

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

ЛЯХ-КАГУЙ НАТАЛІЯ СТЕПАНІВНА



УДК 621.315.592; 537.63

**ЕЛЕКТРО- І МАГНІТОТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ БАЗОВИХ
СЕНСОРНИХ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si, Ge, InSb, GaSb
В ОКОЛІ ПЕРЕХОДУ МЕТАЛ-ДИЕЛЕКТРИК**

01.04.07 – фізика твердого тіла

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Дружинін Анатолій Олександрович
Національний університет «Львівська політехніка»
завідувач кафедри напівпровідникової електроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Хрипунов Геннадій Семенович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
проректор з науково-педагогічної роботи;

доктор фізико-математичних наук, професор
Євтух Анатолій Антонович,
Інститут фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України,
завідувач лабораторії фізики адсорбційних та
поверхневих ефектів у напівпровідникових
і тонких плівках;

доктор технічних наук, професор
Ціж Богдан Романович,
Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького,
завідувач кафедри загально-технічних дисциплін і
контролю якості продукції.

Захист відбудеться « 05 » грудня 2019 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий « 01 » листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13
доктор фізико-математичних наук, професор



Д.М. Заячук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток мікроелектроніки та сенсорної техніки невід'ємно пов'язаний зі створенням нових функціональних матеріалів на основі напівпровідників у вигляді 1D і 2D наноструктур, удосконаленням технологій їх отримання та прогнозуванням наперед заданих фізичних властивостей, в т.ч за впливу зовнішніх полів.

Сьогодні найбільша увага приділяється вивченню мікро- та нанокристалів Si, Ge та сполук A₃B₅, що зумовлено простотою технологічного процесу їх вирощування, низькою вартістю вихідної сировини, широким спектром практичного застосування та можливістю роботи в широкому інтервалі температур. Одновимірні кристали Si і Ge, вирощені у формі ниток, мають досконалу кристалічну структуру і є ідеальним матеріалом для спостереження квантових ефектів при криогенних температурах. В напівпровідникових одновимірних кристалах з проміжним та високим рівнем легування спостерігаються особливості магнітоопору та п'єзомагнітоопору (осциляції Шубнікова – де Гааза, магнітофононні осциляції, тощо) внаслідок квантування носіїв заряду при низьких температурах. Окрім цього, завдяки своїй унікальній формі, розмірам, високій пружності та механічній міцності, що пояснюється структурною досконалістю, ниткоподібні кристали усе ширше застосовуються в різних галузях практичної діяльності людини (авіаційна, ракетно-космічна, медична, транспорт, телекомунікації тощо). Ниткоподібні кристали є перспективною елементною базою для сенсорної електроніки, які завдяки своїм особливостям морфології, можливості контрольованого легування, механічній міцності, мініатюрності та гнучкості технології їх виготовлення, дозволяють створити на їх основі численні сенсори фізичних величин, зокрема, механічних, а також сенсори температури та магнітного поля з наперед заданими параметрами і характеристиками.

Важливою науково-технічною проблемою, яка на сьогодні залишається не розв'язаною, є розроблення концепції створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації (сильні магнітні поля, низькі температури, вплив опромінення, тощо) на основі виявлених у досліджуваних напівпровідникових ниткоподібних кристалах кінетичних ефектів. На сучасному етапі нагромаджено значний теоретичний і експериментальний матеріал з досліджень електрофізичних, термодинамічних, гальваномагнітних властивостей ниткоподібних кристалів базових сенсорних напівпровідників (Si, Ge, InSb, GaSb). При цьому невирішеними є ще низка проблем, зокрема вивчення кінетичних ефектів у ниткоподібних кристалах Si, Ge, антимонідів галію та індію з концентрацією легуючої домішки в околі переходу метал-діелектрик (ПМД) при низьких температурах, що стимулює проведення комплексних досліджень електро- та магнітотранспортних властивостей таких структур за впливу деформації для створення пристроїв сенсорної електроніки на їх основі. Розширення фізичних уявлень про механізми переносу носіїв заряду в легованих напівпровідникових ниткоподібних кристалах, легованих в околі ПМД, при низьких температурах, в сильних магнітних полях та за впливу електронного опромінення дозволить розробити концепцію створення надчутливих радіаційно

стійких п'езорезистивних сенсорів, а також сенсорів теплових величин, дієздатних в екстремальних умовах експлуатації (електронне опромінення, сильні магнітні поля, низькі температури), які можуть знайти застосування в різних галузях науки і техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”. Дисертація виконана в межах держбюджетних НДР Міністерства освіти і науки України: “Дослідження низькотемпературних деформаційно-стимульованих ефектів у напівпровідникових мікрочастинках і структурах та розробка сенсорів на їх основі”, (2004–2005 рр., № держреєстрації 0104U002303); „Дослідження низькотемпературних характеристик напівпровідникових мікрочастинки і структур в полях ефективного зовнішнього впливу для створення сенсорів”, (2006–2007 рр., № держреєстрації 0106U001337); „Транспорт носіїв заряду та деформаційно-стимульовані ефекти у легованих мікрочастинках та структурах під впливом зовнішніх збурень”, (2008–2010 рр., № держреєстрації 0108U000325); „Розробка наукових основ і технологічних методів створення перетворювачів на базі мікро- і наноструктур кремнію для інформаційних систем”, (2011–2012 рр., № держреєстрації 0111U001226); „Розроблення нових датчиків фізичних величин на основі легованих мікро- і наночастинки кремнію для інформаційно-вимірювальних систем”, (2013–2014 рр., № держреєстрації 0113U0001361); „Розроблення багатофункційних перетворювачів на основі мікро- і наноструктур кремнію для інформаційно-вимірювальних систем”, (2015–2016 рр., № держреєстрації 0115U000445); „Перетворювачі фізичних величин на основі напівпровідникових мікро- і наноструктур як елементи мікросистемної техніки інформаційно-вимірювальних систем”, (2017–2019 рр., № держреєстрації 0117U004457); „Двовимірні періодичні наноструктури кремнію для МЕМС-сумісних інтегрованих мікроперетворювачів”, (2018–2020 рр., № держреєстрації 0118U000271), а також у рамках міжнародної наукової співпраці за 2005–2015 рр. із Міжнародною лабораторією сильних магнітних полів і низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

Мета роботи: вивчення електро- та магнітотранспортних властивостей базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, антимонідів індію і галію з різним рівнем легування домішки в околі переходу метал-діелектрик за ефективного впливу зовнішніх полів (магнітного, температурного, деформаційного та радіаційного) для створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- провести комплексне дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb і GaSb у широкому інтервалі температур $1,4 \div 300$ К та магнітних полів $0 \div 14$ Тл, що може бути використано для створення пристроїв сенсорної електроніки;
- розширити фізичні уявлення щодо механізмів переносу носіїв заряду при низьких температурах та деформаційно-стимульованих ефектів у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb, легованих в околі ПМД за впливу зовнішніх полів;

- з'ясувати характер змін електро- та магнітотранспортних властивостей досліджуваних базових сенсорних ниткоподібних кристалів за дії зовнішніх полів, що уможливить спрогнозувати характеристики напівпровідникових матеріалів для використання у сенсорній електроніці;
- дослідити вплив зовнішніх полів (деформації, магнітного поля, електронного опромінення, температури) на характеристики чутливих елементів сенсорів механічних, теплових і магнітних величин;
- розробити концепцію та створити елементну базу пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb, дієздатних у складних умовах експлуатації (кріогенні температури, сильні магнітні поля, опромінення високоенергетичними електронами), які зможуть знайти застосування в різних галузях науки і техніки, зокрема, в авіакосмічній і кріогенній техніці, кріоенергетиці та ін.

Об'єкт дослідження. Ниткоподібні кристали кремнію, германію, антимонідів індію та галію з різною концентрацією легуючої домішки, а також чутливі елементи сенсорів теплових, механічних і магнітних величин, створені на їх основі.

Предмет дослідження. Електро- та магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb із різним рівнем легування домішки за ефективного впливу температурного, деформаційного та радіаційного полів, а також характеристики чутливих елементів сенсорів фізичних величин, створених на їх основі, дієздатних у складних умовах експлуатації.

Методи дослідження. Для контролю якості та придатності ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb для дослідження їх електро- та магнітотранспортних характеристик використовували атомно-силову та електронну мікроскопію – мікроскоп AFM ІФН НАНУ, м. Київ та сканувальні електронні мікроскопи Hitachi SEM S806, JEOL JSM-U3. Опромінення зразків Si р-типу провідності високоенергетичними електронами здійснювалось при кімнатній температурі на імпульсному прискорювачі електронів Мікротрон М-30 в Інституті електронної фізики НАН України, м. Ужгород. Вимірювання електричного опору ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb при низьких температурах проводилось у гелієвому кріостаті типу ГКОП із використанням сучасних цифрових метрологічних засобів, зокрема Keithley 224, Keithley 2010. Перевірка магнітотранспортних характеристик ниткоподібних кристалів проводилась із використанням DC та AC режимів, які забезпечували ідентичні результати, що свідчить про уникнення ефектів паразитних термо-е.р.с., контактної різниці потенціалів, можливих деформаційних напружень при контактній області кристалів, що відкриває можливості їх застосування для створення чутливих елементів сенсорів. Магнітна сприйнятливість зразків GaSb вимірювалась SQUID магнітометром MPMS-XL5 із цифровим підключенням до ПК. Магнітоопір зразків у полях $0 \div 14$ Тл при кріогенних температурах вивчали за допомогою біттерівського і надпровідного магнітів у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур, м. Вроцлав, Польща.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше встановлено зв'язок та виявлено кореляцію між особливостями зміни електро- і магнітотранспортних властивостей базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb з різною концентрацією легуючої домішки в широкому інтервалі температур, які покладені в основу концепції розроблення перетворювачів фізичних величин на їх основі. Новими є такі наукові результати:

1. На основі експериментальних досліджень польових залежностей магнітоопору в області криогенних температур виявлено осциляційний ефект у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb, який в залежності від концентрації легуючої домішки в околі ПМД пов'язаний із магнітофононими осциляціями чи осциляціями Шубнікова – де Гааза, що дозволило оцінити енергії фононів та циклотронні ефективні маси носіїв заряду в зразках.

2. Встановлено індукований магнітним полем ПМД у ниткоподібних кристалах InSb, легованих оловом до концентрації, що відповідає близькості до переходу, зумовлений сильною спіно-орбітальною взаємодією, що приводить до розщеплення кожного піку поздовжнього і поперечного магнітоопору в усьому діапазоні полів $0 \div 14$ Тл і отримання гігантських значень g-фактора Ланде, який в залежності від значення індукції магнітного поля становить $g^* = 46 \div 60$.

3. Вперше встановлена наявність поверхневої надпровідності при критичній температурі 4,2 К у ниткоподібних кристалах GaSb n-типу провідності з концентрацією легуючої домішки $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, яка зумовлена сильною спіно-орбітальною обмінною взаємодією носіїв заряду в металевій фазі в околі ПМД. На основі вивчення польових залежностей намагніченості встановлено, що ниткоподібні кристали GaSb є надпровідниками другого роду з визначеними верхнім і нижнім критичними полями $B_{c2} = 1,1$ Тл та $B_{c1} = 50$ мТл, відповідно.

4. Вперше виявлено ефект Кондо, який проявляється на температурних залежностях опору при температурі 30 К у ниткоподібних кристалах GaSb із концентрацією телуру $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і зумовлений обмінною взаємодією між локалізованими на атомах домішки електронами та вільними носіями заряду, що приводить до пригнічення ефекту надпровідності та є важливим для пояснення механізмів переносу носіїв заряду при низьких температурах.

5. Встановлено, що перехід від ефекту слабкої антилокалізації до слабкої локалізації носіїв заряду реалізується в інтервалі температур $3 \div 4,2$ К у слабких магнітних полях з індукцією до 1 Тл зумовлений зміною з температурою співвідношення між часом збою фази та часом спінової релаксації електронів у сильно легованих телуrom ниткоподібних кристалах GaSb із металевим ходом провідності.

6. Показано, що виявлений у слабких магнітних полях від'ємний магнітоопір ниткоподібних кристалів Si та GaSb описується двовимірною моделлю слабкої локалізації, що дозволило визначити параметр Рашби спіно-орбітальної взаємодії носіїв заряду $\alpha = 5 \times 10^{-15} \text{ eV} \times \text{м}$ та $\alpha = 1,66 \times 10^{-12} \text{ eV} \times \text{м}$, відповідно.

7. Вперше встановлена поява фази Беррі в польових залежностях магнітоопору при температурі 4,2 К деформованих ниткоподібних кристалів InSb та GaSb n-типу провідності, зумовлена сильною спіно-орбітальною взаємодією носіїв заряду в області ПМД, що підтверджує двовимірну природу електронного газу та

деформайційно-індукований перехід зразків у стан топологічного ізолятора.

8. Виявлено, що за впливу деформації в ниткоподібних кристалах GaSb відбувається розщеплення піків осциляцій Шубнікова – де Гааза, що дозволило отримати гігантські значення g-фактора Ланде, який становить $g^* = 53$, а також зумовлює зменшення ефективної маси електронів, підвищення температури Дінгла, пригнічення ефектів надпровідності та слабкої локалізації в досліджуваних зразках.

Практичне значення одержаних результатів дисертації полягає у тому, що результати комплексного дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb за впливу зовнішніх полів були використані в сенсорній електроніці, зокрема:

- розроблено тензорезистори на основі ниткоподібних кристалів Ge та GaSb як n-, так і p-типу провідності з відповідним рівнем легування домішки, які характеризуються високою тензочутливістю та слабкою температурною залежністю їх коефіцієнта тензочутливості, які рекомендовано для вимірювань у різних робочих діапазонах температур і деформацій;

- створено датчики гідростатичного тиску на основі спеціально легованих ниткоподібних кристалів GaSb n-типу провідності; завдяки високій чутливості до гідростатичного тиску, такі датчики можуть застосовуватись для вимірювання високих тисків (до 5 кбар) робочих рідин гідравлічних систем.

- встановлений деформаційно-індукований ефект гігантського магнітоопору, що досягає 720 % у магнітних полях з індукцією до 10 Тл при температурі 4,2 К, у ниткоподібних кристалах InSb із концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, відкриває перспективи створення на їх основі сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

- встановлено, що у багатофункційних сенсорах (температури, деформації, магнітного поля) придатні ниткоподібні кристали Si та Ge з концентрацією легуючої домішки $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а використання тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів InSb з концентрацією олова $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ як чутливих елементів магнітного поля дозволить істотно підвищити чутливість сенсора в інтервалі температур $4,2 \div 70 \text{ К}$ і досягти незалежності магнітоопору від температури в діапазоні магнітних полів з індукцією $0 \div 7 \text{ Тл}$.

- показано, що опромінення електронами з енергією 10 MeV і флюенсом $1 \times 10^{18} \text{ ел/см}^2$ не зумовлює зміни коефіцієнта тензочутливості при температурі рідкого гелію у ниткоподібних кристалах Si, легованих бором до концентрації $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, що відкриває перспективи створення на їх основі радіаційностійких сенсорів механічних величин, дієдатних в області криогенних температур.

Новизну практичних розробок захищено патентами України.

Виготовлені чутливі елементи сенсорів деформації, температури та магнітного поля використовуються при виконанні науково-дослідних робіт із госпдогвірної і держбюджетної тематики у лабораторії сенсорної електроніки, а також у навчальному процесі кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”, НВП «Електрон-Карат»-ДП ПрАТ «Концерн-Електрон».

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів. У зазначених роботах здобувачу належить: дослідження впливу опромінення високоенергетичними електронами на магнітоопір та електропровідність зразків Si за низьких температур [1, 2, 36, 38, 39]; дослідження п'єзоопору та електропровідності ниткоподібних кристалів Si за низьких температур [3-5, 59]; аналіз та моделювання кінетики росту нанорозмірних кристалів [24]; розроблення методів створення електричних контактів до напівпровідникових ниткоподібних кристалів [10, 21, 31]; дослідження магнітоопору й електропровідності Si, Ge за низьких температур у сильних магнітних полях [13, 16, 17, 29, 35, 37, 43]; вивчення осциляційних ефектів у ниткоподібних кристалах Ge [6, 17, 28, 43], InSb [7, 15, 18-20, 28, 30, 49] та GaSb [30, 32, 47] у сильних магнітних полях; вивчення ефектів надпровідності [22, 23, 50, 51] та слабкої локалізації [8, 32, 46] у ниткоподібних кристалах GaSb в околі ПМД за наднизьких температур і в слабких магнітних полях; вивчення деформаційно-стимульованих ефектів у ниткоподібних кристалах Si [16, 27, 35, 37, 40], Ge [17, 43], InSb [25, 26] та GaSb [14] при низьких температурах; дослідження магнітотранспортних характеристик ниткоподібних кристалів InSb [15, 20] та GaSb [14, 22, 47, 50, 51] у сильних магнітних полях; дослідження впливу гідростатичного тиску на характеристики зразків InSb [12, 33, 34, 48] та GaSb [9, 45]; дослідження характеристик сенсорів механічних величин на основі ниткоподібних кристалів Si [4, 41, 53]; дослідження характеристик сенсорів теплових величин на основі ниткоподібних кристалів Si [29, 56-58]; дослідження характеристик датчиків гідростатичного тиску на основі ниткоподібних кристалів GaSb [9, 45, 55]; дослідження характеристик багатофункційних датчиків на основі ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb [5, 11, 42, 44, 52, 53].

В усіх працях спільно зі співавторами проведено постановку задач досліджень, інтерпретацію результатів експериментів, аналіз виявлених ефектів та особливостей, а також підготовку публікацій до друку.

