

**ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ К.Д. УШИНСЬКОГО**

ПАВЛОВСЬКА НАДІЯ ТАРАСІВНА

УДК 621.315.592

**ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ НА МАГНІТНІ ТА МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ОДЕСА – 2016

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Інституті ядерних досліджень НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Литовченко Петро Григорович,
Інститут ядерних досліджень
НАН України, головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Пелещак Роман Михайлович,
Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка,
завідувач кафедри загальної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
Лепіх Ярослав Ілліч,
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
директор Міжвідомчого науково-навчального фізико-технічного
центру МОН та НАН України

Захист відбудеться " __3__ " __березня 2016 р. о " __14__ " годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.053.07 при Південноукраїнському національному педагогічному університеті імені К.Д. Ушинського за адресою: 65000, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26, Аудиторія 52.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Південноукраїнського національного педагогічного університету імені К.Д. Ушинського (м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 36).

Автореферат розіслано " ____ " січня 2016 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Тадеуш О.Х.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдяки своїй унікальній формі, розмірам, високій пружності та механічній міцності, що пояснюється структурною досконалістю, ниткоподібні кристали (НК) усе ширше застосовуються у різних галузях практичної діяльності людини (авіаційна, ракетно-космічна, медична, транспорт, телекомунікації тощо). Із НК виготовляють високочутливі датчики вібрацій, напружень і температур, тензодатчики для вимірювання механічних характеристик, сенсори різноманітних фізичних величин, надміцні композиційні матеріали, мініатюрні підвіски у приладах, мікрозонди. Однією з перспектив застосування НК є їх використання у хімічних і біологічних сенсорах. Це чудові об'єкти фізичних досліджень, оскільки дають змогу в широких межах змінювати досконалість структури і, отже, моделювати різні умови для перевірки правильності теоретичних розрахунків для уточнення наявних моделей, уявлень і отримання нових даних про фізичну природу різноманітних процесів, які протікають у твердому тілі.

Сьогодні найбільша увага приділяється вивченню НК Si, Ge та твердого розчину $Si_{1-x}Ge_x$, що зумовлено простотою технологічного процесу їх вирощування, низькою вартістю вихідної сировини, широким спектром практичного застосування та можливістю роботи в широкому діапазоні температур. Вони є ідеальною елементною базою для створення сенсорів різноманітних фізичних величин: тиску, температури, прискорення, деформації, зусиль, переміщень, вологості, параметрів атмосфери тощо. Важливу науково-технічну проблему, яка на сьогодні не до кінця розв'язана, становить створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації (сильні магнітні поля, низькі температури, вплив опромінення). З практичної точки зору важливим параметром виступає допустима доза опромінення, яка суттєво не впливає на вихідні характеристики сенсорів. Тому встановлення фізичних засад створення радіаційностійких сенсорів, дієздатних в умовах сильних магнітних полів, низьких температур опромінення γ -квантами, протонами і нейтронами – актуальне і важливе завдання.

Зв'язок із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у рамках таких тем: 1. Радіаційні ефекти в напівпровідниках з ізовалентними домішками. 2007–2011 рр. ДР № 0106U011410; 2. Дослідження гетерних властивостей радіаційних дефектів у напівпровідниках. 2012–2016 рр. ДР № 0112U000896.

У межах цих програм методами вимірювання магнітоопору, магнітної сприйнятливості, мікротвердості, скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу автором здійснювалося дослідження впливу сильних магнітних полів і опромінення γ -квантами, протонами й нейтронами на електрофізичні та магнітні властивості ниткоподібних кристалів $Si_{0,97}Ge_{0,03}$.

Мета і задачі дослідження. Встановлення особливостей магнітної сприйнятливості та магнітоопору ниткоподібних кристалів $Si_{0,97}Ge_{0,03}$, одержаних вирощуванням з газової фази, зумовлених опроміненням γ -квантами, протонами і нейтронами та фізична інтерпретація виявлених ефектів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися такі **задачі:**

- методом вирощування із газової фази одержати ниткоподібні кристали $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, перспективні для сенсорного використання;
- скануюча електронна мікроскопія, рентгеноспектральний мікроаналіз та мікрOMEХАНІЧНІ властивості вирощених ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$;
- експериментальне дослідження і теоретичне моделювання магнітних властивостей ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різного поперечного розміру;
- дослідження впливу γ -опромінення на магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$;
- дослідження впливу протонного і нейтронного опромінення на магнітну сприйнятливість, електричний та магнітоопір ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$.

Об'єкт дослідження – ниткоподібні кристали твердого розчину $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, одержані вирощуванням з газової фази.

Предмет дослідження – особливості магнітних та магніторезистивних характеристик ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ в полях ефективного зовнішнього впливу (магнітні поля, низькі температури, опромінення γ -квантами, протонами і нейтронами).

Основними експериментальними методами дослідження були:

- вимірювання магнітної сприйнятливості матеріалів за методом Фарадея;
- метод скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу;
- метод мікрозондового аналізу за допомогою установки «Сameбах»;
- вимірювання магнітоопору на біттерівському магніті;
- визначення мікротвердості за Віккерсом;
- метод ефекту Холла;
- для обробки експериментальних даних – численні математичні розрахунки і комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. Експериментальні результати дисертаційного дослідження є оригінальними і новими. Зокрема:

1. Визначено оптимальні технологічні умови одержання з газової фази ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ складу $x = 0,01-0,08$ з поперечними розмірами 0,1–100 мкм. Встановлено, що однорідний розподіл германію в НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ та відсутність домішок у кристалах поперечними розмірами 10–40 мкм забезпечують найкращу якість та міцність зразків, що визначає перспективи їх практичного використання.

2. Обґрунтовано особливості магнітної сприйнятливості ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ в рамках моделі ланжевенівського суперпарамагнетизму атомів. Оцінено концентрацію, найбільш імовірні розміри та магнітні моменти нанокластерів.

3. З'ясовано, що зміни магнітоопору ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, опромінених γ -квантами дозами до $1,2 \cdot 10^{18} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$, пов'язані з виникненням радіаційних дефектів, які зумовлюють делокалізацію носіїв заряду у домішковій зоні кристалу.

4. Уперше встановлено, що опромінення ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ 6,8 МеВ протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ приводить до утворення диспергованих

парамагнітних центрів, а при подальшому збільшенні дози опромінення – до зростання концентрації магнітних нанокластерів. Показано, що виявлений парамагнетизм зумовлений утворенням А-центрів та дивакансій. З'ясовано механізм провідності у кристалах. Результати обґрунтовано в рамках висунутого припущення про збільшення концентрації двічі зайнятих носіями домішкових станів у процесі опромінення, що супроводжується зростанням провідності кристалів.

5. Уперше зафіксовано, що при опроміненні ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ 6,8 MeV протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ спостерігається суттєве збільшення опору в усіх досліджуваних зразках, а також значне зростання магнітоопору в низькотемпературній області. Показано, що істотний магнітоопір пов'язаний з магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду.

6. Уперше виявлено, що вплив нейтронного опромінення на магнітну сприйнятливість ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ є значно меншим (понад 30%) ніж у випадку монокристалічного кремнію, вирощеного методом Чохральського. Показано, що виявлений магнетизм зумовлений утворенням у процесі опромінення нейтронами вторинних радіаційних дефектів типу А-центрів та дивакансій розташованих в області просторового заряду кластера.

7. З аналізу кривих магнітоопору опромінених нейтронами ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ вперше встановлено, що при низьких температурах (поблизу 4,2 K) причиною магнітоопору, крім магнітопольового зменшення рухливості, є також магнітопольове зменшення концентрації вільних носіїв заряду. При більш високих температурах (приблизно 40 K) переважаючим механізмом магнітоопору виступає магнітопольове зменшення рухливості вільних носіїв заряду.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено апаратно-програмний комплекс до установки для вимірювання магнітної сприйнятливості слабомагнітних матеріалів за методом Фарадея, що дало можливість суттєво зменшити системні та випадкові похибки, необхідну масу досліджуваних зразків і значно скоротити час експериментальних вимірювань.

2. Визначено оптимальні умови легування ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ для створення на їх основі радіаційностійких високочутливих сенсорів деформації, дієздатних при дії магнітних полів до 4 Тл і допустимих доз опромінення γ -квантами до $3 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{cm}^2$ та 6,8 MeV протонами з дозами до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$.

