

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова

Національна академія наук України

Затверджую
Директор ІРЕ ім. О.Я.Усикова
НАН України



Т.М.Мележик

02 20 21 р.

ВИБРАНІ ПИТАННЯ СУЧАСНОЇ ФІЗИЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

(назва навчальної дисципліни)

РОБОЧА ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

з підготовки доктора філософії

рівень підготовки: ТРЕТІЙ (ОСВІТНЬО-НАУКОВИЙ)

(назва ступеня вищої освіти)

галузь знань: 01 природничі науки

(шифр і назва галузі знань)

спеціальність – 014 «Фізика та астрономія»

(код і назва спеціальності)

для аспірантів 2 курсу 4 семестру

мова навчання — українська

Харків, 2021

Розробники програми:

д.ф.-м.н., с.н.с. Прокопенко Юрій Володимирович;

д.ф.-м.н., проф. Лукін Костянтин Олександрович;

к.ф.-м.н., с.н.с. Мірошніченко Володимир Семенович



РЕЦЕНЗЕНТИ:

Зав відділом експериментальної плазмової електроніки і нових методів прискорення Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорення ННЦ "ХФТІ" НАН України, д.ф.-м.н., проф. Сотніков Генадій Васильович;

Декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, д.ф.-м.н., проф. Шульга Сергій Миколайович;

Професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів факультету автоматики та комп'ютеризованих технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, д.т.н., проф. Чумаков Володимир Іванович

Обговорено та затверджено Вченою радою Інституту
Протокол №3 від 11.02.2021 року.

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки» складена відповідно до Освітньо-наукової програми Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

на третьому освітньо-науковому рівні

(назва рівня вищої освіти)

галузі знань 10 «Природничі науки»

(шифр і назва галузі знань)

спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

(код і назва спеціальності)

Опис навчальної дисципліни

Освітньо-науковий рівень вищої освіти передбачає здобуття особою теоретичних знань, умінь, навичок та інших компетентностей, достатніх для продукування нових ідей, розв'язання комплексних проблем у галузі професійної та/або дослідницької діяльності, оволодіння методологією наукової та педагогічної діяльності, проведення власного наукового дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення (Закон України «Про вищу освіту», 2014).

У рамках навчальної дисципліни аспірантам винесені питання ознайомлення про сучасний стан розвитку фізичної електроніки, зокрема в Україні, та оволодіння знаннями про роботу різноманітних приладів і електродинамічних систем вакуумної, дифракційної, релятивістської, плазмової, квантової, функціональної електроніки та мікро- і наноелектроніки як основи для подальшого використання у практиці наукових досліджень, викладацької та іншої професійної діяльності.

Згідно з навчальним планом вивчення дисципліни «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки» здійснюється у 4 семестрі. Організація навчального процесу здійснюється за кредитно-трансферною системою. На вивчення навчальної дисципліни відводиться 150 годин, 5 кредитів ЄКТС.

Статус навчальної дисципліни: за вільним вибором.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є процеси взаємодії заряджених частинок та їх потоків як з полями власних і вимушених хвиль та коливань різноманітних електродинамічних структур, так і з зовнішніми постійними і змінними електричними та магнітними полями в різноманітних середовищах, а також формування та транспортування потоків заряджених частинок у різноманітних електродинамічних системах.

Міждисциплінарні зв'язки: відповідно до навчального плану, вивчення навчальної дисципліни «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки» здійснюється, коли аспірантом набуті відповідні знання з основних базових дисциплін на III рівні вищої освіти, а також дисциплін: «Іноземна мова», «Філософія», «Методологія, технологія та організація наукових досліджень», з якими інтегрується програма наукової дисципліни. У свою чергу, дисципліна «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки» формує засади поглибленого вивчення аспірантом спеціальних фізичних та фундаментальних теоретичних дисциплін (теоретичної фізики, радіофізики, електродинаміки плазми та конденсованих середовищ, фізики напівпровідників).

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1.1. **Метою викладання навчальної дисципліни «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки»** є ознайомлення аспірантів зі станом розвитку сучасної електроніки, вивчення роботи електродинамічних систем, що здатні генерувати чи підсилювати електромагнітні хвилі та коливання

завдяки перетворенню енергії джерела постійного чи змінного струму, оволодіння створенням керованих опорів, які є основою приладів мікро- і наноелектроніки, та формування у аспірантів системи сучасних знань про основні механізми генерування і підсилення електромагнітного випромінювання і електричних сигналів, а також процеси взаємодії поперечних і поздовжніх хвиль з обмеженими твердотільними структурами та практичне застосування цих знань у різних галузях фізики.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни «Вибрані питання сучасної фізичної електроніки» є:

- ознайомлення з процесами формування, фокусування і руху електронних потоків в електричних та магнітних полях, а також їх математичними описами;
- оволодіння методами управління потоками заряджених частинок, що транспортуються в високочастотних полях;
- освоєння фізичних принципів різних видів емісії заряджених частинок, що використовуються в електронних приладах різних призначень;
- визначення особливостей виникнення нестійкостей електродинамічних систем з потоками заряджених частинок і їх застосування в електронних приладах;
- визначення ефектів, що виникають при взаємодії електронів пучка і хвиль просторового заряду з власними хвилями сповільнюючих структур різних конфігурацій;
- визначення струмової нестійкості в *p-n*-переході з ударною іонізацією і створення напівпровідникових генераторів на її основі;
- ознайомлення з особливостями підсилювання і генерації високочастотних коливань в приладах з тривалою взаємодією О- та М-типу міліметрового та субміліметрового діапазонів;
- оволодіння теорією генераторів дифракційного випромінювання;
- освоєння методів розробки та дослідження генераторів дифракційного випромінювання;
- оволодіння основами релятивістської електроніки та нетрадиційних методів, що застосовуються при створенні потужних і надпотужних генераторів НВЧ і ВВЧ діапазонів;
- ознайомлення з сучасним станом розробок генераторів НВЧ і ВВЧ випромінювань та перспективними варіантами їх конструкцій для освоєння ТГц-діапазону;
- визначення фізичних ефектів взаємодії потоків заряджених частинок з твердотільними структурами різних конфігурацій, в тому числі що містять плазмоподібні і штучні середовища, а також малорозмірні заряджені поверхні.