Апробація основних результатів досліджень. Основні результати досліджень, які викладено у дисертації, представлено на таких наукових конференціях: Міжнародна конференція “Фізика і технологія тонких плівок” МКФТТП – 2005, 2017 (Івано-Франківськ, Україна); Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології”, СЕМСТ – 2008, 2010, 2012, 2018 (Одеса, Україна); Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні інформаційні та електронні технології” CIET–2009, 2013, 2015 (Одеса, Україна); Int. Conf. TCSET 2014, 2016, 2018 (Lviv–Slavsko, Ukraine); International Meeting „Clusters and nanostructured materials” (CNM-5) (Uzhgorod, Ukraine, 2018); International Conference ELNANO 2017, 2018; International Conference on Electronics and Information Technology 2016 (Odesa, Ukraine); International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo’2017, 2018). (Odessa, Ukraine); Second International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017) (Zatoka, Odessa region, Ukraine); International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2017, 2018, 2019) (Kyiv, Ukraine); Physics of electronic materials: 3rd International Conference Proceedings 2008 (Kaluga, Russia); Українська

наукова конференція з фізики напівпровідників 2009, 2011, 2013, 2016 (Запоріжжя, Ужгород, Чернівці, Дніпро, Україна); VII Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників» 2010 (Дрогобич, Україна); 8-th International Conference on Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials 2010 (Ivano-Frankivsk region, Ukraine); International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO – 2016, 2017, 2018) (Lviv, Kiev, Kiev, Ukraine) та на щорічних Відкритих науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету „Львівська політехніка” з проблем електроніки (Львів, 2008–2014).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 59 наукових працях, з яких 13 статей у наукових фахових виданнях України, 14 - у періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 8 матеріалів конференцій, включених у міжнародні наукометричні бази, 16 тез доповідей міжнародних і всеукраїнських конференцій, 8 патентів України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, сімох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 415 бібліографічних найменувань, та додатку. Робота викладена на 325 сторінках основного тексту, містить 183 рисунки та 27 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та основні завдання роботи, показано наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність, а також особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів. Наведено дані щодо апробації роботи та її зв'язок із науковими програмами, темами, планами.

У **першому розділі** наведено технологічні режими отримання ниткоподібних кристалів (НК) Si, Ge, InSb та GaSb методом хімічних газотранспортних реакцій у закритій системі з різною концентрацією легуючої домішки, що дозволило отримати зразки з різним характером провідності – від металевого до діелектричного відносно ПМД. Досліджено кристалічну структуру отриманих зразків і проведено аналіз їх розмірних характеристик із метою виготовлення на їх базі чутливих елементів перетворювачів фізичних величин. Розроблено технологічні засади створення електричних контактів до НК сполук АЗВ5 із діаметром порядку $10 \div 20$ мкм із використанням електрохімічного осадження металу. Проведені вимірювання ВАХ створених контактів при різних температурах показали можливість їх використання при дослідженні електро- і магнітотранспортних властивостей НК.

Обґрунтовано та використано спеціальну методику, яка дозволила створити механічно напружений стан напівпровідникових НК для вивчення їх характеристик при криогенних температурах, яка передбачає цілеспрямоване використання термічного напруження за рахунок закріплення зразків на підкладках. Розроблений метод створення механічно напруженого стану (розтягу та стиску) використано під час дослідження п'єзоопору структурно досконалих НК Si, Ge, InSb, GaSb при криогенних температурах, що дозволяє забезпечити

умову стабільності їх характеристик. Розроблено також методику дослідження магнітотранспортних характеристик цих зразків із використанням DC та AC режимів. Обидва режими забезпечували ідентичні результати, що свідчить про уникнення ефектів паразитних термо-е.р.с., контактної різниці потенціалів, можливих деформаційних напружень контактної області кристалів. Адаптована методика визначення магнітної сприйнятливості НК АЗВ5 при низьких температурах із використанням приладу SQUID MPMS-XL5.

Також запропоновано методику вивчення впливу електронного опромінення з енергією $4,2 \div 14$ MeV і флюенсом $5 \times 10^{16} \div 1 \times 10^{18}$ ел/см² на провідність, п'єзо- і магнітоопір НК Si р-типу провідності з різною концентрацією легуючої домішки в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К і магнітних полів $0 \div 14$ Тл із використанням стендів, створених для дослідження характеристик опромінених зразків.

Отже, отримані НК Si, Ge, InSb та GaSb із наперед заданими властивостями і різною концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, що дає можливість їх застосування для створення чутливих елементів сенсорів фізичних величин.

У другому розділі наведено результати щодо дослідження низькотемпературних деформаційно-стимульованих ефектів у НК Si та Ge р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, що уможливорює їх застосування в якості чутливих елементів сенсорів теплових і механічних величин, дієздатних в області криогенних температур.

Розглянуто поверхнево-деформований стан закріпленого НК, для цього закон Гука записано в анізотропному наближенні за допомогою пружних модулів та деформацій, визначених в локальній системі координат. Оцінено термічну деформацію зразків Si та Ge в широкому інтервалі температур для різних матеріалів підкладок і методу їх закріплення.

Вивчено вплив спін-орбітальної взаємодії на деформаційне зняття виродження енергетичного спектра валентної зони Si та Ge у двох- і трьохзонному наближенні за допомогою відомого різновиду *kp*-методу теорії збурень – методу інваріантів. Розглянуто деформаційний генезис валентної зони при різних способах урахування в гамільтоніані деформації кристала та спін-орбітальної взаємодії. Показано, що дослідити взаємний вплив деформації та спін-орбітального розщеплення можна лише одночасно беручи до уваги збурення деформацією та спін орбітальну взаємодію у початково невиродженому стані Γ_{25} гілок важких і легких дірок. Встановлено граничні умови, які гарантують справедливість отриманих результатів: $\delta E(k, \varepsilon) \ll \Delta_{so}$ та $k_B T < \Delta_{so}$. Уточнено вигляд зонного спектру легких і важких дірок у деформованих зразках Si та Ge за рахунок більш коректного врахування зонного спектра. Розрахована деформаційна залежність розщеплення їх валентних зон у центрі зони Бріллюена. Спостерігається збільшення зсуву зони легких дірок у Si лише при деформації стиску, а у германії вплив SO-зони відчувається лише при значних рівнях деформації $\varepsilon > 0,6$ %.

Розглянуто ступінь наближення до ПМД як фактор отримання максимального ефекту п'єзоопору для НК Si та Ge, які демонструють екстремально високі значення коефіцієнта тензочутливості в області дії “некласичного” п'єзоопору.

Досліджено температурні залежності опору деформованих і недеформованих НК Si р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки бору в діапазоні $8 \times 10^{17} \div 5,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та температурні залежності їх коефіцієнта тензочутливості при високому рівні відносної деформації стиску $-3,81 \times 10^{-3}$.

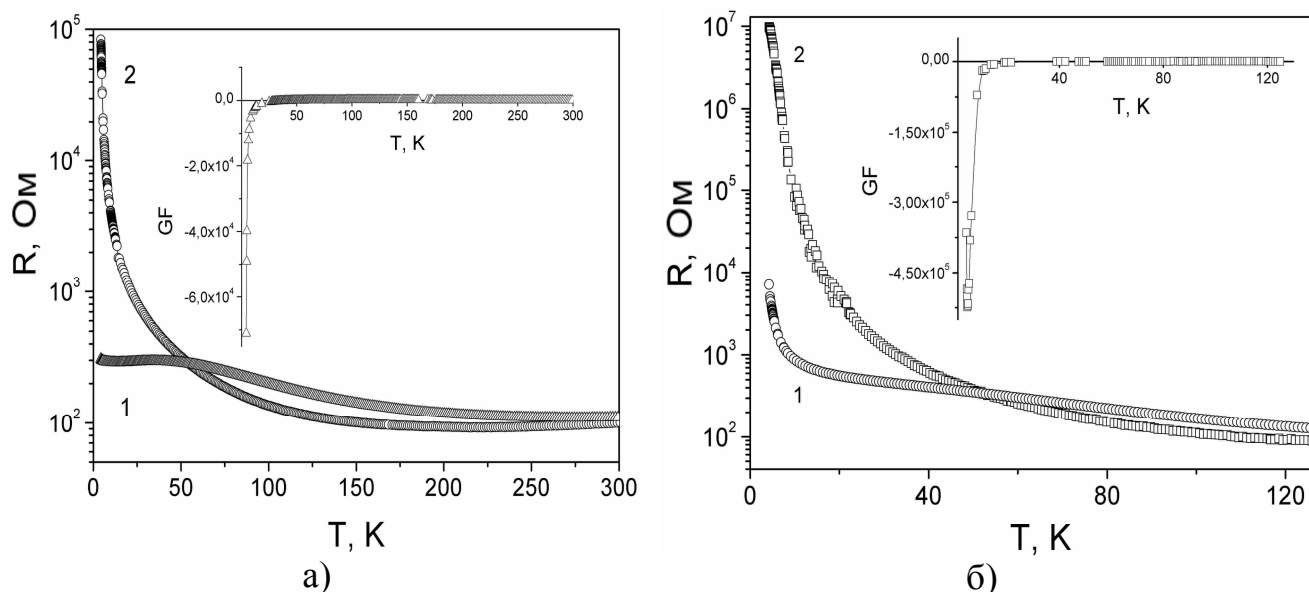


Рис. 1. Для недеформованих зразків (1) та під дією відносної деформації $-3,8 \times 10^{-3}$ (2) температурні залежності опору НК Si з концентрацією легуючої домішки, см^{-3} : а) $5,5 \times 10^{18}$, б) 1×10^{18} . Вставки: температурні залежності коефіцієнта тензочутливості.

Для НК Si, легованих бором до концентрації $5,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає близькості до критичної концентрації ПМД при криогенних температурах спостерігається істотне зростання опору на два порядки під дією деформації стиску (рис. 1,а), що зумовлює появу великого неklasичного п'єзоопору, а значення коефіцієнта тензочутливості при температурі 4,2 К досягає $K_{4,2\text{К}} = -7,21 \times 10^4$ (вставка рис. 1,а). Як видно з рис. 1,б, зразки Si з концентрацією легуючої домішки $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає діелектричному боку переходу, мають гігантський неklasичний п'єзоопір, а значення їх коефіцієнта тензочутливості при температурі рідкого гелію сягає екстремальних значень $-5,24 \times 10^5$. Встановлено, що зразки Si з концентрацією бору $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ можна рекомендувати для використання в надчутливих сенсорах механічних величин (деформації, тиску, рівня рідини, тощо), дієдатних в області криогенних температур.

Для НК Ge р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідає діелектричному боку ПМД, наведено результати вимірювань відносної зміни опору в інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ К}$. Недеформовані зразки мають типовий металевий хід температурної залежності опору (рис. 2,а, крива 1), а вплив деформації як розтягу, так і стиску надає зразкам напівпровідникового ходу (рис. 2,а, криві 2, 3). На рис. 2,б наведено результати вимірювань температурних залежностей відносної зміни опору НК Ge,

концентрація легуючої домішки галію в яких відповідає глибокій діелектричній області $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, які мають типовий діелектричний хід.

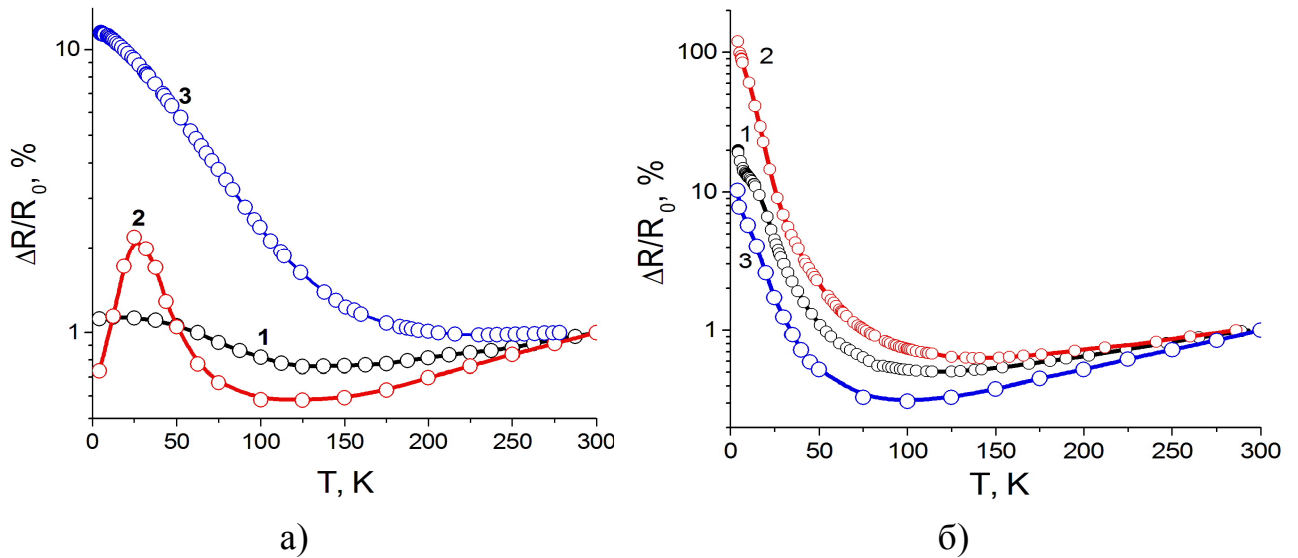


Рис. 2. Температурні залежності відносної зміни опору зразків: 1 – недеформованих, 2 – під дією відносної деформації стиску $-4,4 \times 10^{-3}$ та 3 – розтягу $+1,95 \times 10^{-4}$ для НК Ge з концентрацією легуючої домішки, см^{-3} :
а) 2×10^{17} б) 5×10^{16}

На рис. 3 наведено експериментальні температурні залежності опору НК Ge р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки галію, що відповідає як металевому, так і діелектричному боку ПМД. Як видно з рисунку, температурні залежності опору недеформованих зразків Ge (рис. 3, криві 1, 3, 4) мають монотонний характер. Під дією одновісної деформації стиску $-4,4 \times 10^{-3}$ істотно змінюються їх температурні залежності опору (рис. 3, крива 2) в інтервалі досліджуваних температур $4,2 \div 300 \text{ K}$ у порівнянні з недеформованими зразками.

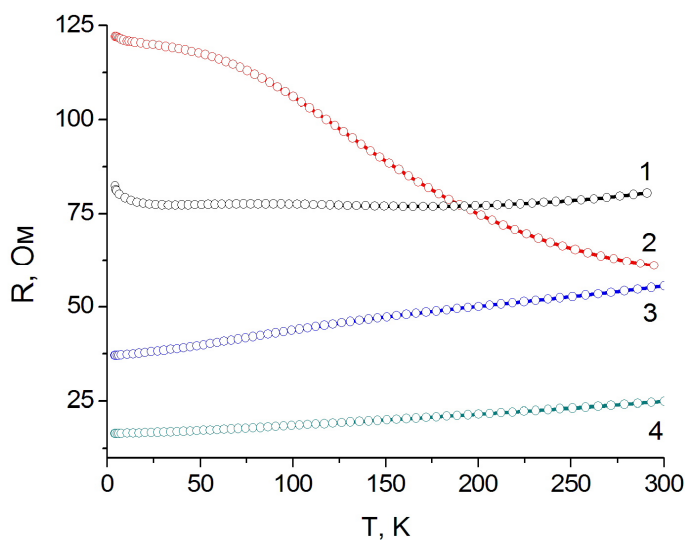


Рис. 3. Температурні залежності опору недеформованих (криві 1, 3, 4) та деформованих ($\epsilon = -4,4 \times 10^{-3}$ (крива 2)) для НК Ge з концентрацією легуючої домішки, см^{-3} :
1 – 5×10^{16} ; 2, 3 – 2×10^{17} ;
4 – 8×10^{18} .

Вивчено також вплив одновісної деформації (розтягу та стиску) на енергію активації домішкової провідності в зразках Ge р-типу провідності та виявлено гігантський п'єзоопір при гелієвих температурах, що відкриває перспективи створення високочутливих п'єзорезистивних сенсорів.

НК Ge р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки галію $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідає діелектричному боку ПМД, деформовані стиском до рівня $-4,4 \times 10^{-3}$ відн. од., можна рекомендувати для створення на їх основі чутливих елементів сенсорів температури, дієздатних в інтервалі температур від 50 до 300 К. Зразки Ge з концентрацією легуючої домішки $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, що при температурі 77 К зазнають істотного впливу деформації ($-4,4 \times 10^{-3}$ відн.од.), можна рекомендувати для створення чутливих елементів сенсорів температури для криогенних температур $4,2 \div 100 \text{ К}$, а сильно леговані зразки ($8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) – для сенсорів температури, дієздатних в широкому інтервалі температур – від криогенних до кімнатної.

У **третьому розділі** подано результати комплексних досліджень впливу деформації, температури і магнітного поля на властивості НК Si та Ge з метою розроблення перетворювачів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації. Вивчено особливості магнітоопору і п'езомагнітоопору зразків із різною концентрацією легуючої домішки в магнітних полях з індукцією $0 \div 14 \text{ Тл}$ при температурі рідкого гелію.

На основі вивчення магнітоопору вільних і деформованих (до $-4,3 \times 10^{-3}$ відн.од.) НК Si р-типу провідності з різним ступенем наближення концентрації легуючої домішки до ПМД виявлено позитивний магнітоопір у полях з індукцією до 14 Тл при температурі рідкого гелію для деформованих зразків з $N_a = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, який зменшується у порівнянні з недеформованими кристалами, а для зразків із $N_a = 5,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, навпаки, зростає в порівнянні з вільними зразками. Показано, що в зразках Si, легованих бором до концентрації $6,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в слабких магнітних полях спостерігається від'ємний магнітоопір (ВМО), який із підвищенням напруженості магнітного поля переходить у позитивний, що зумовлено руйнуванням металевого ходу провідності при криогенних температурах під дією анізотропної деформації стиску. Встановлено, що в сильно легованих НК Si р-типу провідності при певних рівнях одновісної деформації стиску спостерігаються осциляції магнітоопору Шубнікова – де Газа, зумовлені квантуванням енергетичного спектру носіїв заряду в сильному магнітному полі, коли в області малих квантових чисел при проходженні рівня Ландау через рівень Фермі має місце стрибкоподібна зміна густини станів, а осциляційний ефект зникає при більш високих рівнях деформації.

