

Р. Миллер

Введение
в физику
СИЛЬНОТОЧНЫХ
пучков
заряженных
частиц



ББК 22.38
М60
УДК 539.1 + 539.188 + 621.384.6

М60 Миллер Р.
Введение в физику ультрарелятивистских пучков заряженных частиц: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 432 с., ил.
Эта книга (комбинация монографии и учебного пособия) написана известным американским специалистом по ультрарелятивистским пучкам и плазме и представляет собой первое систематическое изложение основ физики ультрарелятивистских электронных и ионных пучков. Наряду с теорией рассматриваются результаты и методики основополагающих экспериментов, а также ряд важных приложений. Качественный анализ физики явлений хорошо сбалансирован с их математическим описанием. Каждая глава снабжена задачами, повышающими эффективность книги как учебного пособия.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и начинающих исследователей, занимающихся физикой ультрарелятивистских пучков, мощной релятивистской СВЧ-электроникой, физикой плазмы и вопросами осуществления управляемого термоядерного синтеза на пучках заряженных частиц. Как справочник принесет несомненную пользу и опытным исследователям.

1704070000 - 374
М $\frac{1704070000}{041(01) - 84}$ 78 - 84, ч. 1

ББК 22.38
530.4

Редакция литературы по физике

Р.Б. Миллер

Введение в физику ультрарелятивистских пучков заряженных частиц

Научный редактор А. Куксенко Мл. научный редактор Г.Сорокина

Художественный редактор В.Захаров Технический редактор
И. Кренделева

Корректор Смирнов

ИБ 3917

Подписано к печати 28.09.84. Формат 60x90 №/16 13,50 бум.л.

Бумага офсетная № 1 Усл.печ.л. 27,00 ; Усл. кр.оттисков 27,00

Уч. изд.л. 22,45 Изд № 2/2982 Тираж 2150 эк. Цена 3р.70к.

Издательство "МИР" 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский
пер.2. Заказ № 667

Отпечатано в Тульской типографии Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли г. Тула, проспект им. В.И. Ленина, 109

© 1982 Plenum Press, New
York

© Перевод на русский язык,
«Мир», 1984

Оглавление

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	9
Глава 1. Введение	12
1.1. Вводные замечания	12
1.2. Мощная импульсная техника	14
1.2.1. Генератор импульсных напряжений	17
1.2.2. Формирующие линии	19
1.2.3. Разрядники	26
1.2.4. Вакуумные диоды	32
1.3. Качественное поведение пучков заряженных частиц	34
1.3.1. Транспортировка пучков в вакууме в продольном магнитном поле	36
1.3.2. Зарядовая и токовая нейтрализация пучков плазменным фоном	38
1.4. Гидродинамическое (макроскопическое) описание	41
Задачи	44
Литература	45
Литература, добавленная при переводе	46
Глава 2. Генерация высокоточных электронных и ионных пучков	49
2.1. Введение	49
2.2. Процессы электронной эмиссии	51
2.2.1. Термоэлектронная эмиссия и фото- электронная эмиссия	51
2.2.2. Автоэлектронная эмиссия	52
2.2.3. Взрывная электронная эмиссия	56
2.3. Электронные потоки в мощных диодах	59
2.3.1. Релятивистский поток в плоском диоде	60

2.3.2.	Модель парapotенциального потока	63
2.3.3.	Бесфольговые диоды	68
2.4.	Потоки ионов в мощных диодах	73
2.4.1.	Биполярный поток, ограниченный пространственным зарядом	74
2.4.2.	Отражательный триод	76
2.4.3.	Ионные диоды с магнитной изоляцией ...	83
2.4.4.	Нестационарные электронные и ионные потоки в диодах со сфокусированным электронным пучком	87
2.5.	Заключение	91
	Задачи	94
	Литература	99
	Литература, добавленная при переводе	102
Глава 3.	Распространение сильноточных пучков в вакууме	104
3.1.	Введение	104
3.2.	Основные уравнения для описания равновесий ламинарного потока	105
3.3.	Предельный ток, ограниченный пространственным зарядом	112
3.3.1.	Тонкий трубчатый пучок в бесконечно длинной цилиндрической дрейфовой камере	113
3.3.2.	Плоская одномерная область дрейфа	115
3.3.3.	Расчет предельного тока пучка в длинной области дрейфа методом итерации	117
3.3.4.	Верхняя оценка предельного тока в дрейфовой камере произвольной геометрии..	118
3.3.5.	Спектр волн в нерелятивистском пучке в одномерной области дрейфа	120
3.4.	Формирование виртуального катода	126
3.4.1.	Классическая теория стационарного виртуального катода	126
3.4.2.	Исследование устойчивости потока	129
3.4.3.	Модель бесконечно тонкого заряженного слоя	129
3.4.4.	Нестационарное поведение виртуального катода	132
3.5.	Равновесия ламинарных заряженных релятивистских электронных пучков	135
3.5.1.	Равновесие релятивистского пучка типа "жесткого ротатора"	136

