

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

Актуальність теми

За останні десятиліття кількість публікацій, присвячених проблемам синтезу та дослідженню фізичних властивостей ниткоподібних мікро- і нанокристалів, зросла приблизно в рази. Причиною цього є різке підвищення інтересу дослідників до проблем отримання та практичного використання ниткоподібних кристалів (НК), обумовлене відкриттям нових перспектив їх застосування у приладобудуванні, зокрема, сенсорів механічних величин, а також розробкою методів синтезу та характеристики нанорозмірних кристалічних структур. У 2008 році ниткоподібні кристали включені до Міжнародної шляхової карти розвитку технологій напівпровідників, як один з найбільш перспективних напрямків розвитку електроніки на найближчі 10 років. У рамках Європейського Союзу розпочато проект переведення технологій НК з дослідницького рівня на рівень технологій індустріалізації. У даний час ниткоподібні кристали відомі не тільки як об'єкт з незвичайною морфологією, але головним чином як об'єкт з унікальними властивостями, які набувають нових цікавих застосувань.

Дослідження залежності електропровідності та магнітних властивостей від дії зовнішнього радіаційного опромінення, магнітного поля, температури дає додаткову інформацію про природу дії домішкової провідності сильнолегованих кристалів із концентрацією домішки поблизу переходу метал-діелектрик, і є одним із методів пояснення характеру провідності напівпровідникових НК в області криогенних температур, зокрема транспорту носіїв заряду в НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, що є актуальною науковою проблемою, оскільки на основі цього можна пояснити фізичні процеси, на яких базується робота, наприклад, сенсорів, а також прогнозувати їх характеристики та параметри.

Виходячи з вище сказаного, тема дисертаційного дослідження, присвяченого цим проблемам, є актуальною. Підтвердженням цьому є, також, і те, що вона виконувалась у рамках наукових проектів Інституту ядерних досліджень НАН України: «Радіаційні ефекти в напівпровідниках з ізовалентними домішками», № ДР 0106U011410, 2007–2011 рр.; «Дослідження гетерних властивостей радіаційних дефектів у напівпровідниках», № ДР 0112U000896, 2012–2016 рр.

Наукова новизна отриманих результатів

Експериментальні результати даного дисертаційного дослідження є оригінальними і новими. Зокрема:

1. Встановлено, що однорідний розподіл германію в НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ та відсутність домішок у кристалах з поперечними розмірами 10–40 мкм забезпечують найкращу якість та міцність зразків, що визначає перспективи їх практичного використання.

2. Обґрунтовано особливості магнітної сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, різного поперечного розміру, в рамках моделі ланжевенівського парамагнетизму 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 $1,2 \cdot 10^{18} \text{ r}_{\text{KB}}/\text{cm}^2$, пов'язані з виникненням радіаційних дефектів, які зумовлюють делокалізацію носіїв заряду в домішкській зоні кристалу.

4. Вивчено вплив опромінення протонами та швидкими нейтронами на магнітну сприйнятливості НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Встановлено, що опромінення дозами до $5 \cdot 10^{15} \text{ r}/\text{cm}^2$ призводить до утворення диспергованих парамагнітних центрів, а при подальшому збільшенні доз опромінення – до зростання концентрації магнітних нанокластерів. Показано, що виявлений парамагнетизм зумовлений утворенням А-центрів та вакансій локалізованих в області утворених нанокластерів. Встановлено, що вплив нейтронного опромінення на магнітну сприйнятливості ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ є значно меншим (понад 30%) ніж у випадку монокристалічного кремнію, вирощеного методом Чохральського.

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

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблено апаратно-програмний комплекс до установки для вимірювання магнітної сприйнятливості слабوماгнітних матеріалів за методом Фарадея, що дало можливість суттєво зменшити систематичні 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 $3 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$ та 6,8 MeV протонами до $1 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$.

