

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.В. ИВАНОВ

ДИНАМИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ В СТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЯХ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2011

УДК 537.8:621.384.6

И 20

Рецензенты: *Н.А. Винокуров*, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры физики ускорителей НГУ, зав. лабораторией ИЯФ СО РАН;
Е.Б. Левичев, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. директора ИЯФ СО РАН

Иванов А.В.

И 20 Динамика заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных полях : учеб. пособие / А.В. Иванов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 211 с.

ISBN 978-5-7782-1635-8

Предлагаемое учебное пособие по курсу «Электродинамика заряженных частиц», который автор читает студентам физико-технического факультета НГТУ, содержит наиболее важные вопросы динамики заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных электромагнитных полях. В книге представлен необходимый математический аппарат, приведены основные уравнения электромагнитного поля, подробно рассмотрены аналитические и численные методы расчета электрических потенциалов и полей. Рассмотрено движение заряженных частиц в однородных и слабо неоднородных электрическом и магнитном полях, в полях с аксиальной симметрией. Построено матричное описание движения, рассмотрена динамика частиц в аксиально-симметричных электрических и магнитных линзах, в дуплетах и триплетах квадрупольных линз. Даны определения эмиттанса пучка и аксептанса канала, рассказано о проблемах построения огибающих потока и согласования потока с периодическим каналом. Описаны основные эффекты, возникающие из-за влияния пространственного заряда, в том числе образование виртуальных катодов. Рассмотрено начальное формирование электронных потоков электростатическим полем, описаны источники пучков заряженных частиц с плазменным эмиттером.

Предназначено для студентов ФТФ НГТУ третьего года обучения.

Работа подготовлена на кафедре ЭФУиУ

УДК 537.8:621.384.6

ISBN 978-5-7782-1635-8

© Иванов А.В., 2011

© Новосибирский государственный технический университет, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1. НЕОБХОДИМЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
1.1. Некоторые сведения из векторного анализа.....	3
1.2. Основные уравнения электромагнитного поля.....	9
1.3. Аналитические методы расчета электрического поля.....	15
1.4. Численные методы расчета электромагнитных полей.....	21
2. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	31
2.1. Принцип наименьшего действия.....	31
2.2. Лагранжиан одиночной частицы, сила Лоренца.....	35
2.3. Энергия частицы в стационарном поле.....	37
2.4. Уравнения движения частицы в различных системах координат.....	40
2.5. Движение заряженной частицы в однородных стационарных полях.....	41
2.6. Движение заряженной частицы в слабо неоднородном магнитном поле.....	50
2.7. Аналогия между движением заряженных частиц и распространением света.....	56
3. ПОЛЯ С АКСИАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ.....	60
3.1. Аксиально-симметричное электростатическое поле.....	60
3.2. Аксиально-симметричное магнитное поле.....	62
3.3. Теорема Буша.....	64
3.4. Параксиальные уравнения движения.....	68
4. ЛИНЗЫ В ОПТИКЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.....	73
4.1. Некоторые сведения из теории дифференциальных уравнений.....	73
4.2. Матричное описание динамики частиц.....	75
4.3. Фокусирующие свойства линейных систем.....	77

4.4. Построение изображения в линзе.	78
4.5. Аксиально-симметричные электростатические линзы.	83
4.6. Аксиально-симметричные магнитные линзы.	88
4.7. Магнитные линзы с азимутальным полем.	91
4.8. Аберрации линз с симметрией вращения.	94
4.9. Квадрупольные линзы.	97
4.10. Дуплеты и триплеты квадрупольных линз.	103
5. ПОТОКИ НЕВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ.	108
5.1. Канонические уравнения Гамильтона, теорема Лиувилля.	108
5.2. Поперечный фазовый объем и проблема согласования.	113
5.3. Распределение пучка на фазовой плоскости.	118
5.4. Среднеквадратичный эмиттанс.	122
6. ДИНАМИКА ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С НЕНУЛЕВЫМ ЭМИТТАНСОМ.	125
6.1. Расплывание пучка в свободном пространстве.	125
6.2. Движение частицы в периодических полях. Уравнение Хилла и функции Флоке.	127
6.3. Построение огибающей пучка в канале.	136
6.4. Эффективный эмиттанс.	139
6.5. Параметры Твисса.	141
7. ПОТОКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ.	145
7.1. Основные соотношения. Первеанс.	145
7.2. Действие сил пространственного заряда.	148
7.3. Расплывание потоков под действием сил пространственного заряда.	150
7.4. Образование виртуальных катодов и предельный ток.	156
7.5. Самофокусировка пучка заряженных частиц. Пинч-эффект.	162
8. НАЧАЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ.	164
8.1. Термоэлектронная эмиссия.	164
8.2. Плоский диод.	166
8.3. Плоская пушка Пирса.	171
8.4. Сферический диод.	177
8.5. Сферическая пушка Пирса.	179
8.6. Отличия реальных электронных пушек.	180
8.7. Формирование интенсивных потоков магнитным полем.	181

9. ИСТОЧНИКИ ИОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ.	192
9.1. Некоторые сведения из физики плазмы.	192
9.2. Извлечение из плазмы заряженных частиц и начальное форми- рование пучков.	194
9.3. Некоторые типы источников ионов.	196
9.4. Источники электронов с плазменным эмиттером.	204
Библиографический список.....	207