Результати, одержані у дисертаційному дослідженні, є важливими і перспективними з точки зору фундаментальної та прикладної наук, допомагають краще зрозуміти процеси й механізми, які протікають у ниткоподібних кристалах SiGe в результаті впливу сильних магнітних полів, низьких температур, іонізуючих випромінювань. Вони можуть бути використані для удосконалення технологічних режимів вирощування низькорозмірних напівпровідникових кристалів, виготовлення на їх основі надійних елементів електронних приладів, сенсорів різних фізичних величин, датчиків тощо, а також для прогнозування надійності їх роботи в полях ефективного зовнішнього впливу (сильні магнітні поля, низькі температури, опромінення γ -квантами, протонами, нейтронами).

Особистий внесок здобувача. Дисертант брала участь у постановці задач, обговоренні та інтерпретації отриманих результатів і написанні наукових публікацій. У працях [1, 4, 10, 13, 14, 21] автором підготовлено зразки до опромінення

швидкими нейтронами реактора, виконано вимірювання магнітної сприйнятливості, електричного та магнітоопору на біттерівському магніті з індукцією до 14 Тл у широкому температурному інтервалі (4,2–77 К). У публікаціях [2, 9, 15] проведено вимірювання магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різного поперечного розміру і запропоновано інтерпретацію одержаних результатів. У роботах [3, 5, 8, 12, 13, 19] дисертантом здійснено підготовку зразків до опромінення протонами, вимірювання їх магнітної сприйнятливості, електричного та магнітоопору. У працях [6, 7, 16, 17, 18, 20] здобувачем проведено вимірювання електричних та магніторезистивних характеристик НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених γ -квантами, виконано обробку й аналіз одержаних даних. У публікаціях [9, 15] автором проведено низку технологічних операцій з удосконалення режимів вирощування НК Si-Ge *p*-типу провідності методом хімічних газотранспортних реакцій. У роботі [11] визначено оптимальний склад кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ методом мікрозондового аналізу, проведено їхні структурні та мікромеханічні дослідження. У роботі [22] взято участь у розробленні апаратно-програмного комплексу до установки для вимірювання магнітної сприйнятливості слабомагнітних речовин.

Апробація результатів роботи. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на наукових конференціях та семінарах: III Міжнародній науково-практичній конференції «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (МЕТІТ-3) (Україна, Кременчук, 2008 р.); XXII Міжнародній конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (Україна, Івано-Франківськ, 18 – 23 травня, 2009 р.); XI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (СІЕТ-2010) (Україна, Одеса, 24 – 28 травня, 2010 р.); 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-4) (Україна, Одеса, 28 червня – 2 липня, 2010 р.); VII міжнародній школі-конференції «Актуальні проблеми фізики напівпровідників» (Україна, Дрогобич, 28 вересня – 1 жовтня 2010 р.); II Всеукраїнській школі-семінарі молодих учених та студентів (Україна, Тернопіль, 2012 р.); The 4-th international conference «Current problem in nuclear physics and atomic energy» (Ukraine, Kiev, 2012 р.); 9-той международной конференции «Кремний 2012» (Россия, Санкт-Петербург, 2012 г.); 10-ой Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Беларусь, Минск, 24 – 27 сентября 2013 г.); X конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2014» (Россия, Иркутск, 7 – 12 июля, 2014 г.).

Публікації. У процесі виконання роботи за темою дисертації опубліковано 22 праці, у тому числі: 3 статті у зарубіжних журналах, з них 2 у міжнародній наукометричній базі SCOPUS; 6 статей у фахових журналах України; 1 стаття в інших наукових виданнях України; 3 праці у матеріалах зарубіжних конференцій; 8 – у матеріалах Міжнародних конференцій; 1 праця у матеріалах Всеукраїнських конференцій. Перелік публікацій наведено наприкінці автореферату.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел з 200 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 147 сторінок і містить 69 ілюстрації та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** відображено загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення дисертаційного дослідження, сформульовано мету і визначено основні завдання, описано зв'язок роботи з науковими темами, визначено новизну отриманих результатів, їх практичне значення, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** подано огляд літератури за темою дисертаційного дослідження. З'ясовано, що існує багато способів отримання кристалів у формі тонких ниток і голок. В основі цих способів часто лежать абсолютно різні і не завжди до кінця вивчені механізми. Показано, що найбільш докладно досліджено процеси, які відбуваються при рості ниткоподібних кристалів з газової фази, проте, і цей метод потребує вдосконалення, щоб одержувати матеріали перспективні для сучасної мікро- та наноелектроніки.

Ниткоподібні кристали, в тому числі Si та SiGe, мають низку особливих властивостей, які відрізняють їх від макрокристалів. Це незвичайна міцність, яка близька до теоретичної, це низка механічних властивостей, це переваги в оптичних, магнітних, електричних та хімічних властивостях. Проте відсутній комплексний підхід у дослідженні цих властивостей, починаючи з моменту вирощування зразків і завершуючи виробленням рекомендацій щодо перспектив їх практичного використання.

У результаті вивчення впливу опромінення електронами на леговані НК кремнію показано, що їх можна використовувати як чутливі елементи сенсорів механічних величин, стійких до дії електронного опромінення з енергією $E = 10$ MeV і флюенсом $\Phi \leq 4 \cdot 10^{17}$ ел/см², але невідомо, як будуть змінюватися властивості ниткоподібних кристалів під впливом γ -квантів, протонів чи нейтронів.

У **другому розділі** представлено опис використаних методик, удосконалення методу вимірювання магнітної сприйнятливості, а також висвітлено результати вирощування НК Si_{1-x}Ge_x, дослідження розподілу германію, структурних та мікромеханічних властивостей вирощених кристалів.

Ниткоподібні кристали Si-Ge вирощувалися методом хімічних транспортних реакцій у закритій бромідній системі Si-Ge-Pt-Au-B-Br. Встановлено, що найбільш ефективно і стабільне масоперенесення створюється при градієнті температур $\Delta T = 200\text{--}250^\circ\text{C}$, температурі зони розчинення 1100°C і сумарного тиску в системі $P = 0,1\text{--}1,0$ атм. Для забезпечення такого тиску задавали концентрацію броду, яка при температурі 1100°C становила $0,5\text{--}1,0$ мг/см³. При цих умовах температура зони кристалізації була $750\text{--}950^\circ\text{C}$. Процес вирощування тривав $1,5\text{--}2,0$ год.

Нами показано, що при підвищенні температури кристалізації від 750 до 900°C морфологія мікрочастин змінюється від тонких квазіциліндричних $d = 0,1\text{--}1$ мкм (рис. 1, а) до шестигранних голкоподібних НК $d = 3\text{--}80$ мкм (рис. 1, б).

Ступінь однорідності твердого розчину Si_{1-x}Ge_x за складом ($\Delta x/x_{\text{Ge}}$) вивчався методом мікрозондового аналізу. Встановлено, що найбільш однорідними за вмістом германію є НК Si_{1-x}Ge_x, які відповідають складу $x = 0,03$. Дослідження мікромеханічних властивостей показали, що зразки саме такого складу

характеризуються максимальною величиною мікротвердості.

a)

б)

Рис. 1. СЕМ фотографії утворення різних морфологічних форм НК Si-Ge: *a)* квазі-циліндричні субмікронні НК (діаметром 0,1–1 мкм); *б)* шестигранні голкоподібні НК (діаметром ~ 60 мкм)

Субмікронні НК ($0,1 < d < 1$ мкм) – це своєрідні “гетероструктури”, які складаються з монокристалічного ядра і нанопористої оболонки [1*]. З рис. 1, *б* видно, що голкоподібні НК ($1 < d < 70$ мкм) – це монокристали з добре вираженою огранкою. НК діаметрами 2–40 мкм мали дзеркальну поверхню. При збільшенні поперечних розмірів кристалів ($d > 40$ мкм) поверхня на вигляд стає матовою і спостерігаються сходинки росту. Детальний аналіз поверхні НК перетином ~ 60 мкм представлено на рис. 2. Привертає увагу відмінність структури поверхневого шару від об’ємної частини зразка. Отже, у голкоподібних кристалах поперечним розміром $d > 40$ мкм, як і у випадку субмікронних НК, на поверхні присутня оболонка, структура якої відрізняється від структури внутрішніх шарів. За результатами рентгеноспектрального аналізу встановлено, що в ній присутня значна концентрація атомів кисню і вуглецю. Слід зауважити, що після травлювання поверхні піків кисню та вуглецю не спостерігалось. Таким чином, однорідний розподіл германію в НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ та відсутність домішок в НК поперечними розмірами 10–40 мкм забезпечують найвищу міцність зразків і визначають перспективи їх подальшого практичного використання.

