

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

ПРИХОДЬКО КИРИЛО ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 621.382.2

АКТИВНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ В  
ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Спеціальність 01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків –2021

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент

**Боцула Олег Вікторович,**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
доцент кафедри фізичної і біомедичної електроніки та  
комплексних інформаційних технологій.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,

професор

**Білецький Микола Миколайович,**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України,  
завідувач відділом твердотільної електроніки;

доктор фізико-математичних наук,

професор

**Стороженко Ігор Петрович,**

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри вищої математики.

Захист відбудеться «30» бересня 2021 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «30» бересня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юрій АРКУША

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Терагерцова область електромагнітного спектру має багато важливих переваг, таких як: відсутність іонізуючого ефекту, висока інформаційна здатність, здатність проникати крізь непрозорі предмети, можливість спрямованого випромінювання та інші, що призвело до розвитку терагерцової технології та пристроїв.

Унікальні властивості терагерцового випромінювання визначають можливість реалізації цілого ряду унікальних систем, що мають переваги над аналогами, що працюють на більш низьких частотах і в оптичному діапазоні. Існує великий інтерес, пов'язаний з реалізацією тривимірної терагерцової візуалізації та терагерцової томографії.

Унікальне спектральне положення терагерцового діапазону визначає труднощі розвитку компактних твердотільних джерел для генерації у цьому діапазоні. У більшості випадків відбувається витіснення робочих частот існуючих пристроїв у терагерцову область.

Серед існуючих джерел високочастотного випромінювання прилади, що працюють на основі ефекту міждолинного перенесення електронів і лавинно-пролітні діоди, є достатньо добре розвинутими високочастотними джерелами, але мають обмежений частотний діапазон. Прилади на основі ефекту резонансного тунелювання є надзвичайно високочастотними приладами, проте мають досить низький рівень вихідної потужності. Транзистори з високою рухливістю електронів (HEMT) та гетероперехідні біполярні транзистори (HBT) часто вимагають низьких робочих температур. Таким чином, створення компактних твердотілих джерел субтерагерцового та терагерцового діапазонів залишається актуальною задачею, що потребує розв'язку.

У роботі розглядаються можливості створення нових і модифікації структури існуючих твердотілих джерел електромагнітного випромінювання з використанням варізонних напівпровідників та ефектів, пов'язаних з розвитком ударної іонізації в них.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних проєктів:

1. «Генерація та помноження частоти в терагерцовому діапазоні діодами з тунельними, резонансно-тунельними та лавинними границями на основі напівпровідників  $A_3B_5$ .» (№ держреєстрації 0109U000556);
2. «Активні твердотілі елементи для генерації, помноження частоти та випромінювання електромагнітних хвиль у терагерцовому діапазоні» (№ держреєстрації 0219U003605);
3. «Активні елементи на основі варізонних та моношаруватих напівпровідників для генерації та випромінювання на частотах терагерцового діапазону» (№ держреєстрації 0120U102290).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є пошук нових і вдосконалення існуючих активних елементів для генерації коливань у терагерцовому діапазоні. Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувалися наступні задачі:

1. Вдосконалення математичної моделі та ефективного числового алгоритму для аналізу динаміки виникнення нестійкостей струму в напівпровідникових гетероструктурах і структурах зі змінним складом (варізонні напівпровідники) з урахуванням процесів міждолинного перенесення електронів та ударної іонізації.

2. Дослідження закономірностей розвитку низькоінтенсивної ударної іонізації у напівпровідниковому шарі, склад якого змінюється з координатою. Визначення просторових і часових параметрів ударної іонізації в залежності від типу матеріалу, його параметрів і характеру розподілу складу в ньому.

3. Дослідження енергетичних та частотних характеристик коротких діодів на основі напівпровідникових шарів на основі сполук  $A_zB_{1-z}C$  з залежним від координати складом з урахуванням процесів генерації носіїв заряду за умови розвитку ударної іонізації.

4. Дослідження шумових і частотних характеристик діодів з катодними статичними доменами сильного поля на основі гетероструктур і варізонних структур, у яких катодна область представляє собою шар змінного складу, у якому ширина забороненої області збільшується від катоду вглиб діоду. Порівняльна характеристика діодів на основі різних напівпровідникових сполук  $A_3B_5$ , у тому числі на основі нітридів.

5. Розробка планарної конструкції активного елемента на основі міждолинного переносу електронів зі складною геометрією з використанням варізонних напівпровідникових шарів з ударною іонізацією.

**Об'єкт дослідження** – електронні процеси в напівпровідникових гетероструктурах і варізонних структурах з ударною іонізацією та міждолинним переносом електронів.

**Предмет дослідження** – розподіли електричних і квазіелектричних полів, концентрації носіїв заряду, часові, енергетичні, частотні характеристики, шумові та спектральні властивості діодів.

**Методи дослідження.** Для аналізу фізичних процесів в розглянутих структурах використовується методи математичного моделювання, оснований на розв'язанні кінетичного рівняння для носіїв заряду у квазікласичному наближенні, зокрема з використанням багаточастинкового методу Монте-Карло. Перевагою реалізованої методики розрахунку над існуючими є комплексний підхід до аналізу нестационарних електронних процесів у складних структурах, що являють собою сукупність різнорідних областей, у тому числі і варізонних шарах, де кожний просторовий елемент має свій власний набір параметрів, урахування носіїв обох знаків і міжзонної ударної іонізації.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Новизна роботи полягає у встановленні нових закономірностей та ефектів, що дозволяють підвищити потужність існуючих активних елементів і

модифікувати їх структуру для підвищення ефективності та граничних частот роботи, виявленню нових фізичних явищ і властивостей та створення нових активних елементів і конструкцій на їх основі для роботи в терагерцовому діапазоні.

У роботі досліджено фізичні процеси в приладах з МПЕ на основі складних напівпровідникових сполук для використання в широкому діапазоні частот, у коротких діодних структурах на основі варізонних напівпровідників з ударною іонізацією та планарному елементі з активною бічною n-границею на основі варізонного напівпровідника. Проведено пошук оптимальних конфігурацій, що за своїми характеристиками перевищують існуючі.

1. Вперше показано можливість використання ударної іонізації у варізонному напівпровідниковому шарі у якості механізму релаксації електронів за енергією. Встановлено, що локалізована у просторі ударна іонізація може призводити до зменшення заселеності верхніх енергетичних долин і покращити частотні властивості приладів.

2. Вперше запропоновано конструкцію активного елемента на основі напівпровідникової системи GaAs/InGaAs з варізонним анодним шаром, що працює в режимі обмеженої ударної іонізації. Показано, що в такому елементі можна реалізувати режим одностороннього руху носіїв заряду різних знаків, що сприяє швидкій релаксації накопиченого в результаті ударної іонізації надлишкового об'ємного заряду. Встановлено, що ударна іонізація є визначальним фактором, що призводить до зміщення робочої частоти приладу в область субтерагерцового діапазону (вище 300 ГГц). Запропонована концепція може бути використана для створення приладів на основі ефекту МПЕ з покращеними частотними можливостями.

3. Вперше обґрунтовано можливість отримання надвисокочастотної шумової генерації в діодах з катодним статичним доменом, що містять варізонний катодний шар з напівпровідника, у якому ширина забороненої зони збільшується від катода вглиб діоду. Показано, що така конструкція локалізує ударну іонізацію в області катода та дозволяє скоротити розміри діода, забезпечуючи шумову генерацію в області терагерцового діапазону. Отримані результати розрахунку діодів на основі сполук InGaAs/GaAs, InGaN/GaN та InAlN/AlN свідчать про перевагу діодів на основі InGaN/GaN над діодами на основі інших сполук. Порівняння шумових характеристик діодів на основі гомогенних матеріалів та діодів з варізонним катодним шаром свідчить про перевагу запропонованої варізонної конструкції. Показано, що в діодах на основі InGaN наявні ділянки напруги, де залежність спектральної потужності шуму є практично лінійна і змінюється майже на порядок. В перспективі з'являється можливість застосовувати їх у радіометричних системах терагерцового діапазону як активне шумове навантаження, яке керується напругою.

4. Вперше запропоновано планарну конструкцію діода, що містить активний елемент на основі варізонного напівпровідника, який розміщується на поверхні діода. Показано, що таке розташування призводить до

розширення частотного діапазону роботи діоду. Частота, що відповідає максимальній ефективності в такому елементі, відповідає звичайному діоду з МПЕ, проте значно розширена в область високих частот. Частотна межа роботи перевищує 300 ГГц при роботі в режимі генерації на основній частоті.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати можуть знайти практичне застосування при розробці генераторів терагерцового діапазону на основі діодів з міждолинним переносом електронів. На основі запропонованих конструкцій діодів зі статичним доменом можна створювати ефективні шумові навантаження для радіометрії, використати їх у якості опорних джерел шуму при вимірюванні шумових характеристик підсилювачів та приймачів різного призначення для використання в терагерцовому діапазоні.

#### **Особистий внесок здобувача**

Всі наукові публікації виконано у співавторстві. Дисертант брав участь у постановці та розв'язанні задач, в обробці й аналізі результатів розрахунку та їх інтерпретації. В роботах [2, 4, 5, 6, 11, 12, 14, 17, 18] автору належить розробка алгоритмів і програмна реалізація математичної моделі електронного транспорту у варізонних структурах з ударною іонізацією. У роботах [1, 3, 7] здобувач брав участь у отриманні результатів та їх інтерпретації. У роботах [8-10] автор брав участь у розробці математичної моделі аналізу гетероструктур, проведенні розрахунків та інтерпретації результатів. У роботах [13, 15, 16] автор брав участь у обговоренні концепції та в проведенні числового моделювання. В роботах [19-20] автор виконав патентний пошук і запропонував формулу винаходу. Результати робіт [9-18] представлені на конференціях здобувачем особисто.

#### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати роботи було презентовано та обговорено на наукових семінарах Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, а також на всеукраїнських і міжнародних симпозіумах і конференціях:

1. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкар'євські читання – 2015», 1-3 квітня, 2015: Київ, Україна;
2. 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016, June 21–24, 2016, Kharkiv, Ukraine;
3. 8th Intern. Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS'2016, September 5–11, 2016, Odessa, Ukraine;
4. IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF–2017, October 17-20, 2017, Lviv, Ukraine;
5. 9-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS-2018, September 4–7, 2018, Odessa, Ukraine;
6. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019, July 2–6, 2019: Conference Paper. Lviv, Ukraine;

7. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2020, September 21–25, 2020: onference Paper. Kharkiv, Ukraine.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертації опубліковано в 8 статтях: 6 – у фахових виданнях України (з яких 2 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science); 2 – у зарубіжних спеціалізованих виданнях (з яких 2 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science); в 2 патентах України; 10 працях апробаційного характеру (з яких 8 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Обсяг загального тексту дисертації становить 157 сторінок, з яких 118 сторінок основного тексту. Список використаних джерел містить 118 найменувань. Дисертація ілюстрована 66 рисунками і 2 таблицями.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність вибору теми дисертаційної роботи й обґрунтовано необхідність проведення досліджень, сформульовано мету та задачі, що розв'язуються у дисертаційній роботі. Визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Представлена наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, показаний зв'язок з науковими темами. Наведено особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи та представлені публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** «Огляд літератури та вибір напрямку досліджень» розглянуто сучасний стан твердотільних елементів для генерації в терагерцовому та суб- терагерцовому діапазонах. Порівняно їх частотні характеристики. Представлені основні причини, що обмежують швидкодію приладів з міждолинним перенесенням електронів. Розглянуто використання варізонного шару, ударної іонізації та можливості заміни традиційних матеріалів для підвищення частоти генерації діодів з міждолинним перенесенням електронів.

У **другому розділі** «Математична модель коротких діодних елементів зі складною зонною структурою та ударною іонізацією» обґрунтована та описана двовимірною нестационарна самоузгоджена модель розрахунку кінетичних процесів у напівпровідникових елементах з використанням багаточастинкового методу Монте-Карло. Приведено загальні алгоритми моделювання приладів методом Монте-Карло та розглянуто окремі його етапи. Наведено опис багатосіткового методу розв'язання рівняння Пуассона.

Модель враховує багатодолинну структуру зони провідності та непараболічну залежність від хвильового вектора дисперсійних характеристик матеріалу. Розглянуто всі суттєві механізми розсіяння носіїв заряду: на деформаційних потенціалах оптичних та акустичних фононів, полярне оптичне, на іонізованих домішках, п'єзоелектричне, міждолинне розсіяння на еквівалентних та нееквівалентних долинах, розсіяння на

сплавному потенціалі. Створена модель дозволяє розглядати транспорт носіїв заряду в середовищі з довільною залежністю складу від координати та враховувати процеси ударної іонізації і, відповідно, наявність як електронів так і дірок.

Для отримання розподілу електростатичного потенціалу використано повний багатосітковий метод, що дозволяє ефективно проводити розрахунки приладів, що мають складну геометрію в умовах неоднорідного розподілу складу матеріалу. Наведено основні параметри матеріалів, що використовуються для розрахунків. Проведена верифікація математичної моделі шляхом порівняння залежностей дрейфової швидкості електронів від електричного поля, які було отримано з її використанням та параметрів матеріалів з відомими експериментальними та теоретичними результатами для різних сполук. Показано відповідність отриманих результатів з результатами експериментів і розрахунків, що проводилися іншими авторами.

У **третьому розділі** «Просторові та часові параметри ударної іонізації» досліджено початкову стадію розвитку ударної іонізації та зроблено оцінку часових і просторових параметрів виникнення ударної іонізації в потрійних напівпровідникових системах  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ ,  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  та  $\text{In}_z\text{Al}_{1-z}\text{N}$  за умови, що коефіцієнт помноження струму в діоді  $M \approx 1$ . Оцінено найбільш важливі фактори – час розвитку ударної іонізації  $\tau$  та величину області  $l_i$  в якій електрон набирає енергію, необхідну для ударної іонізації, так звану “мертву зону”. Показано, що для  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  із вмістом  $z < 0,4$  величина  $\tau < 1$  пс, а  $l_i$  може бути менше 100 нм, (рис. 1).

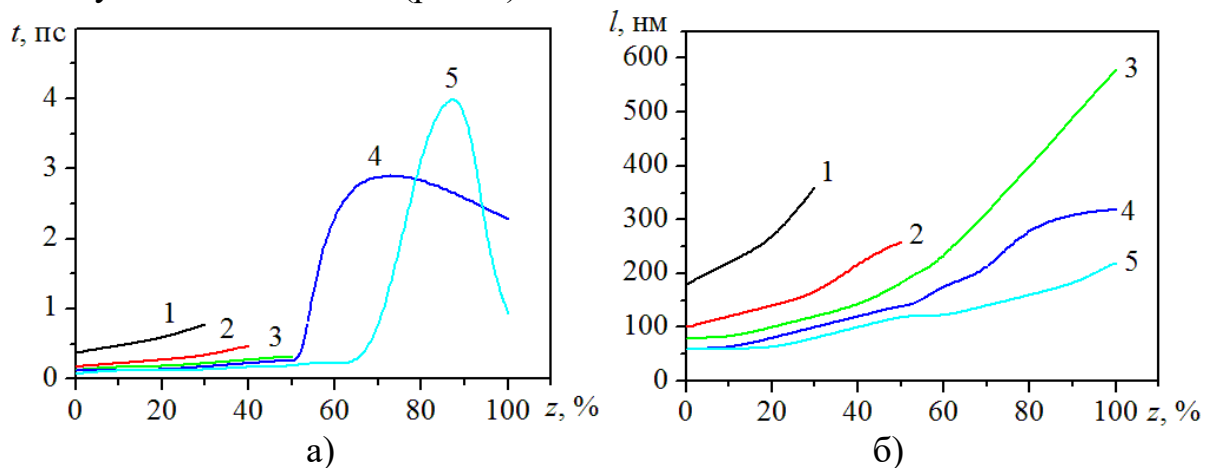


Рис. 1. Час затримки до початку ударної іонізації а) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації для однорідного за складом б) напівпровідника на основі  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  від молярної частки Ga: 1 – 20 кВ/см; 2 – 40 кВ/см; 3 – 60 кВ/см; 4 – 80 кВ/см; 5 – 100 кВ/см

В цілому величини  $l_i$  та  $\tau$  зменшуються при переході від GaAs до InAs. Швидкість набору енергії в GaAs вище ніж в сполуці  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  при  $z < 1$ , що разом зі зменшенням розсіяння електронів на сплавному потенціалі

призводить до змін в області значень  $z$  близьких до нуля та формує максимум на залежності  $\tau(E)$ .

Було також розглянуто ситуацію, коли вміст Ga змінювався з координатою за нормальним законом та містив GaAs-область на катоді, значення молярної частки Ga на аноді  $z_A > 0$ . Такий розподіл в анодній частині має властивості близькі до InAs. Відповідні результати розрахунків наведені на рис. 2 а), б).

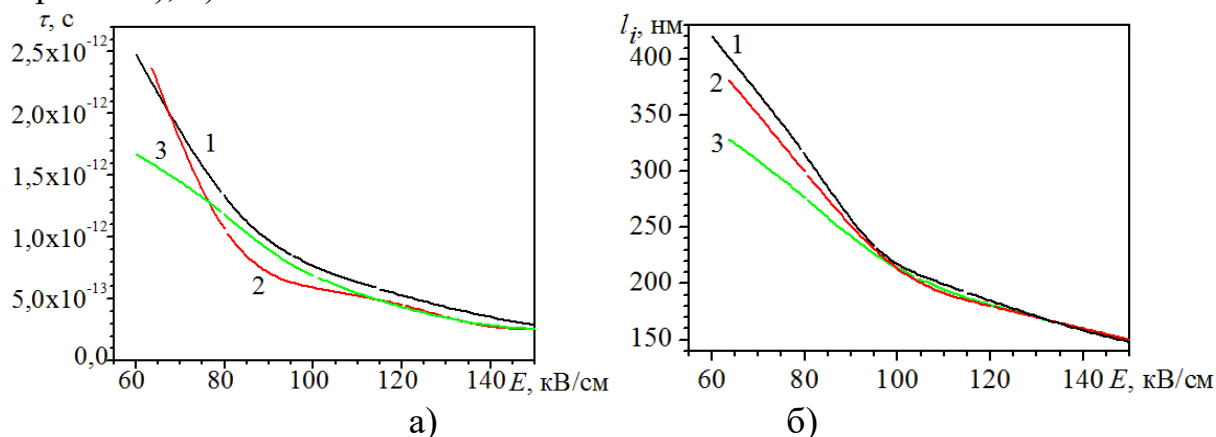


Рис. 2. Час затримки до початку ударної іонізації – а) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації – б). 1–  $z_A=1$ , 2–  $z_A=0,4$ , 3–  $z_A=0$

Показано, що використовуючи нормальний закон розподілу складу напівпровідника, можна розширити діапазон зміни параметрів ударної іонізації та змстити величини полів, за яких можлива ударна іонізація в бік менших значень.

Було оцінено параметри ударної іонізації в  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  при зміні вмісту індію від 0 до 1 та величині напруженості електричного поля до 600 кВ/см. Результати розрахунків для однорідних за складом напівпровідників показані на рис. 3.

