

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. директора Інституту радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України
доктор фізико-математичних наук



Юрій ЛОГВІНОВ

«05» жовтня 2023р

ВИТЯГ

з протоколу № 1 від 21 вересня 2023 р. розширеного засідання наукового семінару відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України

БУЛИ ПРИСУТНІ: доктори фізико-математичних наук Мележик П. М., Кириленко А. О., Свеженцев О. Є., Стешенко С. О., Кузьмичов І. К., Чурюмов Г. І., Кулешов О. М., Лукін К. О., Іванченко І. В., Білецький М. М., Аверков Ю. О., Миценко І. М., Кушнір В. А. (ННЦ «ХФТІ» НАН України); кандидати фізико-математичних наук Бровенко А. В., Сенкевич О. Б., Мірошніченко В. С., Єрмак Г. П., Пономаренко С. С., Кишко С. О., Ковшов Ю. С., Лихачов О. О.

СЛУХАЛИ: доповідь та обговорення дисертаційної роботи старшого наукового співробітника відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки Хуторяна Едуарда Михайловича на тему «Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотним зв'язком» на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – Фізична електроніка.

Тему дисертації та структурний підрозділ для проведення попередньої експертизи та рецензентів затверджено Вченою радою Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (протокол № 6 від 14 вересня 2023 р.)

В обговоренні дисертації взяли участь (ставили питання та виступали):

д. ф.-м.н. Мележик П. М., д. ф.-м.н. Кириленко А. О., д. ф.-м.н. Свеженцев О. Є., д. ф.-м.н. Кузьмичов І. К., д. ф.-м.н. Чурюмов Г. І., д. ф.-м.н. Іванченко І. В., д. ф.-м.н. Аверков Ю. О., д. ф.-м.н. Миценко І. М., д. ф.-м.н. Білецький М. М., д.ф.-м.н. Лукін К.О., д.ф.-м.н. Кулешов О. М.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації:

1. Актуальність теми дослідження

Метою дисертаційної роботи є виявлення режимів і фізичних ефектів, що приводять до підвищення ефективності збудження та виводу випромінювання в електронно-вакуумних приладах з тривалою взаємодією субТГц та ТГц діапазонів.

В дисертації розглядаються особливості фізичних процесів в електровакуумних генераторах субТГц та ТГц діапазонів, таких як гіротрон та прилади на повільних хвилях у режимі збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод. З однієї сторони, важливість цих досліджень полягає в тому, що в таких приладах у даному діапазоні виникають нові фізичні ефекти, які мають бути вивчені задля більш глибокого розуміння цих процесів. З іншого боку, ці дослідження мають на меті створення генераторів з покращеними характеристиками, що мають важливе значення для практичного застосування у багатьох наукових і практичних задачах. Так, протягом останніх декількох десятиліть тривають роботи з освоєння ТГц діапазону та вирішення проблеми «ТГц провалля», що пов'язано з відсутністю потужних компактних джерел електромагнітного випромінювання з перестроюванням частоти в широкому діапазоні. Це в свою чергу гальмує розвиток наукових напрямів, в яких джерела електромагнітного випромінювання ТГц діапазону є вкрай необхідними.

Тому дослідження конкуренції мод і методів розширення частотного діапазону, реалізація стабілізації вихідних параметрів з урахуванням при неідеальності джерел живлення похибок виготовлення та теплових зміщень є дуже актуальними для створення ТГц гіротронів з покращеними характеристиками.

Також актуальними є дослідження більш компактних приладів на повільних хвилях у режимі збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод, що дозволять подолати перешкоди, які заважають ефективній електронно-хвильовій взаємодії в ТГц діапазоні, зокрема зменшити вплив омичних втрат, збільшити ефективність виводу випромінювання, усунути конкуренцію з паразитними модами.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація узагальнює результати досліджень, що були виконані у відділі дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках таких держбюджетних тем:

- «Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур з

композитними матеріалами; розробка когерентних джерел та вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «Старт-2», державний реєстраційний номер: 0107U001082, 2007–2011 рр.);

- «Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композитними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі, розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «Старт-3», державний реєстраційний номер: 0111U010480, 2012-2016 рр.);

- «Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцового випромінювання: електродинамічне моделювання та експеримент» (шифр «Старт-4», державний реєстраційний номер: 0117U004034, 2017-2019 рр.);

- «Нові теоретичні та експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцового та терагерцового діапазонів частот» (шифр «Старт-5», державний реєстраційний номер: 0120U100980, 2020-2024 рр.).

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації одержані такі нові наукові результати:

Вперше теоретично та експериментально продемонстровано, що наявність відбиття з затримкою в субТГц гіротроні:

- а. Спричиняє зменшення стартового струму та розширює діапазон частотного перестроювання за рахунок збудження прямої хвилі з великим аксіальним хвильовим числом;
- б. Має сильний вплив на конкуренцію мод, приводячи до подавлення генерації на другій циклотронній гармоніці модою з частотою на першій гармоніці, та навпаки; також може спостерігатись кооперативна взаємодія мод з підвищенням потужності обох мод;
- в. Призводить до складного гістерезису при зміні положення відбивача, магнітного поля та прискорювальної напруги. В режимі жорсткого збудження, коливання можуть бути зірвані навіть при дуже малому зміщенні відбивача (або зміні коефіцієнта відбиття).

Вперше теоретично та експериментально вивчено поза-резонаторну взаємодію в ТГц гіротроні при збудженні мод з вищими радіальними індексами у вихідному конусі великої довжини та з малим кутом розкриття (1°). При цьому вперше показано, що:

- а. Поза-резонаторна взаємодія спричиняє різке зростання вихідної потужності випромінювання на частоті першої циклотронної гармоніки при величинах магнітних полів, які відповідають збудженню мод з дуже високим аксіальним індексом завдяки довготривалому синхронізму з вищою радіальною модою при слабкій модуляції електронного потоку в регулярній секції робочою модою.
- б. При розглянутій поза-резонаторній взаємодії розкид пітч-фактора може

спричинити значне підвищення вихідної потужності; при відбитті з затримкою цей розкид може призвести до зниження стартового струму робочої моди, а також до режиму багаточастотної генерації.

- в. Трансформація мод при відбитті від рефлектора з затримкою спричиняє збудження «зв'язаної гарячої» моди з пониженим стартовим струмом, що погіршує умови для збудження генерації на другій циклотронній гармоніці.

Вперше вивчено конкуренцію мод з різними напрямками обертання при зміщенні осі електронного потоку в гіротроні. Показано, що гіротрон з аксіальним виводом випромінювання набагато менш чутливий до зміщення електронного потоку, тоді як в гіротроні з гаусовим конвертором мод вихідна потужність швидко падає з величиною зміщення; при цьому для максимальної вихідної потужності може потребуватись зміна полярності магнітного поля.

Вперше виявлено, що в МВт гіротроні з резонатором, що утворений комбінацією регулярної та слабко конусної секцій, існування «гарячих» мод із великою добротністю спричиняє збудження більш низьких радіальних мод замість вищих мод при зростанні напруги в імпульсному режимі.

Розроблено та реалізовано алгоритми стабілізації й модуляції вихідних параметрів гіротронів з триелектродною гарматою та ізольованим колектором для підвищення ефекту динамічної поляризації ядер для ядерно-магнітної резонансної спектроскопії:

- а. Вперше реалізовано модуляцію частоти зі швидкістю 20 кГц та смугою до 100 МГц в 460 ГГц гіротроні на другій ЦГ з урахуванням гістерезису по напрузі та тепловими ефектами.
- б. Вперше практично реалізовано одночасну стабілізацію вихідної потужності та частоти субТГц гіротронів краще ніж $\pm 1\%$ та $\pm 10^{-6}$ відповідно.

Вперше теоретично знайдено ефективний режим зворотного зв'язку на гібридних об'ємно-поверхневих хвилях в Черенковському генераторі, що є мало чутливим до омичних втрат за рахунок одноразового відбиття об'ємної зворотної хвилі. Знайдено співвідношення між геометричними параметрами структури та прискорювальною напругою для оптимального зворотного зв'язку.

Вперше знайдено конфігурацію виводу випромінювання, що забезпечує високу ефективність при збудженні гібридних об'ємно-поверхневих мод в Черенковському генераторі. При цьому (на відміну від класичних ЛЗХ та ГДВ) потужність омичних втрат та вихідна потужність є співрозмірними в субТГц діапазоні (з урахуванням зниження провідності міді в цьому діапазоні за рахунок шорсткості та ін.).

Вперше теоретично показано, що в Черенковському генераторі на гібридних об'ємно-поверхневих хвилях існують режими, в яких при збільшенні довжини простору взаємодії не спостерігається насичення потужності випромінювання навіть в сильно нелінійному режимі. При цьому із збільшенням довжини простору взаємодії реалізуються дві цілі (зазвичай суперечливі в традиційних приладах): зменшення стартового струму і збільшення вихідної потужності.

Вперше показано, що тривимірний розподіл синхронної гармоніки основної (по ширині) гібридної об'ємно-поверхневої моди є майже однорідним по ширині при неоднорідному розподілі об'ємної гармоніки, що сприяє ефективній взаємодії з широкими стрічковими електронними потоками; при цьому в надрозмірному резонаторі селекція

основної моди (по ширині) відбувається за рахунок високої дифракційної добротності в порівнянні з вищими модами, які мають декілька варіацій поля по ширині гребінки.

4. Ступінь наукової обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі

Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими, а їхня достовірність підтверджена результатами експериментальних досліджень. Дослідження, які проводились, ґрунтуються на строгих методах електродинаміки та використанні класичних моделей руху заряджених частинок, ліцензованого програмного забезпечення та класичних методів експериментального вимірювання частоти й потужності в субТГц і ТГц діапазонах. Отримані автором результати корелюються з результатами інших авторів. У цілому сукупність результатів є незаперечною і добре узгоджується із сучасним рівнем знань про процеси взаємодії електронів з електромагнітним полем в субТГц та ТГц діапазонах. Ступінь обґрунтованості, достовірність наукових положень та висновків, зроблених автором, не викликає сумнівів.

5. Теоретичне та практичне значення наукових результатів роботи

Створені та оптимізовані гіротрони субТГц і ТГц діапазонів знаходять застосування в провідних світових наукових центрах у системах ДПЯ-ЯМР спектроскопії (Far-Infrared Research Center, Університет м. Фукуї, Японія; Institute of Protein Research, Університет м. Осака, Японія), біологічних і медичних дослідженнях (School of Medical Sciences, Університет м. Фукуї), при дослідженні нових матеріалів (Institute of Laser Engineering, Університет м. Осака, Японія; Institute of Technology, Токіо, Японія) тощо.

Одержані результати є перспективними для створення гіротронів субТГц і ТГц діапазонів з покращеними вихідними характеристиками для застосування в дослідженнях у біології, медицині, фізиці плазми, радіолокації, матеріалознавстві тощо.

Результати з дослідження черенковських генераторів на гібридних об'ємно-поверхневих хвилях у подальшому можуть бути застосовані для створення компактних субТГц генераторів з покращеними характеристиками, що є дуже привабливими для багатьох практичних і наукових застосувань.

6. Апробація/використання результатів дисертації

Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науковому семінарі «Теорія дифракції і дифракційна електроніка» Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, семінарах в Університеті Фукуї, Японія, університеті Осака, Японія, а також на наступних міжнародних наукових конференціях і симпозіумах:

- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Bangalore, India, 2011);
- 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves

- (Wollongong, Australia);
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2012);
 - International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2013);
 - IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2014);
 - The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2014)
 - Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), Tucson, USA
 - Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 69.1 (Fukui, Japan, 2014);
 - Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.1 (Tokyo, Japan, 2015);
 - 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (Hong Kong, China)
 - Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 71.1 (Kanazawa, Japan, 2016)
 - 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (Copenhagen, Denmark)
 - IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2016);
 - International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2016);
 - The 7th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017)
 - 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (London, UK)
 - 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (Paris, France)
 - IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2020)
 - 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (Monterey, USA)
 - 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (Rotterdam, Netherlands)
 - 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (Chengdu, China (virtual))
 - IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2022);
 - 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (Delft, Netherlands, virtual)
 - 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2022)
 - 2023 IEEE 23rd International Vacuum Electronics Conference (Chengdu, China, 2023);

7. Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота викладена на 355 сторінках друкованого тексту та включає вступ, огляд літератури, 5 розділів результатів власних досліджень, висновки, список з більше як 346 використаних літературних джерел, з яких переважна більшість англійськомовні, а також додаток. Дисертація ілюстрована 9 таблицями та 128 рисунками. За мовою та стилем викладення матеріалу доступна для сприйняття. Дисертація за своєю структурою і змістом відповідає вимогам МОН України до докторських дисертацій та паспорту спеціальності 01.04.04 – Фізична електроніка

8. Дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертація є оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

9. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача

За результатами досліджень опубліковано 43 наукових праці, в тому числі:

- 1 розділ у колективної монографії;
- 1 стаття у науковому періодичному виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України;
- 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави з напрямку, з якого підготовлено дисертацію;
- 18 статей у виданнях, віднесених до першого-другого квартилів (Q1-Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports;
- 22 тези та доповіді на наукових конференціях.

Розділ монографії

1. S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, "Electromagnetic sources for THz imaging and DNP NMR spectroscopy," In: *Electromagnetic Waves and Antennas for Biomedical Applications*, 2021. DOI: 10.1049/PBHE033E_ch3

Стаття у науковому виданні України

2. **Khutoryan E. M.** "Mode Interaction for Random Signal Generation in MM-Waveband Vacuum Oscillators", *Applied RadioElectronics*, Vol. 12, Issue 1, pp. 51-53, 2013. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre_2013_12_1_11

Статті у наукових виданнях інших держав

3. Sattorov M., **Khutoryan E.**, Lukin K., Kwon O., Park G.-S. "Improved Efficiency of Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 60, Issue 1, pp. 458 – 463, 2013. DOI: [10.1109/TED.2012.2225837](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2225837). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка фізичної моделі, розробка теоретичної моделі, участь в чисельному моделюванні, аналіз та обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, формування висновків).
4. **Khutoryan E.**, Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T. "Theoretical Study of the Effect of Electron Beam Misalignment on Operation of the Gyrotron FU IV A", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, Issue 6, pp. 1586 – 1593, 2014. DOI: [10.1109/TPS.2014.2322674](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2322674). **Scopus Q2, Web of Science, USA** (особистий внесок: участь у розробці фізичної моделі, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з

- експериментальними результатами, формування висновків).*
5. **Khutoryan E.**, Nusinovich Gregory S., Sinitsyn Oleksandr V. "Competition between modes with different axial structures in gyrotrons", *Physics of Plasmas*, Vol. 21, Issue 9, 093114, 2014. DOI: [10.1063/1.4896709](https://doi.org/10.1063/1.4896709). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (*особистий внесок: участь у розробці фізичної моделі, розробка теоретичної моделі, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами, формування висновків*).
 6. **Khutoryan E.**, Sattorov M., Lukin K., O.J. Kwon, S.-H. Min, R. Bhattacharya, I.-K. Baek, S. Kim, M. Yi, J. So, G.-S. Park, "Theory of Multimode Resonant Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, Issue 5, pp. 1628-1634, 2015. DOI: [10.1109/TED.2015.2411680](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2411680). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (*особистий внесок: розробка фізичної моделі, розробка теоретичної моделі, участь в чисельному моделюванні, аналіз та обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, написання статті, формування висновків*).
 7. Sattorov M., **Khutoryan E.**, Lukin K., O.J. Kwon, S.-H. Min, R. Bhattacharya, I.-K. Baek, S. Kim, M. Yi, J. So, G.-S. Park, "Automodulation Processes in Clinotrons With Low-Focusing Magnetic Field", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, Issue 5, pp. 1617-1621, 2015. DOI: [10.1109/TED.2015.2409292](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2409292). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (*особистий внесок: розробка фізичної моделі, розробка теоретичної моделі, участь в чисельному моделюванні, аналіз та обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, формування висновків*).
 8. Idehara, T., Tatematsu, Y., Yamaguchi, Y., **Khutoryan E. M.** et al. "The Development of 460 GHz gyrotrons for 700 MHz DNP-NMR spectroscopy", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, Issue 7, pp. 613-627, 2015. DOI: [10.1007/s10762-015-0150-z](https://doi.org/10.1007/s10762-015-0150-z). **Scopus Q1, Web of Science, USA.** (*особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз і обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, проведення чисельного моделювання й порівняння з експериментальними результатами*).
 9. Idehara T., **Khutoryan E. M.**, Tatematsu Y., Y. Yamaguchi, A.N. Kuleshov, O. Dumbrajs, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "High-Speed Frequency Modulation of a 460-GHz Gyrotron for Enhancement of 700-MHz DNP-NMR Spectroscopy", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, Issue: 9, pp: 819-829, 2015. DOI: [10.1007/s10762-015-0176-2](https://doi.org/10.1007/s10762-015-0176-2). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (*особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, розробка схеми модуляції, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз і обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами*).
 10. **Khutoryan E. M.**, Idehara T., Kuleshov A. N., Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Stabilization of Gyrotron Frequency by PID Feedback Control on the Acceleration Voltage", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, Issue 12, pp. 1157-1163, 2015. DOI: [10.1007/s10762-015-0212-2](https://doi.org/10.1007/s10762-015-0212-2). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (*особистий внесок: розробка схеми стабілізації, складання плану проведення*

експерименту, проведення експериментальних досліджень, аналіз і обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами).

11. O. Dumbrajs, **E. M. Khutoryan**, T. Idehara "Hysteresis and Frequency Tunability of Gyrotrons", *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 37, Issue 6, pp. 551–560, 2016. DOI: 10.1007/s10762-015-0240-y. **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: складання плану проведення експерименту, проведення експериментальних досліджень, аналіз і обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті).
12. N. Miyoshi, T. Idehara, **E. Khutoryan**, Y. Fukunaga, A. Bibin, S. Ito, S. Sabchevski "Combined Hyperthermia and Photodynamic Therapy Using a Sub-THz Gyrotron as a Radiation Source", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 37, Issue 8, pp. 805–814, 2016. DOI: 10.1007/s10762-016-0271-z. **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, розробка схеми стабілізації та модуляції, участь у написанні статті).
13. T. Idehara, **E.M. Khutoryan**, I. Ogawa, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Modulation and Stabilization of the Output Power and Frequency of FU Series Gyrotrons", *International Journal on Terahertz Science and Technology*, Vol. 9, Issue 4, pp. 117-130, 2016. DOI: [10.11906/TST.117-130.2016.12.12](https://doi.org/10.11906/TST.117-130.2016.12.12). (особистий внесок: аналіз та обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, формування висновків).
14. **E. Khutoryan**, T. Idehara, M. Melnikova, N. Ryskin, O. Dumbrajs "Influence of Reflections on Frequency Tunability and Mode Competition in the Second-Harmonic THz Gyrotron", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 38, Issue 7, pp. 824–837, 2017. DOI: 10.1007/s10762-017-0378-x. **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка теоретичної моделі, складання плану проведення експерименту, участь у експериментальних дослідженнях, аналіз і обробка отриманих результатів і виявлення особливості збудження коливальних, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами, формування висновків).
15. **E. M. Khutoryan**, T. Idehara, A. N. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Matsuki, T. Fujiwara "Simultaneous Stabilization of Gyrotron Frequency and Power by PID Double Feedback Control on the Acceleration and Anode Voltages", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 38, Issue 7, pp. 813–823, 2017. DOI: 10.1007/s10762-017-0374-1. **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка схеми стабілізації, складання плану проведення експерименту, проведення експериментальних дослідженнях, аналіз та обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами).
16. K. Kato, H. Qiu, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, M. Tani, T. Idehara, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, Y. Maeda, K. Takayama, Y. Minami, M. Empizo, T. Kurihara, K. Yamanoi, T. Shimizu, K. Takano, N. Sarukura, T. Fukuda, M. Yoshimura, M. Nakajima "Strong yellow

