

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

Дисертація Кукурудзяка Миколи Степановича присвячена дослідженню фотоелектричних властивостей кремнієвих планарних $n^+ - p - p^+$ - структур, а також виготовленню та вдосконаленню на їх основі високочутливих фотоприймачів (ФП) - $p-i-n$ фотодіодів (ФД) для детектування електромагнітного випромінювання діапазону 400-1200 нм. Актуальність дослідження фотоелектричних властивостей $n^+ - p - p^+$ -структур на основі високоомного кремнію полягає в широкому застосуванні ФП з такою структурою у сучасних технологіях, де важлива значна детективність, швидкодія та квантова ефективність. Оскільки $p-i-n$ ФП складають основу багатьох пристроїв фотоніки, точне розуміння та вдосконалення їх фотоелектричних властивостей дозволяє значно поліпшити параметри та характеристики цих технологій.

Практична цінність роботи

Процес виготовлення кремнієвих фотоприймачів на основі планарних $n^+ - p - p^+$ - структур ґрунтується на точному розумінні впливу електрофізичних характеристик базового матеріалу, доз легування, послідовності технологічних операцій та топології приладу на електричні та фотоелектричні параметри завершених виробів. Дисертаційна робота Кукурудзяка Миколи Степановича містить ґрунтовний аналіз впливу вказаних аспектів створення фотодіодів на їх спектральні, вольт-амперні, вольт-фарадні, імпульсні та оптичні характеристики. На основі встановлених закономірностей запропоновано, виготовлено та досліджено нові конструкції високочутливих фотоприймачів із мінімальними значеннями темнових

струмів, підвищеним опором ізоляції активних елементів та зниженим впливом фонового короткохвильового випромінювання на корисний сигнал фотодіодів.

Структура і зміст роботи

Обсяг дисертації становить 261 сторінка, із яких основний текст — 122 сторінки. Робота складається зі вступу, трьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. У вступі автор чітко формулює мету і завдання дослідження, обґрунтовує актуальність теми, окреслює наукову новизну та практичне значення роботи. Кожен із розділів основної частини містить теоретичну та експериментальну частини, чисельні розрахунки, аналіз результатів та висновки. Доцільним є наведення короткого опису змісту кожного розділу.

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи; сформульовано мету, основні завдання, об'єкт та предмет дослідження; вказано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів; наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У *першому розділі* дисертації наведено принцип роботи ФД на основі кремнієвих n^+p-p^+ структур, представлено літературний огляд, який свідчить про значну зацікавленість науковців з усього світу в розробці надійних напівпровідникових фотодетекторів з максимальною детективністю. Сформульовано основні фізико-технічні проблеми розробки та виготовлення фотоприймачів на основі високоомних n^+p-p^+ структур. Також проведено аналіз передових виробництв $p-i-n$ ФД, які представлені на ринку.

У *другому розділі* дисертації описано дослідження впливу електрофізичних характеристик кремнію на параметри ФД, а також вплив концентрацій легованих фосфору та бору в n^+ - та p^+ -шарах, відповідно, на електричні та фотоелектричні параметри n^+p-p^+ -структур. Охарактеризовано особливості технології виготовлення планарних $p-i-n$ ФД.

У *третьому розділі* наведено нові перспективні структури ФД на

основі кремнієвих $n^+ - p - p^+$ - структур. Запропоновано відрізаючий абсорбційний фільтр, який мінімізує вплив короткохвильового фонового випромінювання на корисний сигнал ФД. Виготовлено та досліджено ФД із збільшеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду. Запропоновано структуру високочутливого кремнієвого $p - i - n$ ФД з меза-профілем. Запропоновано метод підвищення ізоляційного опору активних елементів квадрантних ФД шляхом розриву інверсійних провідних шарів на межі розділу Si-SiO₂.

В дисертації присутній об'ємний *Додаток 1*, в якому представлено результати досліджень генезису кристалографічних дефектів на поверхні та в об'ємі кремнієвих планарних $n^+ - p - p^+$ - структур, їх вплив на параметри ФП. Наведено деякі нові аспекти дефектоутворень на поверхні кремнієвих підкладок під час різних технологічних операцій та запропоновано ряд нових ефективних методів зниження густини поверхневих структурних дефектів.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукові положення, які представлені в дисертаційній роботі, є добре обґрунтованими, а також належно висвітлені у відповідних розділах дисертації. Основні результати, отримані здобувачем та винесені на захист, повністю відповідають меті та завданням роботи, обговорювались на наукових семінарах, міжнародних конференціях, опубліковані у фахових виданнях України та зарубіжних виданнях, проіндексованих у наукометричних базах Web of Science Core Collection та/або Scopus (у т. ч. 2 статті в журналах, що входять до квартилю Q2 та 6 – до квартилю Q3), отримано ряд патентів на корисну модель. Достовірність отриманих результатів ґрунтується на використанні загальноприйнятих експериментальних підходів і методів досліджень та не викликає сумнівів. Під час виконання дисертаційного дослідження було проаналізовано значну кількість наукових джерел (156 посилань).

