



ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу **Павловської Надії Тарасівни**
“Вплив опромінення на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ ”,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота Павловської Н.Т. присвячена встановленню особливостей магнітної сприйнятливості та магнітоопору ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, одержаних вирощуванням з газової фази, зумовлених опроміненням γ -квантами, протонами і нейтронами та фізичній інтерпретації виявлених ефектів.

Актуальність теми та її зв'язок з державними науковими програмами. На сьогоднішній день ниткоподібні кристали (НК) завдяки своїм унікальним фізико-механічним властивостям набувають широкого застосування 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. Важливим науково-технічним завданням є створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації (сильні магнітні поля, низькі температури, вплив опромінення). У цьому контексті дисертаційне дослідження Павловської Н.Т. є важливим і **актуальним**.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наукових проєктів, які виконувались в Інституті ядерних досліджень НАН України: «Радіаційні ефекти в напівпровідниках з ізовалентними домішками» (номер державної реєстрації 0106U011410, термін виконання 2007–2011 рр.); «Дослідження гетерних властивостей радіаційних дефектів у напівпровідниках» (номер державної реєстрації 0112U000896, термін виконання 2012–2016 рр.).

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

Перший розділ містить структурно-логічно викладений огляд літератури за темою дисертаційного дослідження. Зроблено аналіз різних 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 Si та Si-Ge з газової фази, проте, з'ясовано, що і цей метод потребує вдосконалення, щоб одержувати матеріали перспективні для сучасної мікро- та наноелектроніки. Обґрунтовано необхідність комплексного дослідження фізичних властивостей НК, починаючи з моменту вирощування зразків і завершуючи виробленням рекомендацій щодо перспектив їх практичного використання. Проаналізовано результати вивчення впливу опромінення електронами на НК Si. Показано, що їх можна використовувати як чутливі елементи сенсорів механічних величин, стійких до дії електронного опромінення з енергією $E = 10 \text{ MeV}$ і флюенсом $\Phi \leq 4 \cdot 10^{17} \text{ ел/см}^2$, проте, невідомо як будуть змінюватися властивості НК Si-Ge під впливом γ -квантів, протонів чи нейтронів. На основі аналізу результатів приведених у літературному огляді сформульовані основні завдання дисертаційного дослідження:

- методом вирощування із газової фази одержати ниткоподібні кристали $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ для високочутливих сенсорів фізичних величин;
- експериментальне дослідження та теоретичне моделювання магнітних властивостей

- ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різного поперечного розміру;
- дослідження впливу опромінення γ -квантами, протонами і нейтронами на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$.

У **другому розділі** приведено опис експериментальних методик (опромінення зразків γ -квантами, протонами та нейтронами, вимірювання магнітоопору на біттерівському магніті, скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу, мікромеханічних досліджень) та розкрито суть удосконалення методу вимірювання магнітної сприйнятливості. Висвітлено результати вирощування НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, дослідження розподілу в них германію та структурних і мікромеханічних властивостей цих кристалів.

Ниткоподібні кристали Si-Ge вирощувалися методом хімічних транспортних реакцій у закритій бромідній системі. Встановлено, що найбільш ефективно і стабільне масоперенесення створюється при різниці температур між зоною розчинення і зоною кристалізації $\Delta T = 200\text{--}350^\circ\text{C}$. Показано, що при підвищенні температури кристалізації від 750°C до 900°C морфологія мікрочасток змінюється від тонких квазіциліндричних $d = 0,1\text{--}1\text{ мкм}$ до шестигранних голкоподібних НК $d = 3\text{--}80\text{ мкм}$.

Встановлено, що найбільш однорідними НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ за вмістом германію є НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Дослідження мікромеханічних властивостей показали, що зразки саме такого складу характеризуються максимальною величиною мікротвердості.

Методом скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу досліджено структурну досконалість НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Показано, що найбільш досконалими є кристали поперечними розмірами $2\text{--}40\text{ мкм}$, які можуть мати перспективу подальшого практичного використання.

У **третьому розділі** приведено результати дослідження магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ різних поперечних розмірів ($0,1\text{--}80\text{ мкм}$). Виявлено особливості магнітних властивостей зразків з поперечними розмірами менше 1 мкм та більше 40 мкм . Цим зразкам притаманні нелінійні залежності магнітної сприйнятливості від напруженості магнітного поля. Зроблено припущення про те, що виявлені нелінійності пов'язані з наявністю у зразках нанокластерів суперпарамагнітної природи. Тобто, магнітні моменти таких кластерів у $10^3\text{--}10^5$ разів більші від магнітних моментів окремих атомів. Виходячи з цього, запропоновано функціональну залежність якою можна описати спостережувані особливості магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. На основі запропонованої теоретичної моделі визначено концентрації впорядкованих магнітних нанокластерів та кількість парамагнітних центрів в одному такому кластері. Для врахування розподілу кластерів за величиною магнітних моментів, авторкою введено функцію розподілу, завдяки чому 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 $2,5\text{ нм}$ 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.

Магнітна сприйнятливість зразків $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечними розмірами $2\text{--}40\text{ мкм}$ виявилася типовою для чистих діаманетиків, що підтверджує їх структурну досконалість та визначає, як об'єкт подальшого дослідження впливу іонізуючого опромінення.

У **четвертому розділі** наведено результати досліджень впливу магнітного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення γ -квантами на електричні та магніторезистивні характеристики НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,008\text{ Ом}\cdot\text{см} \div 0,025\text{ Ом}\cdot\text{см}$ в інтервалі температур $4,2\text{ К} \div 300\text{ К}$. Зафіксовано несуттєві зміни у температурних залежностях електричного опору та істотні зміни магнітоопору в процесі опромінення. Показано, що виявлені зміни магнітоопору пов'язані з виникненням дефектів у процесі опромінення, які зумовлюють делокалізацію носіїв заряду у домішковій зоні кристалу. Завдяки дослідженням дозових залежностей електричного та магнітоопору 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 $3 \cdot 10^{17}\text{ кВ}/\text{см}^2$.

