

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В. о. директора Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України



Юрій ЛОГВІНОВ

травня

2025 р.

Витяг

з протоколу № 2 Засідання наукового семінару відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України від 08.05.2025 р.

Були присутні: 21 учасник семінару, в тому числі: **доктори фізико-математичних наук:** Мележик П.М., Кириленко А.О., Стешенко С.О., Іванченко І.В., Аверков Ю.О., Кузьмичов І.К., Кулешов О.М., Хуторян Е.М., Аркуша Ю.В., Прокопенко Ю.В.; Кушнір В.А., Чурюмов Г.І., **кандидати фізико-математичних наук:** Єрмак Г.П., Сенкевич О.Б., Мірошніченко В.С., Желтов В.М., Пономаренко С.С., Кривенко О.В., Соболяк О.В., Луценко І.В., Бровенко А.В.

Слухали: доповідь та обговорення дисертаційної роботи аспіранта відділу вакуумної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України Власенка Сергія Олександровича на тему «Взаємодія інтенсивних стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями в надрозмірних електродинамічних структурах черенковських генераторів і підсилювачів субтерагерцового та терагерцового діапазонів» на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Тему дисертації Власенка С.О. затверджено на засіданні Вченої Ради ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України 27 січня 2022 р., протокол № 2. Науковими керівниками призначено: доктора фізико-математичних наук, професора Кулешова О. М. та доктора фізико-математичних наук, старшого дослідника Хуторяна Е. М. (додання керівником д.ф-м.н., старшого дослідника Хуторяна Е. М. наказ № 192/ВК від 30.10.2024 р. , протокол № 9 від 14.11.2024 р.)

В обговоренні дисертаційної роботи брали участь (ставили питання та виступали): Мележик П. М., Кириленко А. О., Кузьмичов І. К., Іванченко І. В., Кулешов О. М., Хуторян Е. М., Чурюмов Г. І., Кушнір В. А., Желтов В. М. Єрмак Г. П.

Ухвалити: прийняти з даної роботи такий висновок.

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації Власенка С.О.**

Актуальність теми та її зв'язок з планами наукових робіт установи

Виходячи з проблем сучасних досліджень у фундаментальній і прикладній фізиці, біології, медицині, хімії, матеріалознавстві та інших галузях можна впевнено сказати, що вкрай важливими й актуальними є сучасні підходи до вирішення проблеми так званого «ТГц провалля», тобто відсутності компактних ефективних генераторів і підсилювачів електромагнітних хвиль з достатніми рівнями потужності та перестроюванням частоти в широких смугах. Зокрема, в субТГц і ТГц діапазонах, що поширюється від 0,1 ТГц до 10 ТГц, можна виділити три сучасних класи приладів: квантові генератори, електронно-вакуумні прилади та напівпровідникові джерела. Кожен з цих класів приладів має свої переваги і недоліки в порівнянні з іншими, але кожен з таких приладів має суттєві обмеження або в рівнях вихідної потужності, або в ширині робочого частотного діапазону. Найбільші рівні вихідної потужності у діапазоні 0,1–1 ТГц мають вакуумні електронні прилади на магнітогальмівному випромінюванні, мазери на циклотронному резонансі, які здатні в субТГц діапазоні генерувати потужності більше 1 МВт у безперервному режимі. Однак основними недоліками таких приладів є потреба в габаритних надпровідних магнітних системах, вузький діапазон перестроювання частоти, а також суттєві технологічні труднощі у виготовленні циліндричних резонаторів високочастотних приладів, що повинні забезпечити прецизійне налаштування на визначену частоту.

Для задач, де достатні рівні потужності лежать у діапазоні до декількох Ватт, перспективними є компактні джерела на випромінюванні Вавілова-Черенкова, Сміта-Парсела та перехідному випромінюванні. Найбільші діапазони перестроювання частоти мають прилади на ефекті Вавілова-Черенкова, такі як лампа зворотної хвилі (ЛЗХ) та її потужний різновид, клинотрон. Застосування приладів даного класу в практичних задачах, таких як спектроскопія, діагностика плазми тощо вимагає високостабільної генерації впродовж експериментів тривалістю в декілька годин і більше, а також одномодового випромінювання у вихідному тракту генератора для його подальшого перетворення у моди квазіоптичної лінії передачі. Оскільки простір взаємодії таких приладів стає суттєво надрозмірним, починаючи вже з субТГц діапазону, виникає потреба в розробці конструкцій приладів з ефективним перетворенням мод, що збуджуються в сповільнювальних системах електронними пучками, в моди вихідних хвилеводів, які також зазвичай є надрозмірними. З точки зору забезпечення високостабільної генерації в клинотронах, де щільний стрічковий електронний пучок осідає на гребінку, необхідно дослідити вплив теплових ефектів на параметри випромінювання в довготривалих режимах роботи.