Рис. 2. СЕМ фотографії поверхні шестигранних НК (перетином ~ 60 мкм)

Діагностика магнітних властивостей вирощених НК проводилася на установці, робота якої базується на методі Фарадея, для якої, з метою суттєвого зменшення системних і випадкових похибок, ефективного керування магнітним полем, умовами експерименту та автоматичної обробки результатів вимірювання, було розроблено апаратно-програмний комплекс.

У **третьому розділі** представлено результати дослідження магнітної сприйнятливості (χ) НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різних поперечних розмірів. На рис. 3 відображено залежності магнітної сприйнятливості від напруженості зовнішнього магнітного поля ($\chi(H)$) субмікронних (рис. 3, *a*) та субміліметрових (рис. 3, *б*) НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ діаметрами від 0,1 до 80 мкм. Діаметри ниток вказані на вставках до рисунків. Як бачимо, на деяких зразках залежності $\chi(H)$ нелінійно змінюються зі зміною магнітного поля, що відрізняє їх від таких же залежностей для об’ємних кристалів монокристалічного кремнію.

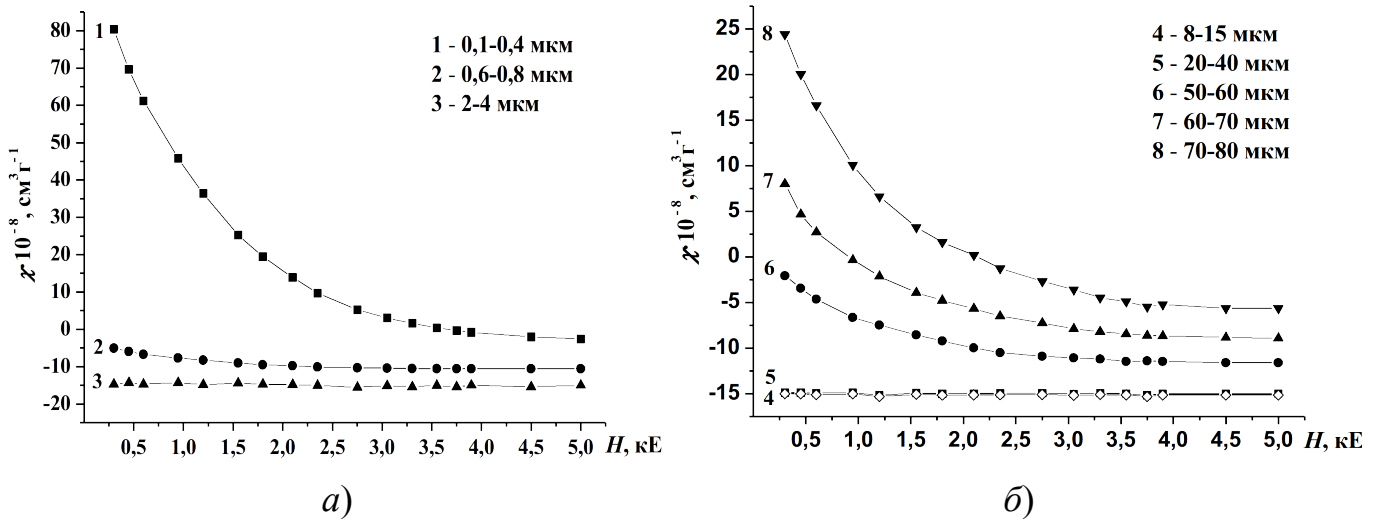


Рис. 3. Залежності магнітної сприйнятливості від напруженості зовнішнього магнітного поля субмікронних (а) та субміліметрових (б) НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$

Зроблено припущення про те, що виявлені нелінійності пов'язані з наявністю у зразках нанокластерів суперпарамагнітної природи. Тобто, магнітні моменти таких кластерів у 10^3 – 10^5 разів більші від магнітних моментів окремих атомів. Виходячи з цього, теоретична функція, якою можна описати спостережувані особливості магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, матиме вигляд:

$$\chi(H) = N_K N_0 M_B g \sqrt{s(s+1)} \cdot \left(\frac{N_0 M_B g \sqrt{s(s+1)}}{kT} \cdot \left(1 - \text{cth}^2 \left(\frac{N_0 M_B g \sqrt{s(s+1)}}{kT} \cdot H \right) \right) + \frac{kT}{N_0 M_B g \sqrt{s(s+1)} \cdot H^2} \right) + \chi_{\text{нар}} + \chi_{\text{гр}} \quad (1)$$

де N_K – концентрація магнітовпорядкованих кластерів; N_0 – кількість парамагнітних центрів в одному магнітному кластері; $N_0 M_B g \sqrt{s(s+1)}$ – магнітний момент кластера; M_B – магнетон Бора; g – g -фактор; s – спин парамагнітного центра, з яких складається кластер (приймаємо $s = 1/2$); k – постійна Больцмана, T – температура; $\chi_{\text{нар}}$ – парамагнітна складова; $\chi_{\text{гр}}$ – сприйнятливості ґратки.

Апроксимуючи отриманою функцією (1) експериментальні криві 1, 2, 6, 7 і 8 оцінено величини N_0 та N_K . Встановлено, що N_0 у всіх зразка приблизно рівне $\sim 5 \cdot 10^3$ 1/кластер, а N_K змінюється у межах $1,0 \cdot 10^9$ – $1,8 \cdot 10^{10}$ см^{-3} . У цій моделі ми прийняли, у першому наближенні, що магнітні моменти кластерів однакові. Для врахування певного їх розподілу за величиною магнітних моментів, увівши функцію розподілу встановлено, що магнітні моменти кластерів змінюються в межах від $4 \cdot 10^3$ до $1,2 \cdot 10^4$ магнетонів Бора, а їхні розміри – від 2,5 до 30 нм. Судячи з результатів мікрозондового аналізу, СЕМ та рентгеноспектрального мікроаналізу природа кластерів може бути пов'язаною з наявністю на поверхні нанопористої оболонки, в якій локалізовані обірвані зв'язки. У порах малого розміру можуть створюватися умови для виникнення обмінної взаємодії між ними.

Залежності $\chi(H)$ НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечними розмірами 2–40 мкм є типовими для чистих діамагнетиків, що свідчить про відсутність у них магнітоактивних дефектів та домішок.

У четвертому розділі наведено результати досліджень впливу опромінення γ

квантами на електричні та магніторезистивні характеристики НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з концентрацією акцепторної домішки в околі переходу метал-діелектрик (ПМД) ($\rho = 0,008 \div 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). На рис. 4 представлено типові температурні залежності опору вихідних та опромінених зразків.

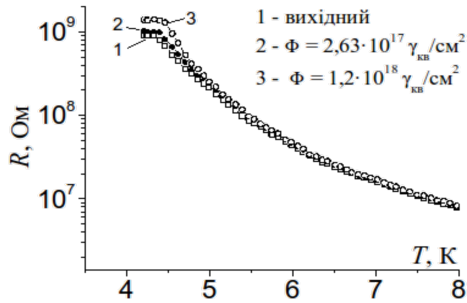
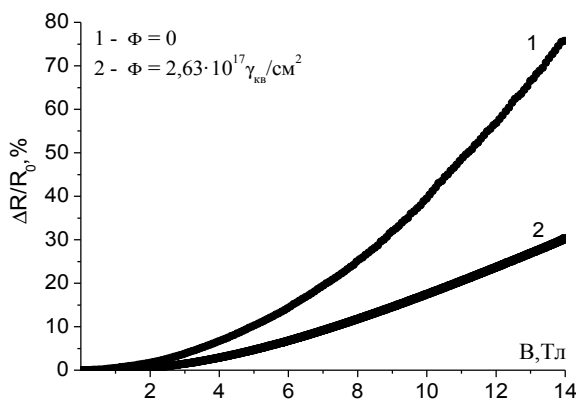
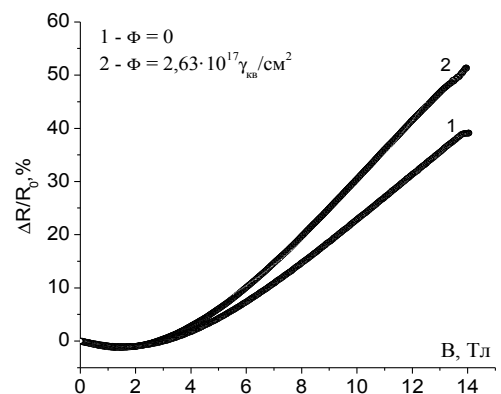


Рис. 4. Температурні залежності опору опромінених γ -квантами НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

боку ($\rho = 0,008 \div 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) магнітоопір зменшується після опромінення (рис. 5, а). Для менш легованих зразків ($\rho = 0,018 \div 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) – зростає у сильних магнітних полях (рис. 5, б), а у слабких полях (до 2,5 Тл) спостерігається поява від'ємного магнітоопору. Одержані експериментальні результати пояснено механізмами стрибкової провідності носіїв по домішковій зоні кристалу.