Проведено аналіз механізмів транспорту носіїв заряду шляхом дослідження радіальної зміни поперечного магнітоопору НК Si р-типу провідності різного діаметра з концентрацією легуючої домішки бору в околі ПМД в діапазоні магнітних полів $0 \div 14 \text{ Тл}$ при температурах $4,2 \div 77 \text{ К}$. За допомогою великого термодинамічного потенціалу Гіббса були обґрунтовані кінетичні тензори узагальнених термодинамічних рівнянь електропровідності. Показано вплив просторового квантування в 2D та 1D кристалах на їх фундаментальні кінетичні властивості. Досліджено вплив нерівноважного радіального розподілу домішки по об'єму мікрочастинки на характер розмірної залежності опору при температурі 4,2 К. Встановлено, що НК є природною радіальною «гетероструктурою» із різним вмістом легуючої домішки в ядрі та оболонці. Нерівномірний розподіл домішки зумовлює особливості струмоперенесення в приповерхневому шарі, характерні

для металевому ходу провідності. На основі порівняння теоретично розрахованих та експериментально виміряних польових залежностей магнітоопору виявлено, що вміст домішки в оболонці відповідає металевому боку ПМД і становить $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а в ядрі кристала – діелектричному боку переходу ($N_a = 5,4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

Виявлено, що вплив одновісної деформації стиску до -2×10^{-3} відн.од. на поздовжній магнітоопір зразків Si з концентрацією легуючої домішки в околі ПМД ($2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в інтервалі температур $4,2 \div 70 \text{ K}$ і магнітних полях $0 \div 14 \text{ Тл}$ приводить до появи великих значень ВМО до 15%, зумовленого слабкою локалізацією носіїв заряду. На основі аналізу ВМО у моделі слабкої локалізації носіїв заряду показано, що довжина когерентності L_ϕ і довжина спінової взаємодії L_{so} пропорційні $T^{-0,53}$ і $T^{-0,45}$, відповідно, що відповідає теоретичним даним для двовимірної системи і підтверджує основний внесок у провідність, зумовлений транспортом носіїв заряду в приповерхневих шарах кристалів. Виявлений ВМО у НК Si у слабких магнітних полях описується двовимірною моделлю слабкої антилокалізації, що дозволило визначити параметр Рашби спінової взаємодії носіїв заряду $\alpha = 5 \times 10^{-15} \text{ eV} \times \text{м}$, згідно виразу для L_Ω довжини спінової взаємодії з частотою обертання спіна Ω : $L_\Omega = \frac{\hbar}{2m^* \alpha}$.

Встановлено вплив деформації на спіно-орбітальне розщеплення та спектр валентної зони Si. Виявлене, за допомогою kp -методу, істотне розщеплення гілок легких і важких дірок, дозволило отримати енергію спіно-орбітального розщеплення підзони важких дірок $\Delta_{so} = 2k_F \alpha$, яка становить $\Delta_{so} = 1,8 \text{ меВ}$ (для Si значення хвильового числа $k_F = 5 \times 10^8 \text{ м}^{-1}$).

В інтервалі температур $4,2 \div 70 \text{ K}$ і у магнітних полях з індукцією до 14 Тл виявлено магнітофононні осциляції поздовжнього та поперечного магнітоопору в НК Ge n-типу провідності, зумовлені міждолинним резонансним розсіюванням електронів, а в зразках Ge p-типу провідності – перерозподілом дірок по зонах легких та важких дірок.

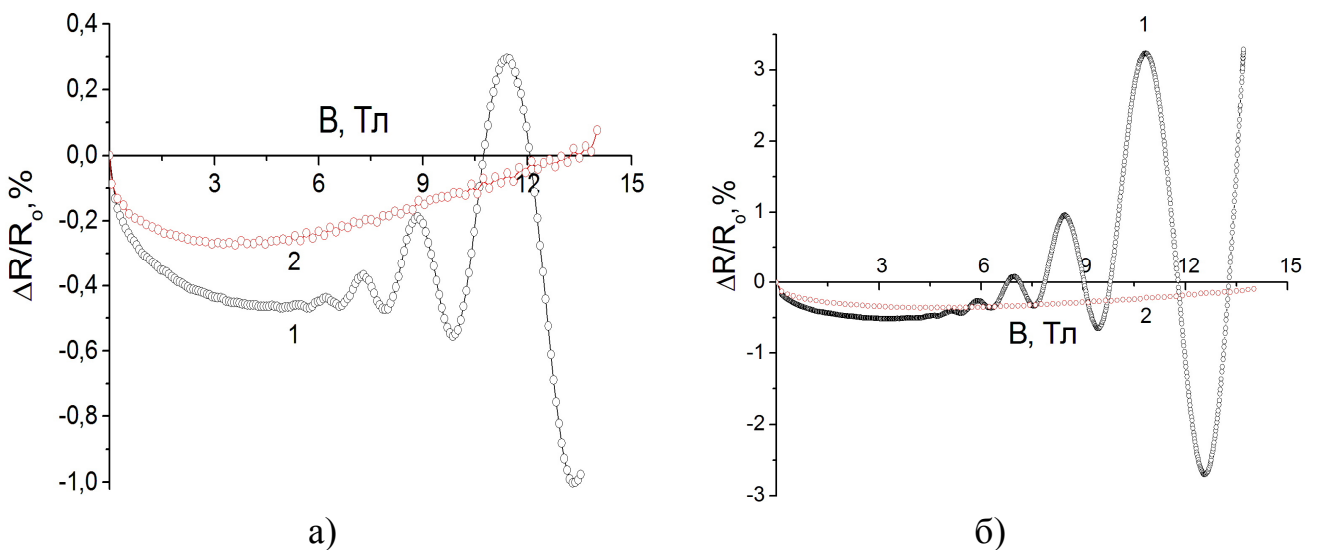


Рис. 4. Польові залежності поздовжнього (1) та поперечного (2) магнітоопору при температурі 4,2 K під дією відносної деформації $-6,25 \times 10^{-3}$ НК Ge з питомим опором $0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ а) n- та б) p-типу провідності

Як видно з наведених на рис. 4 графіків, одновісна деформація стиску $-4,4 \times 10^{-3}$ відн.од. індукує появу осциляцій магнітоопору в поздовжньому магнітному полі при температурі 4,2 К у НК Ge як n- (рис. 4,а, крива 1), так і р-типу провідності (рис. 4,б, крива 1). Так, під дією деформації стиску на залежностях поздовжнього магнітоопору зразків Ge р-типу провідності в діапазоні магнітних полів $0 \div 14$ Тл виявлено чотири осциляційні мінімуми, які періодичні щодо оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,026$ Тл $^{-1}$ (рис. 4,б, крива 1). Крім того, в НК Ge р-типу провідності спостерігається на порядок вища амплітуда магнітофононних осциляцій поздовжнього магнітоопору при температурі 4,2 К (рис. 4,б, крива 1) в порівнянні зі значеннями амплітуд, отриманими для зразків Ge n-типу (рис. 4,а, крива 1).

Як і у випадку зразків Ge n-типу провідності, значний інтерес також викликає аналіз впливу температури на поведінку їх магнітоопору та п'єзомагнітоопору. У зв'язку з цим, ми проаналізували експериментальні залежності магнітоопору при криогенних температурах ($4,2 \div 70$ К) для НК Ge р-типу провідності, як недеформованих зразків (рис. 5), так і під дією одновісної деформації стиску (рис. 6) відповідно в поперечних і поздовжніх магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл.

Виявлені відхилення від монотонного ходу польових залежностей поперечного магнітоопору недеформованих зразків Ge р-типу провідності з $\rho_{300K} = 2,2 \times 10^{-3}$ Ом \times см, які з ростом температури від 4,2 К до 69 К зникають (рис. 5, криві 1-6, відповідно).

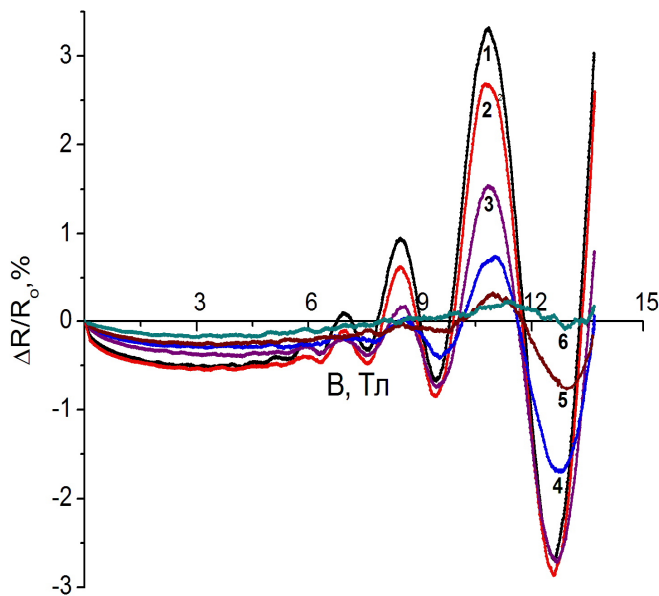


Рис. 5. Польові залежності поперечного магнітоопору недеформованих НК р-Ge з $\rho_{300K} = 0,022$ Ом \times см при фіксованих температурах: 1 – 4,2 К; 2 – 6 К; 3 – 12 К; 4 – 22 К; 5 – 55 К; 6 – 69 К.

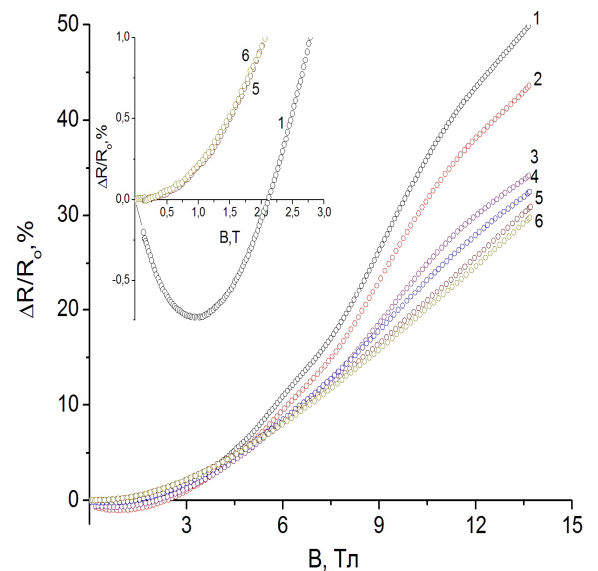


Рис. 6. Польові залежності поздовжнього магнітоопору НК р-Ge з $\rho_{300K} = 0,02$ Ом \times см під дією відносної деформації $-6,25 \times 10^{-3}$ при фіксованих температурах: 4,2 К (1), 6 К (2), 12 К (3), 22 К (4), 35 К (5), 54 К (6).

Встановлено, що амплітуда магнітофононних осциляцій залежить від величини індукції магнітного поля і температури, а також значення і знаку

прикладеної одновісної деформації. Узагальнено й уточнено поведінку поздовжнього магнітоопору НК Ge n-типу провідності під дією одновісної деформації стиску при температурі 4,2 К в сильних магнітних полях з індукцією до 35 Тл для визначення характеру магнітофононної взаємодії, типу внутрідолинних та міждолинних переходів, які відповідають появі осциляційних максимумів на польових залежностях магнітоопору, на основі порівняння одержаних результатів з відомими теоретичними та експериментальними даними. Встановлено, що осциляційний ефект спостерігаються в зразках, легованих до концентрацій в околі ПМД з діелектричного боку з $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \div 0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а виявлені максимуми магнітофононних осциляцій є періодичними відносно оберненого поздовжнього магнітного поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,025 \text{ Тл}^{-1}$, тоді як для поперечного магнітоопору період осциляцій становить $\Delta(1/B) = 0,018 \text{ Тл}^{-1}$. Встановлено, що виявлені осциляційні максимуми магнітоопору зумовлені міждолинними переходами між рівнями Ландау з долини з циклотронною ефективною масою легких електронів $m_H = 0,082m_0$ у долину з циклотронною ефективною масою важких електронів $m_L = 0,207m_0$, при участі акустичних і оптичних фононів у Γ , X_1 та X_3 -точках зони Брілюена, відповідно з енергіями $E_{TA} = 37,3 \text{ меВ}$, $E_{TA} = 9,93 \text{ меВ}$ та $E_{LO} = 29,8 \text{ меВ}$.

В результаті аналізу впливу одновісної деформації на характер виявлених магнітофононних осциляцій зразків Ge встановлено, що деформація стиску стимулює появу осциляційних піків на польових залежностях поздовжнього магнітоопору в Ge n- і p-типу провідності, а деформація розтягу приводить до появи більш чітких осциляційних піків у поперечному магнітному полі зразків n-типу провідності. Як результат впливу розігріву газу носіїв заряду на характер магнітофононних осциляцій НК Ge n- і p-типу провідності виявлено, що збільшення струму розігріву приводить до зменшення значень амплітуди магнітофононних осциляцій.

У **четвертому розділі** наведено результати комплексних досліджень щодо впливу високоенергетичного опромінення електронами на основні властивості (провідність, магнітоопір і p' -езоопір) НК Si з концентрацією бору, що відповідає близькості до ПМД як з металевого, так і з діелектричного боку переходу, в широкому інтервалі температур і магнітних полів.

Систематизовано основні види радіаційних дефектів, які виникають у Si під впливом електронного опромінення. Виявлено, що характер змін електрофізичних властивостей зразків при їх опроміненні визначаються рядом факторів, що пов'язані як з умовами опромінення (енергія, температура і доза опромінення, тощо), умовами термовідпалу, так і з вихідними властивостями опромінених кристалів, зокрема, концентрацією і хімічною природою легуючих домішок.

Експериментально показано, що для сильнолегованих бором (вироджених) Si ($N_a = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$) і для зразків із концентрацією легуючої домішки в околі ПМД $(1 \div 7) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ після електронного опромінення спостерігається збільшення опору зразків і, відповідно, зменшення провідності в області низьких температур.

Досліджено вплив опромінення електронами високих енергій ($E = 10 \text{ МеВ}$) на провідність легованих НК Si в широкому інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ К}$. На

рис. 7 наведено залежності відносної зміни опору НК Si, легованих бором, від флюенсу електронів з енергією 10 MeV при різних температурах.

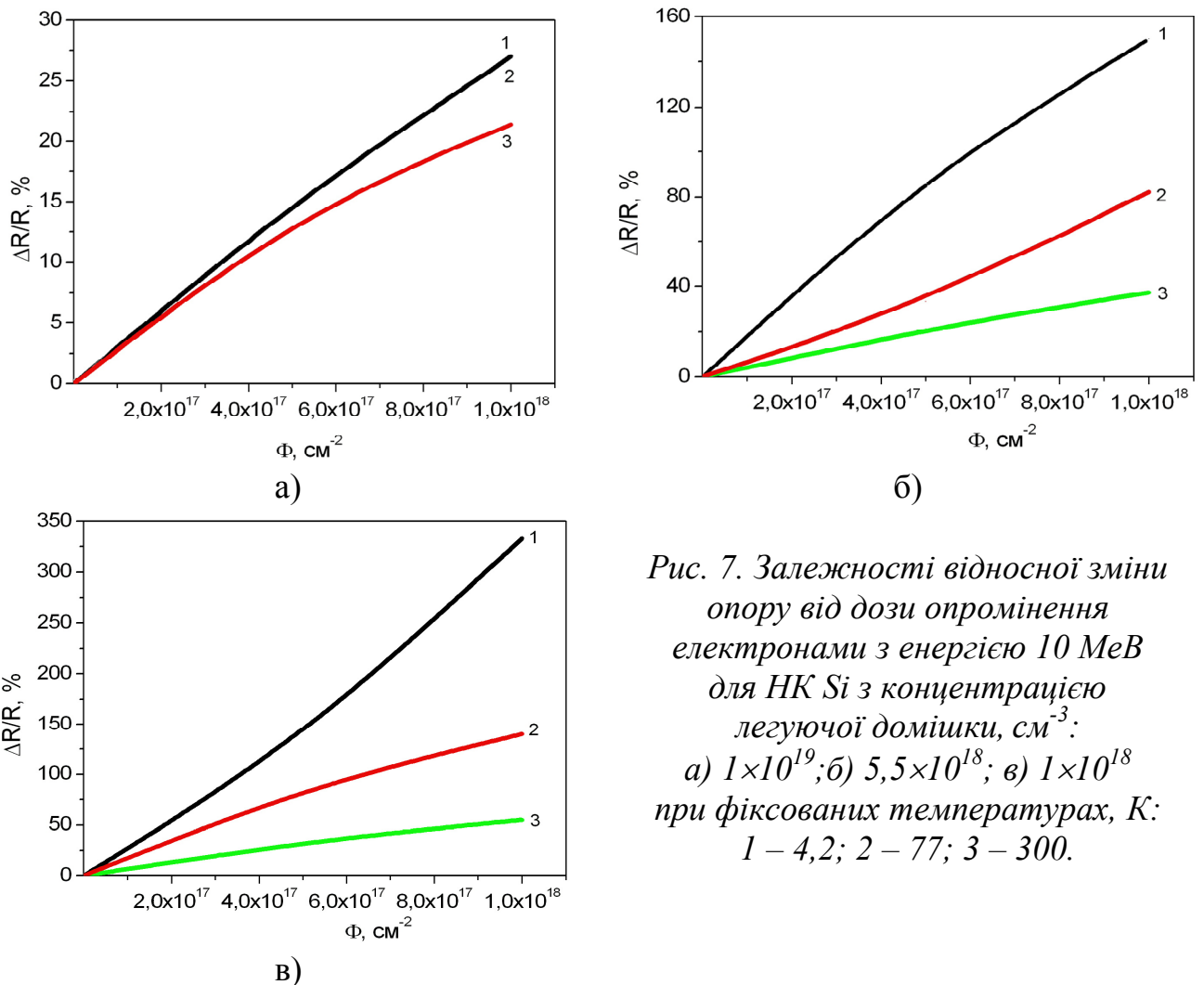


Рис. 7. Залежності відносної зміни опору від дози опромінення електронами з енергією 10 MeV для НК Si з концентрацією легуючої домішки, см^{-3} : а) 1×10^{19} ; б) $5,5 \times 10^{18}$; в) 1×10^{18} при фіксованих температурах, K: 1 – 4,2; 2 – 77; 3 – 300.

