

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

ХОВЕРКО ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.315.592

**РОЗРОБЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ СТРУКТУР  
КРЕМНІЙ-НА-ІЗОЛЯТОРІ ТА МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ,  
МОДИФІКОВАНИХ ДОМІШКАМИ БОРУ І НІКЕЛЮ**

**05.27.01 – твердотільна електроніка**

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

**доктора технічних наук**

Львів – 2016

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: **Лисенко Володимир Сергійович**, член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., професор, керівник відділення фізико-технічних проблем іонно-легованих напівпровідників і багатошарових структур на їх основі (Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України);

**Осадчук Володимир Степанович**, д.т.н., проф., професор кафедри електроніки (Вінницький національно-технічний університет, Міністерство освіти і науки України);

**Політанський Леонід Францович**, д.т.н., проф., завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки (Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Міністерство освіти і науки України).

ЗАХИСТ ВІДБУДЕТЬСЯ "14" КВІТНЯ 2016Р. О 14.30 ГОДИНІ НА ЗАСІДАННІ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ Д 35.052.13 ПРИ НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА" ЗА АДРЕСОЮ: 79013, М.ЛЬВІВ, ВУЛ. СТ.БАНДЕРИ,12, АУД. 226 ГОЛ.К.

З ДИСЕРТАЦІЄЮ МОЖНА ОЗНАЙОМИТИСЬ У БІБЛІОТЕЦІ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА" 79013, М.ЛЬВІВ, ВУЛ. ПРОФЕСОРСЬКА,1.

АВТОРЕФЕРАТ РОЗІСЛАНИЙ "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2016 Р.

ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13



Заячук Д.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогодні розвиток науки і техніки потребує високого рівня інформаційних систем для вимірювання, контролю та управління фізичними процесами, що використовують у виробництві, екології, медицині, космічній техніці тощо. В сучасних інформаційних системах мікроелектронний датчик – це джерело первинної інформації, яке являє собою невід’ємну і ключову ланку інтегрованого комплексу апаратних і програмних засобів. Створення таких систем неможливе без розроблення мікроелектронних датчиків. В свою чергу датчик – це конструктивно закінчений пристрій, який містить первинний вимірювальний перетворювач (сенсор), що забезпечує перетворення контрольованої величини на зручний для використання сигнал. Одним із перспективних напрямів розвитку сучасної сенсорної електроніки є розроблення і використання мікроелектронних датчиків, які є результатом злиття технологій і конструкцій чутливих актюаторних елементів та вторинних схем перетворення інформації на одному або декількох кристалах з гібридною чи монокристалічною інтеграцією елементів, електричними, оптичними або радіозв’язками. Водночас розвиток мікроелектроніки і перспективи наноелектроніки, суттєво збільшені сучасні можливості мікропроцесорної техніки й особливості її використання у високоефективних інформаційних (інтелектуальних) системах потребують реалізації нових підходів до створення датчиків.

Відомо, що в мікроелектроніці широко використовуються шари полікристалічного кремнію на поверхні окисненої кремнієвої пластини (КНІ-структури). Такі шари як правило, формуються хімічним осадженням з газової фази. На відміну від монокристалічного кремнію, в полікристалічних шарах спостерігаються малі рухливості електронів і дірок, а також час життя носіїв заряду, що зумовлено наявністю великої кількості дефектів структури, які є центрами розсіювання і рекомбінації. Зменшення кількості дефектів вихідного полікремнію за рахунок модифікації його структури дає змогу значно підвищити рухливість носіїв заряду в шарі, що робить можливим створення на основі КНІ-структур мікроелектронних приладів і сенсорів фізичних величин з високою швидкодією, підвищеним ступенем інтеграції, проектування багат шарових структур, зокрема зінтегрованих схем з тривимірною інтеграцією елементів з обробкою сигналів для інтелектуальних систем. Окрім того, для створення елементної бази мікроелектронних приладів на основі структур кремній-на-ізоляторі необхідні дані про результати досліджень взаємовпливу параметрів елементів у пристроях, методів їх отримання на електричні, часові, тензометричні, температурні та інші характеристики.

В свою чергу, при створенні чутливих елементів сенсорів широкого використання набули ниткоподібні кристали (НК), які є ідеальними модельними об’єктами для фізичних досліджень. Такі кристали дають змогу модифікувати їх структуру в процесі росту, досліджувати властивості матеріалу тощо. Наприклад, унікальна геометрія НК порушила питання про механізми їх утворення й разом з тим стимулювала дослідження механізмів і кінетики одновимірного росту кристалів.

Сьогодні нанорозмірні НК завдяки своїм розмірам, формі й властивостям все частіше розглядають як базовий елемент для реалізації нових класів приладів та систем наноелектроніки. Зокрема, на їх основі можна створювати польові та гетеробіполярні транзистори, тунельні діоди, однофотонні випромінювачі, одноелектронні транзистори, світловипромінювальні пристрої із наднизьким енергоспоживанням, різноманітні сенсори фізичних величин, зонди для атомно-силових мікроскопів, автоемісійні катоди.

Оскільки унікальні транспортні, електричні та інші характеристики ниткоподібних мікро- і нанокристалів Si визначаються їх розміром та морфологією, то стають актуальними дослідження технологічних умов їх вирощування, а також вивчення їх електрофізичних властивостей. Це, своєю чергою, дозволить моделювати різні умови для перевірки та розширення існуючих уявлень про фізичну природу багатьох процесів, що перебігають у твердих тілах, і, як наслідок, розробити концепцію створення нових сучасних приладів із наперед заданими та прогнозованими характеристиками.

Очевидно, що вирішення проблем розроблення приладів сенсорної електроніки на основі легованих мікрочисталів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі загалом вимагає комплексного підходу, що передбачає використання нових функціональних матеріалів і структур, нових ідей і конкурентоспроможних методів та принципів побудови сенсорів, а отже, проведення фундаментальних досліджень, використання новітніх методів і технологій виробництва.

На цей час вже створено низку сенсорів фізичних величин на основі об'ємних кристалів, працездатних, переважно, в широкому інтервалі температур, у той час як проблема низькотемпературних вимірювань за допомогою малоінерційних приладів, дієздатних в складних умовах експлуатації (динамічні режими роботи, криогенні температури, сильні магнітні поля, дія радіації, агресивних середовищ тощо) залишається невирішеною. Структури кремній на ізоляторі, ниткоподібні кристали кремнію, а також прилади, що виготовлені завдяки злиття технологій мікроелектроніки та технології виготовлення мікрочисталів кремнію дають змогу певною мірою вирішити цю проблему. Створені на їх основі сенсори є перспективними для застосування в тих галузях людської діяльності, де необхідні малі розміри і маса, висока міцність, чутливість і стабільність параметрів. Однак, розробка сенсорів на основі цих матеріалів вимагає глибшого вивчення впливу зовнішніх чинників на їх властивості.

Актуальність таких досліджень продиктована також вимогами, які висувають щодо надійності роботи сенсорів фізичних величин в екстремальних умовах. Передбачається, що розроблені прилади, завдяки своїй мініатюрності, високій чутливості, широкому інтервалу робочих температур, температурній стабільності, знайдуть широке застосування в різних галузях народного господарства України, де існує потреба в датчиках, працездатних в умовах криогенних температур.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до напряму наукової діяльності кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”, в межах

держбюджетних НДР Міністерства освіти і науки, України: “Дослідження низькотемпературних деформаційно-стимульованих ефектів в напівпровідникових мікрокристалах і структурах та розробка сенсорів на їх основі”, (2004–2005 рр., номер державної реєстрації 0104U002303), „Дослідження низькотемпературних характеристик напівпровідникових мікрокристалів і структур в полях ефективного зовнішнього впливу для створення сенсорів”, (2006–2007 рр., номер державної реєстрації 0106U001337), „Транспорт носіїв заряду та деформаційно-стимульовані ефекти у легованих мікрокристалах та структурах під впливом зовнішніх збурень”, (2008–2010 рр., номер державної реєстрації 0108U000325), „Розробка наукових основ і технологічних методів створення перетворювачів на базі мікро- і наноструктур кремнію для інформаційних систем”, (2011–2012 рр., номер державної реєстрації 0111U001226), „Розроблення нових давачів фізичних величин на основі легованих мікро- і нанокристалів кремнію для інформаційно-вимірювальних систем”, (2013–2014 рр., номер державної реєстрації 0113U0001361); госпдоговірними науково-дослідними роботами з Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (2011 р. – номер державної реєстрації 0111U007122; 2012 р. – номер державної реєстрації 0112U006585; 2013 р. – номер державної реєстрації 0113U005282; 2014 р. – номер державної реєстрації 0114U005243) в рамках Державної цільової науково-технічної програми на 2010–2014 рр. „Нанотехнології та наноматеріали”, г/д №7010,7088–2003-2004рр. Полтавське відділення Українського геолого-розвідувального інституту, г/д №7134–Фізико-механічний інститут НАНУ, г/д № 7187–ВАТ“Бориславський завод радіоелектронної медичної апаратури”, г/д 7082,7194– 2004-2005рр. Інститут будівництва та інженерії доквілля НУЛП, г/д № 496,881–2007р.,2009р. ДП “Державний науково-технічний центр інспекції якості та сертифікації дорожньої продукції “Дор’якість”, а також у рамках міжнародної наукової співпраці, зокрема спільного українсько-молдавського науково-дослідного проекту „Розробка технології виготовлення ниткоподібних мікро- та нанокристалів на основі напівпровідників та напівметалів і вивчення їх магніто-транспортних властивостей при пружних деформаціях для створення високочутливих тензо- та термосенсорів” (2009–2010 рр., номер державної реєстрації 0111U006568) на підставі Угоди між Урядом України та Урядом Республіки Молдова про співробітництво у галузі освіти, науки та в рамках Угоди про співпрацю за 2005-2015рр з Міжнародною лабораторією сильних магнетних полів і низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

**Мета роботи:** розроблення нових підходів до формування функціональних властивостей приладів та створення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі і мікрокристалів кремнію, що модифіковані домішками бору, нікелю та встановлення закономірностей зміни їх характеристик під впливом зовнішніх чинників.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні **завдання:**

- вдосконалити технологічні методи виготовлення легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі на основі полікристалічного та

- ниткоподібного кремнію для створення чутливих елементів сенсорів фізичних величин (деформації, температури тощо);
- дослідити електропровідність, магнетоопір, деформаційні характеристики та магнітні властивості кристалів легованих мікрокристалів кремнію і структур кремній-на-ізоляторі у широкому інтервалі температур (4,2–300 К), магнетних полів (до 14 Тл), в т.ч. з використанням методу імпедасної спектроскопії;
  - дослідити вплив зовнішніх чинників (деформації, магнетного поля, опромінення, температури) на властивості легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі як чутливих елементів сенсорів механічних, теплових та магнітних величин;
  - створити елементну базу пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі, в т.ч. виготовлених за суміщеними технологіями та встановити закономірності змін їх характеристик.

**Об'єкт дослідження.** Мікрокристали кремнію та структури кремній-на-ізоляторі, леговані бором до концентрацій з металевого та діелектричного боку переходу метал-діелектрик (ПМД) та прилади на їх основі, створені в т.ч. за суміщеними технологіями.

**Предмет дослідження.** Магнетоопір, магнітні, терморезистивні, деформаційні характеристики ниткоподібного та полікристалічного кремнію, а також сенсори на їх основі в широкому інтервалі температур, магнетних полів і опроміненні високо-енергетичними електронами.

**Методи дослідження.** Для контролю якості досліджуваних зразків НК використовували атомно-силову та електронну мікроскопію – мікроскоп AFM ІФН НАНУ м.Київ та сканувальні електронні мікроскопи Hitachi SEM S806, JEOL JSM-U3. Опромінення зразків електронами високих енергій здійснювалося за кімнатної температури на установці Мікрон М30 в Інституті електронної фізики НАН України, м. Ужгород. Вимірювання електричного опору зразків легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі за низьких температур на змінному та постійному струмах проводили у гелієвих кріостатах за спеціально розробленою методикою з використанням сучасних цифрових метрологічних засобів. Магнетоопір НК Si за низьких температур досліджували за допомогою біттерівських та надпровідних магнітів у Міжнародній лабораторії сильних магнетних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що вперше встановлено зв'язок та виявлено кореляцію в широкому інтервалі температур між особливостями зміни електрофізичних та магнітних властивостей мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі на основі полікристалічного та ниткоподібного кремнію, легованих до концентрацій в околі ПМД, які покладені в основу концепції розроблення та прогнозування характеристик сучасних приладів твердотільної електроніки:

- на основі експериментальних та теоретичних досліджень температурних залежностей провідності та магнітоопору виявлено, що у легованих мікрокристалах

та структурах кремній-на-ізоляторі характер зміни провідності з температурою може бути представлений у відповідності до закону Мотта згідно якого значення магнітного поля, за якого магнетоопір змінює знак з від'ємного на додатній, пропорційне до температури як  $\sim T^{3/8}$ , що вказує на стрибкоподібний характер провідності в таких зразках за низьких температур і це використано для створення елементів сенсорної техніки;

– виявлено кореляцію між гістерезисом магнетоопору та намагніченості в ниткоподібних кристалах кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю, що описується моделлю, згідно якої відбувається спінова поляризація магнітних домішок та утворенням магнітних перколяційних кластерів, що враховано для розроблення сенсорів магнітного поля;

– встановлено, що характер уявної складової імпедансу полікристалічного кремнію в КНІ-структурах та ниткоподібних кристалах кремнію залежить від ступеня наближення до ПМД: в області гелійових температур у зразках з діелектричного боку переходу встановлено ємнісний характер електропровідності, натомість для зразків, концентрація в яких відповідає металевій області стосовно ПМД, спостерігається індуктивний характер імпедансу, що використано під час створення елементів твердотільної електроніки;

– на основі аналізу характеру електропровідності полікристалічного кремнію в КНІ-структурах показано, що електропровідність дрібнозернистих зразків за криогенних температур змінюється стрибкоподібно і зумовлена стрибками по двічі зайнятим станам локалізованих домішкових рівнів, що покладено в основу створення надчутливих сенсорів температури криогенних середовищ;

– на основі аналізу імпедансної спектроскопії для зразків полікремнію в КНІ-структурах після лазерної рекристалізації з концентрацією носіїв заряду  $n_{300\text{K}} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  виявлено комбіновані механізми струмопротікання за низьких температур, які в залежності від температури спостереження проявляються у переході від закону Мотта до перколяційного механізму Шкловського-Ефроса, що використано для створення реактивних елементів сенсорної техніки;

– набула подальшого розвитку концепція струмопротікання для легованих мікрокристалів кремнію, яка оснований на домінуючій ролі приповерхневого механізму перенесення носіїв заряду за рахунок перерозподілу енергії пасткових станів внаслідок деформування, що важливо для створення сенсорів механічних величин.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає у тому, що результати досліджень використано під час створення як елементів сенсорної техніки, так і приладів, виготовлених за рахунок поєднання технологій, що є сумісним із сучасною технологією мікросистемної техніки:

- на основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію розроблено і виготовлено сенсори механічних величин для криогенних температур: з коефіцієнтом тензочутливості  $K=-15500$  в інтервалі 4,2–50 К, з  $K=325$  в інтервалі 4,2-300 К.

- використовуючи леговані мікрокристали кремнію та структури кремній-на-

ізоляторі, розроблено і виготовлено сенсори теплових величин для різних інтервалів температури: з  $\text{TКО} \approx -9\% \times \text{K}^{-1}$  в інтервалі 4,2–50 К на основі полі-Si та  $0,4 \text{ \%}/\text{K}^{-1}$  для діапазону 77–280 К на основі мікрокристалів кремнію.

- для мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору та нікелю, в яких концентрація носіїв заряду знаходиться в безпосередній близькості до фазового переходу метал-діелектрик виявлено гігантський магніто-резистивний ефект і запропоновано надчутливий сенсор магнітного поля з чутливістю 5 мТл.

- розроблено конструктивно-технологічні основи створення кремнієвих автоемісійних катодів, що лягло в основу виготовлення чутливого елемента акселерометра на основі мікро- та наноструктур кремнію, розробленого за технологією що, сумісна із сучасною технологією кремнієвих чіпів з чутливістю до переміщення  $\sim 200$  нм.

- результати досліджень імпедансної спектроскопії легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі лягли в основу створення як дискретних елементів сенсорної техніки (індуктивні, ємнісні), так і комбінованих (коливальні контури), реалізація яких передбачає використання сумісних технологій.

Новизну практичних розробок захищено патентами України.

Виготовлені прилади використовують для виконання наукових досліджень у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща), при виконанні госпдогвірної та держбюджетної тематики лабораторії сенсорної електроніки кафедри, а також у навчальному процесі кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”.

**Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.** У зазначених роботах здобувачу належить: вирощування зразків НК Si у відкритій та закритій системах [2,6,17,23,25,26,39,40,47,49,62], зокрема аналіз та моделювання кінетики росту нанорозмірних кристалів [23,25,26]; розроблення методів вирощування нанорозмірних кристалів [2,6,17,39,40,62]; розроблення методів створення електричних контактів до тонких НК [31,53,56], дослідження магнетоопору та електропровідності структур кремній-на ізоляторі за низьких температур [1,3,7,16,18,30,34,46,54,60,61,63], дослідження магнетоопору та електропровідності структур кремній-на ізоляторі за низьких температур методом імпедансної спектроскопії [1,3,9,36,55], дослідження магнетоопору та електропровідності структур кремній-на ізоляторі за низьких температур під впливом опромінення [13,27,28,29,51,52], дослідження магнетоопору та електропровідності ниткоподібних кристалів кремнію за низьких температур [4,8,12,48,56], дослідження магнетоопору та електропровідності ниткоподібних кристалів кремнію під впливом деформації за низьких температур [4,12,57], дослідження магнетоопору та електропровідності ниткоподібних кристалів кремнію за низьких температур методом імпедансної спектроскопії [4,32,37,45,57], дослідження магнітних властивостей ниткоподібних кристалів [5,10,11], розроблення сенсорів механічних величин [1,14,19,20,44,50,56,57,59], розроблення сенсорів теплових величин [7,14,19,22,29,31,33,41–43,53,57,58,60], розроблення



приладів, виготовлені за суміщеними технологіями [1,3,15,21,24,35,36,38,43], розроблення багатofункційних сенсорів та систем [1,33,44,50], розроблення реактивних елементів твердотільної електроніки [9,36,45,59]. В усіх роботах 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: Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices. NATO Advanced Research Workshop, Kyiv, Ukraine.– 2004, 2010,2013, 2015, Міжнародна конференція “Crystal Materials’2005”.– Kharkov, 2005; 10-а Міжнародна конференція “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”,2009,Свалява,Україна; Міжнародна конференція “Фізика і технологія тонких плівок” (МКФТТП 2005,2007.,2009,2011.,2013 Івано-Франківськ, Україна); Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології”, СЕМСТ–2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014pp.– Одеса, Україна; Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні інформаційні та електронні технології” CIET–2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014.– Одеса,Україна; Int. Conf. TCSET 2010, 2014 (Lviv–Slavsko, Ukraine, 2010); E-MRS Spring meeting, Strasbourg, France (2009, 2010, 2011, 2012, 2013); International Meeting „Clusters and nanostructured materials” (CNM-2,3) (Uzhgorod, Ukraine, 2009,2012); Міжн. наук. конф. „Органічні і неорганічні матеріали для молекулярної електроніки і нанофотоніки” (23–25 квітня 2010 р., м. Черкаси); Четверта міжнародна науково-практична конференція МЕТІТ-4 (19–21 травня 2010 р., Кременчук, Україна); E–MRS 2010 Fall Meeting, Warsaw (Poland, 4th–8th September); 8-th Intern. conf. on electronic proceses in organic and inorganic materials; (17-22 May 2010, Synyogora residence, Ukraine); II Межд. научн. конф. „Наноструктурные материалы 2010” (Київ, 2010); II Міжн. конф. „Сучасні проблеми фізики конденсованого стану” (Київ, 2010); Mediterranean-East-Europe Meeting „Multifunctional nanomaterials–2011” (Uzhgorod, 12–14.05.2011); 7<sup>th</sup> Int. Conf. on „Microelectronics and computer science” (Chisinau, Moldova, September 22–24, 2011); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Лазерні технології. Лазери та їх застосування». – 2011,2013; I Всеукраїнська науково-практична конференція „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 13–15.10.2011); International Conference ELNANO 2012, 2014; Symposium of Nanostructured Materials “NANO 2013”, Жешув, Польща, VIII<sup>th</sup> International Conference in MEMS Design, April 18–21, 2012, Polyana-Svalyava, Ukraine; International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO–2013), Буковель, Україна; Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-4,5,6), Україна.; 2<sup>nd</sup> Ukrainian-French Seminar “Semiconductor-On-Insulator Materials, Devices and Circuits: Physics, Technology and Diagnostics”, 2013 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 положення і результати дисертаційної роботи опубліковано в 105 наукових працях, з яких у монографіях – 2; в статтях у фахових наукових журналах – 50, з яких 16 – у виданнях науково-метричної бази даних Scopus, з них 7 в журналах з імпаکت-фактором, що входять до ISI Master Journal List, а також в 45 публікаціях у матеріалах міжнародних конференцій і 8 патентах України.

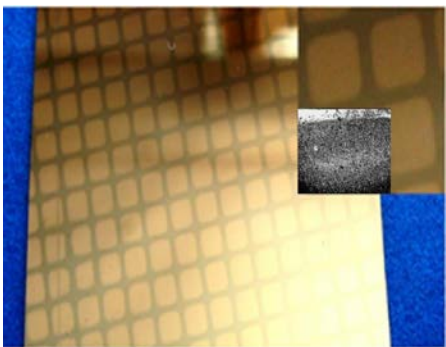
**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, сімох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 245 бібліографічних найменувань, та додатку. Роботу викладено на 287 сторінках, містить 155 рисунків та 17 таблиць.

## 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 вклад здобувача в отриманні результатів. Наведено дані щодо апробації роботи та її зв'язок з науковими програмами, темами, планами.

У **першому розділі** наведено огляд сучасних методів отримання кремнієвих мікроструктур на основі легованих напівпровідників, стан вивчення технологічних шляхів вдосконалення їх властивостей, а також їх застосування у приладах, зокрема використання наноструктур на основі магніто-чужорідних матеріалів у спінтроніці, структури кремній-на-ізоляторі для інтегральної технології, ниткоподібні кристали кремнію в сенсорній електроніці, перспективи використання мікроструктур кремнію у наноелектроніці. Окрема увага приділена створенню комбінованих мікро- та наноструктур та їх застосуванню у приладах наноелектроніки. На основі аналізу літературних даних сформульовано основні завдання досліджень, які необхідно вирішити у дисертації.

У **другому розділі** у розділі подано технологічні аспекти створення кремнієвих мікроструктур, в одному випадку, одержання структур кремній-на-ізоляторі методом мікрозонної лазерної рекристалізації полікремнію, в іншому випадку, одержання легованих мікрочисталів Si методом хімічного парового осадження (CVD) у відкритій проточній та закритій бромідній системах. В розділі



розглянуто обладнання, необхідне для проведення ростових експериментів, методики проведення досліджень властивостей кремнієвих мікроструктур у широкому інтервалі температур та під дією магнетного поля.

Рис. 1. Фотографія пластини кремнію з напиленою плівкою золота та сформованими комірками. На вставці: мікрочистали матричного типу.

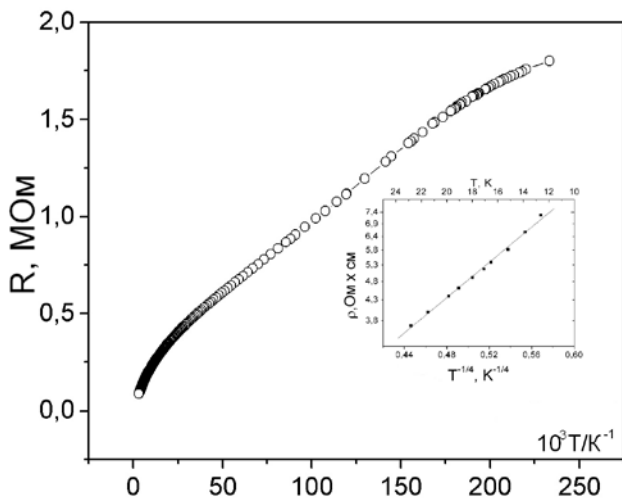
Вдосконалено технологію виготовлення мікро- та наноструктур на основі полікристалічного та ниткоподібного кремнію, що відкриває, в подальшому,

можливості застосування таких матеріалів як чутливих елементів сенсорів, так і елементів зінтегрованих схем, створених за рахунок злиття технологій виготовлення цих матеріалів. Експериментально показано (рис.1), що використання літографічних підходів до формування мікро- та наноструктур кремнію з метою локального утворення необхідних об'єктів на напівпровідниковій пластині дасть змогу отримувати комбіновані структури у технології вирощування мікро-і нанокристалів кремнію. На рис.1 (вставка) показано результати ростових експериментів мікроструктур кремнію, що отримані в проточній водневій системі. За рахунок використання літографічних підходів сформовано комірки з метою локального утворення зародків на пластині, що дає змогу отримувати структури матричного типу. Внаслідок оптимізації технологічних процесів росту нанодротин кремнію на напівпровідниковій підкладці за температури  $T \approx 580^\circ\text{C}$  отримано комбіновані структури у технології створення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки.

Детально розглянуто методику дослідження електрофізичних властивостей мікроструктур кремнію методом імпедансної спектроскопії, яка дозволяє оцінити вклад окремих компонентів матеріалу в загальну провідність зразка. Для аналізу вкладу ліній передачі на результати вимірювань, які проводилися на змінному струмі, було використано модель чотирьохполюсника, що дозволило усунути негативний вклад ліній передачі на результати вимірювань. Визначивши імпеданс холостого ходу  $Z_0 = Z(Z_{\text{зраз}} = \infty)$  і короткого замикання  $Z_S = Z(Z_{\text{зраз}} = 0)$  враховуючи, що чотирьохполюсник являється зворотнім і симетричним, то для нього  $Z_{\text{зраз}} = (Z_S - Z) / (Z_0 - Z)$ . Подано відомості щодо дослідження властивостей матеріалу за складних умов, зокрема під дією високоенергетичного опромінення електронами. Досліджувані КНІ-структури опромінювались на електронному прискорювачі Мікротрон М-30 в Інституті електронної фізики НАНУ, м. Ужгород. Опромінення здійснювалось електронами з енергією 4,2 - 14 МеВ з різним флюенсом  $\Phi = 5 \times 10^{17} \div 1,25 \times 10^{18}$  ел/см<sup>2</sup> при середній густині струму 10 мкА/см<sup>2</sup>. Дослідження поведінки електропровідності, магнетоопору зразків за температур 4,2–300 К у сильних магнетних полях до 14 Тл проводили у Міжнародній лабораторії сильних магнетних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща). Досліджувані зразки розміщували на спеціальній вставці та поміщали у гелієвий кріостат, де відбувалось їх охолодження до температури 4,2 К. До кімнатної температури зразки нагрівали за допомогою спеціальної вставки з нагрівачем із біфілярного дроту, намотаного на корпус вставки. Для дослідження властивостей мікро- та наноструктур кремнію у магнетних полях до 14 Тл використано спеціальну методику, яка дозволяє проводити вимірювання магнетоопору за різних фіксованих температур в інтервалі від 4,2 до 300 К. Магнетне поле створювали з допомогою біттерівського магніта з індукцією до 14 Тл та часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв та 3,5 Тл/хв відповідно. Фіксовані температури вставки кріостату задаються з допомогою спеціальної системи регуляції температури кріостату. Усі напруги вимірюються з допомогою цифрових вольтметрів типу Keithley-199 з точністю не гірше 0,01 %. Струм через резистивну вітку задається від джерела струму Keithley-224 з точністю 0,1 %, що визначає похибку вимірювання опору.

У **третьому розділі** представлені результати щодо дослідження електричних характеристик структур кремній- на-ізоляторі у широкому інтервалі температур для створення мікроелектронних сенсорів на базі полікристалічного кремнію, що ґрунтуються на детальному вивченні електрофізичних та п'єзорезистивних властивостей матеріалу. Дослідження температурних залежностей опору зразків, в т.ч. методом імпедансної спектроскопії, на тестових елементах з полікремнієвими резисторами за дії зовнішніх чинників (електронного опромінення, дослідження у заданих температурних інтервалах за температури рідкого гелію як деформованих, так і недеформованих зразків) дасть змогу з'ясувати механізми перенесення носіїв заряду в полікремнії за низьких температурах, коли відбувається досить помітне виморожування носіїв заряду, що, в свою чергу, дозволить реалізувати дієздатність розроблених приладів для різних галузей застосування.

Особлива увага була зосереджена на дослідженнях дрібнокристалічних (нерекристалізованих) шарів полікремнію з проміжним рівнем легування ( $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), в яких за попередніми оцінками було виявлено стрибкоподібний характер зміни провідності згідно закону Мотта. Так на рис.2 спостерігається сильна температурна залежність опору за криогенних температур в інтервалі 4,2 – 77 К, а в області температур 10÷25 К, як видно з вставки до рис.2, для таких шарів полі-Si температурний хід питомого опору зразків наближено описується законом Мотта ( $\ln p \sim T^{-1/4}$ ).



температурна залежність опору за криогенних температур в інтервалі 4,2 – 77 К, а в області температур 10÷25 К, як видно з вставки до рис.2, для таких шарів полі-Si температурний хід питомого опору зразків наближено описується законом Мотта ( $\ln p \sim T^{-1/4}$ ).

Рис. 2. Температурна залежність опору нерекристалізованого полікремнію з концентрацією вільних носіїв заряду  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Оскільки відомо, що полікристалічний кремній містить велику кількість зерен, з'єднаних між собою міжзеренними границями, то використання імпедансного методу для аналізу матеріалу дає можливість отримати додаткову інформацію про електрофізичні властивості полікристалічного матеріалу, якісно і кількісно описати внески в його провідність розміру зерен, його поверхні й міжзеренних границь. Як видно з рис. 3 графік імпедансних залежностей нерекристалізованих полікремнієвих зразків у КНІ-структурах займає від'ємну гілку півкола, що свідчить про наявність ємностей, які локалізовані здебільшого на міжзеренних границях. Що стосується модифікованих плівок полікристалічного кремнію шляхом проведення лазерної рекристалізації, то з підвищенням концентрації носіїв заряду до рівня  $10^{19}$ - $10^{20} \text{ см}^{-3}$  графік набуває вигляду додатної гілки півкола, що свідчить про підвищення гомогенності зразка унаслідок збільшення розміру зерен, а відтак і зміну механізму струмопротікання. На рис.4. зображено діаграма Найквіста рекристалізованих зразків полікремнію з концентрацією носіїв заряду  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

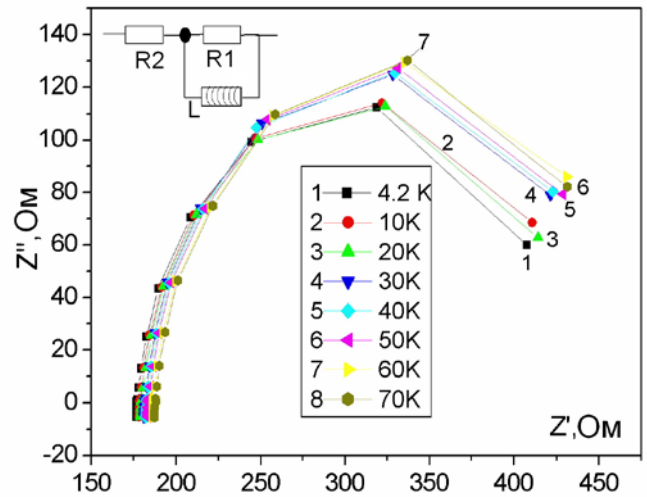
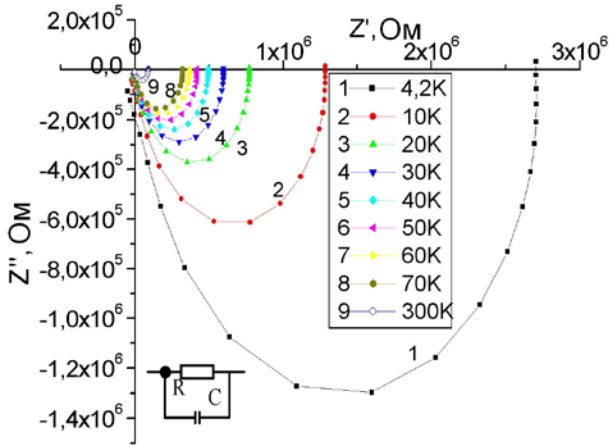


Рис. 3. Діаграма Найквіста ( $Z''=f(Z')$ ) для нерекристалізованих зразків із концентрацією  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Рис. 4. Діаграма Найквіста ( $Z''=f(Z')$ ) для рекристалізованих зразків полікремнію з концентрацією носіїв заряду  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Варто зауважити, що для полікремнієвого зразка (нерекристалізований полікремній) найпростішу еквівалентну схему можна подати у вигляді паралельного контура, який складається з ємності  $C$  та опору  $R$  (рис.3). У цьому разі імпедансні складові визначаються такими рівняннями:

$$Z' = R / (1 + \omega R^2 C^2), \quad Z'' = \omega R^2 C / (1 + \omega R^2 C^2), \quad (1)$$

де  $\omega = 2\pi f$ , опір  $R$  та ємність  $C$  не залежать від частоти. У такому випадку крива на годографі ( $Z''=f(Z')$ ) матиме вигляд півкола. Для рекристалізованих зразків еквівалентна схема дещо складніша і містить послідовно з'єднані опори та паралельну індуктивність, що підтверджують припущення про зміну транспорту носіїв заряду полікристалічного кремнію у КНІ-структурах завдяки лазерній рекристалізації.