Наукова новизна

Дисертація пропонує низку експериментальних результатів, що мають

високу цінність: в даній роботі вперше досліджено вплив поверхневого опору легованих в n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором, відповідно, на фотоелектричні властивості кремнієвих $n^+ - p - p^+$ - структур і фотоприймачів на їх основі; досліджено вплив глибини n^+ - p -переходу на спектральні характеристики чутливості $p-i-n$ фотодіодів; проведено порівняльну характеристику легування фосфором з планарних твердотільних джерел та рідинно-фазного дифузанта PCl_3 в технології виготовлення $p-i-n$ фотодіодів; встановлено явище міграції дислокацій по поверхні $Si-SiO_2$ -структур з інверсійними шарами; запропоновано метод підвищення опору ізоляції чутливих елементів і охоронного кільця кремнієвих квадрантних фотодіодів.

Практичне значення

Результати роботи мають безпосереднє прикладне значення, яке полягає в можливості використання отриманих результатів для розробки новітніх високочутливих фотоприймачів на основі кремнієвих планарних $n^+ - p - p^+$ - структур підвищеної надійності та з покращеними параметрами, зокрема: впроваджено технологічні режими дифузії фосфору та бору з планарних твердотільних джерел, які дозволяють отримувати ФД з покращеними параметрами; досліджено вплив товщини адгезійного підшару хрому з тилової сторони підкладки на коефіцієнт збирання фотогенерованих носіїв заряду та чутливість ФД; запропоновано метод зменшення густини поверхневих структурних дефектів шляхом травлення поверхні чутливих елементів після пасивації; запропоновано та впроваджено використання кремнієвих відрізаючих світлофільтрів, які дозволяють знизити вплив фонового короткохвильового випромінювання на корисний сигнал ФД; запропоновано та виготовлено кремнієвий $p-i-n$ ФД з меза-структурою, який дозволяє нівелювати зменшення електрофізичних характеристик базового матеріалу за рахунок виключення високотемпературної операції окиснення; розроблено ряд методів збільшення опору ізоляції активних елементів ФД, які базуються на розриві провідних каналів на межі розділу $Si-SiO_2$; запропоновано неруйнівний метод визначення питомого опору базового

матеріалу $n^+ - p - p^+$ - структур.

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

Зауваження

1. У пункті 3.4. про чотириквadrантний кремнієвий фотодіод із підвищеним міжквadrантним опором, детально описано вплив зниження опору ізоляції активних елементів квadrантних фотодіодів на темнові струми охоронного кільця та фоточутливих елементів, а також на коефіцієнт фотоелектричного зв'язку останніх. Власне при описі зміни коефіцієнта фотозв'язку внаслідок зміни опору ізоляції між чутливими елементами йде мова про чутливість. Однак нічого не сказано про вплив зменшення опору ізоляції чутливих елементів та охоронного кільця на чутливість фотодіода. Чи існує така залежність, та який її характер?

2. При аналізі умов виникнення інверсного шару на межі розділу $p\text{-Si} - \text{SiO}_2$ йде мова про дифузійно неконтрольованих домішок під час термічних операцій, однак не вказано, які саме елементи призводять до погіршення електричних параметрів багатоелементних фотодіодів, зокрема опору ізоляції. Доцільно було б назвати ці домішки і вказати їх походження.

3. В дисертаційній роботі дисертант аналізує якість межі розділу $p\text{-Si} - \text{SiO}_2$ на основі результатів дослідження $C\text{-}V$ -характеристик кремнієвих МОН-структур, однак не приводить значення напруг плоских зон та густини поверхневих станів.

4. Дисертаційна робота написана належною науковою мовою, проте в ній зустрічаються не зовсім вдалі скорочення, орфографічні помилки та неточності.

Однак наведені зауваження не заперечують наукових результатів дисертації Кукурудзяка Миколи Степановича. Вони не впливають на висновок про високий науковий рівень дисертаційного дослідження та його загальну позитивну оцінку.

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій

За результатами виконаного дослідження опубліковано 48 наукових праць, зокрема, 18 статей у наукових фахових виданнях, які внесено 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. У публікаціях висвітлено матеріали досліджень, які охоплюють усі розділи дисертації. Варто відмітити, що більшість наукових праць представлених до захисту є одноавторськими, зокрема 10 публікацій у наукових фахових виданнях, 8 тез доповідей та 10 публікацій в інших виданнях.

Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Представлені в наукових працях і дисертації результати дослідження є новими та повністю відповідають принципам академічної доброчесності. Дисертант чітко окреслив свій особистий внесок у публікаціях. Використані в дисертаційній роботі ідеї, теоретичні та експериментальні підходи, методи, а також результати інших авторів належним чином задокументовані із відповідними посиланнями на джерела.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Кукурудзяка М. С. є завершеним науковим дослідженням, яке виконано автором самостійно на високому науковому рівні. У роботі дисертантом одержано ряд нових експериментальних результатів, які є достовірними та науково обґрунтованими, мають значний науковий та практичний інтерес. Дисертант самостійно розробляв методики експериментів, виготовляв фоточутливі структури, проводив вимірювання електричних та фотоелектричних характеристик. Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності, він супроводжується великою кількістю табличних та графічних даних, які детально відображають результати проведених досліджень. Аналіз представлених даних глибоко розкриває сутність фізичних явищ та процесів, що сприяє більш глибокому розумінню

предмету дослідження. Усі сформульовані висновки отримали необхідну і достатню теоретичну аргументацію та є методологічно обґрунтованими.

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 за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв’язання проблеми, практичним значенням отриманих результатів, системністю викладення 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 дисертації, Кукурудзяк Микола Степанович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія».

Рецензент

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри електроніки і енергетики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Іван ОРЛЕЦЬКИЙ

