

**Відгук
офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Кудрика Романа Ярославовича

“Електронні властивості тонкоплівкових нанорозмірних омічних та бар’єрних контактів до широкозонних напівпровідників GaN та SiC”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико – математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні

Дисертаційна робота Р.Я. Кудрика присвячена встановленню закономірностей процесів, що відбуваються в омічних та бар’єрних контактах з антидифузійними шарами на основі нанокристалічних плівок металів до широкозонних напівпровідників SiC та GaN, як на етапі їх формування, так і під дією швидкої термічної обробки, що виступає в якості моделі фактора деградації.

Значний розвиток систем енергетично ефективних світлодіодів, мікрохвильової та екстремальної електроніки на основі нітрид галієвих кристалів є пріоритетними галузями у багатьох провідних країнах. Важливим етапом в процесі вдосконалення технологій широкозонної електроніки є розробка надійних омічних та бар’єрних контактів до силових діодів із бар’єром Шотткі, для яких при високому рівні вхідної потужності дуже суттєвою стає їх термостабільність. Структурні та фізико-хімічні властивості перехідного шару, в контактні метал – напівпровідник зумовлюють, як вихідні характеристики, так і надійність напівпровідникових приладів. Тому, необхідним є пошук та вивчення характеристик матеріалів для контактів, які забезпечували б необхідні електрофізичні, морфологічні та механічні властивості контактів на їх основі до температур, що значно перевищують робочі.

В останні роки активно ведеться вивчення властивостей термостійких контактів до GaN та SiC із дифузійними бар’єрами на основі нітридів, карбідів, вольфрамів та боридів тугоплавких металів. Основні проблеми які необхідно вирішити для збільшення термостійкості контакту – це підвищення дифузійної стійкості, мінімізація термічних напружень, покращення адгезії та міцності шарів контакту в широкому температурному діапазоні. Тому актуальним є дослідження механізмів як деградації контактних багатошарових структур так и струмопереносу у контактах з дифузійними бар’єрами на основі нанокристалічних плівок дибориду титану незважаючи на значну кількість публікацій по цій темі, оскільки в багатьох випадках результати різних авторів є взаємно суперечливими, зокрема існує значна кількість методик розрахунку параметрів контактів.

Отримані автором експериментальні результати: про домінуючий фактор, який визначає деградацію омічного та бар’єрного контактів з дифузійним бар’єром на основі дибориду титану до карбїду кремнію та нітриду галію є руйнування дифузійного бар’єру під дією внутрішніх механічних напруг, які виникають внаслідок