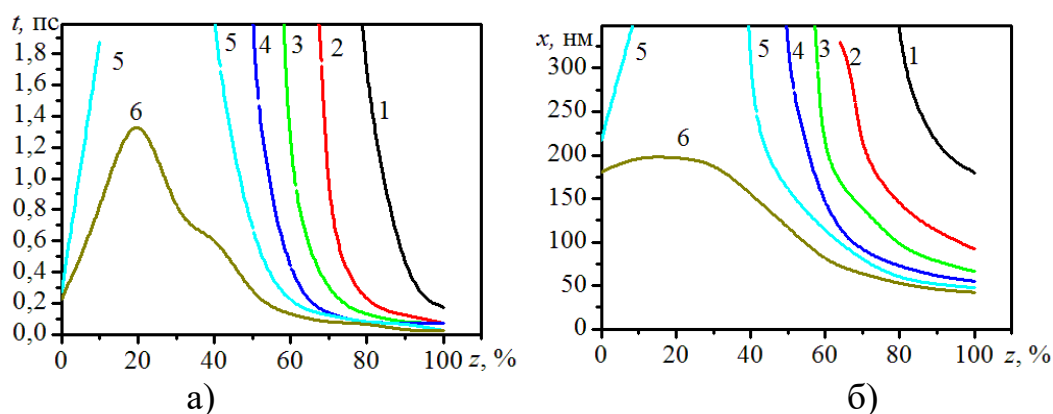


Рис. 3. Час затримки до початку ударної іонізації – а) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації – б). Для однорідного за складом напівпровідника на основі  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  від молярної частки In при різних величинах напруженості електричного поля : 1 – 100 кВ/см; 2 – 200 кВ/см; 3 – 300 кВ/см; 4 – 400 кВ/см; 5 – 500 кВ/см; 6 – 600 кВ/см

Показано, що зростання  $l_i$ , що спостерігається, у яких частка In складає близько 0,7- 0,8 є більш вираженим для сполуки  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ , що пояснюється суттєвим впливом розсіяння на сплавному потенціалі і пов'язане з більшою величиною електронної спорідненості GaN та InN.

Параметри розвитку ударної іонізації в  $\text{In}_z\text{Al}_{1-z}\text{N}$  при зміні вмісту індію від 0 до 1 та зміні напруженості електричного поля до 1400 кВ/см для однорідних за складом напівпровідників показані на рис. 4.

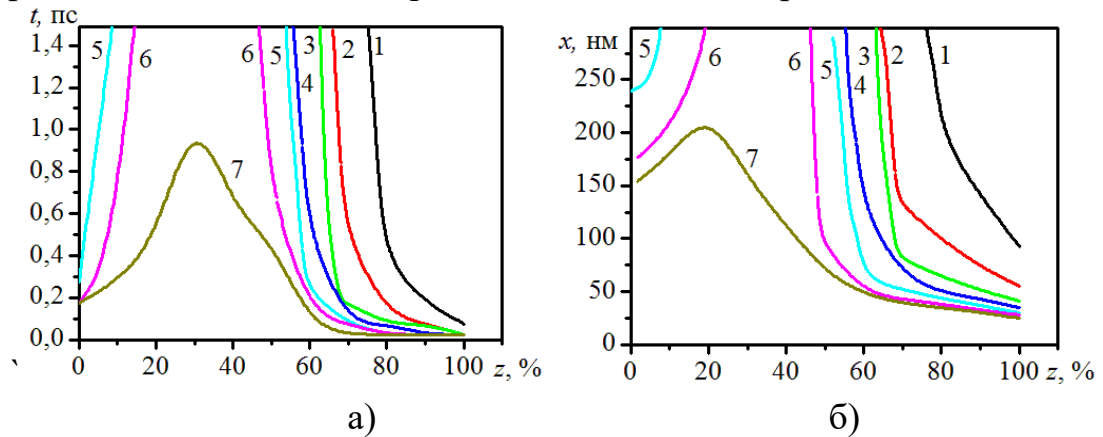


Рис. 4. Час затримки до початку ударної іонізації а) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації для однорідного за складом напівпровідника на основі  $\text{In}_z\text{Al}_{1-z}\text{N}$  від молярної частки In: 1 – 200 кВ/см; 2 – 400 кВ/см; 3 – 600 кВ/см; 4 – 800 кВ/см; 5 – 1000 кВ/см; 6 – 1200 кВ/см; 7 – 1400 кВ/см

Суттєвим у порівнянні з попередніми розглянутими сполуками є сильна залежність  $l_i$  та  $\tau$  від напруженості електричного поля та відповідно їх менші величини. Так при значеннях напруженості електричного поля  $E > 200$  кВ/см ударна іонізація розвивається на довжині меншій за 150 нм. При цьому при великому вмісті індію ( $z > 0,7$ ) час розвитку ударної іонізації в цілому не перевищує  $\tau < 5 \cdot 10^{-13}$ , що є найменшим значенням у вказаному діапазоні зміни  $z$ .

У **четвертому розділі** «Активні елементи з катодним статичним доменом на основі гетеро- та варізонних структур» розглядаються діоди, в яких за певних умов утворюється катодний статичний домен (КСД) з високою величиною напруженості електричного поля. В таких діодах може виникнути ударна іонізація, лавинно-пролітний ефект і шумова генерація в широкому діапазоні частот.

Розглянуто діодні структури  $n^+ - n^- - n - n^+$  на основі напівпровідникових систем  $\text{InGaAs/GaAs}$ ,  $\text{InGaAs/InP}$ ,  $\text{InGaN/GaN}$  та  $\text{InAlN/AlN}$ , у яких катодний статичний домен формується на границі  $n^- - n$  - переходу, а прикатодний шар являє собою напівпровідникову сполуку типу  $\text{A}_z\text{B}_{1-z}\text{C}$ , у якій молярна частка одного із компонент (А) змінюється так, що ширина забороненої зони зростає від мінімального значення на катоді до

максимального сталого значення в точці розташування границі  $n^- - n^-$  - переходу, рис. 5а.

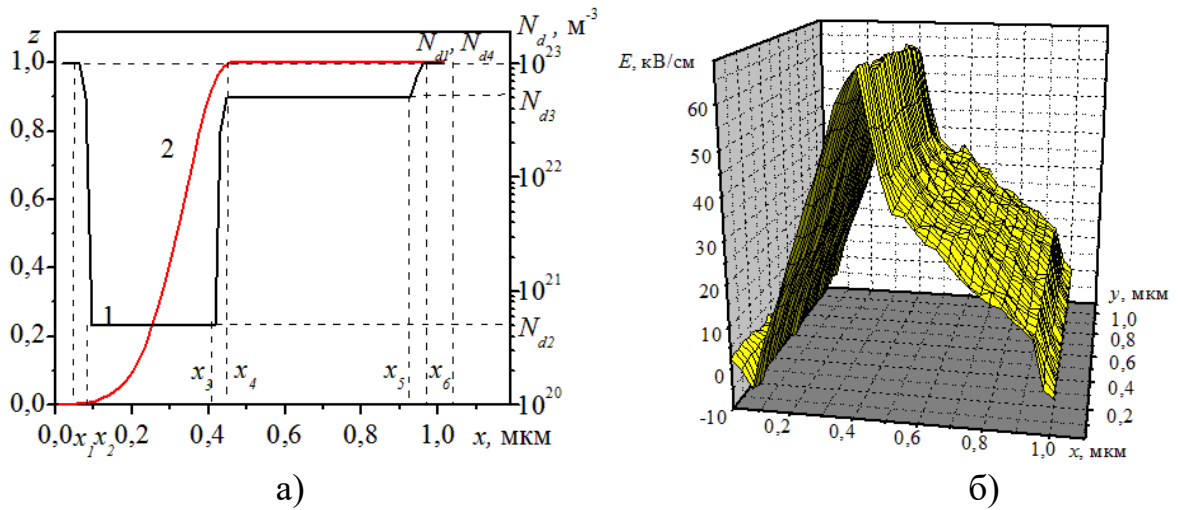


Рис. 5. а) Структура діода: 1 – профіль легування; 2 – розподіл молярної частки  $z(x)$ ; б) – катодний статичний домен, що формується в діоді

На прикладі системи InGaAs/GaAs досліджено статичні характеристики діодів та встановлено, що найбільші значення густини струму відповідають випадку діода з варізонним шаром що містять InAs на катодному контакті. Незначне збільшення долі Ga у складі сполуки  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  на катодному контакті призводить до зменшення рухливості носіїв заряду за рахунок впливу розсіювання на сплавному потенціалі та зниження величини струму. Аналогічний вплив на величину струму має розширення області пониженого легування в сторону анодного контакту.

Для визначення шумових характеристик діода проводиться аналіз флуктуацій струму  $i(t)$  отриманих при моделюванні методом Монте-Карло. Часовий крок вибирався за умови  $(\Delta t)^{-1} \gg W(E)$ , де  $W(E)$  - частота розсіювання електрона, яка набагато більша, частот субтерагерцового діапазону, які розглядаються ( $\Delta t = 2 \cdot 10^{-16}$  с). Шумова генерація оцінювалася за спектральною густиною потужності шуму (СГПШ) (1):

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{P_{\Delta f}(f)}{\Delta f}, \quad (1)$$

де  $P_{\Delta f}(f)$  – усереднена за часом потужність шуму в смузі частот  $\Delta f$  на частоті вимірювання  $f$ .