У **п'ятому розділі** приведено результати дослідження впливу протонного опромінення енергією 6,8 MeV дозами до $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ на магнітні, електричні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з концентрацією домішок поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі температур 4,2 К – 300 К, у магнітних полях з індукцією до 14 Тл.

Встановлено, що опромінення протонами дозами до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ не викликає суттєвих змін магнітної сприйнятливості, збільшення дози до $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ приводить до утворення диспергованих парамагнітних центрів, а при подальшому збільшенні доз опромінення – до зростання концентрації магнітних нанокластерів. Завдяки серії термічних відпалів в інтервалі $100^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ показано, що виявлений парамагнетизм зумовлений утворенням у процесі опромінення А-центрів та дивакансій. Визначено концентрацію та розміри нанокластерів, які при дозі опромінення $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ відповідно становлять $1,85 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ та 6 нм.

Завдяки серії термічних відпалів при 100°C та 280°C з'ясовано механізм провідності при 4,2 К в НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, опромінених дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Отримані результати обґрунтовано збільшенням концентрації двічі зайнятих основними носіями домішкових станів, яке супроводжується зростанням провідності кристалів.

При опроміненні НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ 6,8 MeV протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ виявлено суттєве збільшення електричного опору, а також значні зміни магнітоопору в низькотемпературній області. Розраховано енергію іонізації домішкових атомів у різних магнітних полях (0 – 8 Тл). Встановлено, що енергія домішкового рівня практично не залежить від величини магнітного поля. Показано, що суттєвий магнітоопір в температурному діапазоні 40 К – 90 К пов'язаний з магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду.

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

Встановлено, що при 4,2 К причиною магнітоопору опромінених нейтронами ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, крім магнітопольового зменшення рухливості, є також магнітопольове зменшення концентрації вільних носіїв заряду. При температурах порядку 40 К переважаючим механізмом магнітоопору виступає магнітопольове зменшення рухливості вільних носіїв заряду.

Практична цінність результатів робіт пов'язана з можливістю застосування ниткоподібних кристалів Si-Ge 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 $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Одержані результати 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.

Обґрунтованість та достовірність отриманих у дисертаційному дослідженні результатів забезпечується застосуванням сучасних апробованих експериментальних методів досліджень, таких як скануюча електронна мікроскопія та рентгеноспектральний мікроаналіз, низькотемпературні дослідження електричного та магнітоопору, вимірювання магнітної сприйнятливості та мікромеханічні випробовування, а також підтверджується ретельно зробленими викладами у тексті дисертації. У рамках застосованих теоретичних моделей наукові положення та висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є цілком обґрунтованими.

Повнота викладання основних результатів у наукових фахових виданнях. Основні результати дисертаційної роботи в повній мірі опубліковано в 10 статтях: у 3 зарубіжних журналах, 2 з яких належать до науково-метричної бази даних SCOPUS; 6 статтях у фахових журналах України; 1 статті в інших наукових виданнях України. Результати роботи пройшли апробацію на 12 Міжнародних та Всеукраїнських конференціях.

Зауваження по змісту та оформленню дисертації та автореферату

1. У третьому розділі представлено результати дослідження магнітної сприйнятливості ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ різних поперечних розмірів (0,1 мкм – 80 мкм), проведено численні математичні моделювання та запропоновано фізичну інтерпретацію виявлених особливостей магнітної сприйнятливості. Однак, на мою думку, для з'ясування природи магнетизму більш інформативними були б дослідження низькотемпературні (до гелієвих температур) залежності магнітної сприйнятливості.
2. У роботі проведено значну кількість експериментів по дослідженню впливу γ -квантів, протонів і нейтронів на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$. Запропоновано фізичну інтерпретацію одержаних результатів, проте, не повністю розкрито фізичні механізми радіаційного дефектоутворення при різного роду опроміненні.
3. У роботі приводяться результати дослідження польової залежності магнітоопору опромінених протонами ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$, на яких спостерігаються його від'ємні значення (рис. 5.7, 5.11), однак, не до кінця розкрито фізичну природу цього явища.
4. У п'ятому розділі, при вивченні впливу опромінення швидкими нейтронами доречно було б підібрати різні дози та зробити порівняння з протонним опроміненням.

Зазначені зауваження не впливають істотно на отримані авторкою результати та на загальну високу оцінку дисертаційної роботи.

Загальні висновки щодо дисертації. Дисертація логічно і чітко структурована та написана грамотною науковою мовою. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Публікації та автореферат повністю відображають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація Павловської Н.Т. є завершеною науковою працею, яка вирішує конкретне завдання фізики твердого тіла: встановлення особливостей магнітних та магніторезистивних характеристик ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ – перспективного конструкційного матеріалу мікросенсорики, стійкого до полів ефективного зовнішнього впливу.

Враховуючи актуальність обраної теми, значний об'єм виконаних експериментальних досліджень, наукову новизну, практичну цінність та обґрунтованість отриманих наукових результатів, вважаю, що дисертаційна робота цілком відповідає вимогам МОН України, що ставляться до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам 9, 11 та 12.2 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567, а її авторка Павловська Надія Тарасівна, без сумніву, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри загальної фізики
Дрогобицького державного педагогічного
університету імені Івана Франка

Пелешак Р.М.

Підпис Пелешака Р.М. засвідчую:
проректор з наукової роботи
Дрогобицького державного педагогічного
університету імені Івана Франка, професор



Пантюк М.П.

11.02.2016.