

ВІДГУК

ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Ковшова Ю.С. "Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка

У дисертаційній роботі Ковшова Ю.С. "Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності" розглядаються результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем в просторово-розвинутих електродинамічних структурах приладів ТГц діапазону. Необхідно відзначити, що інтерес до створення нових когерентних, стабільних і ефективних джерел електромагнітного випромінювання в короткохвильовій частині міліметрового і ТГц діапазонів не згасає. Причина цього полягає в тій потенційній ролі, яку розробники апаратури відводять даним діапазонам з точки зору розвитку радіоелектронних систем майбутнього. На жаль, особливості даних діапазонів, пов'язані в першу чергу зі зменшенням робочого об'єму простору взаємодії і, як наслідок цього, появою значних технологічних труднощів, а також проблеми отримання в даних умовах щільних електронних потоків і рішення задачі відводу тепла від електродів приладів - все це обмежує можливості використання традиційних конструкцій класичних приладів вакуумної електроніки НВЧ - ЛБХ і ЛЗХ, клістронів, магнетронів і т.п. У цьому плані питання, розглянуті в даній дисертаційній роботі, є спробою, з одного боку, узагальнити і систематизувати наявний багаторічний досвід колег, а з іншого - розглянути особливості взаємодії нерелятивістського електронного потоку з електромагнітними хвилями гребінчастих електродинамічних структур для кращого розуміння фізичних основ механізму перетворення енергії електронного потоку в енергію НВЧ випромінювання. Рішення сформульованих в роботі завдань проводилося в тісному зв'язку з науковими програмами НАН України та в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт.

Підводячи підсумок вищесказаного можна сказати, що дана дисертаційна робота, присвячена виявленню особливостей процесів і фізичних закономірностей електронно-хвильової взаємодії нерелятивістського електронного потоку з електромагнітними хвилями гребінчастих електродинамічних структур для підвищення стабільності частоти і потужності випромінювання ТГц клінотронів представляє безперечний науковий і практичний інтерес, а її актуальність не викликає сумніву.

В дисертаційній роботі автором розглядається комплекс завдань, що представляють практичний інтерес для розробки ТГц клінотронів підвищеної стабільності частоти і рівня

вихідної потужності. Зокрема, проведені дослідження факторів, які впливають на стабільність частоти та потужність випромінювання, в тому числі на спектральні характеристики ТГц клінотронів, а також проведена розробка зовнішніх кіл стабілізації параметрів випромінювання ТГц клінотронів. Для стабілізації частоти та потужності випромінювання, для поліпшення спектральних характеристик ТГц клінотронів розроблені та створені джерела живлення напруги, що прискорює, та зовнішнього контуру зворотного зв'язку з використанням ПІД схеми управління. Викликає безсумнівний інтерес що до досліджень впливу омичних втрат, викликаних шорсткістю поверхні гребінчастих сповільнюючих систем та температурним навантаженням на їх елементи, на ефективність взаємодії електронного потоку з електромагнітними хвилями у електродинамічних системах ТГц клінотронів. Для експериментальної перевірки теоретичних результатів розроблені макети ТГц клінотронів та досліджено їх характеристики з однорідною та багатоступеневою плоскою гребінкою для зменшення омичних втрат.

В ході проведених досліджень автором проведена велика робота. До числа нових фізичних результатів дисертаційної роботи можна віднести:

1. Вперше продемонстровано вплив розкиду поздовжніх швидкостей електронних шарів товстого пучка на ефективність електронно-хвильовою взаємодії в клінотронах ТГц діапазону у разі використання несиметричної електронно-оптичної системи, що формує стрічковий електронний потік. Показано, що внаслідок просторового розподілу шарів електронного пучка вихідна потужність у разі швидких нижніх шарів зростає у порівнянні з одношвидкісним потоком, тоді як у протилежному разі вихідна потужність різко падає.
2. Вперше отримано умови збудження багато-частотного режиму генерації в клінотроні у разі використання несиметричної електронно-оптичної системи з розкидом поздовжніх швидкостей електронних шарів товстого пучка.
3. Вперше за допомогою розробленої моделі клінотрону з урахуванням відбиття і трансформації поверхневих повільних хвиль у швидкі об'ємні хвилі на кінцях СС показано резонансний характер збуджених коливань навіть за наявності суттєвих затухань поверхневих хвиль в ТГц діапазоні. Вперше показано вплив умов відбиття та трансформації хвиль в області колектора на перерозподіл енергії що потрапляє у вихідний хвилевід, що проходить крізь анодну апертуру в область електронної гармати, та енергією, що відбивається у напрямку системи, що сповільнює рух хвилі.
4. Отримала подальшого розвитку теоретична модель клінотрону, що враховує втрати енергії поверхневої хвилі, викликані шорсткістю поверхні СС, а також тепловим навантаженням у разі осідання електронного пучка на елементи СС. Вперше показано що за рахунок зменшення провідності СС в постійному клінотронному режимі, залежність

вихідної потужності від електронного струму більш полого ніж в імпульсному режимі. Результати розрахункової вихідної потужності клінотронів ТГц діапазону є у добрій відповідності до експериментальних результатів.

