

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації *Кукурудзяка Миколи Степановича* «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ -структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

в галузі знань 10 - Природничі науки

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт Університету.

Дослідження матеріалів, конструкцій фотоперетворювачів та їх властивостей проводяться на кафедрі електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича останні 30 років. Вони присвячені як класичній кремнієвій фотовольтаїці, так і пошуку нових матеріалів. Широкий спектр наукових досліджень реалізується сумісно із ЦКБ «Ритм» у рамках діючих угод про співпрацю.

Актуальність дослідження фотоелектричних властивостей кремнієвих високоомних n^+p-p^+ -структур та $p-i-n$ фотодіодів на їх основі полягає у широкому застосуванні таких фотоприймачів у сучасних технологіях, де важлива висока чутливість, швидкість відгуку та ефективність перетворення світлових сигналів в електричні. Оскільки $p-i-n$ фотоприймачі є основою для багатьох фотонних та оптичних пристроїв, таких як оптичні комунікаційні системи, сенсори і датчики, точне розуміння та вдосконалення їх фотоелектричних властивостей дозволяє значно поліпшити характеристики таких технологій.

Завдяки своїй структурі, що включає p -тип і n -тип напівпровідникових матеріалів, між якими знаходиться високоомний i -шар, $p-i-n$ фотодіоди здатні працювати з високою ефективністю при широкому

спектрі хвиль, що робить їх незамінними для різноманітних оптичних і фотонних технологій. Завдяки своїй технологічності та поширеності інтеграція кремнію в *p-i-n* структуру відкриває можливості для створення високопродуктивних фотоприймачів, що здатні ефективно працювати у широкому спектрі хвиль, зокрема в видимому та інфрачервоному діапазоні, що є важливим для багатьох сучасних технологій.

Кремнієві *p-i-n* фотодіоди мають низький рівень шуму та високу чутливість, що робить їх ідеальними для використання в приладах телекомунікацій, де вони використовуються для прийому сигналів у волоконно-оптичних системах, у медицині для створення систем діагностики, таких як оптичні сенсори та фототерапевтичні апарати, а також у науці та техніці для дослідження властивостей матеріалів та фізичних процесів.

Завдяки високій стабільності та сумісності з іншими кремнієвими компонентами, ці фотоприймачі можуть бути інтегровані в комплексні системи, такі як мікросхеми та сенсори, що є важливим для розвитку мікроелектроніки та фотоніки.

Ще однією перевагою кремнієвих *p-i-n* фотоприймачів є їх здатність до масштабування і використання в інтегрованих фотонних пристроях. Вони дозволяють створювати мініатюрні, але ефективні фотодетектори для різноманітних застосувань, зокрема в автоматизації та робототехніці.

Дослідження фотоелектричних властивостей кремнієвих n^+p-p^+ -структур та фотоприймачів на їх основі є важливим кроком у розвитку технологій, які забезпечують високоточне вимірювання світлових сигналів і реалізацію новітніх наукових досягнень у сфері оптики та фотоніки. Розробка та виготовлення кремнієвих *p-i-n* фотоприймачів є надзвичайно актуальним напрямом у науці та техніці, так як вони забезпечують баланс між високою продуктивністю, низькими витратами на виробництво та здатністю інтегруватися в існуючі мікроелектронні системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Робота виконана на ЦКБ «Ритм» (виготовлення зразків, попереднє тестування їх параметрів) та кафедрі електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (дослідження оптичних, електричних та фотоелектричних властивостей об'єктів дисертаційної роботи). Вона є складовою частиною науково-дослідних робіт, що виконуються в ННІФТКН:

«Статичні та кінетичні явища у макро- і нанооб'єктах зі спіновими переходами та металополімерних системах, динаміка квазічастинок у низьковимірних кристалічних структурах» (номер Держреєстрації 0122U001981) (кафедра професійної та технологічної освіти і загальної фізики);

«Розробка на основі напівпровідникових кристалів та тонких плівок приладів електроніки та фотовольтаїки» (номер Держреєстрації 0121U111110) (кафедра електроніки і енергетики);

«Раціональне проектування четвертинних детекторних матеріалів для пристроїв дистанційної роботи в умовах значного радіаційного випромінювання» (державний реєстраційний номер: 0125U000832).

Метою роботи було вдосконалення існуючих та розробка нових конструкцій фотодіодів на основі сучасних фізичних уявлень про фотоелектричні явища та процеси струмопереносу у кремнієвих планарних $n^+ - p - p^+$ -структурах.

