

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

на правах рукопису

Кудрик Роман Ярославович

УДК 621.328.2

**ЕЛЕКТРОННІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОПЛІВКОВИХ
НАНОРОЗМІРНИХ ОМІЧНИХ ТА БАР'ЄРНИХ КОНТАКТІВ ДО
ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ GaN ТА SiC**

01.04.18 – фізика і хімія поверхні

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник: доктор
фізико – математичних наук,
професор
Стасюк Зиновій Васильович

Львів – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП	5
--------------------	----------

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНИХ СИСТЕМ ДО SiC ТА GaN

(літературний огляд)	11
1.1 Зонна діаграма контакту метал-напівпровідник.....	13
1.2 Властивості контактних систем для екстремальної електроніки.....	17
1.3 Особливості формування омичних контактів	19
1.3.1 Фізико-хімічні процеси в омичних контактах до SiC	20
1.3.2 Фізико-хімічні процеси в омичних контактах до GaN	26
1.4 Особливості формування бар'єрних контактів.....	28
1.4.1 Фізико-хімічні процеси в бар'єрних контактах до SiC	32
1.4.2 Фізико-хімічні процеси в бар'єрних контактах до GaN	33
1.5 Дифузійні бар'єри та температурна стабільність контактів.....	34
Висновки до розділу 1	35

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
2.1 Методика виготовлення зразків.....	37
2.2 Методи вимірювання питомого контактного опору.....	42
2.2.1 Лінійний метод TLM	42
2.2.2 TLM з радіальною геометрією контактів	45
2.2.3 Програмний розрахунок параметрів омичного контакту	47
2.3 Методи розрахунку основних параметрів бар'єрних контактів	51
2.3.1 Розрахунок параметрів бар'єру з ВАХ за Родеріком	52
2.3.2 Суть методу Норде	53
2.3.3 Характеристичний метод Ліна	54
2.3.4 Визначення висоти бар'єру методом Чонга	55
2.3.5 Метод Вернера	56
2.3.6 Методи Сато та енергії активації	57

2.3.7 Програмний розрахунок параметрів бар'єрного контакту.....	58
Висновки до розділу 2	59

РОЗДІЛ 3

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ БАР'ЄРНИХ КОНТАКТІВ	61
3.1 Морфологічні та електрофізичні властивості контактів до SiC	61
3.2 Морфологічні та електрофізичні властивості контактів до GaN	74
Висновки до розділу 3	81

РОЗДІЛ 4

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ	83
4.1 Фазові перетворення в омічних контактах до SiC.....	83
4.2 Омічні контакти на основі GaN	88
Висновки до розділу 4	92

РОЗДІЛ 5

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕГРАДАЦІЇ У СВІТЛОДІОДНИХ МОДУЛЯХ НА ОСНОВІ GaN	93
5.1 Визначення механізму струмоперенесення . Модель ВАХ.....	93
5.2 Температура р-п переходу у робочому режимі	99
5.3 Модель деградації світлодіодної матриці	100
Висновки до розділу 5	107

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	111
ДОДАТКИ	129

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСМ	атомна силова мікроскопія
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
ВАХ	вольтамперна характеристика
ВМН	внутрішні механічні напруги
ВФХ	вольтфарадна характеристика
ВБШ	висота бар'єру Шотткі
ДБШ	діод з бар'єром Шотткі
ЕОС	електронна Оже-спектроскопія
ІРТ	імпульсний регулятор температури
RIE	реактивне іонне травлення
НВЧ	надвисока частота
ПБС	поверхнево-бар'єрні структури
ПЕС	поверхневі електронні стани
TLM	метод лінії передачі (transmission line method)
CTLM	TLM з радіальною геометрією контактів, circular TLM
ЦАП	цифро-аналоговий перетворювач
ШТВ	швидкий термічний відпал

ВСТУП

Актуальність теми. В останнє десятиліття відбувається значний розвиток мікро- та оптоелектроніки на основі широкозонних напівпровідників. Системи енергоефективного освітлення на основі потужних нітридгалієвих світлодіодів, мікрохвильова та екстремальна електроніка є пріоритетними галузями, які інтенсивно розробляються та підтримуються урядами провідних країн.

Одним із важливих етапів у процесі вдосконалення технологій широкозонної електроніки є розробка надійних омичних та бар'єрних контактів. Особливо це стосується силових діодів із бар'єром Шотткі, для яких при високому рівні вхідної потужності дуже суттєвою стає термостабільність контактів. Структурні та фізико-хімічні властивості перехідного шару в контакт метал – напівпровідник зумовлюють як вихідні характеристики, так і надійність напівпровідникових приладів. Як наслідок 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, вольфраматів 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. Як показують попередні дослідження [1–2], механічна міцність і стабільність нанокристалічних шарів вища, ніж у полікристалічних. Перевагою боридів і нітридів тугоплавких металів у порівнянні з чистими металами є заповнення міжзеренного простору аморфною речовиною, що перешкоджає міжзеренному ковзанню при механічних навантаженнях, а

тому може суттєво зменшувати інтенсивність дифузії по границях зерен. Актуальним є дослідження механізмів деградації контактних багат шарових структур та вивчення механізмів струмоперенесення у контактах з дифузійними бар'єрами на основі нанокристалічних плівок дибориду титану.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація виконана відповідно до напрямку наукової діяльності кафедри фізичної та біомедичної електроніки в лабораторії фізичної електроніки НДЛ-12 Львівського національного університету імені Івана Франка за планом наукових держбюджетних тем: СБ-125Ф “Квантові і класичні розмірні ефекти в явищах перенесення заряду в нанорозмірних одно- та двошарових системах” (держреєстрація № 0112U001290), СБ-18ФК “Структура та електронні явища перенесення заряду у двокомпонентних плівкових системах в режимі квантового та квазікласичного розмірного ефекту” (держреєстрація № 0112U001290). Також робота виконувалася в інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України у рамках держбюджетної теми: № 31/4.2.3/17,33-13, “Розроблення методів дослідження контактних систем потужних світлодіодів”, державної цільової науково-технічної програми “Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі” (Постанова Кабінету Міністрів України № 632 від 9 липня 2008 р.).

Мета і завдання досліджень. Мета роботи полягала у вивченні механізмів процесів, що відбуваються в омичних та бар'єрних контактах з антидифузійними шарами на основі нанокристалічних плівок дибориду титану до широкозонних напівпровідників SiC та GaN. Відповідно до сформульованої мети та вимог щодо характеристик омичного та бар'єрного контактів для вказаних матеріалів вирішувалися наступні задачі:

- З'ясування фізичних та морфологічних властивостей контактних систем, що володіють підвищеною надійністю до високотемпературних обробок.
- Встановлення механізмів струмоперенесення в багат шарових

контактних структурах у широкому діапазоні температур.

- Реалізація оптимальних технологічних умов для отримання надійних контактів до SiC і GaN та детальне вивчення фізичних процесів, що виникають на межі розділу контактів.
- З'ясування впливу термічного відпалу на роботу омічних контактів у реальних напівпровідникових приладах.
- Моделювання впливу процесів деградації у контактних структурах на основі широкозонних напівпровідників.

Об'єкти дослідження – термічна стабільність, механізми деградації омічних та бар'єрних контактів до широкозонних напівпровідників та вплив морфології поверхні шарів на їхні електронні властивості.

Предмет дослідження – електрофізичні та морфологічні властивості омічних контактів та діодних структур з бар'єром Шотткі, виготовлених з використанням нанокристалічних антидифузійних шарів TiB_2 , до широкозонних напівпровідників на базі SiC, GaN.

Методи дослідження: вимірювання вольтамперних характеристик (ВАХ) у діапазоні температур 77-750 К, з метою визначення основних параметрів діодів Шотткі (висота бар'єру, фактор ідеальності та послідовний опір) та вивчення механізмів струмоперенесення в контактах; електронна Оже-спектроскопія (ЕОС) для визначення профілю розподілу компонентів у контактах; атомно-силова мікроскопія (АСМ) для аналізу морфології поверхні металу, напівпровідника та антидифузійного шару; вимірювання вольтфарадних характеристик (ВФХ) для визначення концентрації вільних носіїв заряду та висоти бар'єру в карбіді кремнію та нітриді галію; визначення питомого контактного опору для площадок з радіальною геометрією за методом довгої лінії (transmission line method, TLM), комп'ютерна статистична обробка результатів експерименту та моделювання фізичних процесів для дослідження залежності часу свічення вибірки модулів від розкиду параметрів світлодіодних чіпів у партії.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Показано, що домінуючим фактором, який визначає деградацію омичного та бар'єрного контактів з дифузійним бар'єром на основі дибориду титану до карбіду кремнію та нітриду галію, є руйнування дифузійного бар'єру під дією внутрішніх механічних напруг (ВМН), що виникають внаслідок невідповідності коефіцієнтів термічного розширення.
- Встановлено оптимальні розміри нанокристалітів (3-5 нм) у плівці дифузійного бар'єру, при яких набуває максимуму механічна міцність та термічна стійкість контакту загалом. Розроблені омичні контакти Au-TiB₂-Al-Ti-n-GaN виявилися стійкими до ШТВ при температурі T = 900 °C та Au-TiB₂-Ni-n-SiC(6H) - при температурі T = 1000 °C.
- Встановлено електрофізичні параметри діодів Шотткі з дифузійними бар'єрами на основі TiB₂ при оптимальних розмірах нанокристалітів до GaN та SiC.
- Виявлено, що у нітридгалієвих діодах Шотткі з нанокристалічним антидифузійним шаром основною компонентою струму прямозмещеного бар'єру Шотткі при кімнатній та нижчих температурах є тунельний струм.
- На основі експериментальних даних побудована модель деградації світлодіодного модуля, на базі якої можна досліджувати залежність часу свічення вибірки модулів від розкиду параметрів світлодіодних чіпів у партії.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Встановлено критерії формування механічно міцних та термічно стійких плівок дибориду титану з оптимальними розмірами кристалітів та експериментально підтверджено термічну стійкість омичних та бар'єрних контактів на їхній основі.
2. Розроблено та застосовано в експерименті програмне забезпечення (ПЗ) для оптимізації розрахунків контактного опору на основі TLM –

методів. Дане програмне забезпечення дозволяє здійснити розрахунки питомого контактного опору, питомого поверхневого опору, які є критичними для оцінки межі придатності різних методів розрахунку.

3. Створено програмне забезпечення для розрахунку параметрів діодів з бар'єром Шотткі (ДБШ) на основі вимірювань ВАХ, а саме величин фактора ідеальності, висоти бар'єру та послідовного опору.

Особистий науковий внесок дисертанта. Автор особисто здійснив пошук та аналіз літературних джерел, провів експериментальні вимірювання питомого контактного опору у широкому діапазоні температур. Брав участь у побудові та розрахунку моделей струмоперенесення, виконував дослідження температурної релаксації світлодіодних чіпів. Проводив вимірювання ВАХ та ВФХ. Здійснював обробку результатів, отриманих у ході експериментальних досліджень. Приймав участь у розробці програмного забезпечення для розрахунку параметрів ДБШ та омичних контактів. Дослідження, результати яких представлені в дисертації, виконані на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки Львівського національного університету ім. І. Франка та у лабораторії фізико-технологічних проблем твердотільної НВЧ електроніки ІФН НАН України ім. В.Є. Лашкарьова. Систематизація та узагальнення отриманих результатів проводилися спільно з науковим керівником – проф. Стасюком З.В. В обговоренні результатів досліджень брав участь к.ф.-м.н. Бігун Р.І. Автор вдячний д.т.н., проф. Конаковій Р.В. та чл.-кор. проф. Сорокіну В.М. за надані зразки та експериментальне обладнання, а також к.ф.-м.н Кучуку А.В за допомогу в рентгенографічних дослідженнях. Результати досліджень були апробовані автором на міжнародних наукових конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на:

- VI Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference “Electronics and Information Technologies” (Ukraine, Lviv, 2014);

- VIII Международная научно-техническая конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы физики” (Россия, Саранск, 2013);
- VI International Scientific and Technical Conference “Sensors electronics and microsystems technologies” (Ukraine, Odessa, 2014);
- XIV International Conference “Physics and technology of thin films and nanosystems” (Ukraine, Ivano – Frankivsk, 2013);
- XX Международный симпозиум “Передовые дисплейные и световые технологии” (Украина, Крым, 2012);
- Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА” (Україна, Львів, 2011, 2012, 2013);
- Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників “Лашкарівські читання” (Україна, Київ, 2012, 2013, 2014).

Публікації. Матеріали дисертації викладено у 20 наукових публікаціях, у тому числі в 6 статтях, опублікованих у фахових наукових журналах, зокрема, 1 з них, опублікована в журналі, внесеному до реєстру міжнародних наукометричних баз та матеріалах 14 міжнародних наукових конференцій.

Структура та об’єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів та висновків, додатків та списку використаних джерел. Робота викладена на 149 сторінках, містить 70 рисунків, 7 таблиць, 11 додатків. Бібліографічний список включає 161 джерело.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНИХ СИСТЕМ ДО SiC ТА GaN

(літературний огляд)

В останні десятиліття почався бурхливий розвиток екстремальної електроніки [1–8], що знаходить застосування в області високих потужностей (системи контролю двигунів електромобілів, конвертори електроенергії), високих напруг (електроенергетика), високих питомих потужностей (мініатюрні системи живлення, аерокосмічна електроніка), високих температур (для датчиків і більш економічного управління згорянням в двигунах автомобілів та реактивних літаків), терагерцевої (радіолокація і зв'язок) і радіаційно-стійкої (електроніка космічного призначення) апаратури. Для досягнення таких екстремальних параметрів роботи приладів, їх створюють на основі широкозонних напівпровідників, найчастіше значно переважаючих кремній за основними електро-і теплофізичними параметрами. У табл. 1.1 наведені основні параметри напівпровідникових матеріалів.

Таблиця 1.1

Параметри напівпровідникових матеріалів при 300 К [1, 7, 8].

Параметр	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Алмаз
Ширина забороненої зони, E_g , еВ	1,12	1,43	3,26	3,45	5,45
Критична напруженість електричного поля, E_{cr} , $\times 10^6 \cdot \text{В/см}$	0,29	0,4	2,4	3,3	10
Рухливість електронів μ_n , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1350	8500	880	1000	2200
Рухливість дірок μ_p , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	490	400	80	30	1800
Дрейфова швидкість насичення, v_{sat} , $\times 10^7 \text{ см/с}$	1,0	2,0	2,0	2,5	1,5
Теплопровідність, λ , $\text{Вт/см} \cdot \text{град}$	1,3	0,55	4,0	1,7	10
Діелектрична проникність, ϵ_s	11,9	13,1	10,1	8,9	5,7
Температура Дебая, T_D , К	645	360	1300	600	1860

Для аналізу перспективності використання напівпровідникового матеріалу в мікроелектроніці часто використовують *спеціальні критерії якості* [9] – це параметри, які характеризують ефективність застосування напівпровідника в тій чи іншій галузі мікроелектроніки. В таблиці 1.2. представлені критерії якості широкозонних напівпровідників для застосування їх в транзисторах.

Таблиця 1.2

Основні критерії якості деяких широкозонних напівпровідників, нормовані до кремнію [1, 7, 10].

Критерій	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Алмаз
JM	1	8	274	809	2675
KM	1	0,60	4,70	2,40	13,60
QF1	1	7,7	965	10^3	$246 \cdot 10^3$
QF2	1	11	7985	$1,2 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^6$
QF3	1	18	314	816	$32 \cdot 10^3$
BHFM	1	12	45	96	1938

- $JM = (E_{cr} v_{sat} / \pi)^2$ – критерій якості Джонсона, який визначає робочу границю продуктивності приладу (потужність і частота).
- $KM = \lambda (v_{sat} / \varepsilon_s)^{1/2}$ – критерій якості Кейеса, в ньому враховується швидкість переключання транзистора при роботі в якості логічного елемента мікропроцесора.
- $QF1 = \lambda \sigma_A$ – термічний KM – критерій якості з урахуванням термічних властивостей напівпровідника для активних зон потужних приладів.
- $QF2 = \lambda \sigma_A E_{cr}$ – критерій якості, враховує термічні властивості напівпровідника за умов ідеального тепловідведення.
- $QF3 \equiv \sigma_A = \varepsilon_s \mu E_{cr}^3$ – критерій Баліга для оцінки напівпровідникового матеріалу, пов'язаний з втратами при роботі потужних польових транзисторів. Застосовується для загальної оцінки можливостей

напівпровідникового матеріалу з точки зору низькочастотних приладів.

- $BHFM = \mu E_{cr}^2$ – критерій *Баліга*, використовується для оцінки властивостей напівпровідника з точки зору високочастотних приладів, враховуючи втрати пов'язані з переключенням.

З таблиць 1.1 та 1.2 можна зробити висновок, що очевидною є перевага широкозонних напівпровідникових матеріалів для розробки елементної бази силової електроніки, таких як алмаз, карбід кремнію (SiC) і нітрид галію (GaN), які до того ж перевершують кремній за усіма фізичними і хімічними властивостями: тепловій та радіаційній стійкості, механічній міцності, мають значну хімічну інертність, вищі граничні швидкості дрейфу носіїв струму, кращу теплопровідність і т.д. Проте, для того, щоб реалізувати в повній мірі весь потенціал напівпровідникового матеріалу в конкретному приладі, потрібно забезпечити відповідні за надійністю бар'єрні та омичні контакти.

Створенню надійних контактів до широкозонних напівпровідників з необхідними електрофізичними параметрами присвячено безліч дослідних робіт, однак проблема підвищення термічної стійкості омичних і бар'єрних контактів до нітриду галію та карбіду кремнію залишається важливою фізико-технологічною задачею.

1.1. Зонна діаграма контакту метал-напівпровідник

Розглянемо явища, які відбуваються при контакті напівпровідника з металом. Електрон утримується в твердому тілі за рахунок електростатичних сил. Для подолання цих сил і виходу за межі твердого тіла електрону необхідно виконати певну роботу. Найменша енергія, необхідна для виходу електрона за межі твердого тіла, називається роботою виходу.

При контакті металу з напівпровідником виникає контактна різниця потенціалів, яка визначається різницею їх робіт виходу. Припустимо, що робота виходу з металу буде більшою, ніж з напівпровідника з електронною

провідністю. Якщо привести в ідеальний контакт метал з напівпровідником, то в початковий момент, внаслідок різниці робіт виходу електронів з металу і напівпровідника, електрони спрямуються в метал. В результаті цього на поверхні металу утворюється негативний заряд, який перешкоджатиме подальшому переходу електронів в метал з прилеглого шару напівпровідника. У певний момент часу між металом і напівпровідником встановлюється деяка різниця потенціалів, яка врівноважує дифузійний потік електронів з напівпровідника в метал, що утворився за рахунок різниці робіт виходу, і дрейфовий потік електронів з металу в напівпровідник, що виник за рахунок електричного поля різниці потенціалів на контакті.

Приконтактний шар, збіднений основними носіями заряду, володіє підвищеним опором. Його називають областю просторового заряду (ОПЗ). Електричне поле, що виникає в результаті наявності ОПЗ, викривляє енергетичні зони приконтактного шару напівпровідника. У рівноважному стані системи метал-напівпровідник електрону напівпровідника для проходження межі розділу необхідно подолати потенціальний бар'єр.

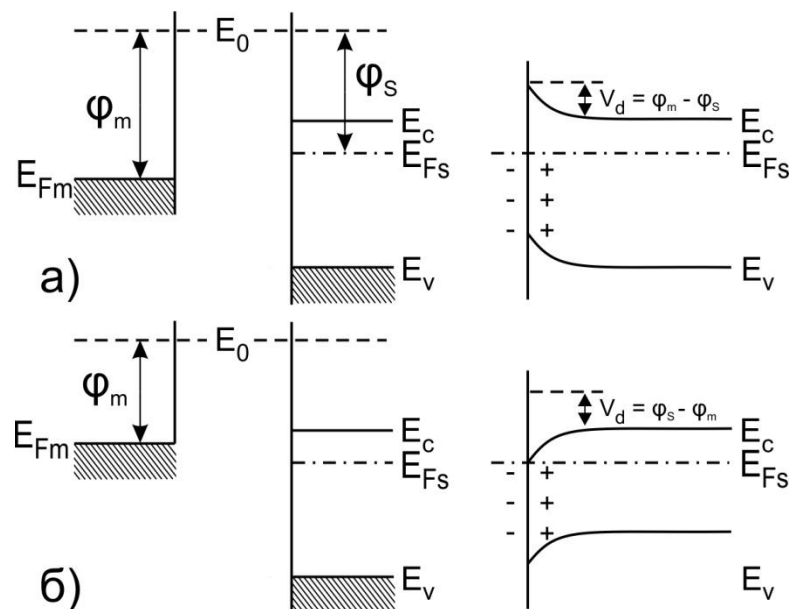


Рис. 1.1. Зонні діаграми контакту метал-напівпровідник

На рис. 1.1, а) зображена зонна діаграма металу і напівпровідника при $\varphi_m > \varphi_s$, де φ_m і φ_s – робота виходу електрона у вакуум з металу і напівпровідника відповідно, E_v – стеля валентної зони; E_{FM} і E_{FS} – рівень Фермі в металі та напівпровіднику відповідно; E_c – дно зони провідності; $\varphi_b = (\varphi_m - \chi)$ – висота бар'єру, χ – електронна спорідненість напівпровідника. Величина $\varphi_m - (\chi + qV_n)$ – контактна різниця потенціалів, де q – заряд електрона [11].

При контакті металу з напівпровідником завдяки описаним процесам у системі встановлюється динамічна рівновага з вирівнюванням рівнів Фермі металу та напівпровідника і утворенням контактної різниці потенціалів, рівної різниці робіт виходу. Якщо робота виходу електрона з металу менша роботи виходу з електронного напівпровідника ($\varphi_m < \varphi_s$), то після з'єднання електрони з металу спрямуються в напівпровідник, збагачуючи приконттактний шар напівпровідника основними носіями заряду і тим самим створюючи шар в напівпровіднику з підвищеною провідністю, який називають збагаченим шаром. Енергетична схема контакту метал-напівпровідник для цього випадку представлена на рис. 1.1б.

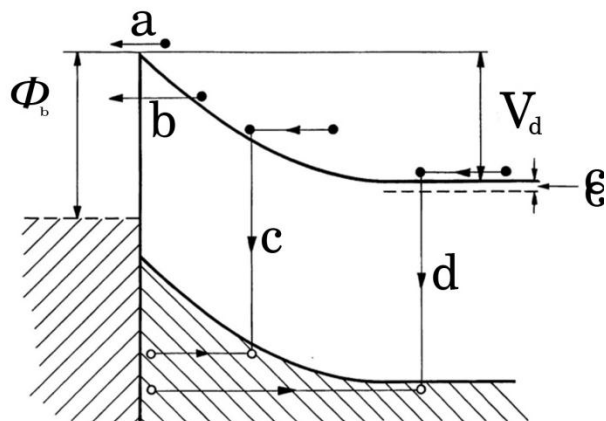


Рис.1.2. Зонна діаграма ідеального контакту метал-напівпровідник з прикладанням зовнішньої напруги: термоелектронна емісія (а), польова та термопольова емісія (b), рекомбінація в області просторового заряду (с) і нейтральній області (d).

На рисунку 1.2 показано зонну діаграму ідеального контакту метал-напівпровідник з прикладанням зовнішньої напруги: рух носіїв заряду можливий над бар'єром – (термоелектронна емісія) (а), крізь бар'єр (b) – (польова емісія – на рівні Фермі, термопольова емісія – на енергетичних рівнях, вищих рівня Фермі) і під бар'єром – рекомбінація в області просторового заряду (с) і нейтральній області (d) [11].

Для визначення домінуючого механізму струмоперенесення Падовані і Стретонам [11] була введена характеристична енергія E_{00} :

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \left[\frac{N_D}{m^* \varepsilon_{sa}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1)$$

де N_D – концентрація донорів, м^{-3} ; m^* – ефективна маса електронів в напівпровіднику; $\varepsilon_{sa} = \varepsilon_s \varepsilon_0$ – абсолютна діелектрична стала напівпровідника; $\hbar$ – модифікована стала Планка; ε_0 – діелектрична стала.

Враховуючи значення сталих, параметр Падовані-Стретона визначається [12]:

$$E_{00} = 18,5 \cdot 10^{-15} \left(\frac{N_D}{m_s \varepsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.2)$$

Де: $m_s = \frac{m^*}{m_0}$ – відношення ефективної маси електрона m^* до маси спокою електрона m_0 . За умови $E_{00} \ll kT$ основним механізмом струмоперенесення є термоелектронна емісія. Якщо $E_{00} \gg kT$, то основною є польова емісія. При $E_{00} \approx kT$ основною являється термопольова емісія [11]. У випадку термоелектронної емісії вольтамперна характеристика (ВАХ) описується формулою:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_b}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right), \quad (1.3)$$

де: J – густина струму, A^* – ефективна стала Річардсона, T – температура, k – стала Больцмана, V – напруга.

При польовій емісії перехід носіїв заряду через межу розділу метал-напівпровідник відбувається через потенційний бар'єр на рівні Фермі, що досягається створенням за допомогою сильного легування приповерхневого шару напівпровідника вузького потенційного бар'єру. ВАХ в цьому випадку описується рівнянням [11]

$$J = J_s \left(\exp \frac{qV}{E_{00}} \right). \quad (1.4)$$

При термопольовій емісії перехід носіїв заряду здійснюється через вершину бар'єру і ВАХ в цьому випадку визначається співвідношенням [12]:

$$J = J_s \left(\exp \frac{qV}{E_0} \right), \quad (1.5)$$

$$\text{де: } E_0 = E_{00} \cosh \left(\frac{qE_{00}}{kT} \right).$$

Як бачимо у всіх трьох випадках можна описати ВАХ залежністю виду:

$$J = J_s \left(\exp \frac{qV}{n(T)kT} \right). \quad (1.6)$$

При цьому для ідеального випадку термоелектронної емісії $n=1$, для випадку термопольової емісії $n = E_{00}/kT \cdot \cosh(E_{00}/kT)$, для польової емісії $n = E_{00}/kT$. Тобто є можливість дослідження механізму струмоперенесення у контакті шляхом дослідження температурної залежності фактора ідеальності.

1.2.Властивості контактних систем для екстремальної електроніки

Контакти між напівпровідником і металом широко використовуються для формування зовнішніх струмопідводів напівпровідникових приладів. Розрізняють невідправляючі та відправляючі контакти. Тип контакту визначається роботою виходу електронів з металу в напівпровідник, типом і концентрацією домішок у ньому, а також, в деяких випадках, густиною поверхневого заряду на межі розділу метал-напівпровідник.

Невипрямляючий (омічний) контакт являє собою лінійну симетричну вольтамперну характеристику (ВАХ) в робочому діапазоні струмів. Основними характеристиками омічного контакту є питомий контактний опір та його температурна залежність, максимальна робоча температура, стійкість до радіаційних, хімічних, механічних та інших факторів деградації, що впливають на контакт у процесі його роботи. Для визначення величини питомого контактного опору використовують модифікації методу TLM, чотирьохточкового методу, методу Кельвіна та інші методи. Детальніший опис яких подано нижче, п.1.3.1. Крім низького контактного опору контакт також повинен володіти рядом інших важливих якостей, а саме:

- термостабільність – у робочому діапазоні температур не повинно спостерігатися міжфазних реакції та дифузійного розмиття шарової структури;
- стійкість до впливу робочих густин струмів (що особливо важливо для потужних діодів Ганна та лавинопролітних діодів);
- контакт також має бути стабільний і по відношенню до інших спеціальних деградаційних факторів, що можуть проявлятися при його експлуатації (іонізуюче, мікрохвильове та ультразвукове випромінювання);
- механічні напруження в металічних шарах мають бути мінімізовані;
- процеси виготовлення повинні бути сумісні із загальною схемою виготовлення самого пристрою.

У п. 1.3.1 та 1.3.2 подано огляд результатів досліджень омічних контактів до карбіду кремнію та нітриду галію, а також показані способи створення омічних контактів високої якості.

Випрямляючий (бар'єрний) контакт має асиметричний вигляд ВАХ. Залежно від механізму струмоперенесення ВАХ може приймати різний вигляд.

Основними характеристиками бар'єрного контакту є:

- фактор ідеальності і його температурна залежність;
- висота бар'єру;
- максимальна робоча температура;
- стійкість до радіаційних, хімічних, механічних та іншим факторів деградації, що впливають на контакт в процесі його роботи.

Огляд результатів досліджень бар'єрних контактів до карбіду кремнію та нітриду галію подано у п. 1.4.1 та 1.4.2 Також показані способи створення бар'єрних контактів з заданими електрофізичними параметрами.

1.3 Особливості формування омічних контактів

У залежності від призначення омічного контакту і вимог до його параметрів він може складатися з одного або декількох шарів, що несуть різні функціональні призначення:

контактоутворюючий шар – шар металу, сплаву або сполуки, що формує потенційний бар'єр з напівпровідником;

підлегуєчий шар – тонкий шар, який дифундує в процесі відпалу, створює в приповерхневому шарі напівпровідника підвищену концентрацію для стимулювання процесу тунельного механізму струмоперенесення в контакті і, як наслідок, зниження контактного опору;

адгезійний шар – тонкий, зазвичай металічний, шар між антидифузійним і контактоутворюючим шаром або між контактоутворюючим і зовнішнім шаром металізації, слугує для підвищення змочування нижнього шару матеріалом, який наноситься після адгезійного шару і підвищення механічної міцності контакту, попереджуючи деламінацію (розшарування);

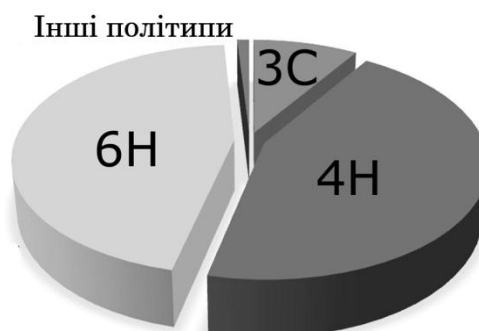
антидифузійний шар – шар, що слугує бар'єром для протікання взаємодифузії між контактоутворюючим і зовнішнім шаром металізації [13];

шар зовнішньої металізації – шар, що використовується для утворення міжшарових субзв'язків, контактопідводів та ін.

1.3.1. Фізико-хімічні процеси в омічних контактах до SiC

Із майже 170 відомих політипів карбіду кремнію лише три широко досліджуються з метою створення до них омічних контактів (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Співвідношення кількості опублікованих результатів по омічних контактах до різних політипів карбіду кремнію [7, 12–14, 20, 29 – 31, 39 – 42, 45 – 50, 115].



Власне розробці технології виготовлення омічних контактів до карбіду кремнію присвячено досить велику кількість робіт. Дослідниками була показана можливість використання в якості матеріалу для контактів цілого ряду металів, сплавів і сполук. Проте, аж до теперішнього часу, спостерігаються суттєві відмінності в експериментальних результатах, отриманих різними авторами, навіть при використанні однакових контактних систем на напівпровідникових пластинах однакового політипу і легування. Причини таких розходжень зумовлені різною технологією виготовлення контактів. На перший план виходить проблема обробки та систематизації отриманих результатів з метою отримання оптимальних матеріалів і параметрів виготовлення контакту для конкретних технологічних завдань. Уже неодноразово були проведені спроби вирішити цю проблему [15–19] і, як наслідок, до сьогодення з'явилося багато нового фактологічного матеріалу, що дозволяє по-новому поглянути на процес і механізми формування омічного контакту та виробити рекомендації з технології його виробництва.

Базова технологія включає підготовку поверхні напівпровідникової пластини, пошарове нанесення контакту з його подальшим відпалом. Підготовка напівпровідникової пластини. У додатку А.1 представлені типові

розчини, їх концентрації та тривалості обробки для проведення хімічної очистки. Сам процес, зазвичай, полягає в попередньому очищенні пластини по RCA методиці або за методикою Хуанга (ті ж розчини, але подвоєний час експозиції [20]). RCA (аббревіатура означає назву фірми) – стандартний набір технологічних операцій з очищення напівпровідникових пластин, що включає три етапи:

- видалення органічних забруднень (SC1);
- видалення оксидів (SC2);
- видалення іонних залишків (SC3).

Травлення буферного оксиду (Buffered oxide etch, BOE) найчастіше проводять травником буферного оксиду (див. додаток А.1). Травник буферного оксиду, також відомий як буферений HF або BHF – розчин, що в основному застосовують в травленні тонких плівок діоксиду кремнію (SiO_2), нітриду кремнію (Si_3N_4) та карбіду кремнію (SiC). Він являє собою суміш з 40% розчину NH_4F та HF з концентрацією 49 % у пропорції, що становить 7: 1. Даний розчин буде травити шар оксиду зі швидкістю приблизно 2 нм за секунду при температурі $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$. Збільшуючи температуру, можна керувати швидкістю реакції, а безперервне перемішування розчину під час травлення допомагає підтримувати гомогенний стан розчину.

Перед зняттям буферного оксиду можливе нанесення фоторезистивної маски. Наступним етапом очищення є промивка в деіонізованій воді (DI) і сушка в потоці азоту (сухий N_2), після чого пластина завантажується у вакуумну камеру. Підготовка напівпровідникової пластини перед нанесенням металізації може визначати параметри сформованого омичного контакту, особливо при знижених температурах термічного відпалу [21-28].

Нанесення металізації здійснюють пошарово магнетронним або електронно-променевим розпиленням мішені, рідше – термічним випаровуванням. Термічний відпал є завершальним етапом формування омичного контакту, що проводиться переважно у вакуумі, розрідженій

інертній або злегка відновлюючій атмосфері. Зазвичай для формування контактів використовують термічну обробку тривалістю 1-15 хв. Час термообробки є компромісом між тривалістю виробничого циклу і розкидом параметрів між партіями. Нижче проаналізуємо результати для найбільш вдалих омічних контактів для кожного з політипів напівпровідників.

n-4H SiC

Розглядаючи склад контактоутворюючих шарів (контактоутворюючий + підлегуєчий) омічних контактів до n-SiC(4H), можна бачити, що переважно використовується нікель та його сполуки, рідше Ti, Al. На рис. 1.4 зібрані результати вимірювання питомого опору для різних контактних металізацій, методів нанесення і термічної обробки контактів.

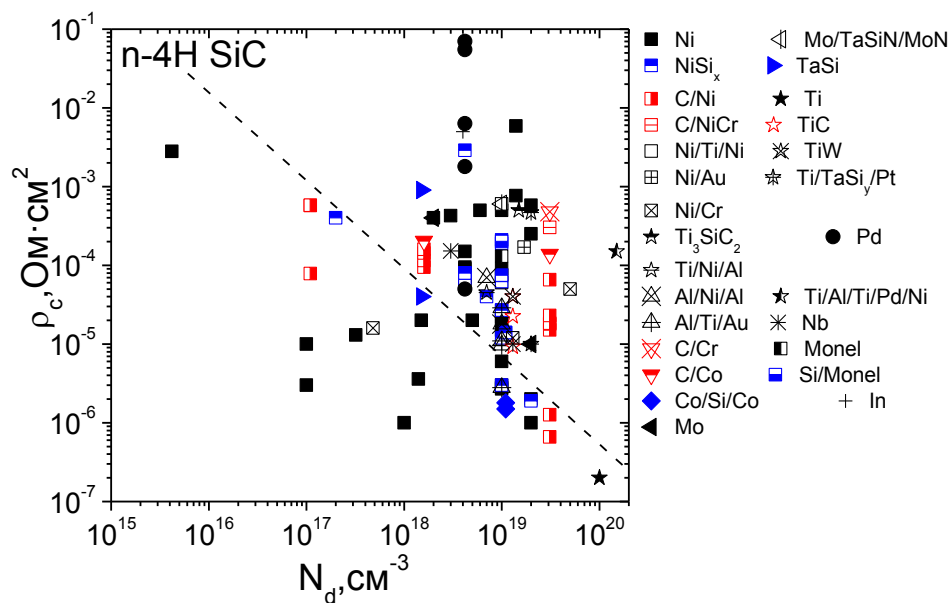


Рис. 1.4. Питомий опір контактів до n- SiC(4H) [7, 12, 14, 20, 39–41, 46, 50, 115–119].

Теоретичні моделі мінімально досягнутої межі питомого контактного опору при певних механізмах струмоперенесення [29, 30, 31] підтверджують певну емпірично-зворотну залежність питомого контактного опору від концентрації домішки в напівпровіднику. Для подальшого аналізу будемо

розглядати контакти нижче емпіричної залежності, вказаної пунктиром на рис. 1.4. Такі контакти будемо називати контактами високої якості, за якими і будемо визначати необхідні особливості обробки напівпровідникової пластини, параметри нанесення і види контактної металізації. І, як впливає з даного рисунку, на момент написання огляду, кращі омічні контакти в широкому діапазоні концентрацій отримують з використанням Ni, NiCr, NiSi_x металізації і з використанням графітизації поверхні з подальшим нанесенням Ni. При високих концентраціях легування напівпровідника хороші омічні контакти отримують з контактною металізацією на основі Ti, AlTi і силіцидів кобальту і танталу. Результати зібрані і представлені в додатку А.2.

Спроби покращення омічного контакту на основі нікелю до SiC(4H) відбуваються в декількох напрямках:

- На основі ідей про те, що основну роль у формуванні контакту відіграють силіцидні фази, запропоновано використання готових силіцидів або мультишарів Ni / Si [12, 14, 20, 32, 33, 45, 46]. Однак, як показали результати цих досліджень, омічний контакт високої якості можна отримати лише за тих умов, коли є недостатньо кремнію в мультишарах. Можливим поясненням цього є суттєва роль вакансій кремнію в процесі формування контакту [34–36] або присутність на межі розділу вуглецевої нанокристалічної фази. З іншого боку, температурна стабільність контактів на основі силіцидів вища [37, 38] за рахунок менш інтенсивних міжфазних реакцій і, як наслідок, простежується присутність більш різкої межі розділу між контактною металізацією та напівпровідником.

- Інша теорія віддає перевагу у процесі формування омічного контакту вуглецевій нанокристалічній фазі [32, 33, 39–44]. У цих роботах запропоновано формування вуглецевого контактоутворюючого шару. Такий підхід також дозволяє отримати хороший омічний контакт у широкому діапазоні концентрацій, однак на даний час ні за першим, ні за другим напрямом ще не вдалося створити омічний контакт з опором нижчим, ніж

для зразків контактів на основі чистого нікелю. З іншого боку, як відзначають І. П. Нікітіна і співавтори [45], формування омичного контакту може бути не пов'язане ні з формуванням силіцидів нікелю, ні з формуванням вуглецевої фази на межі розділу. Вищезгадані автори переконані, що причиною формування омичного контакту є позитивно заряджені вакансії вуглецю в приконтактній області, які утворені в процесі міжфазних реакцій між карбідом кремнію і нікелем.

З метою підвищення термічної стабільності (стійкість до окислення) нікелевого контакту запропоновано використання нікелевих сплавів, зокрема з хромом [46, 47, 7].

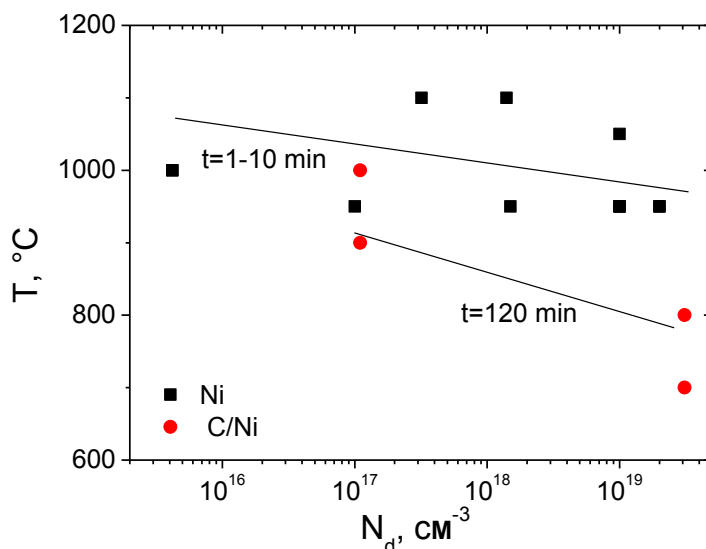


Рис. 1.5. Параметри відпалу контактів на основі нікелю (результати із додатку А.3).

