

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Ткачової Тетяни Іванівни «Електронно-хвильова взаємодія в металевих резонаторах з поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

Дисертаційна робота Т.І. Ткачової присвячена вирішенню актуальних задач сучасної фізики потужних джерел випромінювання в терагерцовому діапазоні частот, а саме детальному теоретичному аналізу селективних властивостей циліндричних резонаторів, що мають металеву поверхню із поздовжніми гофрами та призначені для використання в гіротронах на другій гармоніці циклотронної частоти.

**Актуальність.** Останні десятиліття характеризуються стрімким розвитком терагерцових технологій, що зумовлено їхнім широким спектром застосувань у різних галузях науки і техніки. Дедалі більше уваги приділяється джерелам потужного когерентного випромінювання в терагерцовому діапазоні, що мають значний потенціал для застосування в різних галузях – від бездротових комунікацій і спектроскопії до неруйнівного контролю та біомедичних досліджень. Водночас ефективна генерація потужного когерентного випромінювання в цьому діапазоні залишається складним науково-технічним завданням, що стимулює пошук нових підходів до створення джерел терагерцових хвиль.

Одним із найперспективніших пристроїв для генерації когерентного випромінювання в субтерагерцовому діапазоні є гіротрони – вакуумні електронні прилади, що використовують ефект циклотронного резонансу. Завдяки високій потужності та здатності працювати в режимі неперервної генерації, вони є незамінними для спектроскопічних, комунікаційних і технологічних застосувань. Проте досягнення необхідної частоти генерації у субтерагерцовому діапазоні стикається з низкою труднощів. Обмеженість магнітного поля, яке здатні створювати комерційні надпровідні магніти, ускладнює реалізацію гіротронів на першій циклотронній гармоніці в субтерагерцовому діапазоні. Це зумовлює необхідність переходу до генерації на вищих гармоніках циклотронної частоти. Проте використання другої і вищих гармонік супроводжується низкою проблем, зокрема падінням інтенсивності електронно-хвильової взаємодії та, як наслідок, посиленою конкуренцією мод, що може суттєво погіршити стабільність та потужність генерації на потрібній частоті.

Дисертаційна робота Ткачової Т.І. присвячена дослідженню перспективного підходу до розв'язання цієї проблеми шляхом використання резонаторів із

поздовжніми гофрами. Вивчення особливостей електронно-хвильової взаємодії в таких структурах є важливим як з теоретичної, так і з практичної точки зору, оскільки воно спрямоване на покращення робочих характеристик гіротронів на другій циклотронній гармонії у субтерагерцовому діапазоні. Враховуючи значущість завдання та потенційні можливості застосування отриманих результатів, обрана тема дослідження є беззаперечно актуальною.

**Обґрунтованість і достовірність.** Наукові положення і висновки дисертації мають високий ступінь обґрунтованості та достовірності. Це обумовлено детальним аналізом багатьох літературних джерел, порівнянням різних методів аналізу власних мод резонаторів гіротронів із поздовжніми гофрами. В дисертаційній роботі використані як аналітичні, так і чисельні методи. В основі використаних аналітичних методів лежить метод часткових областей, що є широко відомим. Серед чисельних методів дослідження використовувалися ітераційний метод Мюллера та метод Рунге-Кутти 4-ого порядку з постійним кроком. Продемонстровано збіжності чисельних розрахунків та їхню узгодженість із результатами інших дослідників для граничних випадків.

**Значущість для науки і практики** дисертаційної роботи полягає у тому, що в ній розглянуто та детально досліджено метод поліпшення селективних властивостей резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармонії за рахунок використання поздовжніх гофрів. Такі резонатори можуть знайти широке застосування для подолання проблеми конкуренції мод в субтерагерцових гіротронах на другій гармонії циклотронної частоти, які застосовуються у багатьох сферах науки і техніки.

Варто відзначити найбільш важливі наукові результати дисертаційної роботи:

1. Показано, що маніпуляція омічними втратами, викликаними гофруванням стінок резонатора гіротрона, може бути використана як метод селекції мод в гіротронах на другій гармонії циклотронної частоти. Цей метод дозволяє в декілька разів збільшити відношення омічних добротностей робочої і конкуруючих мод і, таким чином, поліпшити селективні властивості резонатора.

2. Визначено, що конверсія мод, викликана азимутальною періодичністю резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами, суттєво залежить від їх кількості, глибини та ширини. Дисертантка детально продемонструвала вплив цих параметрів на власні частоти, поля та омічну добротність резонатора. Важливим виявився той факт, що при глибині гофрів, близькій до половини довжини робочої хвилі, конверсія мод для конкуруючих мод, на відміну від робочої моди, є сильною. Показано, що за такої умови інтенсивність взаємодії конкуруючих мод з електронним пучком знижується. Такий висновок є суттєвим для практичного використання гофрованих резонаторів гіротронів на другій гармонії циклотронної частоти.