Методи дослідження

Під час проведення експериментів використано методи досліджень: скануюча електронна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, металографічний аналіз, вимірювання спектрів пропускання та відбивання, вимірювання поверхневого опору легованих шарів, вимірювання вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик, експериментальне визначення спектральних характеристик чутливості, вимірювання глибини залягання

дифузійного шару, визначення товщини оксидних і металевих плівок, вимірювання опору ізоляції між чутливими елементами, вимірювання імпульсної чутливості та чутливості на модульованому потоці, вимірювання коефіцієнта фотоелектричного зв'язку, встановлення часу життя неосновних носіїв заряду, вимірювання питомого опору, селективне травлення підкладок.

Предметом дослідження є транспортні, фотоелектричні, оптичні явища у фотодіодних структурах на основі кремнію.

Об'єктом дослідження є фотоелектричні, оптичні та структурні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур та параметри $p-i-n$ фотодіодів створених на їх основі.

2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі наукові завдання:

1. Встановити вплив характеристик базового матеріалу та концентрації легованих фосфору і бору в n^+ - та p^+ -шарах відповідно на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур і фотоприймачів на їх основі та з'ясувати оптимальні режими дифузійного легування та геттерування фосфором та бором для отримання мінімальних темнових струмів та максимальної чутливості;

2. Розробити неруйнівний метод визначення кінцевого питомого опору та дифузійної довжини неосновних носіїв заряду базового кремнію;

3. Обґрунтувати вплив кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри $p-i-n$ фотодіодів та розробити методи зниження густини поверхневих структурних дефектів на поверхні кремнієвих підкладок;

4. З'ясувати методи підвищення коефіцієнта збирання носіїв заряду та чутливості фотодіодів та застосувати отримані закономірності до виготовлення високочутливих кремнієвих меза-фотодіодів;

5. Удосконалити методи ізолювання чутливих елементів квадрантних *p-i-n* фотодіодів;

6. Розробити та виготовити багатоелементні фотоприймачі із підвищеним опором ізоляції між активними елементами.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

У дисертаційній роботі досліджено фотоелектричні властивості кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структур, та фізико-технічні особливості виготовлення на їх основі високочутливих фотоприймачів – *p-i-n* фотодіодів для детектування електромагнітного випромінювання видимої та ближньої ІЧ області спектру.

Під час досліджень отримано нові важливі результати:

1. Фотодіоди, виготовлені на основі кремнію з більшим питомим опором, більш схильні до утворення інверсійних каналів на межі розділу оксид-напівпровідник. Це викликано тим, що зміну поверхневого типу провідності підкладки матеріалу з більшим питомим опором спричинює менша кількість неконтрольованих домішок. Зразки з більшим питомим опором базового матеріалу мають менший ізоляційний опір між чутливими елементами, оскільки цей параметр залежить від густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ та наявності інверсійних шарів, які в свою чергу залежать від технології утворення SiO₂.

2. При збільшенні концентрації фосфору (зменшенні поверхневого опору R_S) в n^+ -шарі спостерігається зниження темнових струмів фоточутливих елементів внаслідок збільшення ефективності геттерування генераційно-рекомбінаційних центрів (при $R_S \approx 8,1$ Ом/□ $I_m = 350-700$ нА, при $R_S \approx 1,9-2,4$ Ом/□ $I_m = 25-30$ нА ($U_{zm} = -120$ В)).

3. Легування бором тилової сторони підкладки фотоприймача значно поліпшує його параметри. Встановлено, що p^+ -шар виконує функцію не лише кращого омичного контакту, а і додаткову функцію геттеру дефектів кристалічної ґратки. Про це свідчить зниження темнових струмів фотодіодів після дифузії бору на порядок. Під час операції дифузії бору n^+ -шар також функціонує як геттер.

4. Хіміко-динамічне полірування тилової сторони підкладок перед дифузією бору зменшує темнові струми фотоприймачів і покращує кінцеві електрофізичні характеристики кремнію, зокрема, питомий опір i -області та довжину дифузії неосновних носіїв заряду внаслідок видалення неконтрольованих домішок із товщі кремнію зі зворотної сторони (близько 10-20 мкм), які є рекомбінаційними центрами та можуть дифундувати на більшу глибину під час тривалої останньої термічної операції ($I_m=300-350$ нА в фотодіодів з хіміко-динамічним поліруванням тилової сторони, $I_m=550-650$ нА в фотодіодів без хіміко-динамічного полірування тилової сторони перед дифузією бору).