а)



б)

Рис. 5. Магнітоопір при 4,2 К НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених γ -квантами: а) з питомим опором $\rho = 0,008 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) з питомим опором $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

За результатами дослідження дозової залежності магнітоопору НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$

встановлено, що для них допустима доза опромінення γ -квантами $\epsilon 3 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$ та магнітне поле з індукцією до 4 Тл.

У п'ятому розділі представлено результати дослідження впливу протонного і нейтронного опромінення на магнітні, електричні та магніторезистивні характеристики НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$.

Опромінення протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ привело до зменшення опору в інтервалі температур 4,2–50 К (рис. 6) та незначних змін магнітоопору в сильних магнітних полях (10–14 Тл). Зміни опору більше виражені в зразках з більшою концентрацією вільних носіїв: опір зменшується майже у два рази в НК з питомим опором $\rho_{300\text{К}} = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 6, а), тоді як він зменшується лише на 10% у кристалах з $\rho_{300\text{К}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 6, б). При більших дозах опромінення спостерігається істотне зростання опору опромінених НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ порівняно з

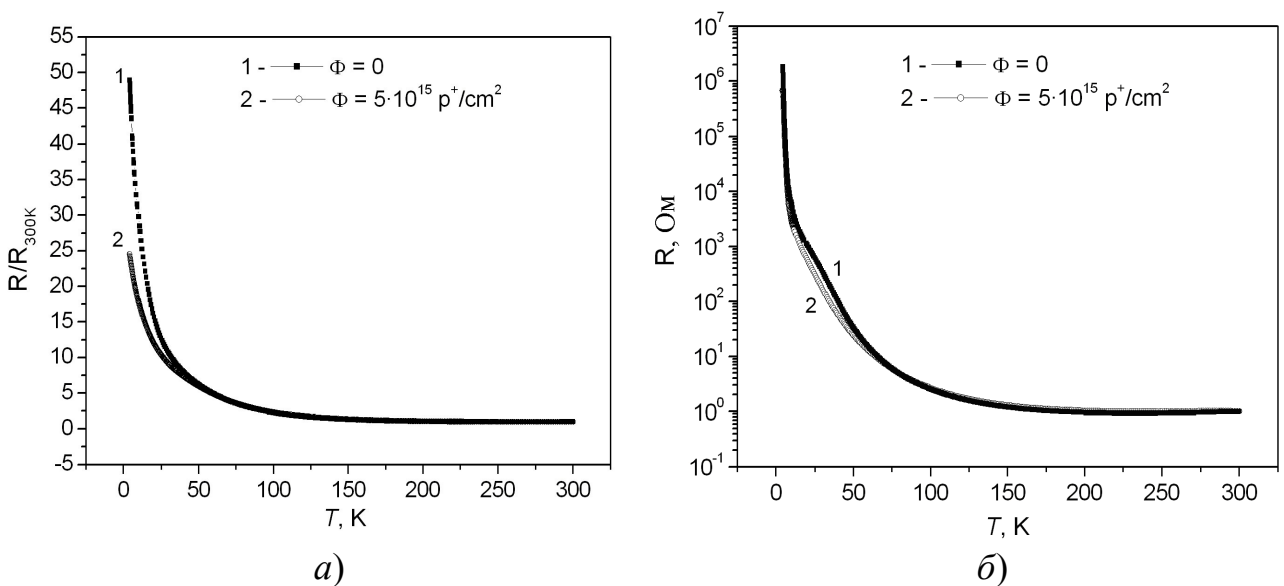


Рис. 6. Температурна залежність опору при 4,2 К опромінених 6,8 МеВ протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$: а) $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) з $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ неопроміненними зразками.

Можна припустити, що дози опромінення ($\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$) спричиняють виникнення електрично активних радіаційних дефектів, які зумовлюють появу додаткових носіїв заряду у домішковій зоні кристалу. У результаті опір НК повинен зменшуватися. Незрозумілим у цій ситуації залишається факт виявлення більших змін опору при низьких температурах у сильніше легованих кристалах (рис. 6, а).

Виникнення додаткових носіїв за рахунок опромінення повинно викликати більші зміни у високоомних кристалах. Ми ж спостерігаємо протилежну картину. Тому логічно припустити, що опромінення цією дозою не приводить до виникнення надлишкових носіїв заряду, а радше сприяє перерозподілу густини станів у домішковій зоні кристалу. У результаті при цих дозах опромінення утворюються збуджені атоми домішки, які одночасно захоплюють два носії заряду з антипаралельними спінами. Наслідком опромінення може бути інверсна заселеність збуджених рівнів домішки. При таких умовах переважаючим типом провідності має бути стрибова 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. Це припущення підтверджено завдяки проведенню серії відпалів при 100 та 280°C, при яких відпалюються дивакансії та А-центри. Тобто опромінення приводить до виникнення двічі зайнятих носіями домішкових станів, яке супроводжується зростанням провідності кристалів. Відпал зразків, своєю чергою, руйнує ці стани – на домішці залишається по одному носію. У результаті зменшується провідність по верхній зоні Хаббарда, що приводить до зростання магнітоопору та зменшення значення від’ємного магнітоопору в інтервалі температур 13–30 К. З іншого боку, зростає провідність по нижній зоні Хаббарда, що приводить до зменшення опору НК при 4,2 К.

Дослідження залежності магнітної сприйнятливості від напруженості магнітного поля НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених протонами показало, що дози до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ не спричиняють суттєвих змін. Збільшення дози опромінення до $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ приводить до появи парамагнітної складової магнітної сприйнятливості. За її лінійним характером можна зробити висновок про утворення в НК у процесі опромінення диспергованих парамагнітних центрів, між якими відсутня взаємодія. При дозі опромінення $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, крім парамагнітної складової, появляється нелінійність залежності магнітної сприйнятливості від напруженості магнітного поля. Це свідчить про те, що у даному випадку, поряд з диспергованими парамагнітними центрами в кристалах зростає концентрація кластерів. Як відомо, опромінення протонами є причиною утворення в матеріалі не тільки різного роду точкових дефектів, але й так званих областей розупорядкування, які, очевидно, можуть слугувати центрами локалізації магнітних центрів. На основі моделі, описаної у третьому розділі, обчислено концентрацію кластерів та їхні розміри, які відповідно становлять $1,85 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ та 6 нм. Завдяки серії відпалів в інтервалі 100–500°C показано, що при цих температурах відпалюються А-центри та дивакансії, розташовані відповідно: в ядрі кластера (100 – 200°C) в області просторового заряду кластера (200 – 300°C) та у провідній матриці кремнію (300 – 500°C) [2*].

Встановлено, що при опроміненні НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ спостерігається суттєве збільшення опору навіть у менш легуваних зразках ($\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) у порівнянні з неопроміненими зразками (рис. 7), а також значна зміна магнітоопору в низькотемпературній області (рис. 8). Як видно з рис. 8, при всіх температурах вимірювання опір опромінених НК не залежить від магнітного поля у слабких полях, задовольняючи умову слабого поля $\mu_p^2 B^2 \ll 1$, де $\mu_p \approx 10^3 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ – рухливість дірок. Далі при збільшенні магнітного поля опір помітно зростає.

Відомо, що для випадку слабких магнітних полів існує напівкласична аналітична залежність питомого опору напівпровідників від індукції магнітного поля, з якої випливає, що ця залежність виникає тільки у випадку наявності в напівпровіднику більше одного типу вільних носіїв заряду. Для того, щоб з’ясувати, чи підпорядковуються наші експериментальні дані, показані на рис. 8, цій моделі, оцінимо концентрації дірок та електронів у зразках при відповідних температурах вимірювання. При $T = 41 \text{ К}$, враховуючи, що питомий опір при відсутності магнітного поля $\rho_0 = 25 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а рухливість дірок $\mu_p \approx 10^3 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, одержуємо

$\rho = 1/(e\mu p) \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Із залежності власної концентрації вільних носіїв заряду від температури для кремнію $\lg(np) = -3460/T + 21,5$, одержуємо, що при $T = 41 \text{ К}$, $n \approx 10^{-134} \text{ см}^{-3}$, тобто вільні електрони практично відсутні. При $T = 89 \text{ К}$, $n \approx 10^{-47} \text{ см}^{-3}$, що означає те ж саме. Таким чином, у зразках присутній тільки один тип вільних носіїв заряду, що в напівкласичній моделі магнітоопору повинно привести до його відсутності. Дійсно, в полях до $0,6 \div 0,8 \text{ Тл}$ це так. Наявність магнітоопору в полях, більших від $0,8 \text{ Тл}$, потребує пояснення поза рамками вищевказаної моделі.

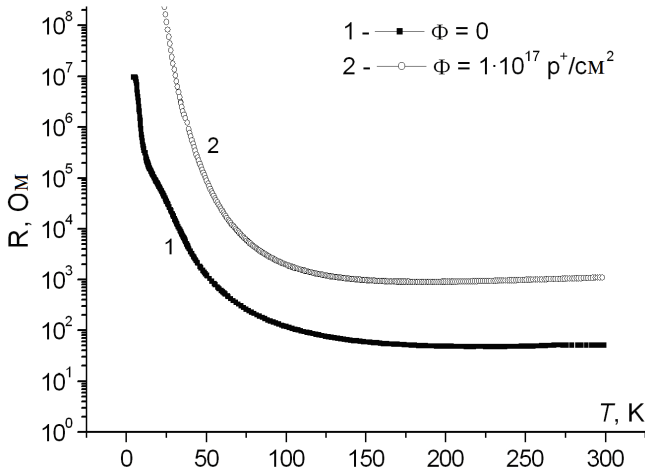


Рис. 7. Температурна залежність електричного опору опромінених $6,8 \text{ MeV}$ протонами НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

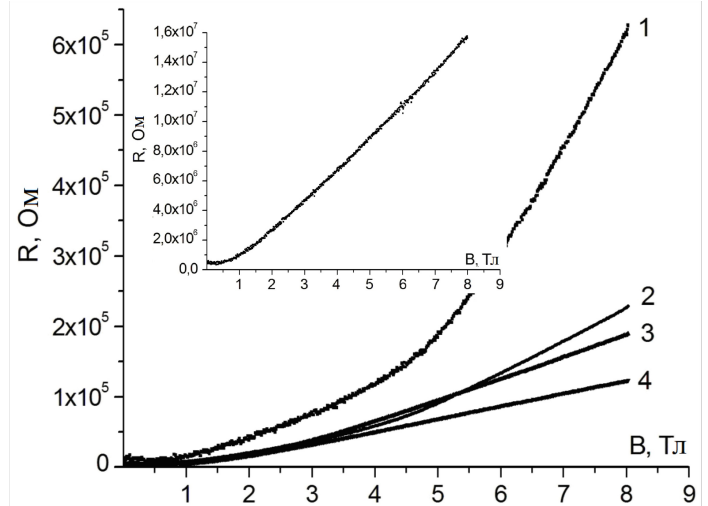


Рис. 8. Польові залежність магнітоопору НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених $6,8 \text{ MeV}$ протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$: при температурі вимірювання 41 К – на вставці; 1 – 65 К ; 2 – 75 К ; 3 – 80 К ; 4 – 89 К

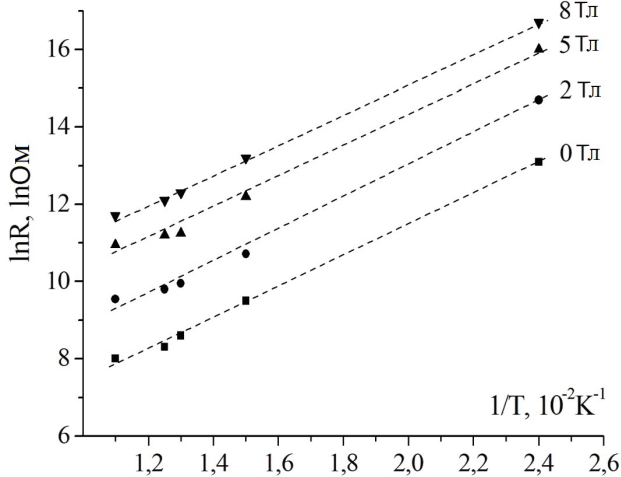


Рис. 9. Залежність опору від оберненої температури в різних магнітних полях НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених $6,8 \text{ MeV}$ протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$

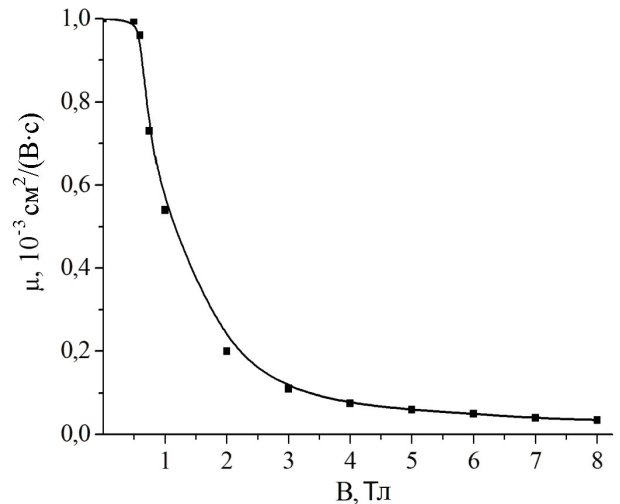


Рис. 10. Залежність рухливості вільних носіїв заряду (дірок) від магнітного поля в НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених $6,8 \text{ MeV}$ протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$

Щоб з'ясувати, що зумовлює зростання опору зі збільшенням магнітного поля: зменшення концентрації вільних носіїв заряду (так зване магнітне виморожування), чи зменшення їх рухливості, за нахилом прямої $\ln R = f(1/T)$ (рис. 9) обчислено

енергію іонізації домішкових атомів у різних магнітних полях. Вона становить 0,072 еВ. З рис. 9 видно, що енергія іонізації домішки практично не залежить від магнітного поля. Це означає, що енергія домішкового рівня практично не залежить від магнітного поля, що, зі свого боку, засвідчує незалежність концентрації дірок від магнітного поля. Отже, суттєвий магнітоопір при всіх досліджених температурах пов'язаний з магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду (дірок). Враховуючи, що питомий опір залежить від магнітного поля, а концентрація дірок не залежить, отримаємо залежність рухливості дірок від величини магнітного поля $\mu_p(B) = 1/(e\rho(B))$. Результати обчислень показано на рис. 10.

Для дослідження впливу опромінення швидкими нейтронами відібрано НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечним розміром 35 – 40 мкм з питомим опором $\rho = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Доза опромінення становила $8,6 \cdot 10^{17} \text{ н/см}^2$.

З вимірювань магнітних властивостей встановлено, що вплив нейтронного опромінення на магнітну сприйнятливість НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ є суттєво меншим (понад 30%) ніж у випадку монокристалічного кремнію, вирощеного методом Чохральського. Після опромінення $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ у них спостерігається менша парамагнітна складова та концентрація магнітовпорядкованих кластерів. Завдяки серії відпалів показано, що виявлений магнетизм може бути зумовлений утворенням у процесі опромінення нейтронами вторинних радіаційних дефектів типу А-центрів та дивакансій, розташованих в області просторового заряду кластера. Висловлене припущення підтверджено результатами дослідження впливу термообробки опромінених зразків в інтервалі 50 – 350°C на зміну їх електричного опору.

