

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора  
кафедри мікроелектроніки

КПІ ім. Ігоря Сікорського Вербицького Володимира  
Григоровича

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 дисертації

Дослідження фотоелектричних параметрів кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур та  $p-i-n$  фотодіодів (ФД) є актуальним у зв'язку з інтенсивним розвитком сучасних систем оптоелектроніки, сенсорики та телекомунікацій, де ключову роль відіграють високочутливі, стабільні та енергоефективні фотоприймачі (ФП). Кремній, як основний матеріал мікро- та наноелектроніки, залишається базою для створення фотодіодів, сумісних із кремнієвими інтегральними технологіями. При цьому оптимізація електричних і фотоелектричних характеристик високоомних структур типу  $n^+p-p^+$  є важливою для підвищення чутливості, зниження темнових струмів, поліпшення спектральної ефективності та забезпечення стабільної роботи пристроїв у широкому діапазоні температур і освітленості.

Особливу наукову й практичну цінність має вивчення фізичних процесів у переходах та області просторового заряду, механізмів генерації та рекомбінації неосновних носіїв, а також впливу технологічних факторів на електричні параметри фотодіодів.

Крім того, сучасні тенденції мікроелектроніки спрямовані на зниження вартості та спрощення технології виготовлення фотоприймачів, що зумовлює необхідність пошуку комбінованих технологічних рішень: спільного формування оксидних та просвітлюючих шарів, а також комбінованих методів гетерування. Такі підходи дають змогу забезпечити високу ефективність фотоелектричного перетворення при мінімізації технологічних витрат. Таким чином, комплексне дослідження фотоелектричних параметрів кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур та  $p-i-n$  фотодіодів має важливе значення для подальшого розвитку елементної бази фотоприймачів, інтегрованих систем оптоелектроніки та сенсорних технологій нового покоління.

## Структура та зміст роботи

Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 156 найменувань та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації – 261 сторінка (основна частина – 122 сторінки).

**Вступ** зосереджено на обґрунтуванні вибору теми дослідження, конкретизації об'єкта дослідження, роз'ясненні мети і завдань роботи, обґрунтуванні методів дослідження, акцентуванні наукової новизни отриманих результатів і їх практичній цінності, конкретизації особистого внеску автора, апробації результатів дослідження на наукових міжнародних конференціях та підтвердження зв'язку теми дисертації з науковими дослідженнями організації, де була виконана дисертація.

**Перший розділ** присвячено огляду вітчизняних і закордонних джерел, що відображають сучасний науковий та технологічний стан розвитку кремнієвих  $n^+ - p - p^+$  - структур та детекторів на їх основі. Охарактеризовано фізико-технологічні проблеми розробки і виготовлення  $p - i - n$  ФД. Наведено порівняння принципів роботи та параметрів  $p - i - n$  та  $p - n$  фотодіодів.

У **другому розділі** автором досліджено вплив параметрів базового матеріалу на характеристики утворених  $n^+ - p - p^+$  - структур. Встановлено механізми струмопереносу в досліджуваних структурах. Запропоновано оптимальні концентрації домішок в легованих шарах  $p - i - n$  ФД для ефективного гетерування та отримання покращених фотоелектричних характеристик. Також розроблено неруйнівний метод контролю питомого опору високоомної області кремнію на завершених виробках.

У **третьому розділі** наведено фізико-технічні аспекти виготовлення новітніх  $p - i - n$  ФД. Запропоновано використання кремнієвого відрізаючого світлофільтра в конструкції фотоприймачів для зниження впливу фонового випромінювання на параметри виробів. Досліджено вплив товщини фільтра та наявності просвітлюючого покриття на його оптичні характеристики. Встановлено, що поєднання світлофільтрів з оптичними концентраторами нівелює втрати інтенсивності випромінювання товщиною фільтра.

Наведено розрахунки коефіцієнта збирання фотогенерованих носіїв заряду ФД, та на основі зроблених висновків виготовлено назьковольтний фотодіод з підвищеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду та чутливістю.

