

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА.....</b>	<b>12</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>13</b>
<b>СПИСОК АВТОРОВ .....</b>	<b>14</b>
<b>1. ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ-ЛАМПЫ .....</b>	<b>17</b>
1.1. Введение .....	17
1.1.1. Современный уровень технологий электронных СВЧ-ламп .....	17
1.1.2. История разработки .....	18
1.1.3. Основные принципы работы и определения терминов.....	20
1.2. Клистроны .....	27
1.2.1. Клистронные усилители .....	27
1.2.2. Многолучевые клистроны.....	34
1.2.3. Лампы с индуктивным выходом (ИОТ).....	37
1.3. Лампы бегущей волны (ЛБВ).....	38
1.3.1. Введение .....	38
1.3.2. Конструкция и принцип работы ЛБВ .....	39
1.3.3. Физические основы работы ЛБВ.....	43
1.3.4. Применение ЛБВ.....	58
1.4. Клистроны с распределенным взаимодействием .....	63
1.4.1. Введение .....	63
1.4.2. Конструкция приборов с распределенным взаимодействием .....	64
1.4.3. Типичное исполнение и приложения ОРВ .....	64
1.5. Лампа обратной волны (ЛОВ) .....	65
1.5.1. Введение .....	65
1.5.2. Принцип действия ЛОВ .....	66
1.5.3. Области применения ЛОВ .....	68
1.6. Магнетроны и усилители со скрещенными полями.....	68
1.6.1. Магнетроны .....	68
1.6.2. Усилители со скрещенными полями (УСП).....	72
1.6.3. Генератор обратной волны со скрещенными полями.....	73
1.7. Устройства на быстрых волнах.....	74
1.7.1. Принципы взаимодействия .....	75
1.7.2. Диаграмма рассеяния при быстроволновых взаимодействиях .....	78
1.7.3. Гиротронный генератор .....	82
1.7.4. Гироусилители .....	86
1.7.5. Гиротронные ЛОВ.....	90
1.7.6. Мазер на свободных электронах (МСЭ) .....	90
1.8. Перспективные тенденции и приложения.....	92
Литература.....	94
<b>2. ВАКУУМНЫЕ ДИСПЛЕИ.....</b>	<b>96</b>
2.1. Введение .....	96
2.1.1. История разработки дисплеев.....	96
2.1.2. Обзор современных дисплеев .....	97



2.1.3.	Основные принципы работы дисплеев .....	99
2.1.4.	Основные параметры дисплеев .....	103
2.1.5.	Сравнение различных технологий производства дисплеев .....	109
2.2.	Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) .....	110
2.2.1.	История разработки .....	110
2.2.2.	Электрофизические основы .....	110
2.2.3.	Современное состояние технологии .....	116
2.2.4.	Будущие направления разработок .....	120
2.3.	Плазменные панели (ПП) .....	120
2.3.1.	История развития .....	120
2.3.2.	Электрофизические основы .....	121
2.3.3.	Современное состояние технологий и применения .....	124
2.3.4.	Будущие направления развития .....	126
2.4.	Вакуумные флуоресцентные дисплеи (ВФД) .....	126
2.4.1.	История разработки .....	126
2.4.2.	Электрофизические основы .....	127
2.4.3.	Современное состояние технологий и применения .....	128
2.4.4.	Будущие направления развития .....	130
2.5.	Дисплеи с автоэлектронной эмиссией (FED) .....	130
2.5.1.	История разработки .....	130
2.5.2.	Электрофизические основы .....	131
2.5.3.	Современное состояние технологий и применения .....	132
2.5.4.	Будущие направления разработок .....	133
	Литература .....	133

### **3. ВАКУУМНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К РАДИАЦИИ ..... 135**

3.1.	История разработки .....	135
3.2.	Электрофизические основы .....	136
3.2.1.	Фотоэлектронная эмиссия .....	136
3.2.2.	Вторичная электронная эмиссия .....	138
3.2.3.	Электронная оптика .....	139
3.3.	Современное состояние технологий и применения .....	139
3.3.1.	Умножители вторичных электронов .....	139
3.3.2.	Преобразователи и усилители изображения .....	144
3.3.3.	Передающие телевизионные трубки .....	149
3.4.	Перспективные разработки радиационно-чувствительных вакуумных электронных компонентов .....	157
	Литература .....	158