Дослідження залежностей п'єзоопору структур кремній-на-ізоляторі у нерекристалізованих та рекристалізованих полікремнієвих шарах в КНІ-структурах вказують на те, що розроблення сенсорів механічних величин, які володіють достатньо великою тензочутливістю до вимірюваного параметру, необхідно використовувати рекристалізовані лазером шари полікремнію на ізоляторі з концентрацією носіїв заряду  $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Величина коефіцієнта тензочутливості за температури 4,2 К досягає значення  $K_{4,2K} \approx 325$ , тоді як за кімнатної температури його значення дорівнює  $K_{300K} = 35,3$ , що є характеризується дієздатністю таких сенсорів в широкому інтервалі температур (рис.5).

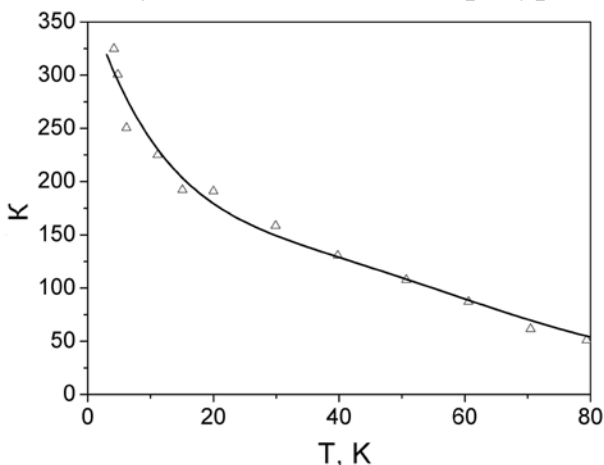


Рис.5. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості рекристалізованих лазером шарів полікремнію на ізоляторі з концентрацією носіїв заряду  $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Результати досліджень щодо впливу інших зовнішніх чинників, а саме електронного опромінення дають можливість стверджувати про стійкість до високоенергетичного опромінення шарів полікремнію на ізоляторі в КНІ-структурах для діапазону концентрацій від  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $1,7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  під час опромінення їх електронами високих енергій ( $E = 10 \text{ MeV}$ ) і флюенсом  $\Phi = 10^{16} \text{ ел/см}^2$ , що використано під час створення мікроелектронних сенсорів фізичних величин.

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження електрофізичних та п'єзорезистивних властивостей ниткоподібних кристалів кремнію на постійному та змінному струмах в інтервалі температур 4,2–300 К для створення чутливих елементів сенсорів теплових та механічних величин.

Використовуючи деформацію як інструмент зміни електрофізичних характеристик мікрокристалів кремнію, можливо з одного боку окреслити використання мікрокристалів у сенсорах фізичних величин, а з іншого боку, досліджувати механізми струмоперенесення у матеріалі. Так, на рис 6. наведено експериментальні температурні залежності опору НК Si р-типу з концентрацією бору  $N_B \approx 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає металевому боку ПМД.

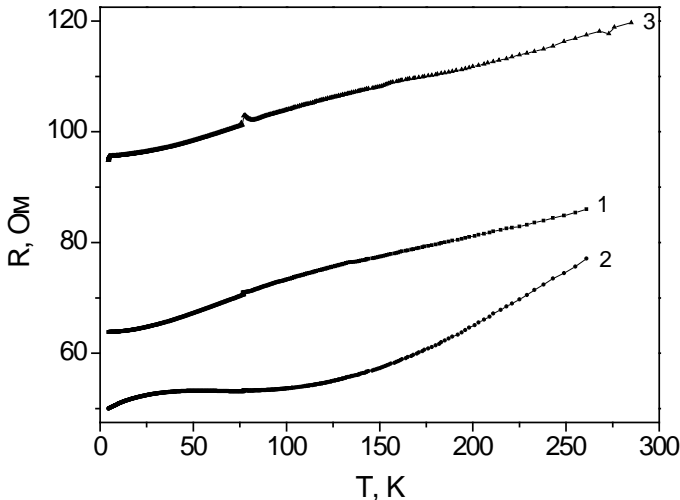
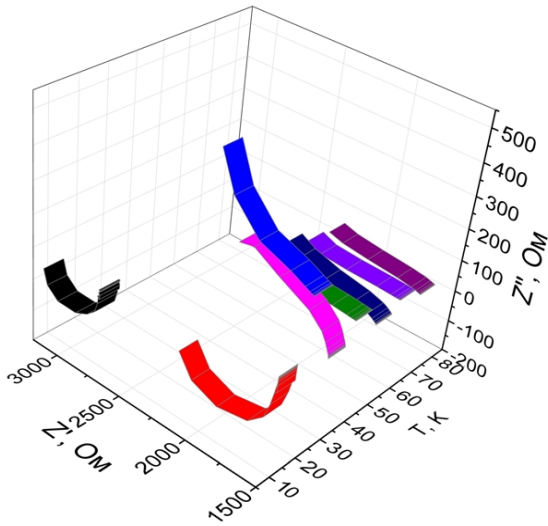


Рис. 6. Температурні залежності опору НК Si р-типу провідності з  $N_B \approx 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  для вільного (1) та закріплених на підкладках з міді (2) і кварцу (3) зразків.

Для цих НК в усьому температурному діапазоні 4,2–300 К спостерігається майже лінійна залежність питомого опору від температури з позитивними значеннями ТКО. Термічна деформація цих зразків з боку підкладок не приводить до значної зміни питомого опору. Температурний хід опору закріплених на підкладках зразків також є монотонним. В ролі чутливих елементів сенсорів температури можна використати зразки НК р-Si закріплені на підкладках з кварцу (крива 3), оскільки температурна залежність їх опору має лінійний характер і добре описується наступним рівнянням:

$$R(T) = A + BT = 94,7 + 0,1T, \text{ де } A[\text{Ом}], B[\text{Ом/К}] \quad (2)$$

Не дивлячись на те, що аналіз імпедансних досліджень монокристалічних зразків напівпровідникових матеріалів вказує на наявність ємнісного (рис.7.) характеру опору на діаграмі Найквіста, проте наші дослідження показали, що більшість зразків НК Si незалежно від ступеню наближення до ПМД демонструють індуктивний характер опору на діаграмах Найквіста (за винятком інтервалу низькотемпературної  $T < 30 \text{ К}$  провідності для зразків з діелектричного боку ПМД). Пояснення причини виникнення індуктивного характеру імпедансу в зразках НК Si



варто шукати в особливостях поширення змінного струму в тонкому приповерхневому шарі ниткоподібного кристалу.

Рис.7. Діаграма Найквіста для НК Si ( $\rho_{300K}=0,0168 \text{ Ом}\times\text{см,}$ ) за різних температур.

Цікавими з фізичної точки зору виявилися температурні залежності реактивної складової опору ниткоподібних кристалів з різним ступенем наближення до ПМД. Так у кристалах з концентрацією домішки, що

відповідає діелектричному боку ПМД, реактивна складова змінює знак за фіксованої температури (рис.8). В цьому разі значну роль відіграють поверхневі так звані таммівські стани, які служать пастками для носіїв заряду. Очевидно, одновісна деформація розтягу кристалу зумовлює зростання радіального стиску поверхні НК, яке приводить до перерозподілу таммівських станів, зокрема до зростання енергії пасткових рівнів, і зрештою до зростання загальної індуктивності зразка.

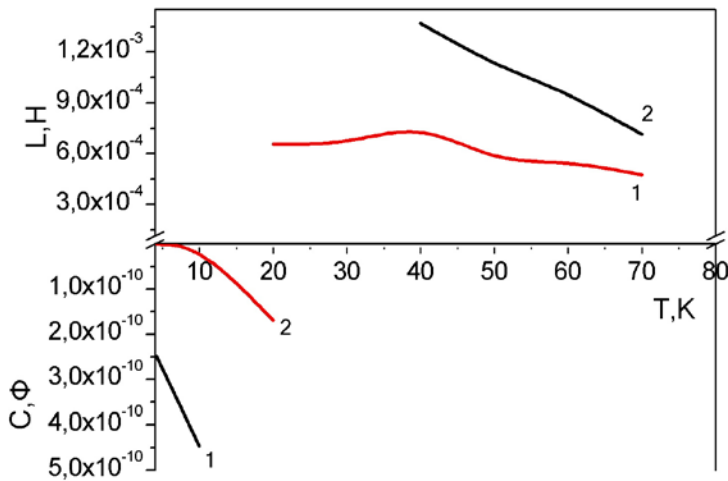


Рис.8. Залежність зміни еквівалентної ємності та індуктивності з температурою для недеформованих (1) і деформованих (2) ниткоподібних кристалів з  $\rho_{300K}=0,0168 \text{ Ом}\times\text{см}$

Деформація стиску кристала зумовлює зворотній ефект, в результаті чого відбувається

зменшення поверхневого стиску, швидше звільнення носіїв заряду пасток за рахунок зменшення енергії пасткових рівнів, і, відповідно, зменшення індуктивності кристала. Заслугує уваги ще один ефект – зростання ємності НК при одновісному стиску та її зменшення при розтягу кристала. Виникнення ємнісного опору НК спостерігається в області низьких температур і пов'язано з стрибковою провідністю по домішковій підсистемі, яка внаслідок іонізації домішкових атомів та їх екранування вільними носіями відіграє роль мікроконденсатора. Одновісна деформація стиску спричинює збільшення радіальних розмірів НК, тобто, зростання площі поверхні кристала, що призводить до збільшення його ємності. Натомість, прикладання одновісної деформації розтягу викликає зворотній ефект, в результаті чого ємність НК зменшується. Подібні ефекти виявлено під час досліджень на постійному струмі, де помічено виникнення некласичного п'єзоопору.



Як згадувалось раніше при досягненні певних рівнів деформації можлива зміна характеру провідності з ємнісного на індуктивний, що наглядно ілюструється рис.9.

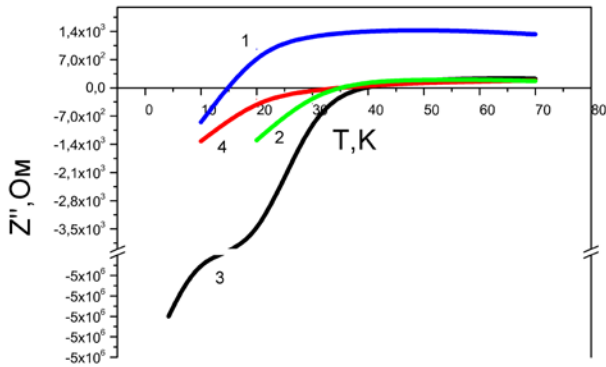


Рис.9. Температурна зміна реактивної складової опору при деформуванні мікрочастин кремнію для різних діапазонів температур: 1- $\rho_{300\text{K}}=0,0142 \text{ Ом}\times\text{см}$  - ( $\epsilon=0$ ), 2 - $\rho_{300\text{K}}=0,0168 \text{ Ом}\times\text{см}$  - ( $\epsilon=0$ ); 3- $\rho_{300\text{K}}=0,0168 \text{ Ом}\times\text{см}$  - ( $\epsilon=-3,8\cdot 10^{-3}$ ); 4- $\rho_{300\text{K}}=0,0142 \text{ Ом}\times\text{см}$ -( $\epsilon=-3,8\cdot 10^{-3}$ ).

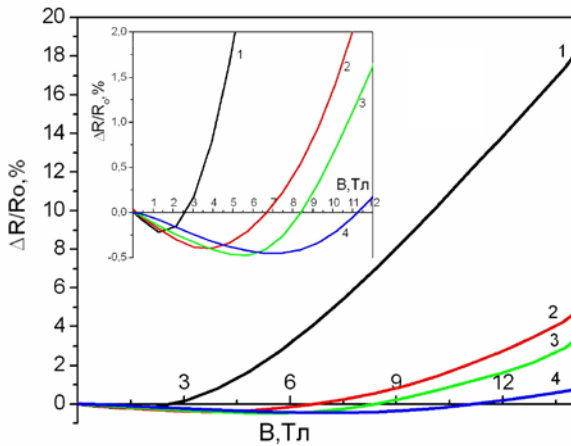
Можна припустити, що два вище описані ефекти (зростання ємності та зменшення індуктивності кристала при деформації стиску) співіснують у НК з концентрацією домішки, що відповідає діелектричному боку ПМД за низьких температур. Це приводить до істотних змін сумарної ємності кристала, наприклад, при деформації розтягу індуктивність НК зростає, а ємність зменшується, а результуюча еквівалентна ємність визначається як  $-1/\omega C_{\text{СКВ}} = \omega L = -1/\omega C$ .

Отже виявлено, що дія одновісної деформації стиску на частотні характеристики НК при низьких температурах сприяє розширенню температурної області в якій спостерігається імпеданс ємнісного характеру в зразках з концентрацією легуючої домішки з діелектричного боку ПМД. Значення еквівалентної ємності при дії деформації стиску зростає, в той час як величина еквівалентної індуктивності – зменшується, що може бути використано як інструмент зміни електрофізичних характеристик мікрочастин кремнію і рекомендувати застосування їх у напівпровідникових елементах зінтегрованих пристроїв, в т.ч. сенсорах деформації, в залежності від потреб використання елементів з ємнісним чи індуктивним імпедансом.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження магнітотранспортних характеристик структур кремній- на-ізоляторі у широкому інтервалі температур. Особлива увага приділялась зразкам з дрібнокристалічним полікремн в КНІ-структурах з концентрацією носіїв заряду  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , де раніше було виявлено особливості низькотемпературного транспорту носіїв заряду. В таких зразках, в яких концентрація електрично активної домішки (бору) відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, спостерігався від'ємний магнітоопір у відносно слабких магнітних полях. Поява від'ємного магнітоопору в таких зразках пояснюється особливостями транспорту носіїв заряду, зумовлених потенціальними бар'єрами на границях зерен в полікристалічному матеріалі.

В області існування стрибкової провідності магнітне поле стискує хвильові функції носіїв заряду домішкових центрів в поперечному напрямку і, тим самим, зменшує величину стрибкової провідності. В цьому разі змінюючи вигляд хвильових функцій носіїв заряду, магнітне поле не може змінити шляхи протікання





носіїв. Ця обставина приводить до однієї із характерних особливостей всіх неупорядкованих систем, а саме, до рівності поперечного і повздовжнього магнітоопору, що і було виявлено експериментально.

Рис.10. Поперечний магнетоопір нерекристалізованих шарів полікремнію з  $p_{300K}=2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  за різних температур: 1 – 4,2К, 2 – 9К, 3 – 12,3К, 4–19,2К.

Як відомо, в області існування стрибкової провідності, що описується законом Мотта стрибки відбуваються не на довжину  $Na^{-1/3}$ , а на середню відстань  $R_{hop}$  між  $\Delta\epsilon$ -акцепторами. В цьому разі магнітоопір виражається як:

$$\frac{\Delta R}{R} = \exp \left[ S \frac{a_0^3}{m^*} \frac{B^2}{c^2} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{3/4} \right], \quad (3)$$

де  $\alpha$  – постійна затухання хвильової функції локалізованого носія,  $T$  – температура,  $B$  – магнітне поле,  $m^*$  – ефективна маса носія заряду,  $S$  – коефіцієнт, що враховує розмірність системи. Як видно із співвідношення (3) залежність магнітоопору від температури на декілька порядків вище, ніж в законі Мотта, що дає великі можливості для експериментальних перевірок. Беручи до уваги слабку залежність  $\ln \sigma \sim T^{-1/4}$  для перевірки закону Мотта необхідно досить значний інтервал зміни температури. Тому для підтвердження цього закону більш чутливим методом є метод вимірювання магнітоопору в області існування стрибкової провідності. За результатами експериментальних досліджень магнітоопору зразків полікремнію в КНІ-структурах з концентрацією носіїв заряду  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  нами було підтверджено існування моттівської стрибкової провідності за температур рідкого гелію.