Для обчислення  $S(f)$  використовувався зв'язок між енергетичним спектром  $S(f)$  та автокореляційною функцією  $K(\tau)$  стаціонарного випадкового процесу  $x(t)$ , які пов'язані один з одним парою перетворення Фур'є. СГПШ діодів проаналізована в найбільш важливих з точки зору прикладних застосувань діапазонах, де знаходяться вікна атмосферної прозорості (мінімуми коефіцієнта згасання) на частотах субтерагерцового діапазону (95, 140, 220, 500 ГГц). На рис. 6 представлені приклади залежності

СГПШ від частоти, що отримано для трьох різних діодів, два з яких являють собою однорідні за складом діоди на основі GaAs та  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ , а третій має варізонну структуру на основі  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  зі зміною складу  $z(x)$  за нормальним законом від 0 на катоді до 1 в кінці області зниженого легування.

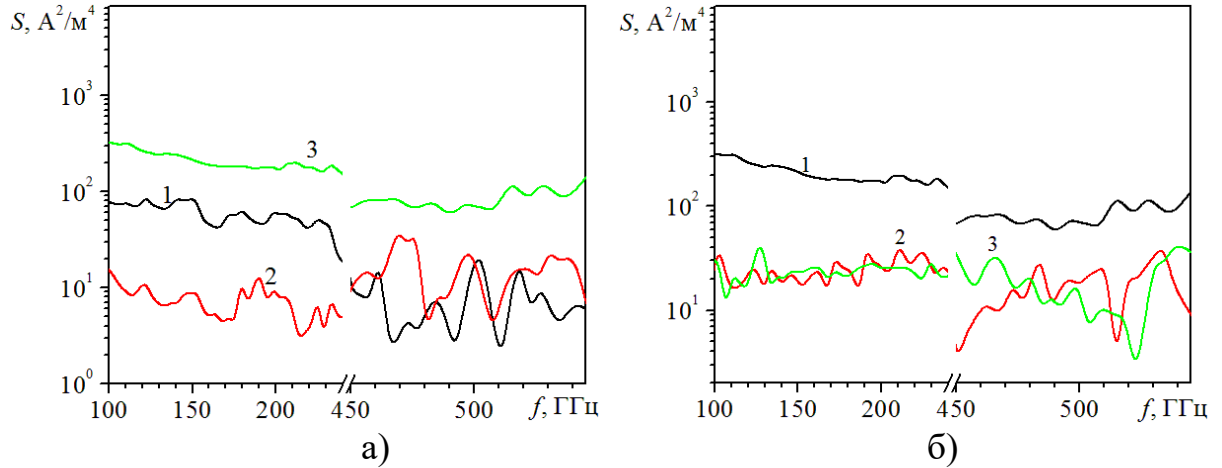


Рис. 6. Залежність рівня СГПШ від частоти для діодів а) з параметром  $\delta=0,67$ , при напрузі  $U=2$  В, 1 –  $z(x)=1$ ; 2 –  $z(x)=0,47$ ; 3 –  $z(0)=0$ ; б) 1 –  $\delta=0,67$   $z(0)=0$ ; 2 –  $\delta=1$   $z(0)=0$ ; 3 –  $\delta=1,5$   $z(0)=0$

Встановлено, що діоди з варізонним шаром за рівнем СГПШ при однакових напругах переважають діоди з однорідним складом в низькочастотній області. Відношення довжин  $n^-$ - області і  $n$ - області, що дорівнює  $\delta=0,67$  виявилось найкращим для отримання високих рівнів СГПШ рис. 6 б) для усіх розглянутих діодів.

Проведено аналіз впливу напруги на діоді на рівень СГПШ рис. 7.

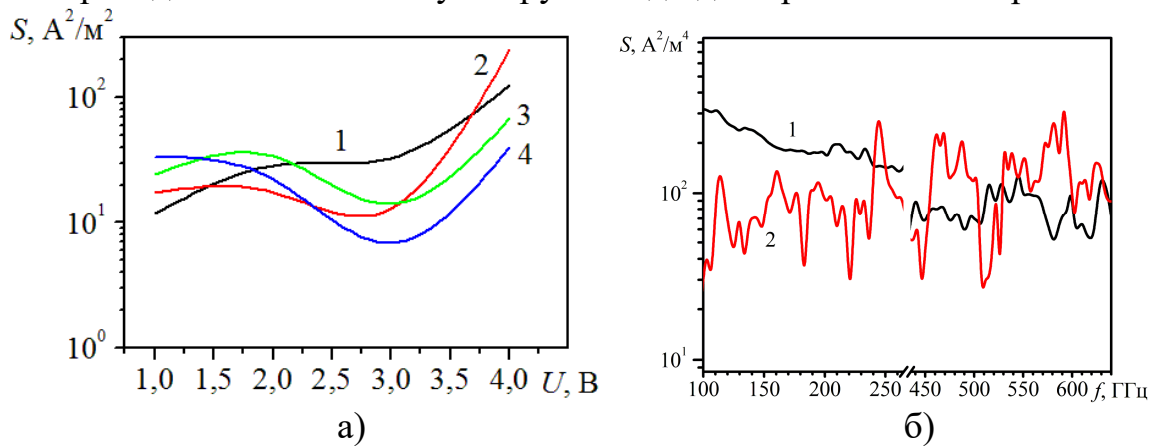


Рис. 7. Залежність рівня СГПШ від напруг на діоді з параметром  $\delta=0,67$  та  $z(0)=0,2$  для характерних частотах прозорості а) 1 –  $f=95$  ГГц; 2 –  $f=140$  ГГц; 3 –  $f=220$  ГГц; 4 –  $f=500$  ГГц. Спектральні характеристики діодів б) 1–InGaAs/GaAs,; 2 - InGaAs/InP, напруга зміщення 2В,  $\delta=0,67$

Враховуючи, що шумові коливання в діодах з катодним статичним доменом (ДКСД) є наслідком різниці в часі прольоту носіями заряду області домену, розглядається використання напівпровідників з більш високою

швидкістю насичення, зокрема шар GaAs змінено на InP (рис. 7 б). Показано, що діод на основі GaAs має вищий рівень СГПШ в низькочастотній частині суб-ТГц області, до 240 ГГц, на частотах вище 450 ГГц СГПШ для ДКСД з шаром InP є більшим. Таким чином, можна стверджувати, що ДКСД на основі InP із варізонним шаром  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  можна розглядати як перспективні для генерації шуму в терагерцовому діапазоні. Завадою може стати досить малий діапазон можливого градієнта частки Ga у варізонному шарі.

Аналізується взаємозв'язок між механізмами розсіяння електронів та шумовою генерацією. Встановлено, що розсіяння на ПО – фононах, яке діє переважно в активній області діода, формує широку дисперсію швидкостей на виході з неї. З другого боку, домінуючим є розсіяння на сплавному потенціалі, яке локалізоване в області варізонного шару на катоді і формує початковий хаотичний розподіл електронів на початку активної області (рис. 8).

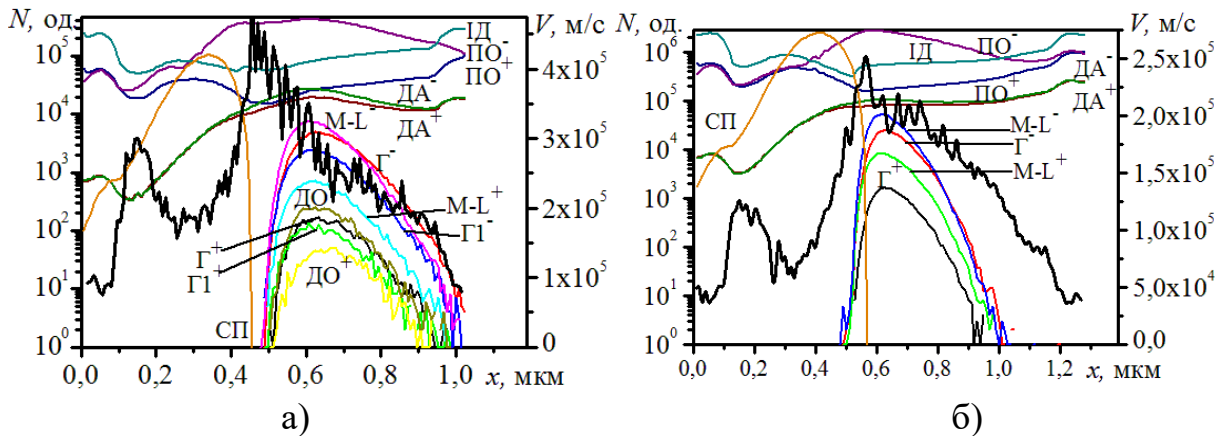


Рис. 8. Залежності кількості актів розсіяння та середньої швидкості електронів (пунктирна крива) від координати для структури з  $\delta = 0,67$  на основі  $\text{In}_{1-z}\text{Ga}_z\text{N}$  а), та  $\text{In}_{1-z}\text{Al}_z\text{N}$  б)

Досліджується вплив положення початку варізонного шару відносно краю  $n^-$  – області. Максимальна величина сплавного потенціалу відповідає діодам з варізонним шаром  $\text{In}_{1-z}\text{Al}_z\text{N}$ , у результаті чого за величиною СГПШ вони поступаються діодам з  $\text{In}_{1-z}\text{Ga}_z\text{N}$ , рис. 9.

