

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Сергію ШУЛЬЗІ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

### **Рецензія**

офіційного рецензента, завідувача кафедри квантової радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук, професора Маслова Вячеслава Олександровича на дисертаційну роботу Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

#### **1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами**

Терагерцовий діапазон представляє інтерес через велику кількість можливих технічних застосувань його для розробки різноманітних приладів і систем у різних областях науки, техніки, медицини та ін. Наприклад, в терагерцовому діапазоні знаходиться велика кількість обертальних та коливальних переходів молекул, що відкриває перспективи для їх дослідження та практичного використання.

Проблема створення джерел випромінювання в цьому діапазоні вирішується як з використанням оптичних методів, так із застосуванням традиційних твердотілих елементів на зразок лавино-пролітних діодів чи діодів Ганна. Однак враховуючи наявність потужних вакуумних приладів для генерації терагерцових коливань на зразок гіротрона, вирішення проблема створення малогабаритних активних елементів наразі заливається на часі. Таким чином, тема дисертації, безумовно, є актуальною, а запропоновані в дисертації ідеї щодо реалізації активних елементів терагерцового діапазону у вигляді планарних діодів Ганна з активними бічними границями, виходячи з результатів роботи, мають перспективи подальшого розвитку.

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової задачі сучасної прикладної фізики, яка стосується розробки твердотілих джерел терагерцового й субтерагерцового діапазонів здатних до генерації за нормальних умов та пошуку можливих шляхів модернізації існуючих приладів твердотілої електроніки з метою просування їх робочої частоти у терагерцовий діапазон.

Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому

тематика дисертації Зозулі В.О. на здобуття наукового ступеня «доктор філософії» є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить великий інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації переконливо свідчить і те, що вона виконувалася на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна за держбюджетною науково-дослідною темою «Активні елементи на основі варізонних та моношаруватих напівпровідників для генерації та випромінювання на частотах терагерцового діапазону», у якій автор приймав участь як виконавець.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, є досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано та переконливо. Дисертація Зозулі В.О. складається зі вступу, який містить загальну характеристику роботи, п'ятьох розділів основного тексту, висновків до роботи, списку використаних джерел та трьох додатків.

**Перший розділ** дисертації присвячено огляду існуючих твердотілих активних елементів, що використовуються для генерації у субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах. Проаналізовано існуючу елементну базу високочастотних приладів, проаналізовано їх переваги і недоліки, та визначені можливі шляхи покращення їх параметрів з точки зору можливості отримання генерації у вказаних діапазонах.

У **другому розділі** дисертації автором наведено опис математичної моделі, що використана для опису переносу заряду у напівпровідникових приладах на високих частотах, наведено обґрунтування її вибору для аналізу гомогенних та варізонних напівпровідникових структур. Продемонстрована верифікація математичної моделі на прикладі розрахунку залежності дрейфової швидкості електронів від прикладеного електричного поля для матеріалів, що використовуються у роботі: GaAs, InP, InAs, GaInAs. Показано, що отримані характеристики узгоджуються з аналогічними характеристиками, що були отримані експериментально та шляхом розрахунку іншими авторами

У **третьому розділі** розглянуто базові варіанти планарних діодів Ганна, що містять активні бічні границі у вигляді активного напівпровідникового елемента, розміщеного над каналом планарного діода. Концепція використання таких активних границь показана на прикладі планарного діода на основі GaAs з бічною границею однорідною за складом з каналом планарного діода та з бічною границею на основі GaInAs, відділеною від каналу гетеропереходом. Продемонстровано розширення частотного діапазону пристрою та зростання коефіцієнту корисної дії в таких діодах

порівняно зі звичайними приладами з планарною конструкцією. Також розглянуто InP-діоди з активною InP-границею.

У **четвертому розділі** приводяться результати досліджень діодів з варізонною активною областю та запропоновано використання елементів з варізонним шаром у якості бічної границі. Проводиться аналіз частотних властивостей вертикальних варізонних структур з варізонним шаром на основі GaInAs. Зокрема, показано, що зміна молярної частки Ga у сполуці GaInAs на аноді з 0 до 0,2 призводить до локалізації ударної іонізації у прианодній області пристрою, що позитивно впливає на генерацію. Продемонстровано використання розглянутого раніше елемента у якості бічної границі до планарного діода Ганна. Автором отримано статичні та частотні характеристики отриманого пристрою, продемонстровано розширення частотного діапазону та підвищення максимальної частоти генерації порівняно з планарним діодом Ганна на основі GaAs.

У **п'ятому розділі** запропоновано використання у якості бічної границі резонансно-тунельні структури на основі GaAs/AlGaAs/GaAs. Наводиться опис особливостей моделювання таких приладів з врахуванням тунельних ефектів в них та проводиться порівняння результатів застосування моделі до обчислення статичних характеристик резонансно-тунельних діодів. Аналізуються статичні, енергетичні та частотні характеристики діодів з активними з активними границями в залежності від електрофізичних параметрів діодів. Показана можливість отримання генерації на частотах вищих понад 400 ГГц.

### **3. Наукова новизна та достовірність отриманих результатів**

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно випливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору і рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє авторці переконливо це підтвердити.

В результаті проведених досліджень отримано ряд нових і принципово важливих результатів. Серед них необхідно визначити наступні:

1. У роботі вперше продемонстровано, що завдяки модифікації поверхні планарного діода шляхом розміщення на каналі активного елемента, який електрично з'єднаний з анодом, можна розширити частотний діапазон роботи пристрою та збільшується його ефективність генерації.
2. При виконанні дисертаційного дослідження вперше було встановлено, що завдяки модифікації поверхні планарного GaAs діода активним елементом з вбудованим гетеропереходом GaAs-GaInAs з малим вмістом In дозволяє підвищити ефективність генерації більш, ніж у 4 рази в порівнянні з планарним GaAs діодом.
3. Вперше показано збільшення частотних меж роботи діодів завдяки використанню варізонних напівпровідникових шарів з можливістю виникнення у них локальної ударної іонізації. Отримано характеристики планарних діодів, що містять активну бічну границю у вигляді варізонного

шару  $\text{Ga}_{1-z}\text{In}_z\text{As}$ , який розміщується на бічній поверхні діода та показаний вплив такого елементу на розширення частотного діапазону роботи діоду.