На цих же зразках проводилося вимірювання магнітоопору в магнітних полях до 14 Тл в температурному інтервалі від 4,2 до 300 К (рис. 11). Як видно, магнітоопір несуттєво змінюється у слабких магнітних полях і зростає при збільшенні магнітного поля. При температурах, близьких до температури рідкого гелію, спостерігається зміна кривизни магнітоопору. Відомо, що напівкласична модель магнітоопору в напівпровідниках з двома типами вільних носіїв заряду дає такі співвідношення для визначення рухливості та концентрації неосновних носіїв заряду [3*]:

$$\mu_n = \frac{\sqrt{3}}{B_n} \left(\frac{4\rho(B_n)}{3\rho_0} - 1 \right), \quad n_n = \frac{4\sqrt{3}B_n}{e\rho_0} \cdot \frac{\frac{\rho(B_n)}{\rho_0} - 1}{\left(\frac{4\rho(B_n)}{\rho_0} - 3 \right)^2}, \quad (2)$$

де μ_n і n_n – рухливість та концентрація неосновних носіїв заряду відповідно; B_n – магнітопольова точка перегину магнітоопору; $\rho(B_n)$ – питомий опір у точці перегину магнітоопору; ρ_0 – питомий опір при відсутності поля.

При $T = 4,22 \text{ К}$ отримуємо: $\mu = 1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $n = 2,9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, тобто при цій температурі вклад у провідність вносить дуже мала кількість легких носіїв заряду з високою рухливістю. Відношення провідності неосновних носіїв заряду до основних становить $\sigma_n/\sigma_0 = 4 \cdot (\rho(B_n)/\rho_0 - 1) = 0,32$, тобто неосновні носії заряду вносять значний вклад у провідність при цій температурі. Енергія активації домішки, що спричиняє ці носії заряду, обчислена за температурним ходом опору, становить

$\varepsilon = 2,1$ меВ. З підвищенням температури цей рівень швидко виснажується і при температурі біля 40 К основний вклад у провідність здійснює рівень з енергією 11,5 меВ.

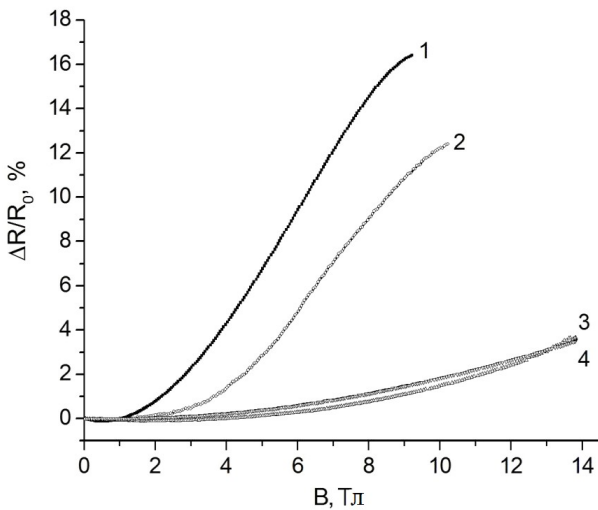


Рис. 11. Польові залежності відносної зміни опору опромінених нейтронами ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,018$ Ом·см при різних температурах: 1 – 4,22 К; 2 – 6 К; 3 – 25 К; 4 – 45 К

концентрації. При більш високих температур (приблизно 40 К) для всіх значень магнітного поля криві зливаються одна з одною, що свідчить про незалежність енергії активації $\varepsilon = 11,5$ меВ від поля, що зі свого боку, говорить про незалежність концентрації вільних носіїв заряду від величини магнітного поля і, таким чином, магнітоопір визначається зменшенням рухливості цих носіїв заряду (дірок).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведення дисертаційного дослідження вивчено вплив опромінення γ -квантами, протонами та нейтронами на магнітні, електричні та магніторезистивні характеристики НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Отримано такі основні результати:

1. Проведено низку технологічних експериментів з вирощування ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ методом хімічних газотранспортних реакцій. Визначено оптимальні технологічні параметри росту НК та одержано зразки поперечними розмірами 0,1 – 100 мкм.

2. Встановлено, що найбільш однорідними за розподілом германію є зразки твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, які відповідають складу $x = 0,03$. За результатами скануючої електронної мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу, вимірюваннями магнітної сприйнятливості показано, що зразки саме такого складу, з поперечними розмірами 10 – 40 мкм, характеризуються найкращою структурною досконалістю, а також максимальною величиною мікротвердості.

3. Обґрунтовано особливості магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ у рамках моделі ланжевенівського суперпарамагнетизму атомів. Оцінено концентрацію магнітних нанокластерів, яка становить 10^9 – 10^{10} см⁻³. Побудовано їх функції

Для того, щоб з'ясувати вплив магнітного поля на параметри вільних носіїв заряду були побудовані залежності $\ln R(1/T)$ при різних значеннях індукції магнітного поля, звідки пораховані енергії активації домішок при цих значеннях поля. При низьких температурах нахил прямої $\ln R(1/T)$ помітно зростає, що свідчить про зростання енергії активації зі збільшенням магнітного поля. При величині поля 10 Тл ця енергія становить 2,5 меВ, тобто вона відчутно більша за енергію активації при відсутності поля (2,1 меВ). Це говорить про те, що при низьких температурах опір зростає з магнітним полем не тільки внаслідок зменшення рухливості вільних носіїв заряду, що є неминучим у цих полях, а й внаслідок магнітопольового зменшення їх

розподілу за величиною магнітних моментів. Обчислено найбільш імовірні розміри і магнітні моменти кластерів, які відповідно змінюються в межах від 2,5 до 30 нм та від $4 \cdot 10^3$ до $1,2 \cdot 10^4$ магнетонів Бора. Встановлено, що магнітна сприйнятливість НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечними розмірами 2 – 40 мкм є типовою для діамантних матеріалів, що свідчить про відсутність у них магнітоактивних дефектів та домішок.

4. Вивчено вплив магнітного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення γ квантами з дозами до $1,2 \cdot 10^{18} \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$ на електричний та магнітоопір НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,008 \div 0,025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ К}$. Встановлено, що опір кристалів несуттєво змінюється у процесі опромінення, тоді як спостерігаються істотні зміни магнітоопору. Показано, що виявлені зміни магнітоопору пов'язані з виникненням дефектів у процесі опромінення, які зумовлюють делокалізацію носіїв заряду у домішковій зоні кристалу. Встановлено, що ниткоподібні кристали твердого розчину $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ можна використовувати для створення високочутливих сенсорів деформації дієдатних у магнітних полях до 4 Тл та опромінення γ -квантами до $3 \cdot 10^{17} \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$.

5. Вивчено вплив протонного опромінення енергією 6,8 МеВ дозами до $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ на електричний та магнітоопір ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з концентрацією домішок поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ К}$ у магнітних полях з індукцією до 14 Тл. З'ясовано механізм провідності при низьких температурах у ниткоподібних кристалах $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, опромінені дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ завдяки серії відпалів. Отримані результати обґрунтовано в рамках висунутого припущення, що опромінення приводить до збільшення концентрації двічі зайнятих носіями домішкових станів, яке супроводжується зростанням провідності кристалів. Відпал зразків, зі свого боку, руйнує ці стани, у результаті чого зменшується провідність по верхній зоні Хаббарда, що спричиняє зростання магнітоопору та зменшення значення від'ємного магнітоопору в інтервалі температур $13 - 30 \text{ К}$.

6. Досліджено вплив протонного опромінення на магнітну сприйнятливість НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. З'ясовано, що опромінення протонами дозами до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ не викликає суттєвих змін магнітної сприйнятливості. Збільшення дози до $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ приводить до утворення диспергованих парамагнітних центрів, а при подальшому збільшенні доз опромінення – до зростання концентрації магнітних нанокластерів. Завдяки серії відпалів показано, що виявлений парамагнетизм зумовлений утворенням в процесі опромінення А-центрів та дивакансій. Визначено концентрацію та розміри нанокластерів, які при дозі опромінення $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ відповідно становлять $1,85 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ та 6 нм.

7. Встановлено, що при опроміненні ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ спостерігається суттєве збільшення опору в усіх досліджуваних зразках, а також значна зміна магнітоопору в низькотемпературній області. Розраховано енергію іонізації домішкових атомів у різних магнітних полях. Доведено, що енергія домішкового рівня практично не залежить від магнітного поля. Виявлено, що істотний магнітоопір при всіх досліджених температурах пов'язаний з магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду (дірок).

