

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Кукурудзяка Миколи Степановича

*«Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних  $n^+ - p - p^+$  - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі»*, поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### **Актуальність дисертаційного дослідження та зв'язок з науковими планами і програмами**

Сучасна фотоелектроніка, сенсорні системи та оптоелектронні прилади потребують фотоприймачів, які поєднують високу чутливість, швидкодію та стабільність параметрів із мінімальними витратами на їх виготовлення. Кремнієві планарні  $n^+ - p - p^+$ -структури залишаються базовими елементами таких пристроїв завдяки технологічній сумісності з кремнієвою мікроелектронікою, низькому рівню шумів та довготривалій стабільності характеристик у широкому діапазоні умов експлуатації.

Подальше вдосконалення цих структур вимагає глибшого аналізу фотоелектричних процесів, які визначають їх роботу, зокрема механізмів генерації, дифузії та рекомбінації носіїв заряду у високоомних областях, а також впливу поверхневих і об'ємних дефектів на параметри фотодіодів (ФД).

Особливе значення мають також фізико-технічні аспекти формування  $p-i-n$  фотодіодів на основі  $n^+ - p - p^+$ -структур: оптимізація процесів легування та дифузії, створення ефективних пасивувальних і просвітлюючих шарів, а також зменшення густини кристалографічних дефектів. Реалізація таких технологічних рішень дозволяє підвищити фоточутливість, опір ізоляції та зменшити рівень темнових струмів.

Враховуючи широке використання кремнієвих фотодіодів у космічних, медичних, лазерних і комунікаційних системах, дослідження

фотоелектричних властивостей кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур і вдосконалення технології виготовлення фотодіодів на їх основі є науково та практично актуальним завданням сучасної фотоелектроніки.

Дисертаційна робота Кукурудзяка Миколи Степановича присвячена розробці практичних рекомендацій для розробки нових та вдосконалення існуючих кремнієвих фотоприймачів на основі досліджень фотоелектричних явищ в кремнієвих планарних  $n^+p-p^+$  - структурах. Ця тематика досліджень відповідає не лише актуальним науковим та інженерним викликам, а й практичним потребам в сфері розробки фотоприймачів. Дослідження, представлені в дисертаційній роботі виконувалися в межах науково-дослідних проєктів, що реалізуються відповідно до державної реєстрації №0121U1111110, № 0125U000832, № 0122U001981, а також у рамках проєктів, підтриманих грантами Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для молодих учених та госпдоговірної теми.

#### **Структура та зміст дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота включає вступ, три розділи з підрозділами, висновки, список використаних джерел і чотири додатки. Загальний обсяг становить 262 сторінки, з яких 121 сторінка припадає на основний текст. У списку використаних джерел наведено 156 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, окреслено наукову новизну, практичну цінність, особистий внесок здобувача та подано дані про апробацію результатів.

У **першому розділі** розглянуто принцип роботи фотодіодів на основі високоомних кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур, виконано аналіз літератури й сучасних технологій виготовлення фотоприймачів. Показано, що якість високоомної області визначає основні параметри приладів — фоточутливість, темновий струм і швидкодію. Охарактеризовано особливості  $p-i-n$  структур, де рух носіїв відбувається у сильному електричному полі, що забезпечує кращі параметри порівняно зі звичайними  $p-n$  переходами. Наведено

порівняльні дані провідних виробників, зразки яких мають максимум спектральної чутливості близько 1000 нм.

У **другому розділі** досліджено вплив електрофізичних властивостей кремнію та концентрації легувальних домішок на фотоелектричні параметри структур. Визначено оптимальні умови формування  $n^+$ - і  $p^+$ -шарів, що забезпечують мінімальні темнові струми та високу чутливість. Показано, що підвищений питомий опір кремнію сприяє зниженню шумів, однак потребує заходів для запобігання утворенню інверсійних каналів.

У **третьому розділі** запропоновано низку вдосконалених конструкцій фотодіодів. Розроблено кремнієвий світлофільтр для усунення короткохвильового фону, фотодіоди зі зменшеною товщиною підкладки для підвищення чутливості, а також меза-структурні ФД, виготовлення яких не потребує високотемпературних операцій. Описано методи підвищення опору ізоляції між елементами, що одночасно знижують темнові струми.

**Висновки** узагальнюють основні результати роботи.

У **додатку 1** подано результати дослідження кристалографічних дефектів та способи їх усунення. Виявлено міграцію дислокацій на поверхні систем Si-SiO<sub>2</sub> з інверсійними шарами під час відпалу та запропоновано використання хіміко-динамічного полірування після операції пасивації для зменшення дефектності й підвищення фоточутливості структур.

#### **Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій**

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується коректним вибором методів дослідження, достовірністю експериментальних даних і їх відповідністю теоретичним моделям. У роботі використано сучасні експериментальні методики електрофізичних і оптичних вимірювань, зокрема дослідження вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик, визначення спектральної чутливості, часу життя неосновних носіїв заряду.

Результати отримано на статистично достовірній вибірці структур, що забезпечує їх відтворюваність. Для перевірки правильності інтерпретації даних проведено порівняння експериментальних характеристик із

розрахунковими моделями, побудованими на основі відомих фізичних закономірностей.

