

## ВІДГУК

офіційного опронтента, доктора фізико-математичних наук, професора  
провідного наукового співробітника відділу фізики поверхні та нанофотоніки

Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України

Євтуха Анатолія Антоновича

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 теми дослідження**

Дослідження фотоелектричних параметрів  $p-i-n$  фотодіодів (ФД) на основі кремнієвих  $n^+p-p^+$  - структур та є надзвичайно актуальним у зв'язку з постійним зростанням вимог до швидкодії, чутливості та енергетичної ефективності елементів фотоелектроніки. Кремнієві  $p-i-n$  -структури широко застосовуються у приладах оптоелектронного перетворення — фотоприймачах (ФП), датчиках оптичного випромінювання, системах телекомунікацій, спектрометрах та оптичних вимірювальних пристроях. Саме фотоелектричні параметри, такі як квантова ефективність, темновий струм, бар'єрна ємність, швидкодія та спектральна чутливість, визначають придатність фотодіодів до використання у конкретних приладових схемах. Відповідно, аналіз та моделювання фотоелектричних характеристик кремнієвих  $n^+p-p^+$  - структур та  $p-i-n$  фотодіодів на їх основі становить важливий науковий та практичний інтерес, сприяючи розвитку високочутливих, швидкодіючих і енергоефективних елементів сучасної фотоелектроніки та сенсорних систем.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Кукурудзяка Миколи Степановича «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних  $n^+p-p^+$  - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі»

є безсумнівно актуальною. За сукупністю отриманих результатів, рівнем їхньої теоретичної і практичної значущості в роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання – дослідження нових фізико-технічних аспектів та закономірностей щодо впливу технологічних факторів на фотоелектричні характеристики кремнієвих  $n^+p-p^+$  - структур, та на основі встановлених результатів розроблення і виготовлення новітніх високочутливих  $p-i-n$  фотодіодів.

### **Оцінка змісту та завершеності дисертації.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, є належним чином обґрунтованими і підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет роботи, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано структуру дисертації та наведено дані щодо публікацій та апробації результатів.

У першому розділі дисертації представлено порівняльну характеристику кремнієвих  $p-i-n$  та  $p-n$  ФД, наведено літературний огляд фізико-технічних проблем виготовлення ФД на основі  $n^+p-p^+$  - структур, сформульовано виклики, які ставлять перед собою науковці з усього світу при проектуванні та виготовленні чутливих детекторів.

У другому розділі дисертації наведено дослідження впливу часу життя неосновних носіїв заряду та питомого опору базового матеріалу на параметри ФД, а також вплив доз легування фосфором та бором  $n^-$ - та  $p^+$ -шарів відповідно на електричні, оптичні та фотоелектричні параметри  $n^+p-p^+$ -структур, зокрема спектри пропускання легованих шарів, темновий струм та фоточутливість. Встановлено що концентрація легованих домішок впливає на ефективність гетерування генераційно-рекомбінаційних центрів.

Третій розділ присвячений розробці та дослідженню нових перспективних  $p-i-n$  ФД. Запропоновано ФД з відрізаючим фільтром, який виключає вплив короткохвильового фонового випромінювання на корисний

сигнал. Встановлено, що для збільшення коефіцієнта збирання носіїв заряду потрібно зменшувати товщину неактивної області структури, з якої фотогенеровані носії заряду не розділяються  $p-n$  переходом. Виготовлено кремнієвий меза  $p-i-n$  ФД з підвищеною чутливістю, яка забезпечується зменшенням кількості термічних операцій та термоударів. Встановлено, що ФД із зниженим міжквADRантним опором володіють підвищеним коефіцієнтом фотозв'язку та темновими струмами. Запропоновано методи підвищення ізоляційного опору чутливих елементів ФД шляхом травлення оксидної плівки в зазорах між активними елементами, та, як наслідок, видалення інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO<sub>2</sub>.