### **4. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И АНАЛИЗА ..... 159**

4.1.	Введение и история разработки .....	159
4.1.1.	Электронная оптика .....	160
4.1.2.	Источники электронов .....	167
4.2.	Термическая обработка материалов .....	173
4.2.1.	Сварка .....	176
4.2.2.	Термическая обработка поверхности .....	180



4.2.3. Скоростное испарение материалов с использованием электронных пушек .....	183
4.2.4. Электронно-лучевое плавление и очистка материалов в вакуумной металлургии .....	186
4.3. Нетермические технологии обработки материалов .....	190
4.3.1. Химические эффекты, вызванные электронными пучками .....	190
4.3.2. Электронно-лучевая литография .....	193
4.3.3. Электронно-лучевая обработка .....	197
4.3.4. Отверждение органических покрытий и поверхностных слоев .....	200
4.3.5. Рафинирование полимерных материалов .....	202
4.3.6. Борьба с патогенными организмами .....	204
4.3.7. Обработка газообразных и жидких отходов .....	206
4.4. Анализ, визуализация и тестирование материалов .....	208
4.4.1. Растровая электронная микроскопия .....	208
4.4.2. Электронная микроскопия .....	211
4.4.3. Электронно-лучевая спектроскопия и анализ .....	219
4.4.4. Электронно-лучевое тестирование .....	220
Литература .....	224

## **5. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ ..... 231**

5.1. Ионно-лучевой анализ .....	231
5.2.1. История разработки .....	231
5.1.2. Электрофизические основы .....	231
5.1.3. Методы анализа .....	232
5.2. Ионно-лучевая обработка материалов и восстановление шаблонов и масок .....	236
5.2.1. История разработки .....	236
5.2.2. Электрофизические основы .....	237
5.2.3. Современное состояние технологий и применения .....	238
5.2.4. Перспективные разработки .....	245
5.3. Имплантация ионов .....	246
5.3.1. История разработок .....	246
5.3.2. Электрофизические основы .....	247
5.3.3. Современное состояние технологий и применения .....	247
5.3.4. Перспективные разработки .....	253
5.4. Высокоэнергетические ионные пучки .....	253
5.4.1. История разработки .....	253
5.4.2. Введение .....	253
5.4.3. Физические принципы действия ускорителя .....	254
5.4.4. Транспортировка пучка .....	258
Литература .....	258

## **6. ИОННЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ..... 263**

6.1. Электростатические и индукционные ионные ракетные двигатели малой тяги с СВЧ-ионизацией .....	263
6.1.1. Введение .....	263
6.1.2. История разработки ионных ракетных двигателей (РИТ) .....	263
6.1.3. Электрофизические основы .....	264

6.1.4. Современное состояние технологий и применения ионных ракетных двигателей малой тяги .....	265
6.1.5. Применения ионных ракетных двигателей .....	266
6.1.6. Будущие направления развития .....	268
6.2. Электрический ракетный двигатель с полевой эмиссией (FEED) .....	269
6.2.1. История разработки .....	269
6.2.2. Электрофизические основы .....	270
6.2.3. Современное состояние технологий и применения .....	271
6.2.4. Будущие направления развития .....	274
6.3. Ионные двигатели на эффекте Холла .....	275
6.3.1. Введение .....	275
6.3.2. Эксплуатационные характеристики .....	275
6.3.3. Примеры применений НЕТ для полетов в космос .....	281
6.4. Высокоэффективные многоступенчатые плазменные двигатели малой тяги .....	283
6.4.1. Введение .....	283
6.4.2. Конструкция и принцип действия .....	284
6.4.3. Конструкция и рабочие характеристики .....	288
6.4.4. Будущие разработки и потенциальные применения .....	291
Литература .....	292

## **7. ИНФРАКРАСНЫЕ, СВЕТОВЫЕ, УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ, ЛАЗЕРНЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАМПЫ ..... 296**

