

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ковшова Юрія Сергійовича «Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01. 04. 04 – фізична електроніка

В даний час значний інтерес приділяється розробці джерел електромагнітних хвиль в терагерцевому (ТГц) діапазоні довжин електромагнітних хвиль. При цьому вимоги до характеристик випромінювання визначаються областю застосування і вельми різноманітні. Серед компактних генераторів в області частот 0.1 - 1 ТГц, які працюють на нерелятивістських пучках, цілу низку переваг мають клінотрони. У першу чергу слід відзначити досить велику потужність і можливість перебудови частоти в широкому діапазоні. Для деяких областей застосувань одним з важливих параметрів джерела електромагнітного випромінювання окрім достатнього рівня потужності та перебудови частоти є довгострокова стабільність частоти та потужності випромінювання. Так, наприклад, такі вимоги пред'являються до ТГц систем, які використовуються для підвищення чутливості ЯМР спектрометрів і засновані на застосуванні стабільних генераторів у частотному діапазоні 100-400 ГГц з потужністю випромінювання понад 100 мВт. Підвищення стабільності параметрів випромінювання в свою чергу вимагають проведення глибоких теоретичних і експериментальних досліджень. Тому тема дисертації Ю. С. Ковшова, що присвячена дослідженню фізичних особливостей взаємодії нерелятивістських стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями в ТГц клінотронах, які впливають на стабільність частоти та потужність випромінювання, безумовно є **важливою, корисною і актуальною**. Актуальність, наукове і практичне значення дисертаційної роботи підкреслює також той факт, що вона виконувалася в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт, що проводяться в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, а також під час виконання договірних робіт з установами Китаю, США, Естонії.

Дисертація Ю.С. Ковшова складається з вступу, де приведена загальна характеристика роботи, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел за темою дисертації. Розглянуто існуючі методи розрахунку і моделювання, формування електронного пучка і стабілізації параметрів випромінювання на виході клінотронів ТГц діапазону. При цьому автор продемонстрував досить глибоке

розуміння сучасного стану досліджень в обраному ним напрямку діяльності. На підставі аналізу результатів попередніх досліджень визначено напрямки і основні завдання роботи.

У другому розділі розвинена модель розрахунку вихідних параметрів ТГц клінотронів з урахуванням високочастотних омічних втрат. Останні мають місцев наслідок шорсткості поверхні сповільнювальної системи і збільшуються в результаті її нагрівання під впливом електронного пучка. Показано, що цей ефект має суттєвий вплив на вихідну потужність коливань. На підставі статистичного аналізу параметрів існуючих клінотронів в діапазоні 120-140 ГГц автором визначені умови отримання максимального значення коефіцієнта корисної дії. Значна увага в розділі приділяється розгляду дисперсійних характеристик хвиль в хвилеводі, щонавантажений багатоступінчастою плоскою гребінкою. Проведено аналіз особливостей роботи клінотрону з такою системою, в якій збуджуються об'ємно-поверхневі хвилі. Показано, що для досягнення максимальної вихідної потужності на фіксованій частоті режим роботи генератора повинен вибиратися поблизу оптимального набігу фази на період який для 130 ГГц складає 1,615 π . В роботі показано, що оптимальний набіг фази на період для клінотронів на центральній частоті 130 ГГц є оптимальним і за умови збудження об'ємно-поверхневих хвиль.

У третьому розділі вирішується питання відбиття і трансформації хвиль в надрозмірних електродинамічних системах ТГц клінотронів на таких неоднорідностях як хвилевідний трійник в області виведення енергії, а також у області колектору електронів з іншого боку сповільнювальної системи. В роботі встановлено, що незважаючи на істотні омічні втрати ТГц діапазоні, залежність потужності випромінювання від частоти має резонансний характер, що обумовлено взаємними трансформаціями поверхневої хвилі та об'ємних хвиль, а також відбиттям поверхневої хвилі від кінців сповільнювальної системи. В роботі показана можливість підвищення потужності випромінювання, що поширюється в вихідний хвилевід шляхом зміни умов відбиття на колекторі.