В результаті проведених досліджень виявлено, що опромінення сильно легованих НК Si з концентрацією $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та в околі ПМД $(1 \div 7) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ електронами з енергією 10 MeV приводить до зростання опору зразків у всьому дослідженому інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ K}$. Встановлено наступні особливості зміни опору досліджуваних НК Si під впливом електронного опромінення:

- найменші зміни опору опромінених кристалів у всьому інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ K}$ спостерігались для сильно легованих (вироджених) НК Si з концентрацією $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$;
- зменшення концентрації легуючої домішки зумовлює збільшення впливу опромінення на провідність кристалів у всьому досліджуваному інтервалі температур;
- найбільші зміни провідності досліджуваних кристалів з концентрацією бору в околі ПМД під впливом опромінення відбуваються при низьких температурах, особливо при температурі рідкого гелію.

Варто зауважити, що опромінення при кімнатній температурі високоенергетичними електронами з флюенсом $1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ не приводить до суттєвих змін величини опору НК Si, що дозволяє їх використання для створення радіаційно стійких сенсорів.

Зменшення провідності досліджених НК після опромінення електронами високих енергій зумовлено як процесами розсіювання носіїв струму на вторинних радіаційних дефектах, яке приводить до зменшення рухливості носіїв, так і зменшенням концентрації носіїв, оскільки при опроміненні утворюються радіаційні дефекти з глибокими акцепторними рівнями і одночасно вводяться компенсуючі донорні радіаційні дефекти, які зменшують концентрацію дірок. Отже, зменшення провідності під впливом електронного опромінення зумовлено зменшенням концентрації носіїв заряду, що пов'язано з утворенням міжвузельних атомів бору, яке має місце як при криогенних, так і при кімнатній температурі.

Проводились дослідження впливу опромінення електронами з енергією 10 MeV і флюенсом $\Phi = 1 \times 10^{17} \div 1 \times 10^{18}$ ел/см² на магнітоопір легованих бором НК Si, легованих до концентрації у діапазоні $8 \times 10^{17} \div 1 \times 10^{19}$ см⁻³, у сильних магнітних полях до 14 Тл при низьких температурах (рис. 8).

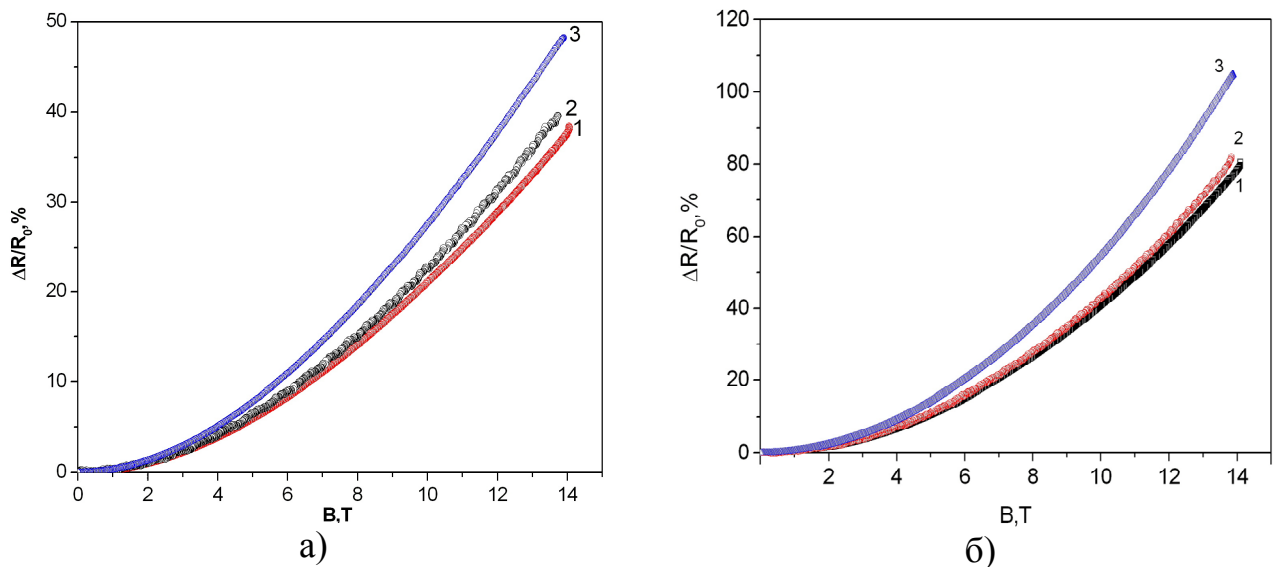


Рис. 8. Магнітоопір НК Si при температурі 4,2 К, опроміненні електронами з енергією 10 MeV і дозою Φ , ел/см²: 1 - 0; 2 - 1×10^{17} ; 3 - 1×10^{18} із концентрацією легуючої домішки (в околі ПМД), см⁻³: а) $5,5 \times 10^{18}$; б) 5×10^{18}

Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнітоопір досліджених зразків при низьких температурах: зберігається однакова тенденція зміни опору та магнітоопору кристалів під впливом опромінення електронами високих енергій. Зокрема, для НК Si р-типу провідності з концентрацією бору $1 \times 10^{18} \div 1 \times 10^{19}$ см⁻³ при збільшенні флюенса до 1×10^{18} ел/см² відбувається збільшення як величини опору, так і магнітоопору цих зразків. Для мікокристалів Si з підвищенням температури до 30 К величина магнітоопору зменшується.

Встановлено граничні дози опромінення зразків Si з концентрацією домішки $8 \times 10^{17} \div 5,5 \times 10^{18}$ см⁻³, за яких можлива стабільна робота сенсорів: за опромінення зразків електронами гранична доза становить $\Phi = 1 \times 10^{17}$ ел/см². Це дозволяє рекомендувати НК Si для створення радіаційно стійких сенсорів фізичних величин.

Досліджувався вплив одновісної деформації на опір легованих НК Si p-типу провідності, вироджених та з концентрацією бору в околі ПМД, як з металевого, так і діелектричного боку, опромінених електронами високих енергій. Розраховано значення коефіцієнта тензочутливості в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К для опромінених і неопромінених кристалів. Виявлено особливості поведінки коефіцієнта тензочутливості для досліджуваних зразків при низьких температурах: для вироджених НК Si, в яких спостерігається класичний п'єзоопір, опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом 1×10^{18} ел/см² не приводить до зміни коефіцієнта тензочутливості цих кристалів при температурі рідкого гелію. Такі кристали можуть використовуватись для створення радіаційностійких сенсорів механічних величин для роботи за криогенних температур.

Для НК Si, легованих бором до концентрації $5 \div 5,5 \times 10^{18}$ см⁻³, які відповідають безпосередній близькості до ПМД, опромінення високоенергетичними електронами ($E = 10$ МеВ, $\Phi = 1 \times 10^{18}$ ел/см²) значно зменшує їх коефіцієнт тензочутливості при температурі 4,2 К, при цьому в опромінених зразках зберігаються достатньо високі значення коефіцієнта тензочутливості, характерні для некласичного п'єзоопору. Досліджено вплив опромінення електронами з енергією 10 МеВ та флюенсом $1 \times 10^{17} \div 1 \times 10^{18}$ ел/см² на характеристики тензорезисторів на основі НК Si з концентрацією легуючої домішки $1 \times 10^{18} \div 1 \times 10^{19}$ см⁻³ в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К з метою оцінки радіаційної стійкості тензорезисторів. Встановлено, що при опроміненні електронами з флюенсом $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ ел/см² опір тензорезисторів при кімнатній температурі практично не змінюється. При збільшенні дози до 1×10^{18} ел/см² температурна залежність їх опору після опромінення сильно зростає в інтервалі температур $0 \div -196$ °С, а в області температур $-196 \div +100$ °С спостерігається незначні зміни коефіцієнта тензочутливості тензорезисторів, в той час як температурний коефіцієнт тензочутливості практично не змінюється. Досліджені тензорезистори можна використовувати в області криогенних температур аж до температури рідкого гелію в умовах опромінення електронами з енергією $E \leq 10$ МеВ і флюенсом $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ ел/см².

У п'ятому розділі наведено результати дослідження електротранспортних характеристик зразків InSb та GaSb із різною концентрацією легуючої домішки в широкому інтервалі температур $4,2 \div 300$ К.

Проаналізовано зонну структуру InSb та GaSb з використанням ізотропного наближення моделі Кейна, яке враховує спін-орбітальну взаємодію, що відіграє суттєву роль в сполуках з кристалічною структурою типу цинкової обманки. В моделі зонної структури виникають чотири види вільних носіїв заряду: електрони провідності, «легкі» і «важкі» дірки, а також зона «відщеплених» дірок, які описуються законами дисперсії. Показано, що для розрахунку транспортних властивостей InSb та GaSb необхідно враховувати електрони зони провідності, «важкі» та «легкі» дірки з урахуванням того, що заселеність «відщепленої» зони дірок набагато менша, ніж заселеність інших зон.

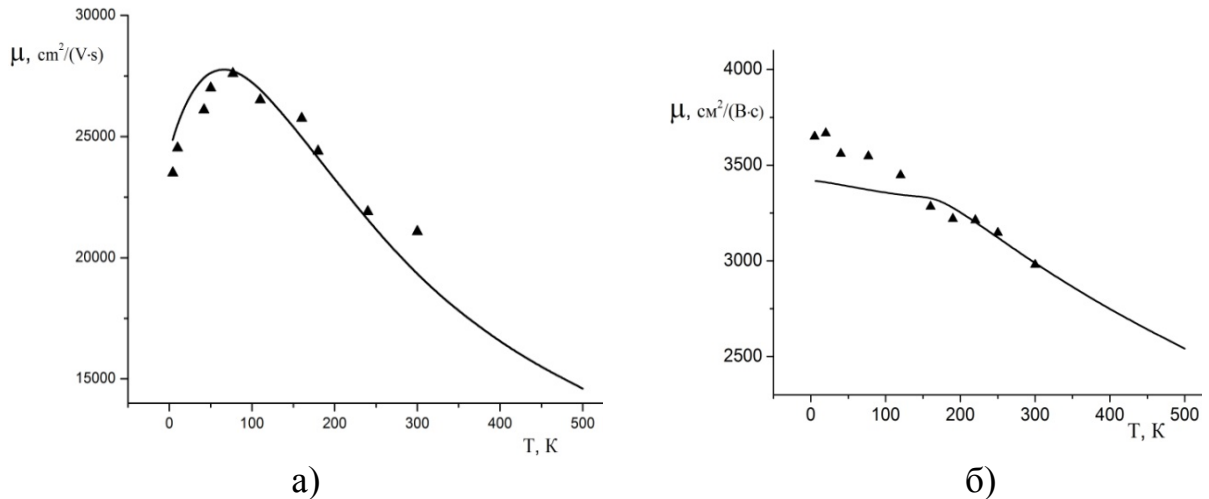


Рис. 9. Температурні залежності рухливості електронів для НК
 а) $InSb$ ($N_D = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) та б) $GaSb$ ($N_D = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$)

Експериментальні залежності $\mu_n(T)$ представлені на рис. 9 у вигляді трикутників для НК $InSb$ та $GaSb$ із концентрацією легуючої домішки в околі ПМД. Суцільними лініями представлена рухливість, розрахована на основі близькодійючих моделей в рамках точного розв'язку рівняння Больцмана. Видно, що теоретичні криві достатньо добре узгоджуються з експериментом в усьому дослідженому інтервалі температур. В результаті проведених експериментальних досліджень рухливості в НК $InSb$ та $GaSb$ n-типу в широкому інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ К}$ з використанням близькодійючої моделі розсіювання носіїв заряду, встановлено достатньо добру узгодженість теорії та експерименту. Визначено основні механізми розсіювання носіїв заряду, зокрема для НК $InSb$ та $GaSb$ основним є розсіювання на центрах статичної деформації в діапазоні температур $77 \div 300 \text{ К}$, тоді як при низьких температурах домінує розсіювання носіїв заряду на іонізованих домішках.

На рис. 10 наведено температурні залежності опору НК $InSb$ n-типу провідності з різною концентрацією олова в інтервалі температур $4,2 \div 300 \text{ К}$.

Як можна спостерігати, хід даних характеристик істотно відрізняється для НК $InSb$ із концентрацією домішки, що відповідає ПМД (рис. 10, крива 1) від поведінки залежностей зразків, легованих до концентрацій в околі ПМД із металевого та діелектричного боку переходу (рис. 10, криві 2 і 3). На температурних залежностях питомого опору НК $InSb$ з критичною концентрацією $3,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температурі порядку 60 К спостерігається мінімум, що відповідає зміні енергії активації і, як наслідок, зміні механізму переносу носіїв заряду.

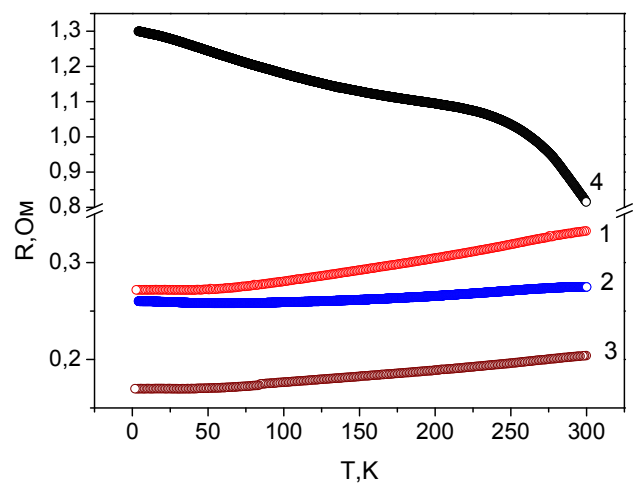


Рис. 10. Температурні залежності опору НК $InSb$ із концентрацією легуючої домішки, см^{-3} : 1 – $3,26 \times 10^{17}$; 2 – $2,3 \times 10^{17}$; 3 – $7,16 \times 10^{17}$; 4 – $4,4 \times 10^{16}$

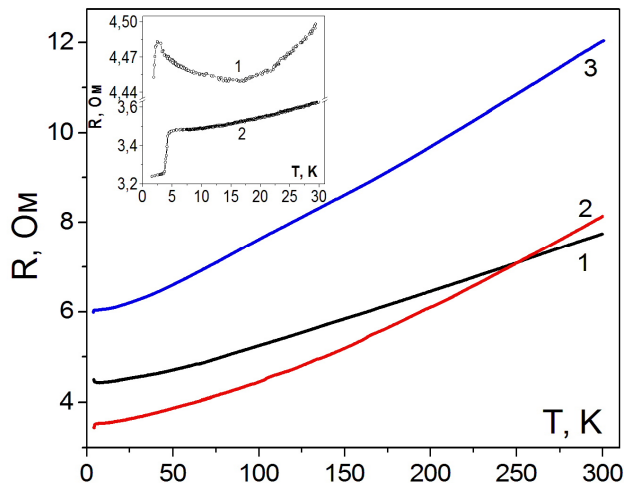


Рис. 11. Температурні залежності опору НК GaSb із концентрацією легуючої домішки, см^{-3} :
1 – 1×10^{18} ; 2 – 2×10^{18} ; 3 – $2,5 \times 10^{18}$

При низьких температурах у НК GaSb із концентрацією телуру $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігається різке падіння опору при температурі нижче 4,2 К (див. вставку рис. 11, крива 2). Для зразків із концентрацією домішки $2,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ виявлене лише невелике падіння опору при температурі нижче 4,2 К (рис. 11, крива 3). Різке падіння опору зразків GaSb при температурах нижче 1,7 К і 4,2 К відповідає частковій надпровідності.

В результаті проведеного аналізу температурних залежностей опору в інтервалі температур 4,2 ÷ 30 К для НК GaSb n-типу провідності з концентрацією легуючої домішки $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (див. вставку рис. 11, крива 1) виявлено глибокий мінімум опору при температурі порядку 16 К, зумовлений ефектом Кондо, який виникає в результаті обмінної взаємодії між локалізованими на атомах домішки дірках і вільними носіями заряду. Встановлено, що збільшення концентрації легуючої домішки збільшує ймовірність перекриття хвильових функцій, приводить до збільшення значення прямої обмінної взаємодії, що зумовлює зміну знака інтеграла обмінної взаємодії J і спостерігається затухання ефекту Кондо.

У шостому розділі наведено магнітні та магнітотранспортні характеристики НК InSb та GaSb n-типу провідності із різною концентрацією легуючої домішки у магнітних полях з індукцією 0 ÷ 14 Тл в інтервалі температур 1,5 ÷ 77 К. У цих зразках, легованих в околі ПМД, виявлено осциляції Шубнікова – де Гааза на польових залежностях поперечного і поздовжнього магнітоопору, аналіз поведінки яких дозволив визначити їх період, температуру Дінгла та ефективну масу електронів. Вивчено спін-орбітальну взаємодію у НК GaSb, легованих телуrom до концентрацій, що відповідають металевому боку ПМД, що дозволило з'ясувати природу виявлених ефектів надпровідності та слабкої антилокалізації, як результат дослідження магнітоопору та магнітопровідності в області низьких температур до 1,5 К і в слабких магнітних полях 0 ÷ 3 Тл.

Особливості, отримані на температурних залежностях опору в діапазоні температур 30 ÷ 300 К відрізняються для НК GaSb із різною концентрацією домішки через зміну механізму переносу носіїв заряду (рис. 11). Наведені характеристики відповідають металевій провідності зразків GaSb із концентрацією телуру $2,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 11, крива 3), в той час як за низьких температур спостерігається напівпровідникова провідність для зразків із концентрацією легуючої домішки $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 11, крива 1) та істотне падіння опору на температурних залежностях для кристалів, легованих до $N_D = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 11, крива 2).