В Додатку 1 наведено дослідження утворень кристалографічних дефектів в кремнієвих планарних  $n^+p-p^+$  - структурах під час різних технологічних операцій, а також їх вплив на темнові струми, фоточутливість та інші ключові характеристики ФП. Запропоновано нові методи зниження поверхневої густини кристалографічних дефектів, які базуються на явищах міграції дислокацій, та шляхом видалення дефектного поверхневого шару кремнію після пасивації перед дифузиею.

У додатках також наведено список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію та впровадження результатів дисертації.

#### **Достовірність та новизна наукових положень**

Достовірність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, ґрунтується на порівнянні параметрів та характеристик експериментальних зразків із класичними серійними фотоприймачами, а також кореляцією розрахункових даних із експериментальними. Також варто підкреслити, що в більшості експериментів виготовлялися не одиничні зразки  $n^+p-p^+$  - структур чи  $p-i-n$  ФД, а серії, які характеризувались повторюваністю результатів. Відповідно, це дає всі підстави вважати отримані результати науково обґрунтованими та відтворюваними, що уможливорює їх подальше застосування в практичних розробках.

## Наукова новизна дисертації

1. Вперше досліджено вплив концентрації фосфору та бору в легованих  $n^+$ - та  $p^+$ -шарах, відповідно, на фотоелектричні характеристики кремнієвих  $n^+ - p - p^+$ -структур;

2. Встановлено, що збільшення глибини  $n^+$ - $p$ -переходу зміщує короткохвильовий край спектральної характеристики чутливості  $p-i-n$  фотодіодів в сторону більших довжин хвиль;

3. В результаті порівняння фотоелектричних параметрів та структурної досконалості ФД виготовлених за допомогою одностадійної дифузії фосфору з планарних твердотільних джерел та двостадійної рідинно-фазної дифузії з  $PCl_3$  встановлено необхідність використання одностадійної дифузії фосфору з планарних твердотільних джерел при виготовленні ФД.

4. Встановлено явище руху дислокацій по поверхні  $Si-SiO_2$ -структур з інверсійними шарами під час термообробок, який базується на зміні механічних напружень структур при утворенні інверсійних шарів;

5. Запропоновано використовувати це явище як метод зниження густини кристалографічних дефектів в зонах чутливих елементів;

6. Запропоновано метод збільшення міжквADRANTНОГО опору багаоелементних кремнієвих фотодіодів шляхом розриву провідних інверсійних каналів на межі розділу  $Si-SiO_2$  в зазора між активними елементами.

## Практичне значення роботи

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати становлять важливу теоретичну та практичну складову для проектування та виготовлення новітніх фотоприймачів на основі кремнієвих  $n^+ - p - p^+$ -структур. Практичне значення отриманих результатів у дисертаційній роботі Кукурудзяком М. С. полягає в наступному:

1. Встановлено та впроваджено оптимальні дози легування фосфором та бором з планарних твердотільних джерел кремнієвих  $n^+ - p - p^+$ -структур,

які забезпечують належний рівень гетерування генераційно-рекомбінаційних центрів без значних оптичних втрат на легованих шарах, та забезпечують значну детективність та квантову ефективність ФП.

2. В результаті дослідження впливу товщини адгезійного шару хрому з тилової сторони підкладки на чутливість ФД та встановлено, що товщина шару хрому 10 нм забезпечує належну адгезію золота з мінімальними оптичними втратами;

3. Встановлено, що проведення хіміко-динамічного полірування чутливих елементів після операції пасивації перед дифузією фосфору дозволяє знизити густину поверхневих структурних дефектів на кілька порядків.

4. Запропоновано та впроваджено фотоприймачі із зменшеним впливом короткохвильового фонового випромінювання, що втілено за допомогою кремнієвих абсорбційних відрізаючих фільтрів.

5. Запропоновано та виготовлено кремнієві високочутливі *p-i-n* ФД з меза-профілем між активними елементами. Підвищена чутливість меза-ФД забезпечується зменшенням деградації часу життя неосновних носіїв заряду та питомого опору базового матеріалу внаслідок відсутності в технологічному маршруті операції термічної пасивації;

6. Розроблено методи збільшення опору ізоляції чутливих елементів ФД, шляхом розриву інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO<sub>2</sub>.