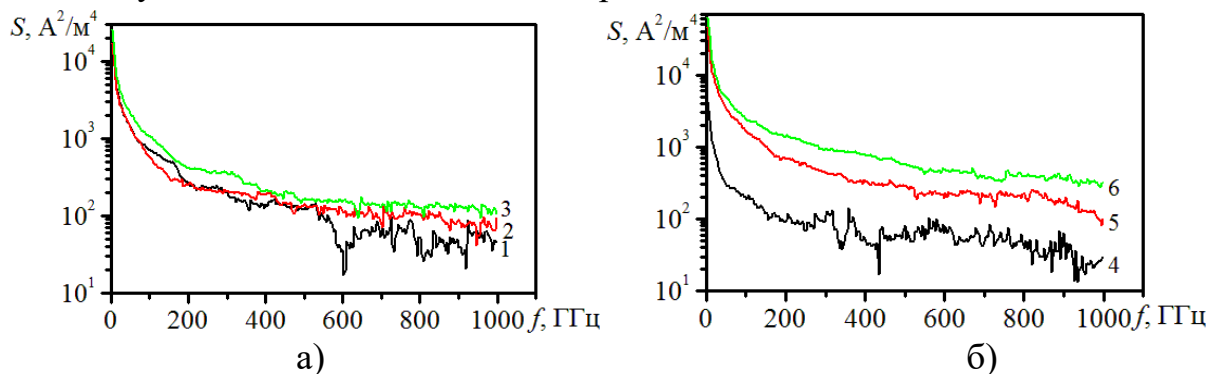


Рис. 9. Залежність рівня СГПШ від частоти діодів на основі  $\text{In}_{1-z}\text{Ga}_z\text{N}$  при напрузі живлення  $U = 7$  В: 1 –  $\delta = 0,67$ , 2 –  $\delta = 1$ , 3 –  $\delta = 1,5$ , 4 – 6 – початок варізонного шару відповідно в початку, середині та в кінці  $n^-$  – області

Найвищий рівень СГПШ відповідає діоду, у якого варізонний шар починається в кінці  $n^-$ -області. Виявлено, що у більшій частині розглянутого частотного діапазону  $S(f)$  зменшується з частотою як  $f^\alpha$  з  $\alpha = -1$ , що вказує на те, що головним фактором генерації шуму в діодах є дробові флуктуації.

Досліджується вплив напруги зміщення на генерацію шуму та показано, що характер залежностей  $S_f$  від величини напруги на характерних частотах зберігається практично у всьому діапазоні частот, рис. 10.

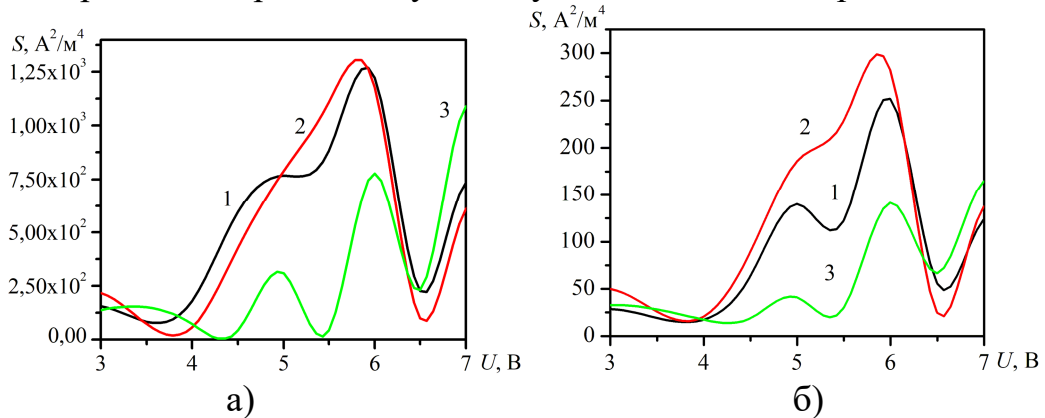


Рис. 10. Залежність рівня СГПШ від напруги для діодів на основі  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ : 1 –  $\delta = 0,67$ , 2 –  $\delta = 1$ , 3 –  $\delta = 1,5$ ; а)  $f = 95 \text{ ГГц}$ , б)  $f = 500 \text{ ГГц}$

Для усіх діодів можна виділити широкую область у якій рівень генерації  $S_f$  найвищий. Виявлено ділянки на залежності  $S_f(U)$  для яких характерне монотонне зростання  $S_f$  з підвищенням напруги, наприклад, рис. 10, крива 2. ( $U = 4 \dots 5,5 \text{ В}$ ), де залежність  $S_f(U)$  практично лінійна і відповідає зміні величини  $S_f$  більше, ніж на порядок, що може знайти застосування у радіометричних системах терагерцового діапазону у якості активного шумового навантаження, яке керується напругою.

В ДКСД на основі сполуки  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ , виявлено ефект генерації електромагнітних коливань з максимальною частотою близько  $180 \text{ ГГц}$  та максимумом ефективністю близько  $1,5 \%$ , рис. 11.

У п'ятому розділі розглядаються діоди, що мають структуру  $n^+-n^-(n)-n-n^+$  на основі матеріалу, склад якого змінюється від катоду до аноду так, що ширина забороненої зони зменшується в бік аноду. Основна ідея полягає в можливості виникнення ударної іонізації в обмеженій області діоду, що граничить з анодним контактом. Завдяки цьому, враховуючи малі розміри діодів, що розглядаються  $L \leq 1 \text{ мкм}$ , які суттєво менші за дифузійну довжину, нерівноважні носії заряду, що виникають в результаті ударної іонізації, будуть покидати діод переважно за рахунок виходу через контакти, що буде сприяти швидкому відновленню рівноваги.

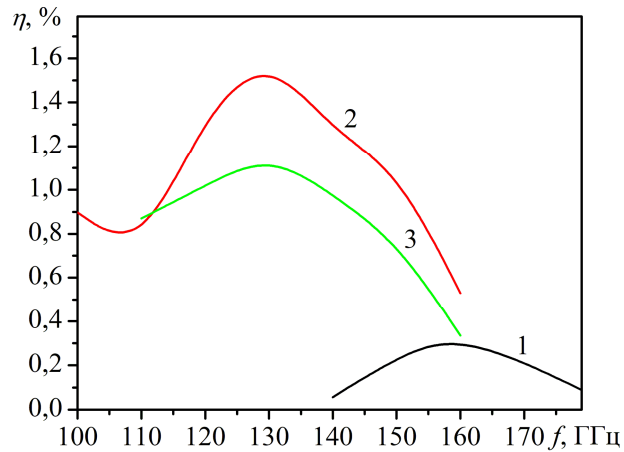


Рис. 11. Залежність ефективності генерації від частоти, для діодів з різним легуванням активної області: 1 –  $N_{d3} = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , 2 –  $N_{d3} = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , 3 –  $N_{d3} = 7 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$

Для дослідження можливості отримання генерації було розглянуто структури загальною довжиною від 0,5 до 1,2 мкм. Розподіл складу сплаву (молярна частка галію)  $z$  у  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ , вибрані у вигляді розподілів Гауса, рис. 12 а). Вольтамперні характеристики деяких діодів представлено на рис. 12 б).

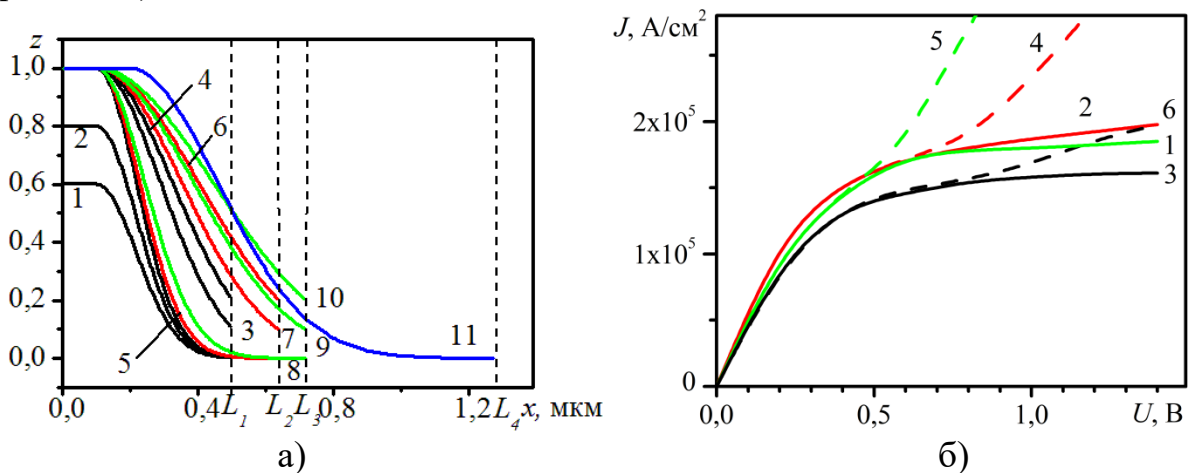


Рис. 12. Розподіл частки Ga проти координати у розглянутих діодах з різною довжиною; 1- 4 – 0.5 мкм; 5- 7 – 0.64 мкм; 8- 10 – 0.72 мкм; 11 – 1.28 мкм – а); залежність густини струму від напруги в розглянутих діодах без урахування УІ 1-3 (суцільні лінії) та з урахуванням УІ - 4-6 (штрихові лінії). 1, 4 – 0.5 мкм, зміна складу від 1 до 0; 2, 5 – 0.5 мкм, зміна складу від 1 до 0.2; 3, 6 – 0.72 мкм, зміна складу від 1 до 0.2 – б)

Отримані енергетичні характеристики діодів, у яких молярна частка Ga змінювалася від 1 до 0,2, концентрацією донорної домішки в активній області  $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  та загальною довжина складала 0,5 мкм, 0,64 мкм та 0,72 мкм наведені на рис. 13 а. Варто зауважити, що у діодів, характеристики яких приведено на рис. 13, молярна частка галію змінюється від 1 до 0,2, завдяки чому дірки, що виникають в результаті УІ, залишають діод в основному шляхом виходу у анодний контакт. Максимальне значення відповідає напрузі

зміщення 1,2 - 1,4 В і мало залежить від довжини діода. Енергетичні характеристики діодів довжиною 1,28 мкм показані на рис. 13 б).