- emission of high-conductivity bulk ZnO single crystals irradiated with high-power gyrotron beam”, *Applied Physics Letters*, Vol. 111, Issue 3, 2017. DOI: 10.1063/1.4994316. **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, розробка схеми стабілізації та модуляції, участь в написанні статті, участь у формуванні висновків).
17. Y. Toda, S. Ishiyama, **E. Khutoryan**, T. Idehara, S. Matsuishi, P. Sushko, and H. Hosono “Rattling of Oxygen Ions in a Sub-Nanometer-Sized Cage Converts Terahertz Radiation to Visible Light”, *ACS Nano*, Vol. 11, Issue 12, pp. 12358–12364, 2017. DOI: [10.1021/acsnano.7b06277](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06277). **Scopus Q1, Web of Science, USA** (особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз і обробка отриманих результатів, розробка схеми стабілізації, участь у написанні статті, участь у формуванні висновків).
 18. Mitsudo S., Glyavin M., **Khutoryan E.**, Bandurkin I., Saito T., Ishikawa Y., Manuilov V., Zotova I., Fedotov A., Kuleshov A., "An Experimental Investigation of a 0.8 THz Double-Beam Gyrotron," *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*", Vol. 40, Issue 11, pp. 1114-1128, 2019. DOI: 10.1007/s10762-019-00629-6. **Scopus Q2, Web of Science, USA** (особистий внесок: участь у складанні плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз і обробка отриманих результатів, опрацювання літературних даних, участь у написанні статті, проведення чисельного моделювання та порівняння з експериментальними результатами).
 19. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Kishko, S. Ponomarenko, M. Glyavin, I. Bandurkin, V. Manuilov, A. Fedotov, I. Zotova, S. Sabchevski, Y. Ishikawa, M. Fukunari, T. Saito, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, T. Idehara. “Increase of Gyrotron Output Power at High-Order Axial Mode Through an After-Cavity Excitation of the Next Transverse Mode”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*", Vol. 42, Issue 6, pp. 684–700, 2021. DOI: 10.1007/s10762-021-00798-3. **Scopus Q2, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка фізичної моделі, розробка теоретичної моделі, складання плану проведення експерименту, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз та обробка отриманих результатів і виявлення особливості збудження коливань, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання й порівняння з експериментальними результатами, формування висновків).
 20. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani “Efficient Excitation of Hybrid Modes in a THz Clinotron”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 42, Issue 6, pp. 671–683, 2021. DOI: 10.1007/s10762-021-00800-y. **Scopus Q2, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка фізичної моделі та конфігурації системи, розробка теоретичної моделі, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання, формування висновків).
 21. **E. M. Khutoryan**, A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, K. A. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, "Hybrid Bulk-Surface Modes Excited by a Sheet Electron Beam in THz Cherenkov Oscillator," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 69, Issue 6, pp. 3407-3412, 2022, DOI: 10.1109/TED.2022.3168526. **Scopus Q2, Web of Science, USA** (особистий внесок: розробка фізичної моделі та конфігурації системи, розробка теоретичної

моделі, опрацювання літературних даних, написання статті, проведення чисельного моделювання, формування висновків).

Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

22. K. Lukin, **E. Khutoryan**, "Mode interaction in resonant Clinotron", IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2011), p.123-124, 2011. DOI: [10.1109/IVEC.2011.5746906](https://doi.org/10.1109/IVEC.2011.5746906)
23. M. Sattorov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, Gun-Sik Park, A. Bera, R. Barik, O. Kwon, Sun-Hong Min, A. Sharma, A. Tanwar, "Experimental study on 0.1 THz clinotron", IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2012), p.453-454, 2012. DOI: [10.1109/IVEC.2012.6262236](https://doi.org/10.1109/IVEC.2012.6262236)
24. M. Sattorov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, G-S Park, O. Kwon, "Automodulation processes in THz resonant backward wave oscillator with low focusing magnetic field", 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves", 1-2, 2012. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2012.6380269](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2012.6380269)
25. **E. Khutoryan**, A. Tsvyk, V. Zheltov, "About reflection diffraction radiation oscillator operation at second space harmonic," 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, p. 403-405, 2013. DOI: [10.1109/MSMW.2013.6622067](https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622067).
26. T. Idehara, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Ueda, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Sub-THz gyrotrons with special functions of frequency control for applications to DNP-NMR spectroscopy," 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 1-2, 2014. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2014.6956167](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2014.6956167)
27. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. Kuleshov, K. Ueda, "Stabilization of Gyrotron Output Power by Use of PID Feedback Control of Anode Voltage," Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.1, p. 552, 2015. DOI: [10.11316/jpsgaiyo.70.1.0_552](https://doi.org/10.11316/jpsgaiyo.70.1.0_552)
28. T. Idehara, **EM Khutoryan**, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, A. Kuleshov, O. Dumbrajs, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "High speed frequency modulation of a 460 GHz gyrotron for application to the 700 MHz DNP enhanced NMR spectroscopy", 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), p. 1-2. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2015.7327859](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327859)
29. **E. Khutoryan**, T. Idehara, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, A. Kuleshov; Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Frequency Modulation of sub-THz gyrotron for 700 MHz DNP-NMR spectroscopy", Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.2, 650, 2015. DOI: [10.11316/jpsgaiyo.70.2.0_650](https://doi.org/10.11316/jpsgaiyo.70.2.0_650).
30. T. Idehara, A. Kuleshov, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, Y. Matsuki, T. Fujiwara, S. Asai, T. Suehara, T. Yamazaki, A. Miyazaki, "High power THz technologies opened by high frequency gyrations covering Sub-THz to THz region," 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), p. 1-3, 2016. DOI: [10.1109/MSMW.2016.7538046](https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538046)
31. **E. Khutoryan**, T. Idehara, M. Melnikova, A. Rozhnev, N. Ryskin, "Influence of