У четвертому розділі дисертаційної роботи проводиться розрахунок електронно-хвильової взаємодії в клінотронах ТГц діапазону з урахуванням результатів траєкторного аналізу стрічкового електронного пучка, що формується як симетричною, так і несиметричною електронно-оптичними системами. В роботі показано підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії за рахунок використання пучка з несиметричним розподілом поздовжніх швидкостей електронів за товщиною, у якого поздовжні швидкості електронів зростають від верхньої межі пучка до нижньої. За результатами проведених розрахунків показана можливість збудження багато частотного

режиму коливань в кліноотронах ТГц діапазону за рахунок використання електронного пучка з повільними нижніми і швидкими верхніми шарами електронів.

У п'ятому розділі проведено дослідження спектральних характеристик ТГц кліноотронів, описано результати розробки джерел живлення, які забезпечують високу стабільність вихідної потужності і частоти коливань. Зокрема розроблений блок живлення, що керується від ПК, і зовнішній контур зворотного зв'язку з використанням пропорційно-інтегрально-диференціальної схеми управління струмурозжарювання і напругою, що прискорює. З використанням розробленої схеми протягом 10 годин роботи прибору, отримано стабільність частоти 5 МГц і потужності 0,5% на частоті 300 ГГц при номінальній потужності 100 мВт.

Серед **найбільш вагомих нових наукових результатів**, які одержані автором, слід відмітити наступне:

1. Результати дослідження механізму впливу розподілу повздовжніх швидкостей в стрічковому електронному пучку на ефективність його взаємодії з сповільнювальною структурою, в кліноотронах ТГц діапазону. Показана можливість отримання багаточастотного режиму генерації коливань.
2. Результати теоретичного розгляду взаємодії пучка з сповільнювальною системою кліноотрона з урахуванням відбиття і трансформації електромагнітних хвиль. Теоретично показано наявність резонансного характеру порушення коливань, що відповідає експериментальним даним.
3. Результати дослідження зміни поверхневого опору поверхні гребінки внаслідок електронного нагріву структури, що впливає на вихідну потужність кліноотрона.

Отримані автором дисертації наукові результати безумовно мають **практичне значення** і можуть бути використані при розробці нових генераторів – кліноотронів ТГц діапазону. Необхідно відзначити, що деякі результати вже в даний час застосовані при створенні малогабаритних приборів цього типу, розроблених в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ України. Наукові положення і рекомендації, які викладені в дисертації, є **достовірними і обґрунтованими**, так як вони базуються на використанні добре відомих і надійних методів обчислень, чисельного моделювання та експериментального дослідження. Так, наприклад, для моделювання використовуються програми CST Studio і Superfish, які добре апробовано в світовій практиці. Крім того, має місце відповідність теоретичних і експериментальних даних, наприклад, при дослідженні впливу відбиття та трансформації хвиль на характеристики випромінювання. **Автореферат** відповідає змісту дисертації.

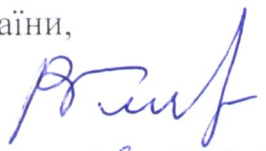
Позитивно оцінюючи наведені в дисертаційній роботі результати досліджень в цілому, слід висловити ряд зауважень щодо її змісту та оформлення.

1. Потребує більш чіткого пояснення значна різниця між результатами моделювання та експериментальними даними при дослідженні залежності вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії від струму пучка (Рис.2.9 –Рис.2.11).
2. Відсутній порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження клінотронів з однорідною і чотирьохступеневою сповільнювальною структурою.
3. Не є обґрунтованим введення величини діелектричних втрат в канавках сповільнюваної системи.
4. При описі результатів вимірювання спектральних характеристик не наведено відомості про роздільну здатність вимірювальної апаратури.
5. У ряді випадків автор при посиланні на будь-якій метод розрахунку або теоретичного розгляду не приводить дані про особливості, допущення і межі застосування методу, а обмежується посиланнями на відповідні літературні джерела.
6. У тексті дисертації зустрічаються друкарські помилки і невдалі стилістичні звороти, які пов'язані з перекладом.

Наведені недоліки не знижують науковозначимість дисертації. Вона являє собою самостійну закінчену науково-дослідну роботу, результати якої являються новими, актуальними і мають практичне значення.

Вважаю, що дисертаційна робота задовольняє всім вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор, **Ковшов Юрій Сергійович**, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01. 04. 04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент,
Начальник лабораторії
НДК «Прискорювач» ННЦ «ХФТІ» НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник


19. 11. 2019
В. А. Кушнір

Підпис В. А. Кушніра засвідчую
Вчений секретар
Національного наукового центра
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України




А. В. Волобуєв