

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут фізики НАН України

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директором Інституту фізики НАН
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.



M. V. Bondar **М.В. Бондар**

(підпис)

« 27 » жовтня 2023 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

БК.14

Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня
вищої освіти – доктор філософії

Київ - 2023

Розробник:

головний наук. співробітник відділу Газової електроніки Інституту фізики НАНУ,
доктор фізико-математичних наук, професор  /О.А. Гончаров/

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол № 10-1 від 24 жовтня 2023 р.

Головою науково-методичної ради  /М.В. Бондар/

Робочу програму затверджено Вченою радою Інституту фізики НАНУ

Протокол № 10 від 26 жовтня 2023 р.

Голова Вченої ради  /М.В. Бондар/



Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 27 жовтня 2023р.

Гарант освітньої програми  /М.В. Бондар/

Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІФ НАН України	підпис	№ протоколу	дата протоколу
20 <u>24</u> /20 <u>25</u>	<u>М.В. Бондар</u>	<u></u>	5	27.06.2024
20 <u>25</u> /20 <u>26</u>	<u>М.В. Бондар</u>	<u></u>	8	11.09.2025
20 ____ /20 ____				
20 ____ /20 ____				



1. Загальні відомості

Найменування показників	Характеристика дисципліни за денною формою навчання
Вид дисципліни	вибіркова
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Загальний обсяг кредитів / годин	4/120
Курс	2
Семестр	2
Кількість змістових модулів з розподілом	1
Обсяг кредитів	4
Обсяг годин, В тому числі:	120
Лекції	30
Практичні заняття	15
Самостійна робота	75
Форма підсумкового контролю	екзамен

2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № 10 від 26 жовтня 2023 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

Передумова вивчення. Навчальний курс ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які вже знайомі з загальним курсом фізики плазми, фізичні явища у плазмодинамічних системах середніх енергій та математичною фізикою.

Мета навчальної дисципліни. ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»: отримання фундаментальних базових знань в теорії загальної плазмодинаміки, зокрема явищ, що призводять до створення об’ємних надтеплових електричних полів, придатних для прискорення іонів в об’ємі плазми без порушення її квазінейтральності, ознайомлення з різними типами джерел рухомої плазми та іонів, з плазмооптичними системами управління та фокусування інтенсивних пучків заряджених часток, з динамікою плазми в схрещених електричних та магнітних полях, використання потоків плазми, в тому числі для задач вакуумно-плазмової технології.

Зміст навчальної дисципліни. Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій», ґрунтуються на знаннях, отриманих при поглибленому ознайомленні з фізичними властивостями плазми, що рухається, зокрема, з основними механізмами прискорення плазми та компенсованих пучків різноманітних іонів, типи джерел рухомої плазми та іонних пучків, плазмооптичні системи управління та фокусування інтенсивними пучками заряджених часток, властивості взаємодії плазми з електричними та магнітними полями, використання потоків плазми, в тому числі для задач вакуумно-плазмової технології.

Предметом навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій» є вибрані розділи фізики плазми, поглиблене вивчення фізичні явища у плазмодинамічних системах середніх енергій, ознайомлення з різними типами джерел рухомої плазми та іонів.

Основними завданнями навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій» є формування фізичного мислення у аспірантів в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

Знати: базові теоретичні моделі одно- та дворідинної магнітної гідродинаміки, гібридні та кінетичні моделі придатні для аналізу та розрахунків конкретних плазмодинамічних систем середніх енергій.

Вміти: розраховувати та обґрунтовувати принципові схеми прискорення, формування та управління інтенсивними іонними потоками в самій плазмі без радикального порушення її квазінейтральності.

Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій» набути компетентності:

Загальні: ЗК1,ЗК2, ЗК3.

Спеціальні: СК1, СК2, СК5, СК6

Програмні результати навчання: РН1, РН4, РН5, РН6, РН7, РН8, РН9.