5. Фотодіоди, виготовлені без p^+ -шару, характеризуються електричним пробом p - n переходу в діапазоні зворотних напруг 230-260 В, що значно підвищує їх чутливість і фотострум ($S_{\text{имп.}} \geq 0,7$ А/Вт). Такі структури можна рекомендувати для створення лавинних фотодіодів. Можливою причиною пробою є досягнення областю просторового заряду дефектної тилової сторони підкладки, де в свою чергу ці дефекти можуть бути джерелами носіїв заряду.

6. Для отримання максимальної фоточутливості p - i - n фотодіодів необхідно, щоби падаюче випромінювання поглиналося в високоомній i -області. Для збільшення кількості випромінювання, яке братиме участь у фотогенерації носіїв заряду, слід забезпечити високе пропускання n^+ - та p^+ -областей. Оптимальними значеннями поверхневого опору після дифузії фосфору та бору, які забезпечують належний рівень геттерування та високе

пропускання n^+ - та p^+ - шарів є $R_S \approx 2,7-3$ Ом/□, та $R_S \approx 16-18$ Ом/□ відповідно. Такі значення поверхневого опору дозволяють отримувати фотодіоди з удосконаленими параметрами: значення темного струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{im} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В.

7. Виготовлено та досліджено кремнієві фотодіоди для ближньої ІЧ області з послабленим впливом короткохвильового фонового випромінювання на рівень корисного сигналу. Мінімізація шумів оптичного походження була реалізована за допомогою запропонованого абсорбційного кремнієвого світлофільтра. При формуванні протилежного покриття на поверхні фільтра можна отримати коефіцієнт відбиття 5-7 відсотків. При збільшенні товщини фільтра коефіцієнт пропускання зменшується через зменшення інтенсивності випромінювання при поширенні в поглинаючому середовищі. При зменшенні товщини фільтра (збільшенні коефіцієнта пропускання) його край поглинання зміщується в бік коротших довжин хвиль. Фільтр товщиною $d=70$ мкм пропускає випромінювання із $\lambda \geq 800-820$ нм, а при $d=430$ мкм - $\lambda \geq 940-960$ нм. Використання оптичних концентраторів дозволяє нівелювати втрати інтенсивності випромінювання при використанні світлофільтрів.

8. Отримано фотодіоди зі збільшеним коефіцієнтом збирання неосновних носіїв заряду та підвищеною чутливістю. Встановлено, що зменшення товщини кристала з 500 мкм до 300 мкм дозволяє підвищити чутливість фотодіодів на 25% при зворотній напрузі $U_{zm} = -2$ В. Зменшення товщини кристала негативно впливає на його механічну міцність, але це нівелюється утворенням ребер жорсткості на зворотному боці кристала. Фотодіоди зі зменшеною товщиною підкладки мають нижчі значення темнових струмів, проте поступаються за ємністю чутливих елементів.

9. Виготовлено та досліджено кремнієві $p-i-n$ меза-фотодіоди. Запропоновано використовувати метод хіміко-динамічного полірування із

маскувальним шаром золота з адгезійним шаром хрому для утворення меза-профілю. Технологія меза-фотодіодів дозволяє виключити перше високотемпературне окислення з технологічного циклу, що сприяє зниженню густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂, і мінімізує погіршення електрофізичних характеристик кремнію. Виключення операції першого термічного окислення в меза-фотодіодах дозволяє отримати зразки із чутливістю $S_{imn}=0,5-0,53$ А/Вт порівняно із $S_{imn}=0,45-0,48$ А/Вт у серійних.

10. Запропоновано метод підвищення опору ізоляції фоточутливих елементів й охоронного кільця кремнієвих чотириквadrантних фотодіодів шляхом розриву інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. У разі відсутності збільшення опору ізоляції після цих маніпуляцій пропонується формувати меза-профіль шляхом травлення кремнію в проміжках між активними елементами на глибину до 10 мкм. При застосуванні запропонованих методів до фотодіодів із високим опором ізоляції отримано такі результати: темнові струми фоточутливих елементів зменшилися майже вдвічі; темнові струми ОК при $U_{зм}=-2$ В – в 40-60 разів, а при $U_{зм}=-120$ В – майже в 200 разів; тоді як $\sum R_{зв}$ збільшився приблизно в 300 разів після процесу травлення. Метод також зменшує коефіцієнт фотозв'язку.