Найкращі результати за питомим опором у цих контактах наближаються до значень показників контактного опору нікелевих контактів. Оптимальний діапазон параметрів відпалу нікелевих омичних контактів можна визначити із рис. 1.5 (додаток А.3). Тривалість відпалу має бути в діапазоні $t = 1-10$ хв при $T = 1100-950$ °С, а для $t = 120$ хв температура відпалу має становити $T = 850-900$ °С. Серед інших контактних металізацій використовують силіциди тугоплавких металів (Ta, Co) і AlTi сплав. Як

показано в [47], термічна стабільність контактів на основі AlTi нижче нікелевих при однаковій величині контактної опору.

n-6H SiC

Результати по SiC(6H) політипу в багато чому подібні до параметрів контактів до SiC(4H). Широко використовуються контакти на основі нікелю і його силіцидів на основі вуглецевої плівки, карбіду танталу (додаток А.2). Особливістю є створення контактів шляхом нарощування додаткового шару карбіду кремнію [48, 49].

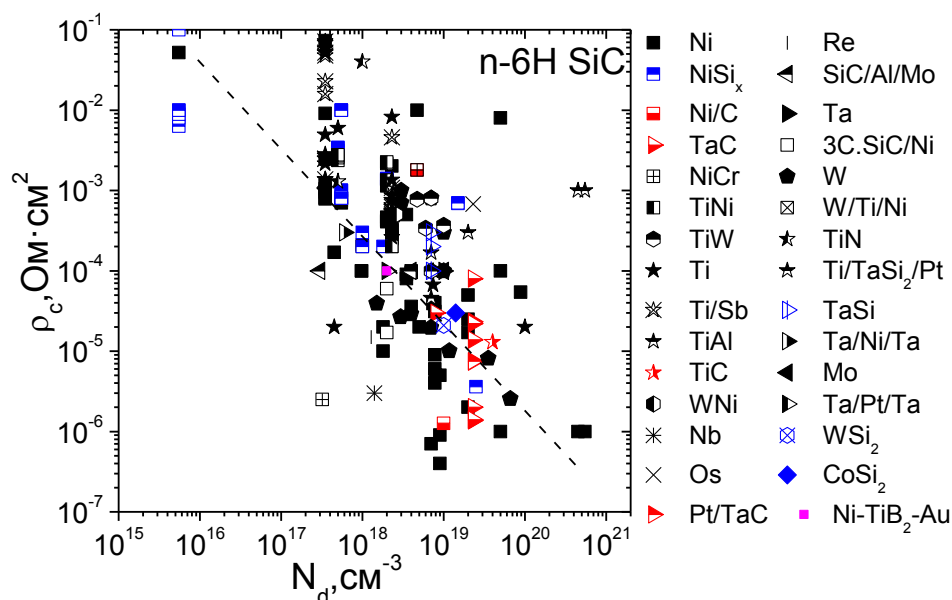


Рис. 1.6. Питомий контактний опір до n-SiC(6H) [7, 14, 20, 42, 45, 46, 48, 49, 61,62,115].

Можливими механізмами утворення такого контакту називають утворення надлишку вуглецю на межі розділу метал-нанесений карбід кремнію [50] та утворення варизонних структур при нанесенні карбіду кремнію кубічної структури на гексагональний SiC(6H) [49]. Перспективними контактними металами також є Re, Nb і Ti, які утворюють контакт, опір якого наближається до значення опорів для Ni і NiCr (рис. 1.6).

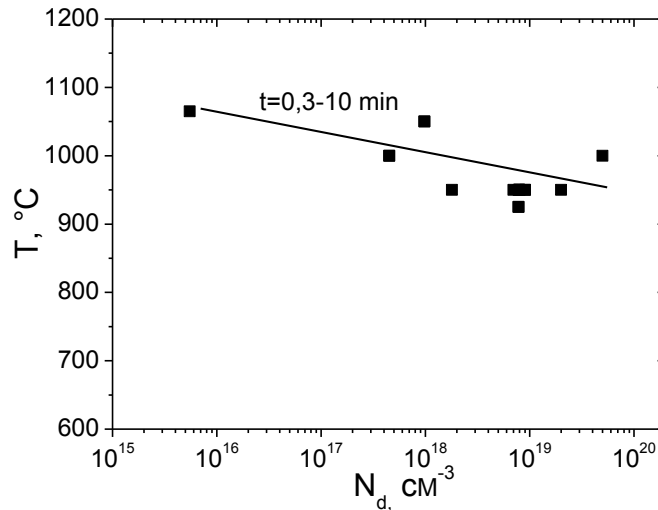


Рис. 1.7. Параметри відпалу контактів на основі никелю до n-SiC(6H) (результати із додатку А.3).

Оптимальними параметрами відпалу рис. 1.7 для нікелевих контактів є:
 $T = 950 - 1000$ °C, $t = 2 - 10$ хв (результати із додатку А.3).

1.3.2 Фізико-хімічні процеси в омичних контактах до GaN

Нітрид галію здійснив революцію в галузі освітлення і в майбутньому може зайняти одне з лідируючих місць в області НВЧ і КВЧ електроніки [51]. Серед параметрів, що виділяють його з ряду інших, слід вказати високі значення критичної напруженості електричного поля і дрейфової швидкості насичення (див. табл. 1.1). З таблиці. 1.2 можна побачити, що в більшості критеріїв якості GaN поступається лише алмазу, що вказує на перспективність нітриду галію як основи для створення НВЧ і КВЧ активних елементів.

Основою проблемою нітридгалієвої опто- та мікроелектроніки є відсутність власних підкладок великого розміру, на даний момент створені 4 та 6 – дюймові пластини, які ще досить дорогі. Основна частина досліджень омичних контактів проведена на епітаксійних плівках, вирощених на сапфірі, що відображає тенденцію його масового використання [52, 53]. Вирощування

нітриду галію на чужорідних підкладках породжує масу проблем, пов'язаних з дефектністю (10^7 - $10^{10} \cdot \text{см}^{-2}$), механічними напруженнями і надійністю приладу в цілому. Властивості і надійність омичних контактів в таких умовах є одними з основних технологічних проблем нітридгалієвої електроніки.

Аж до цього часу спостерігаються суттєві відмінності у властивостях омичних контактів, отриманих різними авторами навіть при використанні однакових контактних систем на напівпровідникових пластинах однакового типу та легування, зумовлені різною технологією виготовлення. Виникає проблема обробки та систематизації отриманих результатів з метою отримання оптимальних матеріалів і параметрів виготовлення омичного контакту до нітриду галію для конкретних технологічних завдань.

Зазвичай підготовка напівпровідникової пластини подібна до вищеописаної для карбіду кремнію. Хімічні реактиви, що застосовуються для очищення підкладок GaN, подано у додатку А.4. Після очищення пластина завантажується у вакуумну камеру, де можуть відбуватися завершальні процеси очищення, наприклад, шляхом реактивного іонного травлення (RIE).

Завершальним етапом формування омичного контакту є термічний відпал, який зазвичай виконується у вакуумі, розрідженій інертній або злегка відновній атмосфері. Для нітриду галію пріоритетною є азотна атмосфера [53].

Зазвичай для формування контактів використовують термічну обробку тривалістю від 1 до 15 хв. Час процесу термообробки є компромісом між тривалістю виробничого циклу і розкидом параметрів між партіями. На рис. 1.8 показані параметри омичних контактів до n-GaN, виготовлених за різними технологіями (див. додаток А.5).

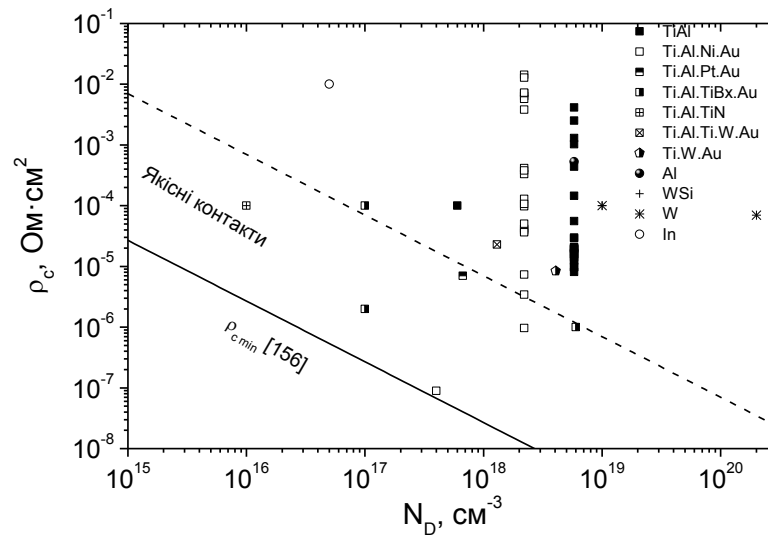


Рис. 1.8. Залежність питомого контактного опору від концентрації домішки омічних контактів до n-GaN.

Найкращі значення контактних опорів отримують при ШТВ: з параметрами $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 0,5\text{ хв}$. Розглядаючи фазову діаграму Al-Ti (додаток А.6), можна побачити, що найімовірніше цілком достатнім є відпал вище $T = 665\text{ }^{\circ}\text{C}$, проте при зниженні температури відпалу для отримання оптимального контактного опору необхідною умовою є підвищення його тривалості. Так для температури відпалу $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ оптимальний час складає $t = 10\text{-}20\text{ хв}$.

1.4 Особливості формування бар'єрних контактів

У випадку ідеального контакту метал-напівпровідник передбачається, що на границі розділу відсутні поверхневі стани й утворення третьої фази (оксиди й інші хімічні сполуки). При цьому, якщо робота виходу напівпровідника φ_s менша ніж робота виходу металу φ_m , відбувається формування потенціального бар'єру. Його висота визначається різницею між роботою виходу металу й електроною спорідненістю напівпровідника. Відповідно в напівпровіднику утворюється збіднена область, а висота бар'єру φ_b залежить як від параметрів напівпровідника, так і від параметрів металу. Цей випадок називається межею

Шотткі і на практиці реалізується на поверхні напівпровідника, отриманий сколом у високому вакуумі з наступним нанесенням на неї металу. Тоді φ_b пропорційна φ_m .

На поверхні напівпровідникових кристалів завжди присутні дефекти кристалічних ґраток. Крім того, на границі розділу реальних контактів завжди існує тонкий перехідний шар, сформований за рахунок залишкових забруднень, окисних плівок і продуктів хімічної взаємодії металу з напівпровідником. З цих причин в області контакту метал-напівпровідник існують поверхневі стани, що характеризуються густиною й енергетичним рівнем (рис. 1.9).

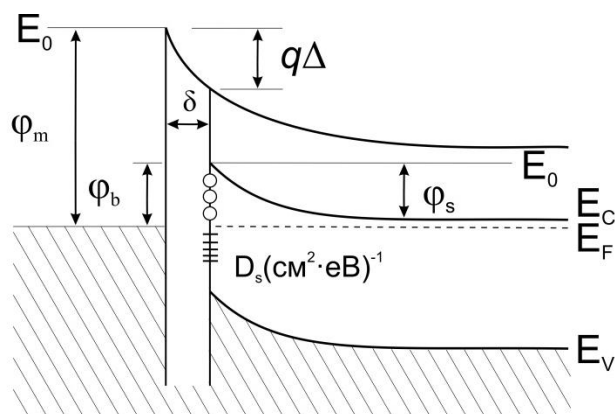


Рис. 1.9. Зонна діаграма контакту метал-напівпровідник з граничним шаром.

У граничному випадку контактна різниця потенціалів $(\varphi_b - \varphi_m)$ буде компенсуватися зарядом поверхневих станів і φ_b не буде залежати від φ_m . Цей випадок називається межею Бардіна. Результируюча величина φ_b реального контакту метал-напівпровідник зумовлюється як межею Шотткі, так і межею Бардіна. За відсутності прикладеної напруги висота бар'єра φ_b^0 визначається виразом [54]:

$$\varphi_b^0 = \gamma(\varphi_m - \chi) + (1 - \gamma)(E_g - \varphi_0) - \Delta\varphi_b + \Delta\varphi_s, \quad (1.7)$$

де φ_0 – енергетичний рівень поверхневих станів; ε_i – діелектрична проникність граничного шару; δ – товщина граничного шару; χ – електронна спорідненість напівпровідника; E_g – ширина забороненої зони, тому:

$$\gamma = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0}{\varepsilon_i \varepsilon_0 + q^2 D_s \delta}. \quad (1.8)$$

Безрозмірний параметр γ змінюється від 0 до 1 і залежить від густини поверхневих станів D_s та товщини діелектричного проміжку δ .

Якщо $qD_s\delta \gg \varepsilon_i$, то $\gamma \ll 1$, і реалізується межа Бардіна. Якщо $qD_s\delta \ll \varepsilon_i$, то $\gamma \approx 1$, і реалізується межа Шотткі.

Величина $\Delta\varphi_b = q \left[\frac{q^2 (N_D - N_A)(\varphi_b - kT)}{8\pi^2 \varepsilon_d^2 \varepsilon_s \varepsilon_0^2} \right]^{1/4}$ – пониження висоти бар'єру за рахунок сил зображення.

Як показано в роботі Сінгха і Кумара [55], для широкозонних напівпровідників цей вираз не цілком відповідає експериментальним результатам. Ними було запропоновано співвідношення:

$$\Delta\varphi_b = aE_{av}^{1/2} + b, \quad (1.9)$$

де E_{av} – усереднене електричне поле на контакті Шотткі, a, b – константи. Для часто використовуваних металів в карбідкремнієвих ДБШ, титану та нікелю значення a і b відповідно:

$$a = 3.63 \cdot 10^{-4} (Vcm)^{1/2} \text{ і } b = -0.034V \text{ для Ti;}$$

$$a = 1.54 \cdot 10^{-4} (Vcm)^{1/2} \text{ і } b = 0.638V \text{ для Ni;}$$

Величина:

$$\Delta\varphi_\delta = \frac{\gamma^2 \varphi_d}{2} - \gamma \varphi_d^{1/2} \left[\gamma(\varphi_m - \chi) + (1 - \gamma)(E_g - \varphi_0) - (E_F + kT) + \frac{\gamma^2 \varphi_d}{4} \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

– підвищення висоти бар'єру за рахунок діелектричного проміжку, де:

$$\varphi_d = \frac{2q^2 \varepsilon_s (N_D - N_A) \delta^2}{\varepsilon_i^2 \varepsilon_0}.$$

За умови достатньо тонкого перехідного шару в співвідношенні (1.7) залежністю останнього члена від φ_m можна знехтувати. Тому, звичайно, при інтерпретації результатів експерименту використовують співвідношення:

$$\varphi_b = \gamma \varphi_m + C, \quad (1.11)$$

де γ – параметр пінінгу.

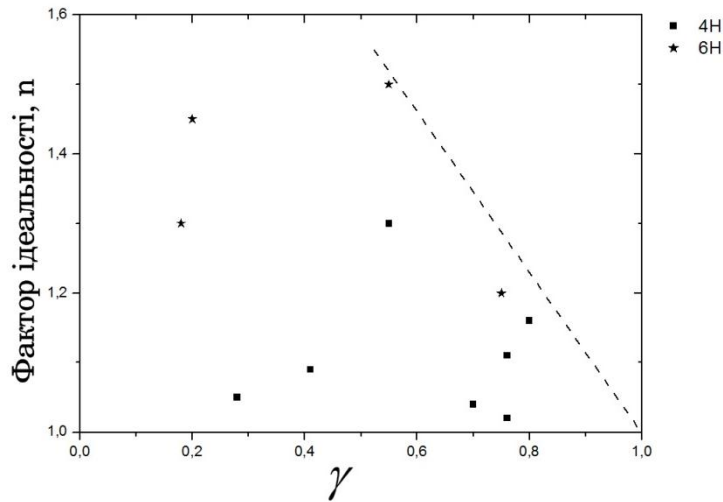


Рис. 1.10. Залежність фактора ідеальності від параметра пінінгу- γ .

У роботах S.Нара і співавторів [56, 57] показана залежність параметра γ не тільки від умов обробки поверхні, що впливають за допомогою зміни концентрації поверхневих станів і величини діелектричного зазору, але і від фактора ідеальності конаткта Шотткі (що можливо, згідно Родеріка, за допомогою товщини діелектричного проміжку). Ними була виявлена зворотна залежність між висотою бар'єру і фактором ідеальності в кожній з партій досліджених контактів. Це дало можливість екстраполювати залежність $\phi_b(n)$ до точки $n = 1$, отримавши нове значення ϕ_b . Лінійна залежність ϕ_b від n означає також лінійну залежність $\gamma \equiv \Delta\phi_b/\Delta\phi_m$ від n . Однак на γ впливають і інші фактори, від яких n не залежить (див. рис. 1.10).

Загальним параметром, що зв'язує γ і n є, згідно з нашим припущенням, є товщина діелектричної прошарку – δ (див. ф-лу 1.8). Залежність фактора ідеальності від товщини діелектричного прошарку розглянута Стріхою [58]. Детальніше роль фактора ідеальності та інших параметрів контакту в електрофізичних процесах буде розглянута у другому розділі, зараз же нам достатньо висновку, що для оцінки якості технології створення бар'єрного контакту можна використовувати параметри γ і n .

1.4.1. Фізико-хімічні процеси в бар'єрних контактах до SiC

Істотною перевагою карбіду кремнію є можливість створення бар'єрних контактів з високими напругами пробою. Ростові дефекти у вигляді отворів, так звані мікропайпи (micropipes), до 90-х років були переважними дефектами, які обмежували можливість створення приладів з великою площею, та високими значеннями пробивної напруги [59]. В даний час ця проблема, за великим рахунком, є вирішена і в комерційних підкладках основну роль відіграють дефекти упаковки [60].

На сьогоднішній день типова металізація, яка застосовується для створення контактів Шотткі до n-SiC, включає Ni або Pt, що формують високий бар'єр (близько 1.1 - 1.6 eV, залежно від політипу і способу обробки), однак їх температурна стабільність відносно низька. Для високотемпературних застосувань досить часто використовуються контакти на основі вольфраму (W, WC, WN, TiW), нітриди та борида тугоплавких металів.

У додатках А.7, А.8 представлені результати досліджень параметра γ згідно з даними різних авторів, залежно від способу обробки. В основному, для очистки поверхні напівпровідникової пластини перед нанесенням бар'єрного контакту використовують ті ж реактиви, що і для омичного контакту (додатки А.1, А.7, А.8). Помітно, що остання стадія – кип'ятіння в деіонізованій воді – дає вагомий приріст γ [56, 57]. Якщо поверхня карбіду кремнію не була захищена буферним оксидом, часто практикують окислення з наступним травленням поверхневого шару [56, 57, 63–65]. Деякими авторами використовувався відпал напівпровідникової пластини до температур $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ безпосередньо в камері напилення в якості завершального етапу очистки [64, 65].

Відпал сформованих бар'єрних контактів може значно змінювати їх характеристики. При підвищенні температури відпалу спочатку, особливо в контактах з низьким γ , відбувається покращення параметрів: підвищення γ ,

зменшення n та підвищення пробивної напруги [66]. Проте подальше зростання температури відпалу призводить до деградації контакту. Оптимальна температура відпалу специфічна для кожного матеріалу і знаходиться, зазвичай, експериментальним шляхом.

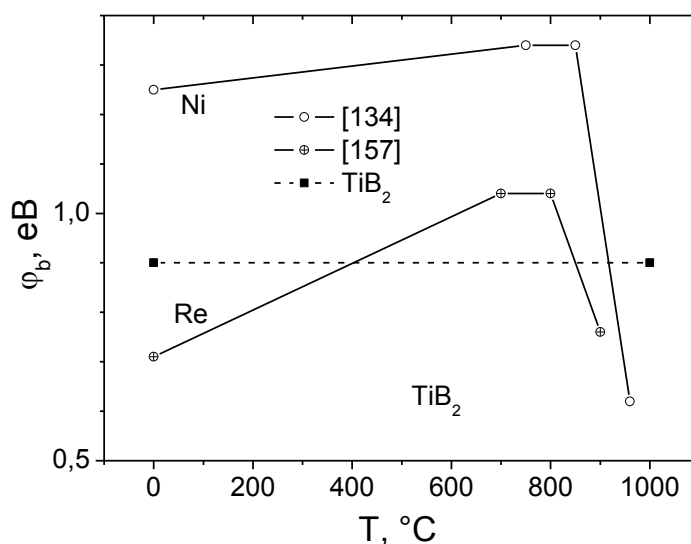


Рис. 1.11. Залежність висоти бар'єру Шотткі контактів до карбіду кремнію від температури швидкої термічної обробки.

Оптимальною температурою швидкого термічного відпалу бар'єрних контактів на основі нікелю та ренію є $T = 750$ та $T = 700$ °C відповідно (рис. 1.11).

1.4.2. Фізико-хімічні процеси в бар'єрних контактах до GaN

Різний характер обробки поверхні нітриду галію може призводити до суттєво відмінних результатів у параметрі γ . Так у роботі [67] спостерігається майже повне закріплення рівня Фермі на поверхневих станах, у той же час у роботі [68] навпаки, залежність висоти бар'єру від роботи виходу металу висока (див. додаток А.9), при цьому в обох випадках спостерігався низький фактор ідеальності n-GaN.

1.5 Дифузійні бар'єри та температурна стабільність контактів

Одним із способів підвищення температурної стабільності омичного контакту є введення у його шарову структуру так званого *дифузійного бар'єру* – дифузійно непроникного та реакційно малоактивного шару з достатньою електричною провідністю. У процесі термічних відпалів, через невідповідність коефіцієнтів термічного розширення, виникають механічні напруження, які складно компенсувати, особливо у омичних контактах, де утворюються нові фази. Механічна міцність дифузійного бар'єру у таких умовах є одним із критичних параметрів для надійності та термічної стабільності контакту. У даній роботі розглянуто перспективи використання у якості такого шару нанокристалічних плівок бори́ду титану.

Як показано в роботах, проведених на великій кількості плівок [69, 70], при зменшенні діаметра d зерна полікристалічної плівки до певної межі (у загальному випадку приблизно до 10 нм, для деяких нітридів і боридів, в т. ч. і TiB_2 , – до 4-5 нм) відбувається збільшення енергії утворення дислокацій, що призводить до значного збільшення мікротвердості матеріалу H за механізмом Холла - Петча ($H \sim d^{-1/2}$) (рис. 1.12) [69,71–76].

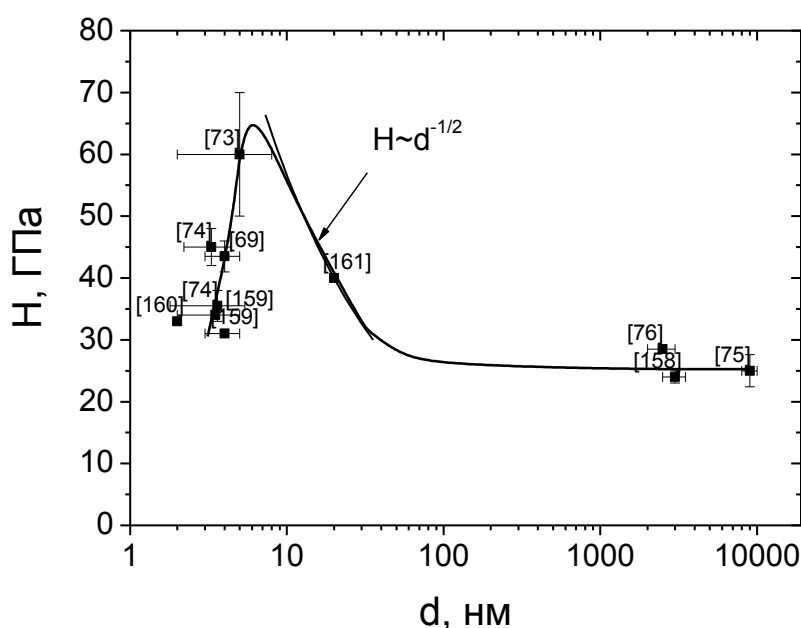


Рис. 1.12. Залежність мікротвердості плівки TiB_2 від розміру зерна.

При досягненні згаданої межі діаметром d відбувається зміна домінуючого механізму, що визначає мікротвердість, а саме: мікротвердість починає визначатися внеском потрійних стиків меж кристалітів і зменшується з подальшим зменшенням розмірів кристалітів.

Інші роботи вказують на одночасне збільшення пластичності (відносного видовження до руйнування) отриманих матеріалів в тому ж діапазоні розмірів зерна [77, 78]. Головною особливістю боридів і нітридів тугоплавких металів, в порівнянні з чистими металами, є заповнення міжзеренного простору аморфною речовиною, що перешкоджає міжзеренному ковзанню при механічних навантаженнях, що, ймовірно, і є причиною продовження дії механізму Холла - Петча до менших розмірів зерна. Тобто, використання наноструктурованих плівок TiB_2 дозволить отримати унікальні фізико-технічні властивості антидифузійних шарів, недосяжні при інших станах того ж матеріалу.

Висновки до розділу 1

1. Показано перспективність напівпровідникових матеріалів нітрид галію та карбіду кремнію для використання в галузях екстремальної електроніки; розробки надійних термостійких контактів до цих напівпровідників, що дозволить повною мірою реалізувати їх потенційні можливості (див. табл. 1.1 та 1.2), підвищити надійність та вихідні параметри приладів на їх основі.
2. Визначено, що у якості контактоутворюючих матеріалів для омичних контактів на основі GaN n-типу найбільш перспективним є використання Al/Ti/ металізації, а для SiC найкращі результати дає використання Ni.
3. Обґрунтовано застосування дифузійних бар'єрів на основі боридів та нітридів тугоплавких металів або шарів вольфраму чи його силіцидів для підвищення термічної стійкості омичних та бар'єрних контактів.

4. Запропоновано створення нанокристалічного дифузійного бар'єру на основі TiB_2 для збільшення його механічної міцності та зменшення модуля Юнга, що може призвести до збільшення температурної стабільності дифузійного бар'єру та омічного контакту в цілому.
5. Сформульовані, на основі літературного огляду, висновки підкреслюють встановлену мету та завдання дисертаційної роботи, які полягали у вивченні процесів, що відбуваються в омічних та бар'єрних контактах з дифузійними бар'єрами на основі наноструктурних плівок TiB_2 до широкозонних напівпровідників SiC та GaN, як на етапі їх формування, так і під дією швидкої термічної обробки, у якості моделі деградаційного фактора.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [79–84].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідними зразками обрано омічні та бар'єрні контакти до карбіду кремнію та нітриду галію з дифузійними бар'єрами на основі наноструктурованих плівок TiB_2 . Було досліджено електрофізичні, морфологічні та структурні параметри контактів. Також було досліджено довгочасову деградацію світлодіодних модулів на основі нітридгалієвих чіпів і показано, що одним із основних факторів їх деградації є збільшення величини послідовного опору, яке вказує на вирішальну роль у цьому процесі властивостей омічних контактів.

2.1 Методика виготовлення зразків

Бар'єрні контакти (див. табл. 2.1) формувалися магнетронним напиленням в атмосфері аргону. Крім хімічної очистки пластин перед початком нанесення контактної металізації у вакуумі проводилась фотонна очистка – опромінення потужними інфрачервоними лампами, що призводило до розігріву поверхні зразка і десорбції домішок. Наступним етапом очистки було короткотривале травлення поверхні в аргонівій плазмі. Після чого відбувалося пошарове магнетронне напилення матеріалів контакту.

Для отримання наноструктурованих плівок дибориду титану була відпрацьована технологія магнетронного напилення на напівпровідникову підкладку. Реалізація оптимальної товщини антидифузійного шару з розміром нанокристалітів близько 3-5 нм, визначеним за даними електронографічних досліджень, досягається при струмі розряду магнетрона – 0,4 А [84].

Зразки для досліджень представляли собою суцільні плівки та контактні структури, виготовлені та термооброблені за однаковою методикою. Дослідження профілів атомного складу за глибиною контактної

металізації проведені методом Оже-електронної спектроскопії, фазового складу – методом рентгенівської дифракції, морфології поверхні – методом атомно-силової мікроскопії (АСМ). Питомий контактний опір досліджено методом лінії переносу (transmission line method). Структура, склад нанесених контактів і параметри швидкого термічного відпалу (ШТВ) представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Структура і параметри ШТВ досліджених бар'єрних контактів.

Структура зразка: склад(товщина у нм) шарів	Характеристики епішару		ШТВ	
	$N_D, \text{см}^{-3}$	t, мкм	T, °C	t, с
TiB ₂ (50) -n-SiC(6H)	$3 \cdot 10^{18}$	400	1000	90
Au(50)-TiB ₂ (50) -n-SiC(6H)	$3 \cdot 10^{18}$	400	1000	60
Au(200)-TiB ₂ (100) -n-GaN	10^{17}	1	700, 900	60

Для структур на основі масивного карбіду кремнію фотолітографічним способом були сформовані контакти Шотткі діаметром 100 мкм, на тильній стороні пластини формувався омичний контакт Au-TiB₂-Ni-n-SiC(6H), параметри якого подано нижче.

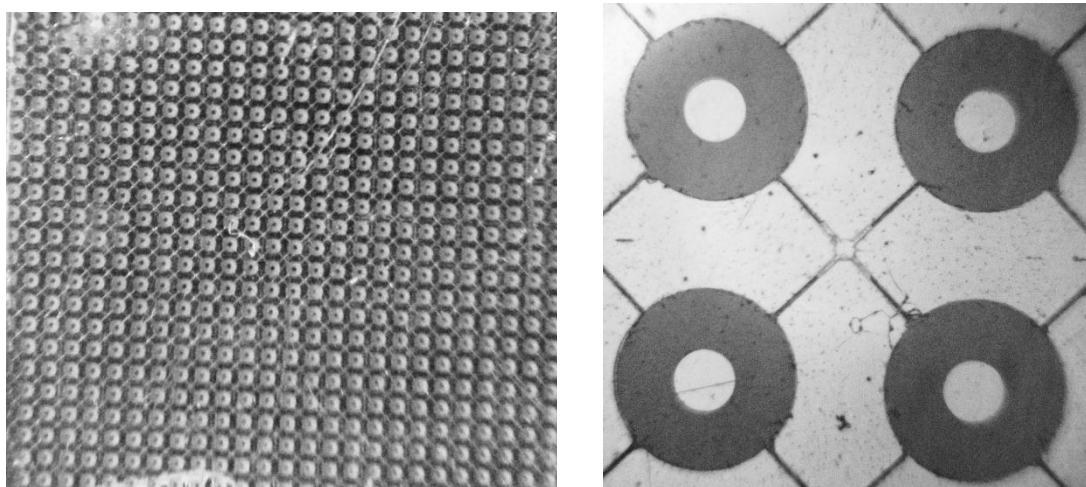


Рис.2.1. Зовнішній вигляд тестової пластини контактів Шотткі Au-TiB₂-n-GaN та її фрагмент.

Для контактів Шотткі на основі нітриду галію, вирощеного на підкладці Al_2O_3 , омичний і бар'єрний контакти формувались з однієї сторони пластин, див. рис. 2.1. Бар'єрний контакт діаметром 150 мкм оточений кільцевим омичним контактом на основі $\text{Au-TiB}_2\text{-Al-Ti-n-GaN}$. Нижче будуть розглянуті тестові зразки для вивчення властивостей омичних контактів.

Досліджувані зразки омичних контактів наведені у таблиці 2.2 – це контакт Ni-n-SiC , що сформований на SiC(4H) з концентрацією $N_d \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ і відпалений при $T = 1050^\circ\text{C}$ в атмосфері азоту. Інша структура, що була досліджена – $\text{NiSi}_2\text{-n-SiC}$ – багатошарова структура з тонких прошарків Ni/Si/Ni/Si , що були напиленні в пропорції 1:2. Решта технологічного процесу аналогічна. Така структура була вибрана з метою збільшення однорідності межі розділу контакт – карбід кремнію та запобігання утворення вуглецевих кластерів.

Таблиця 2.2

Структура і параметри ШТВ досліджених омичних контактів.

Структура зразка: склад(товщина у нм) шарів	Характеристики епішару		ШТВ	
	$N_D, \text{см}^{-3}$	t, мкм	T, $^\circ\text{C}$	t, с
Ni(100)-n-SiC(4H)	10^{19}	2,97	1050, N_2	180
$\text{Ni(14)/Si(50)/Ni(14)/Si(50)-n-SiC(4H)}$	10^{19}	2,97	1050, N_2	180
Ni(100)-n-SiC(6H)	$3 \cdot 10^{18}$	400	300-1000	90
$\text{Au(200)-TiB}_2\text{(100)-Ni(100)-n-SiC(6H)}$	$3 \cdot 10^{18}$	400	1000	60
$\text{Au(200)-TiB}_2\text{(100)-Al(20)-Ti(50)-n-GaN}$	10^{17}	1	700, 900, N_2	60

Омичні контакти з дифузійним бар'єром на основі дибориду титану до карбїду кремнію та нітриду галію наносились за тією ж методикою, що і для бар'єрних контактів. Після нанесення проводився формуючий ШТВ,

параметри якого подано у табл. 2.2. Фотолітографічним способом на частині зразків формувалися TLM – контактні структури. Геометричні параметри структур представлені на рис. 2.2. Перший із шаблонів вказаних структур представляє собою набір контактів з постійним діаметром 100 мкм і змінною товщиною напівпровідникового прошарку, вільного від металізації. Повний опір структур вимірювався між кожним із таких контактів і загальною металізацією.

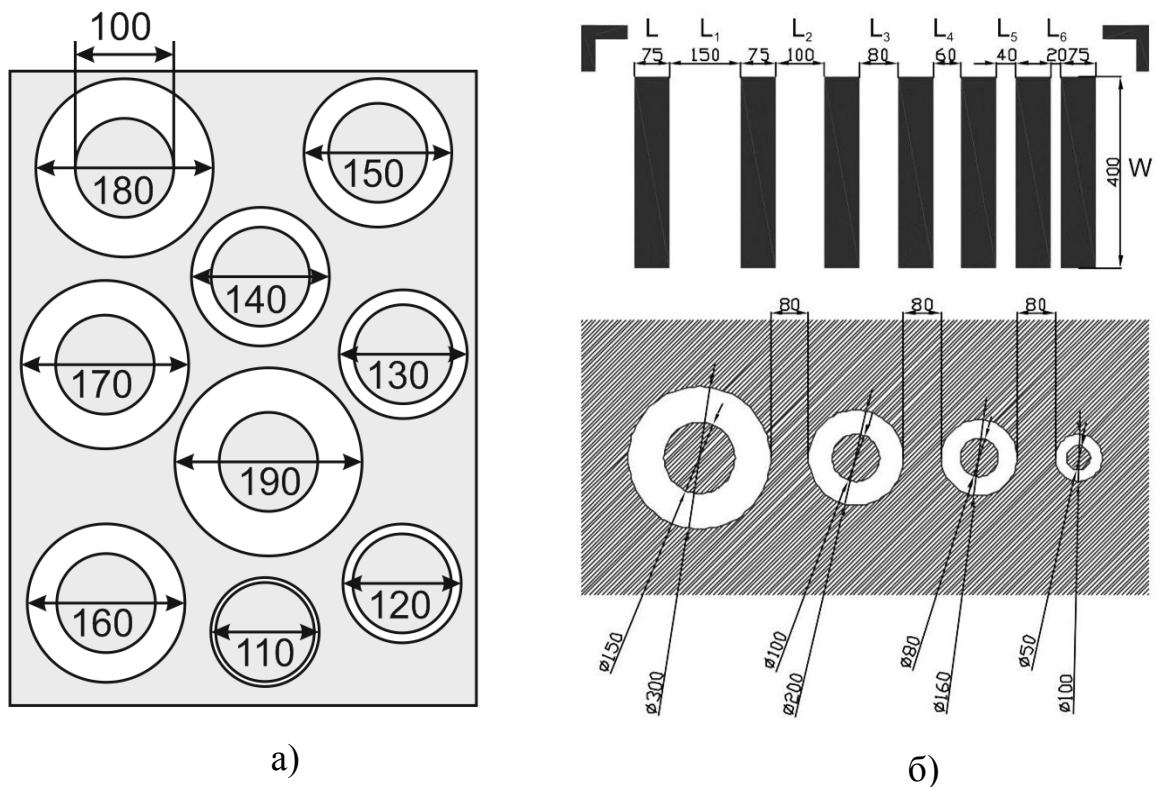
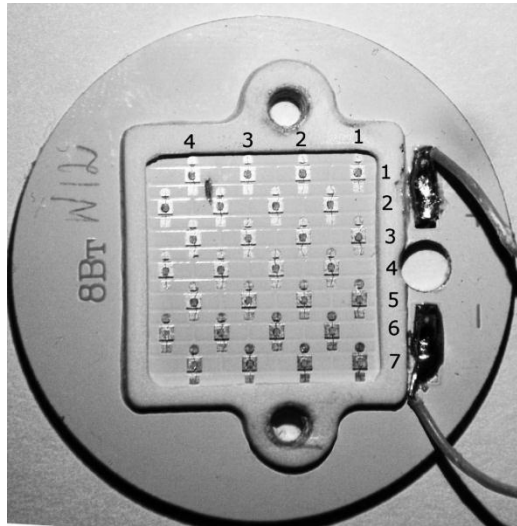


Рис. 2.2. Параметри шаблонів для вимірювання питомого контактного опору.

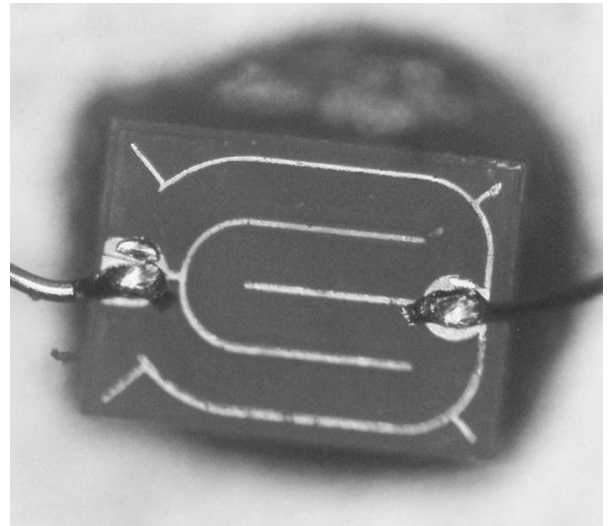
Другий із шаблонів – поєднання двох взаємодоповнюючих TLM – методів: у випадку, коли довжина перенесення більша 75 мкм, користуються шаблоном з радіальними контактами, менша – шаблоном з лінійними контактами.

Для аналізу режимів роботи омичних контактів на основі GaN у сучасних оптоелектронних приладах було проведено дослідження світлодіодних модулів, виготовлених в умовах вітчизняного виробництва, на основі чіпів фірми “EDISON Optocorporation” до заливки їх люмінофором.

Зовнішній вигляд світлодіодного модуля подано на рис. 2.3. Було досліджено два модулі, ідентичні за процесом виготовлення. Модулі виготовлено на базі печатної плати з алюмінієвою основою, на яку посаджено світлодіодні чіпи, з'єднані між собою за паралельно-послідовною схемою, поданою на рис. 2.4.



а)



б)

Рис. 2.3. Зовнішній вигляд світлодіодного модуля, нумерація чіпів а) та мікрофотографія одного чіпа б).

Характеристики світлодіодного модуля: максимальний струм 0,35 А, максимальна напруга 24 В, максимальна розсіювана потужність 8 Вт.

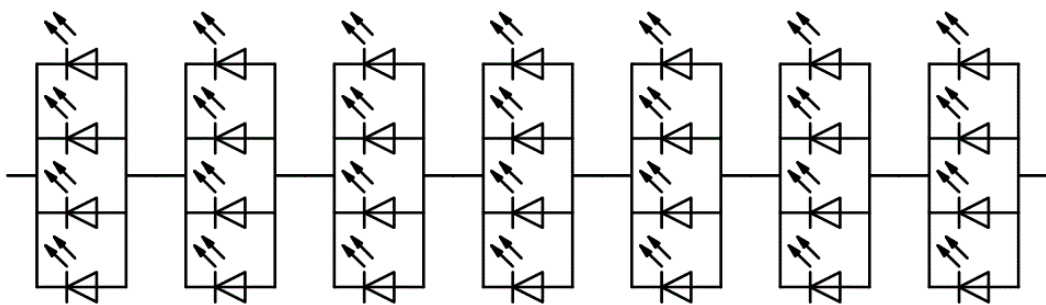


Рис. 2.4. Паралельно-послідовна схема є'єднання чіпів у світлодіодному модулі.

Обидва досліджені модулі містили виробничий дефект – по два світлодіодних чіпи на них не працювали через дефект зварного з'єднання

золотого дроту з площадкою чіпа (рис. 2.5, також див. додаток А.10, чіпи 3.3 і 5.4). Разом з тим модулі залишались працездатними, завдяки використаній схемі включення.