Встановлено, що виключення операції термічного окиснення із технологічного маршруту виготовлення  $p - i - n$  ФД дозволяє мінімізувати деградацію електрофізичних характеристик кремнію та забезпечує підвищені значення чутливості. Описане втілено в

конструкції меза-фотодіода, де першою технологічною операцією є дифузія фосфору, а межі між активними елементами утворені шляхом травлення кремнію методом хіміко-динамічного полірування.

Встановлено, що на межі розділу Si-SiO<sub>2</sub> можливе утворення інверсійних каналів, які провокують зниження опору ізоляції між чутливими елементами та зростання темнових струмів ФД. Для нівелювання вказаного, запропоновано метод підвищення опору ізоляції активних елементів ФД шляхом ліквідації інверсійних шарів на межі розділу кремній оксид, методом травлення діелектричної плівки в зазорах між чутливими елементами.

**Висновки** роботи сформульовані чітко та повною мірою висвітлюють отримані результати. За змістом та рівнем аргументованості висновки відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

**Перелік літературних джерел** складається переважно з наукових робіт за останні 5 років, має інформативний характер, всебічно характеризує галузь досліджень і свідчить про широкий теоретичний огляд проблем описаних в дисертації.

В дисертації присутній також **Додаток 1**, присвячений проблемам дефектоутворень на поверхні  $n^+-p-p^+$  - структур під час їх виготовлення, а також впливу дефектів на параметри  $p-i-n$  ФД.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність**

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджуються узгодженістю експериментальних даних із теоретичними розрахунками, використанням сертифікованих методик вимірювання та повторюваністю результатів незалежних серіях експериментів. Отримані характеристики кремнієвих  $n^+-p-p^+$ -структур і  $p-i-n$  фотодіодів узгоджуються з відомими літературними даними, що свідчить про правильність вибраної методики та коректність інтерпретації фізичних процесів. Також вказано режими термообробки, гетерування, отримання плівок, що дає змогу відтворити структури в інших лабораторіях.

### **Новизна наукових положень дисертаційної роботи**

У роботі вперше проведено комплексне дослідження фотоелектричних властивостей кремнієвих  $n^+-p-p^+$ -структур та  $p-i-n$  фотодіодів, що дало змогу встановити вплив параметрів легування шарів, технологічних умов та структурних дефектів на основні характеристики приладів. Визначено оптимальні режими легування, за яких забезпечується висока ефективність гетерування та стабільність фотоелектричних параметрів. Виявлено закономірності

зміни спектральної чутливості фотодіодів залежно від глибини  $p-n$  переходу.

Показано вплив різних методів дифузійного легування на формування дефектної структури та продемонстровано переваги технологічних прийомів, що знижують концентрацію дислокацій на поверхні кремнієвих структур. Запропоновано підхід до підвищення опору ізоляції між чутливими елементами фотоприймачів, який забезпечує покращення стабільності та чутливості приладів.

Отримані результати розвивають уявлення про взаємозв'язок між технологічними параметрами, дефектною структурою та фотоелектричними властивостями кремнієвих фотодіодів і мають практичне значення для вдосконалення технології виготовлення фотоприймачів нового покоління.

### **Практичне одержаних результатів**

Отримані результати мають важливе практичне значення для розробки та виготовлення високочутливих і надійних фотоприймачів на основі високоомних кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур. Розроблені технологічні рішення впроваджено у виробництво фотодіодів у Центральному конструкторському бюро «Ритм», що підтвержено Актом впровадження наведеним в додатках.

Удосконалено режими дифузії легувальних домішок, що забезпечують зниження темного струму та підвищення чутливості фотодіодів. Встановлено оптимальні параметри металізаційних шарів і розроблено способи зменшення поглинання світла тилowymi контактами. Запропоновано технологічні прийоми, які знижують густину поверхневих дефектів і покращують геттерування рекомбінаційних центрів, що сприяє підвищенню стабільності фотоелектричних параметрів.

Розроблено нові конструктивно-технологічні рішення — зокрема, меза-структури  $p-i-n$  фотодіодів та світлофільтри з кремнію, які підвищують чутливість у робочому спектральному діапазоні та знижують вплив короткохвильового фону. Запропоновано методи підвищення опору ізоляції активних елементів у багатосекційних фотодіодах, що дозволяє покращити їх електричну розв'язку без ускладнення технологічного процесу.