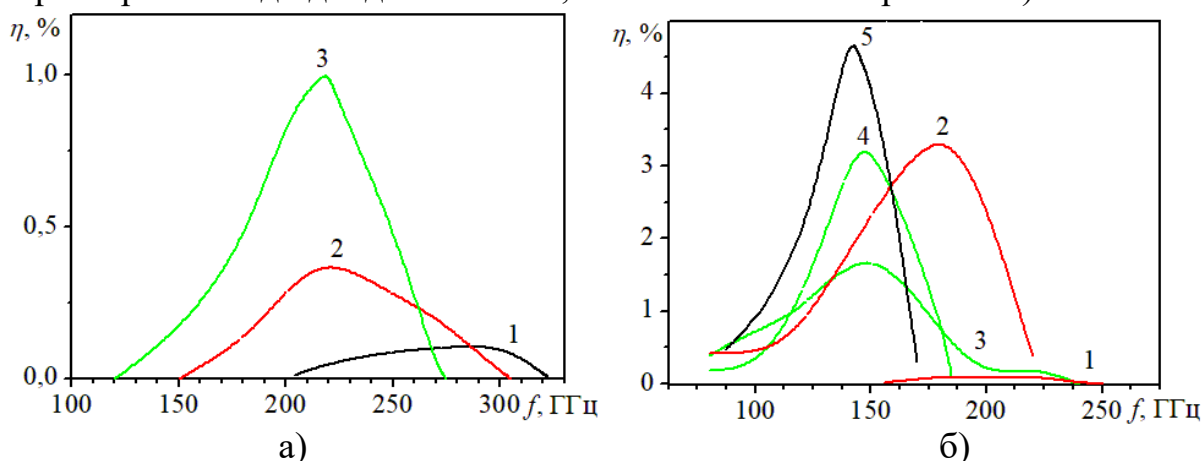


Рис. 13. Залежність максимальної ефективності генерації від частоти: а) отримана для діодів різної довжини, у яких зміна молярної частки  $z$  від 1 до 0,2: 1 – 0,5 мкм; 2 – 0,64 мкм; 3 – 0,72 мкм; б) для діодів довжиною 1,28 мкм. 1, 2 – молярна частка варіювала від 1 до 0; 3, 4, 5 – молярна частка Ga змінюється від 1 до 0,2. 1, 3, 5 – з врахування УІ; 2, 4 – без врахування УІ

Частотні параметри діода визначаються в тому числі співвідношенням концентрацій в активній області і анодному контакті, що показано на рис. 14, а) для коротких діодів довжиною 0,5 мкм, у яких концентрація на катодному і анодному контакті була  $n^+ = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ , концентрація в активній області змінювалася від  $5 \cdot 10^{22}$  до  $1,5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

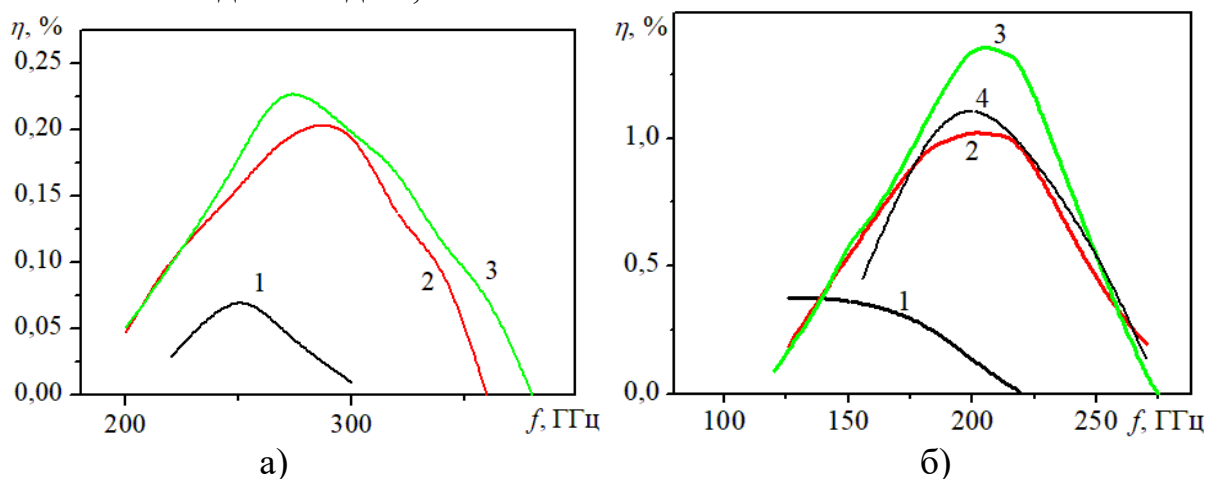


Рис. 14. Залежність максимального ККД генерації від частоти: а) для діодів з довжиною 0,5 мкм, що мають різні величини легування  $n$ -області: 1 –  $N_{d2} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{d2} = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{d2} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; б) для діодів з довжиною 0,72 мкм, що мають різні величини легування  $n$ -області: 1 –  $z = 1 \dots 0$ ; 2 –  $z = 1 \dots 0,1$ ; 3 –  $z = 1 \dots 0,2$ ; 4 –  $z = 1 \dots 0,3$

Як видно з отриманих залежностей, підвищення концентрації в активній області дає змогу отримати генерацію на частоті 380 ГГц (для діода з  $N_{d2} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Слід зазначити, що розподіл часки галію по довжині діода, як і для діодів, що розглянуто вище (рис. 12 крива 4), змінювався від 1 до 0,2.

Така зміна частки галію є оптимальною для отримання генерації в умовах УІ. На рис.14 б) показані частотні залежності максимальної (оптимізованої) ефективності генерації для діодів з довжиною 0,72 мкм, що мали різний розподіл складу у варізонному шарі.

В діодах, у яких розподіл молярної частки Ga на анодному контакті  $z_A \geq 0,2$ , демонструють кращі показники за ефективністю генерації і водночас стійку роботу в умовах УІ.

Розглянуто планарний діод з  $n^+$ - бічною границею, що являє собою класичну планарну структуру, на верхньому шарі якої вирощена вертикальна діодна структура з катодом, що розташовано на каналі діода, Рис. 15 а).

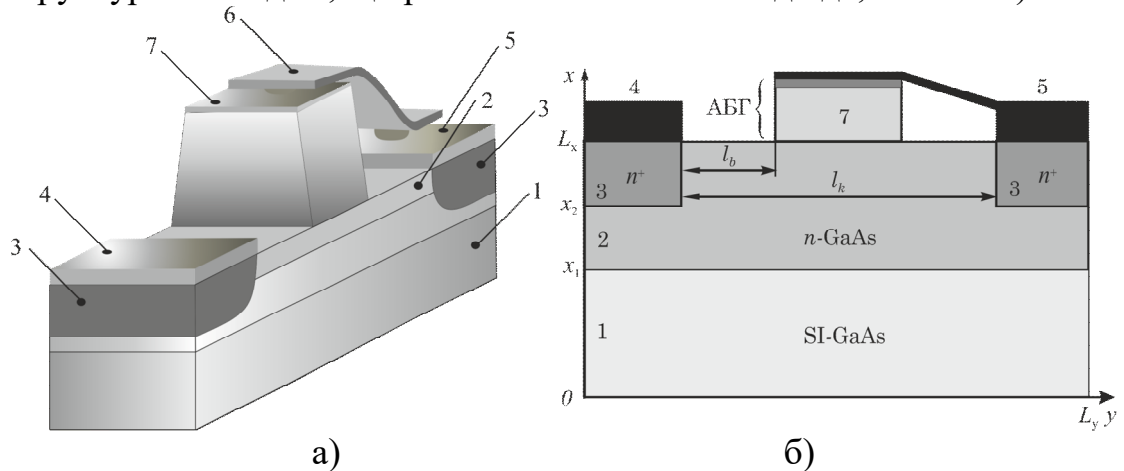


Рис. 15. Структура діода активною  $n^+$  - бічною границею а) та його двовірна модель б)

Бічна границя сама по собі є активним елементом, за допомогою якого можна отримати генерацію НВЧ коливань і у розглянутому варіанті представлена варізонною структурою, що було розглянуто вище, склад якої змінюється від GaAs на границі до InAs на верхньому контакті, що (рис. 12, крива 7). Слід відзначити, що верхній  $n^+$ -контакт до діода (7) і анод планарної частини діода (5) з'єднані між собою металевим контактом (6) і утворюють анод діода. Епітаксіальний шар (1) є n-GaAs. Основна частина діода містить нелеговану напівізолюючу підкладку (2), високолеговані контактні області ( $n^+$ ) катоду та аноду (3).

Двовимірна модель діода показано на рис.15 б). Для отримання розподілу електростатичного потенціалу в діоді з АБГ застосовувався все той же повний багатосітковий метод, що і в розділах 3, 4, який було модифіковано для урахування геометрії задачі (рис. 15. б). В області АБГ використовувалися та ж методика, що і при розрахунку структур з варізонною активною областю.

Струм через таку структуру є сумою струмів, що протікають через планарну частину діода та бічну границю, та визначається концентрацією електронів в епітаксіальному шарі і бічній границі, положенням границі відносно катодного контакту, співвідношенням площі контактів (4) і (5) до

площі границі (7). Останній фактор неможливо врахувати при двовірному моделюванні діода.

Розмір областей діода  $L_y = 1,28$  мкм та  $L_{y1} = 0,32$  мкм. Шар каналу має товщину  $0,16$  мкм і довжину  $0,98$  мкм. Концентрації донорів становили  $(2...6) \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  в області каналу, та  $10^{24} \text{ м}^{-3}$  в контактних областях.

Розподіл величини електростатичного потенціалу та напруженості електричного поля розглянутої структури приведено на рис. 16.