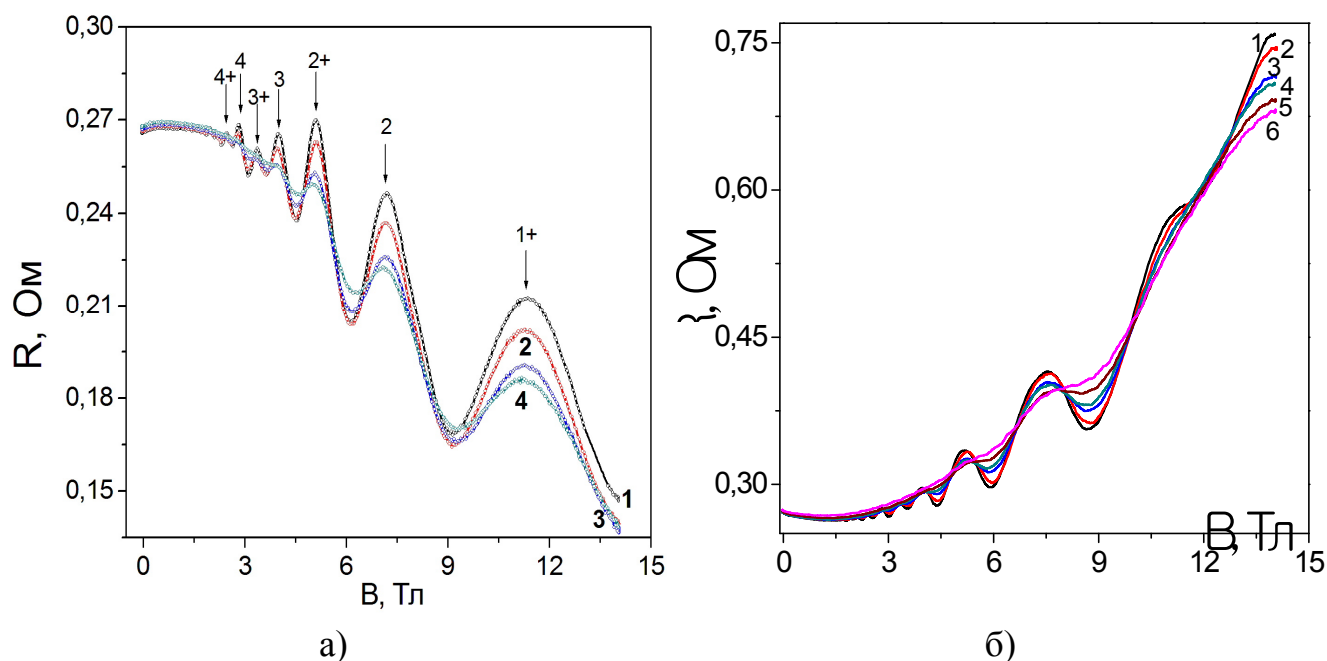


Рис. 12. Польові залежності а) поздовжнього і б) поперечного магнітоопору НК InSb із концентрацією легуючої домішки $3,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при фіксованих температурах, К: 1 – 4,2; 2 – 13; 3 – 29; 4 – 42; 5 – 60; 6 – 70.

Проведені дослідження польових залежностей магнітоопору НК InSb, легованих оловом до концентрації $4,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3} \div 7,16 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідають як металевому, так і діелектричному боку ПМД, в інтервалі низьких температур $4,2 \div 40 \text{ К}$ виявили існування піків поздовжнього і поперечного магнітоопору, ідентифікованих як осциляції Шубнікова – де Гааза. Встановлено, що при температурі 4,2 К кількість піків поперечного магнітоопору є меншою, ніж у поздовжньому полі (рис. 12).

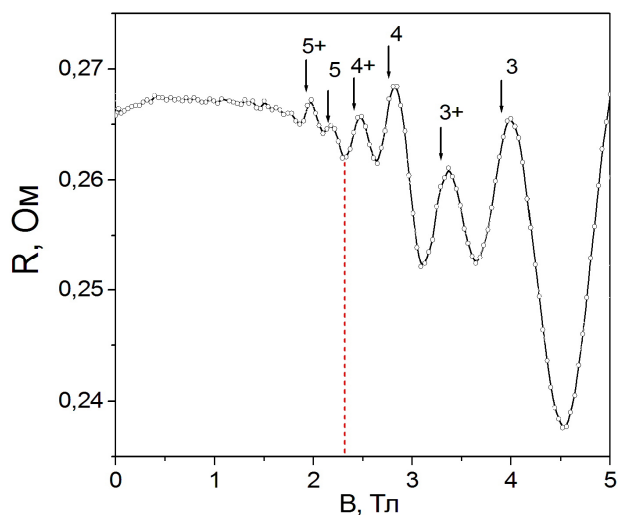


Рис. 13. Польова залежність поздовжнього магнітоопору НК InSb із концентрацією легуючої домішки $3,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температурі 4,2 К (стрілками позначено номери піків).

Аналіз польових залежностей поздовжнього магнітоопору НК InSb з концентрацією легуючої домішки $3,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температурі 4,2 К дозволив виявити індукований магнітним полем ПМД при індукції порядку 2 Тл, зумовлений конкуренцією двох механізмів, а саме сильною спін-орбітальною взаємодією та стрибковою провідністю по домішкових станах (рис. 13). Для цих же зразків кожен пік осциляцій як поздовжнього, так і поперечного магнітоопору розщеплюються як дублет (див. рис. 13), що дозволило розрахувати значення g-фактора Ланде, які є гігантськими і зростають із полем від $g^* = 46$ до $g^* = 60$ при індукції 14 Тл.

Період осциляції Шубнікова-де Гааза у випадку квадратичного закону дисперсії описується виразом: $P = \Delta \left(\frac{1}{H} \right) = \frac{\hbar |e|}{E_F m_e c}$. і становить $0,095 \div 0,1 \text{ Тл}^{-1}$, і залежить від концентрації легуючої домішки, збільшення якої зумовлює також зростання рівня Фермі від $E_F \approx 0,11 \text{ еВ}$ до $E_F \approx 0,12 \text{ еВ}$. Зміна знака магнітоопору, а також високі значення ВМО проаналізовані у зв'язку з можливими механізмами: 1) квантуванням енергії електронів у НК; 2) магнітним впорядкуванням зумовленим суперпозицією спінів електронів; 3) магнітним впорядкуванням за рахунок легування НК неконтрольованими магнітними домішками.

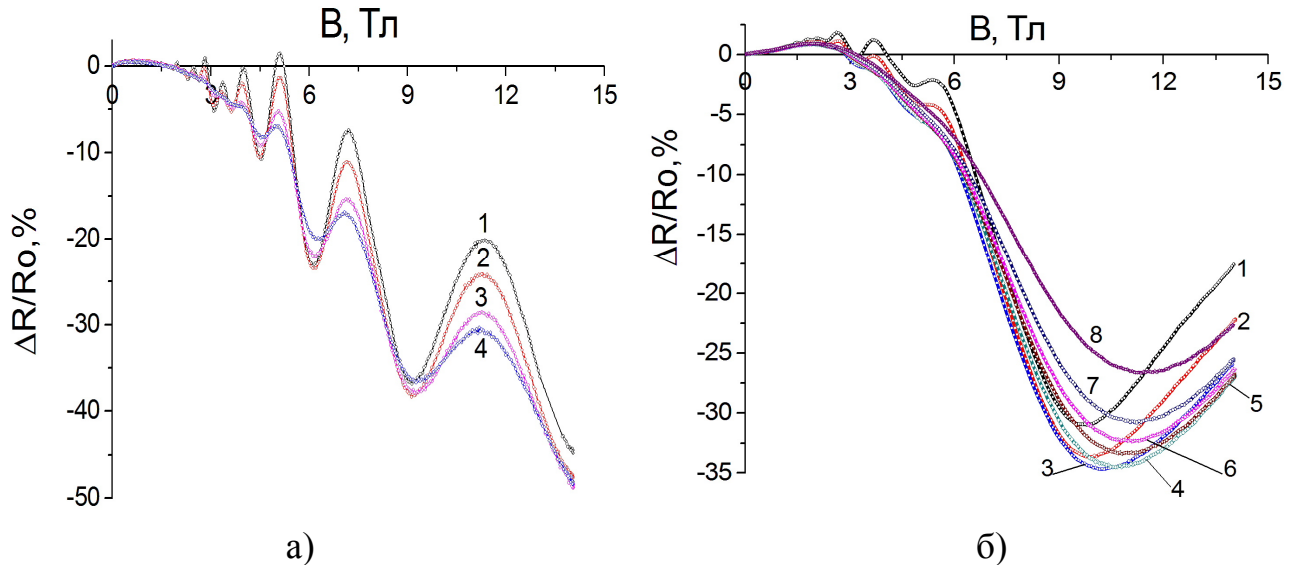


Рис. 14. Польові залежності поздовжнього магнітоопору НК InSb із концентрацією легуючої домішки а) $3,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та б) $2,3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температурах, К: 1 – 4,2; 2 – 13; 3 – 29; 4 – 42; 5 – 50; 6 – 60; 5 – 70; 6 – 77.

Проаналізовано внесок усіх вище перерахованих чинників і встановлено, що можливою причиною зміни знака магнітоопору зразків InSb та одержаних високих значень ВМО (до 50 %) (рис. 14,а) може бути квантування енергії носіїв заряду, зумовлене їх розсіюванням на границях кристалу за рахунок провідності в тонкому (близько 250 нм) приповерхневому шарі кристалу. Існування механізму стрибкової провідності по двічі зайнятих електронами домішкових станах приводить до розщеплення піків магнітоопору, що зумовлено сильною спін-орбітальною взаємодією та підвищенням значень ВМО для зразків InSb, концентрація домішки в яких відповідає ПМД.

Проведено аналіз впливу одновісної деформації стиску на магнітоопір НК InSb n-типу провідності з різним рівнем легування ($6 \times 10^{16} \div 6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при температурах від 4,2 до 70 К у магнітних полях з індукцією до 10 Тл. При низьких температурах осциляції Шубнікова – де Гааза виявлено в деформованих і недеформованих зразках у всьому діапазоні концентрацій легуючої домішки. Виявлено вплив деформації на характер польових залежностей поздовжнього магнітоопору. Так, у недеформованих НК InSb із концентрацією олова $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідає ПМД, піки осциляцій поздовжнього магнітоопору розщеплюються в дублети, тоді як у деформованих зразках розщеплення відсутнє. А у сильно

легованих НК InSb ($6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) із металевим типом провідності вплив деформації приводить до розщеплення першого піку при індукції магнітного поля 8,3 Тл і 6,5 Тл, на основі чого визначено значення g -фактора, який досягає $g^* = 50$.

Вивчено також вплив деформації на основні параметри НК InSb n -типу провідності із різною концентрацією легуючої домішки. Під дією одновісної деформації стиску зменшуються значення ефективної циклотронної маси електронів від $0,03 m_0$ до $0,02 m_0$, а температура Дінгла та енергія Фермі зростає від 12 К до 15 К, і від 0,12 еВ до 0,14 еВ, відповідно. Період осциляцій Шубнікова – де Гааза не змінюється під впливом деформації для зразків InSb у всьому діапазоні легуючих концентрацій.

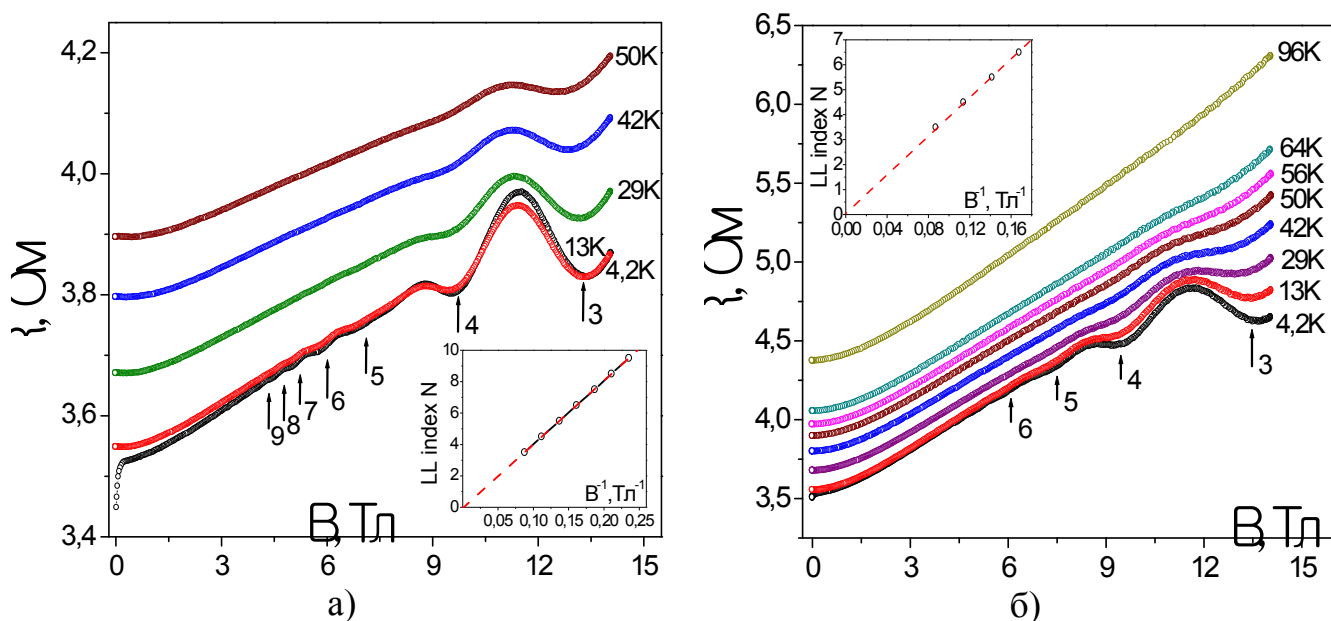


Рис. 15. Польові залежності а) поздовжнього і б) поперечного магнітоопору НК GaSb із концентрацією легуючої домішки $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при фіксованих температурах (стрілками позначено номери піків). Вставки: фан діаграми рівнів Ландау осциляцій Шубнікова – де Гааза в оберненому магнітному полі ($1/B$)

Побудовано фан діаграми Ландау – залежності індексу рівня Ландау N від значення оберненої індукції поля $1/B$, які наведені на вставках рис. 15. Із цих графіків видно, що точки даних відповідають лінійній залежності, що показано штриховою лінією, перетин якої з віссю N -індексів відповідає нульовій фазі $\beta = 0$, що вказує на транспорт електронів згідно теорії Шредінгера, характерний для осциляцій Шубнікова – де Гааза. На основі аналізу фан діаграм Ландау в зразках InSb з концентрацією легуючої домішки, що відповідає ПМД, при низьких температурах виявлена індукована деформацією фаза Беррі. Так, фаза $\beta=0$ відповідає осциляціям магнітоопору недеформованих зразків, а вплив деформації при температурі 4,2 К приводить до відхилення від цього значення до $\beta=1/2$. Фан діаграми деформованих зразків InSb підтверджують двовимірну природу електронного газу, що відповідає переходу в фазу топологічного ізолятора.

Ефект анізотропного магнітоопору при низьких температурах був встановлений в результаті дослідження польових залежностей поперечного і поздовжнього магнітоопору НК GaSb n-типу провідності з концентрацією легуючої домішки в діапазоні $(1 \div 2,5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає металевому боку ПМД у магнітних полях з індукцією $0 \div 14 \text{ Тл}$. Експериментальні дані досліджень для зразків GaSb із концентрацією телуру $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наведено на рис. 15 в інтервалі температур $1,5 \div 96 \text{ К}$.

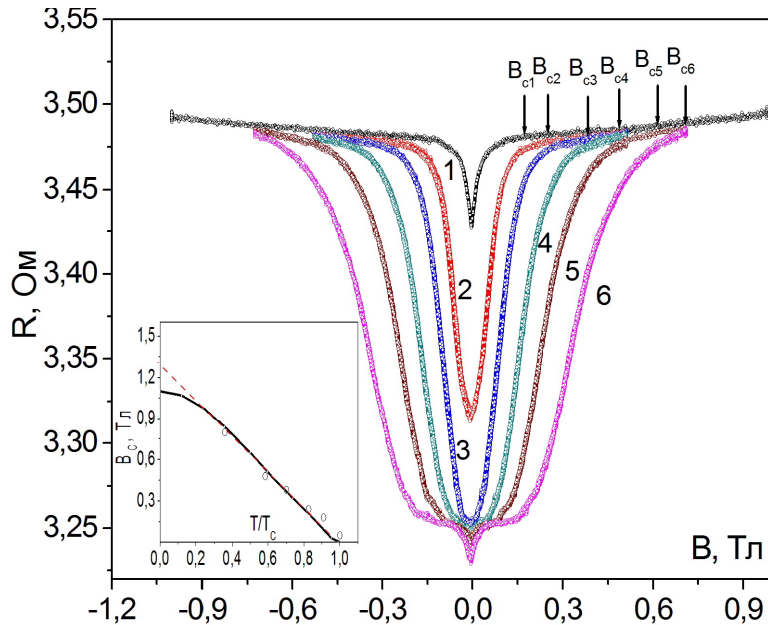


Рис. 16. Польові залежності поздовжнього магнітоопору НК GaSb із концентрацією легуючої домішки $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при фіксованих температурах, К: 1 – 4,2; 2 – 3,3; 3 – 3,47; 4 – 2,95; 5 – 2,45; 6 – 1,5. Стрілками позначено критичне поле B_c при цих температурах.

Вставка: залежність критичного поля B_c як функція від T/T_c . Суцільна лінія відповідає співпадінню експериментальних даних теорії Гінзбурга-Ландау

Встановлено, що стрибкоподібне падіння опору на польових залежностях поздовжнього магнітоопору недеформованих НК GaSb із концентрацією телуру $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 16) в інтервалі температур $1,5 \div 4,2 \text{ К}$ зумовлене частковим переходом у надпровідний стан. Встановлено, що поміщення зразків у магнітне поле пригнічує ефекти слабкої антилокалізації та надпровідності, що дозволило визначити верхні критичні магнітні поля, які становлять $0,16 \text{ Тл}$ та $1,1 \text{ Тл}$ (вставка рис. 16), відповідно.