невідповідності коефіцієнтів термічного розширення при температурах як процесу формування, так і експлуатації контактів; про оптимальні розміри нанокристалітів 3 - 5 нм у плівці дифузійного бар'єру, при яких набуває максимуму механічна міцність, а отже і термічна стійкість контакту в цілому до температур 1000 °С; про електрофізичні властивості діодів Шотткі з антидифузійними бар'єрами на основі TiB_2 з оптимальними параметрами нанокристалітів до GaN та SiC; про те, що у нітридгалієвих діодах Шотткі з нанокристалічним контактоутворюючим шаром TiB_2 основною компонентою струму прямозмщеного бар'єру Шотткі при кімнатній та нижчих температурах є тунельний струм, що суперечить параметру Падовані-Стреттона, який вказує на те, що ймовірність класичного тунелювання значно нижча за ймовірність термоелектронної емісії; про механізми струмопереносу у світлодіодному чіпі їх зміни після тривалого напрацювання – характеризуються науковою новизною і надійністю. Остання ґрунтується на використанні налагодженої технології вирощування і дослідження контактів, статистичній обробці результатів по значній кількості зразків і узгодженості з опублікованими даними. Такі результати мають практичну значимість у визначенні фізичних умови та технологічних параметрів, необхідних для створення плівки дибориду титану з оптимальними розмірами нанокристалітів та термічною стійкістю омичних та бар'єрних контактів на їх основі; у розробці та застосуванню програмного забезпечення для розрахунків контактного опору на основі TLM- методів та для розрахунку параметрів діодів з бар'єром Шотткі на основі виміряних ВАХ, а саме величин фактора ідеальності, висоти бар'єру та послідовного опору.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів не викликають сумнівів, оскільки представлені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки ґрунтуються на комплексних експериментальних вимірюваннях вольтамперних характеристик у діапазоні температур 77 – 750 К, яке дозволяє отримувати основні параметри діодів Шотткі (висоту бар'єру, фактор ідеальності та послідовний опір) і вивчати механізми струмопереносу в контактах; електронній Оже-спектроскопії для визначення профілю розподілу компонентів у контактах; атомно-силовій мікроскопії для аналізу морфології поверхні металу, напівпровідника та антидифузійного шару; вимірюваннях вольтфарадних характеристик для визначення концентрації вільних носіїв заряду та висоти бар'єру в карбіді кремнію та нітриді галію; визначенні питомого контактного опору для площадок з радіальною геометрією за методом довгої лінії, комп'ютерній статистичній обробці результатів експерименту та моделюванні фізичних процесів, які дозволяють досліджувати залежність часу свічення вибірки модулів від розкиду параметрів світлодіодних чіпів у партії. Проведено співставлення результатів, одержаних різними методами, а у випадку розбіжностей проаналізовано їх причини. Сформульовані в дисертаційній роботі висновки зроблені на основі комплексного аналізу досліджуваних фізичних

явищ, всебічно аргументовані, пройшли достатню апробацію презентацією матеріалів дослідження на конференціях та в наукових публікаціях.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, додатків та списку літератури. Загальний обсяг роботи – 149 сторінок, список використаних джерел налічує 161 найменування. Розглянемо послідовно найважливіші результати та помічені недоліки роботи.

В роботі спочатку наводиться літературний огляд, в якому представлені особливості формування омичних і бар'єрних контактів, а також їх властивості, далі у другому розділі методика виготовлення зразків, вимірювання контактного опору і розрахунку основних параметрів бар'єрних контактів, у третьому розділі представлено результати впливу термічних процесів на параметри бар'єрних контактів, у четвертому розділі представлено результати впливу термічних процесів на параметри омичних контактів, у п'ятому розділі представлено вивчення процесів деградації у світлодіодних модулях на основі GaN, наприкінці подано висновки і перелік цитованої літератури.

Відносно літературного огляду можна констатувати, що він достатньо повно відображає теперішній стан проблематики структурного складу та стабільності тонкоплівкових контактних систем до *SiC* та *GaN* при термічних навантаженнях, описані процеси, що відбуваються в контактах. Представлено порівняння електрофізичних характеристик та електронних властивостей *SiC* та *GaN* з іншими напівпровідниками та показана перспективність їх у галузі силової та високочастотної електроніки. Зроблено висновок про необхідність розробки надійних термостійких контактів, що дозволить повною мірою реалізувати потенційні можливості даних напівпровідників, підвищити надійність та вихідні параметри приладів на їх основі.

В методологічній частині міститься опис методик виготовлення зразків і проведення експериментального дослідження. Досліджувані контакти формувалися магнетронним осадженням в атмосфері *Ar*. Крім хімічної очистки пластин перед початком нанесення контактної металізації у вакуумі здійснювалась фотонна очистка – опромінення потужними інфрачервоними лампами, що призводило до розігріву поверхні зразка і десорбції домішок. Наступним етапом очистки було короткотривале травлення поверхні в аргоновій плазмі. Після чого відбувалося пошарове магнетронне осадження матеріалів контакту. Швидкість осадження TiB_2 підібрана такою, щоб утворилася нанокристалічна плівка, з характерним розміром кристалітів 5 нм.

