

ВІДГУК

офіційного опонента Кушніра Володимира Абрамовича
на дисертаційну роботу Кулешова Олексія Миколайовича
«Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах
міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти»,
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01. 04. 04 – фізична електроніка

Дослідження з підвищення ефективності компактних джерел електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів довжин хвиль залишаються актуальною задачею на протязі останніх кілька десятиліть. Такі дослідження є дуже важливими з точки зору вирішення проблеми відсутності компактних джерел електромагнітного випромінювання для багатьох практичних застосувань. Джерелами з найбільшими рівнями потужності випромінювання в зазначених діапазонах є мазери на циклотронному резонансі (МЦР). Серед недоліків приладів типу МЦР є достатньо великі габарити генераторних комплексів на їх основі, а також можливість перестроювання частоти генерації приладів в вузькій смузі частот. Серед компактних нерелятивістських генераторів з перестроюванням частоти генерації в області частот 100 – 500 ГГц перспективними, з точки зору достатніх рівнів потужності випромінювання для багатьох застосувань, є клинотрони, які за принципом дії відносять до потужного різновиду ламп зворотної хвилі. Однак проблемою з освоєння клинотронами ТГц діапазону є експоненціальне зниження потужності випромінювання зі зростом частоти. Для чисельних різноманітних застосувань джерел електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів одним з важливих робочих параметрів окрім рівня вихідної потужності та діапазону перестроювання частоти є довгострокова стабільність параметрів генерації. Підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії компактних вакуумних електронних джерел електромагнітного випромінювання з зазначеними рівнями вихідної потужності, а також підвищення стабільності параметрів генерації вимагають проведення ґрунтовних теоретичних і експериментальних досліджень. Тому тема дисертаційної роботи О. М. Кулешова, що присвячена дослідженню нових режимів автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти генерацію в широких смугах та високою стабільністю параметрів випромінювання, безумовно є **важливою, корисною і актуальною**. Актуальність, а також наукову та практичну значимість дисертаційної роботи підкреслює той факт, що вона

виконувалася в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт, що проводилися в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, а також під час виконання договірних робіт з установами Японії, Німеччини, США, Китаю та Естонії.

Дисертація О. М. Кулешова складається з вступу, шести головних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Коротко відзначимо основні результати, що було отримано в роботі.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел за темою дисертації та наведено результати досліджень з розробки компактних електронно-вакуумних генераторів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів. Розглянуто методи розрахунку і моделювання приладів як на випромінюванні Вавілова-Черенкова, так і приладів на циклотронному випромінюванні. На підставі аналізу результатів попередніх досліджень сформульовано основні завдання роботи.

Другий розділ присвячено вирішенню проблеми формування та транспортуванню щільних стрічкових електронних пучків з енергетичними параметрами, що дозволяють підвищити ефективність електронно-хвильової взаємодії в резонаторах клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів. В процесі вирішення задачі було розроблено та проведено оптимізацію магнітних систем для формування та транспортування щільних стрічкових електронних пучків із заданими геометричними та енергетичними параметрами. Порівняльний аналіз результатів моделювання з експериментальними даними параметрів випромінювання клинотронів субміліметрового діапазону показав, що пакетування клинотронів в фокусуєчій системі з слабонеоднорідним розподілом магнітного поля дозволяє зменшити стартові струми приладів. Також новим і важливим результатом роботи є інформація щодо застосування в клинотроні профільованих за швидкостями електронних потоків, що формуються у несиметричній електронно-оптичній системі. Оптимальний вибір розподілу електронів по швидкостям забезпечує істотне збільшення потужності випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів. Слід зазначити, що результати досліджень мають важливе практичне значення, оскільки розроблені електронно-оптичні та магнітні системи дозволили суттєво підвищити кількість клинотронів, що відповідають технічному завданню у серійному виробництві.