3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»
(2 курс – 2 семестр)

№	Зміст	Лекції, год.	Семінарські, год.	Самостійна робота, год.	Разом, год.
1.	Лекція 1. Короткий історичний огляд. Плазмодинаміка - розділ фізики плазми. Загальна, космічна та лабораторна плазмова динаміка.	3	0	7	10
2.	Лекція 2. Плазмодинаміка середніх енергій (ПДСЕ). Класифікація плазмодинамічних систем.	3	0	7	10
3.	Лекція 3. Базові теоретичні моделі плазми. Параметри подібності.	3	3	8	14
4.	Лекція 4. Умови існування надтеплових електричних полів в плазмі. Механізми прискорення іонів у плазмі.	3	3	7	10
5.	Лекція 5. Плазмові іонні джерела та інжектори нейтральних часток. Закон Чайлда-Ленгмюра. Типи іонних джерел.	3	3	7	13
6.	Лекція 6. Плазмові прискорювачі. Класифікація плазмових прискорювачем.	3	0	8	11
7.	Лекція 7. Плазмові прискорювачі з зовнішнім магнітним полем. Прискорювачі Холлівського типу із замкненим дрейфом електронів.	3	3	8	14
8.	Лекція 8.	3	0	8	11

	Потужні квазістаціонарні плазмові прискорювачі (КСПП)				
9.	Лекція 9. Фокусування інтенсивних іонних пучків. Принципи плазмооптики.	3	0	8	11
10.	Лекція 10. Електростатична плазмова лінза.	3	3	7	13
Всього		30	15	75	120

Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:

опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

4. Зміст навчальної дисципліни

ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

Тема 1. Короткий історичний огляд. Плазмодинаміка - розділ фізики плазми.

Загальна, космічна та лабораторна плазмова динаміка.

Предметом плазмодинаміки (ПД) є системи з плазмою, що рухається, насамперед, системи з рухомою іонною компонентою. Властивості ПД процесів. Три основних напрямку ПД. ПД базових теоретичних моделей, космічна (в тому числі і іоносферна) ПД та ПД конкретних лабораторних і промислових систем.

Література: 1-4,21

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Ознайомлення з прикладами, що демонструють важливу роль ПД у сучасному світі.
Особливості загальної, космічної та лабораторної ПД.

2. Тема 2. Плазмодинаміка середніх енергій (ПДСЕ). Класифікація плазмодинамічних систем.

Фізичні параметри (щільність та енергія іонів) в області використання плазмодинамічних систем середніх енергій. Два принципово різних підхода до отримання іонно-плазмових потоків с необхідними параметрами. Особливості використання джерел іонів та плазмових прискорювачів. Принципова різниця між цими підходами.

Література: 1,4,9-10,19.21

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої основної та додаткової літератури.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Ознайомлення з областю фізичних параметрів, в границях яких знаходяться ПД системи середніх енергій.
Виявлення, у чому є принципова різниця в формуванні іонних пучків за допомогою іонних джерел та плазмових прискорювачів.
Ознайомлення з конкретними типами плазмодинамічних пристроїв, що використовуються в сучасних лабораторних, промислових та космічних технологіях.

3. Тема 3. Базові теоретичні моделі плазми. Параметри подібності.

Одно- та дворідина гідродинамічна модель плазми, що рухається. Умови застосовності.

Гібридна модель для умов, коли одна компонента плазми описується гідродинамічним чином, а для другої виконується кінетичне наближення. Повномасштабна кінетична модель.

Подібність плазмових течій та вибір найбільш раціональної теоретичної моделі для аналізу конкретної ПД системи.

Література: 1,5,21

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої основної та додаткової літератури.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Перетворення рівнянь дворідинної гідродинаміки. Отримання узагальненого закону Ома.
Аналіз висновків, які слідують з цього закону.

Семінар (3 год)

Реферати «від одночастинкових методів прискорення в зовнішніх електромагнітних полях до колективних методів прискорення в плазмі»

4. Тема 4. Умови існування об'ємних, надтеплових електричних полів в плазмі.

Механізми прискорення іонів у плазмі.

Узагальнений закон Ома. Фізичні умови, що впливають на створення надтеплових електричних полів в об'ємі плазмового середовища. Ефект Холла в плазмі із замагніченими електронами та вільними незамагніченими іонами. Наслідки та роль ефекту Холла. Механізми прискорення іонів та умови їх ефективного проявлення.

