

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Предисловие к третьему изданию</b> .....                                                    | 25 |
| <b>Предисловие к первому изданию</b> .....                                                     | 27 |
| <b>Глава 1</b> .....                                                                           |    |
| <b>Введение</b> .....                                                                          | 29 |
| 1.1. Что изучает физика газового разряда .....                                                 | 29 |
| 1.2. Типичные разряды в постоянном электрическом поле .....                                    | 30 |
| 1.3. Классификация разрядных процессов .....                                                   | 32 |
| 1.4. Коротко об истории исследования разрядов .....                                            | 34 |
| <b>Часть I</b>                                                                                 |    |
| <b>ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ<br/>И ЭЛЕМЕНТЫ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ</b>                                |    |
| <b>Глава 2</b> .....                                                                           |    |
| <b>Упругие столкновения электронов и ионов с атомами, молекулами<br/>и друг с другом</b> ..... | 39 |
| 2.1. Основные понятия физики атомных столкновений и кинетической<br>теории газов .....         | 39 |
| 2.1.1. Упругие и неупругие удары .....                                                         | 39 |
| 2.1.2. Эффективное сечение .....                                                               | 39 |
| 2.1.3. Частота столкновений .....                                                              | 41 |
| 2.1.4. Длина свободного пробега .....                                                          | 43 |
| 2.1.5. Вероятности различных пробегов .....                                                    | 44 |
| 2.1.6. Числа столкновений при нормальных условиях .....                                        | 44 |
| 2.2. Сечения рассеяния электронов нейтральными атомами<br>и молекулами .....                   | 45 |
| 2.3. Потери импульса и энергии электронов .....                                                | 48 |
| 2.3.1. Дифференциальное сечение и угловое распределение рассеяния .....                        | 48 |
| 2.3.2. Транспортное сечение и потери импульса .....                                            | 49 |
| 2.3.3. Упругие потери энергии .....                                                            | 51 |
| 2.4. Упругое рассеяние по классической механике .....                                          | 52 |
| 2.4.1. Приведенная масса .....                                                                 | 52 |
| 2.4.2. Система центра масс .....                                                               | 53 |



|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3. Относительное движение .....                                          | 54        |
| 2.4.4. Максвелловское распределение по относительным<br>скоростям .....      | 56        |
| 2.4.5. Дифференциальное сечение .....                                        | 57        |
| 2.4.6. Расходимость полного сечения .....                                    | 57        |
| 2.5. Обмен импульсом и энергией в общем случае упругого<br>рассеяния .....   | 58        |
| 2.5.1. Потеря импульса .....                                                 | 58        |
| 2.5.2. Транспортное сечение для столкновения частиц сравнимой<br>массы ..... | 59        |
| 2.5.3. Обмен энергией .....                                                  | 60        |
| 2.5.4. Релаксация в поступательных степенях свободы газа .....               | 61        |
| 2.6. Столкновения ионов с нейтральными частицами .....                       | 63        |
| 2.6.1. Поляризационное сечение .....                                         | 63        |
| 2.6.2. Взаимодействие с дипольными молекулами .....                          | 66        |
| 2.7. Резонансная перезарядка .....                                           | 67        |
| 2.8. Кулоновские столкновения заряженных частиц .....                        | 70        |
| 2.8.1. Формула Резерфорда .....                                              | 71        |
| 2.8.2. Интеграл транспортного сечения .....                                  | 72        |
| 2.9. Экранирование зарядов в плазме и дебаевский радиус .....                | 73        |
| 2.9.1. Потенциал вокруг заряда в плазме .....                                | 73        |
| 2.9.2. Дебаевский радиус .....                                               | 75        |
| 2.9.3. Идеальность плазмы .....                                              | 75        |
| 2.10. Столкновения заряженных частиц (продолжение) .....                     | 76        |
| 2.10.1. Кулоновский логарифм .....                                           | 76        |
| 2.10.2. Частоты столкновений и длины пробега .....                           | 76        |
| 2.10.3. Обмен энергией и релаксация .....                                    | 78        |
| <br><b>Глава 3</b>                                                           |           |
| <b>Неупругие столкновения электронов с атомами и молекулами .....</b>        | <b>80</b> |
| 3.1. Ионизация .....                                                         | 80        |
| 3.1.1. Потенциалы и сечения ионизации .....                                  | 80        |
| 3.1.2. Формула Томсона .....                                                 | 82        |
| 3.1.3. Ионизация возбужденных атомов .....                                   | 84        |
| 3.1.4. Ионизация ионов .....                                                 | 85        |
| 3.2. Возбуждение и дезактивация электронных состояний .....                  | 85        |
| 3.2.1. Схемы уровней .....                                                   | 85        |
| 3.2.2. Метастабильные и резонансные уровни .....                             | 87        |
| 3.2.3. Сечения возбуждения .....                                             | 88        |
| 3.2.4. Принцип детального равновесия .....                                   | 90        |
| 3.2.5. Сечение дезактивации .....                                            | 91        |
| 3.3. Возбуждение молекулярных колебаний .....                                | 92        |



|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1. Адиабатические и резкие удары .....            | 93 |
| 3.3.2. Квантовая трактовка .....                      | 93 |
| 3.3.3. Возбуждение через захват .....                 | 94 |
| 3.4. Возбуждение вращений молекул .....               | 96 |
| 3.5. Диссоциация молекул .....                        | 97 |
| 3.6. Замечания о возбуждении и ионизации ионами ..... | 98 |