8. З'ясовано, що вплив нейтронного опромінення на магнітну сприйнятливість ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ є суттєво меншим (понад 30%) ніж у випадку

монокристалічного кремнію, вирощеного методом Чохральського. Після опромінення $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ у них спостерігається менша парамагнітна складова та концентрація магнітовпорядкованих кластерів. Завдяки серії відпалів показано, що виявлений магнетизм зумовлений утворенням у процесі опромінення нейтронами вторинних радіаційних дефектів типу А-центрів та дивакансій розташованих в області просторового заряду кластера.

9. З аналізу кривих магнітоопору опромінених нейтронами ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ встановлено, що при низьких температурах (поблизу 4,2 К) суттєвий вклад у провідність вносять легкі носії заряду (електрони або легкі дірки), яких є дуже мало і які мають високу рухливість. Рівень, який постачає ці носії заряду має енергію $\varepsilon = 2,1$ меВ і при прикладанні магнітного поля зростає до $\varepsilon = 2,5$ меВ у полі 10 Тл, отже, причиною магнітоопору, крім магнітопольового зменшення рухливості, є також магнітопольове зменшення концентрації вільних носіїв заряду. За більш високих температур (приблизно 40 К) провідність здійснюється дірками енергія активації яких $\varepsilon = 11,5$ меВ, і яка практично не залежить від магнітного поля.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Magnetic susceptibility and magnetoresistance of neutron-irradiated doped Si whiskers. Original Research Article / A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, K. Rogacki, P.G. Litovchenko, N.T. Pavlovskaya, Yu.V. Pavlovskyy, Yu.O. Ugrin // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 393, N. 1. – P. 310–315.
2. Study and simulation of magnetic susceptibility of Si and $\text{Si}_{0,95}\text{Ge}_{0,05}$ whiskers / V.M. Tsmots, P.G. Litovchenko, N.T. Pavlovskaya, Yu.V. Pavlovskyy, I.P. Ostrovskyy // Semiconductors. – 2010. – Vol. 44, No. 5. – P. 623–627. Original russian text published in Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2010. – Vol. 44, N. 5. – P. 649–653.
3. Магнетоспротивление облученных протонами нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ / Н.Т. Павловская, П.Г. Литовченко, А.Я. Карпенко, Ю.О. Угрин, Ю.В. Павловский, А.А. Дружинин, И.П. Островский // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 69–74.
4. Magnetic and magnetoresistive characteristics of neutron-irradiated $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers / P.G. Litovchenko, N.T. Pavlovskaya, Yu.V. Pavlovskyy, Yu.O. Ugrin, G. Luka, I.P. Ostrovskyy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2014. – Vol. 17, N 4. – P. 186–190.
5. Вплив протонного опромінення на фізичні властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge / П.Г. Литовченко, А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, А.Я. Карпенко, Н.Т. Павловська, В.М. Цмоць, Ю.В. Павловський // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 5–8.
6. Вплив опромінення γ -квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, П.Г. Литовченко, Ю.В. Павловський, Н.Т. Павловська, В.М. Цмоць // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 89–92.
7. Радиационная стойкость нитевидных кристаллов SiGe, используемых для сенсоров физических величин / А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.Н.

- Ховерко, П.Г. Литовченко, Н.Т. Павловская, Ю.В. Павловский, В.М. Цмоць, В.Ю. Поварчук // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – №1–2. – С. 10–12.
8. Вплив протонного опромінення на властивості легованих НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ р-типу / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, П.Г. Литовченко, Н.Т. Павловська, Ю.В. Павловський, Р.М. Корецький // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2012. – Т. 13, № 3. – С. 604–606.
 9. Вдосконалення технології вирощування ниткоподібних кристалів кремнію та дослідження їх магнетизму / Цмоць В.М., Литовченко П.Г., Павловський Ю.В. І.П. Островський, Н.Т. Павловська, А.Н. Щупляк // *Нові технології*. – 2008. – С. 113–118.
 10. Magneto-resistance of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers irradiated by reactor fast neutrons / N.T. Pavlovska, P.G. Litovchenko, A.Ya. Karpenko, Yu.O. Uhryn, Yu.V. Pavlovskiy, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko // *Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy: materials the 4-th International Conference. Proceedings*. – Kiev, 2013. – Part II. – P. 547–549.
 11. Структурні та мікромеханічні властивості ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ / П.Г. Литовченко, Н.Т. Павловська, Ю.В. Павловський, І.П. Островський // *Актуальні проблеми фізики, математики та інформатики. Щорічний науковий журнал*. – Дрогобич. – 2014. – №6. – С. 2–6.
 12. Магнетосопротивление облученных протонами нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ / Н.Т. Павловская, П.Г. Литовченко, А.Я. Карпенко, Ю.О. Угрин, Ю.В. Павловский, А.А. Дружинин, И.П. Островский // *Кремний 2012: материалы 9-той международная конференция*. – Санкт-Петербург. – 2012. – С. 185–186.
 13. Влияние облучения протонами и нейтронами на электромагнитные свойства нитевидных кристаллов Si-Ge / Н.Т. Павловская, П.Г. Литовченко, А.Я. Карпенко, А.П. Литовченко, Ю.В. Павловский, Ю.О. Угрин, И.П. Островский, А.А. Дружинин // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 10-ой Международной конференция, 24 – 27 сентября*. – Минск, 2013. – С. 134–136.
 14. Магнетосопротивление облученных нейтронами нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ / Н.Т. Павловская, П.Г. Литовченко, Ю.В. Павловский, Ю.О. Угрин // *Кремний-2014: тезисы докладов X конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, 7-12 июля*. – Иркутск, 2014. – С. 162.
 15. Вдосконалення технології вирощування ниткоподібних кристалів кремнію та дослідження їх магнетизму / В.М. Цмоць, П.Г. Литовченко, Ю.В. Павловський І.П. Островський, Н.Т. Павловська, А.Н. Щупляк // *Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (МЕТІТ-3): тези III Міжнародної науково-практичної конференції*. – Кременчук, 2008. – С. 144–145.
 16. Вплив опромінення γ -квантами на властивості ниткоподібних кристалів / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, В.М. Цмоць, Ю.В. Павловський, Н.Т. Павловська, В.Ю. Поварчук // *Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: матеріали XXII Міжнародної конференції, 18–23 травня*. – Івано-Франківськ, 2009. – Том. 2. – С. 48–49.

17. Радіаційна стійкість ниткоподібних кристалів Si-Ge для сенсорів фізичних величин / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, П.Г. Литовченко, Н.Т. Павловська, Ю.В. Павловський, В.М. Цмоць, В.Ю. Поварчук // Сучасні інформаційні та електронні технології (СИЕТ-2010): твори XI міжнародної науково-практичної конференції, 24 – 28 травня. – Одеса, 2010. – Т. 2. – С. 127.
18. Вплив опромінення γ -квантами на зміни електро- та магнітоопору ниткоподібних кристалів Si-Ge / Н.Т. Павловська, А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, П.Г. Литовченко, В.М. Цмоць, Ю.В. Павловський, В.Ю. Поварчук // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-4): тези доповідей 4-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 28 червня – 2 липня. – Одеса, 2010. – С. 300.
19. Вплив протонного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge / П.Г. Литовченко, А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, А.Я. Карпенко, Н.Т. Павловська, В.М. Цмоць, Ю.В. Павловський // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-4): тези доповідей 4-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 28 червня – 2 липня. – Одеса, 2010. – С. 181.
20. Зміни фізичних параметрів ниткоподібних кристалів SiGe зумовлені радіаційним опроміненням / Н.Т. Павловська, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, Ю.В. Павловський, В.М. Цмоць, П.Г. Литовченко, А.Я. Карпенко, В.Ю. Поварчук // Актуальні проблеми фізики напівпровідників: тези доповідей VII міжнародної школи-конференції, 28 вересня – 1 жовтня. – Дрогобич, 2010. – С. 125–126.
21. The impact of neutron irradiation on the physical parameters of SiGe whiskers / N.T. Pavlovska, P.G. Litovchenko, A.Ya. Karpenko, Yu.V. Pavlovskiy, I.P. Ostrovskiy, Yu.M. Khoverko // Current problem in nuclear physics and atomic energy: materials the 4-th international conference. – Kiev, 2012. – P. 146–147.
22. Апаратно-програмний комплекс до установки для вимірювання магнітної сприйнятливості слабомагнітних матеріалів / В.М. Цмоць, А.Н. Щупляк, Ю.В. Павловський, Н.Т. Павловська // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих учених та студентів. – Тернопіль, 2012. – С. 111.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. Klimovskaya, A.I. Wire-like submicron crystal as a natural heterostructure / A.I. Klimovskaya, I.V. Prokopenko, I.P. Ostrovskii // J. Phys. Condens. Matter. – 2001. – V.13. – P. 5923–5927.
- 2*. Гайдар Г.П. Отжиг радиационных дефектов в кремнии / Г.П. Гайдар // Электронная обработка материалов. – 2012. – 48(1). – С. 93–105.
- 3*. Пат. 87695 України, МПК(2009) H01L 21/66, G01R 31/26. Спосіб визначення основних параметрів, а саме концентрації і рухливості неосновних носіїв заряду в твердих тілах / Угрин Ю.О.; заявник і власник патенту Дрогобицький державний педагогічний університет імені І. Франка. – № а2007 01976; завл. 26.02.2007; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

Анотація

Павловська Н.Т. Вплив опромінення на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню впливу опромінення γ -квантами, протонами і нейтронами на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Методом вирощування з газової фази одержано ниткоподібні кристали $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,08$) з поперечними розмірами 0,1–80 мкм. Виявлено найкращу якість та міцність зразків складу $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ завтовшки 20–40 мкм. Обґрунтовано особливості магнітної сприйнятливості $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різного поперечного розміру.