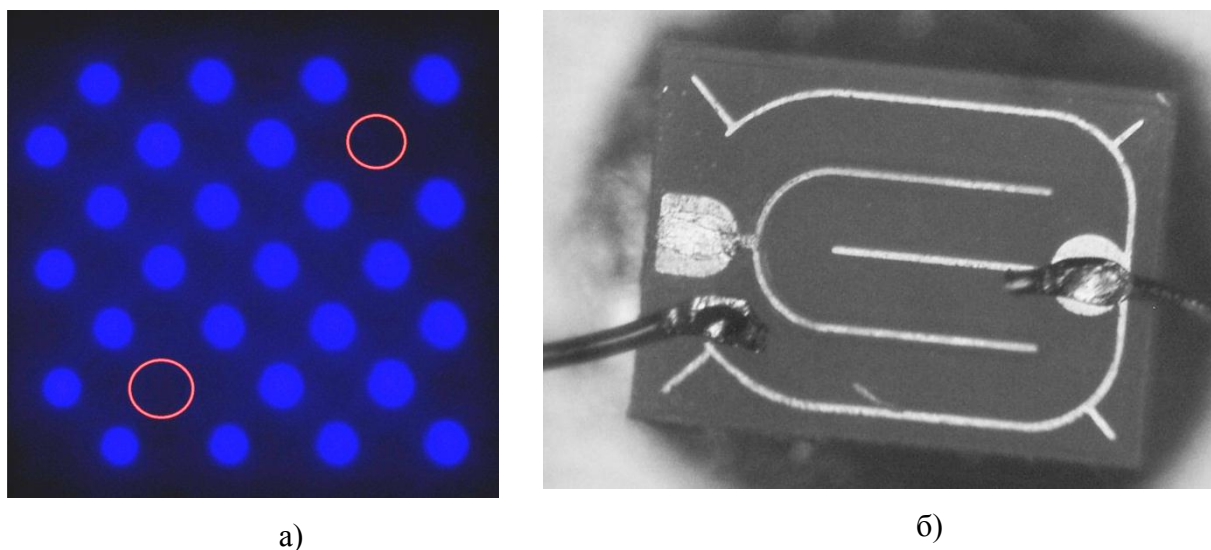


Рис. 2.5. Дефекти розварки чіпа на світлодіодному модулі.

На одному із модулів з'єднання між чіпами було видалено для дослідження індивідуальних характеристик чіпів, що пройшли процеси посадки на тепловідвід та приварки контактів. Другий модуль поставлено на довгострокове напруцювання при стабілізованій температурі тепловідводу.

2.2 Методи вимірювання питомого контактного опору

У роботі використано ряд модифікацій методу довгої лінії визначення питомого контактного опору (transmission line method, TLM). Необхідність використання різних методів зумовлена різними межами застосовності методів (відносно довжини перенесення) та різною специфікою застосування.

2.2.1 Лінійний метод TLM

Для виміру питомого контактного опору лінійним методом TLM використовується структура, яка складається з ряду ідентичних прямокутних омичних контактів з шириною W і довжиною L , розташованих із змінним інтервалом L_i ($i = 1...n$), як показано на рис. 2.6а [85].

Якщо через два цих контакти, розділених відстанню L_i , пропускати струм I , то повний опір $R_i = V/I$ складається з двох компонентів:

$$R_i = \frac{R_{SH} L_i}{W} + 2R_c \quad (2.1)$$

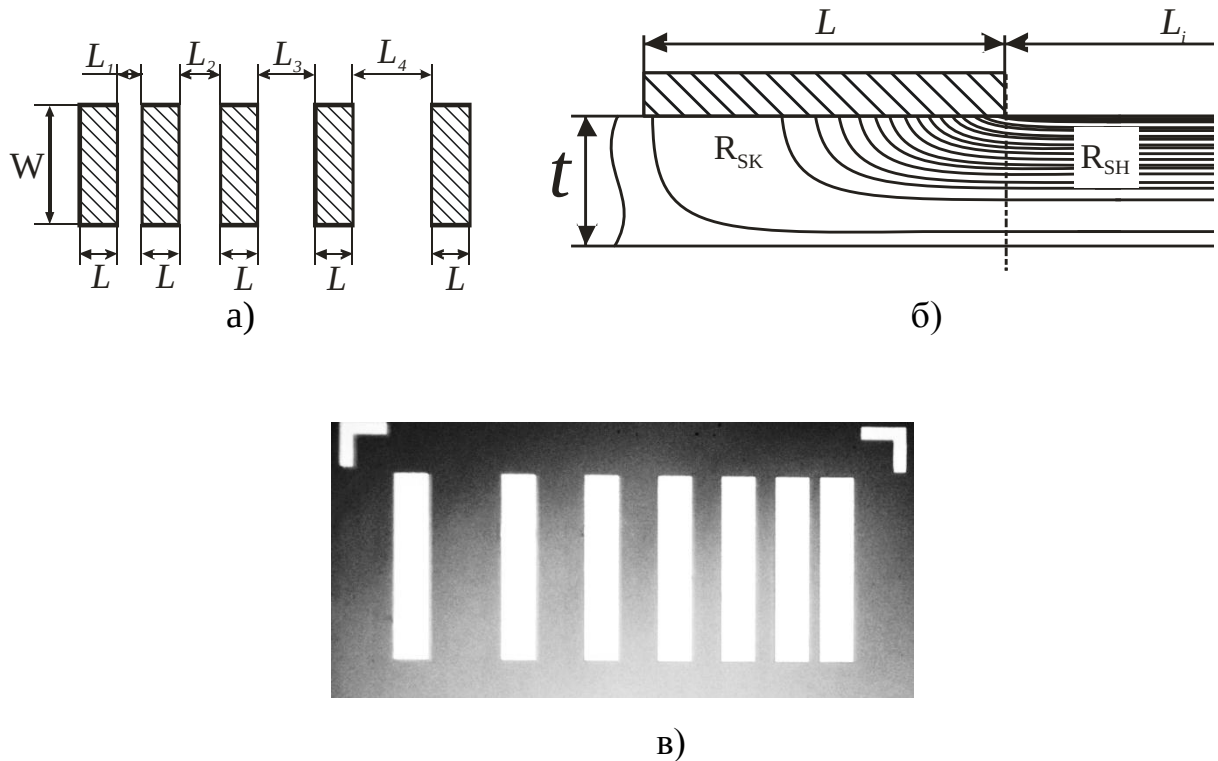


Рис.2.6. Типи фотошаблонів для вимірювання питомого контактного опору методом довгої лінії з лінійними контактами: структура контактних площадок для TLM(a); розподіл ліній струму в напівпровіднику (б); мікрофотографія сформованих TLM-контактів (в).

У формулі $R_i = \frac{R_{SH} L_i}{W} + 2R_c$ перший доданок описує опір ділянки напівпровідника з питомим поверхневим опором напівпровідника R_{SH} , а другий – R_c що є сумою контактного опору і опору розтікання під контактом, оскільки струм не витікатиме зі всієї площі металу однорідно, а буде “скупчуватися” біля краю, ближчого до іншого контакту (рис. 2.6б).

Таке розтікання може бути змодельоване у вигляді лінії передачі. В цьому випадку опір контакту описується формулою:

$$R_c = \frac{L_T R_{SK}}{W} \coth\left(\frac{L}{L_T}\right), \quad (2.2)$$

де $L_T \equiv \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{SK}}}$ довжина перенесення, R_{SK} – питомий поверхневий опір шару напівпровідника під шаром металу. У спільному випадку $R_{SK} \neq R_{SH}$ внаслідок підlegування напівпровідника під час відпалу контакту. Якщо $L > 3L_T$ (що є справедливо для більшості випадків), тоді $\coth(L/L_T) \rightarrow 1$ і, допускаючи, що $R_{SK} \approx R_{SH}$, отримаємо спрощений вираз для повного опору:

$$R_i = \frac{R_{SH} L_i}{W} + 2 \frac{L_T R_{SH}}{W}. \quad (2.3)$$

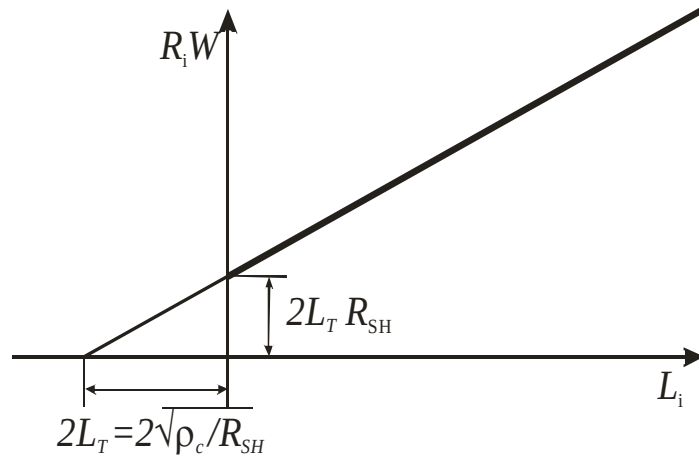


Рис. 2.7. Визначення питомого контактного опору з вимірів повного опору лінійних контактів TLM за умови $R_{SK} \approx R_{SH}$.

За нахилом залежності $R_i W = f(L_i)$ можна визначити R_{SH} (рис. 2.7), а з точки перетину з горизонтальною віссю – ρ_c за допомогою формули:

$$\rho_c = L_T^2 R_{SH}; \quad (2.4)$$

Тепер стає очевидним використання терміну “довжина перенесення”: це ефективна відстань L_T , на яку переноситься струм від краю углиб контакту, тобто ефективна площа контакту для планарного контакту складає приблизно WL_T , а не WL .

2.2.2 TLM з радіальною геометрією контактів

TLM з радіальною геометрією контактів, circular TLM (CTLM), не потребує додаткових технологічних процесів для усунення крайових ефектів, не знижуючи при цьому точність методу в цілому. Існує декілька модифікацій TLM методу з радіальною геометрією контактів, які відрізняються геометрією контактів: набір контактів з постійним внутрішнім радіусом r_1 і змінним r_2 (Marlow and Das [86]), набір контактів з постійним відношенням r_1/r_2 [87] і система з коаксіально вкладених кілець [88] (рис. 2.8 б).

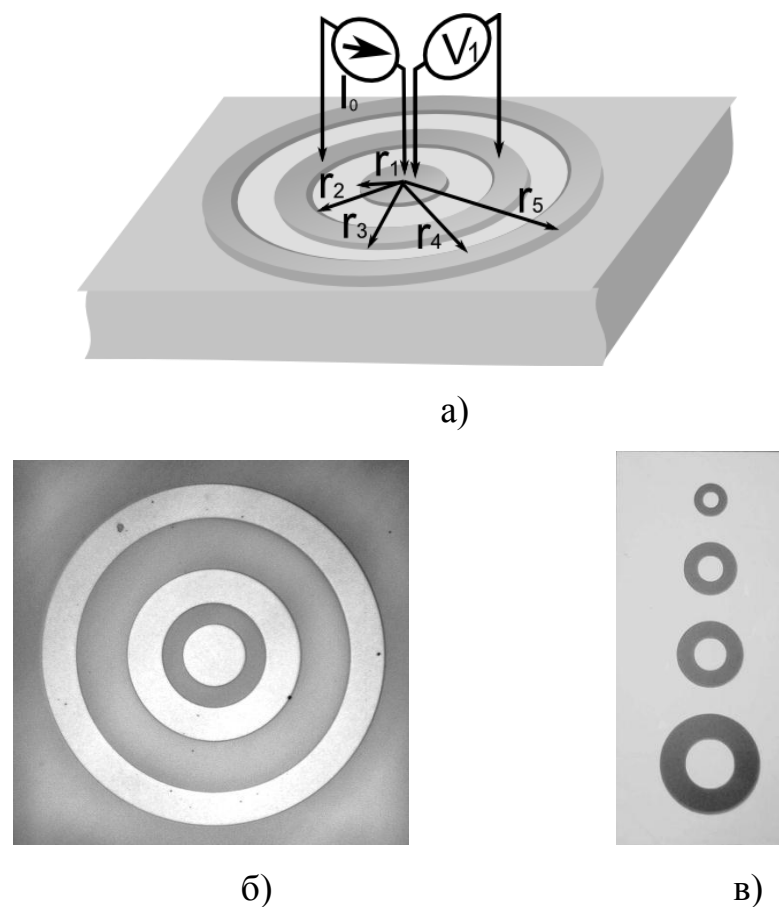


Рис. 2.8. Фотошаблони для реалізації CTLM: спосіб виміру контактного опору (а), мікрофотографії шаблону CTLM по [88] (б) і CTLM за [87] (в).

У загальному випадку для опору внутрішнього “точкового” контакту R_{c1} можна записати [88]:

$$R_{c1} = \frac{R_{SK}}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_1} \frac{J_0(\alpha r_1)}{J_1(\alpha r_1)}; \quad (2.5)$$

для опору внутрішнього кільця, при вимірюванні зсередини:

$$R_{c2 \text{ in}} = \frac{R_{SK}}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_2} \frac{J_1(\alpha r_3)K_0(\alpha r_2) + J_0(\alpha r_2)K_1(\alpha r_3)}{J_1(\alpha r_3)K_1(\alpha r_2) - J_1(\alpha r_2)K_1(\alpha r_3)}; \quad (2.6)$$

для опору внутрішнього кільця, при вимірюванні ззовні:

$$R_{c2 \text{ out}} = \frac{R_{SK}}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_3} \frac{J_1(\alpha r_2)K_0(\alpha r_3) + J_0(\alpha r_3)K_1(\alpha r_2)}{J_1(\alpha r_3)K_1(\alpha r_2) - J_1(\alpha r_2)K_1(\alpha r_3)}; \quad (2.7)$$

для опору зовнішнього кільця, при вимірюванні зсередини:

$$R_{c3 \text{ in}} = \frac{R_{SK}}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_4} \frac{J_1(\alpha r_5)K_0(\alpha r_4) + J_0(\alpha r_4)K_1(\alpha r_5)}{J_1(\alpha r_5)K_1(\alpha r_4) - J_1(\alpha r_4)K_1(\alpha r_5)}; \quad (2.8)$$

де r_1 - r_5 – радіуси контактних площадок (див. рис. 2.8а); J_0, J_1, K_0, K_1 – модифіковані функції Бесселя першого та другого роду відповідно.

Опір кільцевої плівки напівпровідника R_{film} між r_1 і r_2 розраховується за формулою:

$$R_{film} = \frac{R_{SH}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right). \quad (2.9)$$

Розрахунок даних за наведеними формулах досить складний. Проте у ряді випадків можна використовувати спрощений розрахунок. Розглянемо це на прикладі СТЛМ з набором контактів з постійним співвідношенням внутрішнього і зовнішнього радіусів (рис. 2.8в).

Вважаючи, що опір внутрішнього контакту багато більший опору зовнішнього, повний опір між внутрішнім і зовнішнім контактом можна записати у вигляді [87]:

$$R = \frac{R_{SH}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{R_{SK}}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_1} \frac{J_0(\alpha r_1)}{J_1(\alpha r_1)}. \quad (2.10)$$

У разі, коли $L_t \gg r_1$ і $R_{SH} \approx R_{SK}$, (2.10) можна ще спростити до вигляду:

$$R = \frac{R_{SH}}{2\pi} C + \frac{\rho_c}{\pi r_1^2}, \quad (2.11)$$

$$\text{де: } C \equiv \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right).$$

Таким чином, вибір методу вимірювання контактного опору залежить від величини вимірюваного контактного опору, опору підконтактного напівпровідника і технологічних особливостей застосування омічного контакту, оскільки бажано вимірювати опір омічного контакту після тих же технологічних процесів, які зазнаватиме омічний контакт в процесі виготовлення напівпровідникового приладу. Універсального методу, зручного і застосовного у всіх випадках, не існує. Проте майже в кожного методу є свій діапазон застосовності, в якому використання його найефективніше.

2.2.3 Програмний розрахунку параметрів омічного контакту

Для пришвидшення розрахунків контактного опору (ρ_c) на основі розглянутих вище TLM – методів було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє розраховувати питомий контактний опір, питомий поверхневий опір та довжину перенесення, критичну для оцінки меж застосовності різних методів обрахунку, блок-схема якого зображена на рис. 2.9. Вхідними даними для всіх вищеописаних методів розрахунку є залежність опору між контактами від деякого геометричного параметра. Для лінійного TLM геометричний параметр це відстань між контактами, для радіального TLM та методу Кокса-Стрека – радіус контактів. Вхідні дані з вказаного dat файлу чи шляхом ручного вводу потрапляють у матрицю даних шаблонів (рис. 2.9), де кожна з комірок – дані для одного з шаблонів на пластині.

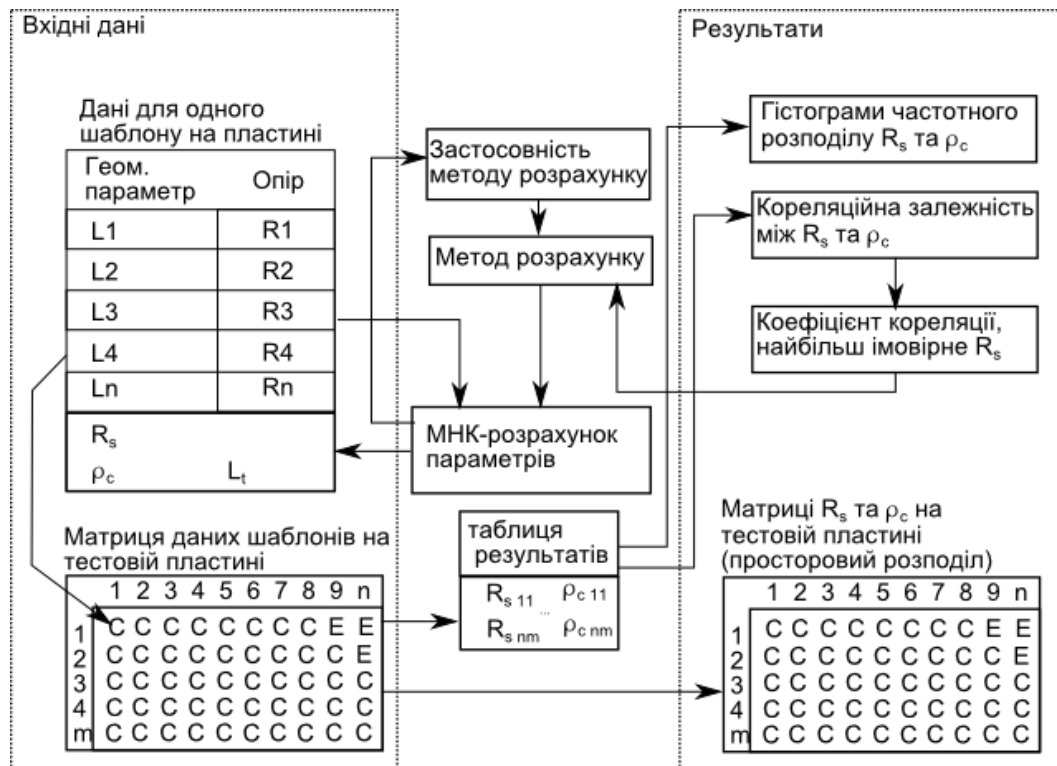


Рис. 2.9. Блок-схема програми для розрахунку параметрів омичного контакту.

В залежності від обраного оператором методу розрахунку питомого контактного опору проводиться апроксимація методом найменших квадратів (МНК) вхідних даних. Результатами є питомий контактний опір, питомий опір напівпровідника та довжина перенесення. На основі отриманих даних автоматично можуть бути побудовані гістограма розподілу питомого контактного опору чи питомого опору напівпровідника по пластині, карти розподілу цих величин по площі зразка, а також кореляційна залежність між значеннями ρ_c і питомого опору напівпровідника. У випадку значної негативної кореляції між згаданими даними можуть бути розраховані уточнені значення питомого контактного опору, базуючись на найбільш імовірних значеннях ρ_c та даних про залежність похибки вимірювання питомого контактного опору від радіусу контакту.

Головне вікно програми для розрахунку ρ_c складається з п'яти основних блоків (рис. 2.10):

- блок загальних параметрів, де задається розмір матриці TLM-шаблонів, кількість контактів в шаблоні і т. ін;
- блок параметрів конкретного шаблона – геометричні параметри, спільні для усіх шаблонів і значення повного опору для конкретного контакту (пари контактів);
- блок навігації по матриці шаблонів;
- блок інформації про обраний метод вимірювання;
- блок графіка, необхідний для оцінки якості контактів, оперативного видалення/перевірки сумнівних даних.

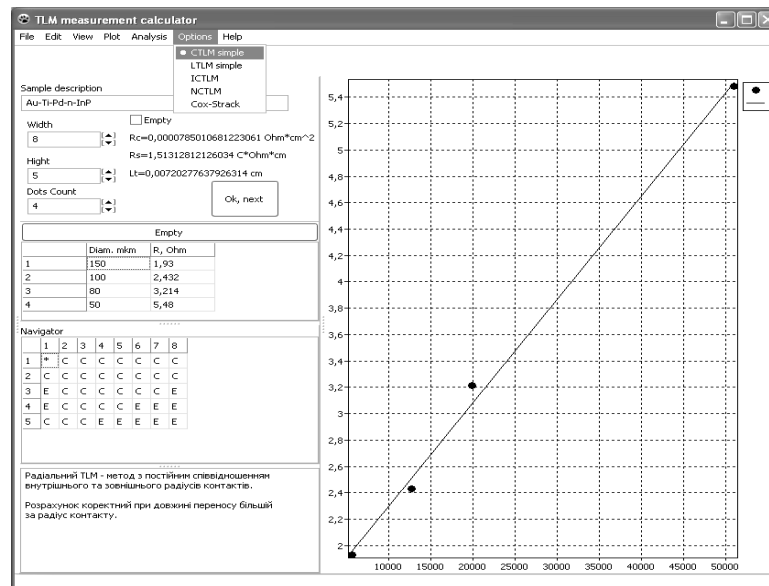


Рис. 2.10. Вигляд головного вікна програми для розрахунку параметрів омичного контакту. Розрахунок питомого контактного опору для одного шаблону CTLM методом найменших квадратів за формулою (2.11)

Програма дозволяє розраховувати параметри омичних контактів методами:

- лінійного TLM;
- радіального TLM з коаксіальними контактами;
- радіального TLM з постійним співвідношенням внутрішнього та зовнішнього радіусів;

- радіального TLM з постійним внутрішнім або зовнішнім радіусом;
- методом Кокса-Стрека.

Програмне забезпечення володіє інтуїтивно простим інтерфейсом та розширеними функціональними властивостями в яких передбачено також можливість, як безпосередньої візуальної оцінки (рис. 2.11) так і експорту карт розподілу виміряних величин по площі зразка, гістограмам їх частотного розподілу, а також кореляційної залежності між значеннями питомого контактного опору і питомого опору напівпровідника. Однією із безумовних переваг є також і швидкість обробки даних створеної програми.

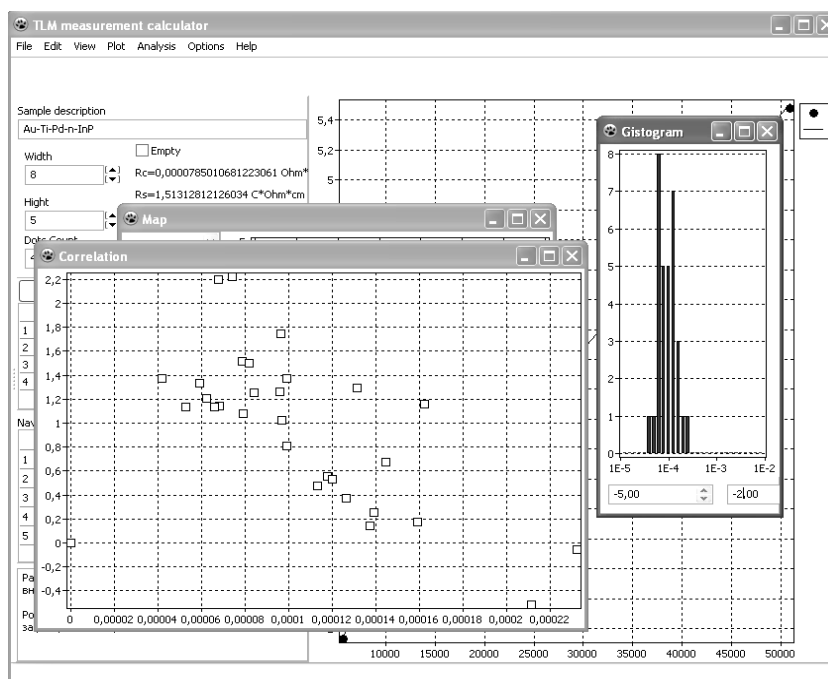


Рис. 2.11. Автоматизація побудови гістограми розподілу питомого контактного опору та кореляційної залежності між величинами питомого контактного опору та питомого поверхневого опору напівпровідника у програмі для розрахунку параметрів омичного контакту.

Усі отримані дані можна експортувати для побудови графіків в “Origin”, “QtiPlot”, “LibreOffice Calc” чи “Excel”. Програма написана в *IDE Lazarus*, що є вільним програмним забезпеченням.

2.3 Методи розрахунку основних параметрів бар'єрних контактів

Висота бар'єру Шотткі (ВБШ) і фактор ідеальності є одними з найважливіших параметрів контакту Шотткі. Відомий ряд методів їх визначення, у тому числі за вольтамперною характеристикою (ВАХ) [89, 90, 91–103, 105, 106]. Спроби узагальнити і систематизувати існуючі методи були зроблені в ряді робіт [89–92], проте оцінка точності, проведена в більшості робіт, не враховує особливості контактів до широкзонного напівпровідника. Говорячи про точності визначення ВБШ стосовно контактів на основі широкозонних напівпровідників необхідно враховувати три фактори: точність вимірювання вихідних величин (струм, напруга, ємність), точність методу апроксимації і відповідність теоретично очікуваного і наявного насправді механізмів струмоперенесення.

У більшості розглянутих робіт з методів визначення параметрів діодів Шотткі число параметрів, що описують стаціонарну ВАХ, обмежено до чотирьох: ВБШ ϕ_b , фактора ідеальності n , послідовного R_s і шунтуючого опорів R_p , мінімально необхідних для побудови наших розрахунків. З їх урахуванням ВАХ можна записати у вигляді [93]:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/nkT) [1 - \exp(-qV_{pn}/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (2.12)$$

де: $I_0 = A^{**} T^2 S \exp(-q\phi_b/kT)$ – струм насичення,

$V_{pn} = V - IR_s$ – напруга на переході метал-напівпровідник,

A^{**} – ефективна стала Річардсона,

S – ефективна площа контакту.

З даного рівняння можна визначити умови, за яких можна знехтувати послідовним і шунтувальним опорами (вклад їх менше 1%):

$$\bullet \text{ обмеження зверху } IR_s/V_{pn} < 10^{-2}, \quad (2.13)$$

де $\Delta V/V$ - відносна похибка прикладеної напруги;

$$\bullet \text{ обмеження знизу } \frac{nkT}{qIR_p} (\ln[I/I_0] - 1) > 10^2. \quad (2.14)$$

Та за умови, де внесок бар'єру Шотткі на тлі цих опорів значний (для досягнення похибки менше 10% на тлі похибки вимірювань):

- обмеження зверху $IR_s/V_{pn} < V/10\Delta V$, (2.15)

- обмеження знизу $\frac{nkT}{qIR_p}(\ln[I/I_0]-1) > 10\Delta V/V$. (2.16)

Якщо на ВАХ немає ділянки, обмеженої умовами (2.15) і (2.16), то ВАХ не несе інформації про висоту бар'єру і фактор ідеальності.

2.3.1 Розрахунок параметрів бар'єру з ВАХ за Родеріком

Найбільш простим у реалізації серед розглянутих методів є метод, представлений Родеріком [93], згідно з яким струм через діод Шотткі описується залежністю:

$$I = I_0 \exp(qV/nkT)[1 - \exp(-qV/kT)]. \quad (2.17)$$

Будуючи ВАХ в координатах $\ln(I)/[1 - \exp(-qV/kT)] \propto V$ і апроксимуючи прямою $y = a + bx$ лінійну ділянку, отримують коефіцієнти:

$$b = \ln(I_0) \text{ та } a = q/nkT,$$

звідки відповідно розраховують φ_b і n . При розрахунках часто ефективна стала Річардсона береться рівною модифікованій постійній Річардсона [93]:

$$A^* = 4\pi n^* q k^2 / h^3 = 120,173 \cdot (m^*/m) [A/cm^2 K^2], \quad (2.18)$$

де h – постійна Планка.

Перевагою методу є можливість опису прямої і зворотної гілки ВАХ однією залежністю, а також врахування вимірювань при $V < 3kT/q$. До недоліків методу слід віднести відсутність врахування впливу послідовного опору, внаслідок чого можуть виникати додаткові похибки при визначенні ділянки ВАХ, де цей вплив дуже малий.

При автоматизації методу зручно визначати фактор ідеальності, побудувавши залежність (похідна знаходиться чисельно):

$$\frac{dV}{d \ln(I)} \frac{q}{kT} = f(V). \quad (2.19)$$

Якщо на залежності $n(V)$ присутня ділянка, для якої залежність від напруги є мала, то за цим діапазоном напруг і визначають величину фактора ідеальності і ВБШ, користуючись методом Родеріка.

Область роботи методу обмежена умовами (2.13) і (2.14). Однак на практиці при низьких значеннях ВБШ або великих послідовних опорах виділити ділянку, що не піддана впливу послідовного опору, виявляється неможливим. Один із шляхів вирішення цієї проблеми був запропонований Норде, який дозволяє визначити висоту бар'єру як в діапазоні умов – обмеження зверху: $IR_s/V_{pn} < 10^{-2}$,

та знизу відповідно: $\frac{nkT}{qIR_p}(\ln[I/I_0]-1) > 10^2$,

так і в точці, що знаходиться поза (вище) цих умов, але нижче умови:

$$\frac{nkT}{qIR_p}(\ln[I/I_0]-1) > 10\Delta V/V. \quad (2.20)$$

2.3.2 Суть методу Норде

Метод Норде [94] був розроблений для фактора ідеальності, рівного одиниці, для випадків, коли вплив послідовного опору на ВАХ вносить значну похибку у визначення висоти бар'єра більш простими методами. Для коректного опису ВАХ при $V > 3kT/q$ формулу:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/nkT) [1 - \exp(-qV_{pn}/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (2.21)$$

потрібно модифікувати до виду:

$$I = A^{**} T^2 S \exp(q(V - IR_s - \phi_b)/kT). \quad (2.22)$$

Можна бачити, що побудувавши функцію:

$$F(V) \equiv V/2 - kT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^* S)], \quad (2.23)$$

отримаємо:

$$F(V) = IR_s + \phi_b - V/2. \quad (2.24)$$

При $R_s = 0$ нахил функції $-1/2$, при переважанні спаду напруги на послідовному опорі нахил складе $1/2$. Якщо спостерігається ділянка з нахилом $-1/2$, висота бар'єру визначається як відсічка лінійної апроксимації цієї ділянки на вісь ординат. Якщо ж вплив послідовного опору значний на всьому діапазоні напруг, то використовується пошук мінімуму функції F , який досягається при деяких значеннях V_{min} і I_{min} , тоді значення послідовного опору і висоти бар'єру можуть бути отримані як:

$$R_s = kT/qI_{min} - \text{значення послідовного опору,}$$

$$\phi_b = F(V_{min}) + V_{min}/2 - kT/q - \text{висота бар'єру.}$$

Поряд зі своїми перевагами метод не позбавлений недоліків: у багатьох випадках фактор ідеальності не дорівнює одиниці, що вносить помилку в результат розрахунку. Розрахунок проводиться за однією точкою ВАХ, що може негативно позначитися на точності розрахунку. Нижче буде розглянуто цілу низку робіт, в яких зроблені спроби нівелювати ці недоліки.

2.3.3 Характеристичний метод Ліна

Метод Ліна [95] заснований на побудові декількох норде-подібних функцій виду:

$$G(I) \equiv V/\vartheta - kT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^*S)], \quad (2.25)$$

де: ϑ – довільний параметр $\vartheta > n$.

З цих кривих можуть бути отримані значення струму I_{min} , при яких $G(I_{min})$ мінімальна.

При $V > 3kT/q$, без урахування шунтуючого опору, формулу:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/nkT) [1 - \exp(-qV_{pn}/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (2.26)$$

можна переписати:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT). \quad (2.27)$$

Бачимо, що виходячи з визначення G і формули (2.27), залежність $I_{min}(\vartheta)$ лінійна і описується виразом:

$$I_{\min}(\mathcal{G}) = (\mathcal{G} - n)kT/qR_s. \quad (2.28)$$

За нахилом залежності визначають послідовний опір, за відсічкою екстраполяції до $I_{\min} = 0$, де $\mathcal{G} = n$ – фактор ідеальності.

Висоту бар'єру можна знайти як екстраполяцію залежності $G_{\min}(\mathcal{G})$ до значення $\mathcal{G} = n$.

У роботах Cibils і Buitrago [96] запропонована подібна модифікація методу Норде, проте замість параметра $\mathcal{G}$ введена деяка параметрична напруга, яка виконує ту ж функцію.

2.3.4 Визначення висоти бар'єру методом Чонга

У методі Чонга і співавторів [97] запропоновано перетворення формули:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT). \quad (2.29)$$

у формулу вигляду:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln(I) + \exp(\ln(I))R_s - \frac{nkT}{q} \ln(A^*T^2S) + n\phi_b. \quad (2.30)$$

Звідки:

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s. \quad (2.31)$$

Тобто, будуючи залежність $\frac{dV}{d \ln(I)} \propto I$ і апроксимуючи її прямою, одержимо коефіцієнти: $a = nkT/q$, $b = R_s$.

Для того, щоб визначити висоту бар'єру, побудуємо залежність:

$$H(I) \equiv V - nkT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^*S)]. \quad (2.32)$$

Як можна побачити з рівняння:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT) \rightarrow H(I) = IR_s + n\phi_b. \quad (2.33)$$

Тобто, апроксимуючи побудовану залежність прямою, отримаємо коефіцієнти: R_s і $n\phi_b$.

Перевагою методу Чонга є визначення поряд з висотою бар'єру і фактором ідеальності послідовного опору, що не тільки дає додаткові

відомості про контакт, але і зручно з точки зору автоматизації процесу розрахунку. До недоліків слід віднести застосовність методу тільки до діапазону напруг вище $V > 3kT/q$.

2.3.5 Метод Вернера

Вернером [98] розглянуті три різних методи для визначення параметрів діода Шотткі на основі ВАХ. Один з них збігається з методом Чонга. Проте, як було показано, інший з розглянутих ним методів, який далі ми будемо називати методом Вернера, дав найбільш точні значення ϕ_b , n і R_s . Метод Вернера використовує диференціальну провідність реального діода $L = dI/dV$ при прямому зміщенні.

Для $V - IR_s > 3kT/q$ з урахуванням рівняння:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT), \quad (2.34)$$

можна записати:

$$\frac{L}{I} = \frac{q}{nkT}(1 - LR_s). \quad (2.35)$$

Як бачимо що, побудувавши залежність $L/I = f(L)$ і апроксимуючи її прямою, з коефіцієнта нахилу можна розрахувати R_s , а з відсічки можна отримати значення фактора ідеальності.

У роботі Аубрі і Меєра [99] проведено порівняльний аналіз методів Ліна і Вернера і показано, що методи мають математично схожі процедури, відповідно їх точність і обмеження близькі.

Ще одним способом вирішення означеної проблеми є використання методів прямої апроксимації (ПА) всієї довжини ВАХ спрощеним виразом (2.27) [100]:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT),$$

або більш повним (2.12) [99, 101–104]:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/nkT) [1 - \exp(-qV_{pn}/kT)] + V_{pn}/R_p.$$

Недоліком методу є відносна складність розрахунку, однак нами розроблена програма [105], що дозволяє легко проводити розрахунки більшістю вищезазначених методів, у тому числі і проводити пакетний розрахунок параметрів, що важливо при статистичних вимірах.

У всіх описаних вище випадках добуток ефективної сталої Річардсона на ефективну площу вважався відомим. Однак цей добуток можна визначити експериментально у разі, коли є температурні вимірювання ВАХ. Для цього треба використовувати метод енергії активації (ЕА) [102] або метод Сато [106].

2.3.6 Методи Сато та енергії активації

Метод енергії активації [102] полягає у визначенні за одним з вищеописаних методів (Родеріка, Чонга і ПА) для кожної температури окремо. Будуючи залежність $\ln(I_0/T^2) \propto q/kT$ і апроксимуючи її прямою лінією, отримуємо коефіцієнти:

$$a = \ln(A^{**}S), \quad b = \varphi_{b0}.$$

Метод Сато [106] полягає в тому, що для визначення висоти бар'єра береться не $\ln(I_0)$, а конкретна точка на ВАХ, визначена за мінімумом $F1_{\min}$ функції при деякому струмі $I_{\min}$:

$$F1 = (qV/2kT) - \ln(I/T^2). \quad (2.36)$$

У такому випадку має виконуватися рівність:

$$F2 \equiv 2F1_{\min} + (2-n)\ln(I_{\min}/T^2) = 2 - n[\ln(SA^{**}) + 1] + (qn\varphi_{b0}/kT), \quad (2.37)$$

звідки висота бар'єру φ_{b0} і $\ln(A^{**}S)$ знаходяться як коефіцієнти лінійної апроксимації:

$$a = 2 - n[\ln(SA^{**}) + 1],$$

$$b = n\varphi_{b0}.$$

Умова застосування даного методу обмежена тим, що розрахунки проводяться для вже визначеного фактора ідеальності.

2.3.7 Програмний розрахунок параметрів бар'єрного контакту

Для пришвидшення розрахунків значень висоти бар'єру, фактора ідеальності та послідовного опору на основі розглянутих вище методів було розроблено програмне забезпечення. Головне вікно програми для розрахунку питомого контактного опору складається з трьох основних блоків (рис. 2.12):

- блок загальних параметрів, де задається площа контакту, температура, при якій проводились вимірювання ефективна стала Річардсона і т. ін;
- блок виводу результатів, де виводяться результати даної апроксимації;
- блок графіка, необхідний для оцінки якості апроксимації, встановлення меж апроксимації.

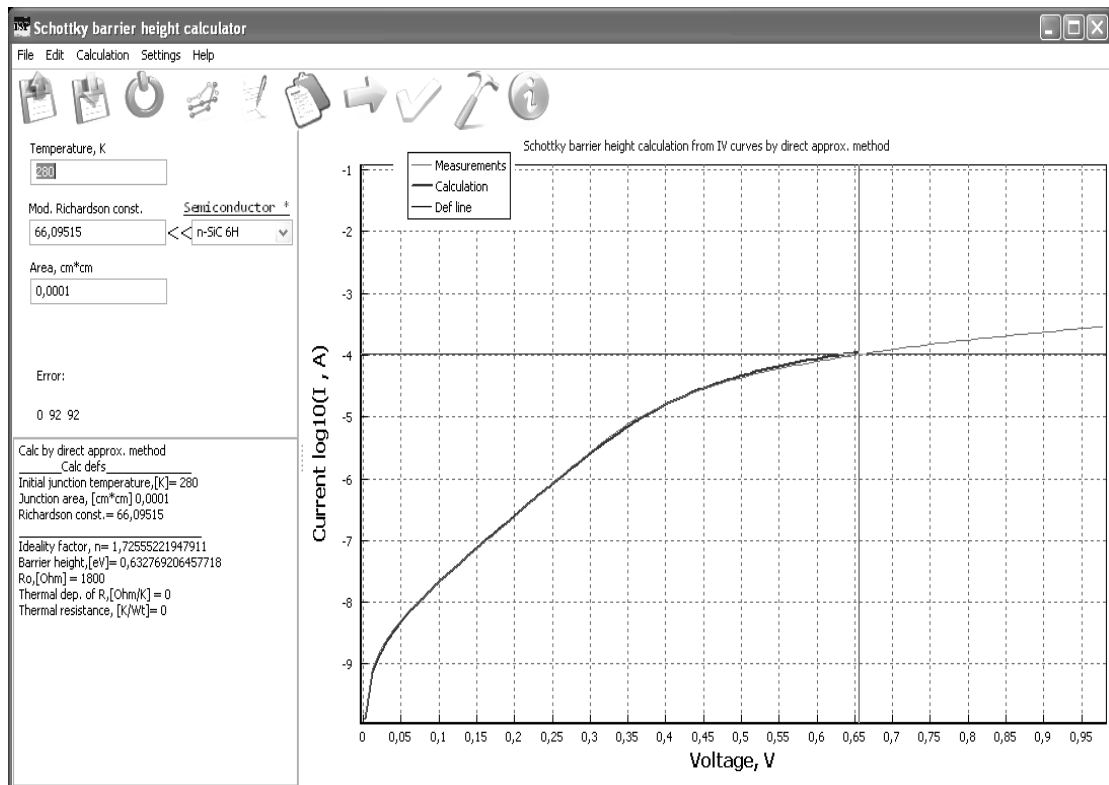


Рис. 2.12. Програма для розрахунку висоти бар'єру Шотткі, фактора ідеальності та послідовного опору з ВАХ.