## Глава 4

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Дрейф, энергия и диффузия заряженных частиц в постоянном поле .....</b>                              | <b>100</b> |
| 4.1. Дрейф электронов в слабоионизованном газе .....                                                    | 100        |
| 4.1.1. Уравнение усредненного движения .....                                                            | 100        |
| 4.1.2. Скорость дрейфа .....                                                                            | 101        |
| 4.1.3. Подвижность .....                                                                                | 102        |
| 4.1.4. Подobie, результаты измерений, дрейф в смесях газов .....                                        | 102        |
| 4.2. Проводимость ионизованного газа .....                                                              | 104        |
| 4.2.1. Слабоионизованная плазма .....                                                                   | 104        |
| 4.2.2. Сильноионизованная плазма .....                                                                  | 105        |
| 4.2.3. Почему электрон-электронные столкновения не вносят вклада<br>в электрическое сопротивление ..... | 105        |
| 4.3. Энергия электронов .....                                                                           | 106        |
| 4.3.1. Джоулево тепло .....                                                                             | 106        |
| 4.3.2. Среднее приобретение энергии электроном в одном эффективном<br>столкновении .....                | 106        |
| 4.3.3. Истинные изменения энергии электрона при столкновениях .....                                     | 107        |
| 4.3.4. Уравнение баланса энергии электрона .....                                                        | 108        |
| 4.3.5. Средняя энергия .....                                                                            | 109        |
| 4.3.6. Соотношение между хаотической и дрейфовой скоростями .....                                       | 110        |
| 4.3.7. Релаксация энергии; критерии постоянства и однородности<br>поля .....                            | 111        |
| 4.4. Диффузия электронов .....                                                                          | 112        |
| 4.4.1. Диффузионный поток и уравнение непрерывности .....                                               | 112        |
| 4.4.2. Соотношение между коэффициентами диффузии, подвижностью<br>и средней энергией .....              | 114        |
| 4.4.3. Нахождение коэффициентов диффузии .....                                                          | 116        |
| 4.4.4. Продольная и поперечная диффузия электронов .....                                                | 116        |
| 4.5. Ионы .....                                                                                         | 119        |
| 4.5.1. Подвижность в несильных полях .....                                                              | 119        |
| 4.5.2. Энергия ионов .....                                                                              | 120        |
| 4.5.3. Дрейф в сильных полях .....                                                                      | 122        |
| 4.5.4. Коэффициенты диффузии при умеренных значениях $E/p$ .....                                        | 123        |
| 4.5.5. Продольная и поперечная диффузия .....                                                           | 124        |
| 4.6. Амбиполярная диффузия .....                                                                        | 126        |
| 4.6.1. Коэффициент амбиполярной диффузии .....                                                          | 126        |



|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6.2. При каких условиях диффузия амбиополярна .....                                                       | 127 |
| 4.6.3. Определение понятия «плазмы» .....                                                                   | 128 |
| 4.7. Протекание электрического тока в плазме в присутствии<br>продольных градиентов плотности зарядов ..... | 128 |
| 4.7.1. Уравнение непрерывности для электричества .....                                                      | 128 |
| 4.7.2. Диффузионный ток и искажение поля градиентами .....                                                  | 129 |
| 4.7.3. Уравнение для плотности плазмы .....                                                                 | 130 |
| 4.7.4. Критерий электронейтральности .....                                                                  | 130 |
| 4.7.5. Амбиоплярный поток зарядов вдоль неоднородного поля .....                                            | 131 |
| 4.8. Гидродинамическое описание электронов .....                                                            | 132 |
| 4.8.1. Уравнения непрерывности и движения .....                                                             | 132 |
| 4.8.2. Уравнение энергии .....                                                                              | 132 |
| 4.8.3. Плазма с током .....                                                                                 | 133 |
| 4.9. Движение зарядов в газе в присутствии магнитного поля .....                                            | 134 |
| 4.9.1. Дрейф в электрическом поле .....                                                                     | 134 |
| 4.9.2. Проводимость и ток Холла .....                                                                       | 135 |
| 4.9.3. Диффузия .....                                                                                       | 135 |

## Глава 5

### **Образование и гибель заряженных частиц в газе .....**

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Различные механизмы и их роль в условиях газового разряда .....                | 138 |
| 5.1.1. Рождение электронов и положительных ионов .....                              | 138 |
| 5.1.2. Электрон-ионная рекомбинация .....                                           | 140 |
| 5.1.3. Отрицательные ионы .....                                                     | 141 |
| 5.1.4. Ион-ионная рекомбинация .....                                                | 142 |
| 5.1.5. Диффузионный уход зарядов к стенкам разрядного сосуда .....                  | 142 |
| 5.2. Ионизация электронным ударом в электрическом поле .....                        | 143 |
| 5.2.1. Частота ионизации .....                                                      | 143 |
| 5.2.2. Электронная лавина .....                                                     | 143 |
| 5.2.3. Частота ионизации при максвелловском спектре .....                           | 144 |
| 5.2.4. Ионизация в однородном поле .....                                            | 144 |
| 5.2.5. Связь между частотой ионизации и ионизационным<br>коэффициентом .....        | 145 |
| 5.2.6. Экспериментальное определение скорости ионизации .....                       | 146 |
| 5.2.7. Эмпирическая формула для ионизационного коэффициента .....                   | 149 |
| 5.2.8. Очень сильные поля .....                                                     | 151 |
| 5.2.9. Оптимальные условия ионизации .....                                          | 152 |
| 5.3. Фотоионизация .....                                                            | 153 |
| 5.4. Ионизация при столкновении возбужденного атома с атомом<br>или молекулой ..... | 154 |
| 5.4.1. Резонансно-возбужденные атомы .....                                          | 154 |
| 5.4.2. Метастабильные атомы — эффект Пеннинга .....                                 | 155 |
| 5.4.3. Ассоциативная ионизация .....                                                | 156 |