1.3. Очікувані результати навчання з дисципліни:

Аспірант повинен знати основні принципи і особливості:

- формування та транспортування потоків заряджених частинок у різноманітних електродинамічних системах НВЧ і ВВЧ техніки;
- механізмів збудження власних хвиль та коливань різноманітних сповільнюючих структур внаслідок взаємодії електронних пучків з ними;
- роботи електронних приладів і пристроїв, що засновані на перетворенні енергії джерела живлення постійного чи змінного струму з використанням керованих опорів.

Аспірант повинен ознайомитися з теоретичними, чисельними та експериментальними методами досліджень різноманітних генераторів і підсилювачів електромагнітних хвиль і коливань сантиметрового, міліметрового та субміліметрового діапазонів.

Аспірант повинен вміти:

- застосовувати взаємозв'язок різних розділів фізичної електроніки;
- реалізовувати знання фізичних закономірностей емісій електронів і принципів отримання їх потоків в практичній діяльності при розробці нових приладів міліметрового і субміліметрового діапазонів;
- здійснювати електродинамічний аналіз взаємодії пучків заряджених частинок зі структурами, що сповільнюють, різних конфігурацій, які складаються з різних середовищ, в тому числі плазмоподібних та штучних (метаматеріалів);

- застосовувати і вдосконалювати математичні моделі процесів взаємодії потоків заряджених частинок з різними середовищами, як газоподібними, так і твердо тільними;
- виробляти перспективні шляхи мініатюризації і мікромініатюризації при розробці електронних приладів;
- використовувати нові досягнення фізичної електроніки для створення генераторів, підсилювачів та інших приладів електронної техніки.

2. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Дисципліна	Модулі	Загальна кількість годин	Кредити ЄКТС	Лекції (годин)	Практичні та семінарські заняття	Самостійна робота
«Вибрані питання сучасної фізичної електроніки»	Модуль 1	150	5	30	0	120

МОДУЛЬ 1.

Тема 1. Вакуумна електроніка та класична НВЧ- і ВВЧ-техніка

Теорія Кисунька-Вайнштейна збудження регулярних хвилеводів. Модифікація Советова теорії збудження. Сучасний погляд. Поле просторового заряду у задачах нерелятивістської та помірно релятивістської вакуумної електроніки. Метод функції Гріна. Векторна формула Кірхгофа у дарвінівському наближенні.

Прилади класу МЦР. Гіротрони середньої потужності. Формування гвинтових електронних пучків. Магнетронно-інжекторна гармата. Механізм азимутально-фазового групування. Додатковий механізм групування у низьковольтних МЦР. Гіротрони з перестроюванням частоти у широкому діапазоні. Планарні МЦР зі стрічковими ВЕП.

Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полі. Механізми різних видів електронної емісії. Основні типи катодів вакуумних електронних приладів. Дія просторового заряду в електронних пучках та приладах. Режими роботи електронного діоду. Класифікація і основні параметри електронних потоків. Типи та характеристики електронно-оптичних систем в електронних приладах. Принципи дії та характеристика систем фокусування електронних потоків.

Нерелятивістські магнетрони. "Харківський" режим магнетронів на просторових гармоніках. Безрозжарювальний («холодний») катод.

Прилади на випромінюванні Вавилова-Черенкова. Лампа зворотної хвилі (ЛЗХ) і ЛЗХ-клинотрон. Формування стрічкових електронних потоків у клинотронах ТГц діапазону. Особливості конструкції клинотронів ТГц діапазону. Хвилевідний і квазіоптичний виводи енергії клинотронів. Гібридні об'ємно-поверхневі хвилі у клинотронах з неоднорідними сповільнюючими системами.

Тема 2. Дифракційна електроніка

Дифракційне випромінювання заряду, що рухається близько до періодичної структури – дифракційної решітки, як випромінювання Сміта-Парсела. Ефект Сміта-Парсела як ефект надвипромінювання. Збудження ендовібраторів – об'ємних резонаторів – зовнішніми джерелами. Збудження відкритих резонаторів (ВР) внутрішніми джерелами. Спектр резонансних коливань, виділення резонансних додатків і нерезонансного випромінювання. Теорія взаємодії прямолінійного електронного потоку з полем ВР ГДВ. Одночастинкове наближення та аналітична оцінка граничного ККД.

Стартовий струм, електронне перестроювання частоти, потужність та ККД генерації. Збудження автоколивань на основній моді ВР ГДВ. Особливості збудження мод з варіаціями поля вздовж руху електронів: підсилення та автоколивання при негативних розсинхронізмах. Багатомодові автоколивання. Конкуренція та кооперація мод. Багатопучковий ГДВ і ГДВ з відбиттям електронів у полі ізолюваного колектора електронів. Динамічний хаос у приладах дифракційної електроніки.

Нелінійна теорія ГДВ: Гістерезис та багатомодові коливання в ГДВ (конкуренція мод). Модифікації ГДВ: ГДВ-ЛМН (з локальною магнітною неоднорідністю). ВГДВ (ГДВ з відбиттям електронного потоку). Генерація в ГДВ на просторових гармоніках. Генерація на вищих часових гармоніках струму. Режим множення частоти.

Електромагнітне моделювання та “холодні” дослідження відкритих резонансних систем, що використовуються в ГДВ. Методи дослідження вихідних характеристик ГДВ в неперервному та імпульсному режимах дії.

Місце ГДВ серед сучасних приладів НВЧ-електроніки. Інтерес в інших країнах до розробки ГДВ. Використання ГДВ в науці та техніці.

Тема 3. Релятивістська електроніка. Нетрадиційні методи, що реалізуються при створенні потужних електронних приладів НВЧ і ВВЧ діапазонів

Генерація та транспортування сильнострумів релятивістських електронних пучків (РЕП). Електронний пучок з надкритичним струмом. Коливання віртуального катоду. Генератори на віртуальному катоді. Діагностика параметрів імпульсів потужного НВЧ- та ВВЧ-випромінювання.

Збудження багатострумним електронним пучком власної моди шепочучої галереї циліндричного діелектричного резонатора. Монотронний механізм генерації. Конструкція генератора і результати експериментальних досліджень.

