

ВІДГУК

офіційного опонента Воловичева Ігоря Миколайовича
на дисертаційну роботу Хуторяна Едуарда Михайловича
“Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового
діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим
зворотнім зв'язком”,
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Актуальність теми дисертаційної роботи Е. М. Хуторяна визначається важливістю створення нових фізичних моделей та механізмів, що дозволяють підвищити вихідну потужність та ККД в електронно-вакуумних приладах (ЕВП) субтерагерцового (суб-ТГц) та терагерцового (ТГц) діапазону (100 ГГц - 1 ТГц). Вирішення цих задач є важливим не лише для отримання нових знань, а й для розвитку наукових напрямків та практичних застосувань, які використовують ТГц випромінювання. В роботі вирішується задача підвищення електронно-хвильової взаємодії, зворотного зв'язку та ефективності виводу випромінювання в двох типах електронно-вакуумних генераторів - гіротроні та черенковському генераторі. Дослідження цих приладів об'єднує спільна фізична проблема: для обох цих типів ЕВП ефективність зворотного зв'язку зменшується в ТГц діапазоні через омичні втрати, конкуренцію мод в надрозмірних структурах, тощо. Незважаючи на сучасні методи збільшення ефективності генерації в ТГц діапазоні, вони є недостатніми. Тому модифікація таких ЕВП та створення нових фізичних моделей електронно-хвильової взаємодії в них, аналіз режимів для знаходження конфігурацій з оптимальною взаємодією електронного потоку з електромагнітним полем (що саме проводиться в дисертаційній роботі) є важливим та актуальним.

2. Ступінь наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації та їх достовірність

В дисертаційній роботі містяться результати, які було отримано за допомогою створених Е.М. Хуторяном теоретичних моделей, чисельного моделювання та експериментальних досліджень. Теоретичні моделі базуються як на строгих методах, так і на наближених перевірених методах, що добре відповідають побудованим моделям. Чисельне моделювання проводилось перевіреними та надійними комерційними пакетами та зі знанням особливостей сіткових методів, коректного завдання кроків, граничних умов, параметрів матеріалів, тощо. Всі чисельні результати ретельно аналізувались з погляду на їх фізичність, а також порівнювались з аналітичними результатами побудованої теорії та загальновідомими результатами. Експериментальні дослідження проводились на сучасному обладнанні із використанням класичних методів вимірювання параметрів електромагнітного випромінювання. Всі отримані результати, що наведено в дисертації, пройшли рецензування в фахових

журналах з високим рівнем рецензування та доповідались на міжнародних конференціях і семінарах за участі провідних вчених зі світовим рівнем в галузі фізичної електроніки та радіофізики. Таким чином, можна зробити висновок про високий ступінь **наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації та їх достовірність.**

3. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та переліку публікацій автора за темою роботи. Обсяг дисертації становить 355 сторінок, зі 128 рисунками, 9 таблицями та 346 бібліографічними джерелами.

У вступі (стор. 24-36), виходячи з поточного стану проблем генерації електромагнітного випромінювання в ТГц діапазоні, формулюється мета і задачі досліджень, а також наукова новизна та практичне значення одержаних результатів та перелік публікацій за темою дисертації.

У першому розділі (стор. 37-55) більш глибоко аналізується поточний стан проблем генерації ТГц випромінювання та вплив цих проблем та стан справ в інших наукових областях та практичних галузях, які потребують джерела ТГц випромінювання. Також детально описується стан розвитку ТГц електронно-вакуумних приладів, зокрема причини значного зменшення їх ефективності в ТГц діапазоні та можливості вирішення цих проблем.

У другому розділі (стор. 56-83) теоретично та експериментально досліджується вплив часткового відбиття вихідного випромінювання назад у резонатор на вихідну потужність, електронний ККД та частоту. Показано, що поява додаткового резонатору довгої лінії між основним резонатором та рефлектором, суттєво збільшує вихідну потужність при циклотронному резонансі з прямою хвилею. Причому вихідна потужність в цьому випадку стає значно більшою за потужність при резонансі зі зворотною хвилею, що зазвичай використовується для частотного перестроювання.