Дисертант брав безпосередню участь у всіх етапах дослідження нових задач, самостійно розробляв методики експериментів і конструкції приладів та структур. Провів детальний аналіз отриманих результатів і сформулював висновки для кожного розділу дисертації.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

У процесі підготовки дисертації Кукурудзяк М. С. провів ґрунтовний аналіз значного обсягу фахової літератури. До опрацьованих матеріалів

увійшли статті, опубліковані у високорейтингових журналах, а також наукові монографії, перелік яких наведено у списку використаних джерел.

Достовірність отриманих результатів обґрунтовується кореляцією розрахункових даних із отриманими за допомогою експериментів. Додаткове підтвердження забезпечує їх узгодженість із результатами інших дослідників.

Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, перелік умовних позначень, вступ, три розділи, основні висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Дисертаційна робота є самостійною науковою працею. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують, зокрема, наукову новизну дослідження, сформовані автором дисертації.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача та рівень його обізнаності з результатами наукових досліджень інших науковців високий. Це видно як з великої кількості наукових джерел, використаних для огляду, так і з опублікованих робіт та доповідей матеріалів дисертації.

6. Наукове та практичне значення роботи.

Дисертаційна робота має важливе наукове та практичне значення, оскільки вона розширює уявлення про фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі.

У роботі **вперше:**

1. Досліджено вплив поверхневого опору (концентрації) легованих у n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором відповідно на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур і фотоприймачів на їх основі. Встановлено, що значення поверхневих опорів $R_S=2,7-3 \text{ Ом}/\square$ та $R_S=16-20 \text{ Ом}/\square$ n^+ - та p^+ -шарів відповідно є оптимальними. Зменшення концентрації домішки (збільшення R_S) у легованих шарах знижує ступінь геттерування генераційно-рекомбінаційних центрів, що, відповідно,

погіршує параметри виробів. Збільшення концентрації домішки призводить до дефектоутворень, внаслідок утворення механічних напружень та їх релаксації, а також призводить до зменшення коефіцієнта пропускання випромінювання робочої довжини хвилі.

2. Досліджено вплив глибини n^+ - p -переходу на спектральну характеристику чутливості p - i - n фотодіодів. Встановлено, що збільшення глибини залягання дифузійного шару фосфору зміщує короткохвильовий край спектральної характеристики фотодіода в сторону більших довжин хвиль. При $x_{n+p} = 4-4,2$ мкм короткохвильовий край спектральної характеристики сягає $\lambda \approx 400$ нм, а при $x_{n+p} = 5,8-6$ мкм - $\lambda \approx 700$ нм. Це явище можна використовувати для зменшення впливу короткохвильового фонового випромінювання на корисний сигнал фотодіода, та викликане поглинанням короткохвильового випромінювання легованим шаром.

3. Проведено порівняльну характеристику легування фосфором із планарних твердотільних джерел та рідинно-фазного дифузанта PCl_3 в технології виготовлення p - i - n фотодіодів. Встановлено, що легування за допомогою рідинно-фазного дифузанта провокує значне дефектоутворення на поверхні підкладок, що негативно впливає на фотоелектричні характеристики виготовлюваних фотоприймачів. Причиною дефектоутворення є розміщення значної кількості легованих атомів у міжвузлях кристалічної решітки кремнію, які вносять додаткові механічні напруження розширення, та викликають утворення дислокацій, внаслідок релаксації цих напружень.

4. Виявлено явище міграції дислокацій по поверхні Si-SiO_2 -структур із інверсійними шарами. Це явище можна використовувати як метод зниження густини структурних дефектів на поверхні чутливих елементів кремнієвих фотоприймачів. При використанні цього методу вдається знизити поверхневу густину дислокацій з $N_{\text{дис.}} \approx 4-6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ до $N_{\text{дис.}} \approx 2-4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

5. Запропоновано метод підвищення опору ізоляції чутливих елементів й охоронного кільця кремнієвих чотириквadrантних фотодіодів шляхом розриву поверхневих інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. Метод дозволяє збільшити опір ізоляції активних елементів з 3-45 кОм до 10-20 МОм.

Також у роботі досягло подальшого розвитку розуміння впливу ростових та набутих, поверхневих та об'ємних кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри кремнієвих n^+p-p^+ - структур та $p-i-n$ фотодіодів на їх основі. Встановлено, що дефекти, які перетинають високоомну i -область фотоприймачів можуть провокувати погіршення їх параметрів, проте дефекти, розміщені в легованих n^+ -зонах впливають на деградацію параметрів мінімально. Дислокації, які перетинають області зазорів між активними елементами, можуть знижувати опір ізоляції та коефіцієнт фотоелектричного зв'язку останніх.

Результати досліджень, проведених у рамках дисертаційної роботи мають велике практичне значення для виготовлення надійних високочутливих фотоприймачів на основі високоомних кремнієвих n^+p-p^+ -структур. Результати дисертації застосовані та впроваджені в Центральному конструкторському бюро «Ритм» при виготовленні таких ФД: ФД-14М, ФД-15М, ФД-15М-01, ФД 29, ФД-255, ФД-31СФ.

1. Впроваджено технологічні режими дифузії фосфору та бору з планарних твердотільних джерел, які дозволяють отримувати фотодіоди з покращеними параметрами: значення темного струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{im} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В. (Патент на корисну модель № 149890).

2. Досліджено вплив товщини адгезійного підшару хрому з тилової сторони підкладки на коефіцієнт збирання носіїв заряду та

чутливість фотодіодів. Встановлено, що товщина адгезійного шару 10-12 нм забезпечує мінімальне поглинання випромінювання ($T=4\%$ при $\lambda=1,05$ мкм) та забезпечує мінімальний спад чутливості без втрат адгезійних властивостей золота. Зменшення товщини шару хрому призводить до зниження його коефіцієнта пропускання.

3. Запропоновано метод зниження густини поверхневих структурних дефектів шляхом проведення операції хіміко-динамічного полірування в зонах чутливих елементів після термічного окислення. Метод дозволяє ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. При використанні методу вдається знизити поверхневу густину дислокацій з $N_{disc.} \approx 4-6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ до $N_{disc.} \approx 0,5-2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$. Проведення хіміко-динамічного полірування з використанням маскування за допомогою SiO_2 формує структуровану поверхню, яка геттерує генераційно-рекомбінаційні центри в об'ємі кристалу фотодіода та зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання від поверхні фотодіода. Описане дозволяє отримати фотоприймачі із покращеними фотоелектричними властивостями внаслідок зменшення густини структурних дефектів та введення додаткового механізму геттерування структурованою поверхнею.

4. Запропоновано та впроваджено використання кремнієвих адгезійних відрізаючих світлофільтрів, які дозволяють виключити вплив фонового короткохвильового випромінювання із $\lambda \leq 850$ нм на корисний сигнал фотодіода. Розроблено конструкцію світлофільтра, який забезпечує коефіцієнт пропускання випромінювання робочої довжини хвилі $T \geq 70\%$ (Патент на корисну модель № 151697).

5. Запропоновано та виготовлено кремнієвий *p-i-n* фотодіод з меза-структурою, який дозволяє нівелювати зменшення часу життя неосновних носіїв заряду та питомого опору базового матеріалу за рахунок виключення високотемпературної операції пасивації. Зниження кількості

термічних операцій дозволяє отримати фотодіоди із підвищеною чутливістю ($S_{imm}=0,53$ А/Вт). Виготовлення фотодіодів за меза-технологією також знижує їх вартість порівняно із виробами, виготовленими за класичною планарною технологією (Патент на корисну модель № 151696).

6. Розроблено ряд методів збільшення опору ізоляції чутливих елементів багатоелементних фотодіодів, які базуються на розриві інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂ шляхом травлення оксидної плівки чи поверхневого шару кремнію, або утворення областей обмеження каналів витоку ізотипних із матеріалом підкладки (p^+ -типу) в зазорах між чутливими елементами. Запропоновано проводити дифузію бору для утворення p^+ -шарів між активними елементами одночасно з утворенням омічного шару на тилевій стороні підкладки, що виключає потребу введення в технологічний маршрут додаткових термічних операцій та дозволяє знизити міру деградації електрофізичних характеристик кремнію під час термообробок. Запропоновані методи дозволяють виготовляти квадрантні фотодіоди із міжквадрантним опором ≥ 20 МОм (Патент на корисну модель № 149108).

7. Запропоновано неруйнівний метод визначення кінцевого питомого опору базового матеріалу n^+p-p^+ - структур, який добре корелює із методом визначення на основі ефекту Холла. Метод базується на визначення напруги зворотного зміщення, при якій ширина ОПЗ набуває максимального значення.

7. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувачки в публікації.

Особистий внесок здобувача у вирішенні конкретного наукового завдання є значним. Зокрема:

- дисертант активно долучався до обговорення постановки задачі, формулювання мети дослідження, вибору методів аналізу, а також до підготовки матеріалів для публікації у наукових журналах. Крім того,

отримані результати у вигляді доповідей були представлені на наукових конференціях;

- проводив дифузійно-окислювальні високотемпературні процеси, виготовляв структури та прилади;

- виконував моделювання та розрахунки кінцевих параметрів фотоприймачів, а також оцінку кінцевих електрофізичних характеристик базового кремнію;

- дослідив вплив електрофізичних характеристик кремнію на кінцеві параметри фотодіодів, а також вплив легування n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором відповідно на фотоелектричні параметри n^+p-p^+ -структур;

- розробив перспективні структури кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів із покращеними фотоелектричними параметрами, зокрема підвищеною чутливістю, зниженим темновим струмом та підвищеним опором ізоляції між активними елементами фотоприймачів;

дослідив генезис кристалографічних дефектів на поверхні та в об'ємі $p-i-n$ фотодіодів, їх вплив на параметри приладів та запропонував нові методи зменшення густини дефектів.

Результати перевірки тексту дисертації з використанням антиплагіатної системи Strike Plagiarism показав на 4% схожості з джерелами з Інтернету. Робота відповідає принципам академічної доброчесності.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи викладені у 18 наукових публікаціях (4 статті у виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus і 14 статей у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus). Апробація основних результатів роботи здійснювалася шляхом доповідей на 15 наукових конференціях та публікацією 9 тез

доповідей. Дві статті опубліковані у виданнях, віднесених до другого квартиля (Q2), шість – до третього квартиля (Q3).

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1 – 01023-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023)
2. Kukurudziak M. S. Formation of dislocations during phosphorus doping in the technology of silicon p-i-n photodiodes and their influence on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04015-1 – 04015-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015)
3. Kukurudziak M. S. Diffusion of phosphorus in technology for manufacturing silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 4. P. 385-393. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.04.385>
4. Kukurudziak M. S. Influence of surface resistance of silicon p-i-n photodiodes n^+ -layer on their electrical parameters. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 756-763. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763>
5. Kukurudziak M. S. Problems of Masking and Anti-Reflective SiO₂ in Silicon Technology. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 2. P. 289-295. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-33>
6. Kukurudziak M. S. Isolation of Responsive Elements of Planar Multi-Element Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 3. P. 434-440. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-48>
7. Кукурудзяк М. С. Дослідження морфології макропористого Si, одержаного металом стимульованим щавленням за допомогою Au. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, №. 3. С. 605-616. <https://doi.org/10.15407/nnn.21.03.605>
8. Kukurudziak M. S., & Lipka V. M. Influence of silicon characteristics on the parameters of manufactured photonics cells. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 4. P. 197-205. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-24> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М.: обговорення результатів).
9. Kukurudziak M. S. The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 603-609. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.603-609>
10. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Study of the Charge Carrier Collection Coefficient of Silicon p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-39> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, розрахунки, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В. : вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів).
11. Kukurudziak M. S. Effect of Structural Defects on Parameters of Silicon Four-Quadrant p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 345-352. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-41>
12. Kukurudziak M. S., Lipka, V. M., & Ryukhtin, V. V. Silicon p-i-n Mesa-Photodiode Technology. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 3 P. 385-389. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-47> (Особистий внесок автора: виготовлення

зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М. та Рюхтін В. В.: обговорення результатів).

13. Kukurudziak M. S., Mastruk E. V., & Koziarskyi I. P. Influence of Boron Diffusion on Photovoltaic Parameters of n⁺-p-p⁺ Silicone Structures and Based Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 4. P. 289-296. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів; Козярський І. П.: вимірювання фотоелектричних параметрів).

14. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Methods of Correction of Spectral Characteristics of Silicon Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 1. P. 290-294. <https://doi.org/290-294>. [10.26565/2312-4334-2025-1-34](https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-1-34) (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Рюхтін В. В.: обговорення результатів).

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus*:

15. Kukurudziak M. S., & Mastruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021, December. Vol. 12126. P. 511-518. <https://doi.org/10.1117/12.2616170> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті, доповідь; Майструк Е. В.: обговорення результатів, вимірювання спектрів пропускання зразків з різною товщиною хрому).