|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5. Термодинамически равновесная плотность электронов .....                                                                           | 158 |
| 5.6. Рекомбинация электронов и положительных ионов .....                                                                               | 159 |
| 5.6.1. Закон рекомбинации .....                                                                                                        | 159 |
| 5.6.2. Фоторекомбинация .....                                                                                                          | 160 |
| 5.6.3. Рекомбинация в тройных столкновениях с участием<br>дополнительного электрона и образованием атома<br>в основном состоянии ..... | 161 |
| 5.6.4. Ударно-радиационная рекомбинация в тройных столкновениях .....                                                                  | 161 |
| 5.6.5. Сопоставление фото- и тройной ударно-радиационной<br>рекомбинации .....                                                         | 163 |
| 5.6.6. Ударно-радиационная рекомбинация с участием атомов .....                                                                        | 164 |
| 5.6.7. Диэлектронная рекомбинация .....                                                                                                | 164 |
| 5.6.8. Диссоциативная рекомбинация .....                                                                                               | 165 |
| 5.7. Образование молекулярных ионов в атомарных газах .....                                                                            | 169 |
| 5.8. Прилипание электронов к атомам и молекулам .....                                                                                  | 170 |
| 5.8.1. Термодинамически равновесные плотности отрицательных<br>ионов .....                                                             | 171 |
| 5.8.2. Фотоприлипание .....                                                                                                            | 172 |
| 5.8.3. Прилипание в тройных столкновениях с участием молекул .....                                                                     | 173 |
| 5.8.4. Прилипание к сложным молекулам .....                                                                                            | 175 |
| 5.8.5. Диссоциативное прилипание .....                                                                                                 | 176 |
| 5.8.6. Прилипание в тройных столкновениях с участием электрона .....                                                                   | 178 |
| 5.8.7. Коэффициент прилипания в постоянном поле .....                                                                                  | 179 |
| 5.9. Освобождение электронов из отрицательных ионов .....                                                                              | 181 |
| 5.9.1. Электронные удары .....                                                                                                         | 181 |
| 5.9.2. Отлипание при столкновениях с атомами и молекулами .....                                                                        | 182 |
| 5.10. Рекомбинация положительных и отрицательных ионов .....                                                                           | 184 |
| 5.10.1. Рекомбинация в парных столкновениях .....                                                                                      | 185 |
| 5.10.2. Тройные столкновения при средних давлениях .....                                                                               | 186 |
| 5.10.3. Высокие давления .....                                                                                                         | 187 |
| 5.11. Диффузионные потери зарядов .....                                                                                                | 188 |
| 5.11.1. Частота диффузионных уходов .....                                                                                              | 188 |
| 5.11.2. Пространственные распределения плотности электронов .....                                                                      | 189 |
| 5.11.3. Характерная диффузионная длина .....                                                                                           | 189 |

## Глава 6

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| <b>Испускание электронов твердыми телами .....</b> | <b>191</b> |
| 6.1. Электроны проводимости в металле .....        | 191        |
| 6.1.1. Температура вырождения .....                | 191        |
| 6.1.2. Распределение Ферми .....                   | 192        |
| 6.1.3. Работа выхода .....                         | 192        |
| 6.1.4. Аналогия со связью в атоме .....            | 193        |
| 6.2. Термоэлектронная эмиссия .....                | 194        |



|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1. Эмиссионный ток насыщения .....                                       | 194 |
| 6.2.2. Эффективные термокатоды .....                                         | 196 |
| 6.2.3. Влияние внешнего поля на работу выхода .....                          | 196 |
| 6.3. Эмиссия электронов под действием частиц .....                           | 197 |
| 6.3.1. Ионно-электронная эмиссия .....                                       | 198 |
| 6.3.2. Потенциальное вырывание электронов возбужденными атомами .....        | 199 |
| 6.3.3. Фотоэлектронная эмиссия .....                                         | 200 |
| 6.3.4. Вторичная электронная эмиссия .....                                   | 201 |
| 6.4. Эффективный коэффициент вторичной эмиссии в разряде .....               | 202 |
| 6.4.1. Влияние вторичной эмиссии на усиление тока первичных электронов ..... | 202 |
| 6.4.2. Вклад вторичной фотоэмиссии .....                                     | 203 |
| 6.4.3. Результаты измерений $\gamma$ . Положительные ионы или фотоны? .....  | 204 |
| 6.5. Вырывание электронов из тела сильным электрическим полем .....          | 206 |
| 6.5.1. Автоэлектронная эмиссия .....                                         | 206 |
| 6.5.2. Термоавтоэлектронная эмиссия .....                                    | 208 |
| 6.6. Элементарный ток в цепи, содержащей разрядный промежуток .....          | 209 |