Для рекристалізованих зразків полікремнію в усьому температурному інтервалі виявлені лінійні вольт-амперні характеристики (ВАХ). Водночас деяка нелінійність в області гелієвих температур спостерігається у зразках з проміжним рівнем легування і залишається значною навіть після лазерної рекристалізації. За низьких температур (4,2К) ВАХ характеризується як лінійною ділянкою (за малих напруг), так і сильною неомічністю типу за напруг  $U > 0,5 \text{ В}$ :

$$I = I_0 \exp \left[ \left( \frac{U}{U_0} \right)^{1/2} \right], \quad (4)$$

де  $I_0$  і  $U_0$  – струм і напруга для лінійної області ВАХ. Такий вигляд ВАХ характерний для перколяційних систем (з великомасштабним рельєф-потенціалом) і добре описується теорією Шкловського–Ефроса.

Отже, підсумовуючи, можна окреслити основні особливості магніто-транспортних властивостей як для нерекристалізованих так і рекристалізованих плівок полікремнію в КНІ-структурах з різною концентрацією носіїв заряду, що

можна використати для розроблення мікроелектронних приладів і сенсорів фізичних величин на їх основі:

- для температур в інтервалі 10÷25 К транспорт носіїв заряду в полікристалічному кремнії до лазерної рекристалізації з концентрацією носіїв заряду  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  підлягає закону Мотта ( $\ln \rho \sim T^{-1/4}$ ), що підтверджує стрибковий характер провідності для таких зразків за низьких температур.

- після лазерної рекристалізації для зразків з концентрацією  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  провідність все ж таки обмежена міжзеренними бар'єрами, що характерно для перколяційних систем з крупномасштабним рельєф-потенціалом, може бути пояснена на основі теорії протікання і добре описується теорією Шкловського-Ефроса.

Експериментальні результати дослідження як для нерекристалізованих так і рекристалізованих шарів полікремнію в КНІ-структурах за низьких температур знайшли своє підтвердження з деяким уточненням під час вимірювань на змінному струмі. Відомо, що перенесення струму носіями, що збуджуються в локалізованому стані поблизу краю валентної зони, зокрема, частотна залежність провідності згідно закону Мотта визначається як

$$\sigma(\omega) = \frac{1}{3} \pi e^2 k T [N(E_F)]^2 \alpha^{-5} \omega [\ln(\frac{\nu_{\text{фон}}}{\omega})]^4, \quad (5)$$

де  $e$  – заряд електрона,  $N(E_F)$  – густина станів носіїв заряду на рівні Фермі,  $\alpha$  – постійна затухання хвильової функції локалізованого носія,  $\omega$  – частота коливань,  $\nu_{\phi}$  – частота оптичних фононів.

Оскільки,  $\nu_{\phi} \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , то множник  $[\ln(\nu_{\phi} / \omega)]^4$  в області радіочастот ( $\sim 10^4$ - $10^7$  Гц) буде пропорційний  $\omega^{-0,2}$ , в результаті чого температурна залежність провідності  $\sigma(\omega) \sim \omega^{0,8}$ , тобто ця залежність має місце, якщо  $\omega \ll \nu_{\phi}$ . При значеннях  $\omega$  близьких  $\nu_{\phi} = 10^{12} \text{ с}^{-1}$  провідність  $\sigma(\omega)$  буде пропорційна меншим степеням  $\omega$ . Результати експериментальних досліджень зображені на рис.11.

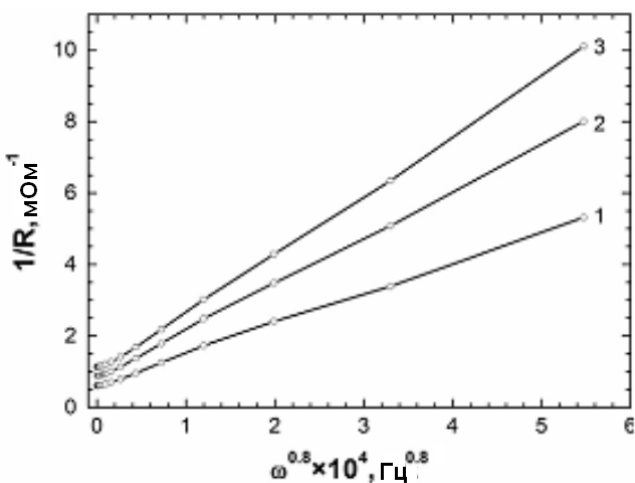


Рис.11 Частотна залежність низькотемпературної провідності для нерекристалізованих шарів полікремнію в КНІ-структурах з концентрацією носіїв заряду  $\rho_{300\text{K}} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  за різних температур: 1-4,2К; 2-10К, 3-20К.

Отже експериментальні результати за частотною залежністю провідності дозволили підтвердити положення щодо характеру стрибкової провідності в невпорядкованих системах, а додаткову інформацію можна отримати аналізуючи діаграми Найквіста в інтервалі температур 4,2-300К для зразків, в яких проявлялась стрибкова провідність

Для обох випадків (рекристалізовані та нерекристалізовані зразки з концентрацією  $2,4$  та  $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) еквівалентна схема провідності складається з паралельно з'єднаних конденсатора і резистора (див. рис.2, вставка), в якій ємність заміщає міжзеренні границі, а опір – об'єм зерна. Ці результати легко аналізувати на прикладі температурних залежностей ємності (рис.12), які розраховані з даних імпедансної спектроскопії.

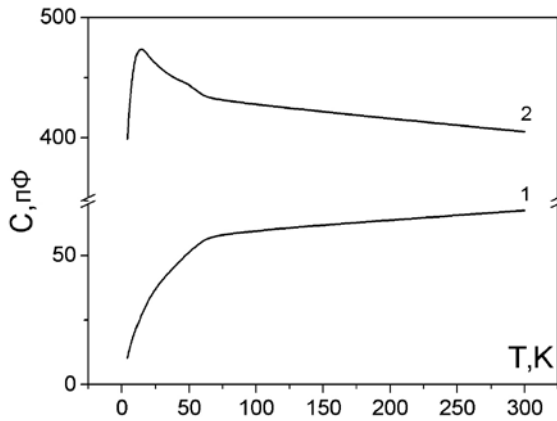


Рис.12. Температурні залежності ємності нерекристалізованих (1) та рекристалізованих (2) зразків із концентрацією  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (1) та  $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (2).

У зразках з нерекристалізованим полікремнієм ємність мала і зростає з температурою в інтервалі  $4,2 - 300 \text{ К}$  від  $10$  до  $70$  пФ. При цьому спостерігається швидке наростання ємності в інтервалі температур  $4,2-50 \text{ К}$  від  $10$  до  $70$  пФ, а далі в інтервалі температур  $50-300 \text{ К}$  залежність виходить на насичення. У нерекристалізованих зразках зерна малі порядку  $30 \text{ нм}$ , сумарна відстань між зернами  $d$  досить велика. Відповідно, бар'єрна ємність відносно мала. В рекристалізованому зразку - ємність значно більша: змінюється від  $380$  до  $490$  пФ. Спостерігається залежність з максимумом, який припадає на температуру приблизно  $20 \text{ К}$ . Причому, як і в попередньому зразку наростання ємності значне в інтервалі температур  $4,2- 20 \text{ К}$ , а далі спостерігається зменшення ємності в інтервалі температур  $20-300 \text{ К}$ .

У зразках з рекристалізованим полікремнієм за рахунок домінуючої ролі об'єму зерен у структурі полікристалічного матеріалу сумарна відстань між зернами досить мала. Тоді за рахунок більшої площі зерна та меншої міжзеренної відстані ємність загалом зростає порівняно з нерекристалізованими зразками. В обох випадках, у нерекристалізованих і рекристалізованих зразках, в інтервалі низьких температур носії в зернах виморожуються. Тому основну роль буде відігравати провідність по міжзеренних границях, в яких реалізується саме провідність по домішкочивій зоні. За температур нижче  $50 \text{ К}$  (в нерекристалізованому) та нижче  $20 \text{ К}$  (в рекристалізованому) зразках ємність різко зменшується із зниженням температури (міжбар'єрна провідність затухає). У високотемпературній області (рис. 12) зменшення ємності з підвищенням температури пов'язано з ростом концентрації вільних носіїв заряду у міжзеренних областях, які, взаємодіючи з областю просторового заряду на поверхні зерна, понижують висоту бар'єра і, відповідно, значення бар'єрної ємності. Це підтверджується результатами вимірювання на постійному струмі щодо неоднорідності рельєф-потенціалу, який, в свою чергу, спричинює виникнення умов, за яких починає проявлятися перколяційний механізм транспорту носіїв заряду.

Згідно з результатами дослідження низькотемпературної провідності

рекристалізованих зразків з концентрацією носіїв заряду  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  графік імпульсних залежностей (рис.4) займає додатну гілку півкола і моделюється послідовно з'єданою індуктивністю і резистором, що свідчить про індуктивний характер провідності за низьких температур. У рекристалізованих зразках з концентрацією носіїв заряду  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  за рахунок впливу великої кількості вільних носіїв на величину потенційного бар'єру на границях зерен утворюються стійкі провідні канали, так звані "перколяційні кластери", які відіграють роль провідників між зернами. В еквівалентній схемі індуктивність заміщає такі кластери на міжзеренних границях, внаслідок чого відбувається запізнення струму від напруги. Опори  $R_1$  та  $R_2$  заміщають опір провідного кластеру та зерна (рис.4), відповідно. В цьому разі перколяційний транспорт носіїв заряду буде відігравати домінуючу роль і, в результаті чого низькотемпературна провідність визначатиметься провідністю у цих перехідних між нормальними областями (зернами) кристалу.

Було також проведено розрахунки параметрів стрибкової провідності носіїв заряду на постійному струмі за експериментальними даними магнітоопору у нерекристалізованих зразках. Результати розрахунків показано на рис.13а,б.

$$\ln[R(B)/R(0)] = \left(\frac{T_0}{T}\right)^\alpha \alpha A_{eff}(T) \left(\frac{\mu B}{k_B T}\right)^2, \quad \text{де } A_{eff} = A + BT^{2-2\alpha} \quad (6)$$

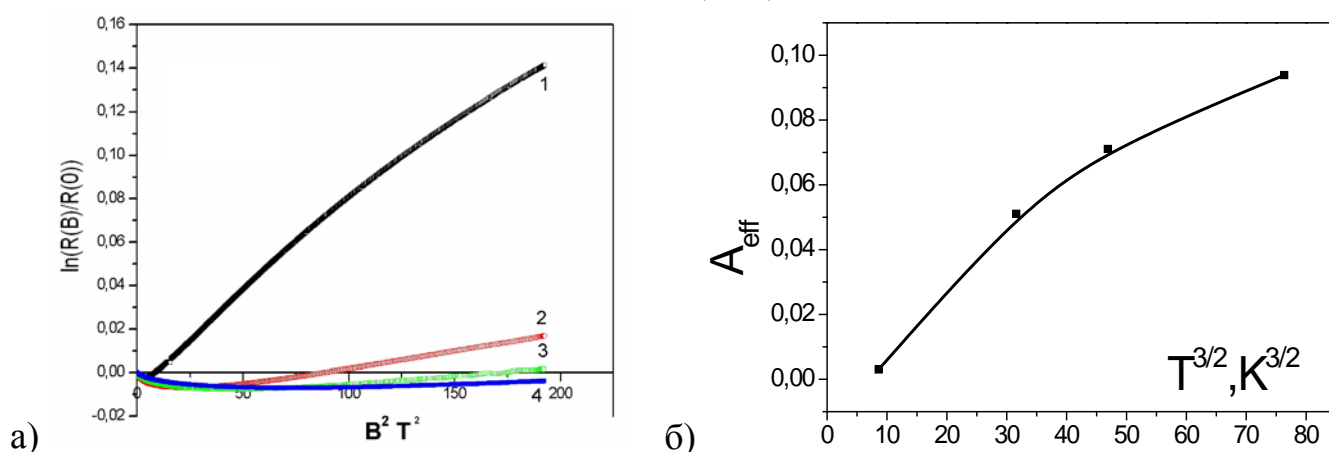


Рис.13. Логарифмічна залежність магнітоопору для нерекристалізованих полікремнієвих шарів з  $p_{300K}=2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при різних температурах: 1– 4,2К; 2– 10К; 3– 13,7К; 4– 18К та температурна залежність функції  $A_{eff}$ , що враховує спінополяризаційний ефект (б).

Використання співвідношення (6) дозволяє знайти квадратичний по магнітному полю магнітоопір. Обробка експериментальних даних  $A_{eff}(T)$  методом найменших квадратів, який реалізований у програмному середовищі Mathcad, дозволяє виконати оцінку ряду параметрів локалізованих станів у досліджуваних зразках низькорозмірного полікристалічного кремнію з концентрацією носіїв заряду  $p_{300K}=2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Результати розрахунків параметрів низькотемпературного транспорту носіїв заряду на постійному та змінному струмах за експериментальними даними у нерекристалізованих та рекристалізованих зразках зведені у табл. 1.

\*Електрофізичні параметри полі-Si структур за низьких температур.

Зразок	N, см <sup>-3</sup>	T, К	Механізм провідності	N(E <sub>F</sub> ), eВ×см <sup>-3</sup>	a, нм	R <sub>DC</sub> , нм	R <sub>AC</sub> , нм	W <sub>DC</sub> , меВ	W <sub>AC</sub> , меВ	W, меВ
Нерекристалізований	2,4×10 <sup>18</sup>	4,2-30	По Мотту	2.727·10 <sup>21</sup>	0,56	3,6	3,0	1,5	3,97	1,9
Рекристалізований	4,8×10 <sup>18</sup>	4,2-30	Шкловського-Ефроса	1.835·10 <sup>21</sup>	0,56	1,8	2,2	0,5	1,0	0,7

\* де N- концентрація носіїв заряду; T-температура; N(E<sub>F</sub>)- густина станів на рівні Фермі, a- радіус локалізації носіїв заряду, R<sub>DC</sub>- довжина стрибка носіїв заряду, отриманих з експериментальних даних на постійному струмі; R<sub>AC</sub>- довжина стрибка носіїв заряду, отриманих з експериментальних даних на змінному струмі; W<sub>DC</sub> –енергія активації носіїв заряду, розрахована з експериментальних даних на постійному струмі; W<sub>AC</sub>-енергія активації носіїв заряду, розрахована з експериментальних даних на змінному струмі; W – енергія активації носіїв заряду, отримана безпосередньо з експериментальних даних.

Отже, ймовірною причиною завищення значень енергії активації, отриманих на змінному струмі, пов'язані з необхідністю враховування комбінованого механізму провідності носіїв заряду за низьких температур, який в залежності від температури спостереження проявляється у переході від закону Мотта до перколяційного механізму Шкловського-Ефроса.

У шостому розділі наведено магнітні та магнітотранспортні характеристики ниткоподібних мікро- і нанокристалів кремнію. Під час досліджень магнетоопору кристалів виявлено, що при індукції магнітного поля B=14 Тл значення магнетоопору для сильно легованих мікрочисталів не перевищує ~ 4 %. Такі зразки, з врахуванням попередніх результатів дослідження їх п'єзорезистивних властивостей, можуть бути використані в ролі чутливих елементів сенсорів механічних величин, дієздатних в екстремальних умовах (за високих магнітних полів, за криогенних температур).

На основі експериментальних результатів можна стверджувати:

- магнетоопір досліджуваних мікрочисталів Si p-типу провідності у всьому діапазоні магнітних полів до 14 Тл є додатним;
- про зростання значення магнетоопору зі збільшенням питомого опору зразків за квадратичним законом від індукції магнітного поля;
- з віддаленням концентрації легуючої домішки (бору) в мікрочисталах Si p-типу провідності від критичного значення N<sub>c</sub>, що відповідає фазовому ПМД, з металевому боку спостерігається зменшення магнетоопору, а з діелектричного боку – значне зростання магнетоопору.

Проте під час дослідження магнетоопору та магнітних властивостей ниткоподібних кристалів Si p-типу провідності було виявлено та більш детально досліджено низку особливостей, які дають можливість кардинально змінити область застосування мікрочисталів кремнію у твердотільній електроніці. Особлива увага надавалась зразкам мікрочисталів кремнію, для яких цілеспрямовано проводилось легування магнітною домішкою нікелю, що дозволило запропонувати з одного боку чутливі елементи сенсорів магнітного поля, а з іншого провести аналіз щодо впливу магнітних домішок на низькотемпературний транспорт носіїв заряду у кристалах. Базуючись на результатах експериментальних даних щодо досліджень НК за низьких температур та даних магнетоопору кристалів, в яких спостерігався гістерезис намагніченості, від'ємний та аномальний позитивний магнетопір

кристалів можна припустити наступне: наявність від'ємного магнітоопору може свідчити про те, що у даній групі зразків за низьких температур присутні локалізовані носії заряду. Поглиблене вивчення стрибка магнетоопору (рис.14) в діапазоні слабких магнітних полів – до 0,2 Тл показало, що в ниткоподібних кристалах спостерігається гістерезис магнетоопору (рис.15).