Отримані залежності добре узгоджуються з літературними даними та підтверджуються результатами незалежних вимірювань. Використання сертифікованого обладнання та контроль технологічних параметрів на кожному етапі виготовлення зразків забезпечили високу точність досліджень.

Таким чином, обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджуються комплексністю підходу, узгодженістю експериментальних і теоретичних даних, повторюваністю результатів і їх відповідністю сучасним науковим уявленням про фізичні процеси в кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структурах.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні наукові результати, винесені на захист дисертації, знайшли належне відображення у публікаціях здобувача. Загалом за темою дисертаційної роботи опубліковано 48 наукових праць, з яких 18 статей – у фахових наукових виданнях, що індексуються у базі даних Scopus та WoS в тому числі чотири статті в високорейтингових закордонних журналах (6 статей - Q3, 2 статті - Q2), 17 публікацій в інших виданнях, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 4 патенти на корисну модель. Положення дисертації були апробовані на 15 міжнародних конференціях та форумах, а також у ході обговорень на наукових семінарах. Такий рівень публікацій та апробації свідчить про повноту і належне представлення основних результатів дисертації.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у розробленні нових та удосконаленні існуючих підходів до виготовлення кремнієвих  $p-i-n$  фотодіодів, на основі досліджених фотоелектричних явищ та закономірностей в  $n^+p-p^+$ -структурах.

У дисертаційній роботі вперше встановлено закономірності впливу електрофізичних параметрів легованих шарів на фотоелектричні властивості

кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур. Показано, що оптимальне співвідношення концентрацій домішок у  $n^+$ - та  $p^+$ -областях забезпечує покращення геттерувальних властивостей, зниження рівня дефектності та підвищення ефективності фотоприймачів.

Виявлено залежність спектральної чутливості  $p-i-n$  фотодіодів від глибини залягання дифузійного шару, що дозволяє керувати робочим діапазоном довжин хвиль і зменшувати вплив короткохвильового фону.

Проведено порівняння різних технологічних методів легування фосфором, зокрема твердотільного та рідинно-фазного, і показано, що вибір джерела домішки істотно впливає на рівень структурної досконалості та оптичні параметри приладів.

Виявлено явище міграції дислокацій на поверхні  $Si-SiO_2$  під час термічних обробок, яке може бути використане для зменшення густини структурних дефектів.

Запропоновано технологічні підходи до підвищення опору ізоляції між чутливими елементами фотодіодів шляхом усунення інверсійних провідних каналів, що сприяє зменшенню темнових струмів і покращенню стабільності параметрів.

Поглиблено уявлення про вплив поверхневих і об'ємних дефектів на фотоелектричні характеристики кремнієвих структур, зокрема встановлено, що дефекти у високоомній області є визначальними для деградації параметрів фотодіодів, тоді як їхній вплив у легованих шарах є незначним.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі, полягає в створенні нових та модернізації існуючих конструкцій кремнієвих фотодіодів, а також розробленні практичних рекомендацій для забезпечення покращених параметрів фотоприймачів та їх надійності, зокрема:

- 1) оптимізовано процеси дифузії легувальних елементів і формування адгезійних шарів, що забезпечує стабільні параметри, низькі темнові струми та високу фоточутливість;

2) розроблено метод зниження густини поверхневих дефектів і вдосконалено технологію полірування, що підвищує якість поверхні та ефективність геттерування. Запропоновано використання кремнієвих світлофільтрів для усунення короткохвильового фону, а також меза-структур, які зменшують термічне навантаження та собівартість виробництва;

3) створено технологічні рішення для підвищення опору ізоляції між чутливими елементами та неруйнівний метод оцінки електрофізичних властивостей базового матеріалу. Отримані результати сприяють виготовленню надійних, економічних і високочутливих фотодіодів для сучасних оптоелектронних систем.

Результати досліджень впроваджено в ЦКБ Ритм, що підтверджено відповідним актом.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Кукурудзяка М. С. повністю відповідає встановленим вимогам до кваліфікаційних наукових досліджень на здобуття ступеня доктора філософії. Робота відзначається актуальністю тематики представлених досліджень, високим рівнем наукової новизни, теоретичним обґрунтуванням і практичною значущістю результатів. Основні положення дисертації апробовані, результати опубліковані у наукових виданнях та успішно представлені на міжнародних наукових конференціях. Обсяг і структура дисертації, якість оформлення, рівень апробації та публікацій цілком відповідають чинним нормативам, а тематика дослідження здобувача відповідає галузі знань 10 «Природничі науки» та спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

#### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У дисертаційній роботі не розкрито потенційне застосування отриманих фотодіодів.
2. В роботі відсутній аналіз впливу товщини  $i$ -шару на швидкодію фотодіодів.
3. В роботі не наведено аналізу стабільності вольт-амперних

характеристик фотодіодів при багаторазовому вимірюванні чи після довготривалої експлуатації чи після термоциклів.

В дисертаційній роботі зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, однак вказані зауваження не впливають на практичну цінність та загальну позитивну оцінку виконаних досліджень.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних  $n^+ - p - p^+$  - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі» є завершеним науковим дослідженням, що відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор Кукурудзяк Микола Степанович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» галузі знань 10 – «Природничі науки».

### **Рецензент**

кандидат технічних наук, доцент, директор

Навчально-наукового інституту

фізико-технічних та комп'ютерних наук

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича

Петро ШПАТАР