За результатами досліджень експериментальних даних у НК GaSb, встановлено, що перехід в надпровідний стан істотно залежить від концентрації легуючої домішки. Так, у зразках із концентрацією телуру $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігається конкуренція обох ефектів Кондо-взаємодії та куперівської взаємодії, характерних для зразків із металеву провідністю, в яких концентрація легуючої домішки відповідає металевому боку ПМД. Для таких зразків частина носіїв заряду локалізується на домішках і взаємодіє з вільними носіями заряду, приводячи до Кондо-взаємодії, яка разом із тепловою взаємодією руйнують куперівські пари і, відповідно, приводять до зникнення надпровідності при температурі $4,2 \text{ К}$.

У досліджених сильно легованих зразках GaSb із концентрацією телуру $2,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при пониженні температури від $4,2$ до $1,6 \text{ К}$ нами вперше виявлено перехід від ефекту слабкої антилокалізації до слабкої локалізації, який спостерігається при температурі порядку 4 К (рис. 17), зумовлений зміною з

температурою співвідношення між часом збою фази τ_φ та часом спінової релаксації τ_{so} за рахунок спин-орбітальної взаємодії (рис. 18).

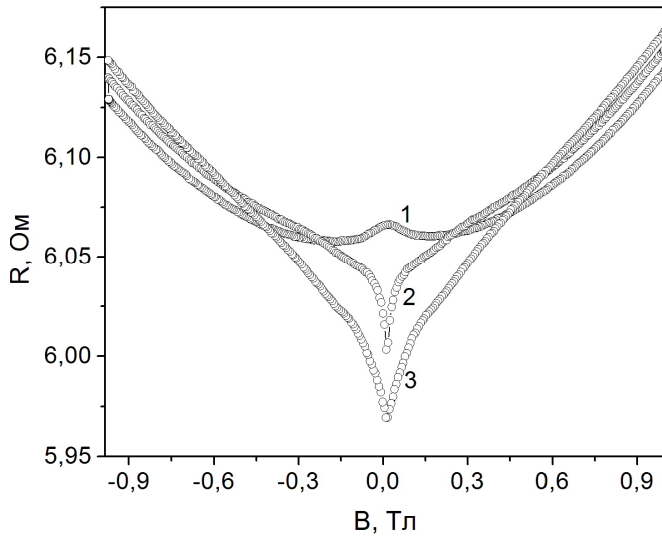


Рис. 17. Польові залежності поперечного магнітоопору НК GaSb із концентрацією легуючої домішки $2,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при фіксованих температурах, К: 1 – 1,6; 2 – 2,8; 3 – 4,2

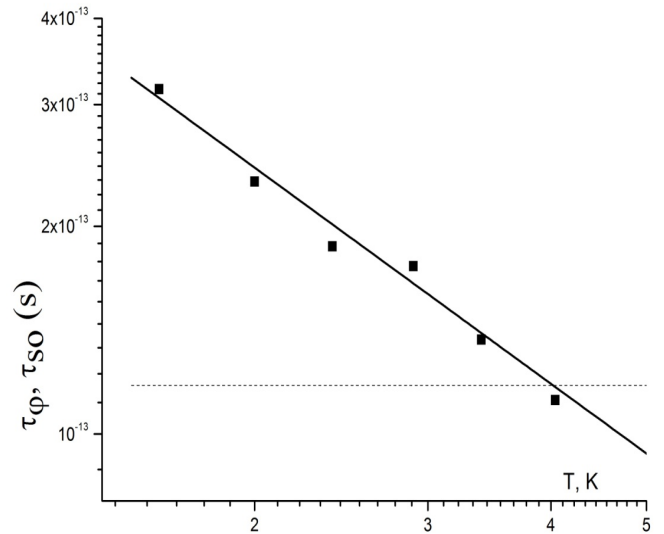


Рис. 18. Температурні залежності часу спин-орбітальної взаємодії та часу фазової релаксації НК GaSb із концентрацією легуючої домішки $2,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Вивчено вплив деформації на поведінку температурних залежностей опору НК GaSb n-типу провідності з концентрацією телуру $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Аналізуючи ці залежності в інтервалі температур $4,2 \div 30 \text{ К}$, виявлено індуковані деформацією ПМД і часткову надпровідність. Зокрема, глибокий мінімум, виявлений на температурних залежностях опору при температурі нижче 11 К , відповідає індукованому деформацією ПМД у діелектричну фазу.

Досліджено також польові залежності поперечного і поздовжнього магнітоопору недеформованих і деформованих НК GaSb в інтервалі температур $5 \div 60 \text{ К}$ і магнітних полів $0 \div 3 \text{ Тл}$. Встановлено, що деформація приводить до зменшення надпровідності та величини отриманих верхніх критичних магнітних полів придушення надпровідності. В НК GaSb n-типу провідності виявлено індуковане деформацією розщеплення виродженого рівня на дві компоненти з паралельними і протилежними спінами, зумовлене ефектами слабкої локалізації та антилокалізації. Внаслідок впливу одновісної деформації стиску змінився також період осциляцій Шубнікова – де Гааза від $0,025 \text{ Т}^{-1}$ до $0,039 \text{ Т}^{-1}$, а при індукції порядку 7 Тл на польових залежностях поздовжнього магнітоопору зразків GaSb, легованих до концентрації в околі ПМД виявлено, зумовлене деформацією, розщеплення піків осциляцій, на основі якого оцінено значення g-фактора Ланде $g^* = 53$. Під впливом деформації ефективна маса електронів зменшується до $m_c = 0,036 m_0$, а температура Дінгла зростає до $9,6 \text{ К}$. У НК GaSb n-типу провідності, як і для зразків InSb, виявлено індуковану деформацією появу фази Беррі, характерну для переходу в стан топологічного ізолятора.

Також вивчено вплив деформації на магнітоопір НК GaSb n-типу провідності в слабких магнітних полях з індукцією $0 \div 3$ Тл, що зумовлює пригнічення ефектів надпровідності та слабкої локалізації, критичні магнітні поля яких збігаються і становлять порядку 0,31 Тл. Крім цього, деформація викликає розщеплення виродженого рівня на дві компоненти з паралельними і протилежними спінами, пов'язаними з ефектами слабкої локалізації та антилокалізації, відповідно.

Отже, встановлено, що слабка антилокалізація та надпровідність є основними конкуруючими механізмами провідності, які мають місце у приповерхневих шарах, що пояснює поведінку польових залежностей магнітоопору в НК GaSb, легованих телуrom.

У **сьомому розділі** наведено результати досліджень щодо розроблення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих НК Si, Ge, InSb та GaSb, дієдатних в області криогенних температур.

Встановлено, що для роботи в області низьких температур найбільш придатними є тензорезистори на основі слабо легованих НК Ge n-типу провідності з концентрацією легуючої домішки 5×10^{17} см⁻³ і зразків Ge p-типу, легованих галієм до концентрації, що відповідає близькості до ПМД. Тензорезистори на основі слабо легованих НК Ge n-типу провідності рекомендовано для вимірювання дуже малих деформацій при фіксованих температурах, особливо при 77 К, завдяки їх високій тензочутливості. Показано, що сильнолеговані зразки необхідно використовувати для вимірювання деформацій у широкому інтервалі температур $77 \div 300$ К, що зумовлено слабкою температурною залежністю їх коефіцієнта тензочутливості.

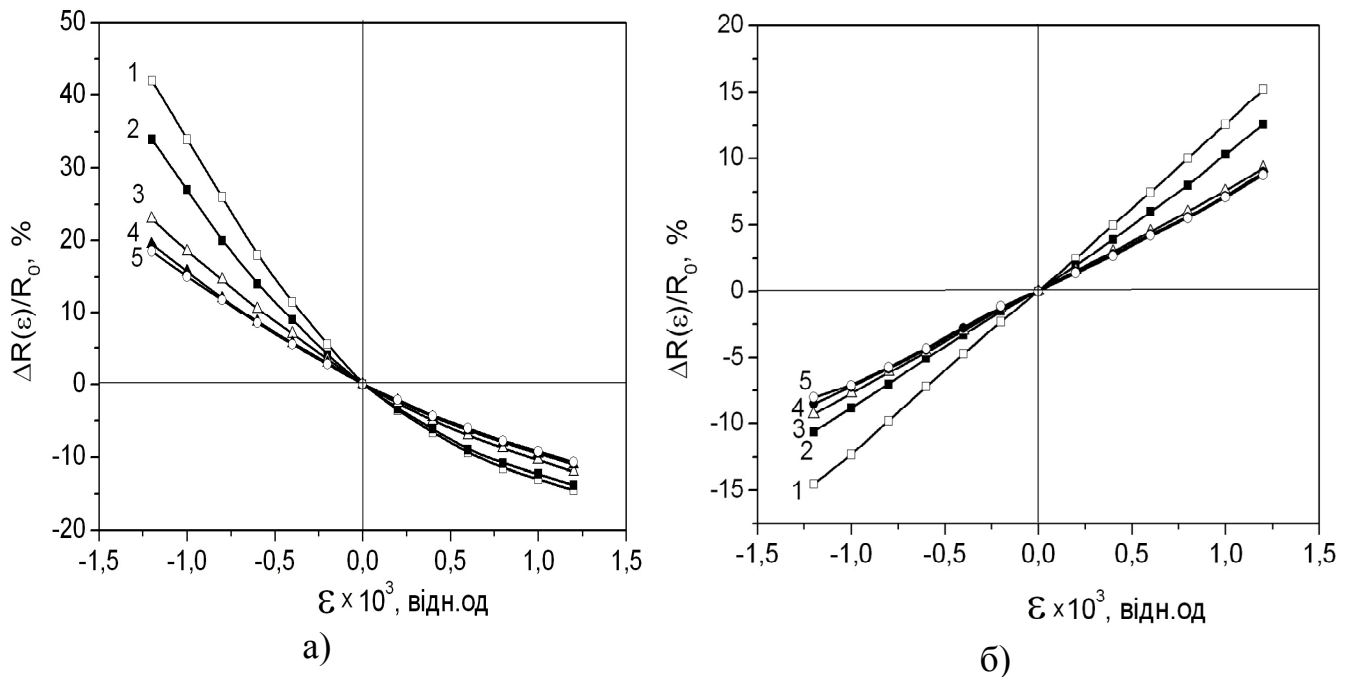


Рис. 19. Залежності відносної зміни опору від деформації для НК Ge n- (а) та p-типу провідності (б) при фіксованих температурах, К: 1 – 6; 2 – 14; 3 – 24; 4 – 42; 5 – 70.

Розроблено чутливий елемент багатофункційного датчика температури, деформації і магнітного поля з використанням в якості сенсора температури НК Si р-типу провідності, а сенсорів деформації та магнітного поля – мікрокристалів Ge р- та n-типу, відповідно.

Вивчено залежності відносної зміни опору від деформації зразків Ge n- та р-типу провідності з концентрації легуючої домішки $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в інтервалі температур 4,2 – 70 К. На рис. 19 наведено описані залежності для НК Ge, легованих сурмою (рис. 19,а) та галієм (рис. 19,б) у діапазоні деформацій $\pm 1,5 \times 10^{-3}$ відн. од., що відіграють роль сенсорів деформації в розробленому чутливому елементі багатофункційного датчика. Встановлено, що чутливість сенсора деформації, створеного на основі НК Ge n-типу провідності при максимальному рівні деформації $1,5 \times 10^{-3}$ відн.од. і температури рідкого гелію становить понад 40 % (рис. 19,а), в той час як на основі НК Ge р-типу – порядку 15 % (рис. 19,б).

На рис. 20 наведено вихідні сигнали сенсорів деформації (рис. 20,а), магнітного поля (рис. 20,б), створених на основі Ge р- і n-типу провідності, відповідно, а також сенсора температури (рис. 20,в), створеного на основі Si р-типу провідності.

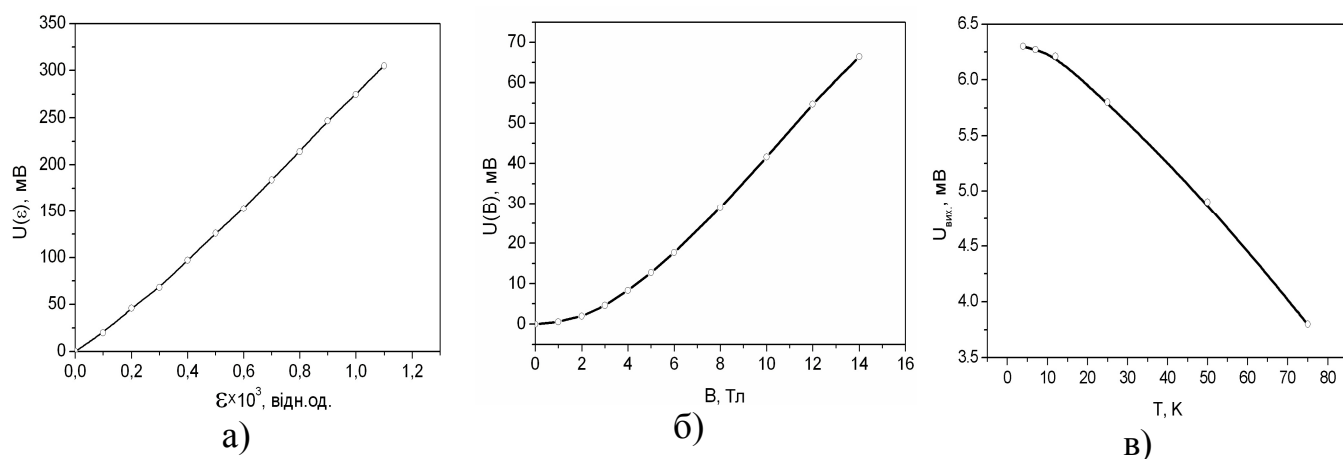


Рис. 20. Вихідний сигнал багатофункційного датчика для сенсорів:
 а) деформації; б) магнітного поля; в) температури

Як видно з рис. 20,а при температурі 70 К вихідний сигнал сенсора деформації, створеного на основі Ge р-типу провідності, що відповідає рівню деформації $1,2 \times 10^{-3}$ відн.од. досягає 300 мВ. Для сенсора магнітного поля на основі Ge n-типу провідності за цієї ж температури та індукції магнітного поля 14 Тл (рис. 20, б) вихідний сигнал становить 65 мВ. На рис. 20,в представлено вихідний сигнал сенсора температури на основі НК Si р-типу провідності в інтервалі температур 4,2 – 70 К. Використання зразків Ge, легованих сурмою та галієм, та Si, легованого бором, є важливим для забезпечення компенсації температурних похибок, що дозволило підвищити точність вимірюваних параметрів і розширити діапазон вимірювання магнітного поля до 14 Тл. Крім того, використання в якості сенсорів деформації та магнітного поля НК Ge р- і n-типу провідності дозволяє розділити сигнали при вимірюванні деформації та магнітного поля. Чутливість

сенсора температури в інтервалі температур $4,2 \div 70$ К становить $0,42 \text{ Ом} \times \text{К}^{-1}$, чутливість сенсора деформації сягає 40 % при температурі рідкого гелію, а сенсора магнітного поля – 35 % при індукції 14 Тл.

Для забезпечення кардинально вищої чутливості розробленого багатофункційного датчика до впливу магнітного поля із збереженням достатньої чутливості також до впливу деформації, запропоновано використання НК InSb n-типу провідності з концентрацією олова $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в якості чутливих елементів сенсорів магнітного поля, що дозволяє підвищити їх чутливість на кілька порядків у полях з індукцією до 10 Тл, що підтверджено патентом України.

Доведено, що НК GaSb n- і p-типу провідності мають високу тензочутливість, працездатні в широкому інтервалі температур $-160 \div +100$ °С і можуть використовуватись як чутливі елементи напівпровідникових тензорезисторів. Розроблені на їх основі датчики можуть застосовуватись для вимірювання високих і екстремально високих тисків до 5 кбар робочих рідин гідравлічних систем, для дослідження процесів з високим тиском в хімічній і нафтохімічній промисловості, вимірюванні тиску бурового розчину та ін.

На основі результатів досліджень впливу гідростатичного тиску на опір спеціально легованих НК GaSb n-типу провідності, встановлено їх високу чутливість до тиску, особливо в діапазоні $0 \div 3$ кбар, що дозволяє створення на їх основі сенсорів тиску з розширеним робочим діапазоном та спрощення їх конструкції. Перевагами розроблених датчиків у порівнянні з датчиками тиску з напівпровідниковими тензорезисторами, закріпленими на пружних елементах, є висока чутливість (зміна опору $18 \div 20$ % на кожні 1000 кгс/см^2), яка є постійною в широкому діапазоні тисків, а також більший вихідний сигнал. Дані датчики відрізняються простотою конструкції, відсутністю нестабільності та гістерезису, зумовленими впливом зв'язуючого матеріалу, що підтверджено патентами України.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Результати проведених комплексних досліджень електро- та магнітотранспортних властивостей НК Si, Ge, InSb та GaSb дозволять розв'язати науково-прикладну проблему створення на їх основі високочутливих сенсорів фізичних величин, що сприятиме розвитку галузі сенсорики. Отримано такі основні результати:

1. На основі вивчення впливу спіно-орбітальної взаємодії на деформаційне зняття виродження енергетичного спектра валентної зони кремнію та германію у дво- та тризонному наближенні кр-методу теорії збурень розрахована деформаційна залежність розщеплення валентних зон Si та Ge у центрі зони Бріллюена. Показано, що під впливом спіно-орбітальної взаємодії відбувається зсув зони легких дірок у Si, а в Ge вплив спіно-орбітальної взаємодії має місце лише при значних деформаціях $\epsilon > 0,6$ %. У НК Si та Ge виявлені екстремально високі значення коефіцієнта тензочутливості в області дії “некласичного” п'єзоопору до $K \approx -5,24 \times 10^5$, що дозволяє їх використання у високочутливих п'єзорезистивних сенсорах механічних величин, дієздатних в області криогенних температур.

2. Встановлено, що в сильно легованих НК Si p-типу провідності із концентрацією легуючої домішки в околі ПМД деформація стиску приводить до появи великих значень від'ємного магнітоопору (до 15%) у магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл, зумовленого слабкою локалізацією носіїв заряду, що підтверджує основний внесок у провідність транспорту носіїв заряду в приповерхневих шарах кристалів. На основі вивчення впливу деформації на спектр валентної зони НК Si визначено енергію спин-орбітального розщеплення підзони важких дірок $\Delta_{SO} = 1,8$ меВ.