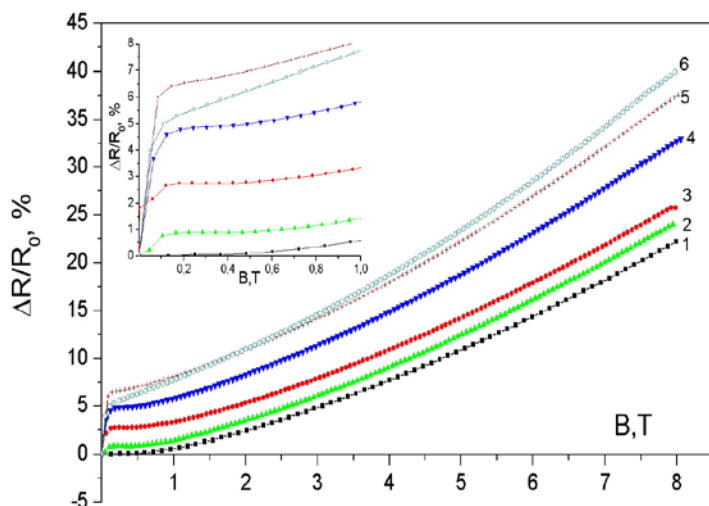


Рис.14. Зміна магнетоопору легованих мікрокристалів кремнію за різних температур: 1-1,7К, 2-4,2К,3-13К,4-29К,5-42К,6-56К.

Як видно з рис.15. гістерезис проявляється в області низьких температур, де має місце стрибкова провідність по домішковій зоні. Окрім цього, прикладення магнітного поля приводить до певної орієнтації

спинів носіїв заряду, за рахунок якої вони вилучаються з процесу переносу. Найбільш імовірним є локалізація на домішці двох носіїв з протилежно направленими спінами. В цьому разі ми маємо справу з явищем аномального позитивного магнітоопору, в результаті чого відбувається значний стрибок опору кристалів із збільшенням магнітного поля та подальше його насичення за рахунок орієнтації всіх спинів по полю.

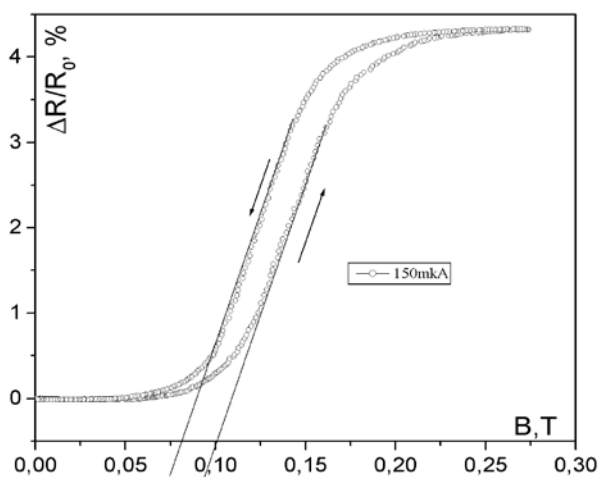


Рис.15. Гістерезис магнетоопору мікрокристалів кремнію у слабких магнітних полях.

Як відомо. зміна знаку напруженості магнітного поля приводить до переорієнтації спинів носіїв заряду, що вимагає певної енергії. В результаті залежність прямої та зворотної зміни магнетоопору з полем не співпадають, що проявляється у гістерезисі магнетоопору (рис.15). Для оцінки вкладу

домішки нікелю у магнітотранспортні властивості кристалів нами проведено дослідження польової залежності намагніченості нанокристалів кремнію за різних температур. На рис. 16 наведена польова залежність намагніченості для нанокристалів кремнію, легованого нікелем в широкому інтервалі температур. Наявність гістерезису у ниткоподібних кристалах кремнію вказує на достатню кількість магнітної домішки, що впливає на магнітотранспортні властивості кристалу. Причиною виникнення магнітного впорядкування у кристалі може бути утворення магнітних кластерів навколо феромагнітної домішки, що поляризує носії заряду навколо локалізованих домішок бору.



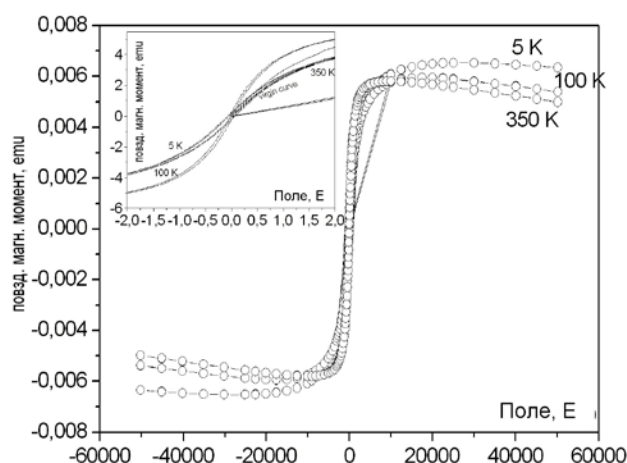


Рис.16. Польова залежність намагніченості для нанокристалів кремнію, легованого нікелем в широкому інтервалі температур.

Враховуючи те, що під час експериментальних досліджень намагніченості кристалів кремнію було виявлено відхилення від закону Кюрі-Вейса, а саме визначено від'ємну температуру Кюрі, що вказує на наявність антиферомагнітної взаємодії нами було запропоновано модель низькотемпературного транспорту носіїв заряду. На рис.17 наведено схематичне зображення моделі провідності мікрочасток за низьких температур, що враховує спін-поляризаційні ефекти і показано можливе магнітне впорядкування. Стрілками зображено перескоки носіїв заряду по локалізованих домішках бору.

Ця модель передбачає, що середня відстань між локалізованими дірками повинна бути більшою, ніж радіус локалізації дірок, тобто  $\alpha_0^3 p \ll 1$ , де  $\alpha_0^3$  – характеристика експоненційного затухання хвильової функції дірки в локалізованих станах. У наших дослідженнях показано, що механізм зміни провідності описується

наступним співвідношенням:  $\rho \propto \exp \frac{E_{hop}}{kT}$ , де  $E_{hop}$  є енергія активації стрибкової провідності по локалізованих домішках,  $T$  – температура спостереження.

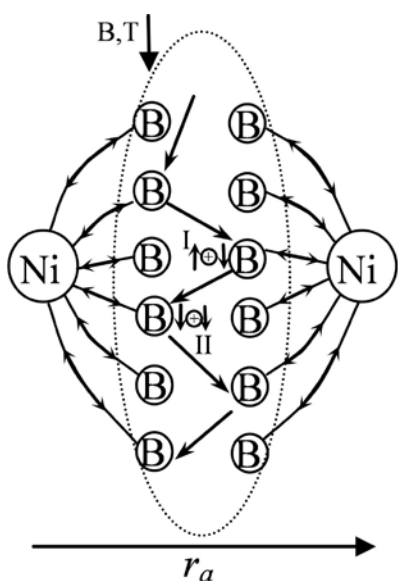


Рис.17. Схематичне зображення моделі провідності мікрочасток за низьких температур, що враховує спін-поляризаційні ефекти.

Ця модель враховує результати щодо виявлених раніше ефектів, як стрибкової провідності, так і стрибка магнетопору. Окрім цього, ця модель враховує обидва стани магнітного впорядкування: антиферомагнітного (режим I) – у кристалах за низьких магнітних полів, коли магнітна домішка захоплює носії заряду, локалізовані на домішці бору з протилежно направленими спінами. В результаті антиферомагнітного впорядкування спінів спостерігається формування магнітної структури (провідного кластера) та стрибок

магнетоопору на графіку залежності (рис.14) до руйнування магнітного кластера (на графіку ми відмітили цей скачок, як існування аномального позитивного магнетоопору); феромагнітного (режим II) – наявність від'ємного магнетоопору, коли магнітна домішка захоплює носії заряду, локалізовані на домішці бору з однонаправленими спінами (рис.18а).

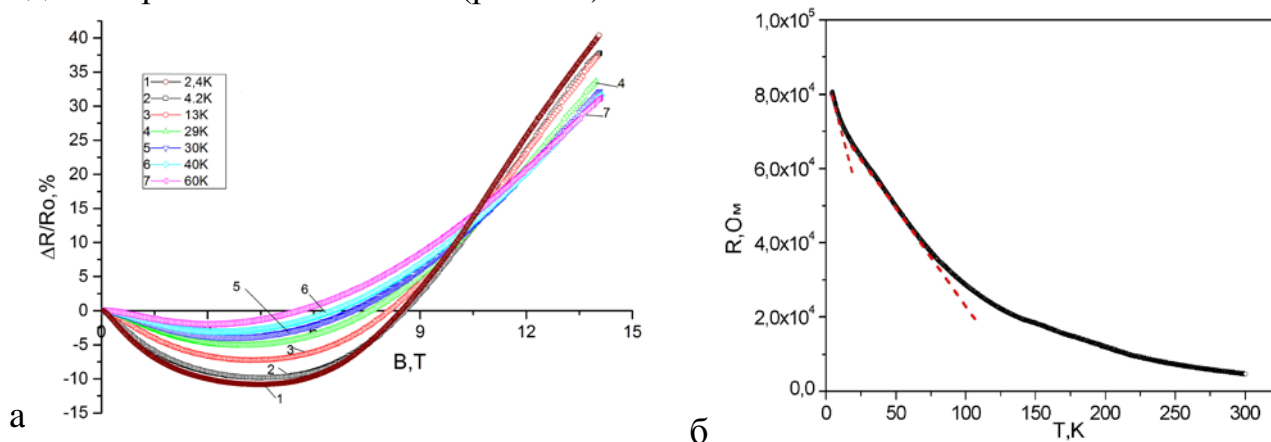


Рис.18. Магнітоопір легованих мікрочастин кремнію, концентрація носіїв заряду в яких відповідає діелектричному боку ПМД ( $N_B < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) за різних температур (а); температурна залежність опору легованих мікрочастин кремнію, концентрація носіїв заряду в яких відповідає діелектричному боку ПМД (б).

З іншого боку, результати магнітотранспортних досліджень вказують на домінуючий вклад магнітної домішки у низькотемпературні характеристики кристалів, зокрема, наведені результати для ниткоподібних кристалів кремнію, концентрація яких знаходиться з діелектричного боку переходу метал-діелектрик, в одному випадку, та з металевого боку у віддаленій області в іншому випадку. На рис.18а зображено поперечний магнітоопір в інтервалі температур 2,4–70К, а на рис.18б температурна залежність опору в широкому інтервалі для цього ж самого зразка. Як видно з рис. 18а область існування від'ємного магнітоопору суттєво розширилась в область підвищених температур. Ймовірно припустити, що область існування стрибкової провідності по двічі окупованих станах, яку ми раніше пов'язували з існуванням від'ємного магнітоопору, суттєво збільшилась. Очевидно, що наявність магнітної домішки істотно впливає на локалізовані дірки, по яких реалізується стрибкова провідність, а провідний канал, тобто впорядкування існує для значно вищих температур. В той же час результати дослідження температурної зміни опору дозволяють припустити, що енергія активації стрибкової провідності відповідає енергії зі змінною довжиною стрибка, що на рис.18б представлено у двох ділянках до температури 70 К.

Значення енергії активації як видно з рис.18б є рівною 1,2 меВ, що узгоджується з попередніми результатами дослідження ниткоподібних кристалів Si, легованих домішкою бору. У мікрочастинках Si р-типу провідності з домішкою Ni виявлено електрично активні глибокі рівні з енергією іонізації 0,22 еВ, а відтак домішкою Ni можна знехтувати щодо внеску у величину провідності, що, очевидно вказує на компенсацію носіїв заряду у мікрочастинках.



Проведені розрахунки на постійному та змінному струмах дозволили оцінити параметри низькотемпературної провідності, а саме, енергію активації і радіуси стрибків в залежності від концентрації легуючої домішки, а також густину станів на рівні Фермі. Ці величини дозволили оцінити динаміку низькотемпературної провідності в НК Si в залежності від концентрації легуючої домішки і зведені в табл.2.

Таблиця 2

\*Розраховані параметри досліджуваних ниткоподібних кристалів Si

$\rho_{300K}$ , Ом×см	$N(E_F)$ , eB×см <sup>-3</sup>	$R_{hop}$ , нм	$a_{DC}$ , нм	$a_{AC}$ , нм	$W_{DC}$ , меВ	$W_{AC}$ , меВ	$W$ , меВ
0,0143	$9,8 \cdot 10^{17}$	5,8-6,5	5,8	18	1,16	2,6	1,8
0,0168	$8,96 \cdot 10^{17}$	8,0-9,5	8,6	26	1,22	3,0	2,3

\* де  $\rho_{300K}$ - питомий опір зразка;  $N(E_F)$ - густина станів на рівні Фермі,  $R_{hop}$  - довжина стрибка носіїв заряду;  $a$  - радіус локалізації носіїв заряду на постійному та змінному струмах, відповідно;  $W_{DC}$ - енергія активації носіїв заряду, розрахована з експериментальних даних на постійному струмі;  $W_{AC}$ -енергія активації носіїв заряду, розрахована з експериментальних даних на змінному струмі;  $W$  – енергія активації носіїв заряду, отримана безпосередньо з експериментальних даних.

Отже, в результаті низькотемпературних досліджень магнітних та магніто-транспортних властивостей нанокристалів кремнію, легованих домішками бору та нікелю, встановлено, що для криогенних температур, включно до рідкого гелію, провідність таких кристалів змінюється стрибкоподібно за рахунок локалізації домішкових станів. Магнітні властивості кристалів, для яких значення концентрації носіїв заряду знаходиться поблизу ПМД з діелектричного та металевих боків підлягають законам перколювання із утворенням магнітних кластерів, що, в свою чергу, важливо для створення приладів, які можуть застосовуватись у спінтроніці. Принцип дії таких сенсорів ґрунтується на значному магніто-резистивному ефекті (~250%) для зразків, концентрація яких знаходиться у безпосередній близькості до переходу метал-діелектрик.

У сьомому розділі наведено результати досліджень щодо розроблення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі як окремих, так і приладів, що виконані за рахунок поєднання технології створення структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію. Було запропоновано сенсори механічних та теплових величин.

*Сенсори механічних величин.* Для оцінки можливості створення сенсорів деформації для заданого інтервалу температур на основі ниткоподібних кристалів Si p-типу провідності з концентрацією легуючої домішки, що відповідає околу переходу метал- діелектрик, було проведено дослідження тензометричних характеристик кристалів. На рис.19 наведено результати досліджень щодо розроблення сенсорів деформації для низькотемпературного інтервалу роботи. Коефіцієнт тензочутливості для зразків із питомим опором  $\rho_{300K}=0,0168$  Ом×см в області гелієвих температур досягає гігантських значень:  $K_{4,2K} \approx 53000$  на постійному та  $K_{4,2K} \approx 15500$  на змінному струмах при деформації стиску (рис.19). В той же час

значення коефіцієнта тензочутливості для зразків із питомим опором  $\rho_{300\text{K}}=0,0142$  Ом $\times$ см значно менше в усьому досліджуваному інтервалі температур.

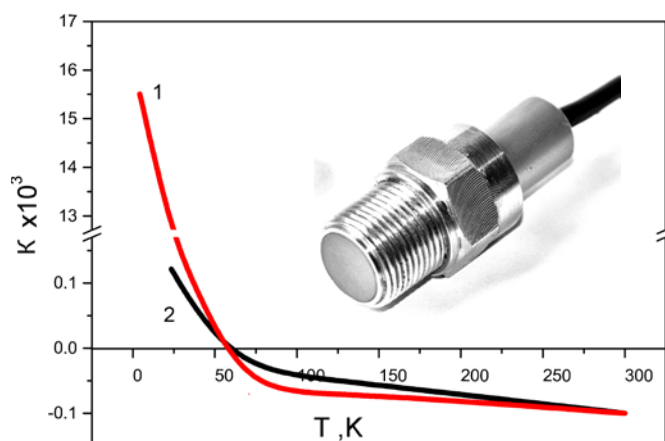


Рис.19. Залежність коефіцієнта тензочутливості від температури для НК Si із питомим опором  $\rho_{300\text{K}}=0,0168$  Ом $\times$ см (крива 1) та  $\rho_{300\text{K}}=0,0142$  Ом $\times$ см (крива 2). На вставці зовнішній вигляд сенсора

Такі гігантські значення коефіцієнта тензочутливості для зразків із  $\rho_{300\text{K}}=0,0168$  Ом $\times$ см в області гелієвих температур пояснюється, як вище згадувалось, так званим “некласичним” механізмом п’єзоопору, що зумовлений транспортом носіїв по локалізованих або частково локалізованих домішкових станах. Подальше збільшення питомого опору досліджуваних зразків не приводить до підвищення ефективності впливу деформації на опір, а навпаки – цей ефект суттєво зменшується.