Граничний струм релятивістського електронного пучка (РЕП), який транспортується у супроводжуючому магнітостатичному полі, у плоскому діоді та камерах дрейфу циліндричної та коаксіальної геометрії. Взаємодія електронного пучка з «швидкими» (несповільненими) електромагнітними хвилями. Синхротронне й ондуляторне випромінювання. Лазер на вільних електронах.

Тема 4. Твердотільна електроніка

Напівпровідникові пристрої НВЧ і ВВЧ діапазонів та їх властивості. Підсилювачі та генератори см, мм і субмм хвиль на тунельних діодах, діодах Ганна, ЛПД, ЛГД і транзисторах. Фактори, що обмежують застосування напівпровідникових підсилювачів і генераторів НВЧ і ВВЧ діапазонів та чутливість супергетеродинних приймачів.

Струмова нестійкість у зворотно-зміщеному $p-n$ -переході з ударною іонізацією. Генератори мм і субмм хвиль на основі нестійкості в $p-n$ -переході з ударною іонізацією. Напівпровідниковий фотоелектронний помножувач на основі $p-n-i-p-n$ структури. Динамічний хаос у зворотно-зміщеному $p-n$ -переході з ударною іонізацією. Генерування двохчастотних коливань терагерцевого діапазону.

Електромагнітне випромінювання зарядженої частинки, що рухається по спіральній траєкторії навколо діелектричного циліндру. Механізми збудження власних хвиль циліндричних твердотільних структур з двомірним електронним газом (електростатичне наближення). Черенковське збудження поверхневих хвиль в циліндричних структурах з двомірним електронним газом (електростатичне наближення). Нестійкість трубчатого електронного пучка у разі транспортування над діелектричним циліндром (врахування ефектів запізнення у циліндрі). Взаємодія трубчатого пучка заряджених частинок з диспергуючим середовищем циліндричної конфігурації.

ПІДСУМКОВИЙ МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ.

Екзамен.

3. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Структура навчальної дисципліни	Кількість годин, з них			
	Всього	Аудиторних		Самостійна робота
		Лекцій	Практичних та семінарських занять	
Вакуумна електроніка та класична НВЧ- і ВВЧ-техніка	50	10	0	40
Дифракційна електроніка	38	8	0	30
Релятивістська електроніка. Нетрадиційні методи, що реалізуються при створенні потужних електронних приладів НВЧ і ВВЧ діапазонів	31	6	0	25
Твердотільна електроніка	31	6	0	25
Всього	150	30	0	120

Примітка: 1 кредит ЄКТС – 30 год.

Аудиторне навантаження - 20%, самостійна робота - 80%.

4. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

№ п/п	Тематика лекції	Години
1.	Збудження регулярних хвилевідних структур електронними потоками	2
2.	Формування гвинтових електронних пучків для низьковольтних мазерів на циклотронному резонансі. Механізм азимутально-фазового групування при низьких прискорювальних напругах у МЦР. МЦР з перестроюванням частоти у широкому діапазоні	2
3.	Методи формування і транспортування нерелятивістських електронних потоків у приладах О-типу	2
4.	Генератори М-типу	2
5.	Клинотропи неперервної дії міліметрового та ТГц діапазонів	2
6.	Теорія генераторів дифракційного випромінювання (ГДВ)	2
7.	Теорія автоколивань у ГДВ. Нелінійні явища в ГДВ та деякі модифікації ГДВ	2
8.	Методи розробки та дослідження генераторів дифракційного випромінювання	2
9.	Огляд сучасного стану розробок ГДВ та перспективних варіантів конструкції ГДВ для освоєння ТГц-діапазону.	2
10.	Електронний пучок з надкритичним струмом. Генерування НВЧ- та ВВЧ-випромінювання за допомогою сильнострумів РЕР	2
11.	Автоколивальна система на базі ЦДР з модами шепочучої галереї	2
12.	Інтенсивні електронні пучки. Критичний струм пучка. Лазер на вільних електронах	2
13.	Особливості напівпровідникової електроніки НВЧ і ВВЧ діапазонів	2
14.	Струмова нестійкість в $p-n$ -переході з ударною іонізацією і напівпровідникові генератори на її основі	2
15.	Взаємодія потоків заряджених частинок з твердотільними структурами різних конфігурацій, в тому числі що містять плазмоподібні і штучні середовища, а також малорозмірні заряджені поверхні	2
	Разом	30

5. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ПРАКТИЧНИХ ТА СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Тематика практичних та семінарських занять	Години
	Всього	

6. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ п/п	Тема 1. Вакуумна електроніка та класична НВЧ- і ВВЧ-техніка	Кількість годин.
1.	Теорія Кисунька-Вайнштейна збудження регулярних хвилеводів. Модифікація Советова теорії збудження.	4
2.	Поле просторового заряду у задачах нерелятивістської та помірно релятивістської вакуумної електроніки.	4
3.	Метод функції Гріна.	3
4.	Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полі. Види електронної емісії. Основні типи катодів вакуумних електронних приладів. Дія просторового заряду в електронних пучках та приладах.	3
5.	Класифікація і основні параметри електронних потоків. Типи та характеристики електронно-оптичних систем в електронних приладах.	4
6.	Формування гвинтових електронних пучків.	3
7.	Механізм азимутально-фазового групування. Додатковий механізм групування у низьковольтних МЦР.	3
8.	Гіротрони середньої потужності. Гіротрони з перестроюванням частоти у широкому діапазоні частот.	4
9.	Магнетрони. "Харківський" режим магнетронів на просторових гармоніках.	4
10.	Прилади на випромінюванні Вавилова-Черенкова.	4
11.	Клиноутрон. Гібридні об'ємно-поверхневі хвилі у клиноутронах з неоднорідними сповільнюючими ми системами.	4
	Разом	40

№ п/п	Тема 2. Дифракційна електроніка	Кількість годин.
1.	Ефект Сміта-Парсела	3
2.	Дифракційне випромінювання заряду, що рухається близько до періодичної структури – дифракційної решітки	3
3.	Теорія взаємодії прямолінійного електронного потоку з полем відкритого резонатора ГДВ	3
4.	Багатопучковий ГДВ і ГДВ з відбиттям електронів у полі ізолюваного колектора електронів	3
5.	Динамічний хаос у приладах дифракційної електроніки	3
6.	Нелінійна теорія ГДВ: Гістерезис та багатомодові коливання в ГДВ (конкуренція мод)	3
7.	Генерація в ГДВ на просторових гармоніках. Генерація на вищих часових гармоніках струму	3
8.	Електромагнітне моделювання та "холодні" дослідження відкритих резонансних систем	3
9.	Методи дослідження вихідних характеристик ГДВ в неперервному та імпульсному режимах дії.	3
10.	Використання ГДВ в науці та техніці.	3
	Разом	30

№ п/п	Тема 3. Релятивістська електроніка. Нетрадиційні методи, що реалізуються при створенні потужних електронних приладів НВЧ і ВВЧ діапазонів	Кількість годин.
1.	Генерація та транспортування сильноточових релятивістських електронних пучків (РЕП). Електронний пучок з надкритичним струмом.	4
2.	Коливання віртуального катоду. Генератори на віртуальному катоді. Вірткод	3
3.	Діагностика параметрів імпульсів потужного НВЧ- та ВВЧ-випромінювання	4
4.	Автоколивальна система на базі циліндричного діелектричного резонатора (ЦДР) з модами "шепочучої галареї"	3
5.	Механізми збудження власних коливань високодобротного ЦДР внаслідок взаємодії з багатострумним трубчатим електронним пучком. Модова селекція. Моноотронний механізм генерації	3
6.	Граничний струм релятивістського електронного пучка, який транспортується у супроводжуючому магнітостатичному полі, у плоскому діоді та камерах дрейфу циліндричної та коаксіальної геометрії	4
7.	Взаємодія електронного пучка з «швидкими» електромагнітними хвилями. Синхротронне й ондуляторне випромінювання. Лазер на вільних електронах	4
	Разом	25

№ п/п	Тема 4. Твердотільна електроніка	Кількість годин.
1.	Напівпровідникові пристрої НВЧ і ВВЧ діапазонів та їх властивості	3
2.	Підсилювачі та генератори см, мм і субмм хвиль на тунельних діодах, діодах Ганна, ЛПД, ЛГД і транзисторах	3
3.	Фактори, що обмежують застосування напівпровідникових підсилювачів і генераторів НВЧ і ВВЧ діапазонів та чутливість супергетеродинних приймачів	2
4.	Струмова нестійкість у зворотно-зміщеному <i>p-n</i> -переході з ударною іонізацією. Генератори мм і субмм хвиль на основі нестійкості в <i>p-n</i> -переході з ударною іонізацією	2
5.	Напівпровідниковий фотоелектронний помножувач на основі <i>p-n-i-p-n</i> структури.	2
6.	Динамічний хаос у зворотно-зміщеному <i>p-n</i> -переході з ударною іонізацією	2
7.	Механізми генерування двохчастотних коливань терагерцевого діапазону	2
8.	Електромагнітне випромінювання зарядженої частинки, що рухається по спіральній траєкторії навколо діелектричного циліндру.	3
9.	Механізми збудження власних хвиль циліндричних твердотільних структур з двомірним електронним газом. Черенковське збудження поверхневих хвиль в циліндричних структурах з двомірним електронним газом	3
10.	Нестійкість трубчатого електронного пучка у разі транспортування над діелектричним циліндром (врахування ефектів запізнення у циліндрі). Взаємодія трубчатого пучка заряджених частинок з диспергуючим середовищем циліндричної конфігурації.	3
	Разом	25
	Разом:	120

7. ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ (по-білетно, по три питання)

1. Теорія Кисунька-Вайнштейна збудження регулярних хвилеводів. Модифікація Советова теорії збудження. Сучасний погляд.
2. Дифракційне випромінювання заряду, що рухається близько до періодичної структури – дифра-

кційної решітки, як випромінювання Сміта-Парсела.

3. Граничний струм релятивістського електронного пучка (РЕП), який транспортується у супроводжувачому магнітостатичному полі, у плоскому діоді та камерах дрейфу циліндричної та коаксіальної геометрії.

4. Поле просторового заряду у задачах нерелятивістської та помірно релятивістської вакуумної електроніки.

5. Ефект Сміта-Парсела як ефект надвипромінювання.

6. Взаємодія електронного пучка з «швидкими» (несповільненими) електромагнітними хвилями. Синхротронне й ондуляторне випромінювання.

7. Збудження регулярних хвилевідних структур електронними потоками. Метод функції Гріна. Векторна формула Кірхгофа у дарвінівському наближенні.

8. Теорія взаємодії прямолінійного електронного потоку з полем відкритого резонатора генератора дифракційного випромінювання. Одночастинкове наближення та аналітична оцінка граничного ККД.

9. Інтенсивні електронні пучки. Лазер на вільних електронах.

10. Формування гвинтових електронних пучків для низьковольтних мазерів на циклотронному резонансі. Рух електронів у адіабатично зростаючому магнітному полі. Магнітна пастка. Адіабатична магнетронно-інжекторна пастка. Пітч-фактор. Топології гвинтових електронних пучків. Оцінка розкиду за швидкостями і енергіями електронів.

11. Збудження ендовібраторів – об'ємних резонаторів – зовнішніми джерелами. Збудження відкритих резонаторів внутрішніми джерелами. Спектр резонансних коливань, виділення резонансних додатків і нерезонансного випромінювання генератора дифракційного випромінювання.

12. Електронний пучок з надкритичним струмом. Генерування НВЧ та ВВЧ-випромінювання за допомогою сильнострумівих релятивістських електронних пучків (РЕП).

13. Механізм азимутально-фазового групування при низьких прискорювальних напругах у МЦР. Класифікація гіроприладів: генератори і підсилювачі на циклотронному випромінюванні. Резонатор гіротрона з традиційною геометрією. Вибір робочої моди. Вивід енергії гіротронів з традиційною геометрією. Гіротрони з квазіоптичним виводом.

14. Стартовий струм, електронне перестроювання частоти, потужність та ККД генерації генератора дифракційного випромінювання (ГДВ). Збудження автоколивань на основній моді відкритого резонатора ГДВ.

15. Генерація та транспортування сильнострумівих релятивістських електронних пучків.

16. Особливості конструкції гіротронів середньої потужності ТГц-діапазону. Гіротрони з частотною перестройкою в широкому діапазоні. Механічна перестройка частоти в МЦР.