Програма дозволяє розраховувати параметри бар'єрних контактів методами Родеріка та прямої апроксимації, містить дані про сталі Річардсона

для різних напівпровідникових матеріалів. Дозволяє вибрати діапазон апроксимації для випадків наявності кількох ділянок на ВАХ з різними механізмами струмоперенесення чи наявності артефактів. Наявність пакетного розрахунку, тобто можливості обробки цілого ряду ВАХ у разі зменшує трудомісткість та час обробки.

Висновки до розділу 2

- У роботі досліджувалися омичні та бар'єрні контакти до карбіду кремнію та нітриду галію з дифузійними бар'єрами на основі наноструктурованих плівок TiB_2 . Було відпрацьовано метод нанесення TiB_2 з оптимальними розмірами нанокристалітів. Досліджено електрофізичні, морфологічні та структурні параметри контактів. Також було досліджено реальні умови роботи омичних контактів, на прикладі потужного світлодіодного модуля з чіпами на основі нітриду галію.
- Для контролю морфології отриманих структур використовувалась атомно-силова мікроскопія (атомно-силовим мікроскопом “*Nanoscope IIIa*” виробництва фірми “*Digital instruments*”). Для контролю фазового складу отриманих структур використовувалися методи рентгенівської дифрактометрії (рентгенівський дифрактометр “*Philips Xpert*”) і Оже спектроскопія (спектроскоп “*LAS 2000*”).
- Розглянуто ряд методів визначення параметрів ДБШ: висоти бар'єру, фактора ідеальності та послідовного опору та виділено ряд найбільш інформативних для випадку використання їх для визначення параметрів ДБШ на основі широкозонних напівпровідників, які і буде використано надалі для розрахунків.

- Для дослідження надійності омічних і бар'єрних контактних структур використовувався швидкий термічний відпал, який дозволяв оцінити швидкість проходження деградаційних процесів у контакті.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [84, 104].

РОЗДІЛ 3

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ БАР'ЄРНИХ КОНТАКТІВ

3.1 Морфологічні та електрофізичні властивості контактів до SiC

Досліджено вплив швидкого термічного відпалу (ШТВ) при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на властивості бар'єрних контактів $\text{TiB}_2\text{-n-SiC}(6\text{H})$. Структура, характерний розмір кристалітів d і параметри ШТВ представлені в таблиці 3.1. Морфологія поверхні та профілі атомного вмісту за глибиною контактної металізації в контакті до та після ШТВ представлені на рис. 3.1.

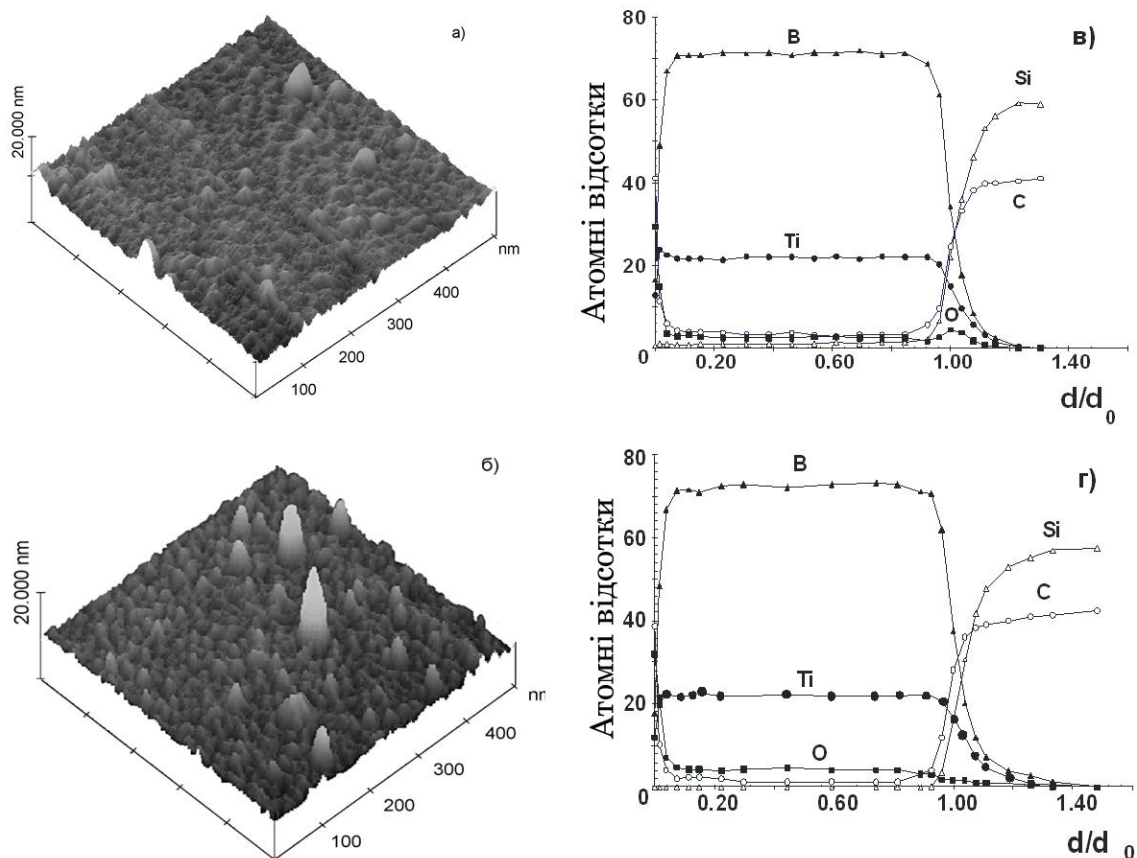


Рис. 3.1. Морфологія поверхні (а, б) та профілі атомного вмісту за глибиною контактної металізації (в, г) в контакті $\text{TiB}_2\text{-n-SiC}(6\text{H})$ $(000\bar{1})$: а, в – вихідний; б, г – після ШТВ при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При дослідженнях морфології поверхні нанокристалічних плівок контакту $\text{TiB}_2\text{-n-SiC(6H)}$ не можна визначити точний розмір впорядкованих областей. Однак, якщо припустити, що нерівності на поверхні плівки TiB_2 пов'язані з виходом на поверхню нанокристалітів, то можна для оцінки щільності розміщення кристалітів в аморфній матриці і проведення оцінки їх розмірів зверху використовувати такі параметри, як найбільш імовірна висота нерівностей і відстань між піками, як це зроблено в [107].

Таблиця 3.1.

Структура і склад досліджених бар'єрних контактів

Контакт	Товщини шарів, нм	d, нм	ШТВ, °C	Час ШТВ, с	Вміст. О, ат. %
$\text{TiB}_2\text{-n-SiC(6H)}$	50	3-5 (5-10*)	1000	90	4
$\text{Au-TiB}_2\text{-SiC(6H)}$	50/50	3-5	1000	60	6
$\text{Au-TiB}_2\text{-n-SiC(6H)**}$	50/50	30-50*	1000	60	

* Оцінка розміру зверху за даними АСМ

** Параметри розпилення не оптимальні

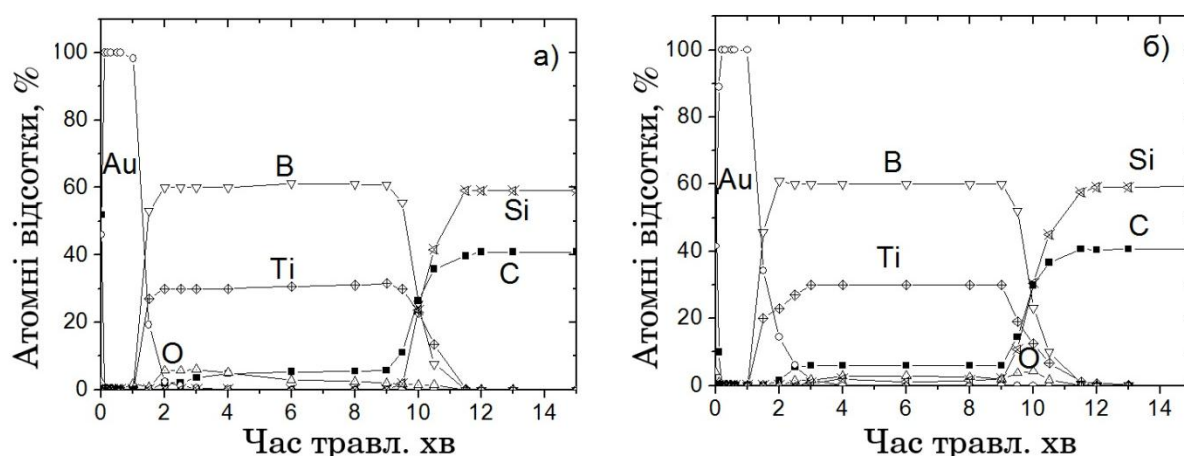


Рис. 3.2. Профілі атомного вмісту по глибині контактної металізації в контакті $\text{Au-TiB}_2\text{-n-SiC(6H)}$: а – вихідний зразок; б – після ШТВ при $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

З аналізу представлених на рис. 3.1а,б АСМ зображень можна зробити наступний висновок: розміри нерівностей поверхні плівки TiB_2 до та після ШТВ суттєво не змінилися, а розміри кристалітів не перевищують 5-10 нм.

Аналіз профілів розподілу компонентів за глибиною зразка показав відсутність значної взаємодифузії компонентів антидифузійного шару і напівпровідника як в TiB_2 -n-SiC(6H) (рис. 3.1в,г), так і в контакті Au-TiB₂-n-SiC(6H) (рис. 3.2). Це свідчить про послаблення дифузії по границях зерен в нанокристалічній плівці TiB_2 , швидше за все через наявність аморфної фази в міжзерновому просторі. Параметри діодів Шотткі на основі таких контактів не змінилися після ШТВ при $T = 1000^\circ\text{C}$ протягом $t = 90$ с. Висота бар'єру до і після ШТВ становила 0,7 еВ, фактор ідеальності – 1,5. Робочий температурний діапазон такого діода – від 190 до 425 $^\circ\text{C}$. Водночас плівка з більш великими кристалітами при тих же умовах відпалу не витримує внутрішніх механічних напруг, що виникають під час ШТВ, і релаксує з утворенням мікротріщин.

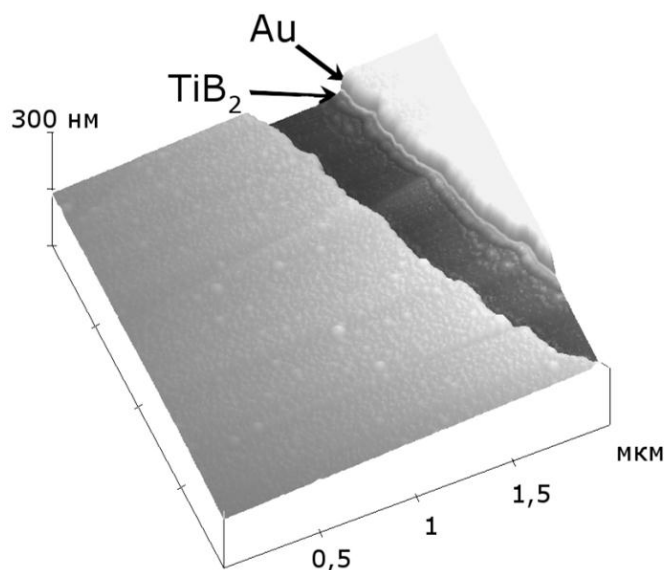


Рис. 3.3. Морфологія поверхні структури Au-TiB₂-n-SiC(6H) з полікристалічним шаром TiB_2 після ШТВ при $T = 1000^\circ\text{C}$.

На рис. 3.3, де показана морфологія поверхні структури Au-TiB₂-n-SiC(6H) після ШТВ при $T = 1000^\circ\text{C}$, в глибині мікротріщини простежується

крупнокристалічний антидифузійний шар, розмір зерна практично відповідає товщині шару TiB_2 .

Для порівняння результатів розрахунків різними методами висоти бар'єру, фактора ідеальності і логарифма добутку ефективної сталої Річардсона на ефективну площу контакту $\ln(A^{**}S)$ було проведено дослідження температурних залежностей ВАХ діодів з бар'єром Шотткі на основі $\text{Au-TiB}_2\text{-n-SiC(6H)}$ (рис. 3.4).

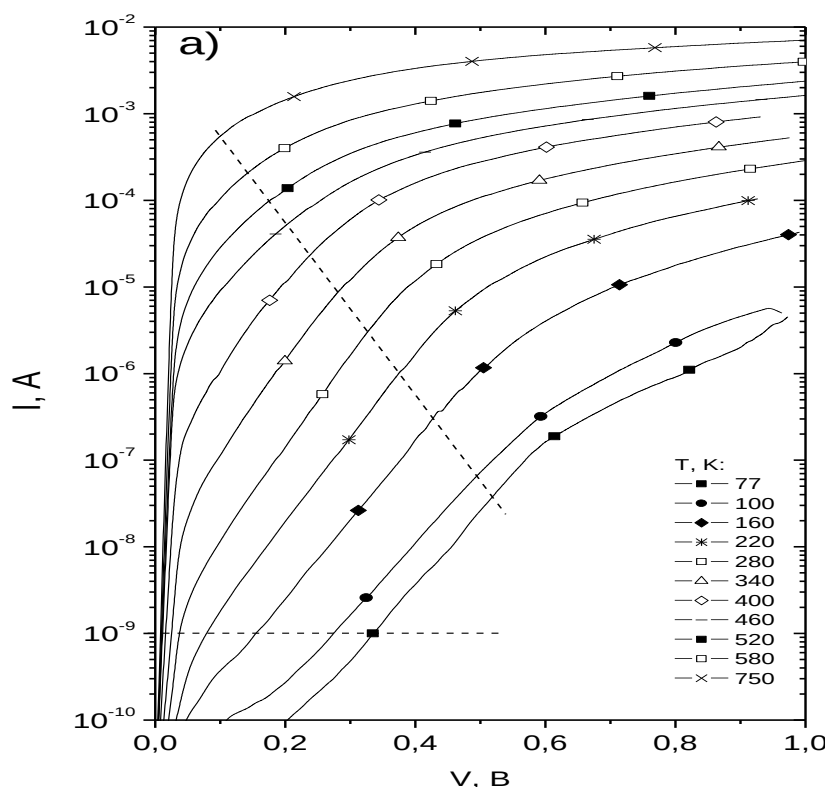


Рис. 3.4. Температурна залежність ВАХ одного з діодів. Штриховими прямими обмежена зона, що описується залежністю (2.17).

Параметри бар'єру Шотткі, розраховані різними методами при температурах 340 К і 480 К, представлені в табл. 3.2 і 3.3 відповідно.

Таблиця 3.2

Параметри бар'єру Шотткі, розраховані різними методами.
Розрахунок для температури в межах 340 К (рис. 3.4).

Метод розрахунку	n	φ_b , В	$\ln(A^{**}S)$	R_s , Ом
Род.	$1,51 \pm 0,05$	$0,704 \pm 0,003$	-4,646*	
Чонг	$1,50 \pm 0,01$	$0,704 \pm 0,003$	-4,646*	934 ± 30
ПА	$1.493 \pm 0,005$	$0,704 \pm 0,002$	-4,646*	951 ± 40
ЭА		0,50	-4,0	
Сато		0,52	-4,1	
C-V		0,98		

* Значення, взяті для розрахунку.

Таблиця 3.3

Параметри бар'єру Шотткі, розраховані різними методами.
Розрахунок для температури в межах 480 К (рис. 3.4).

Метод розрахунку	n	φ_b , В	R_s , Ом
Род.	$1.6 \pm 0,12$	$0.789 \pm 0,005$	
Чонг	$1.5 \pm 0,15$	$0.79 \pm 0,01$	400 ± 25
ПА	$1.45 \pm 0,05$	$0.786 \pm 0,003$	370 ± 25

Для розрахунків методом ЕА використані результати струму насичення, визначені за методом Родеріка. Отримане значення висоти бар'єра надто занижене (див. табл. 3.2). Причиною цьому служить температурна залежність висоти бар'єру (рис. 3.5в).

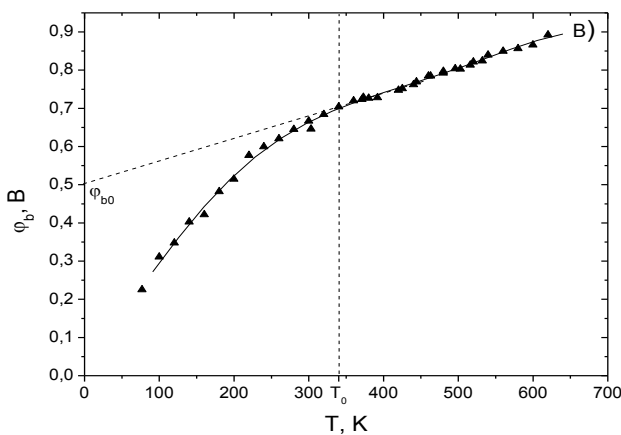
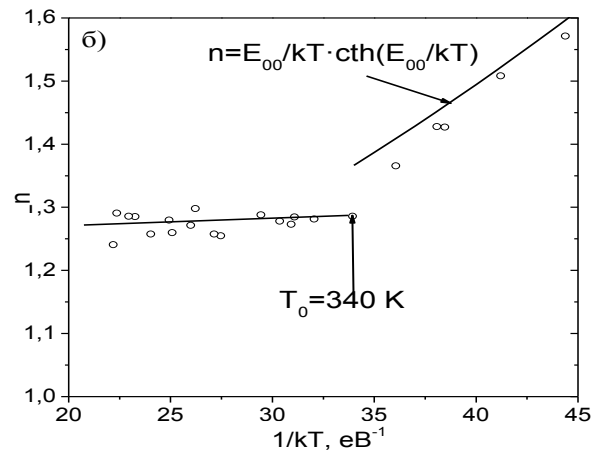
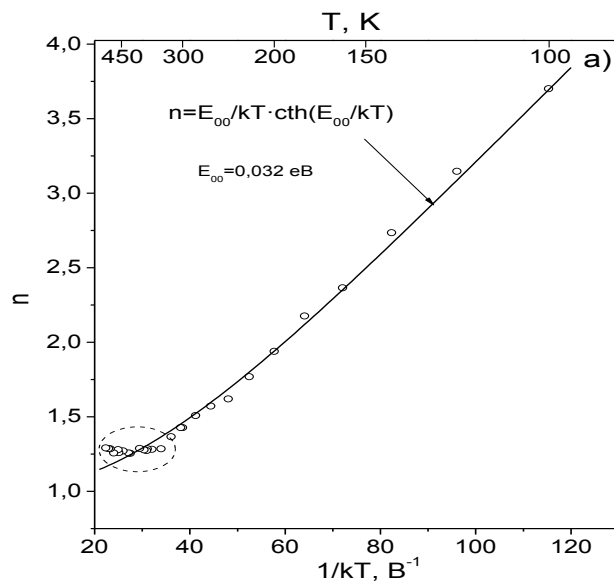


Рис. 3.5. Температурні залежності фактора ідеальності (а,б) та ВБШ (в), розраховані за методом Родеріка з ВАХ, поданих на рис. 3.4.

Як бачимо, отримане з цих методів значення висоти бар'єру є близьким до величини, отриманої лінійною екстраполяцією до нуля температури на температурній залежності висоти бар'єра, розрахованої за методом Родеріка (див. рис. 3.5в).

На рис. 3.6 представлена залежність фактора ідеальності від напруги, розрахована за рівнянням (2.19) для ВАХ при $T = 340$ К. Бачимо, що присутня ділянка кривої $n(V)$, для якої залежність від напруги досить незначна.

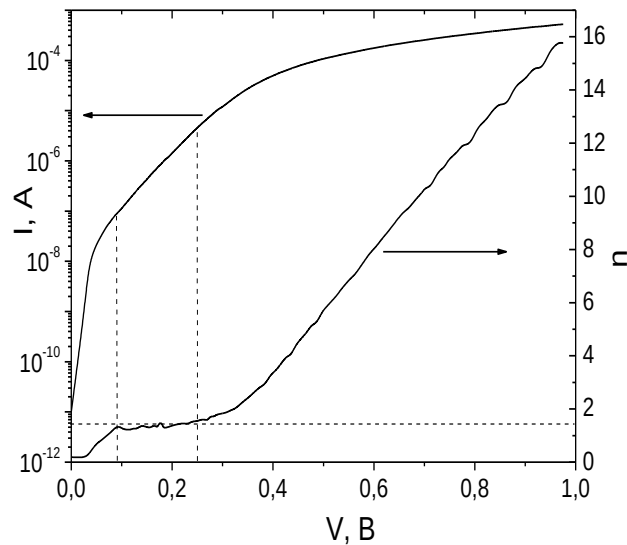


Рис. 3.6. Залежність фактора ідеальності від напруги, розрахована за формулою (2.19), а також ВАХ досліджуваного діода при $T = 340$ К. Штриховими прямими обмежена зона, що описується залежністю (2.17).

За цим діапазоном напруг і визначають величину фактора ідеальності і ВБШ, користуючись методом Родеріка. Слід зауважити, що навіть на виділеній ділянці не можна стверджувати про незмінність фактора ідеальності з напругою. Ця залежність у нашому випадку внесе похибку по точності визначення фактора ідеальності, а отже і висоти бар'єра, істотно більшу, ніж похибки, що вносяться точністю вимірювань. Характерний локальний максимум n при низьких напругах і зростання фактора ідеальності від напруги при великих напругах відзначався також низкою інших авторів [91, 94, 104, 108].

Розрахунок фактора ідеальності, послідовного опору та висоти бар'єру за методом Чонга подано на рис. 3.7

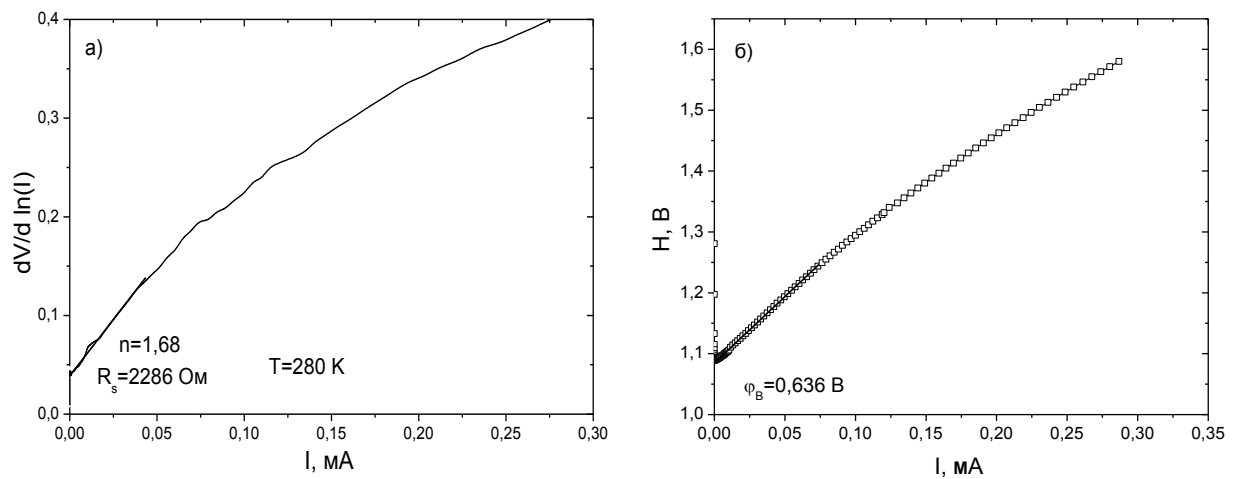


Рис. 3.7. Розрахунок параметрів за методом Чонга: залежність $dV/d \ln(I) \propto I$ для визначення фактора ідеальності та послідовного опору (а) і функція H в залежності від струму для визначення висоти бар'єру (б).

Нелінійність обох графіків можна пояснити нелінійною залежністю $n(V)$, що вже спостерігалось на рис. 3.6.

Розрахунок висоти бар'єру методом енергії активації подано на рис. 3.8.

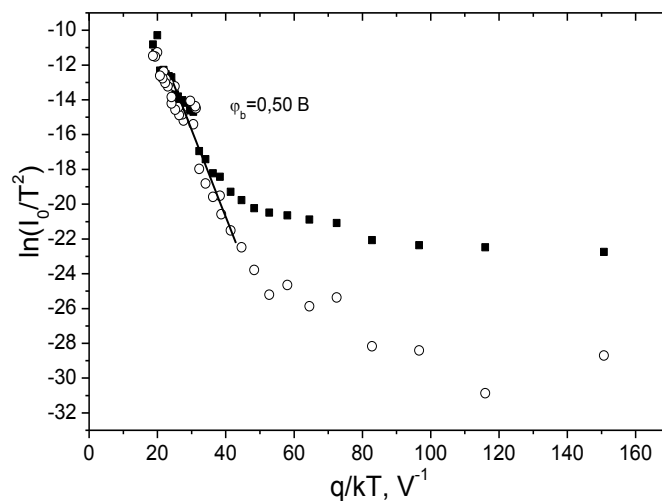


Рис. 3.8. Залежність $\ln(I_0/T^2) \propto q/kT$ для розрахунку висоти бар'єру методом енергії активації.

Бачимо, що існує деяка ділянка температур, на якій залежність $\ln(I_0/T^2) \propto q/kT$ лінійна, що мало б свідчити про застосовність методу на

цій ділянці для визначення величини висоти бар'єру. Однак, як буде показано нижче, цієї умови не достатньо.

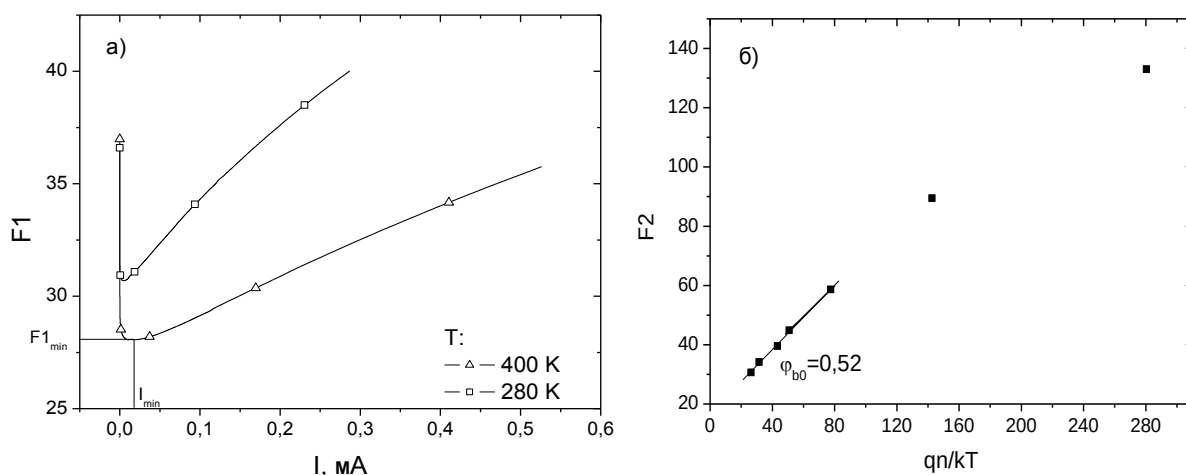


Рис. 3.9. Розрахунок висоти бар'єра методом Сато: залежність функції $F1$ від струму, для двох температур а) і залежність функції $F2$ від qn/kT .

Розрахунок висоти бар'єру методом Сато представлено на рис. 3.9. Значення ϕ_b близьке до значення для методу енергії активації. Проте отримане за допомогою цих двох методів значення висоти бар'єру знаходиться в припущенні відсутності залежності його від температури.

При наявності лінійної температурної залежності висоти бар'єра отриману величину часто позначають — ϕ_{b0} щоб підкреслити, що це значення екстрапольоване до температури, рівною нулю. Однак це справедливо лише для лінійної температурної залежності висоти бар'єра; у разі, коли вона нелінійна, отримаємо різні значення ϕ_{b0} для різних діапазонів температури. У такому випадку обов'язково потрібно вказувати діапазон температур, в якому проводилося вимірювання, а також враховувати похибку визначення значення $\ln(A^{**}S)$, рівну $q\beta/k$, де β — температурний коефіцієнт висоти бар'єра.

Причиною збільшення похибки розрахунку висоти бар'єра у всіх трьох методах є зменшення протяжності логарифмічної ділянки ВАХ і підвищення складності визначення її меж. У випадку методу Чонга помилка

максимальна, бо визначення ділянки $BAX V \sim kT/q$ в даному випадку відіграє істотну роль у загальній точності вимірювання.

Розглянемо причини температурної залежності визначеної (ефективної) висоти бар'єру. По-перше, слід виключити вплив термопольового механізму струмоперенесення.

Температурна залежність фактора ідеальності для цього механізму буде мати вигляд:

$$n = E_{00} \text{cth}(E_{00} / kT) / kT \quad (3.1)$$

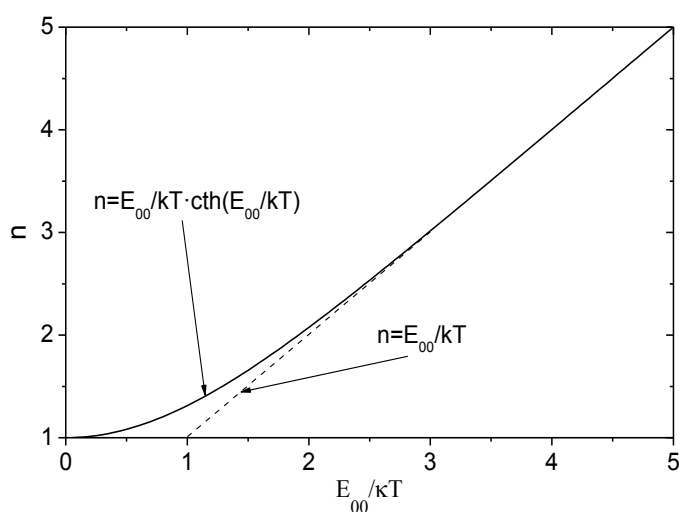


Рис. 3.10. Розрахункова температурна залежність фактора ідеальності у припущенні термопольового механізму струмоперенесення.

На рис. 3.10 представлений теоретичний вигляд температурної залежності фактора ідеальності в припущенні термопольового механізму струмоперенесення. Як бачимо, при значеннях $n > 3$ нахил залежності $n = f(1/kT)$ стає рівним E_{00} , що може бути легко використане для визначення E_{00} .

З рис. 3.11 можна побачити, що температурний хід фактора ідеальності добре описується формулою $n = E_{00} \text{cth}(E_{00} / kT) / kT$ в інтервалі температур 100-300 К.

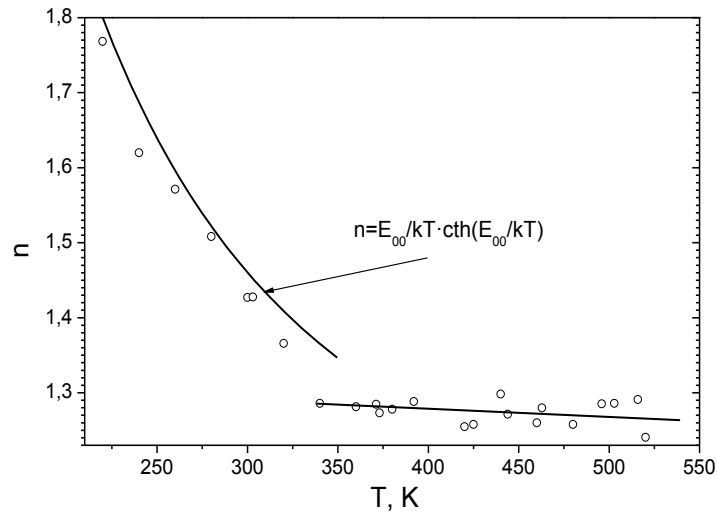


Рис. 3.11. Виміряна температурна залежність фактора ідеальності в температурному діапазоні 450-650 К.

Концентрація некомпенсованих донорів, виміряна з ВФХ (рис. 3.14), склала $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. E_{00} , розрахована на основі температурної залежності фактора ідеальності та за формулою (3.1) практично співпадають.

На ділянці 300-340 К спостерігається злам як в температурній залежності фактора ідеальності, так і висоти бар'єра (рис. 3.11), що відображає зміну механізму струмоперенесення. Температурна залежність фактора ідеальності вище 340 К набагато слабша і залежність ця описується лінійним законом (рис. 3.11), тобто вона не може бути пояснена впливом тунельного механізму струмоперенесення.

По-друге, залежність визначеної (ефективної) висоти бар'єра від фактора ідеальності може бути пояснена падінням напруги на перехідному шарі. У роботі Божкова В.Г. [109] запропоновано використовувати для визначення висоти бар'єру без впливу цього чинника модифіковане рівняння для струму насичення:

$$I_o = A^{**} T^2 \text{Sexp}(-q\varphi_b / nkT),$$

тобто: $\varphi_{b\text{ ef}} = \varphi_b / n$.

Однак це рівняння не пояснює лінійної залежності висоти бар'єра від фактора ідеальності.

По-третє, в роботі S.Hara [110] показано, що значну роль у формуванні бар'єру Шотткі до карбіду кремнію відіграють поверхневі стани. Ним була запропонована інша залежність, яка добре описує як результати що були отримані як автором роботи [110], так і наші результати:

$$\varphi_{b\text{ ef}} = n\varphi_{b0} - \zeta(n-1),$$

де ζ – енергія поверхневих станів. Іншими словами, будуючи залежність ефективної висоти бар'єру від фактора ідеальності (отриманих, наприклад, при різних температурах) та екстраполюючи її до значення $n = 1$ отримаємо істинне значення висоти бар'єру (без впливу поверхневих станів). Залежність ефективної висоти бар'єру від фактора ідеальності для вибірки діодів (рис. 3.12) лінійна, що вказує на значний вплив поверхневих станів на величину ефективної висоти бар'єру.

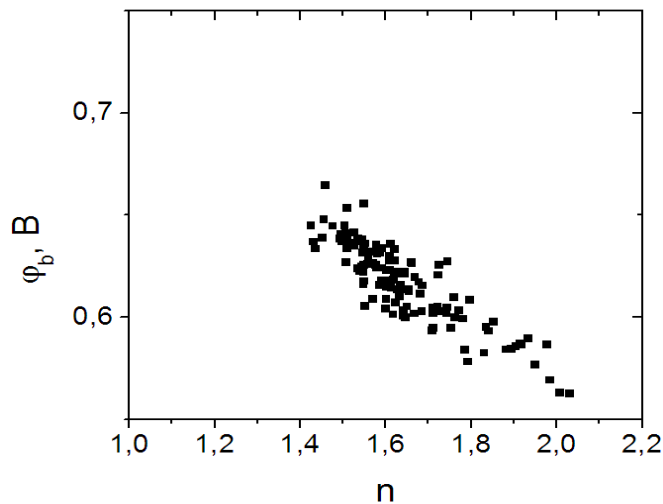


Рис.3.12. Залежність ефективної висоти бар'єру від фактора ідеальності для партії ДБШ при кімнатній температурі.

Проте за кімнатних температур, як нами вже з'ясовано значну роль відіграють термopольові процеси, що не дозволяє нам використовувати цю залежність для визначення істинної висоти бар'єру. Для отримання цієї величини нами було побудовано залежність ефективної висоти бар'єру від фактора ідеальності для одного діода у температурному діапазоні 450-650 К (рис. 3.13), де впливом термopольової компоненти струму можна знехтувати.

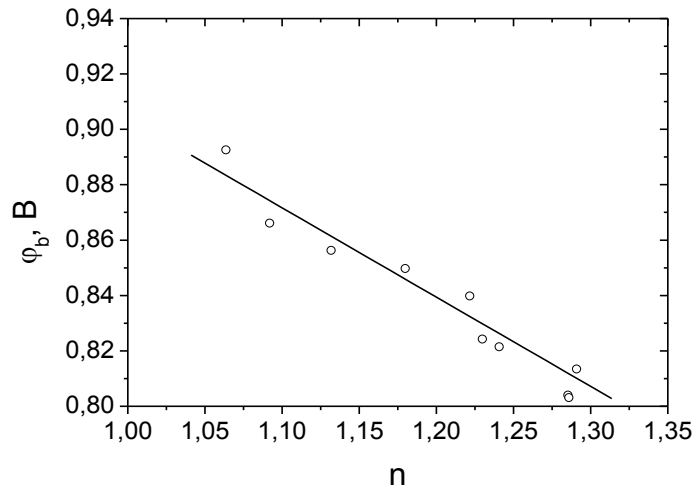


Рис. 3.13. Залежність ефективної висоти бар'єру від фактора ідеальності для одного діода в температурному діапазоні 450-650 К.

Бачимо, що екстраполяція до $n = 1$ дає значення висоти бар'єру 0,9 еВ. Таке ж значення висоти бар'єру отримали і з ВФХ (рис. 3.14).

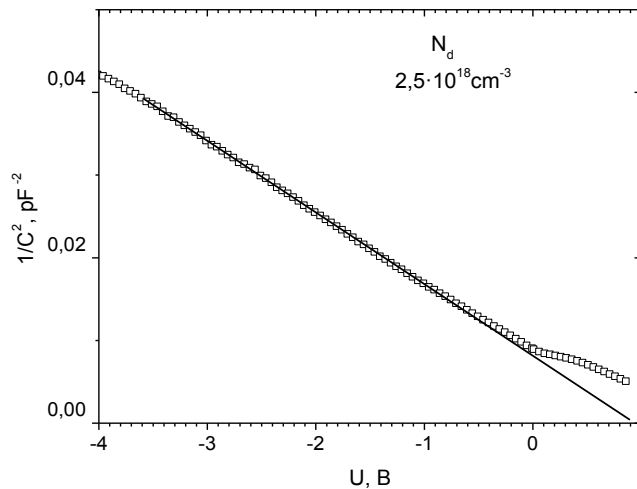


Рис. 3.14. ВФХ ДБШ Au-TiB₂-n-SiC(6H).

Інші можливі механізми залежності висоти бар'єра Шотткі (ВБШ) від фактора ідеальності описано в оглядах Танга [108] і Брілсона [111]. Для детального вияснення, який з цих механізмів реалізується на практиці, необхідне комплексне дослідження температурних залежностей ВАХ з урахуванням даних, отриманих іншими методами.

3.2 Морфологічні та електрофізичні властивості контактів до GaN

Досліджені діоди з бар'єром Шоттки (ДБШ) Au-TiB₂-n-GaN були виготовлені на епітаксійній плівці нітриду галію, вирощеній на монокристалічних підкладках Al₂O₃ (0001) методом металорганічної газофазної епітаксії. Більш докладно технологію та структурні характеристики ДБШ опубліковано в [112]. На вибірці ДБШ на пластині досліджено ВАХ та ВФХ. На одному з типових контактів досліджено температурну залежність ВАХ. На тестовій пластині з аналогічною шаровою структурою, але без фотолітографії, рентгенодифракційним методом визначено усереднену густину дислокацій.

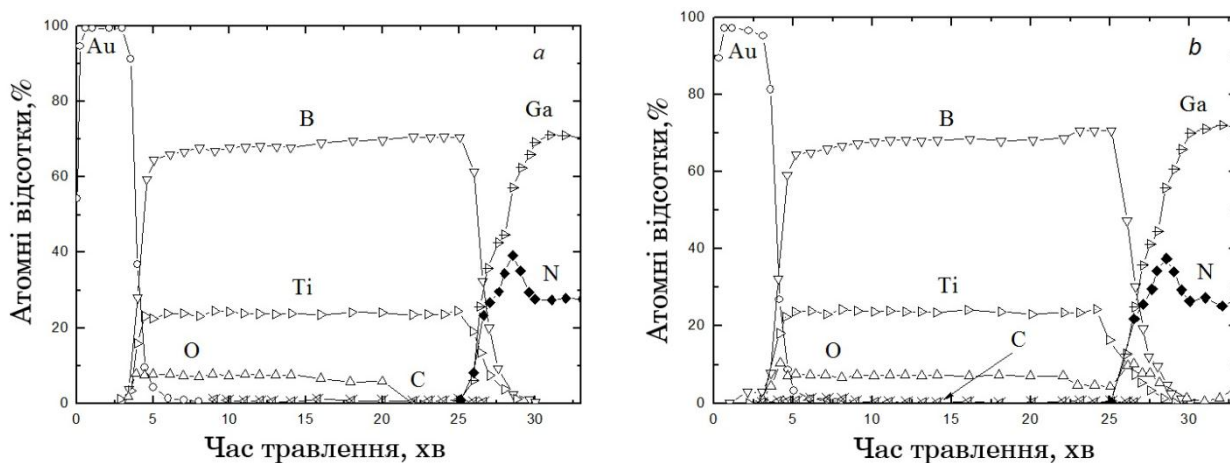


Рис. 3.15. Розподіл компонент по глибині контакту Au-TiB₂-n-GaN, отриманий методом Оже-спектроскопії до (а) і після ШТВ (b) при T = 900 °C протягом t = 30с.