7.1. Общие физические принципы генерации фотонов .....	296
7.1.1. История разработки .....	296
7.2. Лазеры .....	300
7.2.1. Введение .....	300
7.2.2. Типичные лазерные устройства .....	301
7.2.3. Ионные лазеры .....	302
7.2.4. Экцимерные лазеры .....	303
7.2.5. Электронно-лучевая накачка мощных KrF-лазеров .....	305
7.3. Эффект Смита–Парселла .....	307
7.3.1. История разработки .....	307
7.3.2. Электрофизические основы .....	307
7.3.3. Современное состояние технологий .....	307
7.3.4. Перспективы для терагерцевых источников .....	309
7.4. Источники миллиметрового и инфракрасного излучения .....	309
7.4.1. История разработки .....	309
7.4.2. Генерация ИК-излучения .....	310
7.4.3. ИК-применения .....	310
7.4.4. Генерация терагерцевого излучения .....	311
7.4.5. Применения терагерцевого излучения .....	311
7.4.6. Перспективы развития .....	313
7.4.7. Обнаружение терагерцевого излучения .....	313
7.5. Источники видимого света .....	314
7.5.1. История разработки и производства .....	314
7.5.2. Лампы накаливания .....	314
7.5.3. Газоразрядные лампы .....	315
7.5.4. Флуоресцентные покрытия .....	317



7.5.5.	Газоразрядные лампы высокого давления.....	320
7.5.6.	Общая информация об источниках света.....	325
7.6.	Ультрафиолетовые источники света.....	325
7.6.1.	Введение.....	325
7.6.2.	Тепловые вольфрамовые лампы для калибровки интенсивности.....	326
7.6.3.	Дейтериевые лампы.....	326
7.6.4.	УФ дуговые лампы.....	327
7.6.5.	Ртутные лампы.....	328
7.6.6.	Лампы с полым катодом.....	328
7.6.7.	Экцимерные источники света.....	329
7.6.8.	Экцимерные лампы с разрядным возбуждением тлеющего разряда.....	331
7.6.9.	Экцимерные лампы с электронно-лучевым возбуждением.....	333
7.7.	Рентгеновские лампы.....	333
7.7.1.	История получения рентгеновского излучения.....	333
7.7.2.	Генерация рентгеновских лучей.....	334
7.7.3.	Рентгеновские фильтры.....	335
7.7.4.	Рентгеновская дозиметрия.....	335
7.7.5.	Рентгеновские трубки.....	336
7.7.6.	Синхротроны.....	338
7.7.7.	Обнаружение рентгеновского излучения.....	339
7.7.8.	Применения.....	339
7.7.9.	Перспективные разработки – миниатюрные рентгеновские трубки.....	340
	Литература.....	340

## 8. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ ..... 345

8.1.	История изобретения и типы ускорителей.....	347
8.1.1.	Статические ускорители.....	347
8.1.2.	Круговое резонансное ускорение.....	348
8.1.3.	Линейное резонансное ускорение.....	350
8.1.4.	Индукционное ускорение (бетатрон).....	352
8.1.5.	Источники частиц.....	353
8.1.6.	Коллайдеры.....	355
8.1.7.	Источники синхротронного излучения.....	356
8.2.	Основы динамики пучка.....	358
8.2.1.	Эмиттанс пучка и фазовое пространство.....	359
8.2.2.	Уравнения движения и сильная фокусировка.....	360
8.2.3.	Синхротронное излучение.....	364
8.3.	Требования к вакууму ускорителей частиц.....	367
8.3.1.	Взаимодействие пучка с газом.....	367
8.3.2.	Статические и динамические аспекты вакуумных систем ускорителей.....	371
8.4.	Положение дел, оборудование. Конструкция вакуумных систем ускорителей.....	374
8.4.1.	Расчеты профиля давления для одномерных систем.....	375
8.4.2.	Насосы.....	377
8.4.3.	Вакуумное оборудование.....	381
8.4.4.	Выбор материала и проекта.....	381
8.4.5.	Очистка и обработка вакуумных камер.....	385
8.5.	Специальные конструкции вакуумных систем ускорителей.....	385

8.5.1. Ускорители с холодными вакуумными системами .....	385
8.5.2. Объекты с синхротронным излучением .....	388
8.5.3. Системы сверхвысокого вакуума без присутствия частиц .....	389
Литература.....	390

## 9. ВАКУУМНЫЕ ПРЕРЫВАТЕЛИ ..... 392

9.1. Историческое развитие .....	392
9.2. Физические основы.....	393
9.2.1. Прерывающая способность .....	393
9.2.2. Диэлектрические свойства.....	398
9.2.3. Эффекты перехода тока через нуль.....	400
9.2.4. Механические и тепловые основы работы.....	400
9.3. Современное состояние знания и приложений.....	401
9.3.1. Конструкция и технология производства вакуумных прерывателей.....	401
9.3.2. Вакуумные выключатели среднего напряжения.....	404
9.3.3. Контакторы среднего напряжения .....	404
9.3.4. Низковольтные выключатели .....	405
9.3.5. Контакторы низкого напряжения .....	406
9.3.6. Высоковольтные вакуумные выключатели .....	406
9.3.7. Выключатели нагрузки.....	407
9.3.8. Трансформаторные переключатели.....	407
9.3.9. Другие приложения.....	408
9.4. Аспекты будущего .....	408
Литература.....	409

## 10. ВАКУУМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ..... 411

10.1. Термоэмиссионные вакуумные источники электронов .....	411
10.1.1. История разработки .....	411
10.1.2. Физические основы термоэмиссии .....	413
10.1.3. Типы термокатодов, их характеристики и приложения .....	416
10.2. Нетепловые источники электронов .....	430
10.2.1. История разработки .....	430
10.2.2. Автоэмиссионные катоды.....	431
10.2.3. Автоэмиссионные термокатоды .....	432
10.2.4. Холодные катоды для автоэлектронной эмиссии.....	434
10.2.5. Новые материалы для катодов .....	436
10.2.6. Тенденции современных разработок .....	436
10.2.7. Материалы эмиттера металл—диэлектрик—металл (МДМ) .....	439
10.2.8. Эмиттеры с алмазными пленками и скачковой проводимостью .....	439
10.2.9. Эмиттеры из углеродных нанотрубок.....	440
10.2.10. Другие углеродные эмиттеры и перспективы развития.....	441
10.3. Другие типы электронных эмиттеров.....	442
10.3.1. <i>pn</i> -эмиттеры .....	442
10.3.2. Вторичная эмиссия .....	445
10.3.3. Сегнетоэлектрическая электронная эмиссия .....	445
10.3.4. Фотоэлектронная эмиссия.....	446
10.4. Вакуумные электронные конструкции .....	448



10.4.1. Разделители для матричных автоэммиттеров.....	448
10.4.2. Анодное склеивание.....	448
10.4.3. Создание вакуума при производстве вакуумных электронных устройств на кристалле.....	450
10.5. Материалы для вакуумных электронных источников.....	451
Литература.....	455
<b>11. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА.....</b>	<b>459</b>
11.1. Введение и история разработки.....	459
11.2. Газы в вакуумных системах.....	459
11.2.1. Физические основы вакуума.....	459
11.2.2. Идеальный газ.....	460
11.2.3. Диапазоны давлений в вакуумной технике.....	460
11.2.4. Поверхностные взаимодействия и дегазация.....	462
11.3. Вакуумные насосы.....	463
11.3.1. Введение.....	463
11.3.2. Низко- и средневакуумные насосы.....	464
11.3.3. Диффузионные и пароструйные насосы для высокого и сверхвысокого вакуума (СВВ).....	465
11.3.4. Выбор насоса.....	472
11.4. Измерение давления вакуума.....	472
11.4.1. Введение.....	472
11.4.2. Вакуумметры полного давления.....	472
11.4.3. Вакуумметры парциального давления.....	479
11.5. Вакуумные материалы и компоненты.....	481
11.5.1. Критерии выбора материалов для вакуумной техники.....	481
11.5.2. Стандарты и конструкции элементов вакуумных камер.....	484
11.5.3. Процедуры очистки.....	484
11.6. Течи и их обнаружение.....	486
11.6.1. Введение.....	486
11.6.2. Методы обнаружения течей.....	486
11.6.3. Гелиевые течеискатели.....	486
11.6.4. Испытания на герметичность вакуумной микроэлектроники.....	488
11.7. Примеры вакуумных систем.....	488
11.7.1. СВВ-система для получения характеристик автоэмиссии.....	489
Литература.....	491
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>492</b>