16. Kukurudziak M. S., & Mastruk E. V. High-responsivity silicon p-i-n mesa-photodiode. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acdf14> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: обговорення результатів).

17. Kukurudziak M. S. A method of increasing the interquadrant resistance of four-quadrant p-i-n photodiodes. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, No. 9, P. P09006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/P09006>

18. Kukurudziak M. S., Mastruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/adbd4d> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду, обговорення результатів; Яцків Р.: СЕМ; Козярський І. П. та Козярський Д. П.: вимірювання спектрів пропускання).

Патенти на корисну модель:

19. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення р-і-п фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149890 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № u 202100503; заявл. 08.02.2021; опубл. 15.02.2021, Бюл. №50. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М., Рюхтін В.В. та Федінчук І.І.: аналіз та обговорення результатів).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=279707>

20. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення р-і-п фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149108 Україна: МПК

(2021.01) H01L 31/00, № u 202101103; заявл. 05.03.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. №42. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М.: обговорення результатів, Шимановський О.Б.: розробка конструкції фотодіода).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278625>

21. Кукурудзяк М.С., Шимановський О.Б., Ліпка В.М. Спосіб виготовлення кристала кремнієвого *p-i-n* фотодіода з мезаструктурою: Пат. 151696 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № u 202107811; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М. та Шимановський О.Б.: обговорення результатів та конструкції кристалу).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282779>

22. Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Перепелиця О.О., Сидор О.М., Кукурудзяк М.С. Кремнієвий *p-i-n* фотодіод із відрізаючим оптичним фільтром: Пат. 151697 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № u 202107818; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. (Особистий внесок автора: вимірювання оптичних та фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М. та Рюхтін В.В.: обговорення результатів, Перепелиця О.О. та Сидор О.М.: виготовлення зразків).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282775>

8. Апробація матеріалів дисертації здійснювалася на таких конференціях:

1. The 15th International Conference on Correlation Optics, «Correlation Optics'17», 13 - 16 September 2021, Chernivtsi, Ukraine (SPIE); (заочна участь)

2. The 3rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 3-7 October 2022, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)

3. The 4rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 2-6 October 2023, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)

4. The 5rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 7-11 October 2024, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)

5. The 13th International Conference on Electronics and Information Technologies «ELIT», 26-28 September 2023, Lviv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)

6. The 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology «ELNANO», 13-16 May 2024, Kyiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)

7. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2023», 29–31 травня 2021 р., Київ, Україна; (заочна участь)

8. VII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2022), 23–25 листопада 2022 р, Дніпро, Україна; (заочна участь)

9. VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ), 14-16 травня 2022 р., Кременчук, Україна; (заочна участь)

10. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2023), 22–24 листопада 2023 р, Дніпро, Україна; (заочна участь)

11. IX Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2024), 27–29 листопада 2024 р, Дніпро, Україна; (заочна участь)

12. The 51th Jaszowiec International School and Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023», 17 – 23 June 2023, Szczyrk, Poland; (онлайн доповідь)

13. IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-9», 22-26 травня 2023р. Ужгород, Україна; (заочна участь)

14. XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (СИЕТ-2023), 29-31 травня 2023р. Одеса, Україна; (заочна участь)

15. XXXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2023), 17-20 травня 2023р. Харків, Україна. (онлайн доповідь)

9. Оцінка мови і стилю дисертації.

Мова і стиль дисертації відповідають вимогам, що висуваються до праць такого рівня.

10. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

Зміст дисертації відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації, встановленим освітньо-науковою програмою «Фізика та астрономія» галузі знань 10 - Природничі науки, спеціальності 104 - Фізика та астрономія.

11. Дотримання нормативних вимог щодо оформлення дисертації. Нормативні вимоги щодо оформлення дисертації дотримані повністю.

12. Рекомендації дисертації до захисту.

Дисертаційна робота Кукурудзяка Миколи Степановича «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі», подана на здобуття доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблеми, практичним значенням отриманих результатів відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ №507 від 03.05.2024 р.).

За результатами публічної презентації результатів дисертації та їх обговорення на відкритому фаховому семінарі кафедри професійної та технологічної освіти і загальної фізики навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича 18 вересня 2025 року дисертацію Кукурудзяка Миколи Степановича рекомендовано до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.

Голова засідання,
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри професійної та технологічної
освіти і загальної фізики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Юрій ГУДИМА