4. Відповідно до результатів дисертаційної роботи, було вперше підтверджено можливість отримання генерації електромагнітних коливань терагерцового діапазону діодами на основі GaAs з активними бічними границями у вигляді резонансно-тунельної структури на основі GaAs/AlGaAs/GaAs завдяки поєднанню ефекту міждолинного перенесення електронів та ефекту резонансного тунелювання на частотах до 500 ГГц.

Висновки та наукові положення у роботі дисертанта є достовірними, в достатній мірі обґрунтованими. Список публікацій, наведених у кінці дисертації, та перелік статей і тез здобувача в достатній мірі розкривають тему дисертаційної роботи; результати моделювання, з урахуванням у деяких випадках обмежень, мають під собою фізичне підґрунтя та не суперечать фізичним законам, відкритим раніше та загальноприйнятим положенням

#### **4. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях, відсутність порушень академічної доброчесності.**

Дисертаційна робота Зозулі В.О. є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому рівні.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи є логічною.

Основні наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових публікаціях, серед яких 4 у наукових статтях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus і одна стаття опубліковано у фаховому науковому виданні України, а також 5 у збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях. За результатами дисертаційного дослідження отримано 2 патенти на корисну модель.

Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях Зозулі В.О. не виявлено. Посилання на дослідження інших авторів є коректним.

#### **5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування**

В роботі отримано нові результати, що дозволяють змінити концепцію створення активних елементів, які використовують ефект міждолинного переносу електронів. Отримані результати можна використовувати для розробки майбутніх генераторів в міліметровому та субміліметровому діапазонах на основі планарних діодів Ганна. Запропоновані методи модифікування діодів з використанням активних бічних границь можуть стати основою для покращення характеристик існуючих діодів.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики,

наноелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

## **6. Недоліки і зауваження**

Поряд з високим рівнем проведених теоретичних досліджень та цінністю отриманих результатів, мушу зазначити деякі недоліки і зауваження щодо дисертаційної роботи, що розглядається:

1. Автор допускає деяку неточність у назві роботи, а саме вказує «терагерцовий» діапазон частот та «субміліметровий» діапазон довжин хвиль, що є не зовсім коректним з точки зору термінології. Оскільки, згідно загальноприйнятою в науковій літературі термінології терагерцовий діапазон стосується хвиль з частотою від 0,1 ТГц до 10 ТГц, а субміліметровий діапазон хвиль стосується довжин хвиль від 0,1 мм до 1 мм, що відповідає частотному діапазону від 0,3 ТГц до 3 ТГц. Тобто, з огляду на вказану класифікацію має повторення.

2. У Розділі 2 було б доцільно провести порівняння з іншими математичними моделями для моделювання напівпровідникових пристроїв з огляду на визначення ефективності і адекватності моделі, що використовується у дисертації.

3. Доцільно провести верифікацію моделі не тільки на прикладі розрахунку кінетичних характеристик матеріалів, що використовуються у роботі, а й на прикладі основних характеристик подібних до розглянутих у роботі пристроїв, які було отримано експериментально та описано у науковій літературі.

4. На с. 91, рис. 3.5 допущена помилка у підписі до рисунків (а) та (б), а саме вказано, що отримані залежності відповідають однаковій товщині бічної границі. Однак с подальшого тексту дисертації слідує, що для цих залежностей товщині різні – 0,16 та 0,32 мкм.

5. Дисертанту потрібно було звернути увагу на однотипність назв, що застосовуються до одних і тих же об'єктів. У роботі зустрічається два типи написання сполуки GaInAs та сполуки AlGaAs. Наприклад, зустрічаються  $Ga_xIn_{1-x}As$  та  $In_zGa_{1-z}As$  (на с. 128), у розділі 5 зустрічається  $Al_zGa_{1-z}As$  та  $Al_xGa_{1-x}As$  (с. 145, с. 146, с.149).

Зустрічаються граматичні та технічні помилки.

## **7. Загальні висновки**

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи і не стосуються принципових результатів і висновків дисертації.

В роботі отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну наукову задачу сучасної прикладної фізики, яка стосується розробки твердотілих джерел терагерцового й субтерагерцового діапазонів здатних до генерації за нормальних умов та пошуку можливих шляхів модернізації існуючих приладів твердотілої електроніки з метою просування їх робочої частоти у терагерцовий діапазон.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Зозулі В.О. повністю відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Беручи до уваги усе вищесказане, вважаю, що розглянута дисертаційна робота Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21 березня 2022 р., характеризується єдністю змісту та послідовністю викладення, містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати, отримані в процесі досліджень та не має порушень академічної доброчесності, а її автор, Зозуля Валерій Олександрович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний рецензент,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор, завідувач кафедри квантової радіофізики  
факультету радіофізики,  
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна

Вячеслав МАСЛОВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 15:42:41 30.01.2024

Назва файлу з підписом: 2024 Відгук Маслова Зозуля.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 17.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: 2024 Відгук Маслова Зозуля.pdf

Розмір файлу без підпису: 204.6 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: МАСЛОВ ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

П.І.Б.: МАСЛОВ ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2044700616

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 15:42:41 30.01.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000E02A43015E51C204

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (CAAdES detached)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Сергію ШУЛЬЗІ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

### **Рецензія**

офіційного рецензента, доцента кафедри квантової радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Дегтярьова Андрія Вікторовича на дисертаційну роботу Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

#### **1. Обґрунтування вибору теми дослідження**

Темою дисертаційної роботи є пошук можливостей модифікації існуючих конструкцій традиційних приладів твердотілої електроніки, зокрема діодів Ганна, з точки зору підвищення граничних частот їх роботи для отримання генерації коливань струму у субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах.

Актуальність таких досліджень зумовлена попитом на малогабаритні пристрої, що працюють за нормальних умов зовнішнього середовища. Перспективними областями їх застосування є мобільні системи, що використовують частоти вказаних діапазонів, зокрема засоби зв'язку ближнього радіусу дії та системи мобільного зв'язку майбутнього покоління. З огляду на можливі застосування стає зрозуміло, що вимогою до джерел стає компактність, можливість інтегрування з іншими приладами сучасної



електроніки та прийнятна вихідна потужність. Традиційні напівпровідникові прилади, такі як лавино-прольотні діоди та діоди Ганна, у більшості задовольняють цим вимогам на частотах менших 100 ГГц, проте їх використання в субтерагерцовій області та в терагерцовому діапазоні ускладнене через інерційність процесів, що відбуваються в таких пристроях.

У своїй роботі дисертантом пропонується ряд цікавих рішень щодо створення планарних діодів з використання активних бічних границь до каналу діода, що, як показано в роботі, дає можливість підвищити їх граничні частоти та коефіцієнт корисної дії.

## **2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення**

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг загального тексту роботи складає 196 сторінок, з них основного тексту 141 сторінка.

У **вступі** до дисертації обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету і основні завдання дисертації, об'єкт і предмет дослідження, наведено основні результати роботи на їх наукова новизна. Також наведено основні публікації за дисертаційною роботою та зазначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз номенклатури приладів твердотілої електроніки, які на сьогодні використовуються для генерації коливань на високих частотах, проаналізовано їх основні недоліки та переваги та зроблена їх оцінка з точки зору їх здатності до генерації коливань у терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах.

У **другому розділі** зроблено аналіз існуючих підходів до моделювання приладів на високих частотах, обґрунтовано вибір математичної моделі, що використовується в роботі. Наведено детальний опис методу Монте-Карло, який використовується в роботі для моделювання транспорту носіїв заряду, вирази і співвідношення, що визначають процеси розсіяння носіїв заряду та

їх рух в сильних електричних полях. Проводиться порівняння результатів застосування використаних методів з результатами, відомими з наукової літератури.

У **третьому розділі** дисертації автором на прикладі використання найпростіших однорідних за складом бічних активних границь та традиційних напівпровідникових матеріалів (GaAs та InP) показана перевага діодів з активними границями над звичайними планарними діодами з однаковими геометричними параметрами. Показано, що формування активної границі до каналу діода призводить до істотного підвищення ефективності генерації та розширення частотного діапазону.

У **четвертому розділі** розглянуто структури, що містять області із залежністю складу матеріалу від координати (варізонні напівпровідники) та показана можливість їх використання в режимах виникнення ударної іонізації. Отримано характеристики як вертикальних діодів на основі GaInAs, що не містять бічної границі, так і планарних діодів, де в якості бічних границь використовуються варізонні шари GaInAs. Показано, що використовуючи варізонні шари у вертикальних GaInAs діодах можна досягти частот генерації вищих за 300 ГГц. Аналогічне зростання граничної частоти та ефективності показано і для планарних структур з активними варізонними границями, які демонструють більш високі граничні частоти та більшу ефективність генерації ніж звичайні планарні діоди Ганна.

У **п'ятому розділі** у якості бокової границі пропонується використати резонансно-тунельну структуру і в такий спосіб поєднати ефект міждолинного перенесення електронів та ефект резонансного тунелювання. Наведено опис змін, які вносяться до математичної моделі для врахування процесів, пов'язаних з тунелюванням електронів, та показано спроможність застосування отриманої моделі для розрахунку відомих напівпровідникових структур, що працюють на ефекті резонансного тунелювання.

Отримано характеристики GaAs планарних структур з резонансно-тунельною границею на основі GaAs/AlGaAs/GaAs. Показано, що верхня

частота генерації в таких структурах може досягати 500 ГГц, а ефективність генерації є досить високою. Досліджується вплив електрофізичних параметрів діода на його частотні та енергетичні властивості.

**Висновки** та результати дисертаційного дослідження повністю відповідають поставленим завданням та зазначеній меті. Вказана наукова новизна є коректною та відповідає змісту дисертаційної роботи.

### **3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Дисертаційна робота відповідає напрямку кафедри фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт за темою «Активні елементи на основі варізонних та моношаруватих напівпровідників для генерації та випромінювання на частотах терагерцового діапазону» (2020-2022рр., 0120U102290) у якій автор приймав участь як виконавець.

### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено коректним використанням перевірених підходів і методів обчислювальної і математичної фізики, методів чисельного аналізу та відповідністю теоретичним засадам напівпровідникової електроніки.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів забезпечується:

- використанням відомих та апробованих підходів до числового розв'язання диференціальних рівнянь;
- систематичною повторюваністю розрахункових даних, отриманих автором, та їх узгодженням з доступними експериментальними даними, наприклад, порівняння кінетичних характеристик ряду матеріалів у Розділі 2 та порівняння вольт-амперних характеристик у Розділі 5;

- апробацією отриманих результатів на 6 міжнародних конференціях. Основні наукові результати та висновки дисертації пройшли апробацію під час міжнародних наукових конференцій та знайшли відображення у фахових та міжнародних наукових виданнях. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 4 статті у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science та 1 стаття у фаховому виданні.

## **5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна**

У роботі отримано низку нових результатів, серед яких, на мою думку, варто відзначити такі:

- вперше показано, що введення додаткових елементів, що розміщені на каналі планарного діода та електрично з'єднані з анодним контактом, призводить до розширення діапазону частот діода, зокрема збільшується верхня частотна межа його роботи, що спостерігається в тому числі за умови співпадіння параметрів матеріалів в основній частині діодної структури і бічному активному елементі;

- показано, що використання гетероструктури GaAs-Ga<sub>1-z</sub>In<sub>z</sub>As в діоді з GaAs-каналом дозволяє підвищити ефективність генерації більш ніж в 4 рази в порівнянні з використанням гомогенного матеріалу;

- вперше показано можливість отримання генерації електромагнітних коливань терагерцового діапазону діодами на основі GaAs з активними бічними границями у вигляді резонансно-тунельної структури на частотах вище 500 ГГц.

## **6. Практичне значення одержаних результатів**

Отримані дисертантом результати у вигляді конструкцій приладів та визначених оптимізованих параметрів можна використати як практичні рекомендації для розробки напівпровідникових активних елементів, які можуть використовуватися в генераторах терагерцового та субтерагерцового діапазонів. Запропоновані ідеї є основою для пошуку можливостей зміни

параметрів приладів традиційної твердотілої електроніки для використання їх на гранично можливих для них частотах.

## **7. Дотримання академічної доброчесності**

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.**

- У роботі зустрічається два різновиди написання сполуки, а саме InGaAs (с. 5, с 11) та GaInAs (с. 35, с. 38). Ті ж зауваження щодо написання сполук  $Ga_xIn_{1-x}As$  та  $In_zGa_{1-z}As$  (с. 123, с. 124 та с. 128).

- На рис. 1.2 доцільно використати більш ніж одне джерело для демонстрації залежності максимальної температури від частоти для квантово-каскадних лазерів.

- При верифікації математичної моделі у Розділі 2, а саме розрахунку кінетичних характеристик ряду сполук, таких як GaAs, GaInAs, InP, використовуються дещо застарілі дані, особливо це стосується залежності GaAs за посиланням [170]. Рік публікації [170] – 1980.

- С. 89, рис. 3.5. До допису цього рисунку допущено неточність, а саме вказано що рис.3.5 а та рис.3.5 б мають одну й ту ж товщину активного бічного елемента, хоча із подальшого тексту слідує, що це не так і ці елементи мають різну товщину – 0,16 та 0,32 мкм відповідно.

- С. 118, на рис.4.8.можливо більш доцільно було використати логарифмічний масштаб для концентрацій носіїв заряду.

- С. 153, на рис 5.8 в та на рис. 5.9 б відображена різна товщина потенційних бар'єрів у зоні провідності, хоча мова йде про одну й ту ж структуру при однаковій напрузі зміщення 0,2 В.

- Зустрічаються граматичні та технічні помилки.

## **9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи**

Вважаю, що дисертаційна робота Зозулі В. О. «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів» є актуальною, містить нові результати, має важливе прикладне й теоретичне значення та є завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Зозуля Валерій Олександрович є кваліфікованим спеціалістом, який заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний рецензент,  
кандидат фізико-математичних наук,  
доцент, доцент кафедри квантової радіофізики  
факультету радіофізики,  
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна

Андрій ДЕГТЯРЬОВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:03:42 31.01.2024

Назва файлу з підписом: Рецензія\_Дегтярьов.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 17.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Рецензія\_Дегтярьов.pdf

Розмір файлу без підпису: 154.9 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ДЕГТЯРЬОВ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ

П.І.Б.: ДЕГТЯРЬОВ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2588600799

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:03:41 31.01.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000723F3301857CCA04

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (CAAdES detached)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Сергію ШУЛЬЗІ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## **ВІДГУК**

офіційного опонента Кузьмичова Ігоря Костянтиновича, доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, завідувача відділу вакуумної електроніки Інституту радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова Національної академії наук України, на дисертаційну роботу Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

### **Актуальність теми дисертації**

Інтерес до терагерцового діапазону обумовлений можливістю створення у ньому низки систем цивільного і військового призначення, що мають ряд переваги над існуючими. Хвилі цього діапазону проникають через папір, пластмасу, одяг і тому можуть бути успішно застосовані для огляду в місцях масового скупчення людей методами активної або пасивної локації. Терагерцові хвилі становлять інтерес для астрофізичних досліджень фонового космічного випромінювання, аналізу спектрів окремих зірок та галактик. Електромагнітне випромінювання терагерцового діапазону здатне проникати в біологічну тканину на невеликі відстані і відбиватися назад, що дозволяє діагностувати деякі форми раку за допомогою безпечніших і менш агресивних та болючих процедур.

У деяких випадках завадою для успішної реалізації не лише перерахованих завдань є відсутність відповідних джерел терагерцового



випромінювання. На сьогодні для деяких частотних проміжків такі джерела існують у вигляді приладів вакуумної та квантової електроніки, однак вони є надто складними та громіздкими. Щодо компактних активних елементів, то використання традиційних приладів на зразок діодів Ганна та ЛПД в цьому діапазоні ускладнене інерційністю процесів переносу заряду в них на високих частотах. Отже, наразі існує потреба в мініатюрних приладах, здатних забезпечити ефективну генерацію на частотах до 1 ТГц. Тема кваліфікаційної роботи Зозулі В.О. направлена на вирішення саме цієї задачі і є безумовно актуальною.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеності та оформлення**

Дисертація складається з україномовної та англomовної анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 196 сторінок друкованого тексту: 141 сторінки основного тексту, 80 рисунків, 2 таблиці, списку використаних джерел із 196 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету і основні задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, перелік наукових публікацій здобувача, дані щодо апробації матеріалів дисертації та зв'язок роботи з науковими темами.

У **першому розділі** дисертації проаналізовано існуючі твердотілі прилади, які використовуються для отримання коливань в терагерцовому діапазоні та можливі напрямки проведення досліджень.

У **другому розділі** дисертації наведено деталізований опис математичної моделі, що використовувалася для аналізу процесів переносу заряду в приладах, що розглядалися. Обґрунтовано використання та особливості реалізації методу Монте-Карло для аналізу роботи планарних напівпровідникових структур на високих частотах з врахуванням особливостей розглянутих в дисертації задач. Проведено порівняння

розрахунків основних кінетичних характеристик базових матеріалів отриманих дисертантом з результатами, отриманими іншими авторами.

У **третьому розділі** розглянуто концепцію модифікування конструкції планарних діодів з міждолинним переносом електронів на основі GaAs та InP шляхом формування над каналом активної напівпровідникової границі, у вигляді однорідної структури, електрично з'єднаною з анодом діода. Розглянуто випадок діода, в якому активна границя відділена від каналу гетеропереходом. Визначено частотні та енергетичні характеристики розглянутих структур та показані їх переваги.

У **четвертому розділі** розглянуто планарні діоди на основі GaAs, в яких у якості бічної границі використовувалися варізонні структури на основі GaInAs. Визначено характеристики вертикальних діодів з варізонною активною областю та частотні та енергетичні характеристики планарних діодів з варізонною активною бічною границею. Проаналізовано вплив ударної іонізації, положення бічної границі та складу варізонного шару на характеристики діодів.