Отримані вольтамперні характеристики нітридгалієвих ДБШ мали значний розкид (див. рис. 3.16). Такий розкид може бути пов'язаний з дефектністю епітаксійної плівки, яка проявляється у вигляді шунтуючих дефектів і на ВАХ спостерігається у вигляді надлишкових струмів при малих значеннях прикладених напруг (див. рис. 3.16).

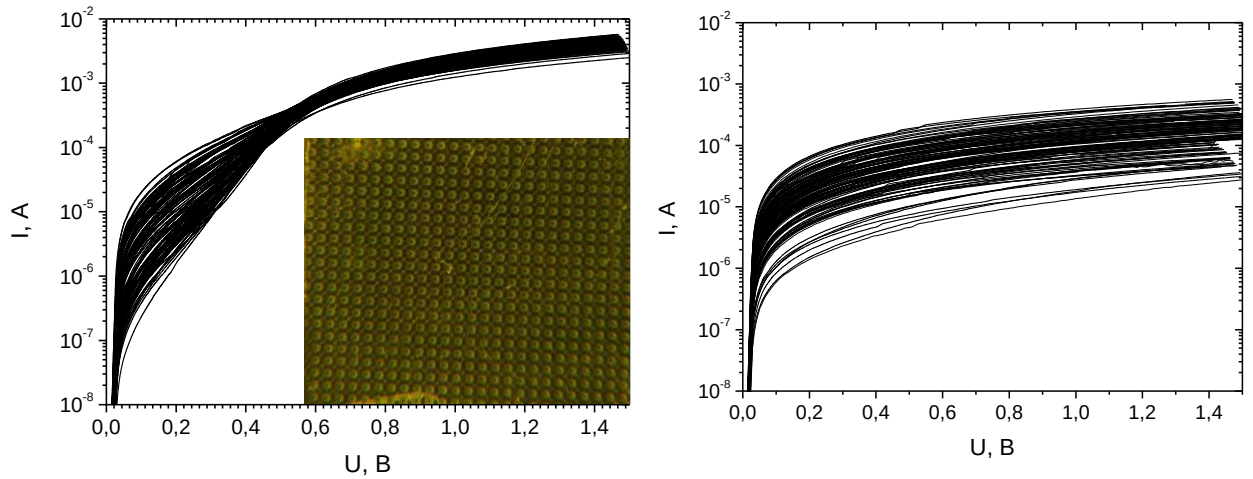


Рис. 3.16. ВАХ контактів з бар'єром Шотткі Au-TiB₂-p-GaN, зібрані з контактів по усій пластині.

Зазвичай ВАХ ДБШ описується залежністю:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{n(T)kT}\right), \quad (3.2)$$

звідки:

$$n(V) = \frac{dV}{d \ln(I)} \frac{q}{kT}. \quad (3.3)$$

Проте, для нашого випадку ВАХ у деякому інтервалі температур має дві ділянки з різними факторами ідеальності та струмами відсічки (рис. 3.17).

Таку ВАХ на ділянці, де вплив послідовного опору незначний, можна описати сумою двох складових: струму, зумовленого термоелектронною (перший доданок) та польовою емісією:

$$I = I_{TE} \left[\exp\left(\frac{qV}{n_{TE}(T)kT}\right) - 1 \right] + I_F \left[\exp\left(\frac{qV}{n_F(T)kT}\right) - 1 \right], \quad (3.4)$$

де: $I_{TE} = A^* T^2 S \exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right)$ – струм насичення для термоелектронної емісії.

Спостережуваний тунельний механізм струмоперенесення не може бути пов'язаний із безпосереднім тунелюванням носіїв крізь область просторового заряду (ОПЗ), оскільки при концентрації носіїв ($\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) ширина ОПЗ надто велика. У випадку ж струмоперенесення, пов'язаного з

шунтуючими дислокаціями, що перетинають область просторового заряду, тунелювання може відбуватися з торця дислокації, що збільшує його ефективність.

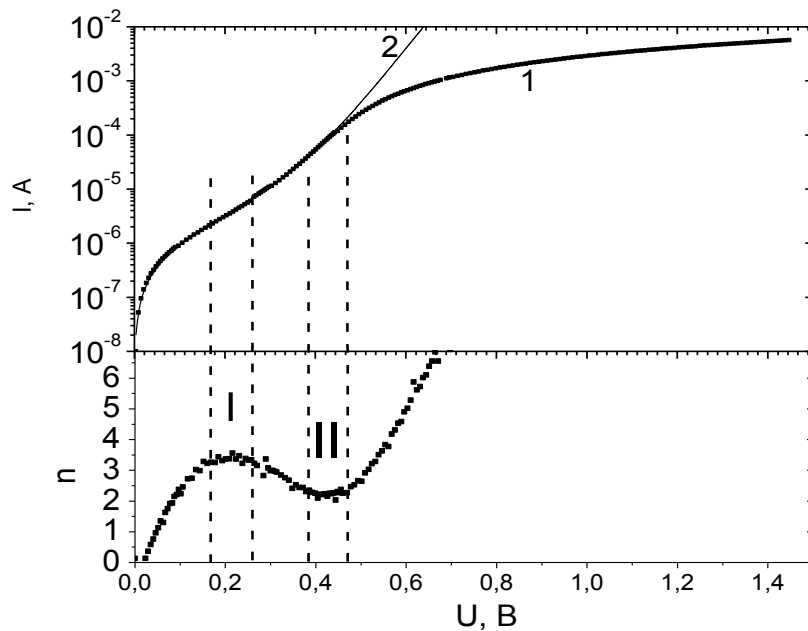


Рис. 3.17. Характерна ВАХ ДБШ (зверху): 1 – експеримент; 2 – теоретичний розрахунок без врахування послідовного опору та залежність ефективного фактора ідеальності, порахованого за формулою (3.3) (знизу) з двома ділянками, що відповідають двом механізмам струмоперенесення: I – переважає тунельна складова, II – переважає термоелектронна складова.

У такому випадку у формулі (3.4) для другої компоненти можна вжити модель дислокаційного шунтування [113] згідно якої:

$$I_F = q\rho\nu_D S \exp\left(\frac{q\phi_b}{n_F(T, \varepsilon)kT}\right) - \text{струм насичення для польової емісії},$$

$$\text{де: } n_{TF} = \frac{\varepsilon}{kT},$$

ρ – густина дислокацій; ν_D – частота Дебая; ε – енергія активації.

Оскільки фактор ідеальності в струмі насичення польової компоненти, експонційно залежний від енергії активації, то його вплив досить значно

відображатиметься на ефективній висоті бар'єру, визначеній із рівняння (3.2) що слідує з рис. 3.18.

Залежність ефективної висоти бар'єру може бути описана за теорією Божкова і обернено пропорційна до фактора ідеальності.

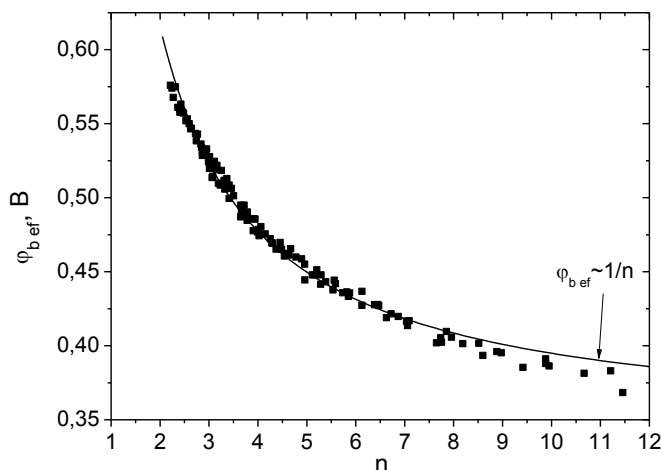


Рис. 3.18. Ефективна висота бар'єру в залежності від фактора ідеальності, (визначена з ВАХ вибірки контактів на рис. 3.4 при $U = 0.4$ В.)

На рис. 3.19 представлено температурні залежності ВАХ одного з досліджених контактів.

Можна також відзначити те, що при низьких температурах ВАХ має лише одну експоненційну ділянку, яка відповідає тунелюванню.

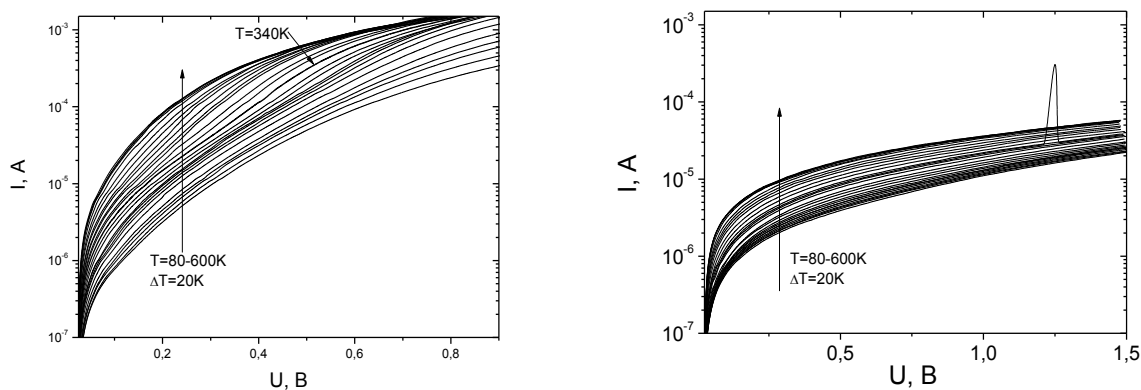


Рис. 3.19. Температурні залежності ВАХ контактів з бар'єром Шотткі Au-TiB₂-n-GaN.

При підвищенні температури до 340 К починає з'являтися друга експоненційна ділянка, яка, очевидно, належить іншому механізму струмоперенесення, що і зумовлює різке падіння ефективного фактора ідеальності, отриманого апроксимацією ВАХ формулою (3.2) (рис. 3.20).

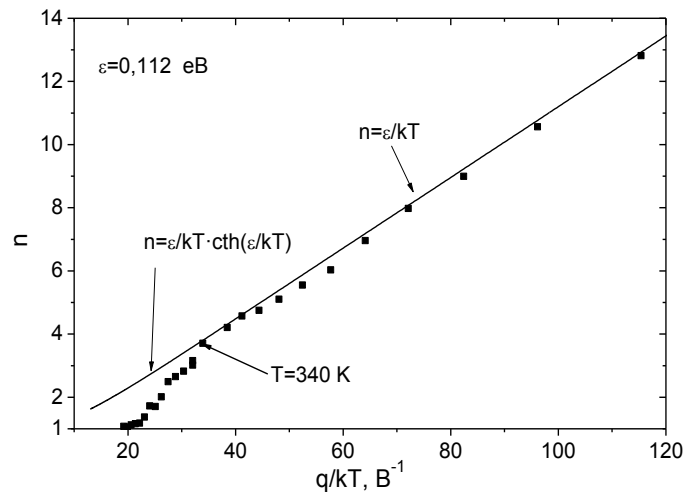


Рис. 3.20. Температурна залежність ефективного фактора ідеальності в діапазоні 80-600 К.

Зрозуміло, що така апроксимація дасть достовірний результат лише на ділянках, де переважає лише один із двох механізмів струмоперенесення, такий метод зручно використовувати для виявлення ділянок, що описуються лише одним механізмом струмоперенесення. Із залежності бачимо, що до температури 340 К ВАХ практично повністю описується польовим механізмом струмоперенесення. При температурах вище 500 К ВАХ можна описати термоелектронним механізмом, на проміжку ж 340-500 К коректна апроксимація можлива лише з використанням двохкомпонентної моделі (3.4).

Апроксимуючи ВАХ на проміжку 340-600 К рівнянням (3.4), отримали залежність висоти бар'єру, визначену із струму насичення для термоелектронної компоненти (рис. 3.21).

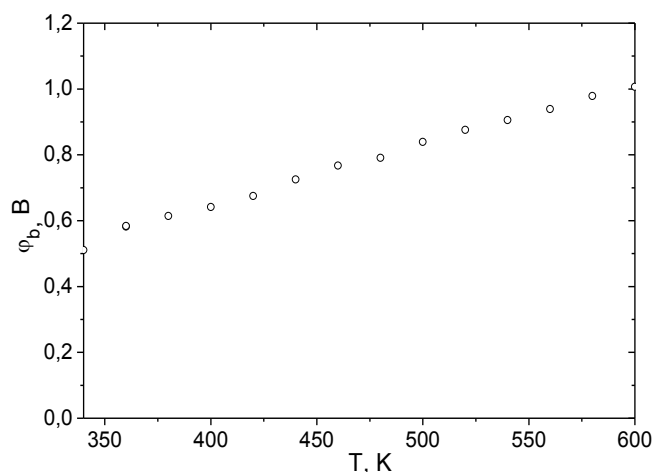


Рис. 3.21. Температурна залежність висоти бар'єру в діапазоні 340-600 К.

Температурна залежність визначеної висоти бар'єру може бути пояснена похибкою, пов'язаною з термопольовим “хвостом” тунельної компоненти (рис. 3.20) та впливом послідовного опору.

Залежність висоти бар'єру від фактора ідеальності, побудована на проміжку температур 340-600 К дає можливість визначити істинне значення висоти бар'єру, екстраполяцією до значення фактора ідеальності, рівного 1. Розраховане таким чином значення висоти бар'єру складає 0,97 еВ.

Визначена густина дислокацій з відомого струму насичення I_F при низьких температурах склала $\rho = 1,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, що узгоджується з даними роботи [112], в якій густина дислокацій визначена рентгенодифракційним методом в шарах GaN, вирощених на сапфірі методом металорганічної газофазної епітаксії в ЗАО “Елма-Малахіт”, і виявилася рівною $1 \div 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ для різних зразків.

Проведено вимірювання вольтфарадних характеристик вибірки контактів.

ВФХ (рис. 3.22) добре описується залежністю:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(\phi_b - V - kT/q)}{q\epsilon_s N_d} \quad (3.5)$$

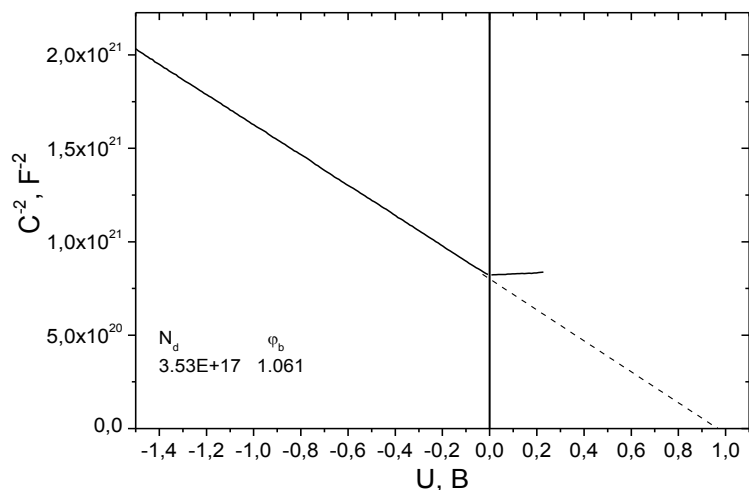


Рис. 3.22. ВФХ діода Шотткі Au-TiB₂-n-GaN, ВАХ якого представлена на рис. 3.17.

Висота бар'єру для даного контакту склала $\sim 0,95$ В, що добре узгоджується з висотою бар'єру, отриманою з ВАХ при високих температурах, або екстраполяцією залежності $\phi_b(n)$ (рис. 3.23) до значення $n = 1$.

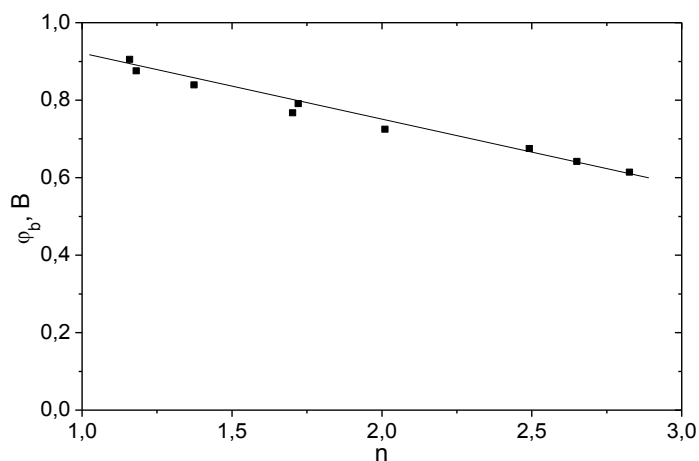


Рис. 3.23. Залежність висоти бар'єру від фактора ідеальності для термоелектронної компоненти в діапазоні температур 340-600 К.

З ВФХ розраховано параметри: висоту бар'єру Шотткі та концентрацію некомпенсованих донорів, гістограми розподілу яких подано на рис. 3.24.

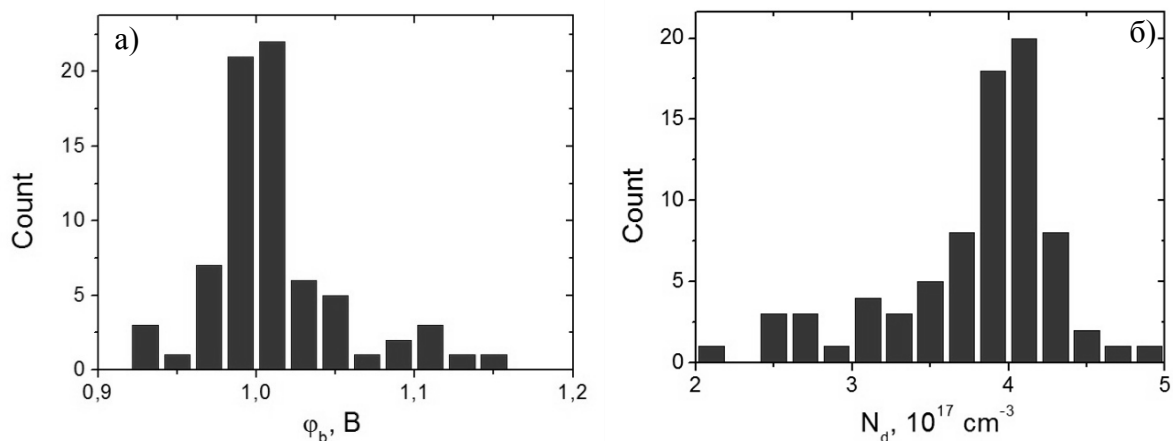


Рис. 3.24. Гістограми розподілу висоти бар'єру Шотткі (а) та N_d (б) по пластині, отримані з ВФХ.

Висновки до розділу 3

1. В результаті досліджень виявлено, що термічна стійкість контактних структур $\text{Au-TiB}_2\text{-n-SiC(6H)}$ 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 ШТВ при $T = 1000^\circ\text{C}$ та $t = 60 \text{ c}$ і не змінювали своїх електрофізичних параметрів після відпалу. У той же час у контактних структурах з неоптимальним розміром кристалітів при тій же ШТВ відбулося значне розтріскування контактної металізації.
2. Показано, що до температури 340 К основними механізмами струмоперенесення є польова та термопольова емісії. При збільшенні температури відбувається зміна механізму струмоперенесення на термоелектронну емісію.
3. Встановлено, що фактор ідеальності у діапазоні 340-550 К має величину 1,3-1,2 і слабко спадає з температурою, що не описується рівнянням Шотткі і може пояснювати різницю між величинами висот

бар'єру, отриманих з нетермічних і термічних методів визначення ВБШ.

4. Запропоновано припущення, що близька до лінійної залежність фактора ідеальності від температури може бути пояснена впливом на струмоперенесення поверхневих станів. Це узгоджується і з тим фактом, що ВБШ, отримана екстраполяцією її залежності від фактора ідеальності до 1, добре узгоджується зі значенням ВБШ, отриманою з високочастотних ВФХ.
5. Проведено дослідження діодів з бар'єром Шотткі (ДБШ) Au-TiB₂-n-GaN, в результаті чого було виявлено, що ВАХ ДБШ при кімнатній температурі має дві характерні ділянки, на одній з яких, в межах - 0,2 В, переважає польовий механізм струмоперенесення, на іншій, в межах - 0,4 В – термоелектронний механізм.
6. Визначено, що струмоперенесення в бар'єрах Шотткі Au-TiB₂-n-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 струмоперенесення. В області 340-420 К переважають обидва механізми на різних ділянках ВАХ.
Висота бар'єру, визначена з ВФХ, добре узгоджується з висотою бар'єру, визначеною екстраполяцією до $n = 1$ температурної залежності висоти бар'єру, отриманої з ВАХ, і складає 1 еВ.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [84, 104, 114]

РОЗДІЛ 4

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ

Омічні контакти до широкозонних напівпровідників, в основному, формуються за допомогою відпалу нанесеного металу, внаслідок чого проходять міжфазні реакції з виділенням контактоутворюючої фази, дифузія підлегулої домішки і т.ін. Важливою особливістю взаємодії металу з напівпровідником є наявність кількох метастабільних фаз, які можуть перетворюватися одна в іншу при нагріванні, що часто зменшує температурну стабільність. Особливо ці процеси складні в бінарних напівпровідниках зокрема в SiC, які із різними металами можуть формувати кілька метастабільних фаз як карбідів, так і силіцидів. Тому з погляду стабільності контактів нам цікавими стають саме метастабільні фази, умови їх формування, температури та умови перетворення.

4.1 Фазові перетворення в омічних контактах до SiC

Для дослідження процесу формування омічного контакту Ni-SiC(6H) було проведено ШТВ при температурах 450, 600, 750, і 1000 °C. До температури $T = 750\text{ °C}$ питомий контактний опір різко знижується з підвищенням температури відпалу (рис. 4.1). Сформований же при температурі відпалу при $T = 750\text{ °C}$ контакт практично не змінює своїх параметрів, принаймні до температури ШТВ $T = 1000\text{ °C}$. Згідно досліджень літературних даних (рис. 1.7), оптимальними температурами відпалу у таких контактах є $T = 950 - 1100\text{ °C}$. Оскільки значення питомого контактного опору після ШТВ при $T = 750\text{ °C}$ та $T = 1000\text{ °C}$ близькі, то можемо зробити висновок, що за даних умов очистки пластини та нанесення контакту можливе формування омічного контакту при зниженій температурі (порівняно з даними літературних джерел) без втрати якості контакту. Отриманий контактний опір $1-3 \cdot 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при концентрації донорів

$\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ знаходиться серед контактів високої якості (див. рис. 1.6), хоча слід зауважити, що кращі літературні результати мають на порядок нижче значення питомого контактного опору [46, 115].

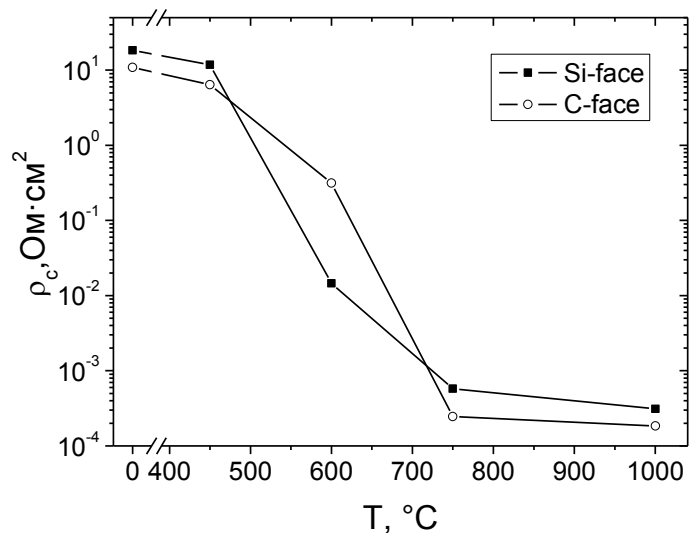


Рис. 4.1. Залежності питомого опору контактів Ni-p-SiC(6H), сформованих на гранях Si та C, від температури ШТВ, тривалістю $t = 90$ с.

Підтвердженням температурної стабільності дифузійного бар'єру на основі наноструктурованих шарів TiB_2 є дослідження профілів розподілу компонент, отриманих за глибиною контакту у подібних структурах методом Оже-спектроскопії (рис. 4.2).

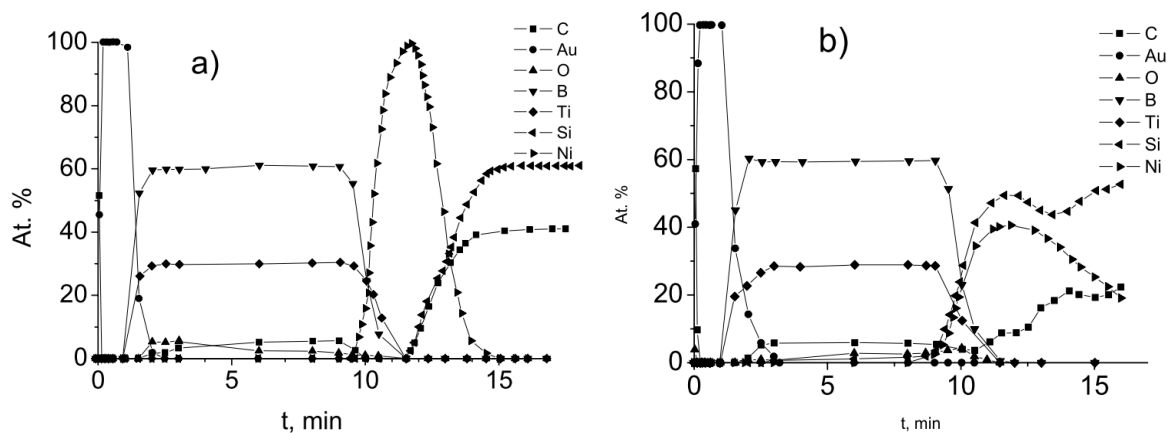
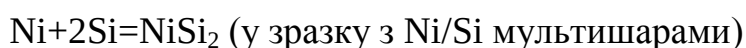
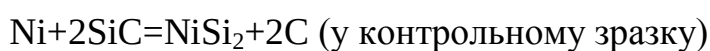


Рис.4.2. Профілі розподілу компонент, отримані методом Оже-спектроскопії, контактів Au-TiB₂-Ni-n-SiC до (a) і після ШТВ при $T = 1000$ °C (b).

Бачимо, що незважаючи на міжфазні реакції під дифузійним бар'єром, сам дифузійний бар'єр залишається стабільним до температур ШТВ при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Одним із найбільш імовірних механізмів формування омичного контакту Ni-n-SiC(6H), як було показано у першому розділі, є генерація у процесі міжфазних реакцій вакансій кремнію на межі розділу, що мають донорні властивості. Для перевірки даної гіпотези було сформовано два зразки наступного типу: контрольний – Ni-n-SiC(4H) та з багат шаровим нанесенням тонких шарів Ni/Si/Ni/Si у співвідношенні Ni:Si 1:2, що забезпечить формування NiSi_2 з меншою концентрацією вакансій кремнію:



Порівняльний аналіз дифрактограм зразків (рис 4.3) Ni-n-SiC(4H) та NiSi_2 -n-SiC(4H) дає підставу стверджувати, що формування контактів NiSi_2 -n-SiC(4H) практично завершується при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, але питомий контактний опір залишається високим.

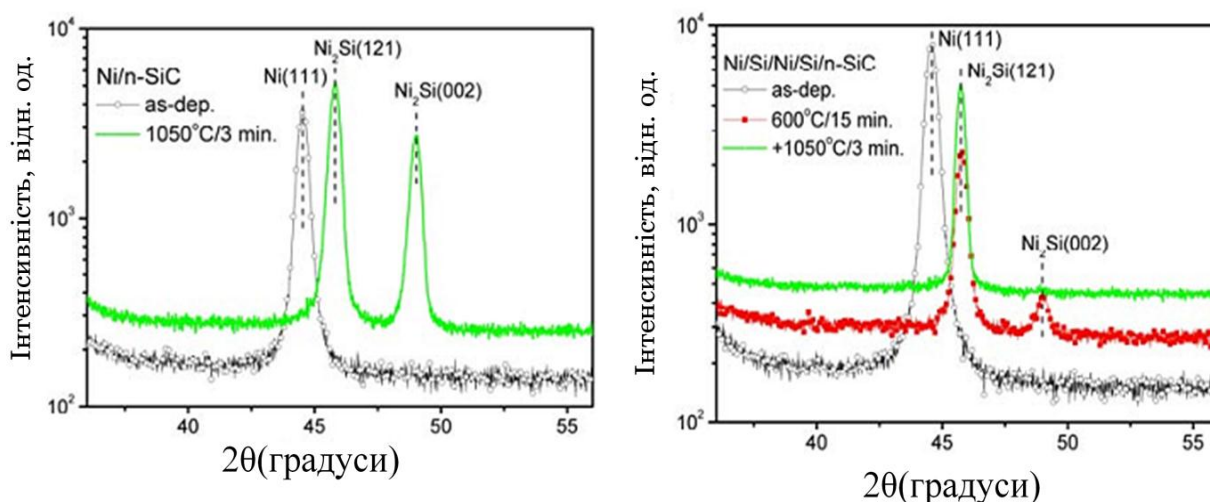


Рис. 4.3. Рентгенівські дифрактограми контактів Ni-n-SiC(4H) і NiSi_2 -n-SiC(4H) при різних температурах термообробки.

У випадку, коли довжина перенесення значно більша за радіус контакту, значення питомого контактного опору можна отримати, побудувавши залежність опору від відношення зовнішнього та внутрішнього радіусів зразка (рис. 4.4), а також знайшовши з графіка, опір відсічки і помноживши його на площу одного контакту. Згідно з моделлю СТЛМ – [86, 87] з постійним відношенням зовнішніх і внутрішніх радіусів, що була описана у розділі - 2.2.2.

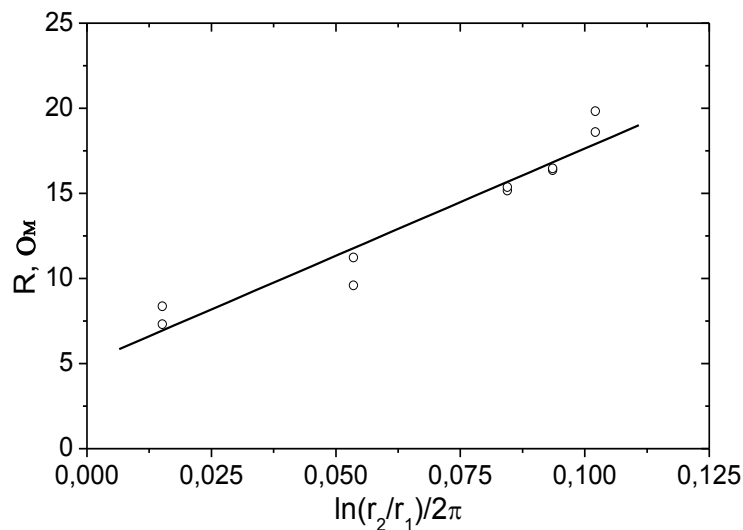


Рис. 4.4. Залежність повного опору між радіальним і загальним контактами (шаблон див. на рис. 2.2а) від логарифму відношення внутрішнього і зовнішнього радіусів контактів.

Отримана довжина перенесення набагато більша за радіус контакту, що дозволяє використовувати спрощену модель СТЛМ. Для визначення механізму струмоперенесення в контакті було досліджено контактний опір в діапазоні температур 100 - 380 К.

Величина питомого контактного опору падає з ростом температури в усьому дослідженому діапазоні температур 100 - 380 К (рис. 4.5). Розрахунок параметру Падовані-Стреттона показує, що у даному діапазоні температур при легуванні 10^{19} см^{-3} повинна переважати польова емісія, проте спостерігається температурна залежність питомого опору, яка може бути

пов'язана з послідовно включеною сходинкою легування n-p⁺ вакансійного походження. Сходинка легування дасть додатковий внесок у повний контактний опір [156], схожий на формулу температурної залежності контактного опору для термоелектронної емісії:

$$\rho_c(T) = \rho_{cF} + \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{\varphi_{bs}}{kT}\right),$$

де $\rho_{cF} \sim \exp\left(\frac{\varphi_b}{E_{00}}\right)$ – внесок польової емісії [54], незалежний від температури, проте значно залежний від ступенню легування.

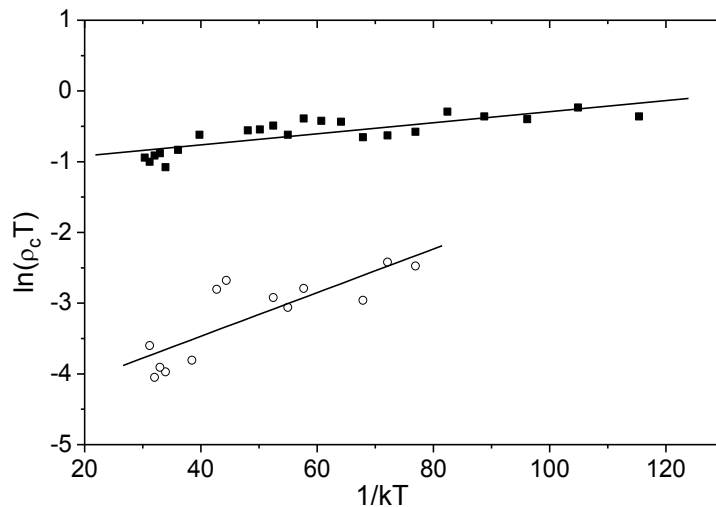


Рис. 4.5. Залежність опору від температури у контактах Ni-SiC та NiSi₂-n-SiC. Прямі лінії – апроксимація у припущенні термоелектронної емісії.

Оскільки ступінь вакансійного легування у контакті з нікелевою металізацією значно вища, то величина сходинки легування, а отже і бар'єру φ_{bs} буде вищою, що й спостерігаємо у експерименті. Поряд з тим підвищення концентрації вакансійного легування веде до значного зниження польової компоненти контактного опору і, як наслідок, сумарного контактного опору.

4.2 Омічні контакти на основі GaN

Досліджено омічні контакти Au-TiB₂-Al-Ti-n-GaN-i-Al₂O₃. Після формуючого ШТВ у омічному контакті утворилися фази Al₃Ti, Al₂Ti, а також потрібні фази Ti₂AlN, Ti₃AlN (див рис. 4.6).

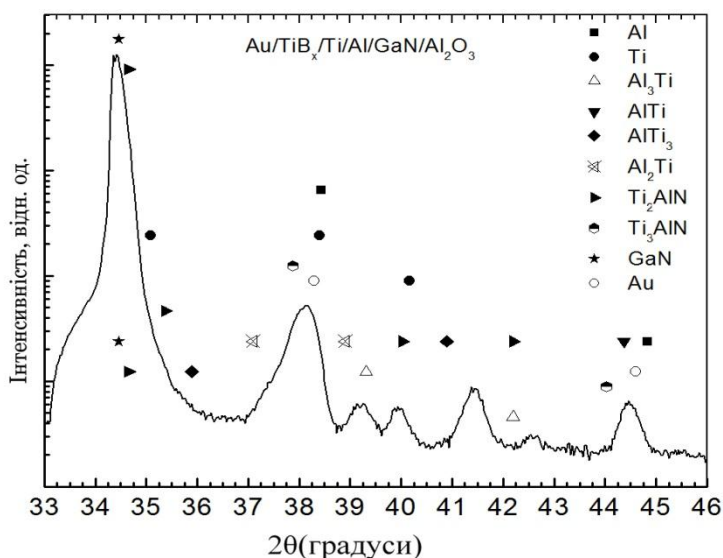


Рис. 4.6. Рентгенодифрактограми структури Au-TiB₂-Al-Ti-GaN-i-Al₂O₃.

Порівнюючи з Оже-профілями розподілу компонент за глибиною контакту (рис. 4.7-4.9), відзначаємо той факт, що на межі розділу присутня значна кількість галію, проте ні фаз з галієм, ні кристалічного галію рентгенодифрактограма не виявила, що свідчить про їх аморфність (рентгеноаморфність). Нанокристаліти розміром близько 3-5 нм рентгеном не виявляються, тому пік дибориду титану відсутній.

Оже-профілі розподілу компонент у контакті до та після термічних відпалів при 700 та 900 °С подані на рис. 4.7-4.9. Наявність домішки кисню в плівці дибориду титану залежить від чистоти мішені. Як буде показано нижче така домішка значно не впливає на термостійкість дифузійного бар'єру. Удавана дифузія золота в плівку дибориду титану, швидше за все пов'язана не з власне дифузією, а з мікрорельєфом, або неоднорідним травленням плівки: ні відпал при 700 °С, ні відпал до аж до 900 °С ніяких додаткових дифузійних процесів з боку золота практично не виявили.

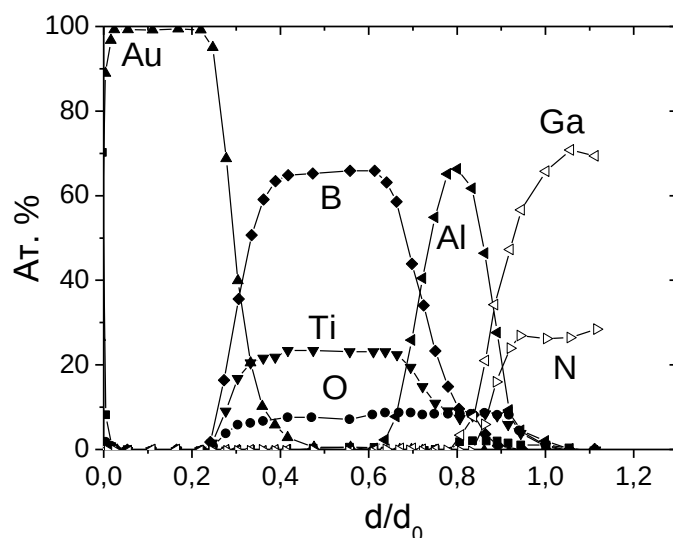


Рис.4.7. Профілі розподілу компонент, отримані методом Оже- спектроскопії контактів Au-TiB₂-Al-Ti-GaN.

Шар титану вже у вихідному зразку повністю проридифундував у шар алюмінію, що добре узгоджується з даними рентгенодифрактографічних досліджень. Після ШТВ при 700 °С профіль розподілу компонент практично не змінюється, що дає привід сподіватись і на стабільність електрофізичних характеристик контактів при таких параметрах термообробки.

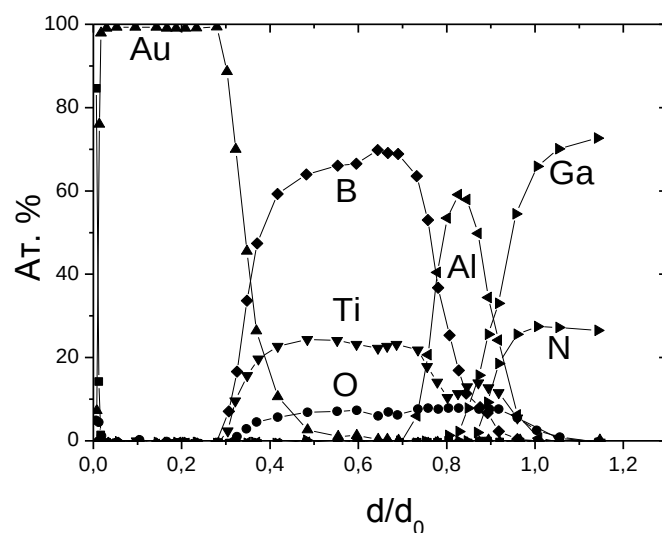


Рис. 4.8. Профілі розподілу компонент контактів Au-TiB₂-Al-Ti-GaN після ШТВ T = 700 °С.

Швидкий термічний відпал до 900 °С призводить до значної дифузії шару алюмінію вглиб нітриду галію та, відповідно, розмиття межі розділу. Дифузійний бар'єр, незважаючи на інтенсивні просеси перемішування під

ним, а значить і зміну внутрішніх механічних напружень, залишається стабільним і виконує свою функцію.