3.5.2.	Равновесие релятивистского трубчатого пучка	137
3.5.3.	Общая постановка задачи о равновесии ламинарных пучков	138
3.6.	Транспортировка в вакууме сильноточных ионных пучков, нейтрализованных электронами	147
3.6.1.	Нейтрализация коллинеарным электронным пучком	148
3.6.2.	Поперечная инжекция электронов	149
3.7.	Электростатическая устойчивость сильноточных релятивистских электронных пучков	151
3.7.1.	Устойчивость равновесия типа "жесткого ротатора"	154
3.7.2.	Устойчивость равновесия трубчатого пучка (диокотронная неустойчивость) ...	158
3.7.3.	Электрон-электронная двухпотоковая неустойчивость	161
3.8.	Заключение	165
	Задачи	167
	Литература	172
	Литература, добавленная при переводе	174
Глава 4.	Распространение сильноточных пучков в плазме	176
4.1.	Введение	176
4.2.	Токовая нейтрализация	177
4.3.	Макроскопическое равновесие системы пучок - плазма	187
4.3.1.	Тепловые гидродинамические равновесия при $B_0 = 0$	187
4.3.2.	Тепловые гидродинамические равновесия в канале разряда	190
4.3.3.	Холодные гидродинамические равновесия в аксиальном магнитном поле	190
4.4.	Макроскопические пучково-плазменные неустойчивости	193
4.4.1.	Резистивная планговая неустойчивость....	193
4.4.2.	Сосисочная неустойчивость	204
4.5.	Микроскопические неустойчивости	209
4.5.1.	Устойчивость зарядово-нейтрализованного электронного пучка (неустойчивость Бунемана)	210

4.5.2. Устойчивость электронного пучка в плотной плазме (двухпоточковая и циклотронная неустойчивости)	211
4.5.3. Электромагнитная нитевидная неустойчивость (неустойчивость Вейбеля)	217
4.6. Нагрев плазмы прямолинейными релятивистскими электронными пучками	221
4.6.1. Нагрев плазмы обратным током	222
4.6.2. Взаимодействие электронного пучка с потоком плазменных электронов	224
4.7. Заключение	228
Задачи	231
Литература	233
Литература, добавленная при переводе	237
Глава 5. Распространение сильноточных пучков в нейтральном газе	239
5.1. Введение	239
5.2. Процессы ионизации при взаимодействии пучка с нейтральным газом	240
5.2.1. Ионизация электронными столкновениями ..	240
5.2.2. Электронная лавина	241
5.2.3. Ионизация ионами	242
5.3. Транспортировка пучка с $I_B / I_e < 1$ в нейтральном газе	243
5.3.1. Область низких давлений	243
5.3.2. Область промежуточных давлений	244
5.3.3. Транспортировка высокоэнергетических пучков в плотном газе	245
5.4. Транспортировка пучков с токами $I_e \approx I_B \approx I_A$ в нейтральном газе	249
5.4.1. Область низких давлений	249
5.4.2. Область промежуточных давлений	252
5.4.3. Область высоких давлений	257
5.5. Транспортировка пучков с токами $I_B > I_A$ в нейтральном газе	258
5.6. Заключение	259
Задачи	260
Литература	262
Литература, добавленная при переводе	263
Глава 6. Мощные источники когерентного излучения	264
6.1. Релятивистский магнетрон	265

6.1.1. Режим до генерации колебаний	267
6.1.2. Анодный блок	271
6.1.3. Взаимодействие пространственного заряда с ВЧ-полями	278
6.2. Мазер на циклотронном резонансе (МЦР)	290
6.2.1. Физический механизм действия МЦР	291
6.2.2. Линейная теория МЦР	293
6.2.3. Механизмы нелинейного насыщения неустойчивости в МЦР	300
6.3. Лазер на свободных электронах	302
6.3.1. Физический механизм действия ЛСЭ	304
6.3.2. Линейная теория ЛСЭ в режиме комбинационного рассеяния	311
6.3.3. Механизм нелинейного насыщения ЛСЭ ...	317
6.4. Заключение	319
Задачи	321
Литература	322
Литература, добавленная при переводе	327
Глава 7. Коллективное ускорение ионов в прямолинейных сильноточных релятивистских электронных пучках ...	330
7.1. Введение	330
7.2. Краткое изложение результатов по коллективному ускорению ионов в нейтральном газе и в вакуумных диодах	332
7.2.1. Коллективное ускорение ионов в дрейфовых камерах, заполненных нейтральным газом	332
7.2.2. Коллективное ускорение ионов в вакуумной дрейфовой камере	339
7.3. Ускорение ионов на фронте ионизации (УФИ) ...	342
7.4. Волновые методы авторезонансного ускорения ионов	346
7.4.1. Метод авторезонансного ускорения ионов (АРУ)	347
7.4.2. Ускоритель со сходящимся волноводом (УСВ)	352
7.5. Заключение	355
Задачи	356
Литература	357
Литература, добавленная при переводе	363

Глава 8. Пучковый управляемый термоядерный синтез	365
8.1. Введение	365
8.2. Условия инициирования термоядерной реакции в мишени	367
8.2.1. Потери энергии заряженных частиц при взаимодействии с веществом	371
8.2.2. Сжатие мишени	377
8.2.3. Неустойчивость Раля - Тейлора	380
8.2.4. Конструкции мишеней для термоядерного синтеза с инерциальным удержанием на пучках заряженных частиц	381
8.3. Управляемый термоядерный синтез на электронных пучках	391
8.3.1. Электронно-пучковый термоядерный синтез в вакуумных диодах	391
8.3.2. Схемы со сведением большого числа электронных пучков	392
8.4. Управляемый термоядерный синтез на ионных пучках	394
8.4.1. Предлагаемые схемы термоядерного синтеза на пучках легких ионов	397
8.4.2. Методы осуществления термоядерного синтеза на пучках тяжелых ионов	406
8.5. Заключение	409
Задачи	412
Литература	413
Литература, добавленная при переводе	419
Предметный указатель	422