Література: 1,5,21

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої літератури.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Вміння отримувати узагальнений закон Ома в плазмі з магнітним полем.
Виявляти ефект Холла та умови його найбільш ефективного проявлення у прискоренні іонів безпосередньо у плазмі.

Семінар (3 год)

Реферати «об'ємні, надтеплові електричні поля в плазмі»

5. Тема 5. Плазмові іонні джерела та інжектори нейтральних часток. Закон Чайлда-Ленгмюра. Типи іонних джерел.

Принципова блок схема типового плазмового джерела іонів (ПДІ) з системою екстракції. Принципові схеми плазмових прискорювачів (ПП). Їх принципова різниця та наслідки. Роль закону Ленгмюра (закону $3/2$) в обмеженні граничних струмів. Різноманіття ПДІ та ПП для лабораторних, промислових та космічних застосувань.

Література: 11-13,16,17,20

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої літератури.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Ознайомлення з деякими ПДІ, традиційними та сучасними для різноманітних застосувань.
Ознайомлення з типовими ПП середніх енергій.
Виведення формули для закону $3/2$ для діодного проміжку в одновимірному наближенні.

Практичне заняття. Лабораторна робота – вимірювання закону $3/2$ у діодному прискорювальному проміжку ПДІ (3 год)

Реферати «реферативний огляд публікацій у наукових журналах по формуванню та прискоренню іонних пучків у ПД системах середніх енергій».

Тема 6. Плазмові прискорювачі. Класифікація плазмових прискорювачів.

Плазмові прискорювачі - плазмодинамічні пристрої середніх енергій для отримання інтенсивних іонних пучків з енергіями в межах від десятків еВ до десятків кеВ. Теплові та електромагнітні прискорювачі. Імпульсні та стаціонарні. Прискорювачі Холлівського типу з металевими, діелектричними та відкритими стінками. Прискорювачі з зовнішнім та власним магнітним полем.

Література: 5,9,10,20

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Ознайомлення з різноманітними ПП яки використовуються ПДСЕ та механізмами їх функціонування.

7. Тема 7. Плазмові прискорювачі з зовнішнім магнітним полем. Прискорювачі Холлівського типу з замкненим дрейфом електронів.

Область застосування ПП з зовнішнім магнітним полем. Динаміка замагнічених електронів в плазмі. Створення самоузгодженого електричного поля. Замкнений дрейф електронів у схрещених аксіальному E - полі та радіальному H - полі. Замкнений Холлівський струм. Особливості динаміки прискорюваних іонів. Плазмодинамічні властивості Холлівських прискорювачів з вузькою та протяжною зоною прискорення.

ПП з замкненим дрейфом це плазмові аналоги ПДІ.

Література: 1,5,9,12,20. Додаткова: 4,5,11,12

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Магнітна ізоляція електронів та її наслідки. Провідність каналу прискорювача для електронів. Особливості взаємодії плазми з металевими та діелектричними стінками каналу. Режими роботи прискорювача та їх вплив на ефективність прискорювача та на параметри іонного пучка, що прискорюється.

Практичне заняття. Лабораторна робота – отримання вольт-амперних характеристик прискорювача Холлівського типу у різних режимах роботи. (3 год.)

8. Тема 8. Потужні квазістаціонарні плазмові прискорювачі (КСПП).

КСПП яскравий представник ПП з власним магнітним полем.

Фізичні механізми, які сприяють створенню потужних ПП (мегаамперного масштабу) струмів з енергіями до одиниць кеВ. Особливості плазмової течії в каналі прискорювача. Іонний струмопереніс. Роль анодних й катодних трансформерів. КСПП як магнето-плазмовий аналог газодинамічного сопла Лавалю. Области застосування КСПП.