У третьому розділі роботи досліджується залежність параметрів випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів від впливу омичних втрат поверхневої хвилі у гребінці та відбиття і трансформації хвиль в надрозмірних електродинамічних системах. В роботі визначено шорсткості поверхні гребінок, що застосовуються в клинотронах, та оцінено величини омичних втрат поверхневої хвилі як в холодній системі, так і з

урахуванням підвищення температури елементів гребінки під час осідання на них електронів пучка у клинотронному режимі. Показано, що врахування зазначених додаткових омічних втрат поверхневої хвилі призводить до суттєвого зменшення вихідної потужності клинотрону в постійному режимі роботи. Ще одним важливим з практичної точки зору результатом роботи, що пояснює експериментальні дані клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, є розробка відповідної теоретичної моделі. Теоретично підтверджено резонансний характер залежності потужності випромінювання від частоти за наявності істотних омічних втрат, що обумовлено відбиттям та взаємними трансформаціями поверхневої хвилі та об'ємних хвиль в області з'єднання гребінки з хвилеводним виводом енергії і в області колектора. Зокрема, в роботі показана можливість керування перерозподілом потужностей випромінювання, що поширюються в область електронної гармати та у вивід енергії, змінюючи умови відбиття хвиль за допомогою короткозамикаючого поршня в області колектора.

У четвертому розділі дисертаційної роботи задля зменшення впливу омічних втрат, що суттєво зменшують ефективність електронно-хвильової взаємодії в черенковських приладах в міліметровому та субміліметровому діапазонах, запропоновано перехід на роботу на об'ємно-поверхневій хвилі в клинотронах з неоднорідною гребінкою. За результатами проведеного моделювання взаємодії стрічкових електронних потоків з гібридними об'ємно-поверхневими хвилями в резонаторах клинотронів було розроблено експериментальні макети клинотронів на діапазони частот 80-100 ГГц та 130-140 ГГц та продемонстровано ефективне збудження коливальних в таких приладах. Важливим результатом для практичних застосувань є знайдення режиму генерації з плавним електронним перестроюванням частоти у вищих смугах пропускання запропонованих систем клинотронів.

У п'ятому розділі роботи отримано умови збудження ефективної низьковольтної генерації в приладах типу мазерів на циклотронному резонансі, що має велике практичне значення з точки зору розробки компактних потужних генераторних комплексів міліметрового та субміліметрового діапазонів. Було показано, що низьковольтна генерація в МЦР збуджується як у разі слабо неоднорідного розподілу магнітного поля в області взаємодії гіротронів з традиційною геометрією, так і у разі використання в гіротронах двопучкової магнетронно-інжекторної гармати. Запропоновано механізм групування електронів гвинтового електронного пучка в зростаючому магнітному полі. Також слід відзначити важливий практичний результат розробки планарної магнетронно-інжекторної гармати для формування

стрічкових гвинтових електронних пучків для дводзеркальних гіротронів з перестроюванням частоти у широкому діапазоні частот.

У шостому розділі роботи запропоновано універсальну схему стабілізації параметрів випромінювання вакуумних електронних джерела на основі декількох контурів зворотного зв'язку з пропорційно-інтегрально-диференціальними регуляторами. Важливим практичним результатом є застосування розробленої схеми для довгострокової стабілізації параметрів випромінювання гіротронів на частоті 395 ГГц, що дозволило забезпечити багатогодинну генерацію з нестабільністю потужності менше 0,1% для підвищення чутливості ЯМР спектрометра з динамічною поляризацією ядер. Іншим важливим практичним результатом, що досягнуто у генераторному комплексі на основі 300 ГГц клинотрону було забезпечення ширину спектральної лінії генерації близько 1 МГц із довготривалою нестабільністю частоти менше 5 МГц протягом 10 годин безперервної роботи у разі потужності випромінювання на рівні 100 мВт зі стабільністю близько 0,5 %.