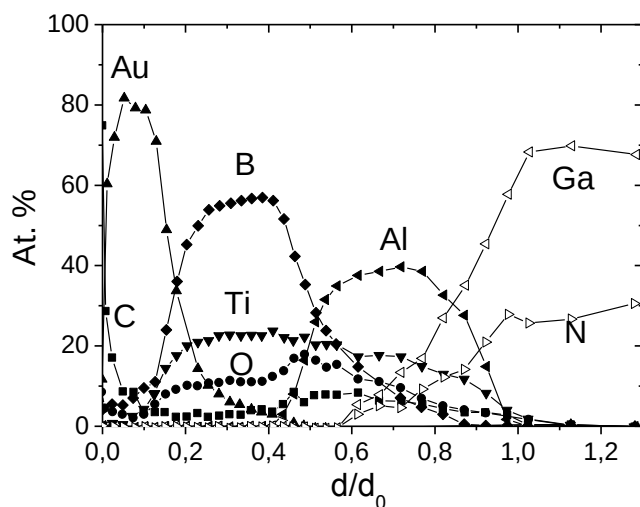


Рис. 4.9. Профілі розподілу компонент, отримані методом Оже-спектроскопії, контактів Au-TiB₂-Al-Ti-GaN при T = 900 °C.

Питомий контактний опір до і після ШТВ при 700 °C залишався незмінним і становив $2\text{--}4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Вивчення температурної залежності питомого контактного опору омичного контакту та механізмів струмоперенесення проводилось в діапазоні температур 80-380 К. Вольтамперна характеристика досліджених контактів виявились лінійними на всьому інтервалі температур (з рис. 4.10).

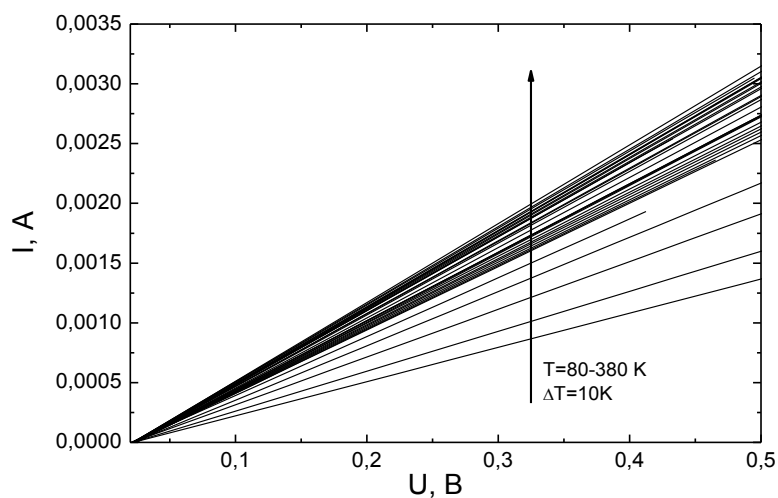


Рис. 4.10. ВАХ контакту Au-TiB₂-Al-Ti-GaN в діапазоні 80-380 К.

На рис. 4.11 подана температурна залежність питомого контактного опору. З даної залежності відзначаємо, що у контакті відбувається зміна механізму струмоперенесення: у діапазоні температур 80-150 К переважає польова емісія, що проявляється у слабкій залежності від температури вимірювання, вище 200 К домінує термоелектронна емісія з висотою бар'єру близько 0,02 еВ. При величині бар'єру 0,02 еВ абсолютне значення контактного опору мало б бути на порядки нижчим, що свідчить про те, що площа ділянок з термоелектронною емісією на порядки нижча у порівнянні з площею контакту.

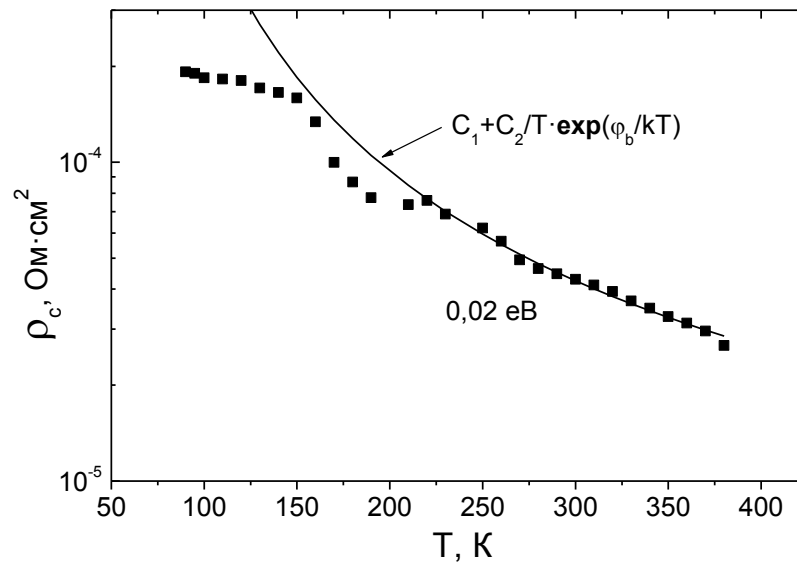


Рис. 4.11. Температурна залежність питомого опору контакту Au-TiB₂-Al-Ti- GaN.

Це може бути пояснено, аналогічно результатам розділу 3 для даної напівпровідникової структури: наявністю дефектних шунтів. Під час відпалу контакту дифузія проходить по таких шунтах швидше, утворюючи локальні низькобар'єрні ділянки, у той час як основна площа напівпровідника має вищу висоту бар'єру і струм через неї відбувається за термопольовим механізмом.

Висновки до розділу 4

1. В результаті досліджень виявлено, що, незважаючи на міжфазні реакції під дифузійним бар'єром у контакті Au-TiB₂-Ni-n-SiC(6H), сам дифузійний бар'єр залишається стабільним до температур ШТВ при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. 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.
3. Встановлено, що струмоперенесення у контакті можна описати комбінацією термоелектронного та польового механізмів струмоперенесення, а саме: термоелектронне струмоперенесення через обмежені ділянки контакту і тунельний механізм струмоперенесення на решті ділянок.
4. Показано, що омічні контакти Au-TiB₂-Al-Ti-n-GaN-i-Al₂O₃ залишалися стабільними до температур ШТВ $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після формуючого ШТВ у омічному контакті утворилися фази Al₃Ti, Al₂Ti, а також потрібні фази Ti₂AlN, Ti₃AlN, які ймовірно й визначали формування низькобар'єрного омічного контакту. У діапазоні температур 80-150 K у контакті переважає термопольова емісія, вище 200 K переважаючою є термоелектронна емісія з висотою бар'єру близько 0,01 eV.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [84, 104, 114].

РОЗДІЛ 5

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕГРАДАЦІЇ У СВІТЛОДІОДНИХ МОДУЛЯХ НА ОСНОВІ GaN

Оцінка надійності є одним із необхідних етапів розробки приладів і пристроїв електронної техніки. При з'єднанні кількох мікроелектронних приладів у одну систему їх загальна надійність, як буде показано нижче, залежить не лише від надійності вихідних компонент, але і від цілого ряду інших технологічних параметрів.

Для побудови моделі деградації світлодіодної матриці побудуємо електрично-теплову модель світлодіодного чіпа, розрахуємо параметри світлодіодних чіпів з експериментальних ВАХ, після чого на основі даних про розкид параметрів в одному модулі змоделюємо розподіл температур між чіпами, їх деградацію та результуючу деградацію усієї світлодіодної матриці.

5.1 Визначення механізму струмоперенесення. Модель ВАХ

Для вивчення механізмів струмоперенесення на розділених світлодіодних чіпах проведені виміри вольтамперних характеристик (ВАХ) та вольтфарадних характеристик (ВФХ). Визначені параметри світлодіодних чіпів для їх подальшого моделювання.

Вимірювання стаціонарних ВАХ проводилось в діапазоні струмів 10^{-11} - 10^{-1} А, який обрано, виходячи з максимального струму для модуля на рівні 0,35 А.

Результати вимірювання прямої та зворотної гілок вольтамперної характеристики чіпів світлодіодного модуля подано на рис. 5.1а, та 5.1б. Відзначаємо, що в даному модулі чіпи 3.3 та 5.4 мають дефект розварки (обрив), який спостерігаємо також і на мікрофотографіях, додатку А.10. Також помітно, що є три чіпи з надмірними паразитними струмами (додаток

А.10, чіпи 4.3, 6.1 та 7.2), які можуть свідчити про дефект, що може призвести до швидкої деградації чіпа.

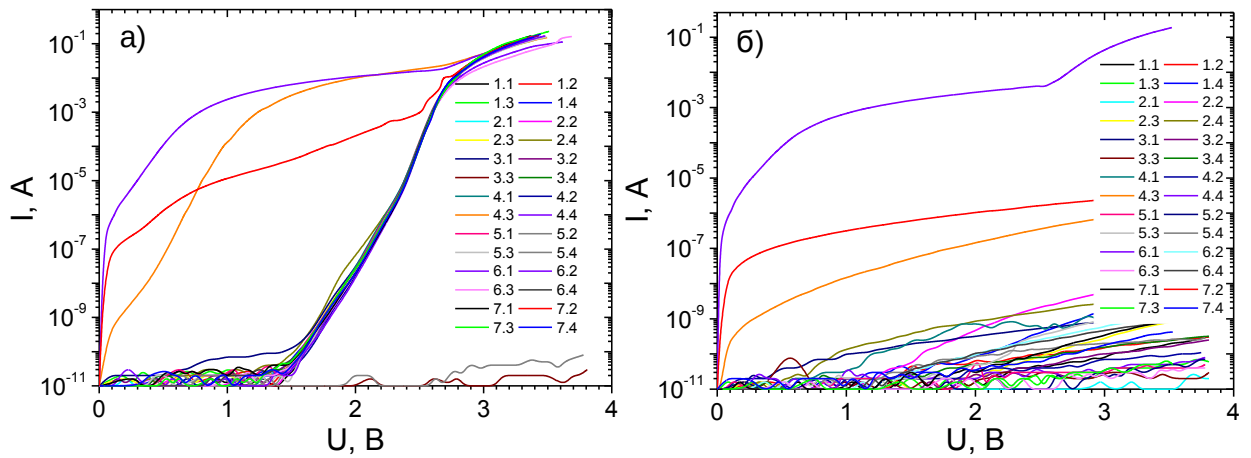


Рис. 5.1. Прямая а) та зворотня б) гілки ВАХ чіпів світлодіодного модуля.

Нумерація та ж, що і на рис. 2.3а.

Також виявлено два чіпи з підвищеними значеннями послідовного опору (4.4 та 6.3). Струм через такі чіпи (рис. 5.2) буде протікати до 3 разів нижчий, ніж у середньому, що призведе до перевантаження сусідніх, паралельних з ними, світлодіодів і, як наслідок, пришвидшеної їх деградації.

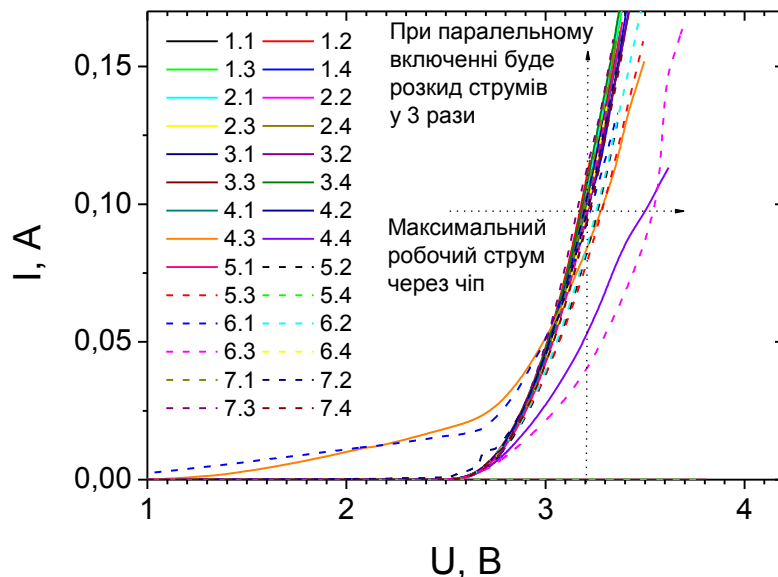


Рис. 5.2. Прямая гілка ВАХ чіпів світлодіодного модуля. (Нумерація та ж, що і на рис. 2.3а).

З отриманих характеристик були розраховані середні параметри чіпа та розкид параметрів з метою їх використання для моделювання поведінки модуля при наявності дефектів різного роду (додаток А.10).

З метою дослідження механізму струмоперенесення та зміни параметрів світлодіодного чіпа з підвищенням температури, було проведено вимірювання ВАХ одного з чіпів в температурному діапазоні 290-370 К.

Розглянемо ВАХ окремого світлодіодного чіпа в діапазоні температур 290-370 К (рис. 5.3а). На вольтамперній характеристиці присутні три характерних ділянки. Ділянки I та II експоненційні, характеризують процеси в р-п переході. Ділянка III – близька до лінійної (рис. 5.3b), характеризує процеси струмоперенесення в р- та п областях а також у омичних контактах. Деяка залишкова нелінійність пов'язана, як буде показано нижче показано, з розігрівом р-п переходу та базової області під дією Джоулевого тепла. Перші дві ділянки описувались залежностями Шоклі:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right). \quad (5.1)$$

Температурна залежність струму насичення I_0 добре описується формулою (див. рис. 5.3с):

$$I_0 = I_{0i} \exp \left(- \frac{E_b}{kT} \right). \quad (5.2)$$

Залежність фактора ідеальності від температури може бути пояснена послідовним включенням контакту з польовим (чи термопольовим) механізмом струмоперенесення. В такому випадку падіння напруги на контакті спричинить додатковий внесок у визначене значення фактора ідеальності. Загальна напруга на приладі буде сумою напруг на р-п переході і на контакті:

$$V = \ln(I/I_0) \frac{nkT}{q} + \ln(I/I_{0f}) \frac{E_{00}}{q}. \quad (5.3)$$

Тобто, шукаючи фактор якості як:

$$n' = \frac{q}{kT} \frac{d \ln(I)}{dV}, \quad (5.4)$$

отримаємо:

$$dV = d \ln(I)^{nkT/q} + d \ln(I)^{E_{00}/q}, \quad (5.5)$$

звідки:

$$n' = n + \frac{E_{00}}{kT}. \quad (5.6)$$

Як бачимо з рис. 5.3d, температурна залежність фактора ідеальності на обох ділянках добре описується залежністю виду (5.6) з однаковим параметром Падовані-Стреттона (E_{00}), що може вказувати на однакову природу температурної залежності фактора якості на I та II ділянках ВАХ.

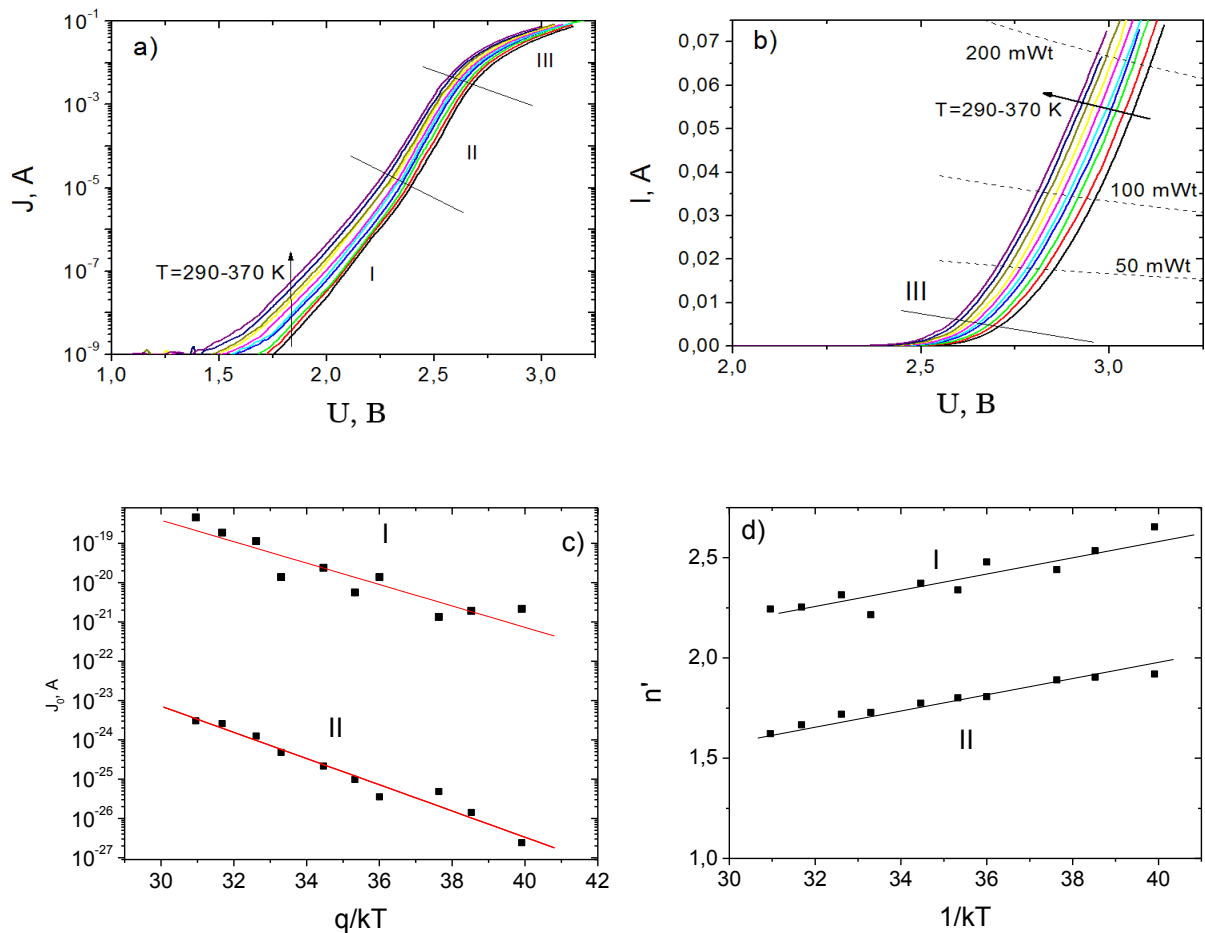


Рис. 5.3. Температурні залежності ВАХ чіпа у напівлогарифмічному (а), та лінійному масштабі (б) і температурні залежності параметрів: фактора якості (с) та струму насичення (д), на ділянках I та II.

Параметр Падовані-Стреттона, отриманий з розрахунків температурної залежності фактора якості близький до kT , що вказує на можливість реалізації термопольового механізму струмоперенесення. Розглядаючи III ділянку ВАХ, слід враховувати можливий додатковий розігрів під дією струму. Температури р-п-переходу, області розтікання струму та омичних контактів чіпа вважатимемо практично однаковими (див. рис. 5.4), оскільки підкладка товща більш ніж на порядок за активний шар, тоді додатковий розігрів буде рівний:

$$\Delta T = R_t P = R_t V I, \quad (5.7)$$

тут R_t – тепловий опір р-п – перехід-тепловідвід для даного чіпа. В даному випадку модель не буде враховувати температурну залежність довжини розтікання у шарі розтікання та інші теплові процеси, які могли б спричинити залежність R_t від температури.

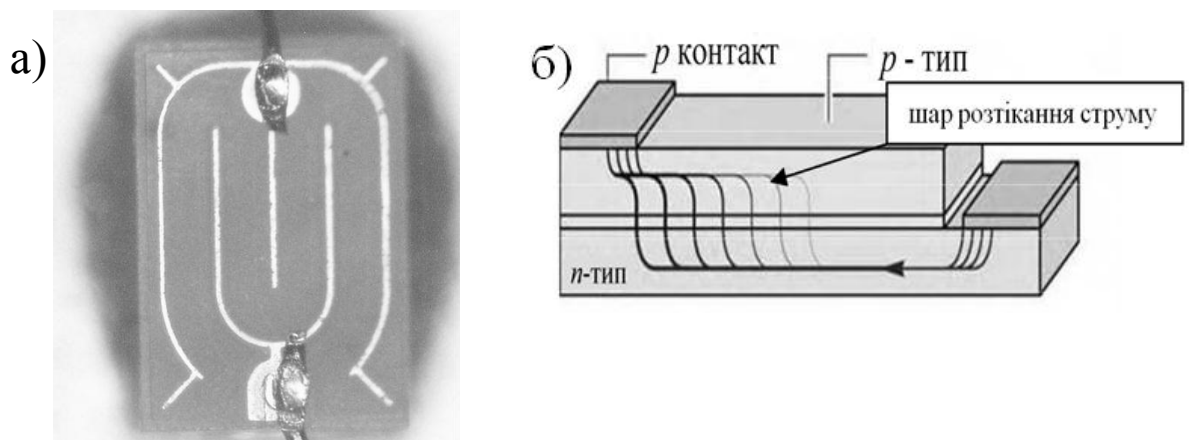


Рис. 5.4. Зовнішній вигляд світлодіодного чіпа з зустрічно-штирьовими стрічковими контактами а) та схема струмопроходження б)

З рівняння (5.7) слідує: якщо побудувати лінії однакової розсіюваної потужності (рис. 5.3b), то їх перетин з ВАХ дасть точки, у яких добавка до температури, спричинена струмом, буде однаковою. Знаходячи

диференційний опір у таких точках, побудуємо залежність диференційного опору від температури при різних розсіюваних потужностях (рис. 5.5).

З рис. 5.5 бачимо, що при потужностях розсіяння більше 50 мВт диференційна провідність слабо залежить від температури, що свідчить про те, що основний внесок в послідовний опір вносить омичний контакт з польовим чи термопольовим механізмом струмоперенесення. Якщо б суттєвим був внесок опору шару розтікання, то отримали б температурну залежність опору напівпровідника (спадаючу з температурою). Цей висновок добре узгоджується із поясненням температурної залежності фактора якості, згаданим вище. Отримані результати дозволяють спростити модель, нехтуючи внеском області розтікання струму.

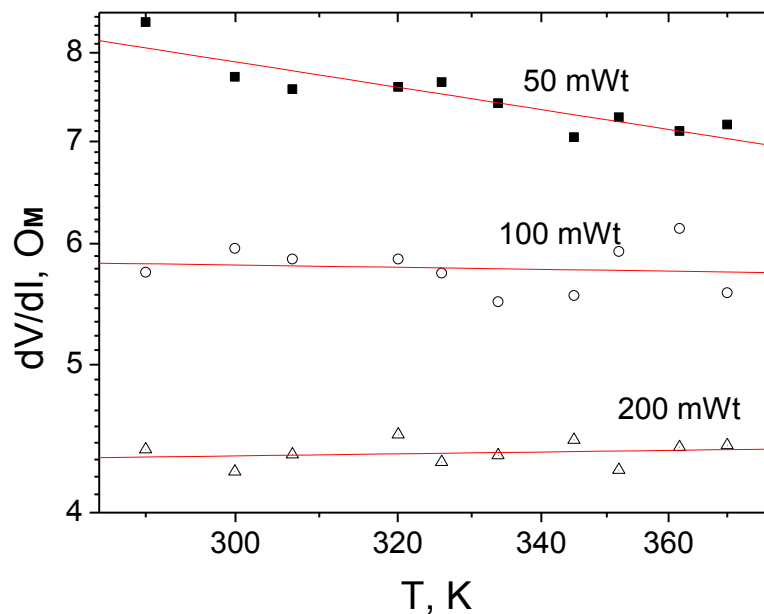


Рис. 5.5. Залежність диференційного опору від температури при різних розсіюваних потужностях.

Диференційний опір на ділянці (III) ВАХ можна отримати диференціюванням рівняння (5.3). Доданком ВАХ для ділянки (I) нехтуємо, оскільки при значних зміщеннях його роль буде незначною. Отримаємо залежність, у якій врахуємо формулу (5.7):

$$Q \equiv \frac{dV}{dI} = \frac{nkT}{q} \frac{1}{I} + \frac{E_{00}}{q} \frac{1}{I} = \frac{nk(T_0 + R_t VI) + E_{00}}{qI}. \quad (5.8)$$

Розділимо обидві частини рівняння 5.8(3) на напругу:

$$QI = \frac{nkT_0 + E_{00}}{q} + \frac{nk}{q} R_t P, \quad (5.9)$$

де $P = IV$;

Тобто будуючи залежність: $\frac{dV}{dI} \frac{1}{V} = f\left(\frac{1}{P}\right).$ (5.10)

Провівши апроксимацію даної залежності прямою на ділянці лінійності (III, $I > 0.03$ А), за відсічкою знайдемо значення, $\frac{nk}{q} R_t$, звідки розрахуємо величину теплового опору. Однак отримане значення дає завищені результати теплового опору. Найбільш імовірна причина цього – вплив послідовного опору області розтікання струму.

5.2 Температура р-п переходу у робочому режимі

Усереднений тепловий опір світлодіодного чіпа на тепловідводі можна знайти, розглядаючи температурну залежність ККД модуля, зняту при різних значеннях стабілізованого струму (рис. 5.6).

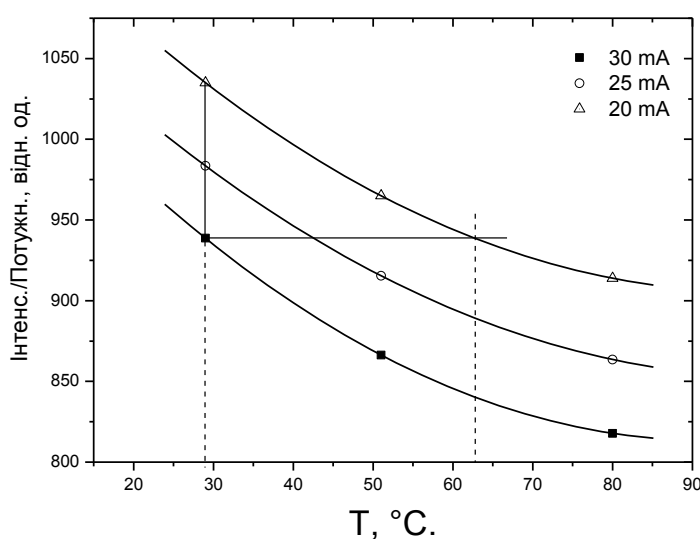


Рис. 5.6. Температурна залежність ККД світлодіодного модуля при стабілізованому струмі 20, 25 та 30 мА.

Бачимо, що збільшення інтегрального струму на 10 мА призводить до такого ж зменшення ефективності, як і розігрів на 34 °С, що, в перерахунку на один чіп, дасть значення теплового опору 420 К/Вт.

5.3 Модель деградації світлодіодної матриці

На основі отриманих даних побудуємо модель інтегральної ВАХ світлодіодної матриці, яка складається із послідовного включення W ланок, кожна з яких складається з U з'єднаних паралельно світлодіодних чіпів на спільному тепловідводі. Спад напруги на одиничному світлодіодному чіпі, який розміщується в j -тій ланці під номером i складається із падіння напруги на р-п – переході, на послідовному опорі області розтікання струму та спад напруги на омичному контакті:

$$V_j = V_{pn,ij}(I_{ij}, T_{ij}) + V_{R,ij}(I_{ij} T_{ij}) + V_{c,ij}(I_{ij}). \quad (5.11)$$

Температури р-п-переходу, області розтікання струму та омичних контактів окремого чіпа вважатимемо практично однаковими, тоді:

$$T_{ij} = R_{t,ij} P_{ij} = R_{t,ij} V_j I_{ij}, \quad (5.12)$$

тут $R_{t,ij}$ – тепловий опір р-п – перехід-тепловідвід для даного чіпа.

Щоб знайти струм через чіп, запишемо рівняння Шоклі:

$$I_{ij} = I_{01,ij}(\exp(qV_{pn,ij}/n_{1ij}kT_{ij}) - 1) + I_{02,ij}(\exp(qV_{pn,ij}/n_{2ij}kT_{ij}) - 1) + V_{pn,ij}/R_{shunt}, \quad (5.13)$$

де $I_{01,ij} = I_{001,ij} \exp(E_{b1}/kT)$ – струм насичення; R_{shunt} – шунтуючий опір, зумовлений дефектами.

Спад напруги на послідовному опорі $V_{R,ij} = I_{ij} R_{b,ij}$.

Падіння напруги на омичному контакті з тунельним механізмом струмоперенесення:

$$V_c = \ln(I_{ij}/I_{0F,ij})^{E_{00,ij}/q}. \quad (5.14)$$

Струм через ланку $I_j = \sum_{i=1}^u I_{ij} \equiv I$ повинен бути однаковим для усіх ланок модуля. Результируюча напруга на модулі $V = \sum_{j=1}^w V_j$.

ВАХ світлодіодного модуля розраховується наступним чином: задаючи певний струм через матрицю та температури чіпів рівними температурі тепловідводу, оптимізуючи напругу на кожній з ланок методом Ньютона, досягають заданого сумарного струму. Напруга на матриці розраховується як сума напруг на кожній з ланок. Наступним кроком температура кожного з чіпів прирівнюється добутку розсіюваної чіпом потужності на тепловий опір, після чого ітераційний процес повторюється до досягнення необхідної точності розрахунку.

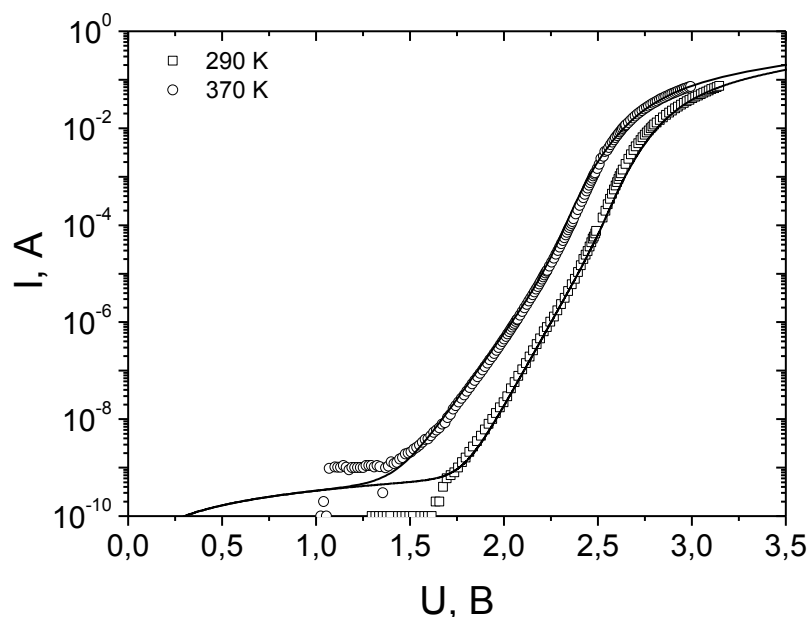


Рис. 5.7. Апроксимація ВАХ світлодіодного чіпа в температурному діапазоні тепловідводу 290-370 К, точки – експериментальні дані, лінії – апроксимація формулами (5.9, 5.14)

На рис. 5.7 показано добре узгодження між теоретичними ВАХ (суцільні лінії), побудованими на основі приведеної моделі, та експериментально виміряними (точки). Аналізуючи деградацію ВАХ світлодіодного модуля, ми виходили з припущення, що основна причина

деградації одна. У такому випадку пояснити збільшення і ефективної висоти бар'єру і ефективного послідовного опору модуля можна лише зміною параметрів омичного контакту. На рис. 5.8, показано, що зміна послідовного опору R_b (5.11) і струму насичення I_{0F} (5.14) може повністю пояснити спостережені зміни інтегральної ВАХ. Зміна послідовного опору R_b може бути пояснена не лише зміною параметрів напівпровідника, внаслідок дифузії у нього матеріалів контакту, але й зміною параметрів струмів розтікання, що потребує подальших досліджень та уточнення моделі деградації.

Середнє значення та дисперсію параметрів струму насичення, фактора ідеальності, теплового опору та компонент послідовного опору досліджено експериментально.

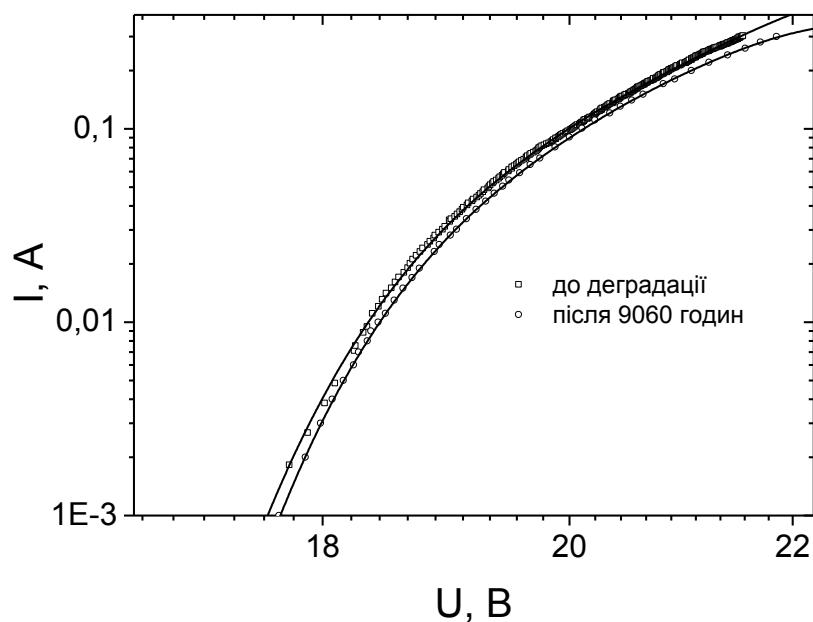


Рис. 5.8. Експериментальна ВАХ (точки) та теоретична модель (суцільні лінії) деградації світлодіодного модуля. Верхня крива – до деградації, нижня після напрацювання 9060 годин.

Експериментальне дослідження деградації світлового потоку світлодіодного модуля з часом напрацювання понад 9000 годин було проведено при двох

різних стабілізованих температурах тепловідводу для розрахунку ефективної енергії активації деградаційного процесу.

Проведено дослідження надійності світлодіодних модулів при струмі 300 мА і напрацюванні протягом 9060 годин: 6800 годин при температурі тепловідводу 37 °С і 2260 при температурі тепловідводу 50 °С. Деградація рівня інтегрального світлового потоку за досліджений період склала 10,7%. Модуль виготовлений на базі друкованої плати з алюмінієвою основою, на якій встановлені світлодіодні чіпи, з'єднані між собою по паралельно-послідовній схемі.

Характеристики світлодіодного модуля: максимальний струм 0,35 А, максимальна напруга 24 В, максимальна розсіювана потужність 8,4 Вт. Порівняння ВАХ світлодіодного модуля до і після напрацювання 9060 годин при $T_{TO} = 29\text{ °C}$ (рис. 5.9) показує зростання ефективної висоти бар'єра і величини послідовного опору.

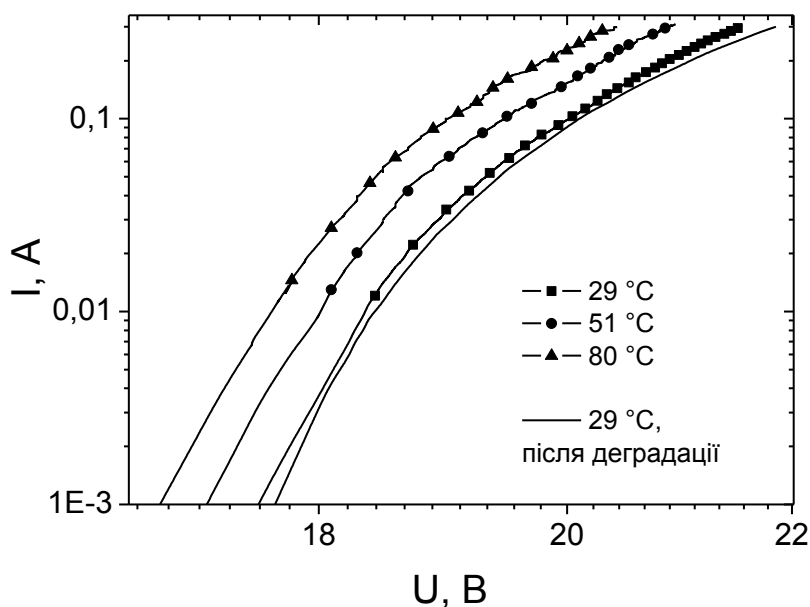


Рис. 5.9. Інтегральна ВАХ світлодіодного модуля до та після деградації.

Зростання послідовного опору зумовлено, ймовірно, дифузійними процесами в омичних контактах під впливом розігріву розсіюваною потужністю. З одного боку, такий процес зменшує ККД модуля і збільшує розсіювану

потужність. З іншого боку, відбулося узгодження світлодіодних чіпів за послідовним опором. Послідовний опір більш навантажених (внаслідок розкиду параметрів) чіпів виріс, що зумовило зменшення струму через них. Саме це і могло стати причиною зростання ефективної висоти бар'єра модуля.

На рис. 5.10 подана залежність інтенсивності випромінювання світлодіодного модуля від часу напрацювання при струмі 300 мА і стабілізованих температурах тепловідводу 37 °С і 50 °С. Можна побачити те, що деградація інтенсивності свічення добре описується експоненційною функцією виду:

$$I = I_0 [\exp(-\alpha(T)t_a)], \quad (5.15)$$

де I – інтегральна інтенсивність свічення, I_0 – початкова інтегральна інтенсивність свічення, взята після ділянки припрацювання, t_a – час напрацювання, $\alpha(T)$ – коефіцієнт деградації, що залежить від температури.

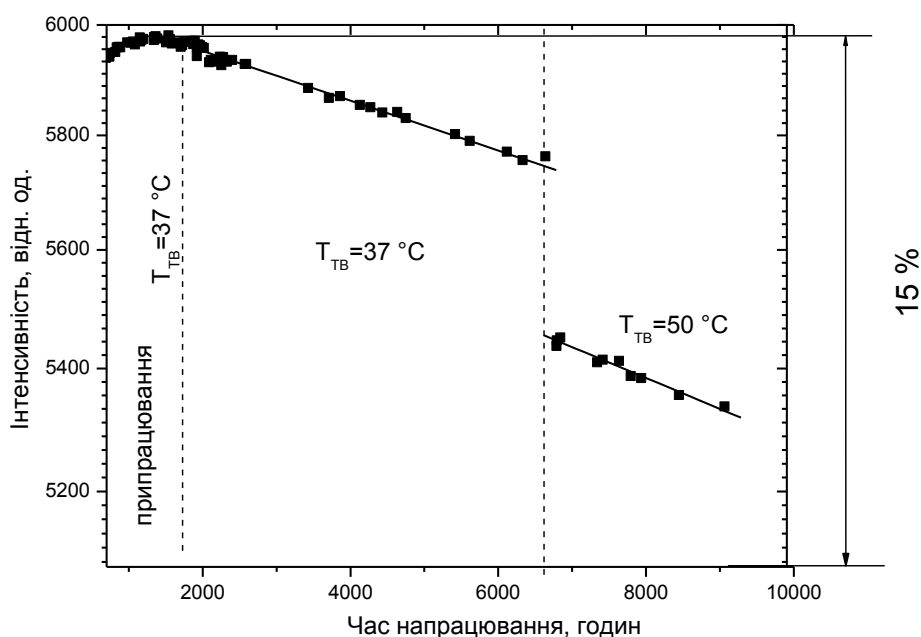


Рис. 5.10. Залежність інтенсивності випромінювання від часу напрацювання при струмі 300 мА і стабілізованій температурі тепловідводу.

Температура р-п переходу T пов'язана з температурою тепловідводу співвідношенням:

$$T = R_T(P(1 - \eta(T)) + I^2 R_s) + T_{TO}, \quad (5.16)$$

де P – повна розсіяна потужність на р-п переході,

$\eta(T)$ – коефіцієнт корисної дії (ККД),

R_T – тепловий опір р-п перехід – корпус,

R_s – послідовний опір, пов'язаний з питомим опором омічних контактів і опором розтікання в p^+ і базовій області,

T_{TO} – температура тепловідводу.

Оскільки дифузні процеси мають, як правило, активаційний характер, то коефіцієнт деградації можна виразити у вигляді:

$$\alpha(T) = \alpha_0 \exp(-E_a/kT), \quad (5.17)$$

де E_a – енергія активації деградаційного процесу,

k – постійна Больцмана,

α_0 – константа.