Встановлено, що зміни магнітоопору $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених γ -квантами, пов'язані делокалізацією носіїв заряду у домішкочній зоні кристалу.

Показано, що парамагнетизм опромінених $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ 6,8 МеВ протонами зумовлений утворенням А-центрів та дивакансій, а істотний магнітоопір – магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду.

За результатами вимірювання магнітної сприйнятливості показано, що ниткоподібні кристали $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ є значно стійкішими до нейтронного опромінення (понад 30%), у порівнянні з монокристалічним кремнієм, вирощеним методом Чохральського. Встановлено, що при температурах поблизу 4,2 К причиною магнітоопору ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ опромінених нейтронами є магнітопольове зменшення рухливості та концентрації вільних носіїв заряду. При більш високих температурах (приблизно 40 К) переважаючим механізмом магнітоопору є магнітопольове зменшення рухливості вільних носіїв заряду.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній-германій, магнітна сприйнятливість, магнітоопір, опромінення.

Аннотация

Павловская Н.Т. Влияние облучения на магнитные и магниторезистивные характеристики нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Южноукраинский национальный педагогический университет имени К.Д. Ушинского, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена исследованию влияния облучения γ -квантами, протонами и нейтронами на магнитные и магниторезистивные характеристики нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ и поиску научных подходов к интерпретации полученных результатов.

Усовершенствовано технологические режимы выращивания нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ методом химических транспортных реакций в бромидной системе. Получено нитевидные кристаллы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ состава $x = 0,01-0,08$ поперечными размерами 0,1–100 мкм. Методом микронзондового анализа установлено, что наиболее однородными по распределению германия являются образцы твердого раствора $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. По результатам сканирующей электронной

микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, измерения магнитной восприимчивости показано, что образцы именно такого состава, поперечными размерами 20–40 мкм, обладают наибольшим структурным совершенством, а также, максимальным значением микротвердости.

Обнаружено особенности магнитной восприимчивости нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ некоторых поперечных размеров. Сделано предположение о наличии в образцах парамагнитных центров, часть которых образует магнитные нанокластеры. Для объяснения полученных экспериментальных результатов предложена модель в рамках ланжевенского суперпарамагнетизма. Построены функции распределения кластеров по величине их магнитных моментов. Определены наиболее вероятные размеры и магнитные моменты кластеров. Установлено, что магнитная восприимчивость нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечными размерами 2–40 мкм типичная для чистых диамагнитных материалов, что может говорить об отсутствии в них магнитоактивных дефектов и примесей.

Исследовано влияние облучения γ -квантами на электропроводность нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Установлено, что сопротивление кристаллов незначительно меняется в процессе облучения, тогда как наблюдаются существенные изменения магнетосопротивления. Показано, что обнаруженные изменения магнетосопротивления связанные с возникновением дефектов в процессе облучения, которые обуславливают делокализацию носителей заряда в примесной зоне кристалла. Предположено, что нитевидные кристаллы твердого раствора $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ можно использовать для создания высокочувствительных сенсоров дееспособных в магнитных полях до 4 Тл и облучения γ -квантами до $3 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$.

Выяснен механизм проводимости при низких температурах в нитевидных кристаллах $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ облученных 6,8 МэВ протонами дозой $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ благодаря серии отжигов. Полученные результаты обосновано в рамках выдвинутого предположения, что облучение приводит к увеличению концентрации дважды занятых носителями примесных состояний, которое сопровождается ростом проводимости кристаллов. Отжиг образцов, в свою очередь, разрушает эти состояния, в результате чего уменьшается проводимость по верхней зоне Хаббарда, что приводит к росту магнетосопротивления и уменьшению значения отрицательного магнетосопротивления в интервале температур 13–30 К.

Показано, что облучение протонами дозой до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ не приводит к изменениям магнитной восприимчивости нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Увеличение дозы до $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ приводит к образованию диспергированных парамагнитных центров, а при дальнейшем увеличении доз облучения – к росту концентрации магнитных нанокластеров. Благодаря серии отжигов показано, что обнаруженный парамагнетизм обусловлен образованием в процессе облучения А-центров и дивакансий. Определены концентрации и магнитные моменты кластеров.

Установлено, что при облученные нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ протонами дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ наблюдается существенное увеличение сопротивления, а также значительное изменение магнетосопротивления в низкотемпературной области. Рассчитана энергия ионизации примесных атомов в различных магнитных полях. Установлено, что энергия примесного уровня практически не зависит от магнитного поля. Показано, что существенное магнетосопротивление при всех исследованных

температурах связано с магнитополевым уменьшением подвижности свободных носителей заряда (дырок).

Установлено, что влияние нейтронного облучения на магнитную восприимчивость нитевидных кристаллов $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ существенно меньше (более 30%), чем в случае монокристаллического кремния выращенного методом Чохральского. После облучения $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ у них наблюдается меньшая парамагнитная составляющая и концентрация магнитоупорядоченных кластеров. Благодаря серии отжигов показано, что обнаруженный магнетизм обусловлен образованием в процессе облучения нейтронами вторичных радиационных дефектов типа А-центров и дивакансий расположенных в области пространственного заряда кластера. Установлено, что при 4,2 К причиной магнетосопротивления $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ облученных нейтронами является магнитополевое уменьшение подвижности и концентрации свободных носителей заряда. При более высоких температурах (около 40 К) преобладающим механизмом магнетосопротивления является магнитополевое уменьшение подвижности свободных носителей заряда.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний-германий, магнитная восприимчивость, магнетосопротивление, облучение.

Abstract

Pavlovska N.T. The influence of irradiation on the magnetic and magnetoresistive characteristics of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers. – Manuscript.

Thesis for a candidate of sciences degree in physics and mathematics. Specialty – 01.04.07 – solid state physics. – South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky, Odessa, 2016.

The thesis is devoted to the research of the influence of irradiation of γ -quanta, protons and neutrons on the magnetic and magnetoresistive characteristics of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers. By the method of growing from the gas phase the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01-0,08$) whiskers with transverse dimensions of 0,1-80 μm were obtained. The best quality and hardness of the samples are revealed for $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ composition of 20-40 μm thick. The peculiarities of the magnetic susceptibility of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ of various cross size are proved.

It is found that the changes of magnetoresistance of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ irradiated by γ -quanta are connected with the delocalization of charge carriers in the impurity zone of the crystal.

It is shown that the paramagnetism of 6,8 MeV proton irradiated $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ is caused by the formation of A-centers and divacancies, while significant magnetoresistance is caused by decrease of the mobility of free charge carriers under the magnetic field.

By the magnetic susceptibility measurement results it is demonstrated that $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers are much more stable to neutron irradiation (over 30%) in comparison with a monocrystalline silicon grown by Czochralski method. It is established that at temperatures nearby 4.2 K the appearance of the magnetoresistance of $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ whiskers irradiated by neutrons is due to reduction of the mobility and concentration of free charge carriers under the magnetic field. At higher temperatures (about 40 K) the dominant mechanism of the magnetoresistance is decreasing the mobility of free charge carriers under the magnetic field.

Keywords: whiskers, silicon-germanium, magnetic susceptibility, magnetoresistance, irradiation.