У ТГц діапазоні постає необхідність у дослідженні нових режимів, таких як збудження гібридних об'ємно-поверхневих хвиль, що має переваги для генерації та посилення електромагнітних хвиль через відносно низьку чутливість до омичних втрат, високу ефективність надрозмірного виводу випромінювання, однорідний розподіл ВЧ поля по ширині гребінки тощо.

Дисертаційну роботу було виконано у відділі вакуумної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України). Робота відповідає напрямку наукових досліджень – фізика та астрономія, що затверджено постановою Міністерства освіти і науки України № 502 від 30.05.2022 р. Дослідження за темою дисертаційної роботи було здійснено відповідно до плану наступних держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: «Нові теоретичні та експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцового та терагерцового діапазонів частот» (шифр «Старт-5», номер держреєстрації 0120U100980, термін виконання 2020–2024 роки); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика-3», номер держреєстрації 0121U100697, термін виконання 2021–2023 роки); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика-4», номер держреєстрації 0124U000770, термін виконання 2024–2026 роки), «Методи моделювання дифракційного випромінювання, поширення та генерації електромагнітних хвиль гігагерцового та терагерцового діапазонів частот за наявності метаматеріалів та графеноподібних 2D-матеріалів» (шифр «Орнатус», номер держреєстрації 0125U000468, термін виконання 2025–2029 роки).

Основні результати роботи отримано в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше визначено вплив транспортування інтенсивного стрічкового електронного потоку в електродинамічних системах клинотронів субТГц і ТГц діапазонів на умови генерації, що дозволило отримати: а) широкосмугову генерацію з помірною вихідною потужністю, або б) генерацію з максимальною потужністю в одномодовому режимі та показано фізичні причини цього явища;
- вперше визначено вплив теплових ефектів в електродинамічних системах клинотронів субТГц і ТГц діапазонів у результаті осідання інтенсивного стрічкового електронного потоку на спектральні характеристики випромінювання, а також показано, що контроль за температурою охолоджувальної рідини дозволяє реалізувати стабільність потужності випромінювання на рівні 3% та стабільність робочої частоти на рівні $5 \cdot 10^{-5}$;

- вперше теоретично та експериментально отримано геометрію електродинамічної системи ТГц клинотрону з підвищеною ефективністю хвилевідного виводу енергії в широкому діапазоні частот;
- вперше продемонстровано підсилення електромагнітних хвиль у черенковському приладі, що працює на гібридних об'ємно-поверхневих хвилях. Результати моделювання вказують на посилення слабкого сигналу до 30 дБ і майже 5% електронного ККД для структури довжиною 41 мм W-діапазону, в той час як було експериментально отримано посилення до 12 дБ на частоті 97,95 ГГц в односекційному підсилювачі, що відповідає результатам моделювання, та продемонстровано робочу смугу частот до 2 ГГц для певної робочої напруги в діапазоні від 3,7 кВ до 3,9 кВ і струму пучка 60 мА.
- запропоновано конфігурацію біперіодичної гребінки, яка підтримує збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод, та показано, що така гребінка забезпечує не тільки підвищений опір зв'язку в ТГц діапазоні, а також широкий діапазон перестроювання частоти (15–20%);
- запропоновано схему ТГц генератора з покращеними характеристиками, в якій електронний потік резонансно збуджує випромінювання Сміта-Парсела двох порядків, при цьому дифракційний порядок, що поширюється тільки в діелектрику, використовується для зворотного зв'язку, а дифракційний порядок у вільному просторі служить вихідним випромінюванням.

Практичне значення одержаних результатів:

- На основі отриманих у дисертаційній роботі результатів теоретичних і експериментальних досліджень було запропоновано та створено нові конструкції генераторів і підсилювачів на ефекті Вавілова-Черенкова в субТГц і ТГц діапазонах.
- Було розроблено генераторну систему на основі клинотрону безперервної дії підвищеної потужності в діапазоні частот 170 ГГц – 175 ГГц і проведено експериментальні дослідження з юстування квазіоптичної лінії передачі енергії модернізованої системи діагностики колективного томсонівського розсіяння на стеллараторі Wendelstein 7-X, Німеччина.

Обґрунтованість і достовірність

У роботі з метою вивчення параметрів взаємодії щільних стрічкових електронних пучків з електромагнітними хвилями в компактних вакуумних електронних приладах на ефекті Вавілова-Черенкова було використано як класичні експериментальні методи вимірювання потужності, частоти та спектра за допомогою калориметричних і болометричних методів, гетеродину, змішувача та спектроаналізатора субТГц діапазону, так і методи чисельного інтегрування рівняння збудження та рівнянь руху електронів методами кінцевих різниць і великих частинок з використанням методу Рунге-Кутти четвертого порядку для аналізу руху нерелятивістського електронного потоку.

