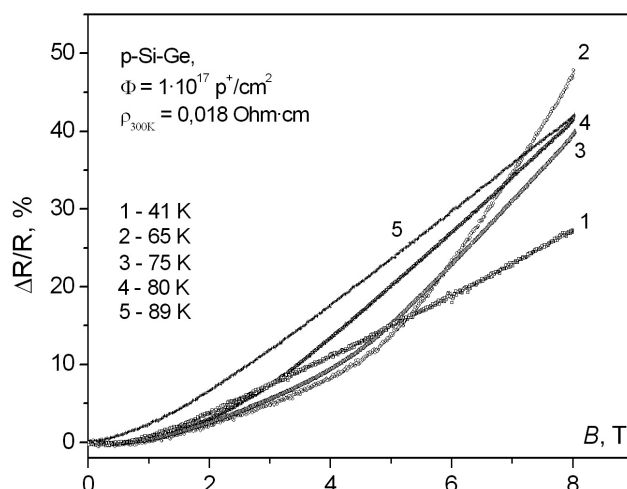


Рис. 5. Польові залежність магнітоопору кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) з питомим опором $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, опромінених протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

На основі наведених результатів можна припустити, що порівняно малі дози опромінення ($\sim 10^{15}$ р⁺/см²) призводять 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. 1 та рис. 2). 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 за все 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 стрибкова провідність по верхній зоні Хаббарда з енергією активації E_2 . У цьому разі опромінення повинно привести до більших змін опору у зразках з більшою концентрацією домішок, що і спостерігається нами експериментально.

Великі дози опромінення приводять до утворення макродефектів у кристалі, що супроводжується значним розсіюванням носіїв заряду на цих дефектах та істотним збільшенням опору кристалів. Для з'ясування природи цих макродефектів необхідні додаткові експериментальні дані, що є предметом наших подальших досліджень.

Висновки

Вивчено вплив протонного опромінення дозами до $1 \cdot 10^{17}$ р⁺/см² та магнітного поля індукцією до 14 Тл на електропровідність ниткоподібних кристалів (НК) Si_{1-x}Ge_x ($x = 0,03$) з питомим опором $\rho = 0,008-0,025$ Ом·см в інтервалі температур 4,2–300 К. Встановлено, що опір кристалів зменшується в процесі опромінення у температурній області 4,2–40 К при дозі опромінення $5 \cdot 10^{15}$ р⁺/см², натомість спостерігається істотне збільшення опору у всій дослідженій температурній області, коли доза опромінення досягає $1 \cdot 10^{17}$ р⁺/см². Припускається, що виявлені зміни опору за малих доз опромінення пов'язані з перерозподілом густини станів у домішковій зоні кристалу. Великі дози опромінення призводять до утворення макродефектів у кристалі, що супроводжується значним розсіюванням носіїв заряду та істотним збільшенням їх опору.

Література

1. Дружинін А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р., Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці: Монографія. — Львів, В-во НУ «Львівська політехніка», 2010. — 200 с.
2. Druzhinin A. A., Dolgolenko A. P., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Kogut Iu. R., Thermoelectric sensors based on Ge_xSi_{1-x} whiskers // Journal of Thermoelectricity. — 2009. — №4. — P. 82–85.
3. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Лях-Кагуй Н. С., Маслюк В. Т., Мегела И. Г., Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010 — № 1 (85). — С. 26–29.
4. А. О. Дружинін, І. П. Островський, Ю. М. Ховерко, В. М. Цмоць, Ю. М. Павловський, Н. Т. Павловська, В. Ю. Поварчук, Вплив опромінення γ -квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge // Фізика і хімія твердого тіла. — 2010. — Т.11, №1. — С. 89–92.