

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0824U000374

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 15-01-2024

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: Наказ ХНУ імені В. Н. Каразіна № 0302-Зк/371 від 14.03.2024 р.



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

- Зозуля Валерій Олександрович
- Valerii Zozulia

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-7371-5424

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 105

Назва наукової спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Галузь / галузі знань:

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Дата захисту: 22-02-2024

Спеціальність за освітою: Мікро- та наносистемна техніка

Місце роботи здобувача: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): ID 4243

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29.19.31, 29.35.33, 29.35.47

Тема дисертації:

1. Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів
2. Active planar semiconductor elements of submillimeter and terahertz ranges

Реферат:

1. Проблемою створення малогабаритних твердотілих активних елементів терагерцового діапазону є фундаментальні обмеження, обумовлені природою переносу заряду в них, сукупність яких отримало назву "терагерцове провалля" через неефективність роботи приладів в цьому діапазоні. Одним з можливих напрямків просування в терагерцовий діапазон є використання традиційних твердотілих приладів на зразок діодів Ганна або лавино-пролітних діодів шляхом розробки нових підходів до конструювання приладів та нових концепцій, що призводять до покращення їх частотних властивостей і створення на їх основі нових активних елементів терагерцового діапазону. Основними завданнями дисертації є: розробка математичних моделей та методів числового моделювання фізичних процесів пов'язаних з переносом електричного заряду в напівпровідникових діодних планарних структурах, що мають складну геометрію та містять різномірні за електричними властивостями області, з використанням багатосіткових алгоритмів розв'язання рівняння Пуассона для визначення розподілу потенціалу і електричного поля та багаточастинкового методу Монте-Карло для врахування високочастотних процесів електронного транспорту та розсіяння носіїв заряду;

розробка програмного комплексу для 2D-моделювання надвисокочастотних напівпровідникових приладів, що враховує їх структуру та особливості перенесення заряду; проведення моделювання нестационарних процесів в планарних гомогенних та гетерогенних структурах, що містять бічні активні елементи різного типу, зокрема із суттєвими відмінностями їх властивостей від властивостей каналу, на зразок поєднання квазікласичних та квантових областей; отримання просторових розподілів напруженості електричних і квазіелектричних полів, дрейфової швидкості та енергії носіїв заряду з урахуванням складної структури зони провідності; отримання залежності струму, що протікає через вказані структури, для випадку постійних та змінних у часі напруг; встановлення особливостей формування нестійкостей струму, які виникають в діодних структурах, що досліджуються; отримання енергетичних характеристик діодів на змінному струмі; визначення частотних властивостей діодних структур з активними бічними границями з точки зору отримання генерації ними електромагнітних коливань та можливостей їх використання на частотах терагерцового діапазону; визначення оптимальних параметрів приладів та відповідних конструктивних елементів з точки зору отримання максимальних частот. Наукова новизна результатів роботи полягає в наступному: Вперше показана можливість отримання широкополосної генерації структурами з активними бічними границями на основі GaAs від 100 до 300 ГГц з використання традиційних матеріалів з максимальною ефективністю до 3%, за умови обмеження напруги живлення величинами меншими 2,5 В. Вперше показано, що використання гетероструктури GaAs - InzGa1-zAs в діоді з GaAs каналом дозволяє підвищити ефективність генерації більш ніж в 4 рази з використанням гомогенного матеріалу. Вперше продемонстровано можливість отримання широкополосної 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%. Досліджено генерацію електромагнітних коливань діодами, що містять варізонні шари InzGa1-zAs, в яких можливе виникнення ударної іонізації та встановлені частотні межі їх роботи. Показано, що у вказаних діодах можлива генерація коливань на частотах до 400 ГГц. Вперше запропоновано планарну конструкцію діода, що містить розміщений на бічній поверхні діода активний елемент на основі варізонного напівпровідника InzGa1-zAs, в якому створені умови для виникнення ударної іонізації, та показано вплив такого елемента на зміну частотного діапазону роботи діода. Встановлено, що частота, відповідає максимальній ефективності, в такому елементі мало залежить від впливу ударної іонізації, проте максимальні частоти генерації більші ніж в звичайних планарних діодах на основі GaAs. Частотна межа його роботи досягає частоти більшої 300 ГГц, а частотний діапазон має значну ширину (від десятків гігагерц до 300 ГГц) у безперервному режимі генерації. Вперше показано можливість отримання генерації електромагнітних коливань терагерцового діапазону діодами на основі GaAs з активними бічними границями у вигляді резонансно-тунельної структури. Встановлено, що верхня частотна межа таких діодів може перевищувати 500 ГГц. Максимальна ефективність коливань досягала 10% і відповідала частоті близько 110 ГГц, що знаходиться у відповідності до часу перенесення електронів через канал діода. Частотний діапазон роботи діодів має значну ширину (від десятків гігагерц до 300 ГГц) у безперервному режимі генерації.