Отримані результати та висновки, сформульовані у дисертаційній роботі, підтверджується їхнім узгодженням з відомими й достовірними дослідженнями з фізичної електроніки і публікаціями в рейтингових міжнародних журналах, які входять до міжнародних наукометричних баз.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 5 статей у міжнародних наукових журналах та 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Усі праці індексуються в Scopus і Web of Science.

Опубліковані роботи повністю відповідають темі дисертації та правильно відображають її зміст і основні результати. Публікаціями за темою дисертації є наступні статті в журналах:

1. S. S. Ponomarenko, A. A. Likhachev, **S. A. Vlasenko**, Yu. S. Kovshov, V. V. Stoyanova, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, K. A. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, “Traveling-Wave Amplification in a Circuit with Nonuniform Grating”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 68, № 10, pp. 5232 – 5237, 2021 **(Q2)**.
2. S. Ponomarenko, H. Braune, E. Khutoryan, S. Kishko, Y. Kovshov, A. Kuleshov, H. P. Laqua, D. Moseev, T. Stange, **S. Vlasenko**, “Operational Characteristics of the 175-GHz Continuous-Wave Clinotron”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 70, № 11, pp. 5921 – 5925, 2023 **(Q2)**.
3. **S. Vlasenko**, Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Zabrodskiy, Yu. Arkusha, A. Kirilenko, S. Steshenko, E. Khutoryan, A. Kuleshov, “Radiation Output of the 330 GHz Continuous-Wave Clinotron Oscillator with Modified Cavity”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 71, № 6, pp. 3940-3944, June 2024, doi: 10.1109/TED.2024.33947962024 **(Q2)**.
4. **Власенко, С. О.**, Тані, М., Лукін, К. О., Аркуша, Ю. В., Кириленко, А. О., Стешенко, С. О., Хуторян, Е. М., Кулешов, О. М., Забродський, О. Ф., Пономаренко, С. С., Кишко, С. О., Ковшов, Ю. С., Лихачов, О. О., Татематсу, Й., “Розробка компактних черенковських приладів зі стрічковими електронними пучками субТГц і ТГц діапазонів частот (огляд),” Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка, т. 67, вип. 3, с. 121–136, Бер. 2024. doi: 10.20535/S002134702403004X **(Q4)**.
5. E. Khutoryan, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, P. Melezhik, **S. Vlasenko**, Y. Tatematsu, M. Tani, “Coupling of Spoof Surface Plasmon Polariton with Multiple-Order Smith–Purcell Radiation in THz Cherenkov Oscillator,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 72, № 3, pp. 1383-1389, March 2025, doi: 10.1109/TED.2024.3524206 **(Q2)**.

і в працях міжнародних конференцій:

1. S. Vlasenko, S. Ponomarenko, Yu. Kovshov, V. Stoyanova, A. Likhachev, S. Kishko, E. Khutoryan, A. Kuleshov, “The Gain Analysis of the 345 GHz Traveling-Wave Amplifier with Nonuniform Grating,” 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Delft, Netherlands, 2022, pp. 1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz50927.2022.9895800

2. S. Vlasenko, A. Likhachev, Yu. Kovshov, S. Kishko, V. Stoyanova, S. Ponomarenko, G. Bezrodna, T. Kudinova, Yu. Klieshchova, A. Zabrodskiy, L. Galushka, V. Zavertanniy, A. Suvorov, L. Kirichenko, A. Khudaiberganov, Yu. Arkusha, E. Khutoryan, A. Kuleshov, "High Performance Dispenser Cathode for the THz Clinotron Tubes," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 234-237, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037142
3. S. Ponomarenko, D. Moseev, T. Stange, T. Windisch, S. Vlasenko, E. Khutoryan, A. Kuleshov, H. P. Laqua, "Radiation Pattern Measurements of Corrugated Horn Antenna for 175 GHz CTS Diagnostics at Wendelstein 7-X," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 242-245, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037162
4. E. Khutoryan, S. Vlasenko, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, "Hybrid Bulk-Surface Modes Excited in the THz Cherenkov Oscillator with the Double Grating," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 238-241, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037038
5. S. Ponomarenko, A. Likhachev, S. Vlasenko, Yu. Kovshov, E. Khutoryan, V. Stoyanova, S. Kishko, A. Zabrodskiy, A. Kuleshov, "Regime of Traveling Wave Amplification in the Oversized Circuit with Nonuniform Grating," 2022 23rd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, USA, 2022, pp. 500-501, doi: 10.1109/IVEC53421.2022.10292395
6. Ю. Ковшов, С. Власенко, С. Кишко, С. Пономаренко, Е. Хуторян, О. Кулешов, Й. Татематсу, М. Тані, "Моделювання електронно-хвильової взаємодії в трьох-секційному підсилювачі біжучої хвилі з неоднорідною гребінкою ТГц діапазону частот," Міжнародна конференція «Ужгородська школа з атомної фізики та квантової електроніки» до 100-річчя від дня народження професора Івана Прохоровича Запісочного, Ужгород, 26–27 травня 2022, с. 89-93.
7. S. Vlasenko, S. Ponomarenko, E. Khutoryan, S. Kishko, A. Zabrodskiy, A. Kuleshov, "Sub-THz CW Clinotron Cavity Design," 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Chengdu, China, 2023, pp. 1–2, doi: 10.1109/IVEC56627.2023.10156940
8. S. Vlasenko, Yu. Kovshov, A. Likhachev, Yu. Arkusha, E. Khutoryan, S. Steshenko, S. Kishko, S. Ponomarenko, A. Kuleshov, "Operational Characteristics of the 330 GHz Continuous-Wave Clinotron with Modified Cavity," 2024 Joint International Vacuum Electronics Conference and International Vacuum Electron Sources Conference (IVEC + IVESC), Monterey, CA, USA, 2024, pp. 1–2, doi: 10.1109/IVECIVESC60838.2024.10694969
9. A. Kuleshov, E. Khutoryan, S. Vlasenko, S. Kishko, S. Ponomarenko, M. Tani, Y. Tatematsu, "Recent Advances in THz Clinotrons," 2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Perth, Australia, 2024, pp. 1–2, doi: 10.1109/IRMMW-THz60956.2024.10697558