Результати досліджень щодо створення чутливих елементів сенсорів деформації на основі структур кремній-на-ізоляторі наведені на рис.20, а їх загальний вигляд на рис.21.

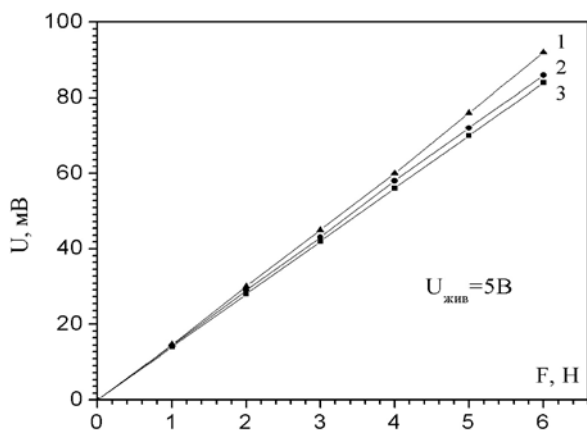


Рис. 20. Градувальна характеристика сенсора зусилля за різних температур: 1– 23°C; 2 – 125 °C; 3 – 165 °C.

Розрахунок деформацій чутливих елементів показав, що, змінюючи розміри кремнієвої балки, можна створити сенсори деформації на різні інтервали зусилля. У цьому разі на кожному чутливому елементі розміщались послідовно вздовж напрямку [110] по чотири однакові мостові схеми.

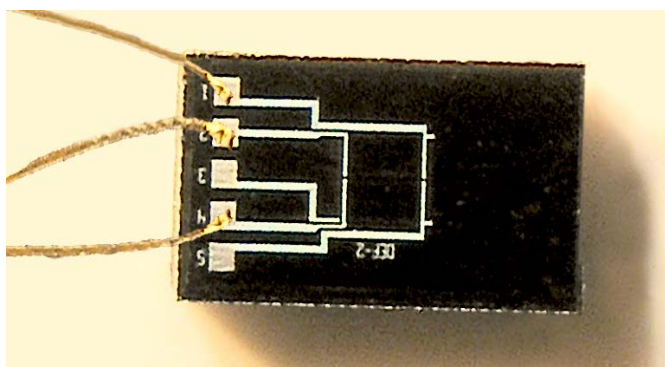


Рис. 21. Мікрофотографія чутливого елемента сенсора деформації на основі полікремнію в КНІ-структурах

Згідно з проведеними розрахунками конструкції сенсора для вимірювання високих тисків ( $P=100$  МПа) було обрано конструкцію сенсора з торцевим пружним елементом, на якому закріплюються

тензорезистори (рис.22).

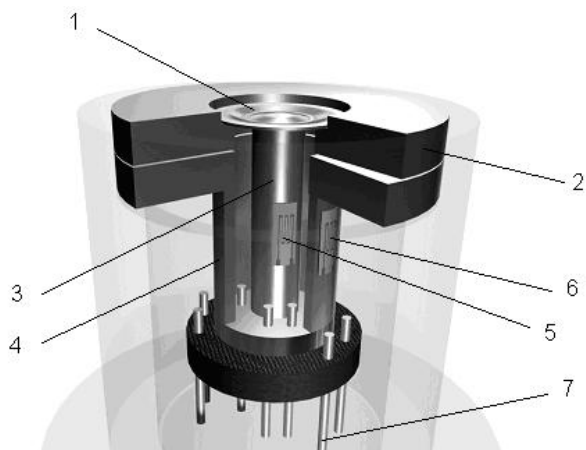
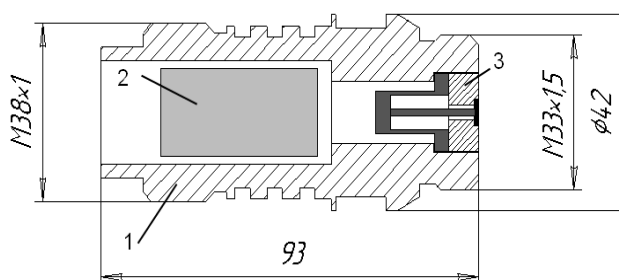


Рис. 22. Зовнішній вигляд мембрани і пружного елемента сенсора тиску: 1 – мембрана; 2 – кільце; 3 – стержневий пружний елемент; 4 – циліндричний пружний елемент; 5,6 – тензорезистори; 7 – струмовиводи від тензорезисторів.

Виготовлений пружний елемент сенсора встановлювався в корпусі (рис.23а) первинного перетворювача, як показано на рис. 23б.



а)



б)

Рис. 23. Загальний вигляд сенсора деформації (а) та його схематичне зображення: 1 – корпус первинного перетворювача, 2 – місце розташування електронної схеми перетворювача, 3 – мембрана і пружний елемент.

Результати градуювання виготовленого сенсора тиску зі стержневим пружним елементом наведено на рис. 24.

Як видно з рис. 24, залежність вихідного сигналу від тиску для розробленого сенсора зі стержневим пружним елементом має практично лінійний характер в діапазоні тисків  $P=0-100$  МПа.

Необхідно зауважити, що для цього пристрою розроблена електронна схема забезпечує вихідний струмовий сигнал 4...20 мА (рис. 25) і температурну корекцію дрейфу нуля первинного перетворювача при зміні температури.

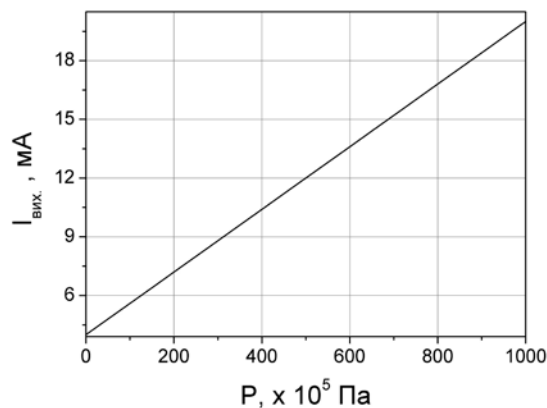
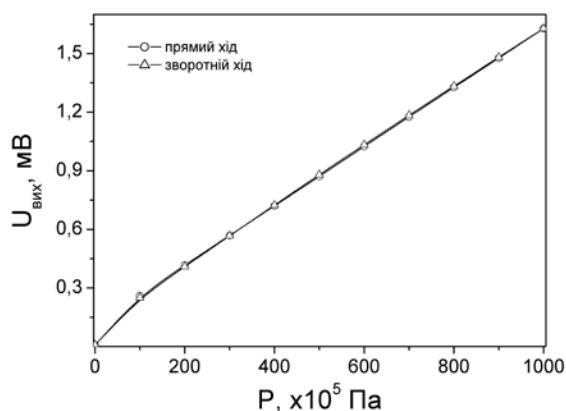


Рис. 24. Градувальна характеристика сенсора тиску зі стержневим пружним елементом. Рис. 25. Вихідний струмовий сигнал вторинного перетворювача тиску.

*Сенсори теплових величин.* Для оцінки можливості створення надчутливих сенсорів теплових величин, працездатних за криогенних температур на основі експериментальних досліджень встановлено, що найбільш сильну температурну залежність опору мають нерекристалізовані шари полі-Si з концентрацією носіїв  $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В інтервалі 4,2–50 К їх температурний коефіцієнт опору (ТКО) становить  $\sim 9\% \times \text{K}^{-1}$ . Зовнішній вигляд чутливого елемента сенсора температури на основі структур кремній-на-ізоляторі зображено на рис. 26.

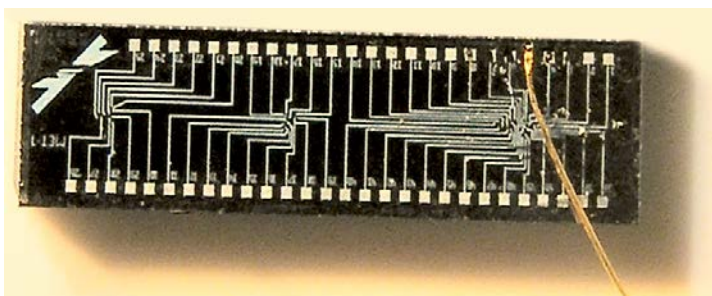


Рис. 26. Мікрофотографія чутливого елемента сенсора температури на основі КНІ-структур.

Проте, використання спеціально деформованих сильнолегованих НК Si має значні переваги при вимірюванні криогенних температур. В області температур 77–280 К температурний коефіцієнт опору НК Si змінюється від 0,2 до 0,4 %/К в залежності від концентрації домішки, що дає можливість створення на їх основі термометрів для вимірювання температур в широкому діапазоні від кімнатної до температури рідкого азоту. На рис. 27 зображено фотографію та схему сенсора температури на основі НК Si.

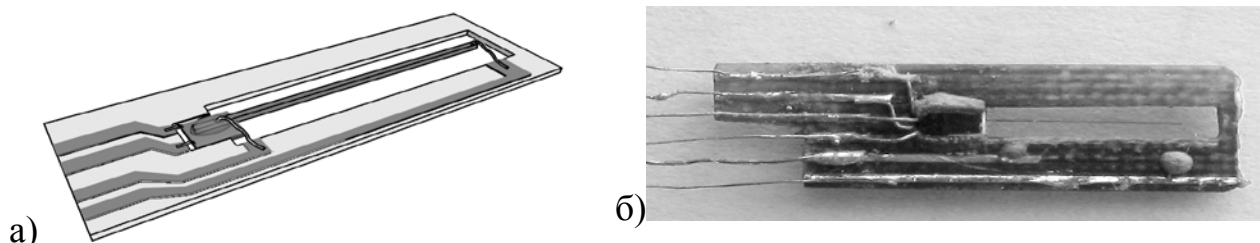


Рис. 27. Схематичне зображення (а) та фотографія сенсора температури (б) на основі мікрокристалів кремнію.

*Сенсори магнітних величин.* Незважаючи на те, що на сьогодні створено деякі сенсори на основі ефектів гігантського магніторезистивного ефекту, проте у спінтроніці ці пристрої, в більшості випадках, виготовлені на основі металевих плівок, у той час, як сучасні технології орієнтовані на напівпровідники. Тому важливе значення має розвиток напівпровідникової спінтроніки, сумісної із сучасною технологією кремнієвих чипів. Базуючись на результатах досліджень магнітоопору НК Si, які показали істотні зміни його значення в залежності від магнітного поля, а саме, при індукції магнітного поля 14 Тл і температурі 4,2 К поперечний магнітоопір сягає 250%, створено сенсор магнітного поля на основі мікрокристалів кремнію, легованих магнітною домішкою нікелю. Градувальна характеристика чутливого елемента сенсора магнітного поля показано на рис. 28, а типовий вигляд сенсора зображено на рис. 29 відповідно. Чутливість сенсора до

магнітного поля 20%/Тл за температури 4,2 К, що дозволяє вимірювати індукцію магнітного поля з точністю 5 мТл. Незважаючи на те, що на цей час для вимірювання слабких магнітних полів використовують датчики Холла або серійні магнеторезистори, наприклад, типу СМ4-1, та все ж для сильних магнетних полів і низьких температур запропоновані сенсори можуть знайти широке застосування.

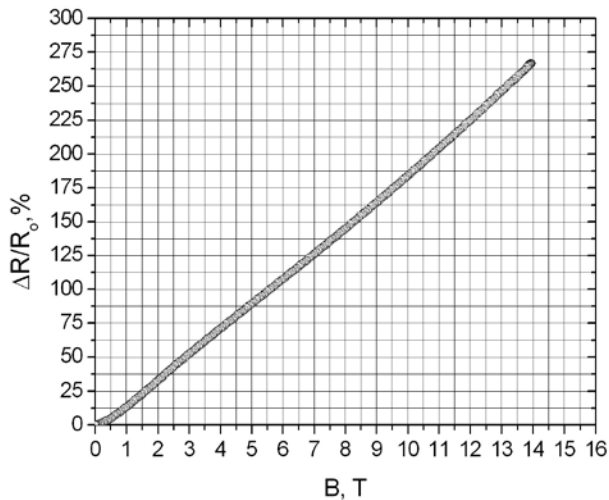


Рис. 28. Градувальна характеристика сенсора магнітного поля.



Рис. 29. Загальний вигляд сенсора магнітного поля.

*Елементи сенсорної техніки.* Використовуючи виявлені особливості низькотемпературної провідності на змінному струмі ниткоподібних кристалів Si р-типу провідності та КНІ структур запропоновано напівпровідниковий індуктивний елемент, використовуючи як дискретний прилад, або у складі зінтегрованого пристрою на основі структур кремній на ізоляторі. Створення напівпровідникових індуктивних елементів на основі ниткоподібних кристалів Si р-типу провідності може бути використано в планарній технології виготовлення напівпровідникових аналогів котушок індуктивності, як елементів мікросхем, які виготовляються в одному технологічному процесі. Отримані імпедансні характеристики зразків дозволяють прогнозувати створення реактивних елементів твердотільної електроніки певних номіналів, працездатних при низьких температурах на основі як полікристалічного, так і монокристалічного кремнію.

Використовуючи комплексний підхід, реалізовано на базі кремнієвих елементів систему у вигляді коливального контуру. Для оцінки параметрів такої системи було виконано розрахунки на основі отриманих експериментальних даних.

Частота коливального контуру визначається наступним співвідношенням:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (7)$$

де  $\omega_0$  - частота власних коливань,  $\beta$  - коефіцієнт загасання,  $L, C, R$  – індуктивність, ємність та опір коливального контуру, відповідно.

Комбінація елементів ниткоподібного кристала кремнію з концентрацією легуючої домішки з діелектричної боку переходу метал-діелектрик, що забезпечує індуктивність коливального контуру, з полікристалічним кремнієм в КНІ-

структурах, що служить ємнісним елементом такої системи, дозволяє отримати частотну залежність вихідного сигналу, який показаний на рис. 30.

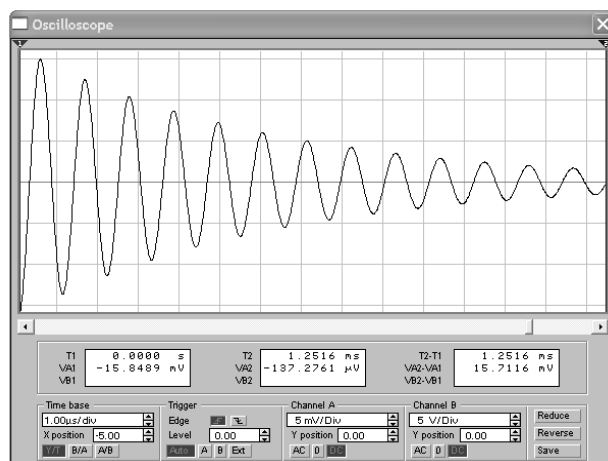


Рис. 30. Частотна залежність вихідного сигналу LC-контру.

Резонансна частота коливального контуру дорівнює 6,0 МГц; розрахована величина добротності даного контуру складає 57.7, що порівняльне з добротністю відомих LC-контурів

Параметри напівпровідникового індуктивного елемента наведені в табл.3 і змінюються з похибкою не більше 2%.

Таблиця 3.

#### Порівняльні характеристики напівпровідникових індуктивних елементів

Виробник	Макс. індуктивність, мГн	Добротність, Q	Діапазон робочих температур, К	Макс.струм, мкА	Робоча частота, кГц
Coilcraft	100	1	230–420	12,5	100
Panasonic	470	0,8	230–420	12,5	100
Toko	3300	1,1	230–420	27,2	100
НУЛП (НК-Si $\rho_{300K}=0,0168 \text{ Ом см}$ )	0,9	1,5	4,2–300	1	100
НУЛП (НК-Si $\rho_{300K}=0,0142 \text{ Ом см}$ )	0,7	1,3	4,2–300	1	100

Для створення зінтегованих компонентів пристроїв на основі структур кремній-на-ізоляторі і ниткоподібних нанокристалів було запропоновано концепцію чутливого елемента акселерометра, створеного за рахунок поєднання технології виготовлення структур кремній на- ізоляторі та нанокристалів кремнію.

На рис. 31 наведено зовнішній вигляд акселерометра на основі наноструктур кремнію.

