

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію

Власенка Сергія Олександровича

«Взаємодія інтенсивних стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями надрозмірних електродинамічних структур у черенковських генераторах і підсилювачах субтерагерцового та терагерцового діапазонів», подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність дослідження

Розробка підсилювачів і генераторів електромагнітного випромінювання субтерагерцового та терагерцового діапазонів є вкрай важливою та актуальною задачею через зростаючу кількість застосувань цього випромінювання і в той же час нестачі джерел випромінювання в цьому діапазоні з задовільними параметрами вихідного випромінювання, вартості, компактності тощо, що відомо як «терагерцове провалля». Створення ефективних джерел у терагерцовому діапазоні може надати поштовх до розвитку деяких наукових напрямків у біології, хімії, фізиці, матеріалознавстві. У дисертаційній роботі Власенка С. О. досліджуються шляхи розробки черенковських електронно-вакуумних приладів субтерагерцового та терагерцового діапазонів з покращеними вихідними характеристиками та вивчаються особливості фізичних процесів електронно-хвильової взаємодії. Таким чином, оптимізація режимів роботи клинотронів субТГц і ТГц діапазонів, а також знайдення нових режимів генерації та підсилення коливань у черенковських приладах для просунення в більш високочастотний діапазон з підвищеним рівнем потужності, що розглянуто в дисертаційній роботі, є актуальною задачею.

Метою наукових досліджень дисертаційної роботи є встановлення оптимальних режимів роботи клинотронів субТГц і ТГц діапазонів з

урахуванням особливостей, що притаманні цим приладам, а саме тепловими навантаженнями, надрозмірними багатомодовими електродинамічними структурами тощо. Також метою досліджень, проведених у роботі, є знайдення нових режимів генерації та підсилення коливань у черенковських приладах для просунення в більш високочастотний діапазон з підвищеним рівнем потужності.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи

Наукова обґрунтованість результатів досліджень базується на апробованих і надійних методах моделювання та експериментального дослідження. При цьому результати теоретичного аналізу та числового моделювання порівнювались як між собою, так і з експериментальними результатами, їхня узгодженість і фізичне обґрунтування додатково підтверджує достовірність отриманих результатів і висновків. Усі результати та висновки, відображені в дисертації, були опубліковані в рецензованих високореєтингових журналах і доповідались на міжнародних конференціях і семінарах.

Наукова новизна результатів, викладених у дисертаційній роботі Власенка С. О., визначається наступним:

1. Вперше визначено вплив транспортування інтенсивного стрічкового електронного потоку в електродинамічних системах клинотронів субТГц і ТГц діапазонів на умови генерації, що дозволило отримати: а) широкосмугову генерацію з помірною вихідною потужністю або б) генерацію з максимальною потужністю в одномодовому режимі та показано фізичні причини цього явища.
2. Вперше визначено вплив теплових ефектів в електродинамічних системах клинотронів субТГц і ТГц діапазонів у результаті осідання інтенсивного стрічкового електронного потоку на спектральні характеристики випромінювання. Показано, що контроль за температурою

- охолоджувальної рідини дозволяє реалізувати стабільність потужності випромінювання на рівні 3% і стабільність робочої частоти на рівні $5 \cdot 10^{-5}$.
3. Вперше теоретично та експериментально отримано геометрію електродинамічної системи ТГц клинотрона з підвищеною ефективністю хвилевідного виводу енергії в широкому діапазоні частот.
 4. Вперше продемонстровано підсилення електромагнітних хвиль у черенковському приладі, що працює на гібридних об'ємно-поверхневих хвилях. Результати моделювання вказують на посилення слабкого сигналу до 30 дБ і майже 5% електронного ККД для структури довжиною 41 мм W-діапазону. Експериментально отримано посилення до 12 дБ на частоті 97,95 ГГц в односекційному підсилювачі, що відповідає результатам моделювання, та продемонстровано смугу частот до 2 ГГц для певної робочої напруги в діапазоні від 3,7 кВ до 3,9 кВ і струму пучка 60 мА.
 5. Запропоновано конфігурацію біперіодичної гребінки, яка підтримує збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод. Показано, що така гребінка забезпечує не тільки підвищений опір зв'язку в ТГц діапазоні, а також широкий діапазон перестроювання по частоті (15–20%).
 6. Запропоновано схему ТГц генератора з покращеними характеристиками, в якій електронний потік резонансно збуджує випромінювання Сміта-Перселла (ВСП) двох порядків, при цьому дифракційний порядок, що поширюється тільки в діелектрику, використовується для зворотного зв'язку, а дифракційний порядок у вільному просторі служить вихідним випромінюванням.

Список публікації здобувача за матеріалами дисертації складається з 14 наукових публікацій, із них у 5 наукових статтях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та Scopus, та в 9 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях, що індексовано базою Scopus.

Структура і зміст дисертації. Загальний обсяг дисертації складає 159 сторінок, що включає в себе: анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, перелік використаних джерел та перелік публікацій автора.