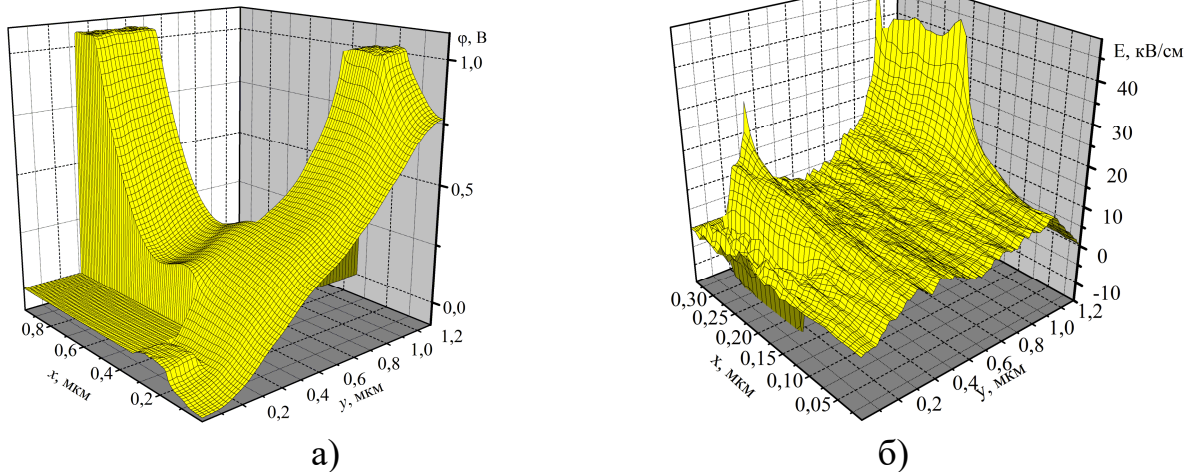


Рис. 16. Розподіл електростатичного потенціалу а) та складової напруженості електричного поля  $E_y$  б) при напрузі зміщення  $U_0 = 1$  В

Генерація коливань в діоді має немонотонну залежність від напруги зміщення. На рис. 17 показана частотна залежність оптимізованого значення ефективності генерації для двох фіксованих напруг живлення.

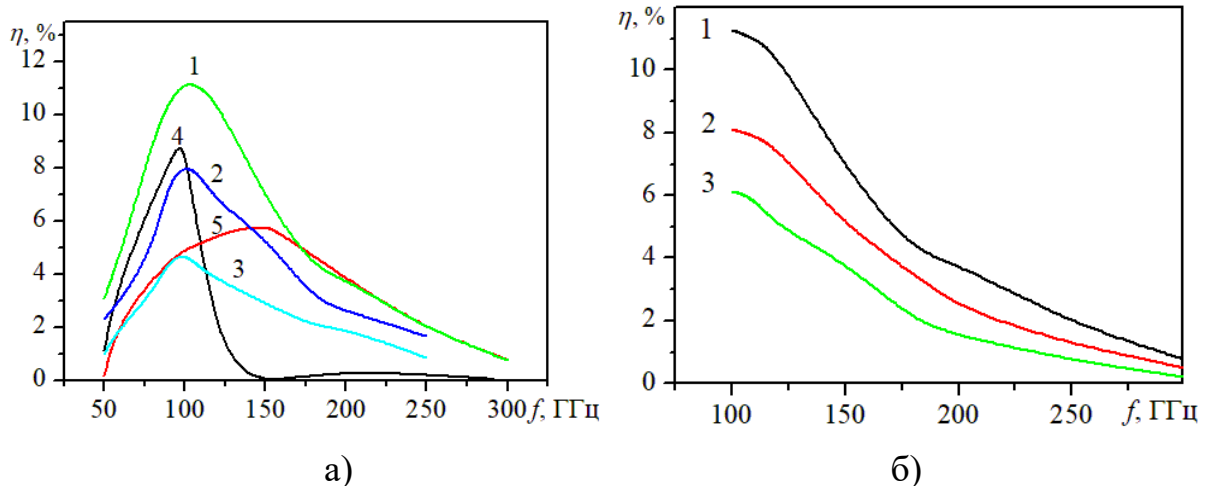


Рис. 17. Залежність максимальної ефективності від частоти для діода з активною границею, з довжиною  $1,28$  мкм, та  $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; а) при трьох значеннях концентрації 1–  $N_{d2} = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{d2} = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{d2} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  та фіксованій напрузі зміщення: 4-  $U = 4,5$  В; 5-  $U = 1,5$  В; б) при різних положеннях АГ відносно катодного контакту – 1-  $y_1 = 0,32$  мкм; 2-  $y_1 = 0,48$  мкм; 3-  $y_1 = 0,64$  мкм

Встановлено, що низькочастотна частина діапазону роботи діода реалізується при великих напругах зміщення і характеризується високим значенням ККД (близько 10 % та вище). Тоді як максимальна ефективність на високих частотах реалізується при малих напругах зміщення. Це відкриває перспективу використання таких структур як керованих напругою джерел випромінювання. Загальний діапазон роботи становить більше 250 ГГц при максимальній частоті вищій 300 ГГц.

На величину ефективності структури впливає положення границі на підкладці. На рис 17 б) показано залежність оптимізованого значення ефективності генерації в діапазоні 100 – 300 ГГц при різних положеннях бічної границі відносно катодного контакту. Найвища ефективність генерації спостерігається при положенні активної границі біля катоду на частоті прольоту електронів через активну область, що вказує на те, що генерація коливань відбувається переважно за рахунок негативної динамічної провідності саме планарної частини діоду.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розглянуто задачі створення нових активних напівпровідникових елементів для генерації шумових коливань та електромагнітного випромінювання в довгохвильовій частині терагерцового діапазону, основою роботи яких є використання ефекту ударної іонізації в напівпровідниках зі змінним складом (варізонні напівпровідники).

1. Вперше показано, що ударна іонізація, яка ініціюється носіями заряду лише одного типу, що характерно для варізонних структур, є перспективним ефектом для використання в надшвидкісних приладах та може розглядатися як спосіб покращення їх частотних характеристик, зокрема у якості механізму релаксації електронів за енергією. За умови, що коефіцієнт помноження носіїв заряду  $M \approx 1$ , що відповідає початку розвитку ударної іонізації, час затримки виникнення ударної іонізації в напівпровідникових сполуках, зокрема в InGaAs, InGaN та InAlN, може бути значно меншим характерних часів розсіяння.

2. Вперше показано, що використання варізонного напівпровідника в діодах з катодним статичним доменом дає можливість зменшити розміри області прольоту носіїв заряду за рахунок локалізації ударної іонізації у варізонному шарі та отримати шумову генерацію в частотній області терагерцового діапазону. Показано, що шумові діоди з варізонним катодним шаром на основі InGaAs/GaAs, InGaAs/InP, InGaN/GaN та InAlN/AlN за своїми шумовими характеристиками переважають діоди на основі гомогенних напівпровідників, а залежність спектральної потужності шуму в них від напруги дозволяє в перспективі застосувати їх у радіометричних системах терагерцового діапазону в якості активного шумового навантаження величиною якого можна керувати напругою.

3. Вперше досліджено можливість отримання надвисокочастотної генерації та визначено енергетичні та частотні характеристики діодних

структур GaAs-варізонний шар  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ , що працюють в умовах ударної іонізації у варізонному анодному шарі напівпровідника. Показано, що в такому елементі можна реалізувати режим одностороннього руху носіїв заряду різних знаків, що сприяє швидкій релаксації накопиченого в результаті ударної іонізації надлишкового об'ємного заряду. Моделювання роботи діодів показало можливість отримання генерації на частоті до 240 ГГц та максимальною ефективністю до 5 % (150 ГГц), використовуючи діоди з довжиною 1280 нм, до 300 ГГц з максимальною ефективністю до 1,2 % (220 ГГц), для діодів з довжинах 720 нм, до 380 ГГц з максимальною ефективністю до 0,25 % (270 ГГц) для діодів довжиною 500 нм.

4. Вперше запропоновано планарну конструкцію діода, що містить активний елемент з GaAs-варізонним шаром  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ , що розміщується на поверхні діода. Показано, що не дивлячись на те, що частота, на якій отримано максимальну ефективність, в такому елементі відповідає звичайному діоду з МПЕ, частотна межа роботи перевищує 300 ГГц в режимі генерації на основній частоті.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці у фахових виданнях України

1. Боцула О. В., Прохоров Э. Д., Свергун Д. С., Приходько К. Г. Влияние ударной ионизации на эффективность генерации коротких диодов на основе GaN // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2013. № 1067. С. 61–64. *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у створенні програм розрахунку, в написанні тексту статті).*
2. Боцула О. В., Приходько К. Г. Вольтамперные характеристики диодов с катодным статическим доменом, варизонным слоем и гетеропереходом // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2016. Випуск 25. С. 66–69. *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у створенні програм розрахунків, проведенні розрахунків, в написанні тексту статті).*
3. Боцула О. В., Приходько К. Г. Влияние ударной ионизации на генерацию диодов на основе нитридов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2017. Випуск 26. С. 71–74. *(Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків, участь у створенні програм розрахунків, в написанні тексту статті).*
4. Боцула О. В., Приходько К. Г., Шевченко О. Р. Частотні можливості варизонних структур з ударною іонізацією на основі GaInAs // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2017. Випуск 27. С. 85–89. *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у проведенні розрахунків, в написанні тексту статті).*

### Наукові праці у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

5. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.**, Zozulia V. A. InGaAs- based graded gap active elements with static cathode domain for terahertz range // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2019. Vol. 11, No 1. P. 01006-1–01006-5. DOI: 10.21272/jnep.11(1).01006 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: розробка математичної моделі, участь у проведенні розрахунків, в написанні тексту статті*).
6. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Generation of electromagnetic oscillations of submillimeter range by  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  diodes using impact ionization // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2019. Vol. 11, No 2. P. 02009-1– 02009-5. DOI: 10.21272/jnep.11(2).02009 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у створенні програми розрахунків, в написанні тексту статті*).