2. The problem of fabrication of small-sized solid-state active elements in the terahertz range is the fundamental limitations due to the processes of charge transfer in such devices, the totality of which is called the "terahertz gap", due to the inefficiency of conventional devices for generation waves in this range. One of the possible ways advancements into the terahertz range is to use traditional solid-state devices such as Gunn diodes or IMPATT diodes by developing new approaches to device design and new concepts that lead to the improvement of their frequency properties and the development of new active elements based on them that can operate in the terahertz range. The main tasks of the thesis are: development of mathematical models and methods of numerical simulation of physical processes of the transport of charge carriers in semiconductor planar diode structures with complex geometry and containing regions with heterogeneous electrical properties, using multigrid algorithms for solving the Poisson equation to determine the distribution of potential and electric field and the multiparticle Monte-Carlo method to take into account for high-frequency processes of transport and scattering for charge carriers; development of a software package for 2D modeling of ultra-high-frequency semiconductor devices, taking into

account their structure and charge transport features; to model non-stationary processes in planar homogeneous and heterogeneous structures containing active side elements of different types, in particular with significant differences in their characteristics from those of the channel, such as a combination of quasi-classical and quantum regions; to obtain spatial distributions of electric and quasi-electric field intensity, drift velocity and energy of charge carriers, taking into account, the complex structure of the conduction band; to obtain the dependences of the current flowing through these structures for the case of constant and time-varying voltages; to establish the peculiarities of the formation of current instabilities arising in the diode structures under study; to obtain the energy characteristics of diodes on alternating current; to determine the frequency characteristics of diode structures with active side boundaries in terms of obtaining the generation of electromagnetic oscillations and the possibility of their use at terahertz frequencies; determine the optimal parameters of the devices and the corresponding structural elements in terms of obtaining maximum frequencies. In particular, the following scientific results are obtained in this thesis: The possibility of broadband generation by structures with active side borders based on GaAs from 100 to 300 GHz using traditional materials with a maximum efficiency of up to 3%, provided that the supply voltage is limited to values less than 2,5 V demonstrated. For the first time, the use of GaAs-InzGa1-zAs heterostructure in a diode with a GaAs channel allows to increase the generation efficiency by more than 4 times compared to the use of a homogeneous material. For the first time, the possibility of broadband generation by structures with active side borders based on InP at frequencies up to 350 GHz when operating at the fundamental frequency with a maximum generation efficiency of up to 2,5% is demonstrated. The generation of electromagnetic diodes containing graded band gap InzGa1-zAs, in which impact ionization is possible, is investigated and the cut frequencies of their operation are established. It is shown that these diodes can generate oscillations at frequencies up to 400 GHz. For the first time, a planar diode design containing an active element based on the graded band gap InzGa1-zAs semiconductor formed on the active region of the diode, in which conditions for the occurrence of impact ionization are formed, is proposed, and the effect of such an element on changing the frequency range of the diode is shown. It is found that the frequency corresponding to the maximum efficiency in such an element is not much affected by the influence of impact ionization, but the maximum generation frequencies are higher than in conventional planar diodes based on GaAs. The cut frequency of its operation reaches a frequency of more than 300 GHz, and the frequency range has a significant bandwidth (from 50 to 300 GHz) in the continuous generation mode. For the first time, the possibility of generating electromagnetic oscillations in the terahertz range by GaAs-based diodes with active side boundaries based on resonant tunnel structure at frequencies above 500 GHz was shown. The maximum efficiency of oscillations was up to 10% and was obtained at a frequency of about 110 GHz, which corresponds to the time of electron transfer through the diode channel with a length of approximately 1 micron. The frequency range of the diodes has a considerable bandwidth (from 50 to 500 GHz) in the continuous generation mode.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

Підсумки дослідження: Теоретичне узагальнення і вирішення важливої наукової проблеми

Публікації:

- 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.

- Botsula, O. V., Zozulia, V. O., Prykhodko, K. H. (2023). Planar n⁺-n-n⁺ Diode with Active Side Boundary on InP Substrate. Journal of Nano- and Electronic Physics, 15(1), 01011–01014. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01011](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01011).
- 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).
- 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).
- 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).
- Zozulia, V. O., Боцула, О. В., Prykhodko, K. H., 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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/uwbuis.2018.8520067>.
- Prykhodko, K., Zozulia, V., Botsula, O. (2017). Graded band gap InGaAs diodes for terahertz applications. 2017 IEEE International Young Scientists Forum On Applied Physics And Engineering (YSF). <https://doi.org/10,1109/ysf.2017.8126637>.

Наукова (науково-технічна) продукція:

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПВ:

Винаходи, корисні моделі, промислові зразки

Патент України на корисну модель, № 150188; Патент України на корисну модель, № 151652

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: 0120U102290

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Боцула Олег Вікторович

2. Botsula Oleg V.

Кваліфікація: к. ф.-м. н., ст.н.с., 01.04.03

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Кузьмичов Ігор Кнстянтинович

2. Igor Kuzmichev

Кваліфікація: д. ф.-м. н., с.н.с., 01.04.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-6870-5491

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 03534593

Місцезнаходження: вул. Академіка Проскури, буд. 12, Харків, Харківський р-н., 61085, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Стороженко Ігор Петрович

2. Igor Storozhenko

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.01

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-7344-242X

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Державний біотехнологічний університет

Код за ЄДРПОУ: 44234755

Місцезнаходження: вул. Алчевських, буд. 44, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Дегтярьов Андрій Вікторович
2. Andrii Degtyarev

Кваліфікація: к.ф.-м.н., доц., 01.04.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-0844-4282

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Маслов Вячеслав Олександрович
2. Viacheslav Maslov

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-7743-7006

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Код за ЄДРПОУ: 02071205

Місцезнаходження: майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові
голови ради

Шульга Сергій Миколайович

Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні

Шульга Сергій Миколайович

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Реєстратор

Шевченко Андрій Олександрович

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна