

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Ковальова Євгена Олександровича
«Відкриті резонансні системи для генераторів дифракційного
випромінювання з розвинутим простором взаємодії»,
що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Джерела когерентного терагерцового випромінювання істотно менш розвинені, ніж джерела більш довгохвильового (електровакуумні СВЧ-прилади) і більш короткохвильового (лазери) випромінювання. Однією з основних труднощів традиційних вакуумних приладів, заснованих на стимульованому черенковському і перехідному випромінюваннях електронів, при переході від більш довгохвильових до терагерцових (ТГц) хвиль є зменшення поперечних розмірів простору взаємодії і збільшення щільності електричного струму. Збільшенню поперечних розмірів цих приладів перешкоджає збудження паразитних мод, яке неминуче виникає в закритих електродинамічних системах. Як і в лазерах і СВЧ-приладах, заснованих на стимульованому гальмівному випромінюванні електронів-осциляторів, одним із способів подолання цих труднощів для черенковських приладів є використання відкритих електродинамічних систем. Цей метод використовується лише в оротронах і генераторах дифракційного випромінювання, які давно і успішно застосовуються для ряду додатків на міліметрових хвилях, але не розвинені в ТГц діапазоні. Разом з тим, згідно з оцінками, оротрони і генератори дифракційного випромінювання можуть досить ефективно працювати на терагерцових хвилях, забезпечуючи більш високі потужність і стабільність випромінювання, ніж широко використовувані лампи зворотної хвилі, які в даний час є практично єдиними джерелами ТГц випромінювання середньої потужності. Забезпечення достатньої довжини простору взаємодії в генераторах дифракційного випромінювання, що працюють в ТГц діапазоні, є актуальним завданням дифракційної електроніки.

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової задачі сучасної радіофізики, що стосується розробки та дослідження відкритих резонансних систем для генераторів дифракційного випромінювання (ГДВ) з метою розширення смуги перестроювання ГДВ по частоті, зменшення масогабаритних параметрів та освоєння ними терагерцового діапазону частот. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Ковальова Є.О. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес

для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації також свідчить і те, що вона виконувалася в рамках 2 держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, в яких здобувач брав участь як виконавець.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, представляються досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація Ковальова Є.О. складається зі вступу, що містить загальну характеристику роботи, п'яти розділів основного тексту, висновків до роботи, списку використаних джерел та одного додатку.

У першому розділі актуальність теми дисертації обґрунтовано на основі розгляду сучасного стану розробок джерел когерентного випромінювання в ММ та ТГц діапазонах і показано, що роль вакуумних генераторів у цих діапазонах тільки підсилюється в зв'язку зі зростанням наукових і прикладних досліджень в цих діапазонах. Огляд літератури досить переконливо показує, що для ГДВ у ММ діапазоні залишаються актуальними задачі розширення смуги перестроювання по частоті, розрідження спектру резонансних мод у його відкритої резонансної системи і суттєве зменшення масогабаритних параметрів. Для розробки ГДВ у ТГц діапазоні необхідно розробити відкриту резонансну систему із подовженим простором взаємодії та розрідженим спектром власних мод, підвищити ефективність використання резонансного поля електронним потоком і зменшити теплове навантаження на періодичну структуру, перехід до роботи на вищих просторових гармоніках дифракційної решітки зі збільшеним періодом та шириною її щілин.

У другому розділі розглянуто принцип дії та основні методи дослідження генератора дифракційного випромінювання. Проведено дослідження впливу параметрів періодичної структури у вигляді здвоєної гребінки на ширину діапазону перестроювання ГДВ по частоті. Показано, що ширина діапазону перестроювання суттєво залежить від подовження H_{10} -хвилі в елементарних хвилеводах, утворених протилежними щілинами здвоєної гребінки. За допомогою експериментальних методів та 2D-моделювання виконані дослідження властивостей відкритої резонансної системи, які дають можливість обрати оптимальні параметри здвоєної гребінки. Представлені результати дослідження вихідних характеристик ГДВ в K_a -діапазоні з декількома варіантами параметрів здвоєної гребінки. Розглянуто проблему зменшення масогабаритних параметрів ГДВ зі здвоєною гребінкою шляхом використання малогабаритної ВРС з робочою TEM_{001} -модю, що дозволяє автоматично уникнути збудження вищих мод, розташованих вище по частотному діапазону.

У третьому розділі приведені результати експериментальних досліджень властивостей мод у ВР з фокусним дзеркалом, складеним з кількох відбивачів з циліндричною поверхнею. Для випадку H -поляризації встановлені структура поля та добротність резонансних мод в смузі перестроювання по частоті $f = 25\text{--}38$ ГГц при використанні фокусного дзеркала, складеного з двох, трьох та чотирьох відбивачів. Показано, що для роботи ГДВ на основній TEM_{00q} -моді найбільш придатною є відкритий резонатор з фокусним дзеркалом, складеним з двох відбивачів з циліндричною поверхнею. Для зменшення впливу стику циліндричних поверхонь на дифракційні втрати TEM_{00q} -моди вибрано оптимальний радіус згладжування стику, при якому вдається сформувати супергаусовий розподіл резонансного поля, стійкий до технологічних перекосів дзеркал відкритого резонатора. За допомогою 2-D моделі показана принципова можливість розробки відкритої резонансної системи з супергаусовою модою для ГДВ діапазону 0,34 ТГц.

У четвертому розділі для розширення діапазону перестроювання ГДВ та для підвищення стабільності частоти генерації пропонується використати відкрита резонансна система з асиметричним розміщенням здвоєної гребінки на плоскому дзеркалі. Приведені результати експериментальних досліджень властивостей робочої TEM_{00q} -моди в резонаторі при симетричному та асиметричному розміщенні здвоєної гребінки на плоскому дзеркалі, а також приведені результати 2D-моделювання структури резонансних полів у досліджуваних резонаторах. Було встановлено, що зміщення здвоєної гребінки на периферію плями поля знижує її вплив на поле робочої TEM_{00q} моди і зменшує омичні втрати у гребінці, що сприяє підвищенню добротності та розширенню смуги одномодового перестроювання резонатора по частоті. Також представлені результати «гарячих» досліджень макета ГДВ з асиметричною резонансною системою. Для оцінки переваг ГДВ з асиметричною резонансною системою, проведено порівняння вихідних характеристик генератора в «гарячому» режимі при симетричному та асиметричному розміщенні здвоєної гребінки в плямі поля робочої TEM_{00q} моди. Для ГДВ з обома типами резонансних систем проведено порівняння ширини діапазону одномодового перестроювання по частоті, величини пускового струму, рівня вихідної потужності і загального ККД генератора.

У п'ятому розділі роботи приведено детальний аналіз особливостей конкуренції мод в ГДВ з симетричними та асиметричними відкритими резонансними системами. Представлені результати розробки та експериментальних досліджень ГДВ з періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки та перестроювання частоти на зв'язаних модах в його резонаторі. В якості робочої було обрано одну з гілок зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$, які виникають у резонаторі при зсуві між площинами симетрії дзеркал. Для аналізу властивостей відкритої резонансної системи була використана строга 2-D модель, за допомогою якої була встановлена оптимальна ширина зсуву між площинами симетрії дзеркал. Показано, що робота на зв'язаних модах дозволила розширити діапазон перестроювання

частоти ГДВ без провалів у вихідній потужності та виключити вплив вищих мод на вихідні характеристики генератора.

3. Наукова новизна та достовірність отриманих результатів

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно випливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору і рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

В результаті проведених досліджень отримано ряд нових і принципово важливих результатів. Серед них необхідно визначити наступні:

1. Досліджено залежність властивостей резонансних мод у відкритій резонансній системі від висоти здвоєної гребінки, та визначено оптимальні параметри здвоєної гребінки.

2. Запропоновано експериментальний метод аналізу структури резонансного поля на поверхні дзеркала відкритого резонатора за допомогою рухомого вузла зв'язку.

3. Встановлено, що в резонансній системі із багатофокусним дзеркалом сформоване поле відповідає арифметичній сумі гаусових плям тільки для сфероциліндричного двофокусного дзеркала та суттєво відрізняється від неї для 3-ох і 4-ох фокусного дзеркала. Показано, що при згладжуванні стику суміжних циліндричних поверхонь на двофокусному дзеркалі можна отримати подовжену пляму поля з супергаусовим розподілом амплітуди для розробки ГДВ у ТГц діапазоні.

4. Вперше запропоновано та досліджено роботу ГДВ на асиметричних модах, які виникають в резонансній системі при зміщенні здвоєної гребінки на периферію плями поля перпендикулярно до руху електронного потоку, що зменшило деструктивний вплив здвоєної гребінки на формування робочої моди та дало можливість збільшити смугу перестроювання ГДВ по частоті в 1,5 рази.

5. Вперше досліджено особливості роботи ГДВ на зв'язаних TEM_{001} і TEM_{101} модах в асиметричній резонансній системі, та продемонстровано ефективну роботу ГДВ на одній із гілок зв'язаних мод у широкій смузі частот без впливу вищих мод на вихідні характеристики генератора.

Достовірність і обґрунтованість результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в даній дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і визначається коректністю постановки задач, а також тим, що при їх отриманні використовувалися всебічно апробовані експериментальні методики і перевірені вимірювальні прилади, а також хорошим збігом результатів, отриманих при теоретичному і чисельному моделюванні і в експериментах.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях

Дисертаційна робота Ковальова Є.О є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому рівні.

