**ВІДГУК**

***офіційного опонента на дисертаційну роботу Приходька Кирила Геннадійовича "Активні напівпровідникові елементи для генерації в терагерцовому діапазоні", подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.***

**Актуальність теми дисертації.** Дисертаційну роботу Приходька Кирила Геннадійовича присвячено актуальній на сьогоднішній день тематиці - генерації електромагнітних коливань та шуму в терагерцовому діапазоні. Розвиток систем, що активно використовують терагерцове випромінювання, зокрема біомедичних систем, систем візуалізації та безпеки, в наш час безперервно зростає.

В роботі досліджуються малогабаритні напівпровідникові прилади, що мають змінний розподіл складу матеріалу. Основна увага в цих приладах приділяється ударній іонізації, яка може бути застосованою для покращення частотних властивостей існуючих та створення нових твердотілих джерел терагерцового випромінювання. Автором доведено, що низькоінтенсивна локалізована ударна іонізація може бути використана для підвищення швидкодії напівпровідникових приладів та створення малогабаритних активних елементів.

Таким чином, обрана тема дисертації є безперечно актуальною і представляє значний науковий та практичний інтерес.

**Наукова новизна результатів дослідження** полягає у наступному:

1. Вперше показано, що локалізована у просторі ударна іонізація, що виникає у варізонних напівпровідниках під дією електричного поля низької напруженості призводить до покращення частотних властивостей терагерцових приладів.

2. Вперше показано, що розглянута конструкція діода з варізонним анодним шаром на основі InGaAs- напівпровідника, що працює у режимі обмеженої ударної іонізації, може забезпечувати односторонній рух носіїв заряду різних знаків та дає можливість отримати частоти генерації не менш ніж 300 ГГц. Ці частоти перевищують части генерації традиційних приладів на основі GaAs та InP, при їх роботі на основній частоті.

3. Вперше запропонована конструкція активних діодів з катодним статичним доменом, у яких шар, що межує з катодним контактом являє собою варізонний напівпровідник. Доведено, що ці діоди мають перевагу над діодами на основі гомогенних напівпровідників. Автором показано, що шумові характеристики діодів з варізонним шаром можуть керуватися електричною напругою. У розглянутих структурах на основі $Ga_zIn_{1-z}As$ виявлено можливість генерації електромагнітних коливань на частотах до 180 ГГц.

4. Вперше запропонована планарна конструкція діода з активним елементом на основі варізонного напівпровідника, що має широкий частотний діапазон роботи – від декілька гігагерц до 300 ГГц в режимі генерації на основній частоті.

**Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації.** Для розв'язання поставлених задач автор у своїй роботі використовує відому сучасну методику математичного моделювання твердотілих приладів на основі багаточастинкового методу Монте – Карло, яка добре зарекомендували себе саме для задач, які були розглянуто. Автором враховано всі важливі аспекти, що пов'язані з моделюванням приладів, у яких використовується ефект між долинного перенесення електронів. Зокрема, використано багатодолинна модель зони провідності, враховано ефекти непараболічності та усі суттєві механізми розсіювання носіїв заряду. Дисертантом проведено порівняння проведених розрахунків з відомими результатами на основі гомогенних напівпровідників.

Застосована методика дозволяє автору з достатньою точністю моделювати кінетичні процеси в напівпровідниках та приладах на їх основі та досягти кінцевої мети досліджень.

**Наукове та практичне значення роботи.** Робота носить теоретичний характер та містить розв'язання актуальних задач, які несуть велику наукову цінність для фізико-математичних та технічних наук. Дисертація має також велику практичну значимість. Отримані результати моделювання діодів з катодним статичним доменом можуть бути використані для створення малогабаритних джерел шуму, а також активних навантажень в радіометричних системах міліметрового та терагерцового діапазонів. Запропоновані конструкції діодів з варізонним шаром та з активною бічною границею можуть знайти практичне

застосування при створенні генераторів електромагнітних коливань на частоті не нижчі 300 ГГц. Розроблена та вдосконалена в роботі математична модель може використовуватися для досліджень напівпровідникових приладів та аналізу надвисокочастотних процесів в них. Вона буде корисною в процесі розробки швидкодіючих надвисокочастотних напівпровідникових приладів.

Автореферат повністю відображає зміст та результати дисертаційної роботи.

Матеріали дисертаційної роботи представлені у 20 наукових працях, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України, 2 з яких входять до науко метричної бази Scopus, та 2 статті зарубіжних виданнях, що входять до науко метричної бази Scopus; 10 наукових працях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації. Автор має 2 патенти України. У цих роботах автор брав участь при постановці та розв'язанні задач, обробці і аналізі результатів. Автору належить розробка нових алгоритмів та програмна реалізація математичної моделі електронного транспорту. Всі апробаційні матеріали Приходько К.Г. представляв особисто.

За змістом дисертації можна зробити наступні **зауваження:**

1) В дисертації слід було більш детально вказати які переваги має метод Монте-Карло над іншими методами знаходження рішень нестаціонарних кінетичних рівнянь у активних напівпровідникових елементах, які містять варізонні шари.

2) У тексті роботи шумові властивості діодів оцінювалися шляхом обчислення величини спектральної густини потужності шуму. Втім, відомо, що важливим параметром, який характеризує двополюсник як джерело струму, є еквівалентна шумова температура, величина якої дала б змогу порівняти структури, що досліджувалися, з відомими джерелами шуму. Таку оцінку доцільно б було зробити, враховуючи, що методика обчислення імпедансу діоду, величина якого необхідна для визначення еквівалентної шумової температури, як видно із публікацій, доступна дисертанту.

3) У роботі автор недостатньо приділив увагу теоретичному опису процесів розсіяння дірок в варізонних напівпровідниках, на відміну від електронів, які описані досить повно.

4) На рисунку 3.5 відсутня інформація про параметри ударної іонізації для проміжних значень молярної частки індію.

**Загальний висновок.** Зазначені зауваження не знижують загальну позитивну оцінку роботи. Дисертаційна робота Приходька Кирила Геннадійовича «Активні напівпровідникові елементи для генерації в терагерцовому діапазоні» є завершиним науковим дослідженням, в якому отримані нові практично значимі результати. Достовірність результатів, що представлені автором, є обгрунтованими. Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи. За змістом і оформленням дисертаційна робота і автореферат відповідають вимогам п.п. 9, 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів». По тематиці проведених досліджень, змісту та отриманим результатам дисертація Приходька К.Г. відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Офіційний опонент, завідувач відділом твердотільної електроніки
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України,
доктор фізико-математичних наук, професор

**М.М. Білецький**

Підпис завідувача відділом твердотільної електроніки
Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України,
доктора фізико-математичних наук, професора М.М. Білецького засвідчую:

Т.В.О. ученого секретаря ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук **С.С. Пономаренко**

ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ ім. О.Я.УСИКОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ Ідентифікаційний код 03534593 Місто Харків

14.09.2021 р.

Відгук одержано 15 вересня 2021р
Вчений секретар спецради Д64.051.02
/Юрій Аркуша/