Література: 1,6,7,21,22.одаткова: 1-2

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої літератури.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Прискорювальний і компресійний режими роботи КСПП. Вибір профілю каналу. Перехід плазмової течії через швидкість звуку. Про вхідну й вихідну зони КСПП. Зв'язок параметрів потоку з електрофізичними характеристиками. Основні рівняння плазмової течії. Поняття кризи струму. Іонний струмопереніс. Двоступінчастий режим роботи КСПП. Основні результати демонстраційних експериментів. Застосування КСПУ й МПК у плазмових технологіях й КТС.

Тема 9 Фокусування інтенсивних іонних пучків. Принципи плазмооптики.

Об'єкт плазмооптики. Критерій плазмооптичного режиму. Магнітна ізоляція електронів та екіпотенціалізація силових ліній магнітного поля. Засоби введення об'ємних електростатичних полів у плазмове середовище компенсованого іонного пучка.

Теоретичні моделі плазмооптичних систем.

Література: 1,8,21, додаткова 3,6,8-10

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Слабкодисипативна, ідеальна плазма. Вироджений закон Ома. Екіпотенціалізація магнітних силових ліній у плазмі. Термалізований потенціал. Магнето-електронні електроди. Типові плазмооптичні системи. Магнето-електричні плазмові пристрої.

Тема 10. Електростатична плазмова лінза.

Типові фокусуєчі плазмооптичні лінзи. Магнітостатичні плазмові лінзи. Електростатичні плазмові лінзи. Плазмооптичні лінзи для фокусування пучків від'ємно заряджених частинок. Фокусуєчі властивості плазмових лінз. Статичні та динамічні характеристики плазмових лінз. Плазмооптичні сепаратори. Плазмооптичні хвилеводи.

Література: 1,8,21, додаткова 8-10

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та рекомендованої літератури.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Механізм створення плазмового середовища в об'ємі плазмової лінзи.

Механізми створення фокусуєчих електричних полів при проходженні пучків позитивно та негативно заряджених частинок. Роль екіпотенціалізації силових ліній ізолюєчого магнітного поля в цьому процесі.

Практичне заняття. Лабораторна робота – експериментальна демонстрація високої оптичної сили електростатичної плазмооптичної лінзи. (3 год.)

5. Практичні заняття

з навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

6. Самостійна робота

з навчальної дисципліни «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

№	Зміст самостійної роботи аспірантів	Обсяг, годин
1.	Вивчення матеріалу лекції	30
2.	Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення	45
Усього за навчальну дисципліну		75

7. Методи викладання

навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
 2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.
- Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою $0,1R$, де R – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

Шкала відповідності оцінок

Рейтингова оцінка	Значення оцінки	Рейтинг у відсотках, %
A	Відмінно – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з, можливими незнаесними недоліками.	90-100
B	Дуже добре – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.	82-89
C	Добре – добрий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.	75-81
D	Задовільно – посередній рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.	69-74
E	Достатньо - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу.	60-68
FX	Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання.	35-59
F	Незадовільно з з обов’язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.	1-34

9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

1. Плазмодинаміка, як розділ фізики плазми. Властивості плазми динамічних процесів.
2. Три основних напрямки плазмодинаміки. Плазмодинаміка базових теоретичних моделей, космічна (в тому числі і іоносферна) та плазмодинаміка конкретних лабораторних і промислових систем.
3. Фізичні параметри (щільність та енергія іонів) в області використання плазмодинамічних систем середніх енергій.
4. Особливості використання джерел іонів та плазмових прискорювачів. Принципова різниця між цими підходами.
5. Одно- та дворідинна гідродинамічна модель плазми, що рухається. Гібридна модель для умов, коли одна компонента плазми описується гідродинамічним чином, а для другої виконується кінетичне наближення.
6. Подібність плазмових течій та вибір найбільш раціональної теоретичної моделі для аналізу конкретної плазмодинамічної системи.