У третьому розділі (стор. 84-118) досліджується двопучковий гіротрон та особливості його роботи на першій (в діапазоні 160-400 ГГц) та другій (в діапазоні 0.72-0.78 ТГц) циклотронних гармонік (ЦГ). Наведено експериментально знайдені особливості роботи такого гіротрона на першій ЦГ, зокрема різкий зріст вихідної потужності в певному діапазоні магнітних полів. Для опису цих особливостей побудовано фізичну та математичну модель, проводиться чисельний аналіз, який підтверджує відповідність запропонованої моделі експериментальним даним. Знайдено умови, що сприяють розширенню частотного діапазону генерації першої ЦГ або погіршують умови її збудження за рахунок збудження другої ЦГ.

У четвертому розділі (стор. 119-190) досліджуються можливості стабілізації вихідних параметрів гіротрона та модуляції частоти. Також досліджуються впливи зміщення елементів структури гіротрона та інших факторів, що можуть змінюватись з часом (прискорювальна напруга,

температура катоду, ступінь вакууму, тощо) на величину вихідних параметрів та їх стабільність.

У п'ятому розділі (стор. 191-260) теоретично досліджено двовимірну модель черенковського генератору на гібридних об'ємно-поверхневих модах. Побудовано фізичну та математичну модель в наближенні нескінченного фокусуємого магнітного поля та зворотної об'ємної хвилі, проведено чисельне моделювання. Знайдено умови для зросту вихідної потужності та проаналізовано фізичні особливості, що відбуваються в знайденому режимі.

У шостому розділі (стор. 261-284) за допомогою моделювання в пакеті MAGIC-3D досліджується тривимірний модель черенковського генератору на гібридних об'ємно-поверхневих модах. Проводиться порівняння з результатами двовимірного моделювання, знайдено особливості, що притаманні трьох-мірній геометрії, та проводиться їх фізичний аналіз. Зокрема, показано, що розподіл по ширині уповільнювальної структури, поля гармоніки, синхронної з електронним потоком, є майже однорідним, при цьому розподіл об'ємної гармоніки є складним. Також встановлено, що в розглянутій структурі імовірність конкуренції з модами з декількома варіаціями по ширині є малою.

У висновках (стор. 285-289) підсумовуються одержані нові результати дисертаційної роботи.

Дисертація є завершеною роботою, зроблені висновки є достовірними, охоплюють весь обсяг одержаних результатів та є важливими для розвитку ТГц електронно-вакуумних приладів.

4. Наукова новизна отриманих в роботі результатів, сформульованих положень та висновків

В роботі Хуторяном Е. М. створено нові фізичні моделі та знайдено фізичні особливості ЕВП, що дозволяють збільшити ефективність генерації ТГц випромінювання як при збудженні гібридних об'ємно-поверхневих мод в черенковському генераторі, так і в гіротронах. Серед вперше отриманих результатів слід виділити наступні.

- Показано, що відбиття випромінювання від рефлектору в гіротроні з аксіальним виводом розширює діапазон частотного перестроювання за рахунок взаємодії електронів з прямою хвилею та резонансам довгої лінії. Вплив відбиття на міжмодову взаємодію спричиняє появу гістерезису при зміні параметрів відбиття та керуючих напруг, а також надає можливість покращення умов для стійкої генерації на другій циклотронній гармоніці при певних коефіцієнтах відбиття.
- Продемонстровано, що в ТГц гіротроні при малому куті розкриву та довгій слабо-конусній секції можлива сильна позарезонаторна взаємодія з вищою радіальною модою. При цьому розкид поперечної швидкості електронів значно підсилює цю взаємодію та спричиняє різкий зріст вихідної потужності при циклотронному резонансі з високими аксіальними модами в основному резонаторі. Показано, що зміщення осі електронного потоку в гіротроні приводить до конкуренції мод з різними

напрямами обертання, та запропоновано шляхи збільшення вихідної потужності.