Результати дисертації застосовані та впроваджені в Центральному конструкторському бюро «Ритм».

### **Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи**

Усі основні положення та найважливіші результати дисертаційної роботи, винесені на захист, опубліковані у достатньому обсязі. За результатами виконаного дослідження опубліковано 48 наукових праць, зокрема, 18 статей у наукових фахових виданнях, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних (з них 4 статті у виданнях іноземних держав), 17 публікацій в інших виданнях, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів

конференцій, 4 патенти на корисну модель. Основні результати дисертації були предметом обговорення на 15 українських і міжнародних наукових конференціях із різними формами участі, що свідчить про належну апробацію досліджень.

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

Дисертація складається зі вступу, трьох розділів з підрозділами, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 261 сторінку (з них: 122 сторінки основного тексту) друкованого тексту, список використаних джерел складає 156 найменувань. Зміст дисертації повністю відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Стиль викладення матеріалу є послідовним, науково виваженим і водночас доступним для сприйняття, що забезпечує зрозуміле подання результатів дослідження. Дисертаційна робота Кукурудзяка М. С. відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами згідно з наказом № 759 від 31 травня 2019 року).

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

1. В роботі часто вживаються терміни  $n^+-p-p^+$  структури,  $p-i-n$  структури,  $p-i-p$  діоди. Тому для покращення сприйняття роботи бажано було б на самому початку вставити фразу «Проводились дослідження та розробки  $p-i-n$  фотодіодів на основі  $n^+-p-p^+$  структур, в яких в якості  $i$ -шару використовувався високоомний кремній».

2. Серед опису методів вимірювання автор часто вказує на вимірювання якоїсь величини, але «вимірювання» не є методом. Потрібно вказувати чим і як вимірювали.

3. При дослідженні електричних властивостей  $n^+-p$  переходів не вказано, які контакти використовувались і чи були вони омичними, оскільки контактний опір може суттєво вплинути на результати вимірювань.

4. Однією з проблем при розробці кремнієвих  $p-i-n$  ФД є виникнення інверсійного поверхневого  $n$ -шару, який обумовлений наявністю в оксиді

кремнію вбудованого позитивного заряду. Не зрозуміло, чому автор не провів дослідження направлені на оптимізацію властивостей шару SiO<sub>2</sub>. Зокрема, низькотемпературний відпал у водні, або плазмова обробка у водні могли б суттєво зменшити вбудований позитивний заряд.

5. У висновках, щоб підкреслити новизну і оригінальність результатів, бажано було б вказати, які результати отримані вперше.

6. На мою думку термін «детектуємість D\*» є невдалим. Чи є він загально прийнятим? Більш зрозумілим є термін «питома виявна здатність».

7. В тексті зустрічаються граматичні помилки та неточності. Зокрема, вказується довжина хвилі випромінювання YAG лазера 1.05 мкм, замість 1.064 мкм та ін.

Разом з тим, висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертаційної роботи.

#### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Кукурудзяка М. С. є завершеним науково-дослідним дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати. У сукупності вони вирішують важливе науково-прикладне завдання, що полягає у дослідженні фотоелектричних властивостей кремнієвих  $n^+p-p^+$  - структур, та на основі встановлених фізичних явищ та закономірностей розробленні і практичній реалізації надійних високочутливих  $p-i-n$  фотодіодів. Дослідження виконано автором на високому науковому рівні.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, 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 наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – фізика та астрономія 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 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).

Автор дисертаційної роботи, Кукурудзяк Микола Степанович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

д. ф.-м. н., проф., п. н. с. відділу фізики  
поверхні і нанофотоніки Інституту фізики  
напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН  
України

А. А. Євтух

Підпис офіційного опонента А. А. Євтуха  
засвідчую:

Вчений секретар ІФН ім. В. Є. Лашкарьова  
НАН України  
к. ф.-м. н.



Р. А. Редько