У **п'ятому розділі** розглянуто планарні діоди на основі GaAs, що мали активну бічну границю у вигляді резонансно-тунельної структури GaAs/AlGaAs/GaAs. Описано методику розрахунку та особливості моделювання для цього випадку. Проведено порівняння характеристик резонансно-тунельних діодів, розрахованих за використаною методикою, з характеристиками діодів, що отримані в інших роботах. Розраховано статичні характеристики планарних діодів з резонансно-тунельною границею в залежності від їх електрофізичних параметрів та визначено частотні та енергетичні характеристики діодів з різним положенням активної границі та рівнем легування.

У **висновках** сформульовані основні результати роботи та їх наукова новизна.

**Список використаних джерел** містить відповідні посилання на літературні та власні публікації за темою дисертації.

В цілому, дисертація є завершеною роботою, її оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 №44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації»

**Наукова новизна полягає у наступних основних результатах:**

1. Вперше показано, що в планарних діодах, що працюють на ефекті міждолинного переносу, формування активних границь до каналу діоду з використанням додаткових напівпровідникових елементів, електрично з'єднаних з анодним контактом, дозволяє впливати на частотні та енергетичні характеристики діода.

2. Було досліджено широкосмугову генерацію діодними структурами з каналами на основі GaAs з активними границями на основі однорідних матеріалів InGaAs та показано, що в таких структурах спостерігається розширення частотного діапазону до 300 ГГц та в рази більша ефективність генерації коливань ніж у звичайному планарному діоді.

3. Вперше продемонстровано можливість отримання широкосмугової генерації структурами з активними бічними границями на основі InP на частотах до 350 ГГц, при їх роботі на основній частоті з максимальною ефективністю генерації до 2,5%.

4. Вперше розглянуто планарні діоди з активними бічними границями у вигляді резонансно-тунельної структури та показана можливість отримання на них широкосмугової генерації на частотах до 500 ГГц. Показано, що в такій структурі можна впливати на її вихідні характеристики, зокрема на частоту, що відповідає максимуму генерації шляхом вибору величини напруги живлення.

## **Обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації**

Головні положення кваліфікаційної праці дисертанта є надійно встановленими, добре обґрунтованими. Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних у дисертації забезпечується використанням апробованих методів розрахунку, які застосовуються для аналізу процесів переносу заряду, що відбуваються в напівпровідникових приладах при їх роботі на високих частотах; порівнянням результатів, отриманих за допомогою використаних методів з результатами, отриманими в інших дослідженнях; апробацією отриманих результатів, які достатньо широко представлені в наукових журналах, доповідалися на міжнародних наукових конференціях.

### **Практична значення результатів дисертаційного дослідження**

У кваліфікаційній роботі сформовано підхід, використовуючи який можна покращити характеристики діодів, що дає змогу розширити можливі межі їх застосування, як з точки зору отримання більш високих частот, так з точки зору генерації більших величин вихідної потужності.

Результати, наведені в роботі, є фактично практичними рекомендаціями щодо створення компактних приладів, здатних забезпечити генерацію коливань в терагерцовому діапазоні (до 500 ГГц) та можуть знайти застосування у розробці нових зразків напівпровідникових твердотілих генераторів терагерцового діапазону.

**Відомості про дотримання академічної доброчесності.** У дисертаційній роботі та публікаціях Зозулі В.О. неправомірних запозичень та ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

### **Зауваження до структури, змісту роботи та оформлення**

1. У назві дисертаційної роботи присутні дві пов'язані між собою неточності: 1) дисертант вказує терагерцовий і субміліметровий діапазони, хоча згідно прийнятої у науковій спільноті класифікації мова йде про один і той же діапазон – терагерцовий; 2) недоцільно поєднувати одночасно назву,

яка стосується довжини хвилі (субміліметровий) та частоти (терагерцовий). Правильніше було б у назві дисертації замість слова «субміліметровий» вставити слово «субтерагерцовий». Тим більше, майже в усьому тексті розглядаються частоти генерації, що лежать в цьому діапазоні (100÷300) ГГц.

2. На стор. 83 у підписі до рис. 2.9 немає опису кривих, які позначені не зафарбованими кружками та трикутниками.

3. На стор. 91 у підпису до рис. 3.5 вказано, що рис. а) та б) відповідають одній і тій самій товщині бічного активного елемента, хоча з тексту дисертації (стор. 90) слідує, що мова йде про дві різні товщини 0,16 мкм та 0,32 мкм.

4. На стор. 128, рис 4.16 а) та в) продемонстровані великі значення  $E_x$  складової електричного поля поблизу анодного контакту планарної частини діода. У тексті дисертації доцільно було б навести пояснення щодо цього.

5. У розділі 4 доцільно було б пояснити фізичні процеси, що призводять до незначного підвищення частоти генерації на частотах вище 200 ГГц, що продемонстровано на рис. 4.20 (стор. 131) та рис. 4.21 (стор. 133).

6. В роботі, особливо у розділі 4 (як приклад, на стор. 123, стор. 125 та стор. 129, стор. 130), зустрічається два різних написання сполук ( $Ga_zIn_{1-z}As$  та  $Ga_xIn_{1-x}As$ ). Теж саме стосується використання двох назв сполуки  $Al_xGa_{1-x}As$  та  $Al_zGa_{1-z}As$  (прикладі на стор. 147, стор. 151) у розділі 5.

7. Зустрічаються граматичні помилки. Наприклад, на стор. 25 «...бічними границя на основі ...», а повинно бути «...бічними границями на основі ...»; на стор. 74 «... пов'язана із залежності складу...», а повинно бути «...пов'язана із залежністю складу...».

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертаційної роботи та обґрунтованість наведених здобувачом висновків.

