

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Ткачової Тетяни Іванівни

**“Електронно-хвильова взаємодія в металевих резонаторах з
поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці”,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
(спеціальність 01.04.20 - “Фізика пучків заряджених частинок”)**

Метою дисертаційної роботи Ткачової Т. І. є встановлення фізичних закономірностей електронно-хвильової взаємодії в вакуумних резонаторах з поздовжніми гофрами для поліпшення селекції мод в гіротронах на другій циклотронній гармоніці. Вирішення цієї наукової задачі є важливим для розвитку теорії та практичної реалізації потужних генераторів випромінювання, зокрема, у терагерцовому діапазоні частот.

1. Актуальність роботи.

Частотний діапазон електромагнітного спектра від 0.1 до декількох терагерц є загальновідомим як “терагерцовий провал”, який тривалий час залишається у технологічному сенсі важкодоступним для практичних застосувань та досліджень через низьку потужність джерел терагерцового випромінювання. Це пояснюється тим, що, з одного боку, традиційна електроніка, яка має високу потужність на частотах до сотень гігагерц (радіо/мікрохвильовий діапазон), стає малоефективною при спробах перейти на вищі частоти. З іншого боку, оптичні прилади, які, навпаки, є ефективними при значно вищих частотах в інфрачервоному діапазоні, втрачають потужність при зниженні частоти до рівня 1 ТГц та нижче. Збільшення потужності джерел випромінювання у цьому діапазоні частот відкриває багато можливостей, наприклад, для безпечної та неіонізуючої медичної діагностики, у дослідженнях фізики твердого тіла, біомолекул та нових матеріалів, у системах безпеки, виявленні небезпечних речовин тощо.

Наукові результати, представлені у дисертаційній роботі, саме пов'язані із необхідністю покращення робочих характеристик гіротронів як найбільш потужних джерел випромінювання у діапазоні 0.1-1 ТГц, зокрема, розглянуто шляхи покращення селективних властивостей резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармоніці. Це покращення може бути використане на практиці задля подолання проблеми конкуренції мод в таких гіротронах, яка становить одне із основних обмежень на їхню потужність, що підтверджує актуальність роботи.

Варто також зазначити, що дисертаційна робота відповідає тематиці Науково-виробничого комплексу “Відновлювані джерела енергії і ресурсозберігаючі технології” та виконувалась у рамках Програми робіт з атомної науки і техніки ННЦ “ХФТІ”.

2. Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій.

У дисертаційній роботі наведено повне теоретичне обґрунтування основних фізичних моделей, що описують електродинамічні процеси в гофрованих резонаторах. Дисертантка коректно використовувала як аналітичні методи, так і чисельні підходи (метод часткових областей, метод просторових гармонік, метод теорії збуджень, чисельні методи Мюллера та Рунге-Кутти 4 порядку), що підтверджує глибину опрацювання теми.

Результати чисельного моделювання узгоджуються з існуючими літературними даними у граничних випадках, а також добре пояснюють нові фізичні ефекти, що виникають у розглянутих конфігураціях. Усі висновки дисертації логічно випливають із наведеного аналізу, що свідчить про належний рівень наукової достовірності роботи.

3. Основні наукові результати дисертації, їх новизна.

У роботі виконано ґрунтовний аналіз властивостей гофрованих резонаторів з метою визначення конструкції резонатора, яка дозволяє покращити селекцію мод в гіротронах на другій гармоніці циклотронної частоти і, таким чином, дає змогу збільшити їхню вихідну потужність. Серед найбільш важливих наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі, можна виділити наступні:

- Отримання дисперсійного рівняння ТЕ мод у циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами методом просторових гармонік, який враховує вплив вищих гармонік на власні поля та частоти резонатора гіротрона.
- Детальне дослідження впливу параметрів гофрів на власні частоти та поля ТЕ мод гофрованих резонаторів гіротронів, зокрема, виявлення того факту, що гофри із глибиною, яка дорівнює половині довжини хвилі робочої моди, мають слабкий вплив на цю моду, на відміну від гофрів із глибиною, близькою до чверті довжини хвилі, які викликають значну конверсію ТЕ моди у вищі просторові гармоніки.

- Розробка нелінійної самоузгодженої теорії для стаціонарної стадії взаємодії гвинтового електронного пучка з власними ТЕ модами гофрованого резонатора гіротрона.

Новизна дисертаційної роботи підтверджується публікаціями дисертантки у вітчизняних та іноземних виданнях, а також виступами на наукових конференціях. Отримані результати розширюють уявлення про особливості генерації електромагнітного випромінювання в складних резонаторних структурах та можуть бути використані для вдосконалення джерел випромінювання у терагерцовому діапазоні частот.

4. Повнота викладення в опублікованих працях.

Основні наукові результати дисертаційної роботи повністю висвітлено у 15 публікаціях, у тому числі у 6 статтях у наукових фахових виданнях України та інших країн. Всі наукові статті відповідають вимогам ДАК МОН України. Апробація результатів досліджень проведена у вигляді доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, де доповіді отримали позитивні оцінки. У наукових роботах розкрито ключові положення дисертації: теоретичне обґрунтування вибраної моделі електронно-хвильової взаємодії, результати чисельного моделювання, аналіз впливу параметрів гофрування резонаторів на їх електромагнітні характеристики та умови ефективної роботи гіротронів на другій циклотронній гармоніці. Такий рівень представлення результатів досліджень свідчить про належну повноту викладення основного змісту дисертаційної роботи в опублікованих працях, її визнання в науковому середовищі та відкритість до наукової дискусії.

Структура дисертації, мова та стиль викладення відповідають вимогам, що пред'являються МОН України до кандидатських дисертацій. Автореферат досить точно відображає зміст основних положень дисертації.

5. Практична значимість одержаних результатів.

Практична значимість дисертаційної роботи полягає у створенні науково обґрунтованої бази для створення удосконалених гіротронів, які мають розширену область генерації на другій гармоніці циклотронної частоти в терагерцовому діапазоні. Одним із ключових результатів дослідження є встановлення оптимальних умов для ефективної електронно-хвильової взаємодії у гофрованих резонаторах, що дозволяє забезпечити стабільну одномодову генерацію ТГц-випромінювання на другій гармоніці без

необхідності використання потужних магнітних полів, характерних для традиційних гіротронів, що працюють на першій циклотронній гармоніці.

Зменшення вимог до магнітної системи забезпечує зниження габаритів, маси та енергоспоживання, а отже, і вартості гіротронів. Це, у свою чергу, робить компактні ТГц гіротрони на другій (та вищих) циклотронних гармоніках вкрай привабливими для використання у широкому спектрі дослідницьких та прикладних задач.

Таким чином, результати дисертаційної роботи, які спрямовані на удосконалення мікрохвильової вакуумної техніки, мають значний потенціал для подальшого використання не лише у спеціалізованих науково-дослідних центрах, але й у прикладних галузях промисловості, медицини тощо.

6. Зауваження до змісту дисертації.

Попри високий рівень дисертаційної роботи, вона має недоліки, зауваження до яких наведені нижче:

1. Для повноти дослідження електронно-хвильової взаємодії в резонаторах гіротронів на другій гармоніці мають бути розглянуті як ТЕ моди, так і ТМ моди. Проте в основній частині дисертаційної роботи досліджуються лише ТЕ моди. Розповсюдженню ТМ мод в гіротронах присвячено тільки один розділ (Розділ 2.3), в якому розглянуто коаксіальний резонатор з гофрованим внутрішнім провідником. У той же час у циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами ТМ моди можуть виникати внаслідок конверсії мод через неоднорідності структури.

2. У підрозділі 4.4 на рис. 4.10 (стор.129), що демонструє слабку та сильну конверсію робочої моди у вищі просторові гармоніки, наведено розподіл поля лише для одного варіанту гофрування резонатора гіротрона ($N=19$), хоча у попередньому підрозділі 4.3 (стор.127) було сказано, що розглядатися будуть два випадки гофрування ($N=19$ та $N=44$). Звісно, з тексту дисертації можна зробити висновок, що при значенні $N=44$ гофри також мають слабкий та сильний вплив на розподіл електричного поля, коли глибина гофрів дорівнює половині і чверті довжини хвилі, відповідно. Але потрібно було ілюстративно підтвердити цей висновок.

3. Не врахована конверсія мод у місці поєднання резонатора з вихідним хвилеводом. Через погіршення чистоти моди у вихідному поперечному перерізі, як зазначено в описі до рис. 4.17 (стор.139), виникає питання, яка саме мода буде розповсюджуватися у хвилеводі і виводитися з нього.

4. У дисертації досліджуються гофри, що виготовлені з точністю до 0.001 см. Проте виникають сумніви щодо доцільності цих розрахунків через складність виготовлення таких гофрів. Якщо гофри з такою точністю можуть бути виконані технологічно, то це необхідно було зазначити окремо. Також не досліджено вплив точності виготовлення гофрів на електромагнітні характеристики резонаторів гіротронів, що також важливо для технологічних процесів.

Вказані недоліки дещо погіршують враження від дисертації, але не впливають принципово на основні положення та висновки.

7. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Ткачові Тетяни Іванівни “Електронно-хвильова взаємодія в металевих резонаторах з поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці” є ґрунтовним та актуальним дослідженням у сфері фізики потужних джерел терагерцового випромінювання. Вона має високу наукову та практичну цінність, а отримані результати можуть сприяти подальшому розвитку гіротронних технологій. Дисертаційна робота відповідає вимогам 9, 11 та 13 “Порядку присудження наукових ступенів” щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Ткачова Т.І. заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.20 “Фізика пучків заряджених частинок”.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
професор кафедри фізичних основ
електронної техніки Харківського
національного університету
радіоелектроніки



Євген ОДАРЕНКО

Підпис Одаренка Є.М. засвідчую
Проректор з наукової роботи ХНУРЕ



Юрій РОМАНЕНКОВ