Методом Монте-Карло досліджено вплив розкиду параметрів послідовного опору світлодіодних чіпів (при однаковому середньому їх значенні) на швидкість деградації свічення світлодіодного модуля. Для моделювання деградації інтегральної інтенсивності свічення світлодіодного модуля було враховано два фактори: залежність ККД світлодіода від температури та температурна деградація свічення. При значному розкиді параметрів світлодіодних чіпів, чіпи, через які проходить більший струм розігріваються більше, а отже їх ККД падає, поряд з цим відбувається пришвидшена деградація інтенсивності свічення саме цих світлодіодних чіпів. Деградація світлового потоку одиничного світлодіодного чіпа з часом t описувалась співвідношенням Арреніуса:

$$J_{ij} = J_{0ij}(T_{ij})[\exp(-\alpha_{ij}(T_{ij})t)], \quad (5.18)$$

де: $\alpha_{ij}(T) = \alpha_0 \exp(-E_a/kT_{ij})$ – коефіцієнт деградації;

$J_{0ij}(T_{ij})$ – множник, що враховує залежність ККД від температури, розрахований чисельно на основі рис. 5.6.

Час безвідмовної роботи визначався як час до 30% деградації інтегральної інтенсивності свічення світлодіодних модулів [155]. Лістинг головного юніта програми моделювання подано у додатку А.11.

Результати моделювання часу напрацювання вибірки світлодіодних модулів від напівширини розкиду значень послідовного опору вибірки зі ста світлодіодних модулів, подані на рис. 5.11 показують, що збільшення розкиду значень послідовного опору окремих чіпів призводить до зменшення середнього часу напрацювання на відмову та збільшення напівширини розкиду значень часу напрацювання у партії модулів. Уже при півширині розкиду значень послідовного опору у 1,87 Ом спостерігається значене зниження часу напрацювання, коли ж підставити експериментальні значення розкиду (рис. 5.11), то гарантоване напрацювання на відмову зменшиться до 60 000 год.

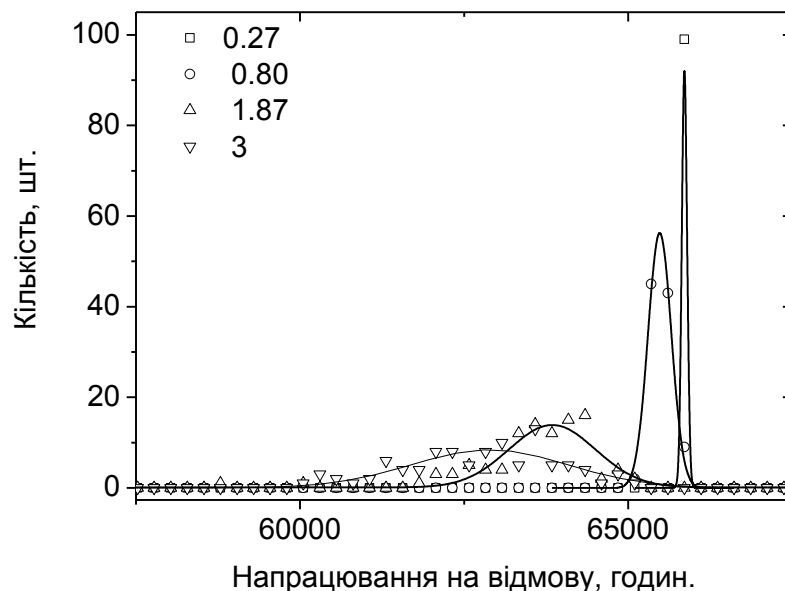


Рис.5.11. Залежність часу напрацювання на відмову модуля від розкиду параметрів послідовного опору.

Гарантоване напруцювання на відмову для вибірки визначали як максимальний час напруцювання, за який 95% модулів не досягнуть 30% деградації інтенсивності свічення. Як бачимо, що навіть при такому, досить м'якому режимі напруцювання, час гарантованого напруцювання зменшується на 10 відсотків, тобто бінування партії чіпів по послідовному опорі перед їх монтажем може дати приріст часу напруцювання в заданому режимі роботи до 10%.

Висновки до розділу 5

1. Проведене дослідження світлодіодних модулів, виготовлених в умовах вітчизняного виробництва з чіпів фірми “*EDISON Optocorporation*”, 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 опорі, що змінює перерозподіл струму в чіпах при паралельному їх включенні і призводить до більш жорсткого режиму роботи окремих чіпів.
2. На підставі дослідження ВАХ було показано, що деградаційні процеси в світлодіодних чіпах зумовлені дифузійними процесами в омичних контактах під впливом розігріву розсіюваною потужністю, що дозволило описати деградацію інтенсивності випромінювання світлодіода експоненційної функцією активаційного типу. Розрахунковий час 50% деградації світлодіодного модуля при $T_{TO} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 90 тис. годин і при $T_{TO} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 73 тис. годин безперервної роботи.
3. В результаті моделювання Методом Монте-Карло часу напруцювання вибірки світлодіодних модулів від напівширини розкиду значень послідовного опорі показано, що бінування партії чіпів по

послідовному опору перед їх монтажем може дати приріст часу
напрацювання в заданому режимі роботи до 10%.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [84, 104, 114].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Показано, що термічна стійкість контактних структур Au-TiB₂-n-SiC(6H) з дифузійними бар'єрами на основі наноструктурованих плівок TiB₂ значною мірою залежить від параметрів даної плівки, а саме від її нанокристалічного стану і розміру зерна нанокристалітів. Показано, що контактні структури на основі дифузійних бар'єрів з розміром нанокристалітів 3-5 нм залишалися стійкими та не змінювали електрофізичних параметрів після відпалу при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. У той же час в контактних структурах з неоптимальним розміром кристалітів при тих же термічних умовах відбулося значне розтріскування контактної металізації.
2. З'ясовано, що у структурі Au-TiB₂-n-SiC(6H) до температури 340 K механізмами струмоперенесення є польова та термопольова емісії, при вищих температурах – термоелектронна емісія. Розрахований фактор ідеальності у діапазоні 340-550 K має величину 1,3-1,2 і слабо спадає з ростом температури. На основі цього можна пояснити різницю між величинами висот бар'єру, отриманими з нетермічних і термічних методів визначення висоти бар'єру Шотткі.
3. Виявлено близьку до лінійної температурну залежність фактора ідеальності впливом на струмоперенесення поверхневих станів, яку підтверджено тим, що величина, отримана екстраполяцією залежності висоти бар'єру Шотткі (розрахованої з ВАХ) від фактора ідеальності до $n = 1$, добре узгоджується зі значенням висоти бар'єру Шотткі, отриманої з високочастотних ВФХ.
4. Виявлено, що для діодів з бар'єром Шотткі Au-TiB₂-n-GaN вольтамперна характеристика висоти бар'єру Шотткі при кімнатній температурі має дві характерні ділянки, на одній з яких в околі 0,2 В переважає польовий механізм струмоперенесення, на іншій – в околі 0,4 В – термоелектронний механізм струмопереносу. Встановлено, що

причинами зміни струмоперенесення в бар'єрах Шотткі (Au-TiB₂-n-GaN) в інтервалі температур 80-340 К є процес тунелювання через дислокації, що перетинають область просторового заряду.

5. Підтверджена гіпотеза про те, що основним механізмом формування омічного контакту Au-TiB₂-Ni-n-SiC(6H) є генерація на межі розділу у процесі міжфазних реакцій вакансій кремнію. Струмоперенесення у контакті описується комбінацією термоелектронного та польового механізмів струмоперенесення.
6. Показано, що омічні контакти Au-TiB₂-Al-Ti-n-GaN-i-Al₂O₃ залишалися стабільними до температур ШТВ $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. У діапазоні температур 80-150 К у контакті переважала термопольова емісія, вище 200 К переважаючою є термоелектронна емісія з висотою бар'єру близько 0,02 еВ.
7. Вивчено режими роботи омічних контактів у чіпах світлодіодних модулів, виготовлених на основі GaN. Показано, що деградаційні процеси в світлодіодних чіпах зумовлені дифузійними процесами в омічних контактах під впливом розігріву розсіюваною потужністю. Здійснено моделювання часу напрацювання світлодіодного модуля в залежності від розкиду параметрів чіпів і показано, що бінкування партії чіпів по послідовному опору перед їхнім монтажем може дати приріст часу напрацювання до 10%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Лебедев А.А. Широкозонные полупроводники для силовой электроники / А.А. Лебедев, В.Е Челноков // ФТП. – 1999. –Т. 33, №9. – С. 1096-1099.
- [2] Войтович В. Si, GaAs, SiC, GaN – силовая электроника. Сравнение, новые возможности / В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич // Силовая Электроника. – 2010. – № 5. – С. 4–10.
- [3] Лебедев А. SiC электроника: прошлое, настоящее, будущее / А. Лебедев, С. Сбруев // Электроника: НТБ. – 2006. – № 5. – С. 28 - 41.
- [4] Полищук А. Полупроводниковые материалы и приборы для жёстких условий эксплуатации / А. Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 4. – С. 20 – 24.
- [5] Лучинин В. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету / В. Лучинин, Ю. Таиров // Современная электроника. – 2009. – № 7. – С. 12 – 15.
- [6] Neudeck P. G. Silicon Carbide Technology / P. G. Neudeck [Ed. by Wai-Kai Chen] // The VLSI Handbook. Second Ed. – 2006. – P. 1 – 34.
- [7] Lee Sang-Kwon. Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications / Sang-Kwon. Lee // Ph.D Dissertation: Royal Institute of Technology. – Stockholm, KTH. – 2002.
- [8] NSM Archive - Physical Properties of Semiconductors / [электронный ресурс] доступ к журналу: <http://www.matprop.ru>
- [9] Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices / B. J. Baliga // Springer Science+Business Media. – 2008.
- [10] Агеев О.А. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А. Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, В.С. Киселев, А.А. Лебедев [и др.] Под ред. А.Е. Беляева и Р.В. Конаковой. // Харьков: ИСМА. – 2010.
- [11] Зи С. Физика полупроводниковых приборов! В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. - 2-е перераб. и доп. изд. - М.: Мир, – 1984. – 456 с.

- [12] Machác P. Improvement of Ni/Si/4H-SiC ohmic contacts by VLS grown sub-contact layer / P. Machác, B. Barda // Microel. Eng. – 2010. – Vol. 87. – P. 2499–2503.
- [13] Touati F. Electrical properties and interface chemistry in the Ti/3C-SiC / F. Touati, K. Takemasa, M. Saji // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1999. – Vol. 46, N 3. – P. 444-448.
- [14] Pecz B. Contact formation in SiC devices / B. Pecz // Applied Surface Science. – 2001. – № 18. – P. 287–294.
- [15] Cooper J. A. Critical material and processing issues of SiC electronic devices / J. A. Cooper // Materials Science and Engineering. – 1997. – Vol. B44. – P. 387-391.
- [16] Goesmann F. Metals on 6H-SiC: contact formation from the materials science. Point of view / F. Goesmann, R. Schmid-Fetzer // Materials Science and Engineering. – 1997. – Vol. B46. – P. 357-362.
- [17] Агеев О.А. Физико-технологические основы формирования контактов к карбиду кремния методами импульсной термообработки: дис. ... д. тех. наук.: 05.27.01 / О. А. Агеев // Таганрог. – 2005. – 524 с.
- [18] Cooper J. A. Advances in SiC MOS Technology / J. A. Cooper // Phys. Stat. Sol. (a). – 1997. – Vol. 162. – P. 305 -320.
- [19] Rideout V. L. A review of the theory and technology for ohmic contacts to group III–V compound semiconductors / V. L. Rideout // Solid State Electron. – 1975. – Vol. 18. – P. 541.
- [20] Baca A.A. Survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors / A. Baca, F. Ren, J. Zolper, R. Briggs, S. Pearton // Thin Solid Films. – 1997. – № 308-309. – P. 599–606.
- [21] Агеев О.А. Влияние обработки поверхности и нагрева на высоту потенциального барьера контактов к SiC / О.А. Агеев, А.М. Светличный, Н.А. Ковалев, Р.Н. Разгонов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 2. – С. 37-41.

- [22] Авдеев С.П. Модификация параметров контактов металл-карбид кремния импульсной термообработкой / С. П. Авдеев, О. А. Агеев, Р. В. Конакова, Я. Я. Кудрик [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – №6. – С. 84-88.
- [23] Pai C. S. X-ray diffraction and ion backscattering study of thermal annealed Pd/SiC and Ni/SiC / C. S. Pai, C. M. Hanson, S. S. Lau // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 57. – P. 618-619.
- [24] Rijnders M. R. Pattern formation in Pt-SiC diffusion couples / Rijnders, MR Marco; Kodentsov, AA Alexander; Beek, van der, J.; Akker, van den, J.M.; Loo, van, P.E // Solid State Ionics. – 1997. – Vol. 95. – P. 51-59.
- [25] Кудрик Я. Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл – полупроводник / Я. Я. Кудрик // Петербургский журнал электроники. – 2010. – №1. – С. 25-40.
- [26] Tsukimoto S. Electrical properties and microstructure of ternary Ge/Ti/Al ohmic contacts to p-type 4H-SiC / S. Tsukimoto, T. Sakai, M. Murakami // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 96. – P. 4976.
- [27] Бланк Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл – полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // ФТП. – 2007. – Т. 41, №11. – С. 1281-1308.
- [28] Kakanakova-Georgieva A. Interface chemistry of WN/4H-SiC structures / A. Kakanakova-Georgieva, L. Kassamakova, Ts. Marinova, R. Kakanakov, O. Noblanc, C. Arnodo, S. Cassette, C. Brylinski // Applied Surface Science. – 1999. – Vol. 151. – P. 225-232.
- [29] Sakai T. Ternary TiAlGe ohmic contacts for p-type 4H-SiC / T. Sakai, K. Nitta, S. Tsukimoto, M. Moriyama, Masanori Murakami // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95. – P. 2187-2189.
- [30] Chen J. S. Reaction of Ta thin film with single crystalline (001) p-SiC / J. S. Chen, E. Kolawa, M.-A. Nicolet, L. Baud, C. Jaussaud, R. Madar, C. Bernard // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 76. – P. 2169-2175.

- [31] Frazzetto A. Structural and transport properties in alloyed Ti/Al Ohmic contacts formed on p-type Al-implanted 4H-SiC annealed at high temperature / A. Frazzetto, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, V. Raineri, F. Roccaforte // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. – Vol. 7. – P. 25
- [32] Александров О. В. Моделирование взаимодействия никеля с карбидом кремния при формировании омических контактов / О. В. Александров, В. В. Козловский // ФТП. – 2009. – Т. 43, № 7. – С.917-923.
- [33] Козловский В. В. Стимулирование металлургических реакций на интерфейсе Ni-SiC протонным облучением / В. В. Козловский [и др.] // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 4. – С. 778-783.
- [34] Давыдов С. Ю. Роль вакансий кремния в формировании барьеров Шоттки на контактах Ag и Au с 3С- и 6H-SiC / С. Ю. Давыдов, А. А. Лебедев, О. В. Посредник, Ю. М. Таиров // ФТП. – 2002. – Т. 36, № 6. – С. 690-692.
- [35] Tsai C. J. Stress evolution during isochronal annealing of Ni/Si system / C. J. Tsai, K. H. Yu // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 350. – P. 91-95.
- [36] Давыдов С. Ю. О влиянии вакансий в подрешетках кремния и углерода на формирование барьера Шоттки на контакте металл-SiC / С. Ю. Давыдов, О. В. Посредник // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 3. – С. 304-306.
- [37] Kuchuk A. V. Thermal degradation of Au/Ni₂Si/n-SiC ohmic contacts under different conditions / A.V. Kuchuk, M. Guzewicz, R. Ratajczak, M. Wzorek, V.P. Kladko, A. Piotrowska // Mat. Sci. Eng. – 2009. – Vol. B 165. – P. 38–41.
- [38] Julies B. A. A study of the NiSi to NiSi₂ transition in the Ni-Si binary system / B. A. Julies, D. Knoesen, R. Pretorius, D. A. Adams // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 347. – P. 201 -207.
- [39] Maeyamaa Y. Ohmic Contact for C-face n-type 4H-SiC with Reduced Graphite Precipitation / Y. Maeyamaa, K. Nishikawa, Y. Fukuda et al. // Mater. Sci. Forum. – 2006. – Vol. 527-529. – P. 867-870.

- [40] Lu W. Ohmic contact properties of Ni/C film on 4H-SiC / W. Lu et al. // Solid-State Electronics. – 2003. – Vol. 47. – P. 2001–2010.
- [41] Lu W. Catalytic graphitization and Ohmic contact formation on 4H-SiC / W. Lu, W. C. Mitchel, G. R. Landis, W. Eugene Collins // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93. – P. 5397-5403.
- [42] Lu W. Ni Graphite Intercalated Compounds in Ohmic Contact Formation on SiC / Wei Jie Lu, J.A. Michel, C.M. Lukehart, W.E. Collins, W.C. Mitchel // Mat. Sci. Forum. – 2006. – Vol. 527-529. – P. 863-866.
- [43] La Via F. Schottky–ohmic transition in nickel silicide/SiC-4H system: is it really a solved problem? / F. La Via, F. Roccaforte, V. Raineri, M. Mauceri et al // Microelectronic Engineering. – 2003. – Vol. 70. – P. 519–523.
- [44] Seyller Th. Schottky barrier between 6H-SiC and graphite: Implications for metal/SiC contact formation / Th. Seyller, K. V. Emtsev, F. Speck, K.-Y. Gao, L. Ley // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88. – P. 242103-1 -3.
- [45] Nikitina P. Formation and role of graphite and nickel silicide in nickel based ohmic contacts to n-type silicon carbide / P. Nikitina // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 083709-1 – 083709-7.
- [46] Shur M. SiC materials and devices / Ed. by M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinstein // Singapore: Mainland Press. – 2006.
- [47] Adedeji A. V. Composite Ohmic Contacts to SiC / A.V. Adedeji, Ayayi Claude Ahyi, John R. Williams, M. J. Bozack, S. E. Mohny, B. Liu, James D. Scofield // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 527-529. – P. 879-882.
- [48] Андреев А. Н. Омические контакты к SiC-6H n-типа проводимости на основе тонких пленок карбида кремния, осажденных методом магнетронного распыления / А. Н. Андреев, А. И. Бабанин, А. Н. Кузнецов, М. Г. Растегаева, Е. И. Теруков, В. Е. Челноков, М. П. Щеглов // ПЖТФ. – Т.20, № 18. – С. 11-15.
- [49] Dmitriev V. A. Low resistivity ($10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$) ohmic contacts to 6H silicon carbide fabricated using cubic silicon carbide contact layer / V. A. Dmitriev,

- K. Irvine, M. Spencer, G. Kelner // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 64. – P. 318-320.
- [50] Lee S.-K. Low resistivity ohmic titanium carbide contacts to n- and p-type 4H-silicon carbide / S.-K. Lee, C. Zetterling, M. Ostling, J. Palmquist et al. // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 44. – P. 1179-1186.
- [51] Kameche M. GaAs-, InP- and GaN HEMT-based microwave control devices: what is best and why / M. Kameche, N. V. Drozdovski // Microwave Journal. – 2005. – vol. 48, N5. – P. 164-178.
- [52] Dasgupta S. Ultra-low ohmic contacts to N-polar GaN HEMTs by In(Ga)N based source-drain regrowth by Plasma MBE / Sansaptak Dasgupta, Nidhi, D.F.Brown, T.E.Mates, S.Keller, J.S.Speck, U.K.Mishr // CS MANTECH Conference, May 17th-20th. – Portland, Oregon, USA. – 2010. – P. 111-114.
- [53] Cao X. Advanced processing of GaN for novel electronic devices: Ph. D. dissertation / X. Cao – 2000. – 204 P.
- [54] Родерик Э. Х. Контакты Металл-Полупроводник / Э. Х. Родерик // М.:Радио и связь. – 1982. – 210 с.
- [55] Singh Y. A new 4H-SiC lateral merged double Schottky (LMDS) rectifier with excellent forward and reverse characteristics / Y. Singh, M. J. Kumar // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2001. – Vol.48. – P. 2695-2700.
- [56] Hara S. Pinning-controlled ohmic contacts: application to SiC(0001)/ S. Hara, T. Teraji, H. Okushi, K. Kajimura // Appl. Surf. Sci. – 1996. – Vol.107. – P.218-221.
- [57] Tokuyuki T. Control of interface states at metal/6H-SiC(0001) interfaces / T. Teraji, S. Hara // PHYSICAL REVIEW. – 2004. – В 70. – P.035312.
- [58] Стриха В. И. Контактные явления в полупроводниках / В. И. Стриха // Киев: Выща школа. Головное издательство. – 1982. – 224 с.
- [59] Neudeck P. Performance limiting micropipe defects in silicon carbide wafers / P. Neudeck, J. Powell // IEEE Electronic Device Letters. – 1994. – N15(2). – P.63–65.

- [60] Tumakha S. Defect-driven inhomogeneities in Ni/4H-SiC Schottky barriers / S. Tumakha et al. // *Applied Physics Letters*. – 2005. – 87(24). – 242106.
- [61] Hara S. Pinning-controlled ohmic contacts: application to SiC(0001) / S. Hara, T. Teraji, H. Okushi, K. Kajimura // *Applied Surface Science*. – 1996. – Vol. 107. – P. 218-221.
- [62] Rastegaeva M. G. The influence of temperature treatment on the formation of Ni-based Schottky diodes and ohmic contacts to n-6H SiC / M. G. Rastegaeva, A. N. Andreev, A. A. Petrov, A. I. Babanin, M. A. Yagovkina, I. P. Nikitina // *Materials Science and Engineering*. – 1997. – Vol. B46. – P. 254-258.
- [63] Kumta A. Unterminated 4H-SiC Schottky barrier diodes with novel HfN_xB_y electrodes / A. Kumta, Rusli, Chin-Che Tin, L. Valeri, S.F. Yoon, // *J. Ahn Microelectronic Engineering*. – 2006. – 83. – P.37–40.
- [64] Waldrop J. R. Metal Schottky barrier contacts to 6H-SiC / J. R. Waldrop, R. W. Grant, Y. C. Wang, R. F. Davis // *J. Appl. Phys.* – 1992. – Vol.72. – P. 4757-4760.
- [65] Waldrop J. R. Schottky barrier height and interface chemistry of annealed metal contacts to alpha 6H-SiC: Crystal face dependence / J. R. Waldrop, R. W. Grant // *J. Appl. Phys. Lett.* – 1993. – Vol. 62. – P. 2685-2687.
- [66] Shili K. Series resistance study of Schottky diodes developed on 4H-SiC wafers using a contact of titanium or molybdenum / K. Shili, M. Ben Karoui, R. Gharbi, M. Abdelkrim et al. // *Microelectronic Engineering*. – 2013. – 106. – P. 43–47.
- [67] Downey B.P. Electrical characterization of Schottky contacts to N-polar GaN / B. P. Downey, D. J. Meyer, D. S. Katzer, D. F. Storm // *BinariSolid-State Electronics*. – 2013. – 86. – P.17–21.
- [68] Kalinina E.V. Structural and electrical properties of Schottky barriers on n-GaN / E. V. Kalinina, N. I. Kuznetsov, A. I. Babanin, V. A. Dmitriev, A. V. Shchukarev // *Diamond and Related Materials*. 1997. – V 6, N 10. – P. 1528–1531.

- [69] Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева). – 2002, – т. XLVI, №5, – С. 50-56.
- [70] Каратаев А. Д. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия / А. Д. Каратаев, В. Ю. Мошков, С. В. Овчинников и др.// Физическая мезомеханика. – 2005. – т. 8, № 5. – с.103-116.
- [71] Береснев В. М. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков В. И. Фареник, Г. В. Кирик. // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – т. 5, № 1-2. – vol. 5, No. 1-2. – с.4-27.
- [72] Андриевский Р. А. Прочность наноструктур / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // УФН. – т.179, №4. – С.337-358.
- [73] Р.А. Андриевский. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы / Р.А.Андриевский.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2012. – С.525 ISBN 978-5-9963-0622-0.
- [74] Андриевский Р. А. Наноматериалы на основе тугоплавких карбидов, нитридов и боридов / Р. А. Андриевский // Успехи химии. – 2005. – т. 74, № 12. – С. 1163–1175.
- [75] Munr R. G. Material Properties of Titanium Diboride / R. G. Munr // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 2000. – V.105, N5. – P.709-720.
- [76] Itoh H. Preparation of TiB_2 a sintered compacts by hot pressing / H. Itoh, S. Naka, T. Matsudaira, H. Hamamoto // Journal of Materials Science. – 1990. – V.25. – P. 533-536.
- [77] Shalisha I. Stability of Schottky contacts with Ta–Si–N amorphous diffusion barriers and Au overlayers on 6H–SiC / I. Shalisha, Y. Shapira // J. Vac. Sci. Technol. – 2000. – V.18, N5. – P. 2477-2481.
- [78] Агеев О. А. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О. А. Агеев, А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец, Р. В. Конакова, В. В.

- Миленин, В. А. Пилипенко Под ред. Р. В. Конаковой // Харьков: НТК “Институт монокристаллов”. – 2008. – 392 с. ISBN 978-9666-024742-0
- [79] Кудрик Я. Я. Технология изготовления контактов к карбиду кремния / Я. Я. Кудрик, Р. И. Бигун, Р. Я. Кудрик // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – № 1. – С. 25-37.
- [80] Кудрик Р. Я. Контактний опір омичних контактів до SiC / Р. Я. Кудрик, Р. І. Бігун // Тези доповідей міжнародної наукової конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика - 2013” – 15 - 17 травня 2013 р. – Львів, Україна.
- [81] Кудрик Я. Я. Омичний контакт до SiC / Я. Я. Кудрик, Р. І. Бігун, Р. Я. Кудрик // Тези конференції молодих вчених з фізики напівпровідників “Лашкарьовські читання- 2013”. – Київ, Україна, – с. 268-270.
- [82] Kudryk Ya. Ya. The formation methods for ohmic contacts to silicon carbide / Ya.Ya. Kudryk, R. Ya. Kudryk // XIV Int. conf. Physics and technology of thin films and nanosystems. – Ivano-Frankivsk, Ukraine. – 2013. – P.131.
- [83] Бучковська М. Д. Влияние поверхностных неоднородностей на энергетический спектр в пленке металла / М. Д. Бучковська, Р. И. Бигун, Р. Я. Кудрик // Материалы международной научно-технической конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы физики” 21–23 октября 2013 г. Саранск, Россия. – С.70-71.
- [84] Кудрик Я. Я. Дослідження контактів з дифузійними бар’єрами на основі наноструктурованих шарів дибориду титану до 6H SiC / Я. Я. Кудрик, В. С. Сліпокуров, В. В. Шинкаренко, І. В. Муха, Р. І. Бігун, Р. Я. Кудрик // VI – th Ukrainian-Polish Scientific and Practical Conference “Electronics and Information Technologies”. Ukraine, Lviv. – 2014. – p.183-186.
- [85] Кудрик Я. Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл- полупроводник / Я. Я. Кудрик // Петербургский журнал электроники. – 2010. – №1. – С.25-40.

- [86] Marlow G. S. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance / G. S. Marlow, M. B. Das // Solid-State Electron. – 1982. – v. 25, N2. – p. 91-94.
- [87] Андреев А. Н. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов / А. Н. Андреев, М. Г. Растегаева, В. П. Растегаев, С. А. Решанов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – т. 32, No 7 – С. 832-838.
- [88] Reeves G. K. Specific contact resistance using a circular transmission line model. / G. K. Reeves // Solid-State Electron. – 1980. – v.23, N5. – P. 487-49.
- [89] Schroder D. K. Semiconductor Material and Devices Characterization / D. K. Schroder // 3rd Edition. – NY: John Wiley & Sons. – 2006. – 800 p.
- [90] Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices/ S. M. Sze, K. N. Kwok // 3rd Edition. – New York:Wiley-Interscience. – 2006. – 832 p.
- [91] Aubry V. Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward IV methods / V. Aubry, F. Meyer // J. Appl. Phys. – 1994. – 76, №12. – P. 7973 - 7984.
- [92] Sarpatwari K. Toward understanding the electrical properties of metal/semiconductor Schottky contacts: the effects of barrier inhomogeneities and geometry in bulk and nanoscale structures. – PhD Diss. – The Pennsylvania State University. – 2009. – 177 p.
- [93] Rhoderick E. H. Metal-semiconductor contacts/ E. H. Rhoderick, R. H. Williams // Oxford: Clarendon Press. – 1988. – 252 p.
- [94] Norde H. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance / H. Norde // J. Appl. Phys. – 1979. – 50, №7. – P. 5052-5053.
- [95] Lien C. D. An improved forward I-V method for nonideal Schottky diodes with high series resistance / C. D. Lien, F.C.T. So, M. A. Nicolet // IEEE Trans. Electron Devices. – 1984. – ED-31, №10. – P.1502-1503.

- [96] Cibils R. M. Forward IV plot for nonideal Schottky diodes with high series resistance / R. M. Cibils, R. H. Buitrago // Journal of Applied Physics. – 1985. – 58. – P.1075–1077.
- [97] Cheung S. K. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. / S. K. Cheung, N. W. Cheung // Appl. Phys. Lett. – 1986. – 49, №2. – P.85–87.
- [98] Werner J. H. Schottky Barrier and p-n-junction I/V Plots – Small Signal Evaluation / J. H. Werner // Applied Physics A. – 47, №3. – P. 291-300.
- [99] Кудрик Я. Я. Определение высоты барьера в диодах Шоттки с шунтирующим эффектом. / Я. Я. Кудрик // Петербургский журнал электроники. – 2005. – № 1. – С.95-99.
- [100] Bennett R. J. Interpretation of Forward Bias Behavior of Schottky Barriers / R. J. Bennett // IEEE Trans. Electron Devices. – 1987. – ED-34, N4. – P. 935-9371.
- [101] Ferhat-Hamida A. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method / A. Ferhat-Hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, R. Weiss. // Solid-State Electronics. – 2002. – 46. – P. 615–619.
- [102] Ortiz-Conde A. Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method / A. Ortiz-Conde, Ma. Yuansheng, J. Thomson, E. Santos, J. J. Liou, F. J. García Sánchez, M. Lei, J. Finol, P. Layman // Solid-State Electronics. – 1999. – 43. – P. 845–848.
- [103] Karaboga N. The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony / N. Karaboga, S. Kockanat, H. Dogan // Appl Intell. – 2013. – 38. – P. 279–288.
- [104] Kudryk Ya. Ya. Methods for determination of Schottky barrier height from I-V curves / Ya. Ya. Kudryk, V. V. Shynkarenko, V. S. Slipokurov, R. I. Bigun, R. Ya. Kudryk // CriMiCo'2014 7-13 September 2014. – Sevastopol, Crimea. – P.673-674.

- [105] Программа для расчета высоты барьера Шоттки [электронный ресурс] / Я.Я.Кудрик, В.В.Шинкаренко, В.С.Слипокуров, Р.И.Бигун, Р.Я.Кудрик : сайт. лаб. №33 ИФП им. В.Е.Лашкарева. – режим доступа: <https://isp.kiev.ua/index.php/uk/component/content/article/908-publications/lab33/lab-33-ustanovky/3944>
- [106] Sato K. Study of the Forward I–V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance / K. Sato, Y. Yasumura // J. Appl. Phys. – 1985. – 58. – P. 3655–3657.
- [107] Todorović B. The effect of rapid thermal annealing on structural and electrical properties of TiB₂ thin films / B. Todorović et al. // Thin Solid Films. – 1997. – V. 300, N 1-2. – P. 272-277.
- [108] Tung R. T. Recent advances in Schottky barrier concepts. / R. T. Tung // Materials Science and Engineering: R. – 2001. – 35, №1–3. – 138 p.
- [109] Божков В. Г. Влияние нелинейной зависимости высоты барьера от смещения на измеряемые параметры контактов с барьером Шоттки / В. Г. Божков, А. В. Шмаргунов // CriMiCo'2011 12-16 September 2011. – Sevastopol, Crimea, Ukraine. – С. 246-247.
- [110] Teraji T. Control of interface states at metal/6H-SiC(0001) interfaces / T. Teraji, S. Hara // Phys. Rev. B. – 2004. – 70. – P. 035312-(1-19).
- [111] Brillson L. J. Contacts to semiconductors: fundamentals and technology / ed. by L. J. Brillson // 1st Indian ed. New Delhi: Crest Publishing House. – 2005. – 680 p.
- [112] Belyaev A. E. Heat-Resistant Au-TiB_x-n-GaN Schottky Diodes / A. E. Belyaev et al // 16th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2006). 11-15 September 2006. – Sevastopol, Crimea, Ukraine IEEE. Weber Co. – V.2. – P.644-645.
- [113] Евстропов В. В. Дислокационное происхождение и модель избыточно-туннельного тока в р–п-структурах на основе GaP / В. В. Евстропов, М. Джумаева, Ю. В. Жилаев и др. // ФТП. – 2000. – Т. 34, № 11. – С. 1357.

- [114] Кудрик Р. Я. Контакты з бар'єром Шотткі Au–TiB_x–n-GaN / Р. Я. Кудрик // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2015. – Т. 13, Вип. 3. – С. 449-457.572.
- [115] Marinova Ts. Nickel based ohmic contacts on SiC / Ts. Marinova, A. Kakanakova-Georgieva, V. Krastev, R. Kakanakov // Materials Sci. Eng. – 1997. – Vol. B46. – P. 223-226.
- [116] Бланк Т. В. Механизм протекания тока в омическом контакте к n-4H-SiC / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг, Е. А. Поссе, Ф. Ю. Солдатенков // ФТП. – 2010. – Т. 44, № 4. – С. 482-485.
- [117] Василевский К. В. Электрические характеристики и структурные свойства омических контактов к эпитаксиальным слоям 4H-SiC с дырочной проводимостью / К. В. Василевский, К. Zekentes, С. В. Реидакова и др. // ФТП. – 1999. – Т. 33, № 11. – С. 1334.
- [118] Buchholt K. Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti₃SiC₂ on n- and p-type 4H-silicon carbide / K. Buchholt, R. Ghandi, M. Domeij et al // Applied physics letters. – 2011. – Vol. 98. – P. 042108 (3 p).
- [119] Kuchuk V. On the Formation of Ni-based Ohmic Contacts to n-type 4H-SiC / V. Kuchuk, V. P. Kladko, Anna Piotrowska, Renata Ratajczak, Rafał Jakiela // Materials Science Forum. – 2009. – Vol. 615-617. – P. 573-576.
- [120] Chang S. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to N-type 4H-SiC / S. Chang, S. Wang, K. Uang, B. Liou // Solid-State Electron. – 2005. – Vol. 49. – P. 1937–1941.
- [121] Yanga S. J. Study of Co- and Ni-based ohmic contacts to n-type 4H-SiC / S. J. Yanga , C. K. Kim, I.H. Noh, S.W. Jang, K.H. Jung, N.I. Cho // Diamond and Related Materials. – 2004. – Vol. 13. – P. 1149–1153.
- [122] Kakanakova-Georgieva A. Characterization of ohmic and Schottky contacts on SiC / A. Kakanakova-Georgieva, Ts. Marinova, O. Noblanc et al. // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 343-344. – P. 637-641.

- [123] Saxena V. Building Blocks for SiC Devices: Ohmic Contacts, Schottky Contacts and p-n Junctions / V.Saxena, A. J. Steckl [Ed. by Y. S. Park] // Semiconductors and Semimetals. – 1998. – Vol. 52.
- [124] Guziewicz M. Ta–Si contacts to n-SiC for high temperatures devices / M. Guziewicz, A. Piotrowska, E. Kaminska, K. Graszka, R. Diduszko, A. Stonert // Materials Sci. Eng. B. – 2006. – Vol. 135. – P. 289–293.
- [125] Bozack M. J. Surface studies on SiC as related to contacts / M. J. Bozack // Phys. stat. sol. (b). – 1997. – Vol. 202. – P. 549-573.
- [126] Kuchuk A. V. Long-term stability of Ni–silicide ohmic contact to n-type 4H–SiC / A.V. Kuchuk, M. Guziewicz, R. Ratajczak, M. Wzorek, V. Kladko, A. Piotrowska // Microel. Eng. – 2008. – Vol. 85. – P. 2142–2145.
- [127] Jang T. Tantalum carbide ohmic contacts to n-type silicon carbide / T. Jang, L. M. Porter, G. Rutsch, B. Odekirk // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 75. – P. 3956-3958.
- [128] Crofton J. Hightemperature ohmic contact to ntype 6HSiC using nickel / J. Crofton, P. G. McMullin, J. R. Williams, M. J. Bozack // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 77. – P. 1317-1319.
- [129] La Via F. Structural and electrical characterisation of titanium and nickel silicide contacts on silicon carbide / F. La Via, F. Roccaforte, A. Makhtari, V. Raineri, P. Musumeci, L. Calcagno // Microelectronic Engineering. – 2002. – Vol. 60. – P. 269–282.
- [130] Porter L. M. A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide / L. M. Porter, R. F. Davis // Materials Science and Engineering. – 1995. – Vol. B 34. – P. 83-105.
- [131] Калинина Е. В. Управление электрофизическими параметрами слоев карбида кремния и создание приборов для эксплуатации в экстремальных условиях: дис. д. физ.-мат. наук.: 01.04.10 / Е. В. Калинина. – Санкт-Петербург. – 2008. – с. 251.
- [132] Jang T. A comparison of single- and multi- layer ohmic contacts based on tantalum carbide on n-type and Osmium on ptype silicon carbide at elevated

- temperatures / T. Jang, L. M. Porter, G. Rutsch, B. Odekirk // Material Science Forum. – 2000. – Vol. 338324. – P. 1001-1004.
- [133] Çınar K. Radiation effects on ohmic and Schottky contacts based on 4H and 6H-SiC / K. Çınar, C. Coskun, E. Gür, S. Aydoğan // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2009. – Vol. 267. – P. 87–90.
- [134] Barda B. Thermal degradation of Ni-based Schottky contacts on 6H-SiC / B. Barda, P. Machác, S. Cichona, M. Kudrnova // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – P. 4418–442.
- [135] Cichoň S. Ni and Ni Silicides Ohmic Contacts on n-type 6H-SiC with Medium and Low Doping Level / S. Cichoň, B. Barda, P. Macháč // Radioengineering. – 2011. – Vol. 20, № 1. – P. 209-213
- [136] McDaniel G. Y. Rhenium ohmic contacts on 6H-SiC / G. Y. McDaniel, S. T. Fenstermaker, W. V. Lampert, P. H. Holloway // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 96. – P. 5357-5364.
- [137] Cayrel F. TiAl Ohmic contact on GaN, in situ high or low doped or Si implanted, epitaxially grown on sapphire or silicon / F. Cayrel, O. Ménard, A. Yvon, N. Thierry-Jébali, C. Brylinsky, E. Collard, D. Alquier // Physica Status Solidi (a). – 2012. – № 209. – P. 1059–1066.
- [138] Lee H. C. Thermally Stable Ti/Al/W/Au Multilayer Ohmic Contacts on n-Type GaN / H. C. Lee, J. W. Bae, G. Y. Yeom // Journal of the Korean Physical Society. – 2007. – Vol. 51, № 3. – P. 1046-1049.
- [139] Ming-Lun Leea. Nonalloyed Cr/Au-based Ohmic contacts to n-GaN / Ming-Lun Leea, Jinn-Kong Sheua, C. C. Hu // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 91 – P. 182106 – (1-3).
- [140] Borysiewicz M. A. Fundamentals and practice of metal contacts to wide band gap semiconductor devices / M. A. Borysiewicz , E. Kamińska, M. Myśliwiec, M. Wzorek et al // Crystal Research and Technology. – 2012. – № 47. – P. 261–272.