- reflections on frequency stability, tunability and mode competition in the second-harmonic THz gyrotron", 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz),1-2, 2016. **DOI:** [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758527](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758527)
32. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Gyrotron output frequency and power stabilization by PID feedback control on the acceleration and anode voltages," 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)", p. 1-2, 2016. **DOI:** [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758502](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758502)
 33. **E. Khutoryan**, T. Idehara, N. Ryskin, M. Melnikova, O. Dumbrajs, "Using of reflections for expansion of frequency tuning in a THz-band gyrotron", 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p.1-3, 2017. **DOI:** [10.1109/IVEC.2017.8289725](https://doi.org/10.1109/IVEC.2017.8289725)
 34. **E. Khutoryan**, S. Ponomarenko, S. Kishko, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, A. Kuleshov, "THz Cherenkov Oscillator with Surface-Radiating Modes," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)", p. 1-2, 2019. **DOI:** [10.1109/IRMMW-THz.2019.8874184](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874184)
 35. Bandurkin I., Fokin A., Glyavin M., **Khutoryan E.**; Kuleshov A., Mitsudo S., Sabchevski S., Tatematsu Y., Saito T., Ishikawa Y., "An Experimental Investigation of a 0.8 THz Gyrotron with an Improved Mode Selection," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)", p.1-2, 2019. **DOI:** [10.1109/IRMMW-THz.2019.8874170](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874170)
 36. Nakajima M., Kato K., Qiu H., Shimizu T., Sarukura N., Yoshimura M., Fukuda T., **Khutoryan E.**, Tatematsu Y., Tani M., "Observation of strong yellow emission for high-conductivity ZnO excited by sub-terahertz gyrotron beam," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), p. 1-2, 2019. **DOI:** [10.1109/IRMMW-THz.2019.8873849](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8873849)
 37. A. Likhachev, S. Ponomarenko, S. Kishko, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, Masahiko, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Lukin, "THz Clinotron Operating in New Regime of Hybrid Surface-Volume Mode with Wide Frequency Tuning Range," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), p. 1-4, 2020. **DOI:** [10.1109/UkrMW49653.2020.9252641](https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252641)
 38. **E. Khutoryan**, S. Ponomarenko, S. Kishko, K. Lukin, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, A. Kuleshov, "Efficient Regime of Hybrid Surface-Radiating Waves in a THz Clinotron," 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC), p. 155-156, 2020. **DOI:** [10.1109/IVEC45766.2020.9520601](https://doi.org/10.1109/IVEC45766.2020.9520601)
 39. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, A. Fedotov, S. Sabchevski, I. Bandurkin, V. Manuilov, I. Zotova, A. Fokin, S. Kishko, S. Ponomarenko," Influence of the Aftercavity Interaction on the Output Power of a Gyrotron Operating at a High-Order Axial Mode," 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p. 1-2, 2021. **DOI:** [10.1109/IVEC51707.2021.9722446](https://doi.org/10.1109/IVEC51707.2021.9722446)
 40. S. Ponomarenko, A. Likhachev, V. Stoyanova, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Lukin, "Simulation and Design of 300 GHz CW Clinotron Oscillator on Hybrid Surface-Volume Modes," 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p. 1-2, 2021. **DOI:** [10.1109/IVEC51707.2021.9722445](https://doi.org/10.1109/IVEC51707.2021.9722445)
 41. **E. M. Khutoryan**, A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, K. A. 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), p.238-241,2022.

DOI: [10.1109/UkrMW58013.2022.10037038](https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037038)

42. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, “The 3D Study of the Hybrid Bulk-Surface Eigen Modes in the THz Cherenkov Oscillator,” 2022 23 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 1-2.
43. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu and M. Tani, "THz Cherenkov Oscillator Efficiency Increase by Use of Long Structures," 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Chengdu, China, 2023, pp. 1-2.
DOI: [10.1109/IVEC56627.2023.10157891](https://doi.org/10.1109/IVEC56627.2023.10157891)

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Хуторяна Едуарда Михайловича «Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотним зв'язком», що подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, є кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно, за своїм науковим рівнем і практичною та теоретичною цінністю, змістом і оформленням повністю відповідає вимогам п.7 та п. 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», що висуваються до докторських дисертацій, та паспорту спеціальності 01.04.04 – Фізична електроніка.

РЕКОМЕНДУВАТИ дисертаційну роботу «Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотним зв'язком», подану Хуторяном Едуардом Михайловичем на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, до захисту у спеціалізованій вченій раді Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за спеціальністю 01.04.04 – Фізична електроніка.

Головуючий на засіданні
доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України

Петро МЕЛЕЖИК

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Ігор КУЗЬМИЧОВ

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
професор

Микола БІЛЕЦЬКИЙ

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Юрій АВЕРКОВ