Під час формування рухомого електрода акселерометра використовуються основні технологічні процеси, що лежать в основі виготовлення зінтегованих схем. В свою чергу під час формування нерухомого електрода використовуються процеси, що характерні для виготовлення нанокристалів кремнію методом хімічного



парового осадження за механізмом пара-рідина-кристал з утворенням п'єдесталів в якості емісійних компонентів.

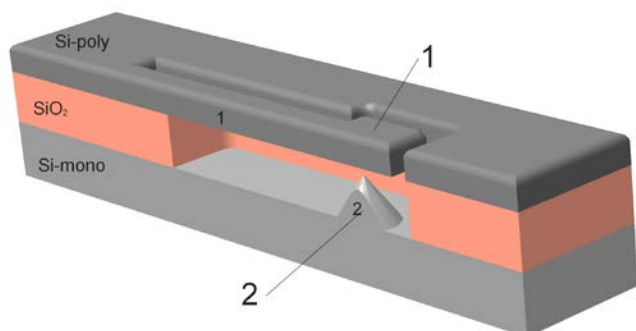


Рис. 31. Загальний вигляд чутливого елемента акселерометра на основі наноструктур кремнію: 1-рухомий електрод; 2- нерухомий електрод.

Принцип дії акселерометра полягає в наступному. При подачі різниці потенціалів між рухомих і нерухомих електродами протікає початковий струм автоемісії. При зміщенні рухомої маси

електрода збільшується відстань між вістрями, в результаті цього зменшується напруженість електричного поля у порожнині і, відповідно, струм автоемісії, який реєструється вимірювальними приладом, або схемою фіксації. Струм автоемісії під час зміщення рухомої маси електрода зменшується на порядок, при зміні положення рухомого електрода відносно нерухомого з кроком 0,2 мкм і становить:  $1,5 \times 10^{-6}$  А в стані спокою, в той час як зміщення досягає 0,4 мкм струм автоемісії зменшується до  $7,2 \times 10^{-8}$  А.

Отже, запропонований чутливий елемент акселерометра, виготовлений за суміщеними технологіями на основі КНІ-структур та нанокристалів кремнію, дав можливість реалізувати як дискретний прилад, так і елемент зінтегрованих наноелектромеханічних систем зі структурою кремній-на-ізоляторі, який забезпечує контроль переміщення з точністю 200 нм.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведення дисертаційного дослідження розв'язано науково-прикладну проблему створення елементів сенсорної техніки, а також пристроїв, виготовлених на основі поєднання структур кремній-на-ізоляторі та мікрочисталів кремнію, що має важливе значення для сучасної кріоелектроніки, сенсорної мікро- та наносистемної техніки. Отримано такі основні результати:

1. Вдосконалено технологічні методи виготовлення мікроструктур на основі полікристалічного та ниткоподібного кремнію, що відкриває, в подальшому, можливості застосування таких матеріалів для створення як чутливих елементів сенсорів, так і елементів зінтегрованих схем, в т.ч. за рахунок поєднання технологій виготовлення цих матеріалів. Експериментально показано, що використання літографічних підходів до формування мікроструктур кремнію за температури  $T \approx 580^\circ\text{C}$  з метою локального утворення необхідних об'єктів на напівпровідниковій пластині дасть змогу отримувати комбіновані структури у технології створення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки. Це дозволяє найкращим чином реалізувати переваги структурної досконалості таких мікрочисталів та структур кремній-на-ізоляторі, а також гнучку і, порівняно,

недорогу технологію їх отримання, яка є сумісною з технологією напівпровідникових чіпів.

2. Проведено комплексне дослідження електрофізичних властивостей структур кремній- на-ізоляторі у широкому інтервалі температур на постійному та змінному струмах, що є передумовою створення мікроелектронних сенсорів на базі полікристалічного кремнію у структурах кремній-на-ізоляторі. Встановлено, що за криогенних температур в околі температури рідкого гелію провідність змінюється стрибкоподібно (з довжиною стрибка  $R_{hop} \approx 3 \text{ нм}$ ) для дрібнозернистих нерекристалізованих зразків, в той час, як для рекристалізованих зразків, концентрація в відповідає безпорядній близькості переходу метал-діелектрик, спостерігається перехід від стрибкоподібного характеру до провідності, що відноситься до перколяційних систем. Подальше підвищення рівня легування вихідного матеріалу приводить до домінуючої ролі перколяційного механізму в транспорті носіїв заряду за криогенних температур.
3. На основі результатів аналізу експериментальних даних дослідження впливу деформації на властивості ниткоподібних мікро- і нанокристалів кремнію р-типу провідності у широкому інтервалі температур виявлено основні закономірності транспортних характеристик та проведено оцінку можливості використання мікрочисталів Si як чутливих елементів сенсорів. Показано, що за низьких температур перенесення носіїв заряду в мікрочисталах відбувається шляхом стрибкового тунелювання зі змінною довжиною стрибка ( $R_{hop} \approx 5-9 \text{ нм}$ ) по локалізованих домішках, а струмопротікання, в основному, домінує в приповерхневій області.
4. На основі досліджень магнітних та магнітотранспортних характеристик ниткоподібних мікрочисталів кремнію, концентрація домішки яких знаходиться у близькості до переходу метал-діелектрик з діелектричного боку ( $N < 5,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) визначено, що магнітні властивості кристалів, підлягають законам протікання із утворенням магнітних кластерів і вкладаються в рамки моделі, яка полягає у поляризації спінів локалізованих носіїв заряду, що оточують атоми магнітних домішок.
5. Запропоновано новий підхід щодо використання ниткоподібних кристалів кремнію, легуваних магнітною домішкою, у сенсорах, які можуть застосовуватись у спінтроніці. Принцип роботи таких приладів заснований на значному магнеторезистивному ефекті, який проявляється в залежності магнетоопору від індукції магнітного поля досягаючи 250% при 14 Тл, що, зокрема, використано під час розроблення сенсорів магнітного поля.
6. Результати досліджень щодо впливу електронного опромінювання дають можливість стверджувати про стійкість шарів полікремнію в КНІ-структурах до високоенергетичного випромінювання для діапазону концентрацій від  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  під час опромінення їх електронами високих енергій ( $E = 10 \text{ MeV}$ ) з флюенсом  $\Phi = 10^{16} \text{ ел/см}^2$ , що може бути використано для створення стійких до радіації мікроелектронних сенсорів на основі цих матеріалів.



7. На основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію розроблено і виготовлено сенсори механічних величин для різних інтервалів робочих температур: сенсори для криогенних температур, що розроблені на основі ниткоподібних кристалів кремнію, для яких коефіцієнт тензочутливості становить  $K \approx 15500$ . У підвищеному діапазоні температур (до кімнатної температури) з коефіцієнтом тензочутливості  $K \approx 100$  виготовлено сенсор з циліндричним пружним елементом. Вихідний сигнал сенсора становить  $U_{\text{вих}} \approx 2 \text{ мВ}$ ; на основі КНІ-структур з рекристалізованим полікремнієвим шаром – коефіцієнт тензочутливості становить  $K \approx 325$  для криогенних температур. У підвищеному діапазоні температур з коефіцієнтом тензочутливості  $K \approx 35$ . Вихідний сигнал сенсора становить  $U_{\text{вих}} \approx 3 \text{ мВ}$ .
8. На основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію розроблено і створено сенсори теплових величин дієздатних в інтервалі криогенних температур: високочутливий сенсор на основі нерекристалізованих шарів полікремнію в КНІ-структурах з температурним коефіцієнтом опору  $9\% \times \text{K}^{-1}$ ; на основі шарів рекристалізованого полікремнію, працездатні в сильних магнітних полях з ТКО  $2,08\% \times \text{K}^{-1}$ ; на основі ниткоподібних кристалів кремнію – з ТКО  $0,4\% \times \text{K}^{-1}$ .
9. Розроблено нові підходи і запропоновано конструктивно-технологічні методи виготовлення елементної бази сенсорів, які створені за рахунок суміщення технології виготовлення структур кремній-на-ізоляторі та напівпровідникових ниткоподібних нанокристалів кремнію. Так, запропоновано чутливий елемент акселерометра, що дало можливість реалізувати як дискретний прилад, так і елемент зінтегрованих наноелектромеханічних систем зі структурою кремній-на-ізоляторі, який забезпечує контроль переміщення з точністю 200 нм.
10. На основі мікрочисталів кремнію та структур кремній-на ізоляторі створено як дискретні елементи твердотільної електроніки (індуктивні, ємнісні елементи), так і комбіновані (коливальні контури), які реалізуються за суміщеними технологіями. Конструкція коливального контура передбачає комбінацію елементів, яка складається з ниткоподібного кристала кремнію із концентрацією легуючої домішки, що відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик і забезпечує індуктивність коливального контуру та полікристалічного кремнію в КНІ-структурах, що слугує ємнісним елементом такої системи. Значення добротності такого контуру становить  $\sim 60$ , що є достатньою умовою використання в LC-контурах.

#### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Структури кремній-на-ізоляторі для сенсорної електроніки/ Дружинін А.О., Когут І.Т., Ховерко Ю.М.// Монографія. – Львів: Вид. НУ “Львівська політехніка”. – 2013. – 233 с.
2. Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине / А.А. Евтух, А.А. Григорьев, А.Ю. Кизяк, О.В. Стеблова, А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.Н. Ховерко, С.И. Ничкало Электронные полевые эмиссионные

катоды и резонансно-туннельные структуры на основе нанопроволок кремния / Кол. моногр. под ред. А.Г. Наумовец // НАН Украины. – К.: Академперіодика, 2014. – 768 с.

3. Magneto-transport properties of polysilicon in SOI structures at low temperatures/ Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Kogut, I., Khoverko Yu., Koretskii, R., Kogut, I. // *Materials Science in Semiconductor Processing.*–Vol. 31.–2015.– P. 19-26.
4. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures/ A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, R. Koretskii. // *Materials Science in Semiconductor Processing.*– 2015.–Vol. 40.– P. 766–771.
5. Magnetic susceptibility and magnetoresistance of neutron-irradiated doped Si whiskers/ A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, K. Rogacki, P.G. Litovchenko, N.T. Pavlovska, Yu.V. Pavlovskyy, Yu.O. Ugrin // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.*– 2015.– Vol. 393.– P. 310–315.
6. Technological approaches for growth of silicon nanowire arrays. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) *Nanocomposites, nanophotonics, nanobiotechnology, and applications/ Druzhinin A., Evtukh A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., and Dvornytskyi S.*// Springer International Publishing, Cham, 2015.–pp. 301-308.
7. Properties of low-dimentional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors/ A. Druzhinin, Yu. Khoverko, I. Kogut, R. Koretskii // *Advanced Materials Research.*– 2014.– Vol. 854.– P. 49–55.
8. Variable-range hopping conductance in Si whiskers/ A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, R. Koretskyy, Iu. Kogut // *Phys. Status Solidi A* 211, No. 2.– 2014.–P. 504–508.
9. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures/ A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, Iu. Kogut // *Physica Status Solidi C* 11.–№1.– 2014.– P.156-159.
10. Magnetic susceptibility of doped Si nanowhiskers/ Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M., Kogut Iu.R., Nichkalo S.I., Warchulska J.K. // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology.*– 2012.–Vol. 12.– P.8690–8693.
11. Особливості магнітної сприйнятливості ниткоподібних кристалів Si/ Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Корецький Р.М. // *Журнал фізичних досліджень.* – 2012.–Т.16, № 3. – С. 3703 (1–4).
12. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures/ A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, N.S. Liakh-Kaguj and Iu.R. Kogut // *Materials Science in Semiconductor Processing.* – 2011. – Vol. 14, № 1. – P. 18–22.
13. Polysilicon on Insulator Structures for Sensor Application at Electron Irradiation & Magnetic Fields/ Anatoly Druzhinin, Inna Maryamova, Igor Kogut, Yuriy Khoverko // *Advanced Materials Research.* – 2011. – Vol. 276. – P. 109–116.
14. The Device-Technological Simulation of The Field-Emission Micro-Cathods Based on Three-Demensional SOI-Structures/ Anatolij Druzhinin, Victor Holota, Igor Kogut, Sergij Sapon, Yuriy Khoverko// *ECS Transactions (The Electrochemical Society).* – 2008. – Vol. 14, № 1. – P. 569-580.

15. Polysilicon-on-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields/ Druzhinin A., I. Maryamova, I. Kogut, Yu. Pankov, Yu. Khoverko, T. Palewski // D. Flandre et al. (eds.), Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment. – Kluwer Academic Publishers. – 2005. – P. 297-302.
16. Peculiarities of Si-Ge whisker growing by CTR method/ A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, Ya.V. Gij // Functional materials.–2005. – Vol. 12, № 4.– P.738-741.
17. Властивості шарів полікремнію на ізоляторі при криогенних температурах і в сильних магнітних полях/ А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, Ю.М. Ховерко, С.М. Матвієнко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 2. – С. 241-246.
18. Дослідження низькотемпературних характеристик шарів полікремнію на ізоляторі для створення сенсорів теплових і механічних величин/ А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, І.Т. Когут, Ю.М. Ховерко.. // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2006. – № 2. – С. 10-15.
19. Сенсори фізичних величин на основі структур “кремній на ізоляторі” з рекристалізованим шаром полікремнію/ Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Когут І.Т., Ховерко Ю.М. // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.–2008.– №4.–С.17-26.
20. Приборно-технологическое моделирование автоэмиссионных кремниевых микрокатодов/ Дружинин А.А., Голота В.И., Когут И.Т., Сапон С.В., Ховерко Ю.М. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008 – № 5(77) – С. 43-49.
21. Шари полікремнію на ізоляторі як чутливі елементи сенсорів криогенних температур/ Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Ховерко Ю.М., Когут І.Т.// Фізика і хімія твердого тіла.–2009.–Т.10,№1.–С.236.-239.
22. Вирощування нано- та мікродротин кремнію методом CVD та можливість їх сенсорних застосувань/ Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Нічкало С.І. // Наук.-техн. збірник “Електроніка и связь”.– №2-3.–2009.–С.56-60.
23. Електронно-оптичне моделювання автоемісійних мікрокатодів/ Дружинін А.О., Голота В.І., Когут І.Т., Ховерко Ю.М. // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології . – 2009 – № 2 – С. 10–17.
24. Особливості створення нанорозмірних кристалів кремнію/ Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Нічкало С.І.// Фізика і хімія твердого тіла.– Т.10, №4.–2009.– с.777–780.
25. Моделювання кінетики росту нанорозмірних кристалів кремнію/ Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Нічкало С.І. // Нові технології. – 2010. – № 2 (28). – С.75–78.
26. Дослідження впливу електронного опромінення на ниткоподібні кристали Si, SiGe та шари полікремнію/ Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Кутраков О.П., Лях-Кагуй Н.С. // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2010. – Т. 1 (7), №3. – С. 45–54.