## Глава 7

### Взаимодействие электронов ионизованного газа с переменными

### электрическими полями и электромагнитными излучениями .....

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Колебания электронов в осциллирующем поле .....                                        | 212 |
| 7.1.1. Свободные колебания .....                                                            | 212 |
| 7.1.2. Влияние столкновений .....                                                           | 213 |
| 7.1.3. Дрейфовые колебания .....                                                            | 214 |
| 7.2. Энергия электронов .....                                                               | 215 |
| 7.2.1. Бесстолкновительное движение .....                                                   | 215 |
| 7.2.2. Приобретение энергии от поля .....                                                   | 215 |
| 7.2.3. Баланс энергии электрона .....                                                       | 216 |
| 7.2.4. Средняя установившаяся энергия .....                                                 | 216 |
| 7.2.5. Истинные изменения энергии электрона при столкновениях .....                         | 217 |
| 7.2.6. Почему электрон-электронные столкновения не приводят к диссипации энергии поля ..... | 218 |
| 7.3. Основные уравнения электродинамики сплошных сред .....                                 | 219 |
| 7.3.1. Уравнения Максвелла .....                                                            | 219 |
| 7.3.2. Токи смещения, поляризации, проводимости зарядов .....                               | 220 |
| 7.3.3. Разложение на гармоники .....                                                        | 220 |
| 7.3.4. Уравнение связи для гармонических компонент .....                                    | 221 |
| 7.3.5. Уравнение закона сохранения энергии .....                                            | 221 |



|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4. Высокочастотные проводимость и диэлектрическая проницаемость плазмы .....                             | 222 |
| 7.4.1. Вычисление $\sigma_\omega$ и $\varepsilon_\omega$ .....                                             | 222 |
| 7.4.2. Предел «больших» частот («бесстолкновительная» плазма) .....                                        | 223 |
| 7.4.3. Статический предел .....                                                                            | 223 |
| 7.4.4. Почему у диэлектриков обычно $\varepsilon > 1$ , а у плазмы $\varepsilon < 1$ .....                 | 223 |
| 7.5. Распространение электромагнитных волн в плазме .....                                                  | 224 |
| 7.5.1. Комплексная диэлектрическая проницаемость .....                                                     | 224 |
| 7.5.2. Плоская электромагнитная волна .....                                                                | 225 |
| 7.5.3. Показатели преломления и затухания волны .....                                                      | 225 |
| 7.5.4. Закон ослабления потока энергии .....                                                               | 226 |
| 7.5.5. Коэффициент поглощения волны в плазме .....                                                         | 227 |
| 7.5.6. Квазистационарное поле и скин-слой .....                                                            | 227 |
| 7.6. Полное отражение электромагнитной волны от плазмы .....                                               | 228 |
| 7.6.1. Непоглощающая среда с отрицательной диэлектрической проницаемостью .....                            | 228 |
| 7.6.2. Критическая плотность электронов .....                                                              | 229 |
| 7.7. Плазменные колебания и волны .....                                                                    | 230 |
| 7.7.1. Плазменная частота .....                                                                            | 230 |
| 7.7.2. Волны .....                                                                                         | 231 |
| 7.7.3. Затухание Ландау .....                                                                              | 231 |
| 7.8. Обмен квантами между полем излучения и свободными электронами в газе .....                            | 232 |
| 7.8.1. Классический и квантовый подходы к проблеме взаимодействия .....                                    | 232 |
| 7.8.2. Интенсивность излучения, коэффициенты поглощения, вынужденного и самопроизвольного испускания ..... | 233 |
| 7.8.3. Принцип детального равновесия и соотношения между коэффициентами .....                              | 234 |
| 7.8.4. Результирующее поглощение световой волны .....                                                      | 235 |
| 7.8.5. Приобретение энергии электроном .....                                                               | 236 |
| 7.9. Полуклассический способ нахождения квантовых коэффициентов .....                                      | 236 |
| 7.9.1. Тормозное излучение .....                                                                           | 237 |
| 7.9.2. Закон Кирхгофа .....                                                                                | 238 |
| 7.9.3. Квантовые коэффициенты .....                                                                        | 239 |
| 7.10. Фактические границы применимости классического подхода к эффектам взаимодействия .....               | 240 |
| 7.10.1. Предельный переход от квантовой теории к классической .....                                        | 240 |
| 7.10.2. Критерий применимости формул классической теории .....                                             | 241 |
| 7.10.3. Статистическая трактовка классического выражения в сугубо квантовом случае .....                   | 241 |