#### **Загальний висновок**

Вважаю, що дисертація Зозулі Валерія Олександровича на тему «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та

терагерцового діапазонів» – це повністю сформована наукова праця, яка відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., її автор, Зозуля Валерій Олександрович – спеціаліст, який здатний компетентно та всебічно проводити наукові дослідження та комплексно аналізувати поставлену задачу, а тому заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент,  
завідувач відділу вакуумної електроніки  
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

Ігор КУЗЬМИЧОВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 20:02:57 02.02.2024

Назва файлу з підписом: Відгук офіційного опонента І.К. Кузьмичова.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 18.1 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук офіційного опонента І.К. Кузьмичова.pdf

Розмір файлу без підпису: 228.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: КУЗЬМИЧОВ ІГОР КОСТЯНТИНОВИЧ

П.І.Б.: КУЗЬМИЧОВ ІГОР КОСТЯНТИНОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2012301053

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 20:04:02 02.02.2024

Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»

Серійний номер: 248197DDFAB977E504000000233B0F01B98A4104

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (CAAdES detached)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
Університету імені В.Н. Каразіна  
професору Сергію ШУЛЬЗІ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## В І Д Г У К

офіційного опонента Стороженка Ігоря Петровича, професора кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету, доктора фізико-математичних наук, професора кафедри фізики, старшого наукового співробітника зі спеціальності «радіофізика» на дисертаційну роботу Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки»

### **Обґрунтування наукової теми дослідження.**

Наукова тема дослідження здобувача ступеня доктора філософії Зозулі Валерія Олександровича (далі – здобувач) є достатньо обґрунтованою. Її обґрунтуванню присвячено розділ 1 та вступ дисертаційної роботи. В кожній науковій праці, в якій опубліковані основні наукові результати дисертації, наводиться актуальність проведених досліджень.

Наукова тема дисертації торкається до основної проблеми, яка ускладнює широке застосування систем терагерцового діапазону – відсутність ефективних активних твердотільних джерел. Переглядаючи існуючі прилади терагерцового діапазону можна легко помітити суттєву різницю між детекторами і джерелами за доступністю, різноманітністю та ціною. Джерел терагерцового діапазону мало, вони або занадто дорогі для широкого використання, або великі за розміром. Проблема є науковою, так як нам досі не відомі такі фізичні явища, за допомоги яких можна було б ефективно отримувати коливання електричного струму терагерцового діапазону. Саме тому увага багатьох дослідників твердотільної електроніки зосереджена як на технології створення дешевих транзисторів з частотною границею понад 300 ГГц, так і на пошуку фізичних ефектів для генерації електромагнітних коливань в цьому діапазоні.

Аналізуючи активні напівпровідникові прилади, які здатні працювати у субміліметровому діапазоні, здобувач провів порівняння сильних і слабких сторін



по вихідній потужності й частотній границі генерації низку традиційних напівпровідникових приладів. Це діоди Ганна, лавинно-пролітні діоди, тунельно-пролітні діоди, резонансно-тунельні діоди, самоперемикаючі діоди і каскади помножувачів частоти. Ним робиться обґрунтований висновок про можливість збільшити частотну границю приладів, які працюють на ефекті міждолинного переносу електронів, за рахунок зменшення густини електричного струму при використанні планарної технології виготовлення приладів. З іншого боку ним пропонується застосовувати різні контактні явища для створення кращих умов для генерації коливань електричного струму. Цей аналіз підкріплено низкою посилань на відомі сучасні наукові праці, достовірність яких не визиває сумнівів.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел, який містить 196 найменування і трьох доданків. Робота містить 80 рисунків. Загальний обсяг роботи складає 196 сторінок, з них основного тексту – 134 сторінок, що відповідає вимогам до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії

У *вступі* наведено коротке обґрунтування вибору теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методологію дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дисертації, зазначено особистий внесок здобувача при виконанні дисертаційного дослідження, наведено перелік наукових публікацій здобувача за темою дисертації та дані щодо апробації матеріалів дисертації, встановлено зв'язок з науково-дослідною роботою, що фінансувалась за рахунок держбюджету України.

У *першому розділі* розгорнуто обґрунтовується наукова тема дослідження. Наводиться огляд та порівняння досягнень різних напівпровідникових приладів. Робиться висновок, що ефект міждолинного переносу електронів може бути взятий за основу для створення планарних приладів, які зможуть генерувати коливання електричного струму у субміліметровому діапазоні. На думку здобувача застосування планарної технології має ряд переваг для покращення характеристик приладів. До таких переваг здобувач відносить використання селективного легування, створення умов для ефективного охолодження, розміщення на активній області приладу додаткових електродів або елементів, які дозволяють модифікувати його роботу і впливати на частотні характеристики.

У *другому розділі* детально описано математичну модель для дослідження запропонованої в першому розділі напівпровідникової планарної структури приладу для генерації електромагнітних коливань субміліметрового діапазону. Другий розділ умовно можна поділити на три частини.

В першій, обґрунтовано застосування кінетичного рівняння Больцмана і його розв'язання методом Монте-Карло. Описується сам метод розв'язання, інтеграли розсіювання, метод числового розв'язування рівняння Пуассона та інше.

В другій частині вирішується питання про параметри потрійних напівпровідників в залежності від їх складу. Помилка у визначенні параметрів напівпровідників часто визначає загальну помилку всього процесу моделювання. Як змінюється більшість параметрів напівпровідника від його складу залишається досі нетривіальним питанням. Здобувач наводить відповідні методи пошуку таких параметрів.

Третя частина розділу присвячена верифікації математичної моделі в цілому. Модель перевіряється по статичних характеристикам дрейфової швидкості електронів від електричного поля.

Кожен крок послідовного опису математичної моделі підкріплено посиланнями на джерела, що були опубліковані у відомих поважних виданнях.

У *третьому розділі* дається опис приладів на основі GaAs,  $\text{In}_{0,47}\text{Ga}_{0,53}\text{As}$  та InP, уточнюється завдання і аналізуються результатів числових експериментів з генерації коливань електричного струму в планарних приладах, у тому числі з активною бічною границею. Здобувач показує, що кожне з дослідженої сполуки GaAs,  $\text{In}_{0,47}\text{Ga}_{0,53}\text{As}$  та InP має свої особливості й потребує оптимізації напівпровідникової структури. Послідовно доведено, що активна бічна границя дає можливість збільшити потужність та розширити частотний діапазон роботи приладів однієї конкретної геометрії. Розширення частотного діапазону роботи відбувається як у бік низьких частот, так і високих. Результати висвітлені в працях здобувача, посилання на які додано в кінці розділу.

Отримані здобувачем результати визивають зацікавленість і є цілком правдоподібними.

У *четвертому розділі* досліджено GaAs прилад з шаром варізонного GaAs-InGaAs в активній області й на анодному контакті. Увага приділяється аналізу механізму дисипації енергії хвилі об'ємного заряду в анодному контакті за рахунок ударної іонізації зона-зона. Здобувачем доведено, що завдяки застосуванню варізонної сполуки GaAs-InGaAs верхня границя частотного діапазону роботи приладу конкретної геометрії може бути підвищена приблизно на 20%. Визначені механізми такого підвищення – збільшення швидкості дисипації хвиль об'ємного заряду в анодному контакті із-за незначної ударної іонізації та збільшення швидкості дрейфу електронів в активній області за рахунок збільшення бінарної компоненти InAs. Результати висвітлені в працях здобувача, посилання на які додано в кінці розділу.

Отримані здобувачем результати цікаві, мають наукове значення і є цілком правдоподібними.

У *п'ятому розділі* досліджено GaAs прилад з двохбар'єрною квантовою структурою в бічному контакті в середині активної зони. На початку розділу додано теоретичну частину про математичне моделювання двохбар'єрної квантової структури, узгодженість квантомеханічного розв'язку з розв'язанням напівкласичного кінетичного рівняння Больцмана. Описано параметри двохбар'єрної квантової структури, яка досліджена. Далі здобувач аналізує отримані результати. Планарний прилад на основі GaAs з резонансно-тунельною структурою на бічній границі в активній області з геометричними розмірами такими ж, як у приладах, що розглядалися в попередніх розділах, має ще більшу ширину частотного діапазону. Зростання ширини частотного діапазону відбувається за рахунок збільшення майже у 2 рази верхньої границі частотного діапазону. Результати висвітлені в працях здобувача, посилання на які додано в кінці розділу.

Отримані здобувачем результати цікаві, мають наукове значення і є цілком правдоподібними.

**Висновки** за результатами виконання дисертаційної роботи є зрозумілими, такими, що підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень, а також не суперечать основному тексту дисертації розділів 2 – 5.

**Список використаних джерел** свідчить про те, що під час роботи було добре враховані результати сучасних наукових досліджень. Він буде корисний тим, хто захоче познайомитися зі станом досліджень розробки приладів для генерації коливань струму субміліметрового діапазону.

Таким, чином дисертація є завершеною науковою роботою. Її оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

### **Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна**

Дослідження, підсумовані у дисертації, ґрунтуються на наукових традиціях Харківської школи радіофізики, зокрема професора Прохорова Едуарда Дмитровича. Водночас робота розвиває їх далі – у дисертації отримано низку нових наукових результатів. Новизна результатів і висновків дисертації полягає в ідеї застосування додаткового контакту, паралельного до активної області приладу, який працює на ефекті міждолинного переносу електронів. Такий контакт тільки за рахунок своєї геометрії повинен покращувати вихідні характеристики приладу. Це було доведено здобувачем. На мою думку, варто відзначити числові експерименти здобувача, які показують можливість отримання генерації коливань електричного струму на частотах близьких до 500 ГГц на основній гармоніці за рахунок поєднання

геометрії приладу з міждолинним переносом електронів та ударною іонізацією зона-зона з одного боку й резонансного тунелювання електронів з іншого. Інший важливий здобуток здобувача – вдосконалення математичної моделі напівпровідникових приладів складної геометрією та складом.

### **Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Головні положення дисертації є обґрунтованими та достовірними. Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних здобувачем при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних і загальновідомих підходів та методів теоретичної, математичної та обчислювальної фізики, адекватних математичних моделей напівпровідникових приладів, фізичної інтерпретацією спостережуваних ефектів та їх несуперечністю з сучасними теоріями й відомим експериментальним даним.

### **Апробація дисертації та публікації**

Результати дисертації представлені в 10 наукових публікаціях у виданнях з переліку наукових фахових видань України й виданнях, що проіндексовані у базі даних Scopus. З них 5 публікацій, опубліковані у наукових періодичних виданнях, у тому числі 3 публікації протягом трьох останніх років до дня утворення разової ради за тематикою дослідження здобувача. Ще 5 публікацій опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій, які теж проіндексовані у базах даних Scopus. Додатково результати дисертації представлено у 2 патентах на корисну модель «Українського інституту інтелектуальної власності».

Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek); 2021 IEEE 3Rd Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON); 020 IEEE Microwave Theory And Techniques In Wireless Communications (MTTW); 2019 IEEE 2Nd Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON); 2018 9Th International Conference On Ultrawideband And Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS); 2017 IEEE International Young Scientists Forum On Applied Physics And Engineering.

Особистий внесок автора в отриманих результатах зазначених в публікаціях належним чином описано в дисертації.

### **Практичне значення результатів дисертації**

У роботі отримано наукові результати, які маю значну практичну цінність. Здобувач запропонував конструкційні особливості приладів з міждолинним переносом електронів і довів їх ефективність у субміліметровому діапазоні. Отримані здобувачем результати не тільки розширюють знання про фізичні процеси

переносу носіїв у складних напівпровідникових структурах, але можуть бути використані для технологічного проектування нових високошвидкісних приладів субміліметрового діапазону.

### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

Я не маю серйозних зауважень щодо дисертаційної роботи. Однак в ній є граматичні, стилістичні й смислові помилки та моменти які невисвітлені в достатньому обсягу.

1. Слово «призводить» здобувач іноді використовує в реченнях з позитивним змістом. Наприклад, сторінка 6 «...призводить до розширення діапазону частот діода в бік високих частот...», сторінка 41 «...призводить до ефективнішого використання площі...», сторінка 101 «...призводить до збільшення ефективності...».

2. Застосування терміну «терагерцового діапазону» в назві є дискусійним. Генерації на частоті 1 ТГц і більше в дисертації не отримано.

3. У практичних значеннях отриманих результатів на сторінці 28 зазначено: «...можна створити ефективні генератори електромагнітних коливань у терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах...». Тут присутнє протиріччя з науковою новизною отриманих результатів п. 1 – 5 на сторінці 25, в яких говориться про генерацію на частотах 300...500 ГГц. Генерація на частотах 300...500 ГГц ще не є генерацією у терагерцовому діапазоні.