27. Ховерко Ю.М. Исследование стойкости слоев поликремния в КНИ-структурах при воздействии электронного облучения и сильного магнитного поля. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 5-6.– С. 38-42.
28. Yu.N.Khoverko. Polysilicon on Insulator Structures for Sensor Application at Harsh Conditions// Physics and Chemistry of Solid State. – V. 12, № 1. –2011. – p. 230-235
29. Influence of Dispersion of Polysilicon on Low-temperature Conductivity in SOI structures/ Druzhinin A.A., Kogut I.T., Khoverko Yu.M., Koretskii R.M. // Physics and Chemistry of Solid State.– 2011. – V.12 (3). – P. 753–756
30. Investigation of Ga-In contacts to Si, Ge and SiGe wires for sensor application/ Druzhinin A.A., Khoverko Yu.M., Ostrovskii I.P., Nichkalo S.I., Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Stich I.//Physics and Chemistry of Solid State.–2012.–Vol.1.– P.269–272.
31. Імпеданс-спектроскопія ниткоподібних кристалів кремнію/ Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Корецький Р.М. // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2012. – Т. 3 (9). – С. 50–55.
32. Нанокристаллы  $Si_{1-x}Ge_x$  в роли чувствительных элементов сенсора магнитного поля и температуры/ Дружинин А.А., Островский И.П., Ховерко Ю.Н., Ничкало С.И., Корецкий Р.Н. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Одесса. – 2012. – № 5. – С. 19–21.
33. Charge carrier transport of polysilicon in SOI structures at low temperatures/ A.A. Druzhinin, I.T. Kogut, Yu.N. Khoverko, A.N. Vuitsyk // Physics and Chemistry of Solid State.– 2013.– Vol. 3.– P.657–661.
34. Accelerometer sensing element based on nanostructured silicon/ Anatoly Druzhinin, Igor Kogut, Yuriy Khoverko, Victor Golota. // Computational Problems of Electrical Engineering.– vol. 3, №1.– 2013.– p. 13-18.
35. Микроэлектронные компоненты интегральных схем, работоспособные при криогенных температурах/ Дружинин А.А., Островский И.П., Ховерко Ю.Н., Корецкий Р.Н. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.– 2014.– № (5–6).– С.5–8.
36. Impedance of Si wires at metal-insulator transition/ A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.N. Khoverko, R.N. Koretskyu, S.I. Nichkalo // Physics and Chemistry of Solid State.– 2014.– Vol. 15, № 1.– P.81–84.
37. Патент № 62951 Україна, МПК H01L 27/00. Автоемісійний чутливий елемент акселерометра / Дружинін А.О., Когут І.Т., Голота В.І., Ховерко Ю.М.; Національний університет «Львівська політехніка» – № u201101326; Заявл. 07.02.2011; Опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. – 3 с.
38. Патент № 63926 Україна, МПК H01L 21/00, C30B 29/00. Спосіб одержання масивів нанокристалів кремнію / Дружинін А.О., Островський І.П., Нічкало С.І., Ховерко Ю.М.; Національний університет “Львівська політехніка” – № u 2011 03520; заявл. 24.03.2011, опублік. 25.10.2011, Бюл. № 20/2011.– 3 с.
39. Патент № 66137 Україна, МПК H01L 31/05. Спосіб одержання поверхневої функціональної нанотекстури / Дружинін А.О., Єрохов В.Ю., Островський І.П.,

- Ховерко Ю.М., Нічкало С.І.; Національний університет “Львівська політехніка” – № u 2011 06810; заявл. 30.05.2011, опублік. 26.12.2011, Бюл. № 24/2011.– 3 с.
40. *Патент* № 49691 Україна, МПК H01L 27/00. Тривимірний МОН-транзистор зі структурою «Кремній-на-ізоляторі» / Дружинін А.О., Когут І.Т., Голота В.І., Ховерко Ю.М.; Національний університет «Львівська політехніка» – № u200911082; Заявл. 02.11.2009; Опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9. – 3 с.
41. *Патент* № 22368 Україна, МПК G01K 7/00. Чутливий елемент мікроелектронного терморезистивного сенсора для вимірювання криогенних температур в сильних магнітних полях / Дружинін А.О., Мар’ямова І.Й., Когут І.Т., Ховерко Ю.М.; Національний університет “Львівська політехніка” – № u200611374; Заявл. 30.10.2006 Опубл. 25.04. 2007, Бюл. № 5. – 3 с.
42. *Патент* № 7677 Україна МПК H01L 27/00 Інвертор на основі структур кремній на ізоляторі. А.О. Дружинін, І.Т. Когут, В.А. Павлиш, Ю.М. Ховерко. Національний університет “Львівська політехніка”–№ 20040705781 від 14.07.2004. Опубл. 15.07.2005 Бюл. № 7. -3с.
43. *Патент* № 91062 Україна, МПК G01B 7/16. Сенсор тиску та температури / Дружинін А.О., Кутраков О.П., Вуйцик А.М., Ховерко Ю.М. Національний університет “Львівська політехніка” – № u 201313685; заявл. 25.11.2013, опублік. 25.06.2014, Бюл. № 12.– 5 с.
44. *Патент* № 87528 Україна, МПК H01L 23/14. Напівпровідниковий індуктивний елемент / Дружинін А.О., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Корецький Р.М.; Національний університет “Львівська політехніка” – № u 201310532; заявл. 30.08.2013, опублік. 10.02.2014, Бюл. № 3.– 3 с.
45. Polysilicon-on-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields/ A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, I.T. Kogut, Y.M. Pankov, Y.M. Khoverko, T. Palewski// Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment. NATO Advanced Research Workshop, Kyiv, Ukraine, 25-29 April 2004. Conference Abstracts, pp.91-92.
46. Peculiarities of Si-Ge whiskers growth by CTR method/ A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, Ya.V. Gij. // International Conference “Crystal Materials’2005”. Abstracts Book. – Kharkov, 2005. – P. 51.
47. Провідність легованих ниткоподібних кристалів кремнію та її аналіз в інтервалі температур 4,2–300 К/ Буджак Я.С., Дружинін А.О., Павловський І.В., Ховерко Ю.М. // Міжрегіональний науковий семінар “Сучасні проблеми електроніки”, 31 січня–1 лютого 2008 р., м. Львів. – С. 11-12.
48. Peculiarities of Si nanowires growth/ Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M., Nichkalo S.I. // Materials of International Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-2)”. – Uzhgorod, Ukraine. –2009. – P.58.
49. Microelectromechanical System Design Based on Si Nanowires/ Alla Klimovskaya, Ihor Ostrovskii, Yurii Khoverko, Stepan Nichkalo // Proceedings of the Xth International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics.–2009, 28-29 February, Svalyava.–pp.504-505.
50. Investigation of electron irradiation influence on properties of polycrystalline layers in

- SOI structures/ Druzhinin A.A., Kogut I.T., Khoverko Yu.M. // 8-th International Conference on Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials, May 17–22, 2010, Ivano-Frankivsk region, Ukraine. Book of Abstracts. – 2010. – P.115–116.
51. Polysilicon on insulator structures for sensors application at harsh conditions/ A.A. Druzhinin, I.T. Kogut, Yu.M. Khoverko // 6<sup>th</sup> International SemOI Conference (NATO) "Nanoscaled Semiconductor-on-Insulator Materials, Sensors and Devices", 26 – 30 April, 2010, Kyiv, Ukraine: Conference abstracts. – 2010. – P.44–45.
  52. Investigation of Ga-In contacts to Si and Ge wires for sensor application/ Druzhinin A.O., Khoverko Yu.M., Ostrovskii I.P., Nichkalo S.I., Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Stich I. // Materials of XIII International conference Physics and technology of thin films and nanosystems, 16-21 May, Ivano-Frankivsk.- 2011.- Vol. 1.- P.234.
  53. Лазерна рекристалізація як метод модифікації полікремнію в КНІ-структурах/ Дружинін А.О., Когут І.Т., Ховерко Ю.М. // Матеріали Всеукраїнської науково-техн. конф. «Лазерні технології. Лазери та їх застосування». – 2011. – С. 62–63.
  54. Вплив лазерної рекристалізації на властивості полікремнію в КНІ-структурах/ Дружинін А.О., Когут І.Т., Ховерко Ю.М., Вуйцик А.М. // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Лазерні технології. Лазери та їх застосування», Трускавець.– 2011. – С. 64–65.
  55. Si, Ge and SiGe wires for sensor application/ Druzhinin A.A., Khoverko Yu.M., Ostrovskii I.P., Nichkalo S.I., Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Stich I. // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International conference on “Microelectronics and computer science”, Chisinau, Moldova, September 22–24.–2011.–P. 59–62.
  56. Strain and Temperature Sensors on the Basis of Si Wires/ Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Kogut I., Nichkalo S., Koretsky R. // Proceedings of the XXXII International Conference ELNANO 2012, April 10–12, 2012, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2012. – P. 35.
  57. Polysilicon on Insulator Structures for Sensor Application Operating at Low Temperatures/ Anatoliy Druzhinin, Igor Kogut, Yuriy Khoverko, Roman Koretskii // Proceedings of the VIII<sup>th</sup> International Conference in MEMS Design, April 18–21, 2012, Polyana-Svalyava, Ukraine. – Polyana-Svalyava, 2012. – P. 102–104.
  58. Magneto-transport properties of polysilicon in SOI structures at low temperatures/ A.A. Druzhinin, I.T. Kogut, Y.N. Khoverko, R.N. Koretskii // Symposium of Nanostructured Materials “NANO 2013”, 21–22 May, 2013, Rzeszow, Poland. – 2013. – P.52–53.
  59. Formation of ordered Si nanowires arrays on Si substrate/ A. Druzhinin, A.A. Evtukh, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, S.I. Nichkalo // Symposium of Nanostructured Materials “NANO 2013”, 21–22 May, 2013, Rzeszow, Poland. – 2013. – P.53–54.
  60. Низькотемпературні характеристики полікристалічного кремнію в КНІ-структурах/ Дружинін А.О., Когут І.Т., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Перетятко В.М. // Тези доповідей VI-ї Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-6), 30 вересня – 4 жовтня, Чернівці, Україна. – 2013. – С. 345–346.
  61. Elements of integrated circuit for cryoelectronics/ Druzhinin A., Ostrovskii I., Kogut

- I., Khoverko Yu., Peretyatko V. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the XII-th International Conference TCSET '2014. February 25–March 1, 2014, Lviv-Slavske, Ukraine.– Lviv, 2014.– P. 301–303.
62. Impedance spectroscopy of Si wires/ Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretsky R., Adamchuk O. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the XII-th International Conference TCSET '2014. February 25–March 1, 2014, Lviv-Slavske, Ukraine.– Lviv, 2014.– P. 307–309.
63. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors/ A.A. Druzhinin, I.T. Kogut, Y.N. Khoverko, R.N. Koretskii // 2<sup>nd</sup> Ukrainian-French Seminar (NATO) “Semiconductor-On-Insulator Materials, Devices and Circuits: Physics, Technology and Diagnostics”, 2013, Kyiv, Ukraine.–2013.–P.40–41.

### АНОТАЦІЯ

**Ховерко Ю.М. Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю.** - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний університет «Львівська політехніка», МОН України, Львів, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми створення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі, та мікрокристалів кремнію, легованих домішками бору і нікелю.

Проведено комплексне дослідження електрофізичних властивостей структур кремній- на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію у широкому інтервалі температур на постійному та змінному струмах, що є передумовою розроблення фізичних основ створення мікроелектронних сенсорів на базі полікристалічного та ниткоподібного кремнію і встановлено, що за криогенних температур в околі температури рідкого гелію провідність змінюється стрибкоподібно по локалізованих домішкових рівнях.

Обґрунтовано фізичні моделі, які описують деформаційно-стимульовані та спін-поляризаційні ефекти в мікрокристалах кремнію та КНІ-структурах, що лягло в основу розроблення нових підходів щодо створення елементів сенсорної техніки і дозволять прогнозувати необхідні параметри в процесі їх виготовлення.

Запропоновано високочутливі сенсори деформації, температури, магнітного поля, що має важливе значення для сучасної кріоелектроніки, кріоенергетики, сенсорної мікро- та наноелектроніки, а також пристрої, що виготовлені за рахунок поєднання технологій отримання структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію шляхом розроблення нових підходів та конструктивно-технологічних методів до формування функціональних властивостей приладів.

Представлено чутливий елемент акселерометра, що дало можливість реалізувати як дискретний прилад, так і елемент зінтегрованих наноелектромеханічних систем зі структурою кремній-на-ізоляторі, який забезпечує

контроль переміщення з точністю 200 нм.

На основі комплексного використання мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі створено як дискретні елементи твердотільної електроніки (індуктивні, ємнісні елементи), так і комбіновані (коливальні контури), які реалізуються за суміщеними технологіями. Конструкція коливального контура передбачає комбінацію елементів, яка складається з ниткоподібного кристала кремнію із концентрацією легуючої домішки, що відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик та полікристалічного кремнію в КНІ-структурах.

**Ключові слова:** КНІ-структура, мікрокристал, кремній, деформація, криогенні температури, високоенергетичне опромінення, магнітоопір, імпеданс, сенсор.

## АННОТАЦІЯ

**Ховерко Ю.М. Разработка элементов сенсорной техники на основе структур кремний-на-изоляторе и микрокристаллов кремния, модифицированных примесями бора и никеля.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника. - Национальный университет «Львівська політехніка», МОН України, Львов, 2015.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы создания элементов сенсорной техники на основе структур кремний-на-изоляторе и микрокристаллов кремния, легированных примесями бора и никеля.

Проведено комплексное исследование электрофизических свойств структур кремний-на-изоляторе и микрокристаллов кремния в широком интервале температур на постоянном и переменном токах, что является предпосылкой разработки физических основ создания микроэлектронных сенсоров на базе поликристаллического и нитевидного кремния и установлено, что при криогенных температурах, возле температуры жидкого гелия проводимость, меняется скачкообразно по локализованным примесным уровням.

Обоснованно физические модели, описывающие деформационно-стимулированные и спин-поляризационные эффекты в микрокристаллах кремния и КНІ-структурах, что легло в основу разработки новых подходов по созданию элементов сенсорной техники и позволят прогнозировать необходимые параметры в процессе их изготовления.

Предложено высокочувствительные сенсоры деформации, температуры, магнитного поля, что имеет важное значение для современной криоэлектроники, криоэнергетики, сенсорной микро- и наноэлектроники, а также устройства, изготовленные за счет сочетания технологий получения структур кремний-на-изоляторе и микрокристаллов кремния путем разработки новых подходов и конструктивно-технологических методов к формированию функциональных свойств приборов.

Представлено чувствительный элемент акселерометра, что позволило реализовать как дискретный прибор, так и элемент интегрированных наноэлектромеханических систем со структурой кремний-на-изоляторе, который обеспечивает контроль перемещения с точностью 200 нм.



На основе комплексного использования микрокристаллов кремния и структур кремний-на изоляторе созданы как дискретные элементы твердотельной электроники (индуктивные, емкостные элементы), так и комбинированные (колебательные контуры), которые реализуются по совмещенным технологиям. Конструкция колебательного контура предусматривает комбинацию элементов, которая состоит из нитевидного кристалла кремния с концентрацией легирующей примеси, что соответствует диэлектрической стороне перехода металл-диэлектрик и поликристаллического кремния в КНИ-структурах.

**Ключевые слова:** КНИ-структура, микрокристалл, кремний, деформация, криогенные температуры, высокоэнергетическое облучения, магнитосопротивление, импеданс, сенсор.

### ABSTRACT

**Khoverko Yu.N. Development of elements of sensing equipment on the basis of silicon-on-insulator structures and silicon microcrystals, modified by boron and nickel impurities.** – On the rights of the manuscript.

Thesis for a doctoral degree in technical sciences by specialty 05.27.01 – solid state electronics. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to the solution of scientific and applied problems of development of elements of sensing equipment on the basis of silicon-on-insulator structures and silicon microcrystals doped with boron and nickel impurities.

A comprehensive study of electrical properties of silicon-on-insulator structures and silicon microcrystals in a wide temperature range at direct and alternating currents, which is a prerequisite for the development of physical foundations of microelectronic sensors based on polycrystalline and needle-like silicon was conducted, and it was established that at cryogenic temperatures in the vicinity of helium ones, the conductivity changes abruptly over localized impurity levels. The study of the properties of poly-silicon layers in SOI structures by impedance analysis method (AC measurements) allowed for determining the effect of material dispersion on its low-temperature conductivity and for separating and identifying the contributions of various microstructure elements in the sample conductivity. In both the DC and AC cases the Mott law hopping conductivity in non-recrystallized poly-Si samples has been confirmed at low temperatures (4.2 – 30 K). A capacitive type of Nyquist plot in turn supported this assumption. In laser-recrystallized poly-Si layers the charge carrier transport is limited by grain barriers and corresponds rather to percolation type of conduction, obeying the Shklovskii-Efros law

The physical models were proposed to describe the strain-induced and spin polarization effects in silicon microcrystals and SOI structures, which formed the basis for the development of new approaches to the fabrication of elements of sensing equipment, and will allow to predict the required parameters in a manufacturing process. The results of low-temperature studies of magnetization of silicon nanocrystals doped with boron and nickel impurities showed that at liquid helium temperatures the crystal conductance changes abruptly due to localization of impurity levels. The magnetic properties of crystals, the concentration of which corresponds to a dielectric and metal side of metal-

insulator transition, subject to the percolation laws of the formation of magnetic clusters, that in turn is important for the development of devices that can be used in spintronics.

A highly sensitive strain, temperature, magnetic field sensors were proposed, which are important for modern cryoelectronics, cryoelectronic storage, sensor micro- and nanoelectronics, as well as for the devices made by combining the techniques of silicon-on-insulator structures and silicon microcrystals fabrication through the development of new approaches and structural and technological methods for the formation of functional properties of devices.

The developed sensing element of accelerometer made it possible to implement as a discrete device or an element of integrated nanoelectromechanical system based on silicon-on-insulator structure, which provides the displacement with precision of 200 nm.

Based on the multipurpose use of silicon microcrystals and silicon-on-insulator structures, the discrete solid state elements (inductive, capacitive elements) and combined elements (oscillatory circuits) implemented by positioning technologies were developed. The design of the oscillatory circuit provides a combination of elements consisting of silicon whisker with a dopant concentration corresponding to the dielectric side of metal-insulator transition and polycrystalline silicon in SOI structures.

**Keywords:** SOI-structure, microcrystal, silicon, strain, cryogenic temperatures, high-energy irradiation, magnetoresistance, impedance, sensor.