## Глава 8

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Излучение и поглощение света плазмой</b> .....                                     | 243 |
| 8.1. Типы радиационных переходов .....                                                | 243 |
| 8.2. Тормозное излучение при столкновениях электронов<br>с ионами .....               | 244 |
| 8.3. Рекомбинационное излучение .....                                                 | 245 |
| 8.3.1. Сечение фотозахвата .....                                                      | 245 |
| 8.3.2. Излучательная способность .....                                                | 247 |
| 8.3.3. Усреднение спектральной функции .....                                          | 247 |
| 8.4. Полное испускание в непрерывном спектре .....                                    | 248 |
| 8.4.1. Спектральная излучательная способность .....                                   | 248 |
| 8.4.2. Уточнения .....                                                                | 249 |
| 8.4.3. Интегральное излучение .....                                                   | 250 |
| 8.5. Поглощение в непрерывном спектре .....                                           | 250 |
| 8.5.1. Тормозное поглощение .....                                                     | 251 |
| 8.5.2. Сечение фотоионизации .....                                                    | 251 |
| 8.5.3. Полный коэффициент поглощения .....                                            | 252 |
| 8.5.4. Квантовая форма закона Кирхгофа .....                                          | 254 |
| 8.6. Излучение спектральных линий .....                                               | 255 |
| 8.6.1. Вероятности радиационных переходов .....                                       | 256 |
| 8.6.2. Классическая модель излучающего атома .....                                    | 256 |
| 8.6.3. Естественные ширина и форма линии .....                                        | 257 |
| 8.6.4. Уширение линий .....                                                           | 258 |
| 8.6.5. Сдвиг границы серии .....                                                      | 260 |
| 8.6.6. Излучательная способность .....                                                | 260 |
| 8.7. Селективное поглощение .....                                                     | 260 |
| 8.7.1. Эффективное сечение поглощения в линии, уширенной<br>столкновениями .....      | 260 |
| 8.7.2. Площадь «классической» линии .....                                             | 261 |
| 8.7.3. Сила осциллятора .....                                                         | 262 |
| 8.8. Молекулярные спектры .....                                                       | 263 |
| 8.9. Перенос излучения, выход его из плазменного объема,<br>радиационные потери ..... | 265 |
| 8.9.1. Уравнение переноса излучения .....                                             | 265 |
| 8.9.2. Интенсивность на выходе из тела .....                                          | 265 |
| 8.9.3. Прозрачное тело .....                                                          | 266 |
| 8.9.4. Абсолютно черное тело .....                                                    | 266 |
| 8.9.5. Самопоглощение .....                                                           | 267 |
| 8.9.6. Степень черноты .....                                                          | 267 |
| 8.9.7. Суммарные спектры и интегральное излучение .....                               | 268 |
| 8.9.8. Лучистый теплообмен .....                                                      | 271 |



|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 8.10. Принцип действия лазера .....           | 272 |
| 8.10.1. Инверсия и усиление .....             | 272 |
| 8.10.2. Условие генерации .....               | 273 |
| 8.10.3. Температура лазерного излучения ..... | 274 |

## Часть II

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

## Глава 9

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Кинетическое уравнение для электронов в слабоионизованном газе,<br>находящемся в поле .....                          | 277 |
| 9.1. Описание электронных процессов при помощи функции<br>распределения по скоростям .....                           | 277 |
| 9.2. Формулировка кинетического уравнения .....                                                                      | 278 |
| 9.2.1. Уравнение баланса числа частиц .....                                                                          | 278 |
| 9.2.2. Теорема Лиувилля .....                                                                                        | 280 |
| 9.2.3. Уравнение баланса применительно к электронам в поле .....                                                     | 280 |
| 9.2.4. Разделение столкновений на упругие и неупругие .....                                                          | 281 |
| 9.2.5. Интеграл столкновений .....                                                                                   | 282 |
| 9.3. Приближение для угловой зависимости функции распределения .....                                                 | 283 |
| 9.3.1. Симметричная и асимметричная части функции распределения .....                                                | 283 |
| 9.3.2. Уравнения для функций $f_0, f_1$ .....                                                                        | 284 |
| 9.4. Уравнение для энергетического спектра электронов .....                                                          | 286 |
| 9.4.1. Приближенное интегрирование уравнения для $f_1$ .....                                                         | 286 |
| 9.4.2. Уравнение для функции $f_0$ .....                                                                             | 288 |
| 9.4.3. Уравнение для функции $n(e)$ .....                                                                            | 288 |
| 9.4.4. Диффузионный характер уравнения .....                                                                         | 288 |
| 9.4.5. Учет упругих потерь .....                                                                                     | 289 |
| 9.4.6. Слагаемое неупругих столкновений .....                                                                        | 290 |
| 9.4.7. Пространственная диффузия электронов .....                                                                    | 291 |
| 9.5. Критерии справедливости уравнения для спектра .....                                                             | 292 |
| 9.5.1. По величине поля .....                                                                                        | 292 |
| 9.5.2. По частоте поля .....                                                                                         | 293 |
| 9.5.3. По пространственной однородности .....                                                                        | 293 |
| 9.5.4. По степени ионизации .....                                                                                    | 293 |
| 9.6. Сравнение некоторых выводов, вытекающих из кинетического<br>уравнения, с результатами элементарной теории ..... | 294 |
| 9.6.1. Проводимость и диэлектрическая проницаемость .....                                                            | 294 |
| 9.6.2. Скорость изменения средней энергии спектра .....                                                              | 295 |
| 9.6.3. Законы подобия .....                                                                                          | 296 |