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1–3, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку. Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики яка стосується з'ясування закономірностей фундаментальних фізичних механізмів і прикладних аспектів відкритих резонансних систем для генераторів дифракційного випромінювання з метою розширення їх смуги перестроювання по частоті, зменшення масогабаритних параметрів та освоєння ними терагерцового діапазону частот.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи є логічною.

Основні результати опубліковані в 5 статтях у профільних наукових виданнях, серед яких 2 статті наукових фахових виданнях України та 3 статті у фахових виданнях, проіндексованих в міжнародних наукометричних базах Scopus, Web of Science, Одержано 1 патент України на винахід. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 4 міжнародних наукових конференціях, а також на наукових семінарах. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування

Зі змісту дисертації видно, що автор цілком чітко уявляє практичну значимість проведених досліджень і, більш того, вибір завдань і об'єктів досліджень проводився їм з урахуванням їх практичного застосування.

Наукова значимість результатів дисертаційної роботи Ковальова Є.О. полягає в тому, що отримані в ній теоретичні та експериментальні результати дозволяють розширити фізичні уявлення про закономірності та особливості збудження, випромінювання і розсіювання електромагнітних коливань елементами зв'язку і сторонніми джерелами в відкритих резонансних системах і в оточуючому просторі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в суттєвому розширенні смуги перестроювання генераторів дифракційного випромінювання по частоті, підвищенні стабільності генерованих коливань, зменшенні масогабаритних параметрів цих джерел в НВЧ діапазоні частот та створення умов для освоєння ними терагерцового діапазону.

Запропонований автором метод аналізу структури резонансного поля на поверхні резонатора, отримані результати досліджень властивостей резонансних мод в асиметричних відкритих резонансних системах дають можливість оптимізувати енергетичні характеристики коливальних систем при розробках твердотільних і електровакуумних приладів, а також

покращувати характеристики вимірювальних приладів, в яких використовуються відкриті резонатори.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики, оптоелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

6. Недоліки і зауваження

Поряд з високим рівнем проведених експериментальних і теоретичних досліджень та цінністю отриманих результатів, мушу зазначити деякі недоліки і зауваження щодо дисертаційної роботи, що розглядається:

1. У першому розділі роботи проведено огляд основних експериментальних і теоретичних досліджень щодо сучасного стану розробок джерел когерентного випромінювання в ММ та ТГц діапазонах, але в досить конспективній формі. Бажано було б провести більш детальний і ґрунтовний огляд цих досліджень.
2. Розглянуті в дисертаційній роботі конфігурації відкритих резонаторів в цілому задовольняють умовам збудження стійких резонансних мод, але в тексті роботи не приведені загальнозв'язані параметри стійкості відкритого резонатора та число Френеля для оцінки дифракційних втрат.
3. В Розділі 2 недостатньо обґрунтована правомірність заміни здвоєної гребінки в 2-D моделі у випадку Е-поляризації прямокутною канавкою на дзеркалі відкритого резонатора, та не вказані очікувані відмінності результатів одержаних за допомогою 2-D моделі від експериментальних даних для ВР зі здвоєною гребінкою.
4. В Розділі 3 не вказані причини зниження добротності коливань на низькочастотній ділянці діапазону перестроювання у ВР з багатофокусним дзеркалом (див. Рис.3.14, Рис.3.20).
5. В Розділі 4 та Розділі 5 розглянуті особливості роботи ГДВ з асиметричними ВРС, але недостатньо чітко описані відмінності режиму роботи ГДВ на зв'язаних модах від режиму роботи ГДВ на основній моді в асиметричній ВРС.

7. Загальні висновки

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи та не стосуються принципових результатів і висновків дисертації. Детальний аналіз дає змогу зробити висновок, що подана до захисту робота є завершеним дослідженням та містить важливі наукові результати.

Здобувач виконав великий обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики, яка стосується з'ясування закономірностей фундаментальних фізичних механізмів і прикладних аспектів відкритих резонансних систем для генераторів дифракційного випромінювання з метою розширення їх смуги перестроювання по частоті, зменшення масогабаритних параметрів та

освоєння ними терагерцового діапазону частот. Ці результати є новими і мають як наукове, так і прикладне значення для розробників елементної бази в мікрохвильовому, терагерцовому і оптичному діапазонах хвиль.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Ковальова Є.О. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно представлені на міжнародних конференціях, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Беручи до уваги усе вищесказане, вважаю, що дисертаційна робота “Відкриті резонансні системи для генераторів дифракційного випромінювання з розвинутим простором взаємодії” задовольняє усім вимогам, зазначених у п. 9, п. 10, п. 12, п. 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Ковальов Євген Олександрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри квантової радіофізики
факультету радіофізики, біомедичної
електроніки та комп’ютерних систем
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, доктор фізико-
математичних наук, професор



Вячеслав МАСЛОВ

2 вересня 2021 року

Підпис засвідчую
начальник відділу кадрів
Служби управління персоналом



Олена ГРОМИКО