- Виявлено існування «гарячих» мод із великою дифракційною добротністю в резонаторі, який утворено комбінацією регулярної та слабкоконусної секцій.
- Створено системи стабілізації і модуляції потужності та частоти гіротронів.
- Показано, що в режимі зворотної об'ємної гармоніки однократно відбитої від верхнього рефлектору в черенковському генераторі на гібридних об'ємно-поверхневих модах ефективність зворотного зв'язку та потужність взаємодії є високими навіть при великих довжинах і ширинах уповільнювальної структури. Знайдено умови максимального збільшення ширини виводу випромінювання, що забезпечує максимальну вихідну потужність, не впливаючи на електронно-хвилеву взаємодію.

Ці результати світового значення та опубліковані в рейтингових виданнях світового рівня.

5. Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів визначається значним попитом на джерела суб-ТГц та ТГц випромінювання з боку як наукових так і практичних застосувань. Так, гіротрони з покращеними характеристиками та з системами стабілізації та модуляції, що було отримано за результатами роботи, застосовувались для біологічних досліджень за допомогою ДПЯ-ЯМР спектроскопії в лабораторіях Японії. Отримані знання та методи підвищення ефективності генерації в ТГц діапазоні сприяють створенню нових модифікацій генераторів з покращеними характеристиками для багатьох практичних застосувань.

6. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Результати, що викладено в дисертаційній роботі, опубліковано в 43 наукових працях, з них 20 фахових наукових статей (18 - у спеціалізованих журналах, що відносяться до першого та другого квартилів Q1-Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 1 розділ у колективній монографії, та 22 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях. Основні результати дисертації викладені повністю в цих працях.

7. Мова та стиль дисертації

Дисертаційну роботу написано державною мовою та із застосуванням загальноновизнаної наукової термінології. Стиль та послідовність викладання досліджень та отриманих результатів та наукових положень, висновків і

рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття. Результати проілюстровані високоякісними рисунками, фотоматеріалами та графіками.

8. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи

Незважаючи на позитивну оцінку результатів дисертаційної роботи в цілому, виникають деякі зауваження щодо її змісту та оформлення

1. Експериментальні дослідження впливу відбиття в гіротроні були якісними, а не кількісними, особливо коли потужність вимірювалась перед відбивачем.
2. Результати комп'ютерного моделювання впливу відбиття в гіротроні, зокрема фізична причина появи гістерезисів та різкої зміни ККД пояснюється конкуренцією мод довгої лінії. Для більш переконливого пояснення, мають бути також проаналізовані розподіли ВЧ поля та стрибкі частоти в точках де є стрибки ККД.
3. Дифракційна добротність відкритого резонатору черенковського ЕВП обчислюється за результатами чисельного розрахунку розподілу поля власних коливань закритого резонатору без втрат. Такий підхід може бути справедливим тільки для коливань з дуже малими дифракційними втратами, а отже із майже однаковим розподілом поля у випадку відкритого та закритого резонаторів.
4. У тексті дисертації і підписах до рисунків зустрічаються неточності, деякі змінні та позначення стисло описуються або надаються значно пізніше ніж наводяться.

Зазначені зауваження не впливають на високу наукову та практичну цінність дисертаційної роботи.

9. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат відповідає всім поточним вимогам щодо його структури та технічного виконання. Він включає основні результати досліджень, проведених у рамках дисертаційної роботи, а також наукові досягнення автора. Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертаційної роботи.

10. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

В дисертаційній роботі Хуторяна Едуарда Михайловича “Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотнім зв'язком” отримано нові наукові результати спрямовані на вирішення ключових теоретичних і практичних проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності зворотного зв'язку та вихідної потужності електронно-вакуумних приладів, які працюють у субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах. Дисертація є

завершеною працею та відповідає вимогам щодо уникнення академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації та відповідає паспорту спеціальності 01.04.04. Робота також відповідає вимогам, встановленим Порядком присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197.

Вважаю, що за результатами своєї наукової праці, наведеними в дисертації, Хуторян Едуард Михайлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
старший науковий співробітник відділу теоретичної фізики
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України



Ігор ВОЛОВИЧЕВ

Підпис Ігоря Воловичева засвідчую
Вчений секретар
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України *



Олена КРИВЕНКО