7. Узагальнений закон Ома. Фізичні умови, що впливають на створення надтеплових електричних полів в об'ємі плазмового середовища.
8. Ефект Холла в плазмі із замагніченими електронами та вільними незамагніченими іонами. Наслідки та роль ефекту Холла. Механізми прискорення іонів та умови їх ефективного проявлення.
9. Принципова блок схема типового плазмового джерела іонів з системою екстракції. Роль закону Ленгмюра (закону $3/2$) в обмеженні граничних струмів.
10. Принципові схеми плазмових прискорювачів із замкненим холлівським струмом та їх різноманіття.
11. Плазмові прискорювачі, як плазмодинамічні пристрої середніх енергій для отримання інтенсивних іонних пучків з енергіями в межах від десятків еВ до десятків кеВ. Теплові та електромагнітні прискорювачі.
12. Прискорювачі Холлівського типу з металевими, діелектричними та відкритими стінками. Прискорювачі з зовнішнім та власним магнітним полем. Область застосування плазмових прискорювачів з зовнішнім магнітним полем.
13. Динаміка замагнічених електронів в плазмі. Створення самоузгодженого електричного поля. Замкнений дрейф електронів у схрещених аксіальному E - полі та радіальному H - полі. Замкнений Холлівський струм.
14. Особливості динаміки прискорюваних іонів. Плазмодинамічні властивості Холлівських прискорювачів з вузькою та протяжною зоною прискорення. Плазмові прискорювачі з замкненим дрейфом, як аналоги плазмових джерел іонів.
15. Фізичні механізми, які сприяють створенню потужних квазістаціонарних сильно струмових (мегаамперного масштабу) плазмових прискорювачів з енергіями до одиниць кеВ. Особливості плазмової течії в каналі такого прискорювача.
16. Іонний струмопереніс. Роль анодних й катодних трансформерів. Квазістаціонарні плазмові прискорювачі як магнето-плазмовий аналог газодинамічного сопла Лавалю. Области застосування квазістаціонарних плазмових прискорювачів.
17. Плазмооптика, як розділ плазмодинаміки. Критерій плазмооптичного режиму. Магнітна ізоляція електронів та еквіпотенціалізація силових ліній магнітного поля.
18. Засоби введення об'ємних електростатичних полів у плазмове середовище компенсованого іонного пучка. Теоретичні моделі плазмооптичних систем.
19. Типові фокусуєчі плазмооптичні лінзи. Магнітостатичні плазмові лінзи. Електростатичні плазмові лінзи. Плазмооптичні лінзи для фокусування пучків від'ємно заряджених частинок.
20. Фокусуєчі властивості плазмових лінз. Статичні та динамічні характеристики плазмових лінз. Плазмооптичні сепаратори та хвилеводи.

10. Рекомендована література:

з навчальної дисципліни ВК.14 «Фізичні основи плазмодинамічних систем середніх енергій»

Основна:

1. А.И. Морозов Введение в плазмодинамику. М. 2006.
2. Д.А. Франк-Каменецкий. Лекции по физике плазмы. М., Атомиздат, 1964.
3. И.И. Новиков. Прикладная магнитная гидродинамика, М., Атомиздат, 1969.
4. Физика и применение плазменных ускорителей. Сб. статей под редакцией А.И. Морозова. Минск, «Наука и техника», 1974.
5. С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. Плазменные ускорители. М., Машиностроение, 1983.
6. А.И. Морозов, Л.В. Соловьев. Стационарные течения плазмы в магнитном поле. В сб. «Вопросы теории плазмы» под редакцией Б.Б. Кадомцева, том.8, М., Атомиздат, 1974.
7. К.В. Брушлинский, А.И. Морозов. Расчет двумерных течений плазмы в каналах. М., Атомиздат, 1974.
8. А.И. Морозов, С.В. Лебедев. Плазмооптика. М., Атомиздат, 1974.
9. А.И. Морозов. Плазменные ускорители. В сб. «Плазменные ускорители». М., Машино-строение, 1973, 5-15.
10. А.И. Морозов, А.П. Шубин. Плазменные ускорители. В сб. «Итоги науки и техники» се-рии «Физика плазмы», т.5, М., ВИНТИ, 1984, 178-260.

