

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію

Лихачова Олександра Олександровича

«Спектральні характеристики та стабільність випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів з урахуванням особливостей процесів енергообміну», подану на здобуття наукового ступеня доктора

філософії за спеціальністю

104 – фізика та астрономія

Актуальність дослідження.

Створення компактних генераторів випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів із середніми рівнями потужності, що мають високі параметри стабільності частоти та можливості її перестроювання та модуляції в широкому діапазоні, на сьогоднішній день є актуальним через дуже велике коло їхніх застосувань у різноманітних галузях: комунікації, ТГц візуалізація, ДПЯ-ЯМР спектроскопія та ін. В дисертаційній роботі Лихачова О. О. розглянуто питання розробки генераторних систем на основі електронно-вакуумних приладів – клинотронів, а також високовольтних джерел живлення, що завдяки додатковим контурам зворотного зв'язку дозволяють реалізовувати модуляцію частоти як за ступінчатим законом, так і у безперервному режимі, що у поєднанні з широким діапазоном перестроювання частоти генератора дозволить його ефективно використати в системах візуалізації. Не зважаючи на значний розвиток за останні десятиліття напівпровідникових генераторів ТГц діапазону, досягнуті рівні потужності випромінювання не дозволяють їх застосування у задачах з багатьма типами матеріалів і середовищ, які мають значний коефіцієнт поглинання. Також отримують подальшого розвитку мазери на циклотронному резонансі (МЦР), які найчастіше застосовуються для задач керованого термоядерного синтезу, дозволяючи отримувати мегаватні рівні потужності випромінювання. Однак для багатьох практичних задач значним

обмеженням МЦР є їх розміри та вузький діапазон перестроювання частоти випромінювання. Дослідження енергообміну у компактних вакуумних електронних генераторах мм і субмм діапазонів типу клинотрон з широким діапазоном електронного перестроювання частоти з метою покращення спектральних характеристик випромінювання та для реалізації частотної модуляції випромінювання, що розглянуто у дисертаційній роботі – є актуальною задачею.

Метою наукових досліджень дисертаційної роботи є виявлення особливостей енергообміну потоку електронів з електромагнітними хвилями у надрозмірних електродинамічних системах клинотронів з урахуванням впливу розкиду поздовжніх швидкостей щільного стрічкового потоку електронів, що виникає внаслідок нестабільності високовольтного джерела живлення, які впливають на спектральні характеристики та потужність випромінювання генератора. Також в дослідженнях розглянуто організацію зовнішніх кіл зворотного зв'язку клинотрона з джерелом живлення для реалізації алгоритмів перестроювання частоти у безперервному режимі та зі ступінчастою зміною частоти.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи. Моделювання траєкторій руху щільного стрічкового електронного пучка, що сфокусовано статичним магнітним полем, а також його взаємодія з електромагнітними хвилями у електродинамічній системі клинотрону виконано за допомогою класичних моделей траєкторного аналізу та електронно-хвильової взаємодії, достовірність яких підтверджується завдяки порівнянню з результатами, що отримано за допомогою чисельних кодів, а також з проведеними за класичними методами експериментальними дослідженнями параметрів випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів.

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

1. За результатами як траєкторного аналізу, так і експериментальних досліджень формування та транспортування щільного стрічкового електронного пучка у електронно-оптичній системі клинотрона продемонстровано залежність розкиду повздовжніх швидкостей електронів потоку від пульсацій прискорювальної напруги та вперше встановлено амплітуду пульсацій високовольтної напруги, впливом яких на розкид швидкостей електронів у порівнянні з іншими ефектами можна знехтувати.

2. Вперше отримано залежності спектральних характеристик випромінювання від резонансних властивостей надрозмірних електродинамічних систем клинотронів як міліметрового, так і субміліметрового діапазонів.

3. У результаті моделювання взаємодії електронного пучка з електромагнітними хвилями, що збуджуються у електродинамічних системах клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, було вперше отримано залежність ширини спектральної лінії випромінювання від пульсацій прискорювальної напруги.

4. Вперше запропоновано та експериментально реалізовано режими безперервної модуляції частоти випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів за лінійним законом в межах окремих зон генерації, а також за ступінчастим законом перестроювання частоти завдяки переходам між зонами.

Список публікацій здобувача за матеріалами дисертації містить 9 публікацій: в 5 наукових статтях, з яких 4 індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та Scopus і одну статтю опубліковано у фаховому науковому виданні України, а також у 4 збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура і зміст дисертації. Загальний обсяг дисертації складає 142 сторінки що включає в себе: анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, перелік використаних джерел та перелік публікацій автора.