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

1. Підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії в клинотронах з несиметричної оптичної системи завдяки оптимізації профілю швидкостей шарів електронного пучка, що відповідає розподілу амплітуди поля поверхневої хвилі вздовж гребінки та умовам оптимальному розсинхронізму.
2. Результати оптимізації розподілу магнітного поля вздовж структури клинотронів, що, за рахунок збільшення довжини прольоту електронів у ефективному шарі електромагнітного поля поверхневої хвилі, забезпечує підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії. Створено та досліджено відповідні магнітні фокусуєчі системи
3. Результати теоретичного та експериментального дослідження режимів збудження гібридних об'ємно-поверхневих хвиль у резонаторі клинотронів з неоднорідними гребінками, що підтверджує існування електродинамічної взаємодії мод в таких системах.
4. Результати теоретичного розгляду взаємодії електронного пучка з електромагнітними хвилями в надрозмірному резонаторі клинотрону з урахуванням відбиття і трансформації електромагнітних хвиль, що добре узгоджуються з експериментальними даними.
5. Результати теоретичного та експериментального дослідження умов збудження ефективної генерації в низьковольтних гіротронах.

Отримані автором дисертації наукові результати безумовно мають **практичне значення**, що було підтверджено у розробці нових компактних

генераторних комплексів на основі клинотронів та гіротронів для ДПЯ-ЯМР спектроскопії в університетах м. Фукуї та м. Осаки в Японії, а також для юстування квазіоптичної лінії передачі системи з розігріву плазми на стелераторі у Інституті фізики плазми ім. Макса Планка у м. Грайфсвальд, Німеччина. Наукові положення і рекомендації, які викладені в дисертації, є **достовірними і обґрунтованими**, так як вони базуються на використанні добре відомих і надійних методів чисельного моделювання та експериментального дослідження. Проведений автором порівняльний аналіз у більшості випадків продемонстрував добру відповідність теоретичних результатів з моделюванням та експериментальними даними. Результати дослідження автора досить повно відображені в статтях національних і зарубіжних журналів з високим рейтингом і неодноразово доповідалися на Міжнародних конференціях

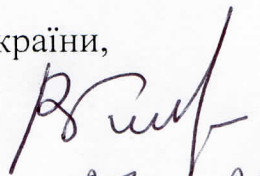
Позитивно оцінюючи наведені в дисертаційній роботі результати досліджень в цілому, слід висловити ряд зауважень щодо її змісту та оформлення.

1. Розрахунок температурних режимів сповільнюючої системи проводиться без урахування втрат на випромінювання. Не розглянуто також вплив зміни температури структури на її електродинамічні характеристики.
2. При моделюванні процесів взаємодії пучка з сповільнюючою структурою автор враховує втрати шляхом заповнення канавок структури діелектриком. При цьому величина уявної частини діелектричної проникності не вказується.
3. При визначенні розподілу поля в резонаторах з багатоступеневими гребінками використовується програма SUPERFISH, яка призначена для моделювання структур з аксіальною симетрією. Застосування цієї програми в даному випадку вимагає обґрунтування.
4. Наявність додаткового механізму угруповання в низьковольтних гіротронах підтверджено експериментально і шляхом моделювання. У той же час фізика цього механізму не досліджена.
5. Відсутнє пояснення суттєвої відмінності експериментальних і розрахункових даних при дослідженні залежності потужності на виході клинотрона від струму пучка (Рис. 3.11)
6. Істотно перевантажений результатами досліджень п'ятий розділ дисертації.
7. У тексті дисертації і підписах до рисунків зустрічаються невдалі стилістичні звороти і професійний сленг, деякі підписи до рисунків не відповідають зображенням.

Зазначені недоліки не заважають оцінити дисертаційну роботу в цілому як завершене наукове дослідження, в якому вирішено низку актуальних проблем сучасної фізичної електроніки, що пов'язані з розробкою ефективних компактних низьковольтних електронно-вакуумних джерел з перестроюванням частоти міліметрового та субміліметрового діапазонів з підвищеною стабільністю параметрів генерації. Нові результати отримані із застосуванням надійних як експериментальних методів, так і методів чисельного моделювання. Аналіз і фізичне трактування результатів, що наведено в дисертаційній роботі, не дають підстав для сумнівів в їх актуальності, достовірності, а також науковій та практичній значимості. Дисертаційна робота в цілому є добре структурованою, висновки сформульовано чітко та обґрунтовано. **Автореферат** повною мірою відображає зміст дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота задовольняє всім чинним вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до докторських дисертацій, а її автор, Кулешов Олексій Миколайович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора 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


27.04.21

В. А. Кушнір

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





А. В. Волобуев