|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.7. Стационарный спектр электронов в поле при действии упругих потерь и влияние неупругих ..... | 297        |
| 9.7.1. Что дает элементарная теория? .....                                                       | 297        |
| 9.7.2. Решение кинетического уравнения (9.23) .....                                              | 298        |
| 9.7.3. Распределение Дрюивестейна .....                                                          | 299        |
| 9.7.4. Влияние неупругих потерь на «хвост» энергетического спектра и скорость ионизации .....    | 300        |
| 9.8. Численные расчеты для азота и воздуха .....                                                 | 301        |
| 9.8.1. Колебательно-невозбужденные газы .....                                                    | 302        |
| 9.8.2. Колебательно-возбужденный азот .....                                                      | 304        |
| 9.9. Пространственно неоднородные поля произвольной силы .....                                   | 305        |
| 9.10. Квантовое уравнение для электронного спектра и переход к классике .....                    | 308        |
| 9.10.1. Формулировка уравнения .....                                                             | 308        |
| 9.10.2. Диффузионное приближение .....                                                           | 309        |
| 9.10.3. Предельный переход .....                                                                 | 310        |
| <b>Глава 10</b>                                                                                  |            |
| <b>Электрические зонды .....</b>                                                                 | <b>311</b> |
| 10.1. Введение. Схема эксперимента .....                                                         | 311        |
| 10.2. Вольт-амперная характеристика одиночного зонда .....                                       | 313        |
| 10.3. Теоретические основы диагностики разреженной плазмы по электронному току .....             | 314        |
| 10.3.1. Электронная температура .....                                                            | 314        |
| 10.3.2. Ток насыщения; потенциал и плотность зарядов в плазме .....                              | 315        |
| 10.3.3. Критерий «разреженности» плазмы .....                                                    | 316        |
| 10.3.4. Нахождение функции распределения электронов .....                                        | 316        |
| 10.3.5. Применимость теории крутой части ВАХ к зондам малых размеров .....                       | 317        |
| 10.3.6. Почему не насыщается ток на маленький зонд? .....                                        | 318        |
| 10.4. Техника измерения функции распределения .....                                              | 319        |
| 10.4.1. Наложение небольшого переменного напряжения .....                                        | 319        |
| 10.4.2. Пример результатов .....                                                                 | 320        |
| 10.5. Ионный ток на зонд в разреженной плазме .....                                              | 321        |
| 10.5.1. Ток насыщения .....                                                                      | 322        |
| 10.5.2. Измерение плотности зарядов в плазме .....                                               | 322        |
| 10.5.3. Плавающий потенциал .....                                                                | 323        |
| 10.6. Ток в вакуумном диоде и слой пространственного заряда около заряженного тела .....         | 323        |
| 10.6.1. Ток в вакуумном промежутке, ограниченный действием пространственного заряда .....        | 324        |
| 10.6.2. Оценка толщины плоского слоя .....                                                       | 327        |
| 10.7. Двойной зонд .....                                                                         | 327        |



|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.7.1. Характеристика .....                                                                                                             | 328        |
| 10.7.2. Измерение параметров плазмы .....                                                                                                | 329        |
| 10.7.3. Измерение электрического поля .....                                                                                              | 330        |
| <b>10.8. Зонд в плазме повышенного давления .....</b>                                                                                    | <b>331</b> |
| 10.8.1. Приближенное равновесие в электронном газе .....                                                                                 | 331        |
| 10.8.2. Пространственное распределение плотности зарядов<br>и потенциала в квазинейтральной области вокруг<br>отрицательного зонда ..... | 332        |
| 10.8.3. Ионный ток насыщения и оценка плотности зарядов<br>в плазме .....                                                                | 333        |
| 10.8.4. Об оценке электронной температуры по электронному току<br>на зонд .....                                                          | 334        |
| 10.8.5. Слой положительного пространственного заряда .....                                                                               | 335        |
| 10.8.6. Плавающий потенциал и измерение распределения<br>потенциала .....                                                                | 336        |

### Часть III

## РАЗРЯДЫ РАЗНЫХ ТИПОВ

### Глава 11

#### **Пробой газов в полях различных частотных диапазонов .....**

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1. Сущность явления .....                                                                                                                                                                              | 339 |
| 11.2. Пробой и зажигание самостоятельного разряда в постоянном<br>однородном поле при не слишком больших произведениях<br>давления на длину промежутка .....                                              | 341 |
| 11.2.1. Несамостоятельный ток в разрядном промежутке .....                                                                                                                                                | 341 |
| 11.2.2. Условие зажигания самостоятельного разряда .....                                                                                                                                                  | 343 |
| 11.2.3. Протекание процесса пробоя во времени .....                                                                                                                                                       | 343 |
| 11.2.4. Потенциал зажигания .....                                                                                                                                                                         | 345 |
| 11.2.5. Пробивающие поля в воздухе и других электроотрицательных<br>газах атмосферного давления в случае не слишком длинных<br>промежутков; предельные $pd$ для таунсендовского механизма<br>пробоя ..... | 348 |
| 11.2.6. Пробой вакуумных промежутков .....                                                                                                                                                                | 350 |
| 11.3. Эксперименты по пробую в СВЧ-полях .....                                                                                                                                                            | 351 |
| 11.3.1. Постановка опытов .....                                                                                                                                                                           | 351 |
| 11.3.2. Результаты измерений .....                                                                                                                                                                        | 352 |
| 11.3.3. Neg-газ .....                                                                                                                                                                                     | 353 |
| 11.4. Интерпретация результатов экспериментов по СВЧ-пробую<br>на основе элементарной теории .....                                                                                                        | 354 |
| 11.4.1. Уравнение кинетики ионизации .....                                                                                                                                                                | 354 |
| 11.4.2. Стационарный критерий пробоя .....                                                                                                                                                                | 354 |
| 11.4.3. Низкие давления .....                                                                                                                                                                             | 355 |