У вступі обгрунтовано актуальність проведених досліджень, визначено мету, задачі та стисло результати роботи, зазначено ступінь їхньої апробації та наведено перелік публікацій.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто поточний стан розробок компактних джерел електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів, наведено спектральні характеристики випромінювання вакуумних електронних приладів і методи їхнього контролю, а також проведено аналіз генераторних систем для практичних застосувань з реалізацією модуляції частоти.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню енергетичних параметрів стрічкових електронних пучків, що формуються діодною гарматою клинотрона у статичному магнітному полі, де значну увагу приділено впливу просторового заряду на розкид швидкостей електонів пучка. В результаті траєкторного аналізу руху стрічкових електронних пучків продемонстровано вплив нестабільності прискорювальної напруги на розкид повздовжніх швидкостей електронів пучка. Ретельно розглянуто аспекти розробки системи високовольтного живлення та живлення розжарення електронної гармати клинотрону з впровадженням додаткових кіл зворотного зв'язку для стабілізації параметрів випромінювання.

У третьому розділі роботи наведено результати досліджень спектральних характеристик випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів безперервної дії. У результаті моделювання взаємодії стрічкового електронного пучка з поверхневою електромагнітною хвилею у надрозмірній електродинамічній системі клинотрона продемонстровано резонансний характер збудження випромінювання, що у міліметровому діапазоні визначається резонансами поверхневої хвилі, в той час як у субміліметрового діапазону резонансність зумовлено відбиттями та трансформацією поверхневих і об'ємних хвиль. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень продемонстровано спектральні

характеристики випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, а також їхню залежність від стабільності прискорювальної напруги для електронних пучків різної щільності.

У *четвертому розділі* продемонстровано результати досліджень щодо використання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів за умови безперервного випромінювання та у випадку модуляції частоти генерації. Продemonстровано та експериментально реалізовано систему на основі клинотрона для отримання зображень зі сталою частотою та запропоновано систему, що дає можливість модуляції частоти в межах однієї зони генерації для безперервного перестроювання, та в межах всього діапазону перестроювання генератора для ступінчастої зміни частоти.

Практичне значення наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі Лихачова О. О., полягає у створенні систем на основі клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, що дозволяють їхнє використання у практичних задачах, які потребують як випромінювання зі сталими параметрами частоти та потужності – спектроскопія ядерного магнітного резонансу з динамічною поляризацією ядер, так і використовують випромінювання з модуляцією частоти – методи візуалізації підповерхневого простору 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.

1. В оглядовій частині роботи недостатньо відображено результати попередніх досліджень електронних пучків, що б зробило більш наглядним та зрозумілим значення отриманих результатів.
2. В дисертації наведені часові характеристики модуляції частоти клинотрона за допомогою розробленого джерела живлення, але в роботі продемонстровано приклад візуалізації тільки зі сталою частотою, не наведені експериментальні результати застосування описаних алгоритмів модуляції частоти.
3. В тексті роботи присутні декілька друкарських помилок та невдалих використань термінології. Зокрема, на стор. 3 слід замість "стабільності прискорювальної напруги 10^{-5} " використати "відносної нестабільності прискорювальної напруги 10^{-5} ", на стор. 47 слово "підходу" треба замінити на "методу"; на стор. 54 слід замість "виміряти" використати "отримати"; у підписі до рис. 2.11 слово "після" слід замінити на "у результаті"; на стор. 72 "Тобто" використовується поспіль двічі; на стор. 87 "корегування" замінити на "модифікацію", «продемонстрована» - на «продемонстровано»; на стор. 100. Слід прибрати слово "Саме"; на стор. 102 - "поділ" слід замінити на "дільний".

Всі наведені недоліки не стосуються основних результатів роботи та можуть бути корисними у подальших дослідженнях автора.

Висновок щодо відповідності дисертації становленим нормам.

Вважаю, що зміст дисертаційної роботи Лихачова О. О. «Спектральні характеристики та стабільність випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів з урахуванням особливостей процесів енергообміну» дає підставу вважати її завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «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, Лихачов Олександр Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Рецензент

Кандидат фіз.-мат. наук, с.н.с,

Старший науковий співробітник

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України

 Г. П. Єрмак

23.01.2023 р.

Підпис Г. П. Єрмака засвідчую.

ТВО Вченого секретаря

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України

кандидат фіз.-мат. наук



О. В. Кривенко