- [141] Ching-Ting Leea. Long-term thermal stability of Ti/Al/Pt/Au ohmic contacts to n-type GaN / Ching-Ting Leea, Hsiao-Wei Kao // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 76, № 17. – P. 2364-2366.
- [142] Zhifang F. Very low resistance multilayer ohmic contact to n-GaN / Fan Zhifang, S. Noor Mohammad, Wook Kim, Özgür Aktas, Andrei E. Botchkarev, Hadis Morkoç // Appl. Phys. Let. – 1996. – Vol. 68, № 12. – P. 1672-1674.
- [143] Chen Z. Z. Thermal annealing effects on Ni/Au contacts to p type GaN in different ambient / Z. Z. Chen, Z. X. Qin, Y. Z. Tong, X. D. Hu, T. J. Yu, Z. J. Yang, X. M. Ding, Z. H. Li, G.Y. Zhang // Materials Science and Engineering: B. – 2003. – № 100. – P. 199–203.
- [144] Baik K. H. Ohmic contact properties of non-polar a -plane GaN films on r -plane sapphire substrates / K. H. Baik et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – № 43. – p. 295102.
- [145] Belyaev A. E. Development of high-stable contact systems to gallium nitride microwave diodes / A. E. Belyaev, N. S, Boltovets, V. N. Ivanov, L. M. Kapitanchuk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2007. – № 10. – P. 1–8.
- [146] Belyaev A. E. Heat-resistant Au–TiB_x–n-GaN Schottky diodes / A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, V. N. Ivanov, V. P. Kladko, R. V. Konakova, Ya. Ya. Kudryk et al // Proc. 2006 16th Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo'2006). – 2006. – P. 644–645.
- [147] Khanna R. Stability of Ti/Al/ZrB₂/Ti/Au ohmic contacts on n-GaN / R. Khanna, S. J. Pearton, F. Ren, I. I. Kravchenko // Appl. Surf. Sci. – 2006. – № 253. – P. 2340-2344.
- [148] Crofton J. Finding the optimum Al–Ti alloy composition for use as an ohmic contact to p-type sic / J. Crofton, S. E. Mohny, J. R. Williams, T. Isaacs-Smith // Solid-State Electron. – 2002. – № 46. – P. 109–113.
- [149] Chang Shu-Cheng. Design and fabrication of high breakdown voltage 4H-SiC Schottky barrier diodes with floating metal ring edge terminations / Shu-Cheng

- Chang, Shui-Jinn Wang, Kai-Ming Uang, Bor-Wen Liou // Solid-State Electronics. – 2005. – 49. – P.437–444.
- [150] Defives D. Electrical behaviour and microstructural analysis of metal Schottky contacts on 4H-SiC / D. Defives, O. Durand, F. Wyczisk, O. Noblanc, C. Brylinski, F. Meyer // Microelectronic Engineering. – 2001. – V.55. – P. 369–374.
- [151] Itoh A. Analysis of Schottky Barrier Heights of Metal/SiC Contacts and Its Possible Application to High-Voltage Rectifying Devices / A. Itoh, H. Matsunami // Physica status solidi (a), – 1997. – V.162, N 1. – P. 389–408.
- [152] Андреев А. Н. Высота барьера в диодах Шоттки, сформированных на основе n-SiC-6H / А. Н. Андреев и др. // Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т.29, № 10. – С. 1833-1843.
- [153] Hagen S.H. Surface-barrier diodes on silicon carbide / S. H. Hagen // J. appl. Phys. 1968. – V.39. – P.1458-146.
- [154] Hara S. Characterization of the 6H-SiC (0001) surface and the interface with Ti layer with the Schottky limit / S. – Hara // Applied Surface Science. – 2000. – Vol. 162-163. – P. 19-24.
- [155] IEC/PAC 62717:2011 “LED modules for general lighting - Performance requirements”, ГОСТ Р 56230-2014 “Модули светодиодные для общего освещения. Эксплуатационные требования”.
- [156] Kupka R. K. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors / R.K. Kupka, W. A. Anderson // J. Appl. Phys. — 1991. — № 69. — P. 3623-3632.
- [157] Shalish I. Thermal stability of Re Schottky contacts to 6H-SiC/ I. Shalish, Y. Shapira // Electron Device Letters, IEEE. — Volume:21, Issue: 12. — P. 581 – 583.
- [158] Park June-Ho. Effect of Hot-Pressing Temperature on Densification and Mechanical Properties of Titanium Diboride with Silicon Nitride as a Sintering Aid / June-Ho Park, Yong-Ho Lee, Young-Hag Koh, Hyoun-Ee Kim. // J. Am. Ceram. Soc. — 2000. — V.83, N6. — p.1542–1544.

- [159] Андриевский Р. А. Высокоразрешающая просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия наноструктурных боридонитридных пленок / Р. А. Андриевский, Г. В. Калинин, Д. В. Штанский // ФТТ. — 2000. — т. 42, № 4. — С. 741-746.
- [160] Pfohl C. Development of titanium diboride coatings deposited by PACVD / C. Pfohl, A. Bulak, K.-T. Rie. // Surface and Coatings Technology. — 2000. — V.131. — P.141- 146.
- [161] Mayrhofer P. H. Self-organized nanocolumnar structure in superhard TiB_2 thin films / P. H. Mayrhofer, C. Mitterer, J. G. Wen, J. E. Greene, I. Pet. // Applied Physics Letters. — 2005. — V. 86. — P.131909-(1-3).

ДОДАТКИ

Додаток А.1

Таблиця

Розчини, що використовуються для очищення підкладок SiC [7, 154].

Розчин	Т, °С	Час	Опис
$\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ (5:1:1)	75	5 хв	RCA SC1
$\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$ (5:1:1)	75	5 хв	RCA SC2
$\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ (2.5:1)	100	5 хв	Seven-up
$\text{H}_2\text{O}:\text{HF}:\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ (100:3:1)	25	100 с	IMEC
$\text{HCl}:\text{HNO}_3$ (3:1)	50	5хв	царська горілка
$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10)	25		розчин HF (DHF)
$\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1)	120		Piranha
$\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ (1:7)	25		BHF
BHF+ NH_4OH	25		pH-модифікат BHF (pH 12)
K_2CO_3	90	10 хв	

Додаток А.2

Таблиця

Характеристики оптимальних омичних контактів до 4H SiC
(знаходяться нижче емпіричної залежності, див. рис. 1.4).

Контакт	Грань	N_d см^{-3}	$T_{\text{відп.}}$ $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{відп.}}$ хв.	ρ_c $\Omega \cdot \text{см}^2$	Ref.
Al/Ti/Au		$1,0 \cdot 10^{19}$	1050	5	$2,8 \cdot 10^{-6}$	[120]
C/Ni	Si	$3,1 \cdot 10^{19}$	800	120	$6,6 \cdot 10^{-7}$	[45]
C/Ni		$3,1 \cdot 10^{19}$	700	120	$1,26 \cdot 10^{-6}$	[40]
C/Ni		$1,1 \cdot 10^{17}$	900		$7,85 \cdot 10^{-5}$	
C/Ni		$1,1 \cdot 10^{17}$	1000		$5,75 \cdot 10^{-4}$	
C/Ni	Si	$1,1 \cdot 10^{17}$	1000	120	$5,8 \cdot 10^{-4}$	[45]
Co/Si/Co		$1,1 \cdot 10^{19}$	800	3	$1,5 \cdot 10^{-6}$	[121]
Co/Si/Co		$1,1 \cdot 10^{19}$	800	5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	[46]
Ni		$1,0 \cdot 10^{19}$	950	10	$2,8 \cdot 10^{-6}$	[122]
Ni		$1,0 \cdot 10^{19}$	950	10	$3,0 \cdot 10^{-6}$	[14]
Ni		$2,0 \cdot 10^{19}$	950		$1,0 \cdot 10^{-6}$	[123]
Ni		$1,4 \cdot 10^{18}$	1100		$3,6 \cdot 10^{-6}$	
Ni		$3,2 \cdot 10^{17}$	1100	1	$1,3 \cdot 10^{-5}$	
Ni		$1,5 \cdot 10^{18}$	950	3	$2,0 \cdot 10^{-5}$	[124]
Ni		$1,0 \cdot 10^{17}$	950	10	$3,0 \cdot 10^{-6}$	[115]
Ni		$1,0 \cdot 10^{19}$	950	10	$2,8 \cdot 10^{-6}$	[46]
Ni		$4,2 \cdot 10^{15}$	1000	1	$2,8 \cdot 10^{-3}$	
Ni	Si	$2,0 \cdot 10^{19}$	950	5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	[45]
Ni	Si	$1,0 \cdot 10^{19}$	950	10	$2,7 \cdot 10^{-6}$	
Ni	Si	$4,2 \cdot 10^{15}$	1000	1	$2,8 \cdot 10^{-3}$	
Ni	Si	$1,0 \cdot 10^{19}$	1050	10	$6,00 \cdot 10^{-6}$	[125]
Ni	Si	$1,0 \cdot 10^{18}$	1050	5	$1,0 \cdot 10^{-6}$	
Ni	Si	$1,0 \cdot 10^{17}$	1050	5	$1,0 \cdot 10^{-5}$	
Ni/Cr	Si	$4,8 \cdot 10^{17}$	1100	3	$1,6 \cdot 10^{-5}$	
Si/Ni		$2,0 \cdot 10^{19}$	900	10	$1,9 \cdot 10^{-6}$	[46]
Si/Ni		$2,0 \cdot 10^{17}$	1000	3	$4,0 \cdot 10^{-4}$	[126]
Si/Ni мультишар		$1,0 \cdot 10^{19}$	950	10	$3,0 \cdot 10^{-6}$	[14]
TaSi		$1,5 \cdot 10^{18}$	950	3	$4,0 \cdot 10^{-5}$	[124]

Додаток А.3

Таблиця

Характеристики оптимальних омичних контактів до 6Н SiC
(знаходяться нижче емпіричної залежності, див. рис. 1.6)

Контакт	Грань	N_d см^{-3}	$T_{\text{відп}}$ $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{відп}}$, хв.	ρ_c $\Omega \cdot \text{см}^2$	Ref.
TaC/Au		$2.3 \cdot 10^{19}$	1000	15	$1,38E^{-6}$	[127]
TaC/Au					$2,0E^{-6}$	
Nb		$1.4 \cdot 10^{18}$	1100	10	$3,0 \cdot 10^{-6}$	[46]
Ni		$1.8 \cdot 10^{18}$	950	10	$2,0 \cdot 10^{-5}$	[115]
Ni	Si	$7.0 \cdot 10^{18}$	950	2	$7,0 \cdot 10^{-7}$	[128]
		$7.8 \cdot 10^{18}$			$6,0 \cdot 10^{-6}$	
		$7.8 \cdot 10^{18}$	925	2.5	$4,0 \cdot 10^{-6}$	
	$9,0 \cdot 10^{-6}$					
	C				$9,0 \cdot 10^{18}$	
		$9,0 \cdot 10^{-7}$				
Ni		$9,8 \cdot 10^{17}$	1050	5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[129]
		$8.0 \cdot 10^{18}$	950	2	$5,0 \cdot 10^{-6}$	
Ni		$9,8 \cdot 10^{17}$	1050	5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[130]
		$8.0 \cdot 10^{18}$	950	2	$5,0 \cdot 10^{-6}$	
Ni		$5,0 \cdot 10^{19}$	1000	5	$1,0 \cdot 10^{-6}$	[125]
Ni		$4,5 \cdot 10^{17}$	1000	0,3	$1,7 \cdot 10^{-4}$	[131]
Ni	Si	$2,0 \cdot 10^{19}$	950	5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	[132]
Ni		$5,5 \cdot 10^{15}$	1065	10	$5,2 \cdot 10^{-2}$	[50]
Ni		$4,5 \cdot 10^{17}$	1000	0,3	$1,7 \cdot 10^{-4}$	[133]
Ni		$1.8 \cdot 10^{18}$	950	10	$1,0 \cdot 10^{-5}$	[46]
		$8,0 \cdot 10^{18}$	950	2	$5,0 \cdot 10^{-6}$	
Ni		$9,0 \cdot 10^{18}$	950	2	$5,0 \cdot 10^{-6}$	[45]
3C SiC /Ni	Si	$2,0 \cdot 10^{18}$	1000	0,5	$1,7 \cdot 10^{-5}$	[57]
C/Ni	Si	$1,0 \cdot 10^{19}$	700	120	$1,26 \cdot 10^{-6}$	[42]
Ni ₂ Si		$5,5 \cdot 10^{15}$	1065	10	$6,3 \cdot 10^{-3}$	[134]
			960	10	$8,9 \cdot 10^{-3}$	
Ni ₂ Si		$5,5 \cdot 10^{15}$	1070	10	$8,0 \cdot 10^{-3}$	[135]
NiCr		$3,2 \cdot 10^{17}$	1100	3	$2,5 \cdot 10^{-6}$	[46]
Re	Si	$1,28 \cdot 10^{18}$	1000	120	$1,5 \cdot 10^{-5}$	[136]
SiC/Al/Mo	C	$3,0 \cdot 10^{17}$	1600	50	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[48]
W/Ti/Ni		$9,8 \cdot 10^{17}$	1050	5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[130]
Ti		$4,5 \cdot 10^{17}$			$2,0 \cdot 10^{-5}$	[123]

Додаток А.4

Таблиця

Розчини, що застосовуються для очистки підкладок GaN [137-139].

Розчин	Т, °С	Час	Опис
H ₂ O:NH ₄ OH:H ₂ O ₂ (5:1:1)	75	5 хв.	RCA SC1
H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (5:1:1)	75	5 хв.	RCA SC2
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ (2.5:1)	100	5 хв.	Seven-up
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ (1:1)			Caro's
H ₂ O:HF:CH ₃ CH(OH)CH ₃ (100:3:1)	25	100 с.	IMEC
HCl:HNO ₃ (3:1)	50	5 хв.	AV
HF:H ₂ O(1:10)	25		розчин HF (DHF)
HF:NH ₄ F (1:7)	25		BHF
BHF+NH ₄ OH	25		pH-мод. BHF (pH 12)
HCl:H ₂ O(1:10)	25		розчин HCl (DHCl)

Додаток А.5

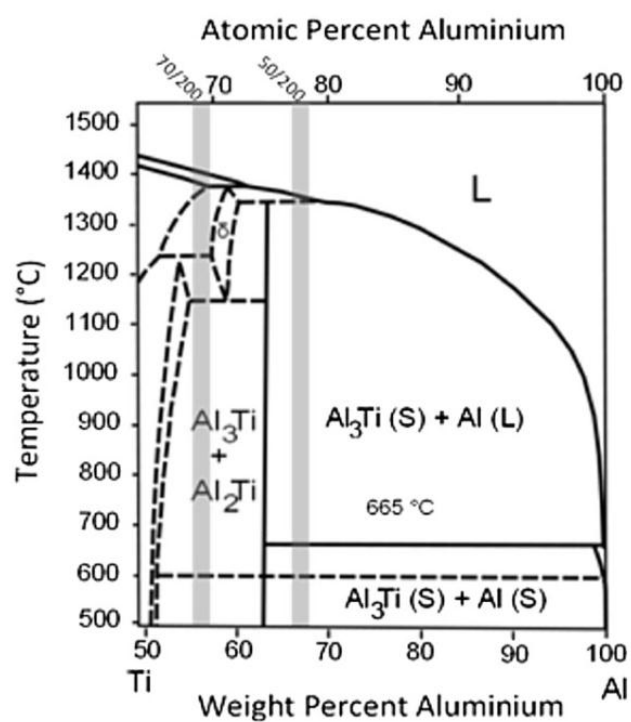
Таблиця

Основні параметри технології виготовлення якісних омічних контактів до p-GaN (знаходяться нижче емпіричної залежності на рис. 1.11).

Контакт	N_d , см^{-3}	$T_{\text{відп}}$, К	t , хв.	ρ_c , $\Omega \cdot \text{см}^2$	Шари, нм	Підкл	Очистка	Ref.
Ti/Al/TiN	10^{16}	600		10^{-4}	16/16/20	Al_2O_3		[140]
Ti/Al/Pt/Au	$6,7 \cdot 10^{17}$	950		$7,0 \cdot 10^{-6}$			DHCl 3 хв.	[141]
Ti/Al/Ni/Au	$4 \cdot 10^{17}$	900	0,5	$8,9 \cdot 10^{-8}$	15/220/40 /50		RIE в атм. Cl_2 , 20 с і в BCl_3 , 20 с.	[142]
Ti/Al/Ni/Au	$2,2 \cdot 10^{18}$	900	0,5	$9,68 \cdot 10^{-7}$	20/20/ 20/200	Al_2O_3	RIE в атм. CHF_3 і O_2	[143]
Ti/Al/Ni/Au	$3 \cdot 10^{18}$	650	1	$9,03 \cdot 10^{-6}$	20/40/ 20/80	Al_2O_3		[144]
Ti/Al/TiB _x /Au	$6 \cdot 10^{18}$	900	0,5	10^{-6}		Al_2O_3		[145]
Ti/Al/TiB _x /Au	$1 \cdot 10^{17}$	870	0,5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	50/20/ 100/200	Al_2O_3		[146]
Ti/Al/ZrB ₂ /Ti/ Au	$7 \cdot 10^{18}$	1000		$3,0 \cdot 10^{-6}$	20/100/50 / 20/80			[147]

Додаток А.6

Рис. Фазова діаграма Al-Ti [148].



Додаток А.7

Таблиця

Технологія виготовлення та основні параметри бар'єрних контактів до n-SiC 4H.

Контакта металізація	$N_d - N_{av}$ cm^{-3}	γ	Методика підготовки підкладки	n	прим.	ref.
Al; Ti; Ni; Au	$3,5 \cdot 10^{15}$	0,8	ацетон, сірчана кислота, стандартне очищення по RCA.	1,16		[149]
Ni, Pt, Ti, Au, HfN_xBy	$2,5 \cdot 10^{15}$	0,55	органічні розчинники; RCA і piranha $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ (1:8); витримка в розчині BHF; просушка в атмосфері - O_2 при $T = 1100^\circ\text{C}$. Очистка від оксиду BHF проводиться перед нанесенням металу.	1.3		[63]
Ti, W	$9 \cdot 10^{15}$	0,76	RCA очистка	1,02		[150]
Ti, Mo	$4-7 \cdot 10^{15}$	0,28		1,05		[66]
Ti, Mo	$4-7 \cdot 10^{15}$	0,41		1,09	ann.	[66]
Au, Ti; Ni	$2 \cdot 10^{16}$	0,76	Поверхня очищається трихлоретиленом і ацетоном, K_2CO_3 при температурі $T = 90^\circ\text{C}$ протягом 10 - 60 хв, HCl протягом 10 хв, царською горілкою - 15 хв, травленням HF протягом 1 хв, з подальшою промивкою в деіонізованій воді.	1,11	C-face	[151]
Au, Ti; Ni	$6 \cdot 10^{15}$	0,70		1,04	Si-face	[151]

Додаток А.8

Таблиця

Технологія виготовлення та основні параметри бар'єрних контактів до n-SiC 6H.

Контакта металізація	$N_d - N_a$, cm^{-3}	γ	Методика підготовки підкладки	n	прим.	ref.
Al, Ti, Mo, Ni, Pt	$5 \cdot 10^{17}$	0.18	без обробки	1,3	Si-face	[56, 57]
Al, Ti, Mo, Ni, Pt	$5 \cdot 10^{17}$	0,55	окислення ~ 30 А.; травлення 5% HF	1,5		
Al, Ti, Mo, Ni, Pt	$5 \cdot 10^{17}$	0.75	те ж з наступним кип'ятінням в деіонізованій воді 10 хв.	1,2		
Al, Mo, Cr, Au	$10^{17} - 10^{18}$	0,25	розплав КОН 5-10 с, промивання в деіонізованій воді та розчинниках			[152]
Pd, Au, Ag, Mg	$4 \cdot 10^{13}$	0,73	окиснення, видалення оксиду, промивання, відпал у високому вакуумі			[64-65]
Al, Ag, Au		0	скол у високому вакуумі (10^{-9} торр)		(1100)	[153]

Додаток А.9

Таблиця

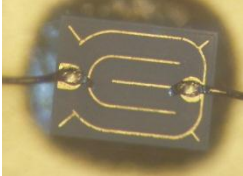
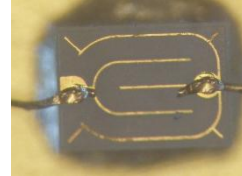
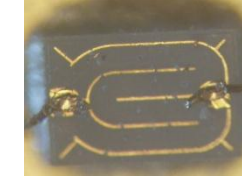
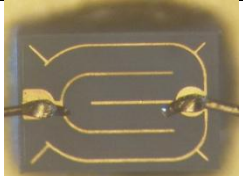
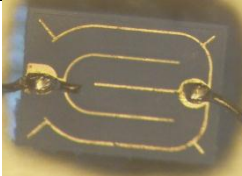
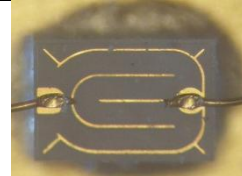
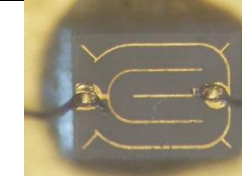
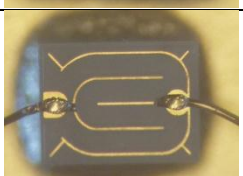
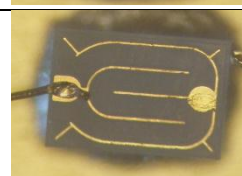
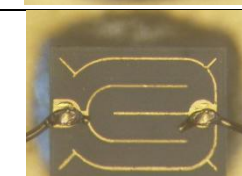
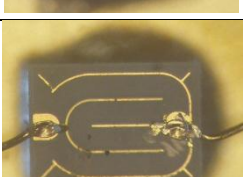
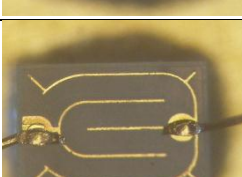
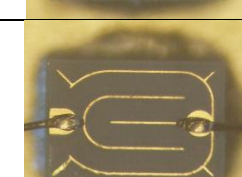
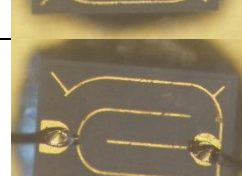
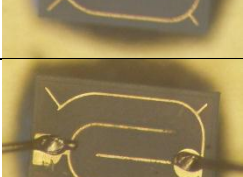
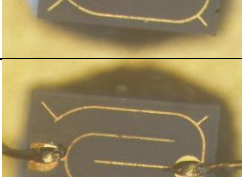
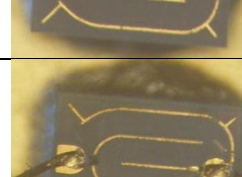
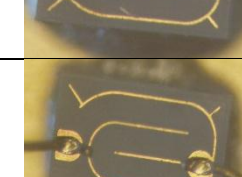
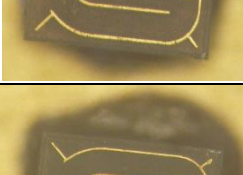
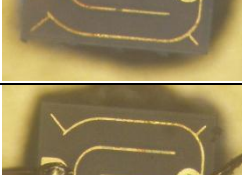
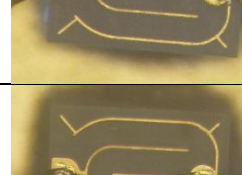
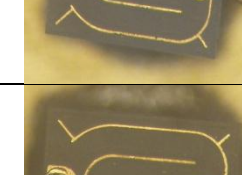
Технологія виготовлення та основні параметри бар'єрних контактів до n-GaN.

Контактні металізації	$N_d - N_a$ cm^{-3}	γ	Методика підготовки підкладки	n	прим.	ref.
Cu, Au, Pd, Ni, Pt	10^{17}	0,18	Плазмова очистка в атмосфері - O_2 для видалення залишкового фоторезисту, після чого - протягом 30 сек. в розчині HF з концентрацією - 10: 1, з подальшою промивкою в деіонізованій воді та просушуванні в атмосфері - N_2 .	1,07	n-GaN плівка вирощена на 6H-SiC підкладці.	[82]
Cr Au Ni	$6 \cdot 10^{17}$ - 10^{18}	0,83		1,05- 1,15	n-GaN плівка вирощена на 6H-SiC підкладці (0001).	[83]

Додаток А.10

Таблиця

Мікрофотографії світлодіодних чіпів, змонтованих на спільному тепловідводі. Нумерація стрічок та ж, що і на рис. 2.3 а.

	1	2	3	4
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Додаток А.11

Лістинг головного юніта програми моделювання часу напрацювання вибірки світлодіодних модулів

```
unit Unit1;
{$mode objfpc}{$H+}
interface
uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, TAgGraph, TASeries, Forms, Controls, Graphics, Dialogs,
Menus, ActnList, ComCtrls, ExtCtrls, Spin, StdCtrls, Math;
type
  ChipType=record
    Rt:real;
    Rshunt,
    n1,n2,
    Eb1,Eb2,
    Ioo1,Ioo2,
    Rbo,alpha,Eo,
    Iof,Eoo,
    I,V,T,Z,Degrad:real;
  end;
  { TForm1 }
  TForm1 = class(TForm)
    AcOpen: TAction;
    AcExit: TAction;
    AcSave: TAction;
    AcOneChip: TAction;
    AcExport: TAction;
    ActionList1: TActionList;
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Button4: TButton;
    Button5: TButton;
    Button6: TButton;
    Chart1: TChart;
    Chart1LineSeries1: TLineSeries;
    Chart1LineSeries10: TLineSeries;
    Chart1LineSeries11: TLineSeries;
    Chart1LineSeries2: TLineSeries;
    Chart1LineSeries3: TLineSeries;
    Chart1LineSeries4: TLineSeries;
    Chart1LineSeries5: TLineSeries;
    Chart1LineSeries6: TLineSeries;
    Chart1LineSeries7: TLineSeries;
    Chart1LineSeries8: TLineSeries;
    Chart1LineSeries9: TLineSeries;
    FloatSpinEdit1: TFloatSpinEdit;
    FloatSpinEdit10: TFloatSpinEdit;
```

```

FloatSpinEdit11: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit12: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit2: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit3: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit4: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit5: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit6: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit7: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit8: TFloatSpinEdit;
FloatSpinEdit9: TFloatSpinEdit;
Label1: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Label8: TLabel;
Label9: TLabel;
MainMenu1: TMainMenu;
MenuItem1: TMenuItem;
MenuItem2: TMenuItem;
MenuItem3: TMenuItem;
MenuItem4: TMenuItem;
MenuItem5: TMenuItem;
MenuItem6: TMenuItem;
MenuItem7: TMenuItem;
OpenDialog1: TOpenDialog;
Panel1: TPanel;
ProgressBar1: TProgressBar;
SaveDialog1: TSaveDialog;
ToolBar1: TToolBar;
procedure AcExportExecute(Sender: TObject);
procedure AcOneChipExecute(Sender: TObject);
procedure AcOpenExecute(Sender: TObject);
procedure AcSaveExecute(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Chart1Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Label2Click(Sender: TObject);
procedure MenuItem1Click(Sender: TObject);
private
{ private declarations }

```

```

    public
    { public declarations }
end;
const m=3;
    n=6;
    kb=0.026/300;
var
    Form1: TForm1;
    Chip:array[0..m,0..n] of ChipType;
    T0:real;
    Ol:byte;
    min, max:real;
    ar:array [0..99] of word;
implementation
{$R *.lfm}
procedure ParToScreen;
begin
    with Form1 do
Begin
    FloatSpinEdit1.Value:=Chip[0,0].Rbo;
    FloatSpinEdit8.Value:=Chip[0,0].alpha;
    FloatSpinEdit2.Value:=Chip[0,0].n1;
    FloatSpinEdit5.Value:=Chip[0,0].n2;
    FloatSpinEdit3.Value:=Chip[0,0].Eb1;
    FloatSpinEdit6.Value:=Chip[0,0].Eb2;
    FloatSpinEdit4.Value:=ln(Chip[0,0].Ioo1);
    FloatSpinEdit7.Value:=ln(Chip[0,0].Ioo2);
    FloatSpinEdit9.Value:=Chip[0,0].Eo;
    FloatSpinEdit10.Value:=ln(Chip[0,0].Iof);
    FloatSpinEdit11.Value:=Chip[0,0].Rt;
End;
end;
Procedure SetParams;
var i,j:integer;
Begin
For i:=0 to m do
For j:=0 to n do
    if not((i=0) and (j=0)) then
        Begin
            Chip[i,j].alpha:=Chip[0,0].alpha;
            Chip[i,j].Eb1:=Chip[0,0].Eb1;
            Chip[i,j].Eb2:=Chip[0,0].Eb2;
            Chip[i,j].Eo:=Chip[0,0].Eo;
            Chip[i,j].Ioo1:=Chip[0,0].Ioo1;
            Chip[i,j].Ioo2:=Chip[0,0].Ioo2;
            Chip[i,j].n1:=Chip[0,0].n1;
            Chip[i,j].n2:=Chip[0,0].n2;
            Chip[i,j].Rbo:=Chip[0,0].Rbo;
            Chip[i,j].Rshunt:= Chip[0,0].Rshunt;
            Chip[i,j].Rt:=Chip[0,0].Rt;
            Chip[i,j].Iof:=1e-3;
            Chip[i,j].Eoo:=0.037;

```

```

    end;
end;
procedure Gistt(par:byte);
var
    i,j:byte;
    Tmax:real;
begin
    {for}
    // For i:=0 to 9 do ar[i]:=0;
    Tmax:=0;
    For i:=0 to m do
    For j:=0 to n do
    Begin
        if Tmax< Chip[i,j].T then Tmax:=Chip[i,j].T;
        case par of
            1: inc(ar[trunc((Chip[i,j].Rbo-min)/(max-min)*99)]);
            2:inc(ar[round(random(19)+random(19)+random(19)+random(19)+random(19)+random(
19)+random(19)+random(19)) div 8)]);
        end; {case}
    end; {for} Form1.Chart1LineSeries1.Clear;
    For j:=0 to 99 do Form1.Chart1LineSeries1.AddXY((min+(j)/99*(max-min)),ar[j]);
    form1.Label13.Caption:='Tmax='+FloatToStr(Tmax);
end; {Gistt}
Procedure SetParams2;
var i,j,l:integer;
    s:real;
Begin
For i:=0 to m do
For j:=0 to n do
    if not((i=0) and (j=0)) then
    Begin
        s:=0;
        for l:=1 to 20 do s:=s+random;
        s:=s/10-1;
        Chip[i,j].alpha:=Chip[0,0].alpha;
        Chip[i,j].Eb1:=Chip[0,0].Eb1;
        Chip[i,j].Eb2:=Chip[0,0].Eb2;
        Chip[i,j].Eo:=Chip[0,0].Eo;
        Chip[i,j].Ioo1:=Chip[0,0].Ioo1;
        Chip[i,j].Ioo2:=Chip[0,0].Ioo2;
        Chip[i,j].n1:=Chip[0,0].n1;
        Chip[i,j].n2:=Chip[0,0].n2;
        Chip[i,j].Rbo:=Chip[0,0].Rbo+exp(s*8);
        Chip[i,j].Rshunt:= Chip[0,0].Rshunt;
        Chip[i,j].Rt:=Chip[0,0].Rt;
        Chip[i,j].Iof:=6e-4;
        Chip[i,j].Eoo:=0.037;
        Chip[i,j].Degrad:=1;
    end;
end;
Procedure CalcIVT(j,k:byte;Vpn:real);
var Io1,Io2,Vr,Vt,Told:real;

```

```

    b:boolean;  l:word;
Begin
  Chip[j,k].T:=T0;
  l:=0;
  { }repeat
  inc(l);
  Told:=Chip[j,k].T;
  Io1:=Chip[j,k].Ioo1*exp(-Chip[j,k].Eb1/kb/Chip[j,k].T);
  Io2:=Chip[j,k].Ioo2*exp(-Chip[j,k].Eb2/kb/Chip[j,k].T);
  Chip[j,k].I:=Io1*(exp(Vpn/Chip[j,k].n1/kb/Chip[j,k].T)-1)+
    Io2*(exp(Vpn/Chip[j,k].n2/kb/Chip[j,k].T)-1)+Vpn/Chip[j,k].Rshunt;
  Vr:=Chip[j,k].I*(Chip[j,k].Rbo+Chip[j,k].alpha*exp(Chip[j,k].Eo/kb/Chip[j,k].T)/exp(Chip[j,k].
  Eo/kb/290));
  Vt:=ln(Chip[j,k].I/Chip[j,k].Iof+1)*Chip[j,k].Eoo;
  Chip[j,k].V:=Vpn+Vr+Vt;
  Chip[j,k].T:=Chip[j,k].T*0.5+0.5*(T0+Chip[j,k].Rt*Chip[j,k].V*Chip[j,k].I);
  b:= ((abs(Chip[j,k].T-Told))<0.001) or (l<1000);
  { } until b;
end;
Procedure CalcIT(j,k:byte;V:real);
var Vl,Vr,Vm,dV:real;
Begin
  vl:=0;
  Vr:=V;
  repeat
  Vm:=(Vl+Vr)/2;
  CalcIVT(j,k,Vm);
  if Chip[j,k].V>V then Vr:=Vm else Vl:=Vm;
  until abs(Vr-Vl)<1e-4;
  end;
Procedure CalcMV(k:byte;Isum:real);
var Ism:real;
  Vl,Vr,Vm,dV:real;
  i:integer;
Begin
  vl:=0;
  Vr:=6;
  repeat
  Vm:=(Vl+Vr)/2;
  ism:=0;
  for i:=0 to m do
  begin
    CalcIT(i,k,Vm);
    Ism:=Ism+Chip[i,k].I;
  end;
  if Ism>Isum then Vr:=Vm else Vl:=Vm;
  until abs(Ism-Isum)<(1e-4*Isum);
  for i:=0 to m do
  begin
    Chip[i,k].Z:=Chip[i,k].I*(1080.8474-5.82139*(Chip[i,k].T-273-
    30)+0.03167*(Chip[i,k].T-273-30)*(Chip[i,k].T-273-30));
    Chip[i,k].Z:=Chip[i,k].Z/28*Chip[i,k].Degrad;

```

```

end;
end;
Procedure DrawGr;
var j:integer;
x,y,T:real;
Begin
  with Form1 do
  Begin
    Chart1LineSeries2.Clear;
    Chart1LineSeries3.Clear;
    Chart1LineSeries4.Clear;
    Chart1LineSeries5.Clear;
    Chart1LineSeries6.Clear;
    Chart1LineSeries7.Clear;
    Chart1LineSeries8.Clear;
    Chart1LineSeries9.Clear;
    Chart1LineSeries10.Clear;
    Chart1LineSeries11.Clear;
    For j:=1 to 300 do
    Begin
      T0:=290;
      CalcIVT(0,0,j/100);
      if Chip[0,0].I<1 then
      Chart1LineSeries2.AddXY(Chip[0,0].V,ln(Chip[0,0].I));
      T0:=370;
      CalcIVT(0,0,j/100);
      if Chip[0,0].I<1 then
      Chart1LineSeries3.AddXY(Chip[0,0].V,ln(Chip[0,0].I));
    End;
    End;
    End;
  Procedure DrawGr1;
  var j,i:integer;
  x,y,T:real;
  Begin
    with Form1 do
    Begin
      if ol=1 then Chart1LineSeries2.Clear;
      if ol=2 then Chart1LineSeries3.Clear;
      Chart1LineSeries4.Clear;
      Chart1LineSeries5.Clear;
      Chart1LineSeries6.Clear;
      Chart1LineSeries7.Clear;
      Chart1LineSeries8.Clear;
      Chart1LineSeries9.Clear;
      Chart1LineSeries10.Clear;
      Chart1LineSeries11.Clear;
      For j:=1 to 60 do
      begin
        x:=0;
        For i:=0 to n do
        Begin

```

```

T0:=300;
CalcMV(i,j/180);
x:=x+Chip[0,i].V;
end;
if ol=1 then Chart1LineSeries2.AddXY(x,ln(j/180));
if ol=2 then Chart1LineSeries3.AddXY(x,ln(j/180));
End;
End;
End;
{ TForm1 }
procedure TForm1.Chart1Click(Sender: TObject);
begin
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Chip[0,0].alpha:=0;
  Chip[0,0].Eb1:=2.79;
  Chip[0,0].Eb2:=1.2;
  Chip[0,0].Eo:=3.4;
  Chip[0,0].Ioo1:=exp(14);
  Chip[0,0].Ioo2:=exp(-1.9);
  Chip[0,0].n1:=1.15;
  Chip[0,0].n2:=2.5;
  Chip[0,0].Rbo:=3.25;
  Chip[0,0].Rshunt:=3e9;
  Chip[0,0].Rt:=420;
  Chip[0,0].Iof:=1.5e-3;
  Chip[0,0].Eoo:=0.037;
  min:=Chip[0,0].Rbo-1;
  max:=Chip[0,0].Rbo+10;
  ParToScreen;
end;
procedure TForm1.Label2Click(Sender: TObject);
begin
end;
procedure TForm1.AcOpenExecute(Sender: TObject);
var tf:TextFile;
    s:string; x,y:real;
    i:integer;
begin
  If OpenFileDialog1.Execute then
  begin Chart1LineSeries1.Clear;
    for i:=0 to OpenFileDialog1.Files.Count-1 do
    begin
      AssignFile(tf,OpenDialog1.Files[i]);
      reset(tf);
      if not(eof(tf)) then readln(tf,s);
      while not(eof(tf)) do
      begin
        readln(tf,x,y);
        if y>1e-16 then
          Chart1LineSeries1.AddXY(x,ln(y));
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

    end;
end;
CloseFile(tf);
end;
end;
procedure TForm1.AcSaveExecute(Sender: TObject);
begin
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    Chip[0,0].Rbo:=FloatSpinEdit1.Value;
    Chip[0,0].alpha:=FloatSpinEdit8.Value;
    Chip[0,0].Eb1:=FloatSpinEdit3.Value;
    Chip[0,0].Eb2:=FloatSpinEdit6.Value;
    Chip[0,0].n1:=FloatSpinEdit2.Value;
    Chip[0,0].n2:=FloatSpinEdit5.Value;
    Chip[0,0].Ioo1:=exp(FloatSpinEdit4.Value);
    Chip[0,0].Ioo2:=exp(FloatSpinEdit7.Value);
    Chip[0,0].Eo:=FloatSpinEdit9.Value;
    Chip[0,0].Iof:=exp(FloatSpinEdit10.Value);
    DrawGr;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    SetParams;
    Ol:=1;
    DrawGr1;
    SetParams2;
    Ol:=2;
    DrawGr1;
end;
function Svet(Isum:real):real;
var Z {potok sveta}
    :real;
    i,j:integer;
Begin
    For i:=0 to n do
    Begin
        CalcMV(i,Isum);
    end;
    z:=0;
    For i:=0 to m do
        For j:=0 to n do
            Z:=Z+Chip[i,j].Z;
        result:=z;
    end;
end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
Var Z0, Z, alpha:real;
hour :dword;
i,j,ii:integer;
begin
    Form1.ProgressBar1.Position:=0;

```

```

min:=20000; max:=50000; T0:=323;
for ii:= 1 to 50 do
Begin
  SetParams2;
  Z0:= Svet(0.4);
  hour:=round(min);
  repeat
  For i:=0 to m do
  For j:=0 to n do
  begin
    alpha:=exp(-6.45587-0.17711*300/0.026/Chip[i,j].T);
    Chip[i,j].Degrad:=exp(-alpha*hour);
    Z:=Svet(0.4);
  end;
  hour:=hour+100;
  until Z<0.70*Z0;
  inc(ar[trunc((hour-min)/(max-min)*99)]);
  Gistt(3);
  Form1.ProgressBar1.StepIt;
End;
end;
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
end;
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
  SetParams2;
  Gistt(1);
end;
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
  Gistt(2);
end;
procedure TForm1.AcOneChipExecute(Sender: TObject);
var j,k:integer;
    Vpn:real;
begin
  Chart1LineSeries2.Clear;
  For j:=0 to 100 do
  begin
    Vpn:=1+3/100*j;
    CalcIVT(1,1,Vpn);
    Chart1LineSeries2.AddXY(Chip[1,1].V,Chip[1,1].I);
  end;
end;
procedure TForm1.AcExportExecute(Sender: TObject);
Var F:TextFile;
    nt,ct,jj :integer;
begin
  if SaveDialog1.Execute then
  Begin
    AssignFile(F,SaveDialog1.FileName);

```

```

rewrite(f);
nt:=round(FloatSpinEdit12.Value);
case nt of
1: ct:=Chart1LineSeries1.Count;
2: ct:=Chart1LineSeries2.Count;
3: ct:=Chart1LineSeries3.Count;
end;
{ TChart.Series[nt].; }
for jj:=1 to ct-1 do
case nt of
1:writeln(F,Chart1LineSeries1.GetXValue(jj),#9,Chart1LineSeries1.GetYValue(jj));
2:writeln(F,Chart1LineSeries2.GetXValue(jj),#9,Chart1LineSeries2.GetYValue(jj));
3:writeln(F,Chart1LineSeries3.GetXValue(jj),#9,Chart1LineSeries3.GetYValue(jj));
end;{ case }
CloseFile(f);
end;
end;
procedure TForm1.MenuItem1Click(Sender: TObject);
begin
end;
Function Voltage(j,k:byte):real;
var Io,Vpn,Vr:real;
begin
Io:=Chip[j,k].Ioo*exp(Chip[j,k].Eb/0.026*300/Chip[j,k].T);
Vpn:=ln(Chip[j,k].I/Io)*Chip[j,k].n*0.026/300*chip[j,k].T;
Vr:=Chip[j,k].I*(Chip[j,k].Rbo+Chip[j,k].alpha*exp(-
Chip[j,k].Eo/0.026*300/Chip[j,k].T));
Chip[j,k].V:=Vpn+Vr;
result:=Chip[j,k].V;
end;
end.

```