Результати, одержані у дисертаційному дослідженні, можуть бути корисними в технологіях вирощування мікро- та нанокристалів, виготовлення на їх основі елементів електронних приладів, датчиків, сенсорів, які б надійно працювали в сильних магнітних полях, при низьких температурах, під впливом іонізуючого опромінення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі

Сформульовані в роботі висновки та наукові положення ґрунтуються на детальному аналізі новітньої наукової літератури за темою дисертації, на експериментальних даних, які одержано з використанням відомих апробованих методів (скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу, мікрозондового аналізу, вимірювання магнітоопору на біттерівському магніті, вимірювання магнітної сприйнятливості матеріалів за методом Фарадея та інші), використанні фізичного та математичного моделювання на персональному комп'ютері з використанням пакетів прикладних програм. Одержані експериментальні дані та проведені теоретичні розрахунки є взаємоузгодженими, що свідчить про достовірність результатів роботи.

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано в 22 працях, з яких: 3 статті у зарубіжних журналах, з них 2 у міжнародній наукометричній базі даних Scopus; 6 статей у фахових виданнях України; 1 стаття в інших наукових виданнях України; 3 праці у матеріалах зарубіжних конференцій; 9 – у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

Аналіз змісту дисертації

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

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження, викладені наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, наведені дані про особистий внесок здобувача, публікації та апробацію наукових результатів.

Перший розділ є оглядовим. У ньому наведено аналіз різних методів вирощування ниткоподібних кристалів та області їх практичного застосування. Детально проаналізовано фізичні властивості НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ одержаних вирощуванням з газової фази, результати впливу на них низьких температур, деформацій, магнітних полів та опромінення електронами. Показано,

перспективи їх використання в якості чутливих елементів сенсорів фізичних величин.

У **другому розділі** описано методики експериментальних досліджень, опромінення γ -квантами, протонами і швидкими нейтронами реактора. Представлено розробку апаратно-програмного комплексу до установки для вимірювання магнітної сприйнятливості слабомагнітних матеріалів за методом Фарадея. Наведено результати вирощування ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, визначення розподілу в них германію, дослідження структурних та мікромеханічних властивостей. Показано, що найбільш однорідними за вмістом германію є НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ і саме вони характеризуються максимальною величиною мікротвердості. За результатами скануючої електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу встановлено, що найбільш досконалими є кристали $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечними розмірами 2–40 мкм.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження магнітної сприйнятливості за методом Фарадея ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ поперечними розмірами від 100 нм до 80 мкм. Підтверджено структурну досконалість НК товщиною 2–40 мкм. На зразках менше 1 мкм та більше 40 мкм виявлено нелінійні залежності магнітної сприйнятливості від напруженості магнітного поля. Виконано теоретичне моделювання виявлених особливостей в рамках ланжевенівського парамагнетизму атомів. Приведено численні математичні розрахунки з використанням пакетів прикладних програм. У результаті, оцінено концентрації впорядкованих магнітних нанокластерів та їх розміри, побудовано функції розподілу кластерів за величиною магнітних моментів.

Четвертий розділ присвячено вивченню впливу магнітного поля з індукцією до 14 Тл та опромінення γ -квантами (випромінювання Co^{60}) з дозами до $1 \cdot 10^{18} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$ на електропровідність ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з питомим опором $\rho = 0,08\text{--}0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в інтервалі температур 4,2–300 К. Встановлено, що опір кристалів практично не змінюється в процесі опромінення дозами до $3 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$, натомість спостерігаються істотні зміни магнітоопору в залежності від концентрації легуючої домішки, які пояснюються делокалізацією носіїв заряду у домішкській зоні кристалу.

У **п'ятому розділі** дисертації викладено результати вивчення впливу опромінення протонами та швидкими нейтронами реактора на магнітну сприйнятливість, електричний та магнітоопір ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ в інтервалі температур 4,2–300 К і магнітних полів до 14 Тл. Показано наявність парамагнітних центрів та нанокластерів, пов'язаних з радіаційними дефектами, оцінено їх концентрацію та розміри. Виявлено суттєве зменшення опору кристалів у температурній області 4,2–40 К після опромінення 6,8 МеВ протонами дозою $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$ та незначні зміни магнітоопору в магнітних полях 10–14 Тл. Після опромінення протонами дозою $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$ і швидкими нейтронами дозою $8,6 \cdot 10^{17} \text{ n}/\text{см}^2$, виявлені суттєві зміни електричного та магнітоопору в широкому температурному діапазоні. Встановлено, що зміни магнітоопору НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, опромінених протонами, пов'язані з

магнітопольовим зменшенням рухливості вільних носіїв заряду (дірок), а НК, опромінених швидкими нейтронами, крім того й з магнітопольовим зменшенням їх концентрації.

Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату

1. У назві роботи слід було б конкретизувати вид опромінення, а також відобразити дослідження електричних властивостей, що має місце у дисертації (розділи 4,5).
2. У 3 розділі дисертації, при побудові функції розподілу кластерів за величиною їх магнітних моментів, не поясненим є фізичний зміст параметрів n , σ , $\langle M \rangle$.
3. У 4 розділі представлено результати дослідження впливу опромінення γ -квантами на магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ з різним ступенем легування. Встановлено, що в більш легуваних зразках магнітоопір зменшується після опромінення (рис. 4.3), у той час як у менш легуваних зразках магнітоопір опромінених ниткоподібних кристалів зростає в сильних магнітних полях, а в слабких полях спостерігається поява від'ємного магнітоопору (рис. 4.4). Авторкою запропоновано інтерпретацію одержаних результатів, проте, на мою думку, не до кінця розкрито фізичну природу виявлених особливостей.
4. § 4.2 присвячений дослідженням радіостійкості сенсорів деформації на НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Однак сенсор як такий по суті не описується, не наводиться його конструкція, не показана поведінка, зокрема, залежність від дози опромінення, температури і інших фізичних чинників, характеристик, параметрів інших елементів сенсора. До прикладу, руйнування клеєвого кріплення НК до підкладки під дією зовнішніх чинників робить його недеформованим (с. 88 дисертації).
На рис. 4.9 с. 90 не розшифровано позначення характеристики по осі абсцис і не вказано одиниць вимірювання.
5. У п'ятому розділі приводяться результати дослідження впливу опромінення швидкими нейтронами на магнітоопір ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$. Виявлені особливості пояснюються високою рухливістю легких носіїв заряду. Вважаю, що для підтвердження висунутої гіпотези доречно було б провести більш детальні експериментальні дослідження.
6. У тексті дисертації зустрічаються технічні помилки та опечатки, наприклад: с. 99 у підписі до рис. 5.10 фігурують три криві, а на графіку їх дві; на с. 121 у висновку 2 замість $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, очевидно, повинно бути $5 \cdot 10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$; у розмірностях p^+/cm^2 знак « \leftrightarrow » є зайвим.
7. Мають місце також орфографічні помилки і некоректні означення, наприклад, “вимірювання магнітних властивостей” (с. 12 автореферату, 3-ій абзац), “зміна кривизни опору”, “точка перегину магнітоопору” (с. 12 автореферату, 4-ий абзац).

Вказані зауваження, однак, не зменшують суттєво загалом високого наукового рівня і практичного значення роботи.

Висновки про відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертація Павловської Н.Т. є завершеним науковим дослідженням, що має вагомим науковим і практичним значенням. Сформульовані висновки повністю відображають основні положення, які виносяться на захист.

Вважаю, що авторка виконала поставлені перед нею завдання. Результати дисертаційного дослідження повною мірою висвітлені у відомих зарубіжних та вітчизняних виданнях, добре апробовані на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях. Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертації.

Вважаю, що за актуальністю теми, об'ємом виконаних робіт, науковою новизною та практичною цінністю одержаних результатів і висновків дисертаційна робота Павловської Н.Т. "Вплив опромінення на магнітні та магніторезистивні характеристики ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ " відповідає всім вимогам п.п. 9, 11 і 12.2 положення "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 заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент
директор Міжвідомчого науково-
навчального фізико-технічного
центру МОН та НАН України
при Одеському національному
університеті імені І.І. Мечникова
доктор фіз.-мат. наук, професор

Підпис Лепіха Я.І. засвідчую
Вчений секретар, к.х.н., доц.



Handwritten signature of Y.I. Lepik

Лепіх Я.І.

Handwritten signature of S.V. Kurando
17.02.2016

Курандо С.В.