

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

О. Ф. Целуйко

**ФОКУСУВАННЯ ПУЧКІВ
ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИМИ
ТА МАГНІТНИМИ ЛІНЗАМИ**

Навчальний посібник

За загальною редакцією І. О. Гірки

Харків – 2020

УДК 537 (076.1)

Ц 41

Рецензенти:

В. Д. Єгоренков – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри експериментальної фізики фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;

Г. В. Сотніков – доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу експериментальної плазмової електроніки та нових методів прискорювання Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України.

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 10 від 23 червня 2020 року)*

Целуйко О. Ф.

Ц 41

Фокусування пучків заряджених частинок електростатичними та магнітними лініями: навчальний посібник / О. Ф. Целуйко / за заг. ред. І. О. Гірки. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 136 с.

ISBN 978-966-285-657-6

Посібник створено на основі конспекту лекцій доцента фізико-технічного факультету О. Ф. Целуйка, який багато років читав курси з динаміки пучків заряджених частинок та фізичних основ пучково-плазмових технологій. Питання, що висвітлені в посібнику, повністю відповідають програмі навчального курсу «Фізичні основи пучкових технологій». Матеріал викладено детально та послідовно, без скорочень. Посібник призначений для збагачення методичного забезпечення організації самостійної роботи студентів, містить значну кількість авторських рисунків, що сприяють розумінню геометрії досліджуваних задач та фізики процесів, полегшує вивчення фізичних технологій із застосуванням пучків заряджених частинок, зокрема виконання відповідних лабораторних робіт.

ISBN 978-966-285-657-6

УДК 537 (076.1)

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2020

© Целуйко О. Ф., 2020

© Чорна О. Д., макет обкладинки, 2020

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Електронні та йонні гармати	8
1.1. Формування пучків заряджених частинок	8
1.2. Компенсація негативної дії розштовхувального електричного поля об'ємного заряду.....	10
1.2.1. Метод компенсації електричного поля розштовхування	10
1.2.2. Методи обчислення прискорювальних систем	11
1.2.3. Методика Пірса.....	12
1.3. Розрахунок гармати для формування стрічкових пучків.....	13
1.3.1. Внутрішня задача.....	13
1.3.2. Зовнішня задача	19
1.3.3. Визначення форми електродів.....	21
1.3.3.1. Еквіпотенціальна поверхня з $\varphi(r,\theta) = 0$	22
1.3.3.2. Еквіпотенціальна поверхня з $\varphi(r,\theta) = V_a$	22
1.3.3.3. Форма електродів для формування стрічкових пучків.....	23
1.4. Системи формування пучків заряджених частинок з керувальними електродами	24
1.5. Гармата з керувальною сіткою.....	28
1.5.1. Визначення максимальної напруги сітки V_{\max}	29
1.5.2. Визначення напруги замикання $V_{\text{зам}}$	31
1.5.3. Визначення коефіцієнта керування K_k	33
1.5.4. Величина струму гармати з керувальною сіткою.....	34
Питання для самоконтролю	36
2. Рух заряджених частинок в електромагнітних полях	38
2.1. Рівняння електростатичного та соленоїдного полів.....	38
2.2. Зв'язок векторного потенціалу з потоком магнітного поля	39
2.2.1. Випадок плоскопаралельного магнітного поля	40
2.2.2. Випадок аксіально-симетричного магнітного поля.....	44
2.3. Рівняння руху заряджених частинок в електромагнітних полях	46
2.3.1. Рівняння руху в формі Ньютона.....	46
2.3.2. Рівняння руху в формі Лагранжа	47
2.3.3. Рівняння руху в формі Гамільтона	48

2.4. Рівняння руху заряджених частинок в аксіально-симетричних полях	48
2.4.1. Теорема Буша.....	48
2.4.1.1. Випадок нульової початкової азимутальної швидкості	51
2.4.1.2. Випадок однорідного магнітного поля та нульової початкової азимутальної швидкості	51
2.4.2. Модифіковані рівняння руху заряджених частинок в аксіально-симетричних полях.....	52
2.4.3. Еквівалентний потенціал	53
2.5. Рівняння траєкторії руху заряджених частинок в аксіально-симетричних електромагнітних полях	54
2.6. Параксіальне рівняння траєкторії руху заряджених частинок в аксіально-симетричних електромагнітних полях.....	57
Питання для самоконтролю	62
3. Електростатичні лінзи	63
3.1. Типи та конфігурації електростатичних лінз.....	64
3.1.1. Одиночні лінзи	64
3.1.2. Імерсійні лінзи	64
3.1.3. Лінзи-діафрагми.....	65
3.2. Тонка електростатична лінза	66
3.2.1. Фокусувальні властивості електростатичних лінз.....	68
3.2.1.1. Фокусувальні властивості одиночної лінзи.....	68
3.2.1.2. Фокусувальні властивості імерсійної лінзи.....	69
3.2.1.3. Фокусувальні та розсіювальні властивості лінзи-діафрагми	70
3.2.2. Фокусна відстань тонкої лінзи.....	71
3.2.3. Сферична аберація лінз	74
3.2.4. Залежність кута заломлення в тонкій електростатичній лінзі від кута входження пучка	75
3.3. Матричне рівняння для електростатичних лінз.....	77
3.3.1. Матричне рівняння для тонкої одиночної лінзи	77
3.3.2. Матричне рівняння для товстої одиночної лінзи.....	79
3.4. Спрощений розрахунок електростатичних лінз	79
3.4.1. Спрощений розрахунок електростатичних імерсійних лінз	80
3.4.2. Спрощений розрахунок одиночних електростатичних лінз	80
Питання для самоконтролю	83
4. Магнітні лінзи	85
4.1. Тонка магнітна лінза	86

4.1.1. Фокусувальні властивості тонкої магнітної лінзи	87
4.1.2. Фокусні відстані тонкої магнітної лінзи	88
4.1.3. Залежність кута заломлення в тонкій магнітній лінзі від кута входження пучка	89
4.1.4. Азимутальний зсув у магнітній лінзі	90
4.1.5. Матричне рівняння для тонкої магнітної лінзи.....	92
4.2. Товста магнітна лінза. Матричне рівняння для товстої магнітної лінзи	93
4.3. Розрахунок магнітного поля соленоїда на осі системи.....	94
4.4. Довга магнітна лінза.....	96
4.5. Аберация пучків у довгих соленоїдах	102
4.6. Розсіювальна магнітна лінза.....	102
Питання для самоконтролю.....	103
5. Фокусування інтенсивних пучків заряджених частинок	104
5.1. Особливості руху інтенсивних потоків заряджених частинок.....	104
5.2. Система рівнянь руху інтенсивних потоків заряджених частинок.....	106
5.3. Спрощені фізичні моделі руху інтенсивних потоків заряджених частинок (МГД-наближення).....	107
Питання для самоконтролю.....	108
6. Фокусування пучків однорідним магнітним полем	109
6.1. Принцип фокусування пучків магнітним полем	109
6.2. Рівноважний (бріллюєнів) пучок частинок в однорідному магнітному полі для повністю екранованої гармати	111
6.3. Величина поздовжньої швидкості частинок у пучку	116
6.4. Стійкість руху рівноважного пучка частинок в однорідному магнітному полі для повністю екранованої гармати	119
6.5. Стійкість пучка в однорідному магнітному полі для частково екранованої гармати.....	124
6.5.1. Величина рівноважного радіуса для частково екранованої гармати	127
6.5.2. Стійкість руху пучка для частково екранованої гармати.....	128
Питання для самоконтролю.....	132
Предметний покажчик	133
Список використаних джерел.....	125