

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Зозулі Валерія Олександровича

«Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконанні індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірант Зозуля Валерій Олександрович виконав у повному обсязі Індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному обсязі. Він успішно склав наступні дисципліни:

- Залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень» (92 бали);
- Іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів» (82 бали);
- Залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» (92 бали);
- Залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці» (95 балів);
- Іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (94 бали);
- Іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної радіофізики та електроніки» (91 бал).

Всі заплановані види робіт були виконанні своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Терагерцовий та субтерагерцовий діапазони відповідають частотам від приблизно 100 ГГц до 1 ТГц із відповідним інтервалом довжин хвиль від 0,03 до 3 мм. Цей частотний інтервал займає частину електромагнітного спектра між інфрачервоним і мікрохвильовим діапазонами. Терагерцове випромінювання поєднує переваги оптичного та мікрохвильового діапазонів, такі як: відсутність іонізуючого ефекту, здатність проникати крізь непрозорі об'єкти, малий коефіцієнт затухання у атмосфері та високу інформаційну здатність, можливість спрямованого випромінювання. Чисельні унікальні властивості терагерцового випромінювання можуть зайти досить багато застосувань для практичних розробках, що є причиною розвитку терагерцової технології. Очікується, що за рядом параметрів такі системи матимуть переваги над існуючими аналогічними системами мікрохвильового та оптичного діапазонів. Як приклад, терагерцове випромінювання може використовуватися для досліджень структури молекул та кристалів, для діагностичних цілей в області медицини та для неструктурної оцінки якості матеріалів. Одним з найперспективнішим напрямком застосування терагерцового випромінювання є високошвидкісний бездротовий зв'язок з високою пропускнуою здатністю та низьким рівнем інтерференції. Терагерцовий діапазон має великий потенціал для застосування у системах безпеки, зокрема для створення засобів ідентифікації небезпечних речовин та виявлення прихованих предметів, прозорих в рентгенівському діапазоні.

Практична реалізація пристроїв які здатні працювати в терагерцовому діапазоні повинна задовольняти наступним

критеріям: ефективність, відносна простота, невеликі габарити, здатність генерувати при нормальних умовах, достатня вихідна потужність, можливість налаштування та частотної перебудови.

Складність створення ефективних терагерцових джерел пов'язана з тим, що в терагерцовому діапазоні погано застосовуються добре розроблені методи генерації випромінювання сусідніх оптичного та мікрохвильового діапазонів. За даними досліджень основним засобом отримання терагерцового діапазону є збільшення робочої частоти у мікрохвильових пристроях, або зменшення робочої частоти у оптичних приладах, що є, зазвичай, досить складною задачею. Наприклад, оптичні генератори когерентного випромінювання, які засновані на вимушених переходах електронів між рівнями, не можуть бути ефективними генераторами ТГц через малу величину кванту терагерцового випромінювання в результаті чого теплова релаксація лазерних рівнів при кімнатній температурі приводить до вирівнювання населеності і швидкої релаксації інверсії.

Одним із можливих напрямків отримання терагерцового діапазону є використання приладів напівпровідникової електроніки, які широко застосовуються для генерації як у мікрохвильовому (діоди Ганна) так і в оптичному(лазерні діоди) діапазонах. Основною перевагою таких приладів є відносно малий розмір та здатність працювати за кімнатних температур.

На даний момент основною проблемою є обмеження роботи приладів напівпровідникової електроніки на частотах терагерцового діапазону, що проявляється у зниженні вихідної потужності, коефіцієнту корисної дії та обмеження верхньої частотної межі їх роботи.

З огляду на перспективність використання терагерцових систем в найближчому майбутньому актуальність досліджень, які відносять

до розробки напівпровідникових джерел терагерцового і субтерагерцового діапазонів на сьогодні є високою як в теоретичній так і в практичній площині.