5. Вперше за допомогою запропонованого зовнішнього контуру зворотного зв'язку з використанням пропорційно-інтегрально-диференційної схеми управління напругою живлення ТГц клінотрону отримано параметри стабілізації робочої частоти і потужності випромінювання, що відповідають вимогам спектроскопії ЯМР з ДПЯ. Вперше отримано залежності ширини спектральної лінії ТГц клінотронів від пульсації напруги, що прискорює, та від щільності струму стрічкового електронного пучка, та визначено межі рівня пульсації напруги, що прискорює для досягнення значень ширини спектральної лінії потрібно для ЯМР-ДПЯ спектроскопії.

Достовірність і обґрунтованість основних результатів і висновків дисертації забезпечена строгими математичними методами вирішення завдань фізичної електроніки в наближеннях заданого поля (заданого струму) і самоузгодженій постановці, порівнянням отриманих результатів з відомими, адекватністю фізичних моделей процесам, що відбуваються при збудженні черенковського випромінювання. У більшості випадків вона підтверджується також прямою відповідністю теоретичних і експериментальних результатів, отриманих на спеціальних експериментальних макетах ТГц клінотронів.

Отримані результати можуть бути використані при реалізації практичних схем приладів ТГц діапазону (клінотронів) з поліпшеними частотними і енергетичними характеристиками. Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що отримані в процесі виконання дисертаційної роботи результати можуть бути використані при розробці ТГц комплексів та радіоелектронних систем на основі клінотронів з підвищеною вихідною потужністю (100 мВт в частотному діапазоні 280-320 ГГц) та високою стабільністю ($1,5 \cdot 10^{-5}$ від робочої частоти). Зокрема, запропоновано метод врахування впливу омичних ВЧ втрат, відбиття та трансформації хвиль на кінцях електродинамічної структури на процес генерації коливальних в ТГц клінотронах. Результати, що отримані при аналізі взаємодії інтенсивного стрічкового багатопоточного електронного потоку з електромагнітними хвилями, можуть бути використані при розробці ТГц генераторів з підвищеною потужністю та у разі збудження багаточастотного режиму в клінотронах.

Основні матеріали і результати дисертаційної роботи досить повно висвітлені в опублікованих наукових працях автора (6 статтях і 8 доповідях на міжнародних науково-технічних конференціях). Робота апробована на науково-кваліфікаційному семінарі «Радіофізика і електроніка міліметрових та субміліметрових хвиль» ІРЕ ім. О.Я. Усикова

НАН України. Автореферат повністю відповідає змісту і основним положенням дисертації та оформлений відповідно до існуючих вимог що до кандидатських дисертацій.

На жаль, робота не вільна від ряду недоліків, серед яких необхідно відзначити наступні:

1. При дослідженні хвильових і електронно-хвильових процесів автор використовує лінійне наближення (див., напр., стор. 35). Це дозволяє достатньо просто розглянути процес збудження приладів, але звужує можливості теоретичного аналізу що до оцінки граничних енергетичних характеристик приладів (в режимі великого сигналу або великих робочих струмів). Також ускладняється фізичне пояснення явища обмеження вихідної потужності, що спостерігається в експерименті. З іншого боку, облік омічних втрат є безперечною перевагою роботи. Однак в цьому випадку необхідно уточнити зміну виду класичних рівнянь, що описують самоузгоджений підхід та аналіз електронно-хвильових процесів, представивши їх з урахуванням втрат на поверхні електродинамічної структури (наближені граничні умови Леонтовича-Щукіна).
2. Хотілося б відзначити, що наявність мікронерівностей поверхні електродинамічної структури впливає не тільки на втрати (загасання), але і змінює їх електродинамічні характеристики (уповільнення) (див., напр., статтю В.М. Курицын, А.Г. Лазерсон. Влияние микронеровностей поверхности замедляющей системы на их электродинамические характеристики. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, вып. 2(362), 1984. С. 39-43).
3. Застосування автором сучасних пакетів прикладних програм для моделювання електронно-хвильового механізму взаємодії (наприклад, пакета CST) можна розглядати як позитивний момент роботи. У той же час при чисельній реалізації автор не привів значення модельних параметрів, які пов'язані з просторовою і часовою дискретизацією (умови Куранта).
4. У роботі використовуються кілька ненормованих скорочень (аббревіатур) назв приладів і окремих їх елементів і вузлів. На жаль, деякі з таких скорочень не відповідають їх повній назві (див., напр., СС - системи, что сповільнюють рух).
5. Відповідно до сентенції стародавніх - "errare humanum est" (людині властиво помилятися) неминучим виявилось кілька дрібних неточностей і похибок у тексті автореферату і дисертації.

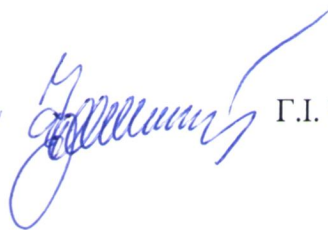
Проте зазначені недоліки не зачіпають основних положень і результатів дисертації, не знижують загального позитивного враження від роботи, яка представляє собою закінчену наукову працю і виконана на високому науковому рівні.

В цілому вважаю, що дисертаційна робота Ковшова Ю.С. "Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності" повністю відповідає всім вимогам, що пред'являються до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка, а її автор Ковшов Ю.С. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка

Офіційний опонент,

Доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри фізичних
основ електронної техніки Харківського
національного університету
радіоелектроніки

01.11.2019



Г.І. Чурюмов

Підпис проф. Г.І. Чурюмова засвідчую:

Учений секретар Харківського
національного університету
радіоелектроніки



І.В. Магдаліна