У третьому розділі роботи виявлено, що термічна стійкість контактних структур $\text{Au-TiB}_x\text{-p-6H SiC}$ значною мірою залежить від параметрів плівки TiB_2 , саме від її нанокристалічного стану і розміру зерна нанокристалітів. Так контактні структури з розміром нанокристалітів 3-5 нм виявилися стійкими до швидкого термічного відпалу при $T = 1000^\circ\text{C}$ та $t = 60$ с і не змінювали своїх електрофізичних параметрів після відпалу. У той же час у контактних структурах з неоптимальним розміром кристалітів при тому же швидкому термічному відпалі відбулося значне розтріскування контактної металізованої поверхні. Показано, що до температури 340°K основними механізмами струмопереносу є польова та термопольова емісії. При збільшенні температури відбувається зміна механізму струмопереносу на термоелектронну емісію. Встановлено, що фактор ідеальності у діапазоні 340-550 К має величину 1,3-1,2 і слабко спадає з температурою. Запропоновано припущення, що близька до лінійної залежність фактора ідеальності від температури може бути пояснена впливом на струмоперенесення поверхневих станів. Проведено дослідження діодів з бар'єром Шоттки $\text{Au-TiB}_x\text{-p-GaN}$, в результаті чого було виявлено, що ВАХ при кімнатній температурі має дві характерні ділянки, на одній з яких, в межах - 0,2 В, переважає польовий механізм струмопереносу, на іншій, в межах - 0,4 В – термоелектронний механізм струмоперенесення. Визначено, що струмоперенесення в бар'єрах Шоттки $\text{Au-TiB}_x\text{-p-GaN}$ в інтервалі температур 80-340 К здійснюється за тунельним механізмом, через дислокації, що перетинають область просторового заряду. В області температур 420-600 К домінуючим є термоелектронний механізм струмопереносу. В області 340-420 К обидва механізми струмопереносу переважають на різних ділянках ВАХ. Висота бар'єру, визначена з ВФХ, добре узгоджується з висотою бар'єру, визначеною екстраполяцією до $p=1$ температурної залежності висоти бар'єру, отриманої з ВАХ, і складає 1 еВ.

Четвертий розділ дисертації присвячено дослідженню міжфазних реакцій під дифузійним бар'єром у контакті $\text{Au-TiB}_x\text{-Ni-n-SiC 6H}$, встановлено що сам дифузійний бар'єр залишається стабільним до температур ШТВ при $T = 1000^\circ\text{C}$. Підтверджена гіпотеза про те, що основним механізмом формування омічного контакту є генерація на межі розділу у процесі міжфазних реакцій вакансій кремнію, що мають донорні властивості. Встановлено, що струмоперенос у контакті можна описати комбінацією термоелектронного та польового механізмів, а саме: термоелектронний через обмежені ділянки контакту і тунельний механізм на решті ділянок. Показано, що омічні контакти $\text{Au-TiB}_x\text{-Al-Ti-p-GaN-i-Al}_2\text{O}_3$ залишалися стабільними до температур ШТВ $T = 900^\circ\text{C}$. Після формуючого ШТВ у омічному контакті утворилися фази Al_3Ti , Al_2Ti , а також потрійні фази Ti_2AlN , Ti_3AlN , які ймовірно й визначали формування низькобар'єрного омічного контакту. У діапазоні

температур 80-150 К у контакті переважає термопольова емісія, вище 200 К переважаючою є термоелектронна емісія з висотою бар'єру близько 0,01 еВ.

У п'ятому розділі описано модель деградації світлодіодної матриці, електрично-теплову модель світлодіодного чіпа, розраховано параметри світлодіодних чіпів з експериментальних ВАХ, після чого на основі даних про розкид параметрів в одному модулі змодельовано розподіл температур між чіпами, їх деградацію та результуючу деградацію усієї світлодіодної матриці. Проведено дослідження світлодіодних модулів, на основі GaN до заливки їх люмінофором, а також режимів роботи омичних контактів у них. Виявлено значний розкид параметрів досліджених чіпів, зокрема чіпи з надмірними паразитними струмами та чіпи з підвищеними значеннями послідовного опору, що змінює перерозподіл струму в чіпах при паралельному їх включенні і призводить до більш жорсткого режиму роботи окремих чіпів. На основі дослідження ВАХ було показано, що деградаційні процеси в світлодіодних чіпах зумовлені дифузійними процесами в омичних контактах, під впливом розігріву розсіяною потужністю, що дозволило описати деградацію інтенсивності випромінювання світлодіода функцією активаційного типу. В результаті моделювання методом Монте-Карло часу напрацювання вибірки світлодіодних модулів від розкиду значень послідовного опору показано, що бінування партії чіпів по послідовному опору перед їх монтажем може дати приріст часу напрацювання в заданому режимі роботи до 10%.