|                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.4.4. Высокие давления .....                                                                                                 | 356        |
| 11.4.5. Положение минимума .....                                                                                               | 357        |
| 11.4.6. Неупругие потери; молекулярные, электроотрицательные<br>газы .....                                                     | 357        |
| 11.4.7. Близость пороговых величин в постоянном и переменных<br>полях при высоких давлениях и зависимость их от размеров ..... | 358        |
| 11.5. Вычисление частот ионизации и порогов пробоя на основе<br>кинетического уравнения .....                                  | 359        |
| 11.5.1. Вывод уравнения кинетики из кинетического уравнения .....                                                              | 359        |
| 11.5.2. Разделение переменных .....                                                                                            | 360        |
| 11.5.3. Уравнение для спектральной функции .....                                                                               | 360        |
| 11.5.4. Законы подобия .....                                                                                                   | 361        |
| 11.5.5. Постановка упрощенной задачи о влиянии неупругих потерь<br>на частоту ионизации .....                                  | 362        |
| 11.5.6. Результаты решения .....                                                                                               | 363        |
| 11.5.7. Сравнение вычисленных частот ионизации и порогов пробоя<br>с экспериментом .....                                       | 364        |
| 11.6. Оптический пробой .....                                                                                                  | 366        |
| 11.6.1. Постановка опытов .....                                                                                                | 366        |
| 11.6.2. Результаты экспериментов .....                                                                                         | 367        |
| 11.6.3. Пороги пробоя атмосферного воздуха .....                                                                               | 369        |
| 11.6.4. Многоквантовый фотоэффект .....                                                                                        | 369        |
| 11.6.5. Нестационарный критерий пробоя .....                                                                                   | 370        |
| 11.6.6. Расчеты пороговых полей .....                                                                                          | 371        |
| 11.6.7. Мост между СВЧ и светом .....                                                                                          | 372        |
| 11.6.8. Длинная искра .....                                                                                                    | 373        |
| 11.7. Способы возбуждения высокочастотного поля в разрядном<br>объеме .....                                                    | 374        |
| 11.8. Пробой в полях высокочастотного и низкочастотного<br>диапазонов .....                                                    | 375        |
| 11.8.1. Амплитуда колебаний электронов мала; столкновений много .....                                                          | 376        |
| 11.8.2. Амплитуда колебаний сравнима с размерами промежутка;<br>столкновений много .....                                       | 377        |
| 11.8.3. Широкий диапазон частот, включая низкие; столкновений<br>много .....                                                   | 378        |
| 11.8.4. Пробой «вакуума» .....                                                                                                 | 380        |
| <b>Глава 12</b>                                                                                                                |            |
| <b>Стабильный тлеющий разряд .....</b>                                                                                         | <b>381</b> |
| 12.1. Общая структура и внешний вид .....                                                                                      | 381        |
| 12.1.1. Отличительные черты .....                                                                                              | 381        |
| 12.1.2. Разрядные устройства .....                                                                                             | 381        |
| 12.1.3. Картина свечения .....                                                                                                 | 382        |
| 12.1.4. Изменение условий .....                                                                                                | 384        |



|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.1.5. Распределения параметров по длине .....                                                                       | 384 |
| 12.1.6. Качественная интерпретация картины свечения .....                                                             | 385 |
| 12.1.7. Направляющее действие зарядов, оседающих на стенках .....                                                     | 386 |
| 12.2. Вольт-амперная характеристика разряда между электродами .....                                                   | 387 |
| 12.2.1. Нагрузочная прямая .....                                                                                      | 387 |
| 12.2.2. Темный таунсендовский разряд .....                                                                            | 388 |
| 12.2.3. Тлеющий разряд .....                                                                                          | 388 |
| 12.3. Темный разряд и роль пространственных зарядов в образовании<br>катодного слоя .....                             | 389 |
| 12.3.1. Распределение зарядов в слаботочном темном разряде .....                                                      | 390 |
| 12.3.2. Искажение внешнего поля .....                                                                                 | 391 |
| 12.3.3. Предельный ток существования темного разряда .....                                                            | 392 |
| 12.3.4. Условие самоподдержания разряда в плоском промежутке<br>в случае неоднородного поля .....                     | 392 |
| 12.3.5. Что происходит с напряжением в результате действия<br>пространственного заряда .....                          | 393 |
| 12.4. Катодный слой .....                                                                                             | 393 |
| 12.4.1. Что дает катодный слой .....                                                                                  | 393 |
| 12.4.2. Вольт-амперная характеристика .....                                                                           | 394 |
| 12.4.3. Нормальное катодное падение и плотность тока .....                                                            | 396 |
| 12.4.4. Аномальный разряд .....                                                                                       | 399 |
| 12.4.5. В каком диапазоне токов существует нормальный разряд .....                                                    | 399 |
| 12.4.6. Поднормальный разряд .....                                                                                    | 399 |
| 12.4.7. Затрудненный разряд .....                                                                                     | 399 |
| 12.4.8. Нормальный разряд и принцип минимума мощности .....                                                           | 400 |
| 12.4.9. Механизм установления нормальной плотности тока .....                                                         | 401 |
| 12.4.10. Расширение токового пятна на катоде .....                                                                    | 404 |
| 12.4.11. Нелокальный характер электронного спектра и ионизационного<br>коэффициента в катодном слое .....             | 406 |
| 12.5. Области отрицательного свечения и темного фарадеева<br>пространства .....                                       | 410 |
| 12.5.1. Определяющая роль энергичных электронов, поступающих<br>из катодного слоя .....                               | 410 |
| 12.5.2. Данные зондовых измерений .....                                                                               | 411 |
| 12.5.3. Роль электронной диффузии .....                                                                               | 413 |
| 12.5.4. Основные факторы, определяющие продольную структуру<br>разряда и результаты ее численного моделирования ..... | 413 |
| 12.5.5. Разряд с полым катодом .....                                                                                  | 416 |
| 12.6. Положительный столб .....                                                                                       | 416 |
| 12.6.1. Его предназначение; причинные связи .....                                                                     | 416 |
| 12.6.2. Баланс числа зарядов в газах без прилипания .....                                                             | 417 |
| 12.6.3. Поле в столбе и ВAX .....                                                                                     | 418 |
| 12.6.4. Электронная температура и ее связь с полем .....                                                              | 420 |