У даній роботі розглядаються можливості удосконалення існуючих напівпровідникових структур та розробка концепцій нових надвисокочастотних приладів з використанням напівпровідникових гетероструктур, варізонних напівпровідникових матеріалів та поєднання ефектів міждолинного перенесення електронів з ударною іонізацією та ефектом резонансного тунелювання.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є пошук і вдосконалення напівпровідникових структур здатних генерувати електромагнітні коливання у терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах. Відповідно до цього в роботі розглянуто наступні задачі:

1. Вдосконалення фізико-математичної моделі для аналізу процесів переносу носіїв заряду та нестійкостей струму у напівпровідникових структурах із гетеропереходами, у структурах із залежністю складу від координати з урахуванням складної геометрії приладів та поєднанні процесів міждолинного перенесення електронів, тунелювання та ударної іонізації.
2. Дослідження енергетичних та частотних характеристик діодних планарних структур з гомогенними активними бічними границями на основі матеріалів GaAs, InGaAs та InP.
3. Дослідження можливості отримання генерації терагерцового діапазону з використанням варізонних діодних елементів з ударною іонізацією та планарних діодів з варізонними активними бічними границями.
4. Дослідження енергетичних та частотних характеристик діодних планарних структур з резонансно-тунельними активними бічними границями.

Об'єкт дослідження – процес генерації електромагнітних коливань з використання напівпровідникових структур з активними бічними границями.

Предмет дослідження – розподіли електричних і квазіелектричних полів, електричного потенціалу, концентрації носіїв заряду, а також енергетичні та частотні характеристики напівпровідникових структур із активними бічними границями.

Методи дослідження

Для дослідження та аналізу фізичних процесів у структурах з активними бічними границями використовуються математичне моделювання, що полягає в отриманні розв'язку кінетичного рівняння для носіїв заряду у квазікласичному наближенні з використанням багаточастинкового методу Монте-Карло. Реалізація такого підходу дозволяє провести комплексний аналіз нестационарних процесів у складних структурах, які є поєднанням різнорідних за властивостями областей, гетероструктур та варізонних шарів, в умовах міждолинного переносу електронів, ударної іонізації та тунелювання.

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

Дисертаційна робота виконана у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна відповідно до плану науково-дослідних робіт факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, зокрема в межах наступних науково-дослідних робіт:

1. «Активні твердотілі елементи для генерації, помноження частоти та випромінювання електромагнітних хвиль у терагерцовому діапазоні» номер держреєстрації 0219U003605, при виконанні якої здобувач приймав участь як співавтор наукових публікацій.

2. «Активні елементи на основі варізонних та моношаруватих напівпровідників для генерації та випромінювання на частотах терагерцового

діапазону» номер держреєстрації 0120U102290, при виконанні якої здобувач приймав участь як виконавець.

4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.

Всі наукові публікації виконано у співавторстві. Здобувач брав участь у постановці та розв'язанні задач, програмної реалізації чисельних алгоритмів, та в обробці і аналізі результатів розрахунку та їх інтерпретації.

Вперше:

1. Показано, що введення додаткових елементів, що розмішені на каналі планарного діода та електрично з'єднаних з анодним контактом, призводить до розширення діапазону частот діода в бік високих частот, навіть за умови співпадіння параметрів матеріалів в основній частині діодної структури і бічному активному елементі.
2. Показана можливість отримання широкопasmової генерації структурами з активними бічними границями на основі GaAs від 100 до 300 ГГц з використанням традиційних матеріалів з максимальною ефективністю до 3% за умови обмеження напруги живлення величинами меншими 2,5 В.
3. Показано, що використання гетероструктури GaAs - $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ в діоді з GaAs - каналом дозволяє підвищити ефективність генерації більш ніж в 4 рази в порівнянні з використанням гомогенного матеріалу.
4. Продемонстровано можливість отримання широкопasmової генерації структурами з активними бічними границями на основі InP на частотах до 350 ГГц при роботі на основній частоті з максимальною ефективністю генерації до 2,5%.
5. 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. Максимальна ефективність коливань становила до 10% і була отримана на частоті близько 110 ГГц, що відповідає часу перенесення електрона через канал діода.