4. В об'єкті дослідження на сторінці 24 присутня змістовна невизначеність: «процес генерації електромагнітних коливань з використанням напівпровідникових структур з активними бічними границями». Не зрозуміло за рахунок чого відбувається генерація, до чого саме застосовується напівпровідникові структури і, яка у структур бічна границя?

5. У предметах досліджень на сторінці 24, на мій погляд, слід було б додати залежність густини електричного струму приладів від часу та напруги, яка безумовно досліджується, але не зазначена.

6. В огляді дуже мало приділено уваги досягненням швидкодіючих транзисторів. Зовсім не згадано, про джерела на основі плазмон-поляритонів, спінтроніки, від'ємної ефективної масі носіїв заряду, балістичному транспорту в коротких приладах. Було б природно й корисно зупинитися на інших принципах отримання надвисокочастотного випромінювання.

7. На сторінці 35 зазначено, що «Діоди Ганна є традиційними і найпоширенішими джерелами субтерагерцових коливань.» На мій погляд, ця фраза є некоректною по суті й протирічить проведеному здобувачем огляду приладів. Діод Ганна є одним з приладів, який здатний генерувати коливання електричного струму в субміліметровому діапазоні.

8. На сторінках 80 – 82, рис. 2.8. – 2.10. показані результати верифікації математичної моделі. Модель перевіряється на необмежених однорідних напівпровідниках в стаціонарному режимі. Це загально відома практика. Але, досліджувати здобувач планує швидкодіючі процеси. Те що модель адекватно відтворює відомі залежності дрейфової швидкості електронів від електричного поля не означає, що вона також гарно узгоджується з динамічними характеристиками. На рис. 2.8. – 2.10. приведено багато кривих. Серед цих них одна крива отримана здобувачем при моделюванні. Інші криві взяті з різних статей. Але незрозуміло, чим ці криві відрізняються одна від одної. Що змінюється у параметрах? Треба було б додати більше інформації про криві, на які посилається здобувач як на еталон.

9. На сторінках 56, 57 і 72 обумовлюються критерії застосування математичної моделі по розбиттю за часом та координатами. Все правильно, але конкретні числа сітки часу та координат не приведено. Також не приведена будь-яка оптимізація по такому розбиттю. Залишається тільки сподіватися, що оптимізація по кроку інтегрування та перевірка збігу моделі проводилася.

10. Не вказано який само електричний струм вважався струмом через прилад при обчислюванні потужності коливань. Усереднений струм в приладі або струм на анодному контакті?

11. Застосовується грубий підхід у моделювання роботи резонатора у вигляді гармонічної напруги, яка подається на прилад. Єднання досить точної моделі приладу з дуже неточною моделюю резонатора виглядає дивним. Використання найпростішої моделі резонатора для визначення частотних характеристик і ККД діода не є оптимальним для серйозних прогнозів просування у високочастотну область. Область коливань вище 100 ГГц сусідить з квазіоптикою, де резонансне оточення генератора мікронних розмірів може бути реалізовано на принципах, відмінних від тих, які експлуатуються в міліметровій та сантиметрової області. Ряд пропозицій і відповідних технологій утворення резонаторів в цьому високочастотному діапазоні реалізовані й опубліковані в науковій літературі. Ці роботи, на жаль, не привернули уваги здобувача

12. Невказані деякі початкові та граничні данні для моделювання. Наприклад, невказана температура кристалевої решітки, при якій зроблені числові експерименти. Не обґрунтовано вибір концентрації донорів в активній області приладу, геометричні розміри приладу.

13. Аналіз фізики процесу генерації проведено недостатньо повно. Не до кінця з'ясовані причини утворення вихідних характеристик. З результатів, отриманих здобувачем, нам відомо, що така конструкція приладу приводить до розширення частотного діапазону або підвищення вихідної потужності. Однак, які само внутрішні процеси відповідальні за це залишається невизначеним.

14. Відсутнє порівняння отриманих результатів з експериментальними даними по генерації навіть в тих випадках, коли таке порівняння можна було б

зробити. Наприклад, експериментальна генерація за допомоги планарних GaAs- та InP-приладів [140 – 145], які взагалі підтверджують отримані здобувачем результати, згадуються ним тільки в огляді, розділу 2.

15. Недостатньо порівнюються результати розділів 3 – 5 між собою. Складається враження, що приладі, які розглянути в різних розділах, не як не пов'язані загальною темою. На мій погляд, проводити порівняння між приладами на основі GaAs і GaAs з InGaAs варізонним шаром у низькочастотній частині їх частотного діапазону роботи не коректно, так як вихідна характеристика GaAs-приладу штучно обмежена напругою (сторінка 87 « $U_0 + U_1 < 2,5 \text{ В}$ »).

16. На сторінці 162 є смислова помилка, яка вводить читача в оману «...отримання генерації на частотах вищих 500 ГГц з максимальною ефективністю до 10%...». Генерація з ефективністю 10 % отримана на частоті 110 ГГц (сторінка 160, п. 3). Однак, верхня границя частотного діапазону, дійсно приблизно 500 ГГц.

Зазначені зауваження можуть бути враховані в подальших дослідженнях здобувача і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

#### **Загальні висновки щодо дисертаційної роботи**

Дисертація Валерія Олександровича Зозулі «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів» є завершеним науковим дослідженням, має доведену наукову новизну та практичну значимість.

Тема та зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Вважаю, що Зозуля Валерій Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Професор кафедри фізики та математики  
Державного біотехнологічного університету  
доктор фізико-математичних наук,  
професор

Ігор СТОРОЖЕНКО

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 19:39:40 02.02.2024

Назва файлу з підписом: Відгук\_Зозуля\_Стороженко.pdf.xml

Розмір файлу з підписом: 16.3 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук\_Зозуля\_Стороженко.pdf

Розмір файлу без підпису: 304.4 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: СТОРОЖЕНКО ІГОР ПЕТРОВИЧ

П.І.Б.: СТОРОЖЕНКО ІГОР ПЕТРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2542700811

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 19:39:38 02.02.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000E56747011361CD04

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (XAdES detached)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00