Крім того, розроблено неруйнівний метод визначення питомого опору базового матеріалу, який корелює з результатами, отриманими за методом Холла, та може бути використаний для технологічного контролю якості кремнієвих структур.

**Основні результати роботи опубліковано у 48 наукових працях, в тому числі 18 статей у наукових фахових виданнях, які внесено до міжнародних наукометричних баз даних (6 статей - Q3, 2**

статті - Q2), 17 публікацій в інших виданнях, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 4 патенти на корисну модель.

### **Апробація результатів дисертаційної роботи.**

Отримані результати досліджень мають достатню апробацію, що підтверджено доповідями на престижних міжнародних наукових конференціях, зокрема:

1. The 15th International Conference on Correlation Optics, «Correlation Optics'17», 13 - 16 September 2021, Chernivtsi, Ukraine (SPIE);
2. The 3rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPI Week», 3-7 October 2022, Kharkiv, Ukraine (IEEE);
3. The 4rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPI Week», 2-6 October 2023, Kharkiv, Ukraine (IEEE)
4. The 5rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPI Week», 7-11 October 2024, Kharkiv, Ukraine (IEEE);
5. The 13th International Conference on Electronics and Information Technologies «ELIT», 26-28 September 2023, Lviv, Ukraine (IEEE);
6. The 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology «ELNANO», 13-16 May 2024, Kyiv, Ukraine (IEEE);
7. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2023», 29- 31 травня 2021 р., Київ, Україна;
8. VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ), 14-16 травня 2022 р., Кременчук, Україна;
9. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2023), 22- 24 листопада 2023 р, Дніпро, Україна;
10. IX Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2024), 27- 29 листопада 2024 р, Дніпро, Україна;
11. The 51th Jaszowiec International School and Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023», 17 - 23 June 2023, Szczyrk, Poland;
12. IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-9», 22-26 травня 2023р. Ужгород, Україна
13. XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2023), 29-31 травня 2023р. Одеса, Україна;
14. XXXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2023), 17-20 травня 2023р. Харків, Україна.

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

#### **Зауваження по дисертації.**

1. Для визначення глибини занурення легуючої домішки використовувався метод шар-шліфа, який має певну похибку вимірювання і для його калібровки слід було б використати більш сучасну методику, наприклад вторинно-йонну маспектрометрію.

2. Легування *p*- і *n*-областей проводилось із твердого чи газоподібного джерела при високих (~ 1000°C) температурах. В роботі відсутні дані по процесу зміни концентрацій носіїв зарядів йонними методами, яким притаманна низька температура та більш відтворений технологічний процес.

3. Для проведення досліджень використовувався "бездислокаційний" FZ-Sip-тип, але не оцінено густину дефектів ні в об'ємі ні на поверхні кремнію..

4. При проведенні вимірювань електрофізичних параметрів напівпровідникових структур неказані ні абсолютні ні відносні похибки.

5. На деяких малюнках ( в Розділі2) занадто дрібний шрифт особливо там де вставки, що утруднює сприйняття матеріалу.

#### **Висновок**

Дисертаційна робота Кукурудзяка М. С. виконана на високому науковому рівні та написана сучасною науково-технічною мовою. Матеріал викладено послідовно, логічно й грамотно, із чіткою структурою та належною аргументацією кожного етапу дослідження. Виклад супроводжується великою кількістю ілюстративного матеріалу — графіків, схем, експериментальних залежностей, що сприяє глибшому розумінню досліджуваних процесів і результатів. Стиль подання забезпечує ясність, доступність та наукову переконливість викладеного матеріалу.

За змістом дисертація є завершеним комплексним науковим дослідженням, у якому послідовно розглянуто фізичні процеси, що визначають фотоелектричні властивості кремнієвих  $n^+p-p^+$ -структур, а також їх вплив на характеристики *p-i-n* фотодіодів. Отримано нові, науково обґрунтовані результати щодо впливу легування, структурних дефектів і технологічних факторів на електрофізичні параметри фотоприймачів. На основі встановлених закономірностей розроблено та практично реалізовано