11. М.Д. Габович, И.В. Плешивцев, Н.И. Семашко. Пучки ионов и атомов. М., Энергоатом-издат, 1986.
12. Материалы V и VI Всесоюзных конференций по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Москва, 1982 г. и Днепропетровск, 1986.
13. Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. Ионно-плазменная обработка материалов, М., «Радио и связь», 1986.
14. Диагностика плазмы под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. М., Мир, 1967.
15. Э.И. Кузнецов, Д.А. Щеглов. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М., Атомиздат, 1974.
16. Физика и технология источников ионов. Под ред. Яна Брауна. Москва, «Мир», 1998.
17. М.Д. Габович. Физика и техника плазменных пучков ионов. Москва, Атомиздат, 1972.
18. Физика и применение плазменных ускорителей. Под ред. А.И.Морозова. «Наука и техника», Минск, 1974.
19. Итоги науки и техники. Физика плазмы, т. 5. Москва, 1984. «Плазменные ускорители», стр. 178-260.
20. Ионные инжекторы и плазменные ускорители (сборник статей). Москва, Энергоатомиздат, 1990.
21. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. В.Е. Фортова. Москва, Наука, 2000, том.3, раздел 9, статья А.И.Морозова «Плазмодинамика», стр. 383-512.
22. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. В.Е. Фортова. Москва, Наука, 2007, Т.9, Глава 3. В.И. Терешин, И.Е. Гаркуша, В.В. Чеботарев. Использование мощных квазистационарных плазменных ускорителей для моделирования экстремальных плазменных нагрузок в термоядерном реакторе. С.395-441, Глава 4, В.И. Терешин, И.Е. Гаркуша, В.В. Чеботарев. Модификация поверхностных слоев твердых тел мощными импульсными потоками плазмы. С.442-479

Додаткова:

1. V.I. Tereshin. Quasi-stationary plasma accelerators (QSPA) and their applications. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. Volume 37 (1995) pp. 177-190..
2. I.E. Garkusha. High current plasma accelerators: physics and applications. «*Journal of Kharkiv National University*», № 1040, 2013 physical series «Nuclei, Particles, Fields», issue 1 /57/ pp.28-39.
3. A. A. Goncharov Recent development of plasma optical systems (invited)// *Review of Scientific Instruments*, 2016. – V.87. – Iss. 2., 02B901.
4. Litovko I.V., Dobrovolsky A.N., Naiko L.V., Naiko I.V. A new type of plasma accelerator with closed electron drift // *Ukrainian Journal of Physics*, 2018. – V. 63.– Iss. 2. – P. 110-115
5. Novel modification of Hall-type ion source (study and the first results) / Goncharov A., Dobrovolsky A., Litovko I., Naiko L., Naiko I // *Rev. Sci. Instrum.* 87, 02A501 (2016).
6. Self-sustained focusing of high-density streaming plasma / A. Bugaev, A. Dobrovolskiy, A. Goncharov, V. Gushenets, I. Litovko, I. Naiko, and E. Oks // *Journal of Applied Physics*, 2017. – V.121.– P. 043301
7. Alexey A. Goncharov, Volodymyr Yu. Bazhenov, Alexey S. Bugaev, Andrii M. Dobrovolskiy, Vasiliy I. Gushenets, Irina V. Litovko, Irina V. Naiko, and Efim M. Oks Recent Progress in Development New Generation Erosion Plasma Sources / *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019. – V.47. – Iss. 8. – P. 3594 - 3600.
8. A.Goncharov, I. Brown, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 32 (1), 2004, p. 8083..
9. Goncharov, A. Dobrovolskiy, S. Dunets, A. Evsyukov, I. Litovko, V. Gushenets, E. Oks., Positive-Space-Charge Lens for Focusing and Manipulating High-Current Beams of Negatively Charged Particles // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, v. 39, № 6, (2011), pp. 1408-1411
10. Alexey Goncharov, Invited Review Article: "The Electrostatic Plasma Lens", *Rev. Sci. Instrum.*, 84, 2013, 021101.
11. D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters*, Vol. 1 (John Wiley & Sons, 2008).
12. *Appl. Phys. Rev.* 5, 011104 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5007734>

Інформаційні ресурси

1. <http://nashol.com/2013101373956/vvedenie-v-plazmodinamiku-morozov-a-i-2006.html> – Введение в плазмодинамику, Морозов А.И., 2006.