У *вступі* обговорюються нагальні проблеми сучасної терагерцової вакуумної електроніки та надається обґрунтування актуальності проведених досліджень, визначено мету й задачі та наведено наукову новизну і практичне значення результатів роботи. Також зазначено ступінь їхньої апробації та наведено перелік публікацій за темою дисертації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено огляду поточного стану розробок електронно-вакуумних приладів ТГц діапазону, де особливу увагу прикуто до компактних черенковських приладів. Окремо розглянуто шляхи формування та транспортування електронних потоків, шляхи боротьби з конкуренцією мод у надрозмірних структурах. Також обговорюються вимоги до параметрів вихідного випромінювання приладів для їхніх практичних застосувань.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розробці та дослідженню робочих характеристик клинотрона безперервної дії в діапазоні частот 161–178 ГГц. Також розглядаються аспекти застосування цього клинотрона для юстування квазіоптичної лінії передачі енергії модернізованої системи діагностики колективного томсонівського розсіяння на стеллараторі в Інституті фізики плазми Макса Планка у м. Грайфсвальд, Німеччина. Особливу увагу прикуто до теплових навантажень елементів гребінки, методу юстування приладу для отримання окремо широкої смуги та максимальної потужності генерації.

У *третьому розділі* роботи запропоновано та досліджено модифіковану конструкцію терагерцового клинотрона, що забезпечує одномодове випромінювання у вихідному надрозмірному хвилеводі. В результаті теоретичних досліджень і чисельного моделювання «холодної» електродинамічної системи клинотрона діапазону частот 280–335 ГГц показано, що передача та ефективне перетворення основної поверхневої

хвилі в моді TE_{10} надрозмірного вихідного хвилеводу відбувається в діапазоні частот від 297 до 323 ГГц з коефіцієнтом проходження в межах від -8 до -4 дБ, в той час як проходження в анодну апертуру є значно нижчим.

У четвертому розділі досліджується підсилення та генерація електромагнітних хвиль у режимі збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод. Так, теоретично та експериментально продемонстровано ефективне підсилення біжучої хвилі в W-діапазоні зі стрічковим електронним потоком, що вказує на перспективність такого підходу і для більш високих частот. Також у розділі запропоновано та теоретично досліджується схема ТГц генератора, в якій електронний потік резонансно збуджує випромінювання Сміта-Перселла двох порядків: дифракційне випромінювання, що поширюється тільки в діелектрику, використовується для зворотного зв'язку, а дифракційний порядок у вільному просторі служить вихідним випромінюванням. Показано, що такий підхід дозволяє отримати підвищену вихідну потужність випромінювання та широку смугу частотного перестроювання.

Практичне значення наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі Власенка С. О., полягає в розробці компактних електронно-вакуумних приладів субТГц і ТГц діапазонів, що можуть бути використані та навіть вже використовуються в практичних застосуваннях, зокрема у ЯМР–ДПЯ спектроскопії, діагностиці плазми, у матеріалознавстві, медицині та інших галузях.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. Представлені в роботі результати не порушують правил академічної доброчесності. Запозичені результати інших авторів мають посилання на відповідне першоджерело.

Зауваження до дисертаційної роботи. Робота виконана на високому професійному рівні. Разом з тим, можна висловити такі зауваження та побажання:

1. У розділі 3 наведено модовий склад клинотрона з модифікованою шириною, однак не наведено відповідних даних для традиційної геометрії. Було б доцільно навести таке порівняння, щоб наочно продемонструвати переваги запропонованого рішення, зокрема «збільшення модової чистоти».
2. У випадку розгляду схеми генерації з зворотним зв'язком по хвилі в діелектрику не враховуються діелектричні втрати. Хоча для попереднього аналізу знехтування діелектричними втратами є прийнятним, груба оцінка їхнього впливу в порівнянні з омичними втратами в гребінці зробила б модель, представлену в Розділі 4, більш повною та обґрунтованою.
3. У тексті дисертації трапляються незначні друкарські помилки (напр., «підвищенні рівні потужності» замість «підвищені рівні потужності» на стор 3, «впевнено» замість «впевнено» на стор. 16, «при створені» замість «при створенні» на стор. 97, «при забезпечені» замість «при забезпеченні» на стор. 98) та деякі стилістичні неточності.

Висловлені зауваження не є принциповими, не знижують високої наукової та практичної цінності роботи і можуть розглядатися як побажання для подальших досліджень автора.

Висновок щодо відповідності дисертації становленим нормам.

Вважаю, що зміст дисертаційної роботи Власенка С. О. «Взаємодія інтенсивних стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями надрозмірних електродинамічних структур у черенковських генераторах і підсилювачах субтерагерцового та терагерцового діапазонів» дає підставу вважати її завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам наказу

МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Власенко Сергій Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 « Фізика та астрономія».

Рецензент

Доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу радіофізики твердого тіла

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України



Юрій АВЕРКОВ

Підпис Ю. О. Аверкова засвідчую:

в. о. вченого секретаря

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України

кандидат фізико-математичних наук



Олена КРИВЕНКО