### Наукові праці у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

7. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.**, Zozulia V. A. Impact ionization in short  $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ -based diodes // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, No1. P. 61– 71. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i1 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: розробка математичної моделі, участь у проведенні розрахунків, в написанні тексту статті*).
8. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Heterostructure-based diode with cathode static domain // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, No10. P. 891– 01. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.60 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у проведенні розрахунків, в написанні тексту статті*).

### Наукові праці апробаційного характеру

9. Боцула О. В., **Приходько К. Г.** Діод з катодним статичним доменом на основі гетеропереходу GaAs-AlGaAs для генерації НВЧ – шуму // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2015», 1-3 квітня, 2015: Збірник тез. Київ, Україна, 2015. с.111 – Доповідь. (*Особистий внесок здобувача: участь в обробці й аналізі даних та підготовці тез і доповіді для виступу*).
10. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Heterostructure-based diode with the cathode static domain // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016, June 21–24, 2016: CD of abstracts. Kharkiv, Ukraine, 2016. E25 – Poster. (*Особистий внесок здобувача: участь в отриманні результатів роботи і підготовці матеріалів для тез*).
11. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Static characteristics of the graded gap and heterojunction diodes containing the cathode static domain // UWBUSIS'2016 : 8th Intern. Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 5–11, 2016: Conference Paper. Odessa, Ukraine, 2016. P. 163–

166 – Oral. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2016.7724178 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь у створенні програм для обробки даних, проведенні розрахунків, підготовка тез для публікації та доповіді*).

12. **Prykhodko K. H.**, Zozulia V. O., Botsula O. V. Graded band gap ingaas diodes for terahertz applications // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF–2017, October 17–20, 2017: Conference Paper. Lviv, Ukraine, 2017. P. 291–294 – Oral. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126637 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь у створенні програм для обробки даних, проведенні розрахунків, підготовка тез для публікації та доповіді*).

13. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.**, Zozulia V. O. Monte Carlo modeling of the diodes with lateral resonant tunneling border // 9-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS-2018, September 4–7, 2018: Conference Paper. Odessa, Ukraine, 2018. P. 256–259 – Poster. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520067 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь в отриманні результатів роботи і підготовці матеріалів для тез*).

14. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Graded band diode for noise generation in terahertz range // 9-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS-2018, September 4–7, 2018: Conference Paper. Odessa, Ukraine, 2018. P. 336–339 – Oral. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520183 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь в обробці й аналізі даних та підготовці тез і доповіді для виступу*).

15. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.**, Zozulia V. O. Diodes with lateral  $n^+-n$  –border // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019, July 2–6, 2019: Conference Paper. Lviv, Ukraine, 2019. P. 752–755 – Poster. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879884 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь в отриманні результатів роботи і підготовці матеріалів для тез*).

16. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** GaN-based planar heterostructure diodes for high frequency generation // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019, July 2–6, 2019: Conference Paper. Lviv, Ukraine, 2019. P. 788–791 – Poster. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879818 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь в отриманні результатів роботи і підготовці матеріалів для тез*).

17. Botsula O. V., **Prykhodko K. H.** Graded Band InGaN- Based Diode for Noise Generation in Terahertz Range // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2020, September 21–25, 2020: Conference Paper. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 925–928 – Oral. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252763 (**Scopus**) (*Особистий внесок здобувача: участь в обробці й аналізі даних та підготовці тез і доповіді для виступу*).

18. Botsula O., **Prykhodko K.** Sub-THz and THz Noise Generation by Diode Heterostructures under Impact Ionization // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2020, September 21–25, 2020: Conference Paper. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 1103–1107 – Oral. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252772

(Scopus) (Особистий внесок здобувача: участь в обробці й аналізі даних та підготовці тез і доповіді для виступу).

### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

19. Напівпровідниковий діод для генерації НВЧ шуму: пат. 127847 Україна. № u201802061; заявл. 28.02.2018; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16/2018. (Внесок здобувача: пошук та аналіз аналогів, складання формули винаходу).

20. Напівпровідниковий діод для генерації електромагнітних НВЧ коливань: пат. 132057 Україна. № u201808876; заявл. 21.08.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3/2019. (Внесок здобувача: пошук та аналіз аналогів, складання формули винаходу).

### **АНОТАЦІЯ**

**Приходько К.Г. Активні напівпровідникові елементи для генерації в терагерцовому діапазоні.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню можливостей підвищення граничних частот роботи напівпровідникових приладів для використання їх для генерації електромагнітних коливань та шуму в терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах.

Розроблено математичну модель транспорту носіїв заряду, що враховує ударну іонізацію та неоднорідний розподіл складу. Досліджено початкову стадію ударної іонізації в напівпровідникових сполуках InGaAs, InGaN та InAlN. Було досліджено генерацію шуму в коротких діодах з катодним статичним доменом, що містив варізонний шар на катоді. Вперше досліджено можливість отримання надвисокочастотної генерації та визначено енергетичні та частотні характеристики структур GaAs – варізонний шар  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ , що працюються в умовах ударної іонізації у варізонному анодному шарі. Запропонована та досліджена планарна структура з бічною  $n^+$ -границею на основі варізонного GaInAs напівпровідника. Частотна межа генерації структури перевищує 300 ГГц на основній частоті.

Отримані результати дозволять удосконалити існуючі джерела терагерцового діапазону та створити нові. Отримані шумові характеристики ДКСД свідчать про можливість їх використання у радіометричних системах в якості опорних джерел шуму.

Ключові слова: гетероперехід, варізонний шар, напруженість електричного поля, ударна іонізація, резонансно-тунельна границя, електромагнітне поле.

## ABSTRACT

**Prykhodko K.H. Active semiconductor elements for generation in the terahertz range. – Manuscript.**

Thesis for the Candidate Degree in Physics and Mathematics, speciality 01.04.03 – radiophysics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to investigate of increasing of limiting operation frequencies of semiconductor devices using for generation of electromagnetic oscillations and noise in terahertz and subterahertz ranges. Development of novel solid state sources of electromagnetic oscillation and modification of existing active elements by using of graded-gap semiconductors and impact ionization effects are considered.

A mathematical model of charge carrier transport in semiconductors has been developed, taking into account impact ionization and inhomogeneous composition distribution. 2- D modeling of diode has been performance. It is based on synchronous Ensemble Monte Carlo simulations and multigrid technica of solving Poisson's equation. Nonparabolic dependences of energy on momentum in conduction band valleys were used for modeling. All actual scattering mechanisms as an optical deformation potential, acoustic deformation potential, intervalley scattering between equivalent and nonequivalent valleys, polar optical phonon scattering, piezoelectric scattering, alloy disorder scattering and ionized-impurity scattering to be used in modeling were taken into account. The calculation results of kinetic characteristics of some semiconductor obtained by the model were compared with noun experimental and numerical results.

The initial stage of impact ionization development in InGaAs, InGaN and InAlN semiconductor compounds has been studied. The spatial distributions of impact ionization acts for a charge carriers ensemble were analyzed to determined a characteristic mean distance of carrier moving before ionization(dead space) and a delay time of the impact ionization. Time response and space parameters associating with impact ionization in homogenous and graded-gap semiconductors have been obtained. Response times of impact ionization in initial stage can be less than the characteristic scattering times in the considered semiconductor compounds was shown.

Possibility of obtaining noise generation in short diodes with a cathode static domain containing a graded-gap layer in the near-cathode where material changes from narrow-gap semiconductor at a cathode to wide-gap one in the end of the graded-gap layer has been researched. It is shown that InGaAs/GaAs, InGaAs/InP, InGaN/GaN та InAlN/AlN diodes with graded-gap cathode layer have batter noise characteristics then diodes on the basic homogenous semiconductors. Existing of wide bias voltage ranges in InGaN diodes where dependence of the noise power spectral density on bias voltage is almost linear was demonstrated. Moreover, in this range the magnitude of noise power spectral density is changed more than an order. Such diodes can be used as voltage control active noise loads in radiometric systems of both subterahertz and terahertz ranges.

Graded-gap diode structure for generation in long wave part of terahertz range is proposed. It contains the graded gap layer with wide-gap semiconductor at the beginning of the active region and narrow-gap semiconductor at the anode. This construction permits to localize impact ionization close to anode contact. Realization of the one-way moving of positive charge carriers and negative charge carriers is demonstrated as way of rapid relaxation of excess charge. It is established that local space impact ionization can lead to decreasing of upper energy valleys occupation and to improve frequency properties of devices. Possibility of ultrahigh-frequency generation has been first investigated. Energy and frequency characteristics of GaAs -  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ - graded gap layer- structures operating under impact ionization conditions in the graded gap anode layer of the semiconductor have been determined. Electromagnetic wave generation on frequencies higher than 300 GHz in fundamental frequency generation mode has been shown.

A planar structure with a  $n^+$ - lateral boundary based on a graded- gap GaInAs semiconductor is proposed and investigated. It was shown that the position of active element at side plane of the planar diode can lead to extend of operation frequency range of the diode. The frequency corresponding to the maximum efficiency in such element corresponds to a conventional transfer electron diode, but significantly extended to the high frequency range. Frequency limit of this structure exceeds 300 GHz in fundamental frequency generation mode.

The obtained results will allow to improve characteristics of the existing terahertz range sources and to create new ones. The results of noise characteristics of the static cathode domain diode indicate a possibility of using such structures in radiometric systems as a noise reference sources for measurement of noise characteristic of amplifiers and receivers in terahertz range.

Keywords: heterojunction, graded layer, electric field strength, impact ionization, resonant tunneling border, electromagnetic field.