6. Вперше запропоновано планарну конструкцію діода, що містить активний елемент на основі варізонного напівпровідника, що розміщується на бічній поверхні діода та продемонстрован вплив такого елемента на розширення частотного діапазону роботи діоду. Встановлено, що частота, що відповідає максимальній ефективності в такому елементі відповідає звичайному діоду з міждолинним перенесенням електронів, проте значно розширена в область високих частот з максимальним значенням частоти більше 300 ГГц в режимі генерації на основній частоті.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів, одержаних Зозулею В.О., при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, полягає у використанні фундаментальних підходів і методів обчислюваної та математичної фізики. Поміж іншого у дисертації представлено характеристики, а саме залежність швидкості носіїв заряду від прикладеного електричного поля у деяких напівпровідниках, яка апроксимує залежності які були отримані експериментально, та співвідноситься з результатами які були отримані за допомогою інших обчислювальних методів. Також слід зазначити що достовірність результатів обґрунтовується використанням параметрів матеріалів які наявні у сучасній науковій літературі.

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних наукових конференціях.

Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Отримані результати можуть стати основою для розробки генераторів міліметрового та субміліметрового діапазонів на основі структур з різними типами активних бічних границь, зокрема для модифікації їх конструкцій та розширення частотного діапазону. На основі запропонованих конструкцій напівпровідникових структур можна створити ефективні генератори електромагнітних коливань у терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах. Запропоновані методи модифікування діодів з використанням активних бічних границь можуть стати основою для покращення характеристик існуючих діодів.

Результати дисертаційного дослідження Зозулі В.О. було використано при виконанні науково-дослідних робіт у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна відповідно до плану науково-дослідних робіт факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем (номери держзамовлення: 0219U003605 та 0120U102290) та при розробки планарних діодів які отримали Патент України на корисну модель (№ 150188 та № 151652)

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 12 наукових працях, серед яких 4 статті у виданнях, які входять до наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 1 стаття у науковому виданні, включеному на дату видання до переліку фахових видань України, 7 тез доповідей іщо входять до наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, було отримано 2 патенти на корисну модель.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Приходько, К. Г., Боцула, О. В., Зозуля, В. О. (2021). Особливості розвитку ударної іонізації в напівпровідникових сполуках InGaN та InAlN.

Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка», (34), 19-28. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-03>

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у періодичних наукових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу або у, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science

1. Botsula, O., Zozulia, V., Prykhodko, K. (2023). Planar n^+-n-n^+ Diode with Active Side Boundary on InP Substrate. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 15(1), 01011-1-01011-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01011](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01011)

2. Botsula, O., Zozulia, V. (2021). Energy and Frequency Properties of Planar n^+-n-n^+ Diodes with Active Side Boundary. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*, 13(6), 06028-1-06028-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(6\).06028](https://doi.org/10.21272/jnep.13(6).06028)

3. Botsula, O., Zozulia, V. (2020). Generation of THz Oscillations by Diodes with Resonant Tunneling Boundaries. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*, 12(6), 06037-1-06037-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06037](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06037)

4. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2019). InGaAs-based Graded Gap Active Elements with Static Cathode Domain for Terahertz Range. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*, 11(1), 01006-1-01006-5. [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(1\).01006](https://doi.org/10.21272/jnep.11(1).01006).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2022). Modeling of Planar 2D/3D Semiconductor Heterostructures Based on MoS₂/GaN Junction. *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. <https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037030>

6. Prykhodko, K., Botsula, O., Zozulia, V., Sanin, S., Katrich, G., Fedosova, S. (2022). Graded Band InGaN - Based Diode as Element of Active

Noise Load in Terahertz Range. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916405>

7. Zozulia, V., Botsula, O., Prykhodko, K., Sanin, S., Katrich, G., Fedosova, S. (2022). Planar GaAs-InGaAs Heterostructure for Generation in Long Wave Part of Terahertz Range. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916337>

8. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2021). Impact Ionization in Graded Gap Transferred Electron Diode. *2021 IEEE 3Rd Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON)*. <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575748>

9. Botsula, O., and Zozulia, V. (2020). Operation Principle and Simulation of Planar Diode with Tunnel n-p-n Border. *2020 IEEE Microwave Theory And Techniques In Wireless Communications (MTTW)*. <https://doi.org/10.1109/mttw51045.2020.9245041>

10. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2019). Diodes with Lateral n+-n -Border. *2019 IEEE 2Nd Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON)*. <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879884>

11. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2018). Monte Carlo Modeling of the Diodes with Lateral Resonant Tunneling Border. *2018 9Th International Conference On Ultrawideband And Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*. <https://doi.org/10.1109/uwbusis.2018.8520067>

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Боцула О. В., Зозуля В. О. (2022). *Планарний діод для генерації в терагерцовому діапазоні* (Патент України на корисну модель, № 150188), Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне Підприємство "Український Інститут Інтелектуальної Власності". <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1673142/>

2. Боцула О. В., Зозуля В. О. (2022). *Планарний діодний активний елемент для широкосмужової генерації в довгохвильовій частині*

терагерцового діапазону (Патент України на корисну модель, № 151652), Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне Підприємство "Український Інститут Інтелектуальної Власності".
<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1703072/>.

Результати дисертаційної роботи повністю відображено у публікаціях.

8. Дотримання академічної доброчесності.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу оригінальності (перевірки наявності тестових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертація виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

9. Апробація матеріалів дослідження.

Результати проведених досліджень представлялися на міжнародних конференціях у формі доповідей, за результатами яких були опубліковані матеріали наукових конференцій:

1. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2022). Modeling of Planar 2D/3D Semiconductor Heterostructures Based on MoS₂/GaN Junction. *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*.
<https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037030>
2. Prykhodko, K., Botsula, O., Zozulia, V., Sanin, S., Katrich, G., Fedosova, S. (2022). Graded Band InGaN - Based Diode as Element of Active Noise Load in Terahertz Range. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916405>
3. Zozulia, V., Botsula, O., Prykhodko, K., Sanin, S., Katrich, G., Fedosova, S. (2022). Planar GaAs-InGaAs Heterostructure for Generation in Long Wave Part of Terahertz Range. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916337>
4. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2021). Impact Ionization in Graded Gap Transferred Electron Diode. *2021 IEEE 3Rd Ukraine Conference On*

5. Botsula, O., and Zozulia, V. (2020). Operation Principle and Simulation of Planar Diode with Tunnel n-p-n Border. *2020 IEEE Microwave Theory And Techniques In Wireless Communications (MTTW)*. <https://doi.org/10,1109/mttw51045.2020,9245041>

6. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2019). Diodes with Lateral n⁺-n -Border. *2019 IEEE 2Nd Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON)*. <https://doi.org/10,1109/ukrcon.2019.8879884>

7. Botsula, O., Prykhodko, K., Zozulia, V. (2018). Monte Carlo Modeling of the Diodes with Lateral Resonant Tunneling Border. *2018 9Th International Conference On Ultrawideband And Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*. <https://doi.org/10,1109/uwbusis.2018.8520067>

10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №14), наказу Міністерства освіти і науки України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (від 12.01.2017 р. №40).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значущістю дисертаційна робота Зозулі В.О. «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувач продемонстрував основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри фізичної, біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу №4 розширеного засідання кафедри фізичної, біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій від 31 жовтня 2023 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. На даному засіданні були присутні 16 співробітників із різних наукових установ України, із яких 6 докторів наук та 8 кандидатів наук. Дисертанту було задано 27 запитань, на які він надав відповіді. Також виступили 4 науковці, які позитивно відізначались про дисертаційне дослідження Зозулі В. О..

У рамках цього розширеного засідання було ухвалено одногосно (15 голосів) рекомендувати дисертаційну роботу аспіранта Зозулі Валерія Олександровича «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Доктор фізико-математичних наук,
професор, в.о. завідувача кафедри
фізичної, біомедичної електроніки
та комплексних інформаційних технологій
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна



Сергій БЕРДНИК