17. Особливості збудження мод з варіаціями поля вздовж руху електронів у генераторі дифракційного випромінювання: підсилення та автоколивання при негативних розсинхронізмах.

18. Електронний пучок з надкритичним струмом. Коливання віртуального катоду. Генератори на віртуальному катоді.

19. Методи формування і транспортування нерелятивістських електронних потоків у приладах О-типу. Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полі. Механізми різних видів електронної емісії. Основні типи катодів вакуумних електронних приладів.

20. Багатомодові автоколивання в генераторі дифракційного випромінювання (ГДВ). Конкуренція та кооперація мод. Конкуренція між режимом ГДВ та лампи зворотної хвилі (ЛЗХ). Причина, наслідки та методи боротьби з режимом ЛЗХ.

21. Збудження багатострумівим електронним пучком власних мод шепочучої галереї циліндричного діелектричного резонатора (ЦДР). Автоколивальна система на базі ЦДР з модами шепочучої галереї. Модова селекція коливань. Моноотронний режим генерації. Вивід енергії власних слабозгасаючих коливань ЦДР та її випромінювання.

22. Дія просторового заряду в електронних пучках та приладах. Режими роботи електронного діо-

- ду. Обмеженість струму просторового заряду. Дія об'ємного заряду і власного магнітного поля в електронних пучках.
23. Багатопучковий генератор дифракційного випромінювання (ГДВ). ГДВ з відбиттям електронів у полі ізолюваного колектора електронів. Вплив на стартовий струм та вихідну потужність.
24. Діагностика параметрів імпульсів струму інтенсивного електронного потоку та потужного НВЧ-випромінювання.
25. Класифікація і основні параметри електронних потоків. Принципи побудови гармати Пірса. Вплив початкових теплових швидкостей. Методи управління електронним потоком. Вплив іонів в електронних потоках.
26. Динамічний хаос у приладах дифракційної електроніки.
27. Взаємодія потоків заряджених частинок з твердотільними структурами різних конфігурацій, в тому числі що містять плазмоподібні і штучні середовища, а також малорозмірні заряджені поверхні.
28. Типи та характеристики електронно-оптичних систем в електронних приладах. Електронно-оптичні системи клинотронів мм і субмм діапазонів.
29. Методи розробки та дослідження генераторів дифракційного випромінювання.
30. Електромагнітне випромінювання зарядженої частинки, що рухається по спіральній траєкторії навколо діелектричного циліндру. Механізми збудження власних хвиль циліндричних твердотільних структур з двомірним електронним газом.
31. Принципи дії та характеристика систем фокусування електронних потоків. Фокусування електронних потоків системами з постійними магнітами. Періодичне фокусування.
32. Електромагнітне моделювання та "холодні" дослідження відкритих резонансних систем, що використовуються в генераторах дифракційного випромінювання (ГДВ). Методи дослідження вихідних характеристик ГДВ в неперервному та імпульсному режимах дії.
33. Черенковське збудження поверхневих хвиль в циліндричних структурах з двомірним електронним газом.
34. Стрічковий електронний потік в однорідному магнітному полі. Вплив початкових пульсацій. Аксиально-симетричний електронний потік в однорідному магнітному полі. Теорема Буша. Формування трубчатих електронних потоків, особливості та умови вводу в магнітне поле.
35. Нелінійні явища в генераторах дифракційного випромінювання (ГДВ). Профілювання магнітного поля в ГДВ. Клинотронний кут. Модифікації ГДВ. ГДВ з локальною магнітною неоднорідністю.
36. Нестійкість трубчатого електронного пучка при розповсюдженні над діелектричним циліндром та циліндром із лівостороннього метаматеріалу.
37. Генератори М-типу. Нерелятивістські магнетрони. "Харківський" режим магнетронів на просторових гармоніках. Безрозжарювальний («холодний») катод.
38. Генерація в генераторі дифракційного випромінювання на просторових гармоніках. Генерація на вищих часових гармоніках струму. Режим множення частоти. Режим генерації на вищих гармоніках струму в відкритому резонаторі при самозбудженні в режимі лампи зворотної хвилі.
39. Взаємодія трубчатого пучка заряджених частинок з диспергуючим середовищем циліндричної конфігурації.
40. Клинотрони неперервної дії міліметрового та ТГц-діапазонів. Формування стрічкових електронних потоків у клинотронах ТГц-діапазону. Транспортування інтенсивних стрічкових електронних потоків у клинотронах з магнітними фокусуючими системами. Особливості конструкції клинотронів ТГц діапазону. Хвилевідний і квазіоптичний виводи енергії клинотронів.
41. Сучасний стан розробок генератора дифракційного випромінювання (ГДВ) та перспективних варіантів конструкції ГДВ для освоєння ТГц-діапазону.
42. Напівпровідникові пристрої НВЧ- і ВВЧ-діапазонів та їх властивості. Підсилювачі та генератори см, мм і субмм хвиль на тунельних діодах, діодах Ганна, лавино-прольотних (ЛПД) та лавино-генераторних (ЛГД) діодах і транзисторах. Фактори, що обмежують застосування напівпровідникових підсилювачів і генераторів НВЧ- і ВВЧ-діапазонів та чутливість супергетеродинних приймачів.

43. Прилади на випромінюванні Вавилова-Черенкова. Лампа зворотної хвилі (ЛЗХ) і ЛЗХ-клинотрон. Дисперсія хвиль у неоднорідних сповільнювальних системах клинотронів. Збудження об'ємних поверхневих і гібридних об'ємно-поверхневих хвиль у генераторах зі сповільнювальними системами (дифракційними решітками). Багаточастотні клинотрони.

44. Місце генератора дифракційного випромінювання (ГДВ) серед сучасних приладів НВЧ-електроніки. Інтерес в інших країнах до розробки ГДВ. Використання ГДВ в науці та техніці.

45. Струмова нестійкість в $p-n$ -переході з ударною іонізацією і напівпровідникові генератори на її основі. Напівпровідниковий фотоелектронний помножувач на основі $p-n-i-p-n$ структури. Динамічний хаос у зворотно-зміщеному $p-n$ -переході з ударною іонізацією. Генерування двохчастотних коливань терагерцевого діапазону в лавино-генераторному діоді.

8. ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Завданнями самостійної роботи є опрацювання матеріалу згідно тематичного плану із застосуванням рекомендованої літератури, сучасних інформаційних технологій та спеціалізованих ресурсів в Інтернеті, а також підготовка усного виступу за окремою темою в межах тематичного плану.

9. МЕТОДИ НАВЧАННЯ

Основними видами навчальних занять згідно з навчальним планом є лекції та самостійна робота. Теми лекційного курсу розкривають проблемні питання відповідних розділів дисципліни, передбачають застосування аспірантами методів дослідження у практиці розв'язання наукових задач у галузі фізики та астрономії.

Допоміжні методи навчання: пояснення, бесіда, розповідь, ілюстрація, спостереження, навчальна дискусія, обговорення теоретичного та/або науково-практичного питання, усне тематичне повідомлення та його обговорення, інтуїтивна опора на життєвий досвід.

10 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА АТЕСТАЦІЙНА ОЦІНКА ЗА ДИСЦИПЛІНОЮ

10.1 Підсумкова атестаційна оцінка

Для оцінювання роботи аспіранта протягом семестру підсумкова рейтингова оцінка $O_{сем}$ розраховується як сума залікових оцінок за різні види діяльності та контрольні заходи. В табл. 1 наведено розподілення балів за підсумковими рейтинговими етапами у разі їх зарахування.

Таблиця 1. Поточні залікові оцінки, що дозволяють зарахувати підсумкові рейтингові етапи

Вид діяльності / контрольний захід	Оцінка ($O_{сем}$)
Індивідуальне опитування в межах теми 1	15...25
Індивідуальне опитування в межах теми 2	15...25
Індивідуальне опитування в межах теми 3	15...25
Індивідуальне опитування в межах теми 4	15...25
Всього	60...100

У разі отримання аспірантом рейтингової оцінки $O_{сем}$ менше 20 балів він не допускається до екзаменаційного іспиту як не витримавши рейтингу. У разі не зарахування якогось етапу аспіранту надається право його захисту протягом екзаменаційного іспиту як додаткове завдання.

Як форма підсумкового контролю для дисципліни "Вибрані питання сучасної фізичної електроніки" застосовується **екзамен**. При цьому виді контролю підсумкова атестаційна оцінка P_n обчислюється за формулою:

$$P_n = 0,6O_{сем} + 0,4O_{екз},$$

де $O_{сем}$ — рейтингова оцінка за семестр за 100-бальною системою, $O_{екз}$ — оцінка за екзамен за 100-

бальною системою. Результат екзаменаційного іспиту складається з відповідей на 3 запитання за темами змістового модуля. Відповіді на перше і третє запитання максимально оцінюються в 60 балів (по 30 балів за кожне питання), а друге — у 40 балів. Таким чином, в сумі 100 балів.

10.2 Критерії оцінювання роботи аспіранта

Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки складається із знань:

1. Фізичних принципів різних видів емісії заряджених частинок, що використовуються в електронних приладах різних призначень.
2. Процесів формування, фокусування і транспортування електронних потоків в електричних та магнітних полях, а також їх математичні описи. Методи управління потоками заряджених частинок, що транспортуються в високочастотних полях.
3. Фізичних ефектів взаємодії електронних пучків з твердотільними структурами різних конфігурацій, в тому числі що містять плазмоподібні і штучні середовища, а також малорозмірні заряджені поверхні.
4. Теоретичні основи аналізу нестійкостей систем з потоками заряджених частинок. Ефектів, що виникають при взаємодії електронів пучка і хвиль просторового заряду з власними хвилями сповільнюючих структур різних конфігурацій.
5. Принципів і особливостей підсилювання і генерації високочастотних коливань в приладах з тривалою взаємодією О- та М-типу сантиметрового, міліметрового та субміліметрового діапазонів.
6. Принципу роботи та теорії генераторів дифракційного випромінювання.
7. Основ релятивістської електроніки та нетрадиційних методів, що застосовуються при створенні потужних і надпотужних генераторів НВЧ- і ВВЧ-діапазонів.
8. Напівпровідникових пристроїв НВЧ- і ВВЧ-діапазонів та їх властивостей. Роботи електронних приладів і пристроїв, що засновані на перетворенні енергії джерела живлення постійного чи змінного струму з використанням керованих опорів. Підсилювачів та генераторів см, мм і субмм хвиль на тунельних діодах, діодах Ганна, ЛПД, ЛГД і транзисторах.

Необхідний обсяг умінь для одержання позитивної оцінки:

1. Застосовувати взаємозв'язок різних розділів фізичної електроніки, яка є основою сучасної електронної техніки.
2. Застосовувати знання фізичних закономірностей емісії електронів і принципів отримання їх потоків в практичній діяльності при розробці нових приладів міліметрового і субміліметрового діапазонів.
3. Здійснювати електродинамічний аналіз взаємодії пучків заряджених частинок зі сповільнюючими структурами різних конфігурацій, що складаються з різних середовищ, в тому числі плазмоподібних і штучних (метаматеріалів).
4. Застосовувати і вдосконалювати математичні моделі процесів взаємодії потоків заряджених частинок з різними середовищами, як газоподібними, так і твердотільними.
5. Аналізувати і виявляти механізми збудження власних хвиль та коливань різноманітних сповільнюючих структур внаслідок взаємодії електронних пучків з ними.
6. Виробляти методики експериментальних досліджень різноманітних об'єктів фізичної електроніки із застосуванням перевірених методів їх діагностики.
7. Розробляти перспективні шляхи мініатюризації і мікромініатюризації при розробці електронних приладів. Використовувати нові досягнення фізичної електроніки для створення генераторів, підсилювачів та інших приладів електронної техніки

Позитивні підсумкові атестаційні оцінки:

Задовільно, D, E (60-74). Мати мінімум знань і умінь. Захистити реферативну роботу за окремою темою фізичної електроніки. Уміти пояснити принципи робіт різноманітних електронних приладів і електродинамічних систем вакуумної, дифракційної, релятивістської, плазмової, функціональної електроніки та мікро- і наноелектроніки. Мати уявлення про процеси емісії носіїв заряду та формування, фокусування і транспортування їх потоків в електричних та магнітних полях.