3. Встановлено, що виявлені магнітофононні осциляції поздовжнього та поперечного магнітоопору в НК Ge n-типу провідності в інтервалі температур 4,2–70 К і у магнітних полях з індукцією до 14 Тл зумовлені міждолинним резонансним розсіюванням електронів, а у зразках Ge p-типу – перерозподілом дірок по зонах легких та важких дірок. Показано, що амплітуда магнітофононних осциляцій залежить від величини індукції магнітного поля, струму розігріву і температури, а також значення і знаку прикладеної одновісної деформації. Встановлено, що осциляційні максимуми зумовлені внутрідолинними переходами між рівнями Ландау в долині з циклотронною ефективною масою легких електронів $m_L = 0,082 m_0$ при участі поперечних оптичних фононів із енергією $E_{TO} \approx 36,15$ меВ у L-точці зони Брілюена, а також міждолинним резонансним розсіюванням носіїв з ефективною масою важких електронів $m_L = 0,207 m_0$, при участі акустичних і оптичних фононів у Γ , X_1 та X_3 -точках зони Брілюена, відповідно з енергіями $E_{TA} = 37,3$ меВ, $E_{TA} = 9,93$ меВ та $E_{LO} = 29,8$ меВ.

4. Встановлено, що електронне опромінення НК Si з концентрацією легуючої домішки $1 \times 10^{18} \div 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ з енергією 10 МеВ при збільшенні флюенса до $1 \times 10^{18} \text{ ел/см}^2$ зумовлює збільшення як величини опору, так і магнітоопору у магнітних полях з індукцією до 14 Тл, а підвищення температури до 30 К приводить до зменшення значень магнітоопору. Опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $1 \times 10^{18} \text{ ел/см}^2$ не приводить до зміни коефіцієнта тензочутливості при температурі рідкого гелію сильно легованих НК Si з концентрацією бору $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, які придатні для створення радіаційностійких сенсорів механічних величин, дієздатних в області криогенних температур.

5. На основі аналізу зонної структури НК InSb та GaSb з використанням ізотропного наближення моделі Кейна, яка враховує спин-орбітальну взаємодію, встановлено, що заселеність «відщепленої» зони дірок набагато менша, ніж заселеність зони провідності, «важких» та «легких» дірок, що впливає на транспортні властивості зразків InSb та GaSb.

6. Вперше виявлено ефект Кондо в НК GaSb n-типу провідності з концентрацією телуру $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, який виникає в результаті обмінної взаємодії між локалізованими на атомах домішки дірками і вільними носіями заряду. Встановлено, що збільшення концентрації легуючої домішки зумовлює істотне перекриття хвильових функцій, що приводить до збільшення значення прямої обмінної взаємодії, зміни знаку інтеграла обмінної взаємодії і як результат затухання ефекту Кондо.

7. Виявлено осциляції Шубнікова-де Гааза як результат аналізу поздовжнього і поперечного магнітоопору НК InSb n-типу провідності з концентрацією Sn від $4,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $7,16 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в інтервалі температур $4,2 \div 77 \text{ К}$ в магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Встановлений індукований магнітним полем ПМД у зразках із концентрацією легуючої домішки, зумовлений сильною спін-орбітальною взаємодією, що приводить до розщеплення кожного піку поздовжнього і поперечного магнітоопору у всьому діапазоні полів і одержання гігантських значень g-фактора $g^* = 46 \div 60$. Аналіз осциляцій Шубнікова-де Гааза дозволив розрахувати основні параметри InSb, такі як циклотронна ефективна маса електронів $m_c \approx 0,03m_0 \div 0,033m_0$, рівень Фермі $E_F \approx 0,11 \text{ еВ}$, температура Дінгла $T_D = 3 \text{ К}$, які із збільшенням концентрації домішки зростають до $E_F \approx 0,12 \text{ еВ}$ та до $T_D = 12 \text{ К}$, відповідно.

8. Вперше встановлена поява надпровідності в НК GaSb, легованих телуром, при критичній температурі 4,2 К, зумовлена сильною спін-орбітальною обмінною взаємодією носіїв заряду в металевій фазі в околі ПМД. Цей висновок підтверджується результатами дослідження магнітної сприйнятливості НК у слабких магнітних полях, які показали, що НК GaSb – це надпровідник другого роду з критичними полями (нижнім 50 мТл та верхнім 1,1 Тл) існування надпровідності.

9. В результаті вивчення польових залежностей магнітоопору НК GaSb вперше виявлено перехід від слабкої локалізації до антилокалізації носіїв заряду при температурі 4 К, зумовлений зміною з температурою співвідношення між часом збою фази та часом спінової релаксації електронів у мікрокристалах.

10. Аналіз виявленого від'ємного магнітоопору в НК GaSb в слабких магнітних полях $0 \div 3 \text{ Тл}$, що описується двовимірною моделлю слабкої антилокалізації, дозволив визначити параметр Рашби спін-орбітальної взаємодії, що становить $1,66 \times 10^{-12} \text{ еВ} \times \text{м}$. Отримані значення довжини спін-орбітальної взаємодії $l_{SO} = 20 \text{ нм}$ і одержані значення довжини когерентності $\xi(0) = 1,7 \text{ нм}$ куперівських пар, дозволили зробити припущення про конкуренцію надпровідності та слабкої антилокалізації носіїв заряду в приповерхневих шарах кристалу.

11. Встановлено, що вплив деформації на магнітотранспортні характеристики НК GaSb зумовлює розщеплення піків осциляцій Шубнікова – де Гааза, на основі чого розраховано гігантські значеннями g-фактора Ланде 53, а також зменшення ефективної маси електронів до $m_c = 0,036 m_0$, зростання температури Дінгла до 9,6 К, пригнічення ефектів надпровідності та слабкої локалізації, а також розщеплення виродженого рівня важких дірок на дві компоненти з паралельними і протилежними спінами.

12. Вперше встановлена індукована деформацією поява фази Беррі в магнітоопорі НК InSb та GaSb з концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, яка зумовлена сильною спін-орбітальною взаємодією носіїв заряду, що підтверджує двовимірну природу електронного газу та їх перехід у стан топологічного ізолятора.

13. На основі вивчення впливу гідростатичного тиску на опір спеціально легованих зразків GaSb n-типу провідності, встановлено їх високу чутливість до

тиску в діапазоні $0 \div 3$ кбар, що дозволило створити на їх основі датчики гідростатичного тиску з розширеним робочим діапазоном. Їх перевагами в порівнянні з датчиками тиску з напівпровідниковими тензорезисторами є висока чутливість (зміна опору $18 \div 20$ % на кожні 1000 кгс/см²) в широкому діапазоні тисків, а також більший вихідний сигнал. Розроблені датчики відрізняються простотою конструкції, відсутністю нестабільності та гістерезису, зумовленими впливом зв'язуючого матеріалу.

14. В результаті вивчення електрофізичних властивостей НК кремнію р-типу провідності, германію та антимоніду індію n-типу як деформованих, так і недеформованих в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К і магнітних полях з індукцією до 14 Тл встановлено, що для застосування у багатофункційних сенсорах магнітного поля, температури та деформації придатні зразки Si, Ge з концентрацією легуючої домішки $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18}$ см⁻³. Виявлено, що використання тензорезисторів на основі НК InSb n-типу провідності з концентрацією олова 2×10^{17} см⁻³ як чутливих елементів магнітного поля дозволило істотно підвищити їх чутливість при температурах $4,2 \div 70$ К та досягти незалежності магнітоопору від температури в інтервалі полів $0 \div 7$ Тл.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Дружинін, А. О., Мар'ямова, І. Й., Островський, І. П., Ховерко, Ю. М., Лях-Кагуй, Н. С., Маслюк, В. Т., & Мегела, І. Г. (2010). Вплив електронного опромінення на низькотемпературну провідність легованих ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge. *Physics and Chemistry of Solid State*, 11(3), 588-592. <http://page.if.ua/uploads/pcss/vol11/1103-07.pdf> (Здобувачкою визначено зміну коефіцієнта тензочутливості НК Si р-типу провідності під дією високоенергетичного електронного опромінення)
2. Дружинин, А. А., Марьямова, И. И., Кутраков, А. П., Лях-Кагуй, Н. С., Маслюк, В. Т., & Мегела, И. Г. (2010). Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 1 (85), 26-29. <http://dSPACE.nbuV.gov.ua/bitstream/handle/123456789/51887/07> (Здобувачкою визначено індуквану електронним опроміненням зміну параметрів тензорезисторів на основі НК кремнію з різним рівнем легування)
3. Дружинін, А. О., Мар'ямова, І. Й., Кутраков, О. П., & Лях-Кагуй, Н. С. (2011). Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки. *Фізика і хімія твердого тіла*, (12, № 4), 1078-1084. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2011_12_4_41 (Здобувачкою розраховано коефіцієнт тензочутливості НК Si з різною концентрацією легуючої домішки)
4. Дружинін, А. О., Мар'ямова, І. Й., Кутраков, О. П., & Лях-Кагуй, Н. С. (2012). Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 9(3), 16-24. <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.3.114538> (Здобувачкою розраховано

параметри чутливого елемента сенсора механічних величин на основі НК Si дієздатних за криогенних температур)

5. Дружинин, А. А., Кутраков, А. П., Лях-Кагуй, Н. С., & Вуйцик, А. М. (2013). Двухфункциональный датчик давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 4, 23-26. <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/56345> (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора механічних величин на основі НК p-Si)

6. Дружинин, А. О., Островський, І. П., Лях-Кагуй, Н. С., & Вуйцик, А. М. (2013). Магнетофононний резонанс у ниткоподібних кристалах германію. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Електроніка*, 764, 135-142. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/24011> (Здобувачкою визначено період магнетофононних осциляцій у сильнолегованих НК Ge n-типу провідності в імпульсних магнітних полях з індукцією до 35 Тл)

7. Дружинин, А. О., Большакова, І. А., Островський, І. П., Ховерко, Ю. М., & Лях-Кагуй, Н. С. (2014). Особливості магнітоопору мікрочастин InSb за криогенних температур. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Електроніка*, (798), 93-98. (Здобувачкою проведено аналіз поведінки магнітоопору НК InSb та виявлено осциляції Шубнікова – де Гааза в області криогенних температур)

8. Druzhynin, A., Ostrovskiy, I., Khoverko, Y., Khytruk, I., & Liakh-Kaguy, N. (2015). Low temperature performances of doped GaSb whiskers. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 5(2), 75–78. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/33977> (Здобувачкою встановлено перехід від ефекту слабкої локалізації до антилокалізації в легованих НК GaSb n-типу провідності)

9. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Кутраков А.П., Лях-Кагуй Н.С. (2015). Датчики гидростатического давления на основе микрокристаллов антимионда галлия. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 4, 19–23. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2015.4.19> (Здобувачкою запропоновано модель чутливого елемента датчика гідростатичного тиску на основі НК GaSb)

10. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Liakh-Kaguy N.S. (2016). Thermoelectric properties of SiGe whiskers. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 20-27. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22016.20-27> (Здобувачкою визначено параметри НК Si та Ge, рекомендованих для створення сенсора теплових величин на їх основі)

11. Druzhinin, A. A., Khoverko, Y. M., Kuttrakov, A. P., Liakh-Kaguy, N. S., & Yatsukhnenko, S. Y. (2017). Sensitive element of multifunctional sensor for measuring temperature, strain and magnetic field induction. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 6, 42–45. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2017.6.03> (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора магнітних величин на основі НК Ge n- та p-типу провідності)

12. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2018). Вплив одновісної деформації та гідростатичного тиску на властивості тонких шарів InSb. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 15(3), 50–57.

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2018.3.142044> (Здобувачкою визначено значення коефіцієнта гідростатичного тиску в зразках InSb із різною рівнем легування)

13. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M., Liakh-Kaguy N.S. (2018). Magnetoresistance of Ge-Si whiskers in the vicinity to metal-insulator transition. *Physics and Chemistry of Solid State*, 19(2), 130-133. <https://doi.org/10.15330/pcss.19.2.130-133> (Здобувачкою визначено індуковану деформацією зміну параметрів у НК Si, легованих в околі ПМД)

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science

14. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2019). Strain-Induced Berry Phase in GaSb Microcrystals. *Journal of Low Temperature Physics*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10909-019-02189-4> (Здобувачкою встановлено існування Бері фази в деформованих НК GaSb)

15. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., Liakh-Kaguy, N., & Lukyanchenko, A. (2018). Spin-orbit interaction in InSb core-shell wires. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 674(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/15421406.2019.1578506> (Здобувачкою встановлено перехід від ефекту слабкої локалізації до антилокалізації в НК InSb)

16. Druzhinin, A. A., Maryamova, I. I., Kuttrakov, O. P., Liakh-Kaguy, N. S., & Palewski, T. (2012). Strain induced effects in p-type silicon whiskers at low temperatures. *Functional materials*, 19(3), 325-329. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/135328> (Здобувачкою визначено індуковану деформацією зміну параметрів у НК Si p-типу провідності)

17. Druzhinin, A. A., Ostrovskii, I. P., Khoverko, Y. N., Liakh-Kaguy, N. S., & Vuytsyk, A. M. (2014). Low temperature characteristics of germanium whiskers. *Functional materials*, 21 (2), 130-136. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/120404> (Здобувачкою визначено період магнітофононних осциляцій НК Ge з концентрації легуючої домішки в околі ПМД)

18. Druzhinin, A., Bolshakova, I., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2015). Low temperature magnetoresistance of InSb whiskers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 40, 550-555. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.030> (Здобувачкою визначено значення температури Дінгла в легованих НК InSb)

19. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., Liakh-Kaguy, N., Khytruk, I., & Rogacki, K. (2015). Peculiarities of magnetoresistance in InSb whiskers at cryogenic temperatures. *Materials Research Bulletin*, 72, 324-330. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.08.016> (Здобувачкою визначено період осциляцій Шубнікова – де Гааза в НК InSb легованих в околі ПМД)

20. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2016). Negative magnetoresistance in indium antimonide whiskers doped with tin. *Low Temperature Physics*, 42(6), 453-457. <https://doi.org/10.1063/1.4954778> (Здобувачкою встановлено природу від'ємного магнітоопору в НК InSb, зумовлену класичним розмірним ефектом, зокрема розсіюванням в приповерхневих шарах ниткоподібних кристалів)

21. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Liakh-Kaguy, N., & Kogut, I. (2016). Thermoelectric properties of oblique SiGe whiskers. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 8(2), 02030-1–02030-5. http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnef_2016_8_2_32 (Здобувачкою визначено ряд параметрів НК Si та Ge на основі дослідження їх електрофізичних властивостей)
22. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2017). Low-temperature magnetoresistance of GaSb whiskers. *Low Temperature Physics*, 43(6), 692-698. <https://doi.org/10.1063/1.4985975> (Здобувачкою встановлено природу від'ємного магнітоопору в деформованих НК InSb зумовлену квантування електронних станів)
23. Khytruk, I., Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., Liakh-Kaguy, N., & Rogacki, K. (2017). Properties of doped GaSb whiskers at low temperatures. *Nanoscale research letters*, 12(1), 156. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1923-1> (Здобувачкою визначено параметр Раїмба та довжину когерентності в НК GaSb)
24. Budzhak, Y., Liakh-Kaguy, N., Ostrovskii, I., & Druzhinin, A. (2018). Peculiarities of Electroconductivity and Magnetoresistance in Silicon Whiskers with Doping Concentration in the Vicinity to Metal-insulator Transition at Low Temperatures. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 10(4), 04015-1–04015-7. [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04015) (Здобувачкою визначено концентрацію легуючої домішки в оболонці та ядрі НК Si)
25. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., Liakh-Kaguy, N., & Rogacki, K. (2018). Berry phase in strained InSb whiskers. *Low Temperature Physics*, 44(11), 1189-1194. <https://doi.org/10.1063/1.5060974> (Здобувачкою встановлено появу Бері фази під дією деформації в НК InSb)
26. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2019). Quantization in magnetoresistance of strained InSb whiskers. *Low Temperature Physics*, 45(5), 513-517. <https://doi.org/10.1063/1.5097360> (Здобувачкою встановлено природу від'ємного магнітоопору в деформованих НК InSb зумовлену квантуванням електронних станів)
27. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y., & Liakh-Kaguy, N. (2019). Spin-orbit Splitting of Valence Band in Silicon Whiskers under Strain. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11 (2), 02019-1–2019-8. [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(2\).02019](https://doi.org/10.21272/jnep.11(2).02019) (Здобувачкою визначено величину спін-орбітального розщеплення валентної зони Si під дією деформації)

Статті в матеріалах конференцій, які індексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science

28. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N., Byldina Ya. (February, 2016). Magnetoresistance oscillation in germanium and indium antimonide whiskers. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the XIII-th International Conference TCSET*, (pp. 361–363.) Lviv-Slavske, Ukraine. <http://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452059> (Здобувачкою визначено період магнітофононних осциляцій в НК Ge і осциляцій Шубнікова-де Гааза – в InSb)

29. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Liakh-Kaguy N.S., Kogut Iu.R. (2016, May). Properties of SiGe microcrystals in strong magnetic fields for thermoelectric sensors. *Proceedings of the International Conference on Electronics and Information Technology*, (pp. 39–42) Odesa, Ukraine. <http://doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500987> (Здобувачкою визначено параметри сенсорів температури дієздатних в сильних магнітних полях)

30. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N. (2017, September). Magnetoresistance oscillations in InSb and GaSb whiskers at low temperatures. *The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). Conference Proceedings*, (p. 1–5) Odessa, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2017.8095393> (Здобувачкою проведено аналіз поведінки магнітоопору НК InSb та GaSb виявлено осциляції Шубнікова – де Гааза в області криогенних температур)

31. Druzhinin A., Ostrovskii I., Liakh-Kaguy N., Zyska T., Tuleshova A., Satymbekov M., Iskakova A. (2017). Thermoelectric properties of SiGe whiskers with various morphology. *Proceedings of SPIE*, 10445, 1044556-1–1044556-9. <http://doi.org/10.1117/12.2280895> (Здобувачкою визначено ряд параметрів НК SiGe на основі дослідження їх електрофізичних властивостей)

32. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N., Byldina Y. (2017). Magnetoresistance of doped Te:GaSb whiskers. *Proceedings of the 2017 IEEE 7th Second International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017)*, (p. 04NESP11-1–04NESP11-4.) Zatoka, Odessa, Ukraine. <http://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190298> (Здобувачкою проведено аналіз поведінки магнітоопору НК GaSb при температурах нижче рідкого гелію)

33. Druzhinin A., Maryamova I., Kuttrakov O., Liakh-Kaguy N. (2018). Studies piezoresistive properties of n-type conductivity indium antimonide thin layers. *Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, (pp. 445–448) Lviv-Slavske, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336237> (Здобувачкою проведено аналіз характеристик InSb завдяки дослідженню електрофізичних властивостей)

34. Druzhinin A., Kuttrakov A., Liakh-Kaguy N. (2017, April). The effect of hydrostatic pressure on the indium antimonide thin films. *37th International Conference on Electronics and Nanotechnology, (ELNANO), Conference Proceedings*, (pp. 96-99) Kyiv, Ukraine, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939724> (Здобувачкою визначено значення коефіцієнта гідростатичного тиску в зразках InSb із різною рівнем легування)

35. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N., (2019, April). Deformation-induced Magnetoconductance in Silicon Whiskers near Metal-insulator Transition. *39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, (ELNANO), Conference Proceedings*, (pp. 732-735) Kyiv, Ukraine, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783337> (Здобувачкою проведено аналіз поведінки магнітоопору НК Si, легованих в околі ПМД)

Праці, опубліковані у збірниках тез доповідей всеукраїнських і міжнародних конференцій:

36. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Кутраков А.П., Лях-Кагуй Н.С. (2009). Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. *Труды 10-ой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (СИЭТ-2009), Том 2*(с. 153) м. Одесса, Украина. (Здобувачкою визначено індуковану електронним опроміненням зміну параметрів тензорезисторів на основі НК Si з різним рівнем легування)
37. Дружинин А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Лях-Кагуй Н.С. (2009, Вересень). Вплив деформації на магнітоопір ниткоподібних кристалів кремнію та Si-Ge. *Тези доповідей IV Української наукової конференції з фізики напівпровідників. Том 1*, (с. 203-204) м. Запоріжжя, Україна. (Здобувачкою проведено аналіз впливу деформації на поведінку магнітоопору НК Si)
38. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Й., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2010). Дослідження впливу електронного опромінення на ниткоподібні кристали Si, SiGe та шари полікремнію. *4-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-4): Тези доповідей*, (с. 8-9) м. Одесса, Україна. (Здобувачкою визначено коефіцієнт тензочутливості НК Si під дією електронного опромінення)
39. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2010). Провідність легованих НК кремнію, опромінених електронами. *VII Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників»: Тези доповідей*, (с. 164) м. Дрогобич, Україна. (Здобувачкою визначено коефіцієнт тензочутливості НК Si, опромінених високоенергетичними електронами)
40. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2011, Жовтень) Деформаційно-стимульовані ефекти в мікрочисталах кремнію р-типу за низьких температур. *Збірник тез V Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5)*, (с. 136–137) Ужгород, Україна. (Здобувачкою визначено зміну коефіцієнта тензочутливості НК Si під впливом опромінення)
41. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2012, Травень). Тензорезистивні сенсори на основі ниткоподібних кристалів кремнію. *5-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ–5). Тези доповідей*, (с. 185–186) Одеса, Україна. (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора механічних величин на основі НК Si дієдатних при криогенних температурах)
42. Дружинин А.А., Кутраков А.П., Лях-Кагуй Н.С., Вуйцик А.М. (2013, Мау). Разработка двухфункционального датчика давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния. *Труды XIV Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (СИЭТ)*, (с. 242–243) Одесса, Україна. (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора механічних величин на основі НК p-Si)
43. Дружинин А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Лях-Кагуй Н.С., Вуйцик А.М. (2012, Вересень) Низькотемпературні характеристики легованих ниткоподібних кристалів Ge. *Тези доповідей VI-ї Української наукової конференції*

з фізики напівпровідників (УНКФН-6), (с. 83–84) Чернівці, Україна. (Здобувачкою визначено ряд параметрів НК Ge, дослідивши їх електрофізичні властивості)

44. Druzhinin A., Kutrakov A., Liakh-Kaguy N., Vuuytsyk A. (2014, February). Pressure-temperature sensor based on p-type silicon whiskers. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the XII-th International Conference (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine. pp. 320–322. (Здобувачкою розраховано коефіцієнт тензочутливості НК кремнію p-типу)

45. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Кутраков А.П., Лях-Кагуй Н.С. (2015, Май). Датчики гидростатического давления на основе нитевидных кристаллов антимионида галлия. *Труды XVI Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (СИЭТ)*, (с. 226-227). Одесса, Украина. (Здобувачкою запропоновано модель чутливого елемента датчика гідростатичного тиску на основі НК GaSb)

46. Хитрук І.І., Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Лях-Кагуй Н.С. (2016, Вересень). Особливості магнітоопору ниткоподібних кристалів GaSb n-типу в умовах слабкої локалізації за низьких температур. *7-ма Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції*, (с. 130–131) Дніпро, Україна. (Здобувачкою встановлено перехід від ефекту слабкої локалізації до антилокалізації в НК GaSb при температурі рідкого гелію)

47. Khytruk I.I., Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.N., Liakh-Kaguy N.S. (2016, August) Properties of doped GaSb whiskers at low temperatures. *Abstract book of International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO)*, (p. 537). Lviv, Ukraine. (Здобувачкою проведено аналіз поведінки магнітоопору НК GaSb та виявлено осциляції Шубнікова – де Гааза)

48. Дружинін А.О., Марьямова І.Й., Островський І.П., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. (2018). Вплив деформації на властивості тонких шарів InSb в широкому інтервалі температур. *8-ма Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-8): Тези доповідей*, (с. 27) Одеса, Україна. (Здобувачкою визначено значення коефіцієнта тензочутливості в зразках InSb із різною рівнем легування)

49. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N., Lukianchenko A. (2018, August). Spin-orbit interaction in InSb core-shell wires. *Abstract book of International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO)*, (p. 622.) Kyiv, Ukraine. (Здобувачкою встановлено перехід від ефекту слабкої антилокалізації до локалізації в НК InSb із зменшенням рівня легування)

50. Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Лях-Кагуй Н.С. (2018, Жовтень). Надпровідність мікрокристалів GaSb за низьких температур в слабких магнітних полях. *8-ма Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-8)*, (с. 60–61) Ужгород, Україна. (Здобувачкою визначено верхнє критичне поле існування надпровідності в НК GaSb)

51. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.N., Liakh-Kaguy N.S. (2018). Superconductivity of GaSb microcrystals at weak magnetic fields. *Materials of the International Meeting “Cluster and nanostructured materials (CNM-5)”*, (p. 50–51) Uzhhorod, Ukraine. (Здобувачкою визначено верхнє та нижнє критичні поля існування надпровідності в НК GaSb n-типу провідності)

Патенти України

52. Патент на корисну модель № 106175 Україна, МПК: (2016.04) G01K 7/22. *Багатофункційний датчик / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201507474; заявл. 27.07.2016, опублік. 25.04.2016, Бюл. № 8. (Здобувачкою запропоновано модель багатофункційного датчика температури, деформації та магнітного поля на основі ниткоподібних кристалів кремнію та германію)*

53. Патент на корисну модель № 119016 Україна, МПК: (2017.09) G01K 7/22, G01B 7/16. *Багатофункційний датчик для криогенних температур / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201701869; опублік. 11.09.2017, Бюл. № 17. (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора магнітних величин на основі ниткоподібних кристалів InSb, легованих в околі переходу метал-діелектрик)*

54. Патент на корисну модель № 111724 Україна, МПК: (2016.11) G01V 1/16, G01V 1/52. *Сейсмічний датчик вібрацій / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С., Корецький Р.М. – № у 201604087; заявл. 14.04.2016, опублік. 25.11.2016, Бюл. № 22. (Здобувачкою розраховано параметри чутливого елемента сенсора механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію р-типу провідності)*

55. Патент на корисну модель № 133495 Україна, МПК: (2019.04) G01L 7/02, G01L 9/02, G01L 9/04. *Датчик гідростатичного тиску / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201810828; заявл. 01.11.2018, опублік. 10.04.2019, Бюл. № 7. (Здобувачкою запропоновано модель чутливого елемента датчика гідростатичного тиску на основі НК GaSb n-типу провідності)*

56. Патент на корисну модель № 79101 Україна, МПК: (2013.04) G01K 7/22, G01B 7/16, G01L 9/04, G01L 9/06. *Газовий термометр / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 2012 12082; заявл. 22.10.2012, опублік. 10.04.2013, Бюл. № 7. (Здобувачкою запропоновано вимірювальний елемент у вигляді чутливого елемента сенсора механічних величин на основі спеціально легованого НК Si)*

57. Патент на корисну модель № 86792 Україна, МПК: (2014.01) G01K 7/22, G01L 9/06. *Газовий термометр для криогенних температур / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201308841; заявл. 15.07.2013, опублік. 10.01.2014, Бюл. № 1. (Здобувачкою запропоновано спосіб підвищення точності вимірювань завдяки використанню двох додаткових тензорезисторів на основі НК Si р-типу)*

58. Патент на корисну модель № 107892 Україна, МПК: (2016.06) G01K 7/02, H01L 35/34. *Датчик теплового випромінювання / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201512671; заявл. 21.12.2015, опублік. 24.06.2016, Бюл. № 12. (Здобувачкою запропоновано виконання терморари на основі контакту епітаксійного шару Si р-типу провідності з шаром платини)*

59. Патент на корисну модель № 95398 Україна, МПК: (2014.12) G01K 7/22. *Спосіб компенсації температурної залежності тензочутливості / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. – № у 201406812; заявл. 16.06.2014, опублік. 25.12.2014, Бюл. № 4. (Здобувачкою запропоновано спосіб компенсації температурної залежності тензочутливості НК Si р-типу провідності)*

АНОТАЦІЯ

Лях-Кагуй Н.С. Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Проведено комплексне дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb у широкому інтервалі температур $1,4 \div 300$ К і магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл. На основі експериментальних досліджень польових залежностей магнітоопору в області криогенних температур виявлено осциляційний ефект у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb, який в залежності від концентрації легуючої домішки в околі ПМД пов'язаний з магнітофонними осциляціями чи осциляціями Шубнікова–де Гааза, що дозволило оцінити основні параметри носіїв заряду в кристалах. У ниткоподібних кристалах GaSb, легованих телуrom, вперше виявлено поверхневу надпровідність при критичній температурі 4,2 К, що зумовлено сильною спіно-орбітальною обмінною взаємодією носіїв заряду в металевій фазі в околі ПМД. Вперше встановлена поява фази Беррі в польових залежностях магнітоопору при температурі 4,2 К деформованих ниткоподібних кристалів InSb та GaSb n-типу провідності, що підтверджує двовимірну природу електронного газу у кристалах.

Вивчено вплив зовнішніх чинників (деформації, магнітного поля, електронного опромінення, температури) на властивості легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb як чутливих елементів сенсорів механічних, теплових та магнітних величин. На основі виявлених кінетичних ефектів розроблено концепцію створення надчутливих радіаційно стійких п'єзорезистивних сенсорів, дієздатних в екстремальних умовах експлуатації, зокрема при криогенних температурах, у сильних магнітних полях, при опроміненні електронами високих енергій, які зможуть знайти застосування в різних галузях науки і техніки.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, перехід метал-діелектрик, Si, Ge, InSb, GaSb, деформація, магнітоопір, надпровідність, слабка локалізація, сенсор.

АННОТАЦИЯ

Лях-Кагуй Н.С. Электро- и магнитотранспортные свойства базовых сенсорных нитевидных кристаллов Si, Ge, InSb, GaSb в окрестности перехода металл-диэлектрик. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

Проведено комплексное исследование электро- и магнитотранспортных свойств нитевидных кристаллов Si, Ge, InSb и GaSb в широком интервале температур $1,4 \div 300$ К и магнитных полях с индукцией $0 \div 14$ Тл. На основе экспериментальных исследований полевых зависимостей магнитосопротивления

в области криогенных температур обнаружено осцилляционный эффект в нитевидных кристаллах Si, Ge, InSb и GaSb, который в зависимости от концентрации легирующей примеси в окрестности ПМД связан с магнитофононными осцилляциями или осцилляциями Шубникова-де Гааза, что позволило оценить основные параметры носителей заряда в кристаллах. В нитевидных кристаллах GaSb, легированных теллуром, впервые выявлено поверхностную сверхпроводимость при критической температуре 4,2 К, что обусловлено сильным спин-орбитальным обменным взаимодействием носителей заряда в металлической фазе в окрестности ПМД. Впервые обнаружено появление фазы Берри в полевых зависимостях магнетосопротивления при температуре 4,2 К деформированных нитевидных кристаллов InSb и GaSb n-типа проводимости, что подтверждает двумерную природу электронного газа в кристаллах.

Изучено влияние внешних факторов (деформации, магнитного поля, электронного облучения, температуры) на свойства легированных нитевидных кристаллов Si, Ge, InSb и GaSb как чувствительных элементов сенсоров механических, тепловых и магнитных величин. На основе выявленных новых кинетических эффектов разработана концепция создания сверхчувствительных радиационно стойких пьезорезистивных сенсоров, дееспособных в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе при криогенных температурах, в сильных магнитных полях, при облучении электронами высоких энергий, которые смогут найти применение в различных областях науки и техники.

Ключевые слова: нитевидный кристалл, переход металл-диэлектрик, Si, Ge, InSb, GaSb, деформация, магнетосопротивление, сверхпроводимость, слабая локализация, сенсор.

ABSTRACT

Liakh-Kaguy N.S. Electro- and magnetotransport properties in the basic sensory Si, Ge, InSb, GaSb whiskers in the vicinity to the metal-insulator transition. – On the rights of the manuscript.

Thesis for a scientific degree of a Doctor of Technical Sciences on the specialty 01.04.07 – Solid State Physics. Lviv Polytechnic National University, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The complex investigation of electro- and magnetotransport properties of Si, Ge, InSb and GaSb whiskers in the wide temperature range 1.4 ÷ 300 K and magnetic fields with induction of 0 ÷ 14 T were carried out. On the basis of experimental studies of the magnetoresistance field dependences at cryogenic temperatures, an oscillatory effect was found in Si, Ge, InSb and GaSb whiskers. The effect was associated with magnetophonon oscillations or oscillations of Shubnikov-de Haas, depending on the doping concentration in the vicinity to the metal-insulator transition.

Shubnikov-de Haas oscillations were detected in the temperature interval of 4.2 ÷ 77 K and magnetic fields with induction up to 14 T as a result of the analysis of the longitudinal and transversal magnetoresistance of n-type conductivity InSb whiskers with a concentration of a dopant in the range of $4.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ to $7.16 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The induced magnetic field the metal-insulator transition is established in the InSb whiskers due to strong spin-orbit interaction, which leads to the splitting of each peak of the

longitudinal and transverse magnetoresistance in whole range of magnetic fields and to obtain the giant Lande g-factor $g^* = 46 \div 60$. Analysis of the Shubnikov-de Haas oscillations allowed to calculate the basic parameters of InSb whiskers, such as the cyclotron effective mass of electrons $m_c \approx 0.03m_o \div 0.033m_o$, the Fermi level $E_F \approx 0.11$ eV, the Dingle temperature $T_D = 3$ K, which, with increasing doping concentration increases to $E_F \approx 0.12$ eV and up to $T_D = 12$ K, respectively.

The Kondo effect was first detected in GaSb whiskers with tellurium concentration of $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. This effect arises as a result of an exchange interaction between holes localized on doped atoms and free charge carriers. It was established that the increasing of the doping concentration causes a significant overlap of the wave functions, which leads to an increase of the value of direct exchange interaction, the change of the sign of the exchange interaction integral and as a result of the damping of the Kondo effect.

A transition from the effect of weak anti-localization to the weak localization of charge carriers at temperature about 4 K was detected in heavy doped whiskers with a metallic type of conductivity in weak magnetic fields due to a change in the temperature correlation between dephasing time and electron spin relaxation time. Surface superconductivity was first observed at a critical temperature of 4.2 K in GaSb whiskers doped with tellurium due to the strong spin-orbit exchange interaction of charge carriers in the metal phase in the vicinity to the metal-insulator transition. This conclusion is confirmed by the results of the study of the magnetic susceptibility of whiskers in weak magnetic fields. This showed that the GaSb whisker is a superconductor of the second kind with critical fields (lower 50 mT and upper 1.1 T). The first appearance of the Berry phase on the magnetoresistance field dependences at temperature 4.2 K was found in the strained n-type conductivity InSb and GaSb whiskers with a doping concentration near the metal-insulator transition. That confirms the two-dimensional nature of the electron gas in whiskers and their transition into the state of the topological insulator.

Extremely high values of the Gauge factor up to $K \approx -5.24 \times 10^5$ for Si and Ge whiskers were found in the region of the action of the "non-classical" piezoresistance that allows them to be used in highly sensitive piezoresistive mechanical sensors.

The influence of external factors (strain, magnetic field, electron irradiation, temperature) on the properties of doped Si, Ge, InSb and GaSb whiskers as sensitive elements of mechanical, thermal and magnetic sensors were studied. The physical representations about the transport mechanisms of charge carriers were expanded due to the conducted studies for doped semiconductor whiskers in the vicinity to the metal-insulator transition at low temperatures in strong magnetic fields and under the influence of high-energy electron irradiation.

The concept of creating supersensitive radiation-sensitive piezoresistance sensors have been developed due to the discovered new kinetic effects in the whiskers. These sensors, which could be used in various fields of science and technology, are capable of extreme operating conditions, in particular at cryogenic temperatures, in strong magnetic fields with irradiation by high-energy electrons.

Key words: whisker, metal-insulator transition, Si, Ge, InSb, GaSb, strain, magnetoresistance, superconductivity, weak localization, sensor.