3. Показано, що при належних розмірах та кількості гофрів вони мають неістотний вплив на робочу моду та викликають збільшення стартових струмів конкуруючих мод, що дозволяє використовувати гофри для вирішення проблеми конкуренції мод в резонаторах гіротронів на другій гармоніці циклотронної частоти.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. В дисертаційній роботі показано, що використання поздовжніх гофрів у циліндричних резонаторах гіротронів на другій циклотронній гармоніці дозволяє придушувати фундаментальні конкуруючі моди, що перешкоджають стабільній та ефективній роботі таких гіротронів.

2. Продемонстрована важливість врахування вищих просторових гармонік при аналізі характеристик резонаторів із гофрованими поверхнями для використання в різних приладах, зокрема, гіротронах.

3. Важливим результатом є той факт, що поздовжні гофри у резонаторі гіротрона на другій циклотронній гармоніці дозволяють розширити діапазон одномодової генерації робочої моди та за рахунок цього збільшити вихідну потужність гіротрона на обраній частоті.

В дисертаційній роботі багато значних результатів та висновків, але є також недоліки. Серед них можна відзначити наступні:

1. Гіротрон – це електронний вакуумний пристрій, ефективність роботи якого оцінюється величиною ККД. У дисертаційній роботі багато говориться про зниження ККД, яке має місце зі зростанням номеру циклотронної гармоніки через зниження інтенсивності взаємодії гвинтового пучка електронів з робочою модою. До зниження ККД також може призводити проблема конкуренції робочої моди на другій гармоніці з модами на першій гармоніці, омичні втрати на стінках резонатора. Проте розрахункових значень ККД в проведених дослідженнях не наведено. Є лише один графік із залежністю вихідної потужності гіротрона від магнітного поля. Тому незрозуміло, наскільки представлені оптимізовані параметри гофрування резонаторів впливають на ефективність роботи гіротронів.

2. Дисертантка використовує термін "конверсія мод" для перерозподілу енергії між просторовими гармоніками мод, хоча цей термін зазвичай використовується для трансформації однієї моди в іншу.

3. У підрозділі 2.2.3. вказано, що власне значення ТЕ моди немонотонно зростає зі збільшенням ширини гофра та мають місце розриви на дисперсійних кривих при певних співвідношеннях між шириною гофра та довжиною хвилі відсічки. Однак, в подальших розрахунках при виборі та аналізі оптимальних параметрів гофрування не вказано, як ці параметри співвідносяться із розривами на дисперсійних кривих.

4. У дисертаційній роботі представлені результати розрахунку власних частот та полів гофрованої структури за допомогою метода перерозкладання

власних полів поліномами Гегенбауера, який, як зазначено у роботі, дозволяє досягти високої точності розрахунків, у тому числі поблизу ребер гофрів (підрозділ 2.3). Але основним методом розрахунку у наступних розділах 3 та 4 обрано метод просторових гармонік, і виникає питання, чому не використовується більш точний метод перерозкладання полів для всіх розрахунків.

Ці недоліки, звісно, дещо погіршують загальне враження від дисертаційної роботи, але не зменшують значення отриманих наукових результатів та позитивну оцінку роботи в цілому. Дисертація добре структурована та написана якісною науковою мовою. Автореферат повністю відображає зміст дисертаційної роботи. Основні результати опубліковані в 6 статтях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science, та пройшли апробацію на 9-и наукових конференціях. При цьому значний внесок в роботу належить особисто дисертантці.

На основі викладеного вище, вважаю, що задачі наукових досліджень розв'язано в повній мірі, дисертаційна робота Ткачової Тетяни Іванівни «Електронно-хвильова взаємодія в металевих резонаторах з поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці» відповідає спеціальності 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01. Дисертація повністю відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, зокрема, пп. 9, 11-13 «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова КМУ №567 від 24.07.2013 р.), а її автор, Ткачова Тетяна Іванівна, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок.

Офіційний опонент

завідувач відділу Фізики пучків заряджених частинок  
Інституту прикладної фізики НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор



О.Г. Пономарьов

Підпис Пономарьова О.Г.

доктора фізико-математичних наук, професора,  
завідувача відділу Фізики пучків заряджених частинок **завіряю**

Вчений секретар

Інституту прикладної фізики НАН України,  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник



О.І. Ворошило