Добре, C (75-89). Твердо володіти мінімумом знань. Уміти пояснити основні принципи дії

та аналізувати основні вузли електронних пристроїв, основою яких є взаємодія потоків заряджених частинок з полями власних хвиль чи коливань різноманітних електродинамічних структур. Володіти фізичними методами управління потоками заряджених частинок, що транспортуються в високочастотних полях. Уміти самостійно застосовувати методи аналізу механізмів збудження і нестійкостей електродинамічних систем. Володіти математичними методами дифракційної та плазмової електроніки. Застосовувати тунельні діоди, діоди Ганна, ЛПД, ЛГД і транзистори для генерування електромагнітних хвиль мм і субмм діапазонів.

Відмінно, А, В (90-100). Досконально знати всі теми. Впевнено орієнтуватися в рекомендованих літературних джерелах. Мати уявлення про сучасні тенденції та перспективи розвитку фізичної електроніки. Уміти розробляти технічні завдання на проектування електромагнітних автоколивальних систем, генераторів і підсилювачів та будь-яких їх частин. Професійно обирати та коректно застосовувати елементну базу для їх конструювання. Створювати структурну та розробляти і розраховувати принципову схему будь-якого пристрою фізичної електроніки за технічним завданням.

Таблиця 2. Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		для заліку
96-100	A	зараховано
90-95	B	
75-89	C	
66-74	D	
60-65	E	
35-59	FX	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

11. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Методичне забезпечення складається із навчального контенту (конспекту, розширених планів лекцій, презентацій з використанням мультимедійних пристроїв), рекомендованих первинних джерел за темами, завдання для самостійної роботи і поточного та підсумкового контролю знань і вмінь аспіранта.

Аспірант має доступ до бібліотеки Інституту, де знаходяться підручники і посібники із загальних та спеціальних дисциплін, науково-періодичні видання в галузі фізики та астрономії, методичні рекомендації із окремих тем, автореферати дисертацій та дисертації за спеціальностями в галузі фізики та астрономії, у тому числі — радіофізики та фізичної електроніки. Бібліотека має точку доступу до Інтернет-баз даних.

11.1. Перелік навчально-методичної рекомендованої літератури

11.1.1. Основна література

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 648 с. ISBN 5-9221-0200-1.
2. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных приборов. – Нижний Новгород: Ин-т. прикладной физики РАН, 2012. – 576 с.
3. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ электроника. М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
4. Шматько О.О., Одаренко Э.М. Электроника сверхвысоких частот: Основы теории и лабораторный практикум: Учеб. пособ. – Харьков: ХНУим. В.Н. Каразина. Факт, 2003.

5. Андреев В.В., Балмашнов А.А., Корольков В.И., Лоза О.Т., Милантьев В.П. Физическая электроника и её современные приложения: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 383 с.
6. Шестоपालов В.П. Дифракционная электроника. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. – 231 с.
7. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. Шестоपालова В.П. – Киев.: Наук. думка, 1991. – 320 с.
8. Кириченко А. Я., Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф., Черпак Н. Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. – Киев: Наукова думка, 2008. – 286 с. ISBN 978-966-00-0945-3
9. Ефимов Б.П., Зеленский А.А., Мильчо М.В. Приборы СВЧ миллиметрового диапазона волн: учебное пособие. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1990. – 82 с.
10. Левин Г.Я., Бородкин А.И., Кириченко А.Я. и др. Клиноотрон / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наук. думка, 1992.
11. A. Kuleshov, Y. Ishikawa, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, T. Idehara, E. Khutoryan, S. Kishko, S. Ponomarenko, M. Glyavin, I. Bandurkin, V. Manuilov, A. Fedotov, T. Saito, “Low-Voltage Operation of the Double-Beam Gyrotron at 400 GHz”, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 67, № 2, pp.673–676, 2020.
12. Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, “Numerical simulation and experimental study of sub-THz and THz CW clinotron oscillators”, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 65, № 6, pp.2177–2182, 2018.
13. Аверков Ю.О., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Численное исследование взаимодействия трубчатого пучка заряженных частиц с диэлектрическим цилиндром // ЖЭТФ. – 2020. – **157**, Вып. 5. – С. 877–888. DOI: 10.31857/S0044451020050119
14. Ю.О. Аверков, Ю.В. Прокопенко, В.М. Яковенко Потери энергии заряженной частицы при взаимодействии с диэлектрическим цилиндром // Радиофизика и электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 60–69. DOI: <https://10.15407/fej2020.01.060>
15. Аверков Ю.О., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Нелинейная стабилизация резистивной неустойчивости трубчатого пучка заряженных частиц, движущегося над твердотельным плазменным цилиндром // Физика плазмы. – 2019. – **45**, № 6. – С. 529–537. DOI: 10.1134/S0367292119060015
16. Averkov Yu.O., Prokopenko Yu.V., and Yakovenko V.M. Interaction between a tubular beam of charged particles and a dispersive metamaterial of cylindrical configuration // Phys. Rev. E. – 2017. – **96**. P. 013205(12).
17. Аверков Ю.О., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Неустойчивость трубчатого электронного пучка, движущегося над диэлектрическим цилиндром // ЖТФ. – 2017. – **87**, № 10. – С. 1571–1577.
18. Дормидонтов А.В., Кириченко А.Я., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Прокопенко Ю.В., Сотников Г.В., Уваров В.Т., Филиппов Ю.Ф. Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи" // Письма в ЖТФ. – 2012. – **38**, Вып. 2. – С. 65–73.
19. Галайдыч К.В., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Прокопенко Ю.В., Сотников Г.В., Уваров В.Л. Возбуждение миллиметровых волн сильноточным РЭП в диэлектрическом резонаторе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. – 2012. – **58**, № 3 (79). – С. 174–178.
20. Дормидонтов А.В., Прокопенко Ю.В., Ханкина С.И., Яковенко В.М. Потери энергии заряженной частицы, движущейся по спиральной траектории // Радиофизика и электроника. – 2014. **Т.5(19)**, №1. – С. 29–41.
21. Дормидонтов А.В., Прокопенко Ю.В., Ханкина С.И., Яковенко В.М. Потери энергии заряженной частицы на возбуждение собственных волн в цилиндрических структурах с двумерным электронным газом // Радиофизика и электроника. – 2014. – **Т.5(19)**, №4. – С. 63–72.
22. Дормидонтов А.В., Прокопенко Ю.В., Ханкина С.И., Яковенко В.М. Потери энергии быстрых зарядов в структурах с двумерным электронным газом // ЖТФ. – 2015. – **85**, № 7. – С. 125–132.
23. Аверков Ю.О., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Взаимодействие потока заряженных частиц трубчатого пучка с собственными колебаниями диэлектрического цилиндра // Радиофизика и