Попри загальну високу оцінку роботи слід визначити її деякі упущення та висловити наступні зауваження і рекомендації:

1) Твердження, що складається з трьох частин, (вступ стор. 6) про те, що для боридів і нітридів тугоплавких металів, в порівнянні з чистими металами, заповнення міжзеренного простору аморфною речовиною, перешкоджає міжзеренному ковзанню при механічних навантаженнях, є причиною продовження дії механізму Хола - Петча до менших розмірів зерна, а також суттєво зменшує інтенсивність дифузії по границям зерен не є очевидним потребує детальнішого обґрунтування

2) В роботі досліджено два типи широкозонних напівпровідників з різними типами бар'єрних і омичних контактів. Нажаль, ні у загальних висновках до дисертації, ні у тексті самої дисертації чи авторефераті не порівнювалися характеристики різних бар'єрів з метою встановлення причин розбіжностей чи узгоджень, одержаних автором результатів.

3) На стор. 74 представлено рис 3.15, на який у тексті немає посилання.

4) На стор 103 у першому абзаці читаємо речення " Порівняння ВАХ світлодіодного модуля до і після напрацювання 9060 год при ТТО = 29 °С (рис. 5.9) показує зростання ефективної висоти бар'єра і величини послідовного опору ", однак ці криві йдуть практично поряд і наслідують одна одну, а ні у підписах ні на самому рисунку згадані у реченні параметри не представлені.

5) З температурних залежностей фактора ідеальності бар'єрів Шотткі до SiC і GaN (рис. 2, б і 4, б) для температур вищих 340 К зроблено висновок про переважання того ж самого термоелектронного механізму струмопереносу, хоча відносно теоретичної залежності, що описує польовий механізм вони відхиляються у різні сторони.

Вказані вище зауваження і рекомендації не є кваліфікаційними і тому не знижують загальне позитивне враження від роботи. Робота логічно викладена, містить чітко виписані вступні частини в кожному розділі і науково обґрунтовані висновки.

Сформульовані в дисертації положення та висновки представлені у 20 наукових публікаціях, серед яких 6 статей, опублікованих у фахових виданнях, і 14 тез доповідей на Українських та міжнародних наукових конференціях. Публікації повністю відповідають змісту дисертаційної роботи.

Автореферат за змістом відповідає дисертації.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота **Кудрика Р. Я.** “Електронні властивості тонкоплівкових нанорозмірних омичних та бар'єрних контактів до широкозонних напівпровідників GaN та SiC”, є завершеною науково-дослідницькою роботою, в рамках поставленого завдання вона виконана на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів. За рівнем, актуальністю, новизною, об'ємом дисертація відповідає вимогам Постанови КМ України "Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів" № 567 від 24.07 2013 р. (зі змінами згідно з Постановою КМ України № 656 від 19.08.2015 р., п 11-15), а її автор – Кудрик Роман Ярославович – заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.18 - фізика і хімія поверхні.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ;

доктор фізико - математичних наук, професор,
професор кафедри фізики і хімії твердого тіла
ДВНЗ “ Прикарпатський національний університет ”

Салія Я.П. Салій Я.П.

Підпис Салія Я.П. засвідчую :

Вчений секретар

ДВНЗ “ Прикарпатський національний університет ”



Стинська В.В. Стинська В.В.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефанива
ІДОР 03.02-11/100
31 10 16