Обсяг публікацій за матеріалами дисертаційної роботи відповідає вимогам МОН України і є достатнім для подання роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

В дисертаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності. Оформлення дисертації відповідає вимогам.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи апробовано на 7-х міжнародних науково-технічних конференціях і симпозиумах.

- 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz);
- 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW);
- 2022 23rd International Vacuum Electronics Conference (IVEC);
- «Ужгородська школа з атомної фізики та квантової електроніки» до 100-річчя від дня народження професора Івана Прохоровича Запісочного, Ужгород, 26–27 травня 2022;
- 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC);
- 2024 Joint International Vacuum Electronics Conference and International Vacuum Electron Sources Conference (IVEC + IVESC);
- 2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz);

Особистий внесок здобувача. Представлені в дисертаційній роботі результати теоретичних і експериментальних досліджень отримано особисто здобувачем або за його безпосередньої участі. Аналіз та інтерпретацію отриманих теоретичних і експериментальних даних здобувач проводив спільно зі співавторами публікацій та з науковими керівниками. У роботі [1] автор брав участь як в розробці конструкції підсилювача, так і в експериментальних дослідженнях параметрів підсилювача електромагнітних хвиль; у роботі [2] брав участь в розробці конструкції клинотрона та в експериментальних дослідженнях параметрів генерації; у роботі [3] брав участь у розробці модернізованої конструкції ТГц клинотрону та в експериментальних дослідженнях параметрів генерації, провів обробку отриманих результатів; у роботах [4, 5] взяв участь у розробці нових конструкцій генераторів на ефекті Вавілова-Черенкова ТГц діапазону та в моделюванні процесів збудження об'ємно-поверхневих мод у генераторах з біперіодичною гребінкою.

Рішення. Науковий семінар відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України на підставі доповіді Власенка С. О. та детального обговорення дисертаційної роботи «Взаємодія інтенсивних стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями в надрозмірних електродинамічних структурах черенковських генераторів і підсилювачів субтерагерцового та терагерцового діапазонів», що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія», відзначає високий науковий рівень, фундаментальність проведених у ній досліджень і вважає, що за актуальністю вирішуваних задач, новизною, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю отриманих результатів вона відповідає вимогам МОН України, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Науковий семінар відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України **рекомендує:** 1) дисертаційну роботу Власенка С. О. «Взаємодія інтенсивних стрічкових електронних потоків з електромагнітними хвилями в надрозмірних електродинамічних структурах черенковських генераторів і підсилювачів субтерагерцового та терагерцового діапазонів» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в разовій спеціалізованій вченій раді Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України; 2) утворити разову спеціалізовану вчену раду в складі:

Голова:

доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України Ямпольський Валерій Олександрович.

Члени:

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України Аверков Юрій Олегович;

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України Єрмак Геннадій Павлович.

Опоненти:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри фізичних основ електронної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки Одаренко Євген Миколайович;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, начальник лабораторії дослідження і розробок високочастотних інжекторних систем лінійних прискорювачів електронів науково-дослідного комплексу «Прискорювач» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України Кушнір Володимир Абрамович

Головуючий на засіданні семінару відділу
теорії дифракції та дифракційної електроніки
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України



Петро МЕЛЕЖИК

Секретар семінару відділу
теорії дифракції та дифракційної електроніки
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Олена СЕНКЕВИЧ