- электроника. 2016. – 7(21). Вып. 4. С. 68–76.
24. Кисунько Г.В. Электродинамика полых систем. – Л.: ВКАС, 1949. – 422 с.
 25. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: Сов. радио, 1957. – 483 с.
 26. Советов Н.М. Основы теории ламп бегущей волны с учётом релятивистских эффектов. – Саратов: Изд. Саратовского ун-та, 1966. – 153 с.
 27. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Советское радио, 1973. – 400 с.
 28. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбуждённых классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. вузов Радиофизика. – 1967. – 10, № 9–10. – С. 1414–1453.
 29. Зинченко Н.С. Курс лекций по электронной оптике. – Харьков: Изд. Харьковского ун-та, 1961. 362 с.
 30. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Сов. радио, – 1966.
 31. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
 32. Лукин К.А., Шестопапов В.П. Нелинейная теория ГДИ // ДАН УССР. – 1978.
 33. Бакай А.С., Лукин К.А., Шестопапов В.П. Нелинейная нестационарная теория генераторов дифракционного излучения // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика, 1979. – 22, № 9.
 34. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986. – 208 с.
 35. Маршал Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987. – 240 с.
 36. Эткин В.С. Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВЧ. – М. Радио и связь, 1983.
 37. СВЧ полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Г. Уотсона, пер. с англ. под ред. В.С. Эткина. – М.: Мир, 1972.
 38. Гусятинер М.С., Горбачев А.И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. – М.: Радио и связь, 1983.
 39. Кэрролл Дж. СВЧ–генераторы на горячих электронах. – М.: Мир, 1972.
 40. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Моклас, 1989.
 41. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. – М.: Мир, 1991.
 42. Пирс Дж. Электроны, волны и сообщения. – М.: Изд. физ.-мат. лит., 1961.

11.1.2. Допоміжна література

43. Gilmour A.S., Jr. Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers, and Gyrotrons. – Boston-London: Artech House, 2011.
44. Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, A. A. Likhachev, A. A. Danik, L. P. Mospan, S. A. Steshenko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, “Effect of Mode Transformation in THz Clinotron”, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, vol. 39, № 11, pp.1055–1064, 2018.
45. Gyrotron oscillators: their principles and practice / Ed. by C.J. Edgcombe. Washington, D.C.: Taylor & Francis, 1993. – 423 p.
46. Thumm M. State of the art of high power gyro-devices and free electron masers, update 2009 // KIT Scientific Report 7540, Karlsruhe Institute of Technology, 2010. – 120 p.
47. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. – Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press, 2004. p. 330.
48. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Электронно-оптические системы приборов СВЧ. – Ленинград: Энергия, 1965.
49. Кириченко А. Я., Лонин Ю. Ф., Папкович В. Г., Пономарев А. Г., Прокопенко Ю.В., Уваров В. Т., Филиппов Ю. Ф. Микроволновый генератор с резонатором "шепчущей галереи" // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). № 2 (66), Серия: Ядерно-физические исследования. Вып. 53. 2010. С. 135-139.
50. Galaydych K.V., Lonin Yu.F., Ponomarev A.G., Prokopenko Yu.V., Sotnikov G.V. Mathematical

model of an excitation by electron beam of "whispering gallery" modes in cylindrical dielectric resonator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Physics"*. – 2010. – Issue 16, No. 6. – P. 123–125.

51. Galaydych K.V., Lonin Yu.F., Ponomarev A.G., Prokopenko Yu.V., Sotnikov G.V. Nonlinear analysis of mm waves excitation by high-current REB in dielectric resonator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Physics"*. – 2012. – **18**, No 6(82). – P. 158–160.
52. Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра / Пер. с англ. под ред. Т.М.Лифшица. – М.: Мир, 1970
53. Микроэлектронные устройства СВЧ / Под ред. Г.И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988.
54. Геккер И.Р., Юрьев В.И. Субмиллиметровые волны. – М.: ГЭИ, 1961.
55. Дормидонтов А.В., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Потери энергии заряженной частицы на возбуждение волн в полупроводниковом цилиндре с двумерным электронным газом на боковой поверхности // *Радиофизика и электроника*. – 2015. – **6(20)**, №4. – С. 24–30.
56. Аверков Ю.О., Прокопенко Ю.В., Яковенко В.М. Неустойчивость трубчатого электронного пучка при взаимодействии с плазмоподобной средой // *Радиофизика и электроника*. – 2016. – **7(21)**, Вып. 2. – С. 28–35.

11.2. Інформаційні ресурси

1. Бібліотека Інституту.
2. Інформаційна база наукових статей:
<https://doi.org/10.1134/S106378501201021X>;
<http://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,6b541fef7dc47de0,0e3f57e67b27c5a6.html>;
<http://www.dl.begellhouse.com/ru/journals/0632a9d54950b268,1fbf64cd6ed5f5d9,692a43a75e6e6386.html>;
<https://doi.org/10.1134/S1063776115100039>;
<http://www.dl.begellhouse.com/ru/journals/0632a9d54950b268,7631f9d56fd21b5f,6ce70dc50ba0b66a.html>;
<http://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,3dc554df396b4a9e,1ec124294b7bdcc0.html>;
<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.96.013205>;
<http://dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,79879c3a3c6b0423,6af443ff57ec995d.html>;
https://link.springer.com/epdf/10.1134/S1063780X19060011?author_access_token=io9sEjztZbLzIIIH Ewt86-EckSORA_DxfnEvY7GoQybZ34sajYw_T5eXeizN-Y-zo9HE2AMr1NgCQvLWIyFM3fVbi75NhqGoutOQVZO5keig0NsSp_eTyiNZEVO7cYb49oUtBgBEtWSSb2_65-cb6yQ%3D%3D;
<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063776120030012>.