|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.6.5. Почему степень ионизации в слабоионизованной газоразрядной плазме сильно неравновесна ..... | 421 |
| 12.6.6. Неоднородный плазменный столб .....                                                         | 422 |
| 12.7. Влияние нагрева газа на поле и ВАХ положительного столба .....                                | 423 |
| 12.7.1. Теплопроводностный вывод джоулева тепла .....                                               | 423 |
| 12.7.2. Конвективный теплоотвод .....                                                               | 424 |
| 12.7.3. Баланс энергии газа .....                                                                   | 424 |
| 12.7.4. Падающая ВАХ .....                                                                          | 424 |
| 12.7.5. Устойчивое и неустойчивое состояния .....                                                   | 425 |
| 12.7.6. Температура газа и масштабы электрических параметров в диффузном тлеющем разряде .....      | 426 |
| 12.7.7. Состояние газа и механизмы ионизации в положительном столбе разряда в азоте .....           | 427 |
| 12.8. Плазма электроотрицательных газов .....                                                       | 429 |
| 12.8.1. Разряд, контролируемый прилипанием .....                                                    | 429 |
| 12.8.2. Зарядовая кинетика при действии отлипания .....                                             | 432 |
| 12.8.3. Эффективный коэффициент рекомбинации .....                                                  | 432 |
| 12.8.4. ВАХ; зарядовый состав плазмы и скорость отлипания .....                                     | 433 |
| 12.9. Разряд в быстром потоке газа .....                                                            | 434 |
| 12.9.1. Турбулентный вынос зарядов к стенкам .....                                                  | 435 |
| 12.9.2. Конвективный вынос зарядов .....                                                            | 435 |
| 12.9.3. Влияние на накопление активных в отношении отлипания молекул .....                          | 436 |
| 12.10. Анодный слой .....                                                                           | 436 |
| 12.10.1. Рождение ионов .....                                                                       | 436 |
| 12.10.2. Падение потенциала и плотность тока .....                                                  | 437 |
| 12.10.3. Пронизывают ли положительный столб ионы, рожденные в анодном слое? .....                   | 438 |
| <b>Глава 13</b>                                                                                     |     |
| <b>Неустойчивости тлеющего разряда и их последствия</b> .....                                       | 439 |
| 13.1. От чего возникают и к чему приводят неустойчивости? .....                                     | 439 |
| 13.1.1. Феноменологический признак устойчивости или неустойчивости .....                            | 439 |
| 13.1.2. Стабилизирующие и дестабилизирующие факторы .....                                           | 440 |
| 13.1.3. Продольные и поперечные неоднородности и их результаты .....                                | 441 |
| 13.1.4. Принципы анализа на устойчивость .....                                                      | 442 |
| 13.2. Квазистационарные параметры .....                                                             | 443 |
| 13.2.1. «Быстрые» и «медленные» процессы .....                                                      | 443 |
| 13.2.2. Временные масштабы различных процессов .....                                                | 443 |
| 13.2.3. Квазистационарность тока .....                                                              | 445 |
| 13.2.4. Квазистационарность электронной температуры .....                                           | 446 |
| 13.2.5. Нарушения квазистационарности $T_e$ .....                                                   | 446 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.3. Возмущения поля и электронной температуры в условиях ее квазистационарности ..... | 447 |
| 13.3.1. Потенциальность поля .....                                                      | 447 |
| 13.3.2. Поперечные неоднородности .....                                                 | 447 |
| 13.3.3. Связь продольных возмущений $T_e$ , $E$ и $n_e$ .....                           | 448 |
| 13.4. Ионизационно-перегревная неустойчивость .....                                     | 449 |
| 13.4.1. Порог и инкремент .....                                                         | 449 |
| 13.4.2. Молекулярный газ с замедленной колебательной релаксацией .....                  | 450 |
| 13.4.3. Стабилизирующее действие ионизации внешним источником .....                     | 451 |
| 13.4.4. Повышенная устойчивость разрядов в переменных полях .....                       | 452 |
| 13.5. Прилипательная неустойчивость .....                                               | 453 |
| 13.5.1. Устойчивость разряда, контролируемого прилипанием .....                         | 453 |
| 13.5.2. Механизм неустойчивости .....                                                   | 453 |
| 13.5.3. Инкремент .....                                                                 | 454 |
| 13.5.4. Домены .....                                                                    | 455 |
| 13.6. Некоторые другие часто действующие дестабилизирующие факторы .....                | 455 |
| 13.6.1. Ступенчатая ионизация .....                                                     | 455 |
| 13.6.2. Максвеллизация электронов .....                                                 | 456 |
| 13.6.3. Удары второго рода .....                                                        | 457 |
| 13.7. Страты .....                                                                      | 457 |
| 13.7.1. Наблюдения .....                                                                | 457 |
| 13.7.2. Условия возникновения .....                                                     | 459 |
| 13.7.3. Теория ионизационных волн малой амплитуды .....                                 | 460 |
| 13.7.4. Почему страты движутся .....                                                    | 462 |
| 13.7.5. Оценка скорости и частоты страт .....                                           | 463 |
| 13.7.6. Страты большой амплитуды .....                                                  | 464 |
| 13.7.7. Эксперимент и его интерпретация .....                                           | 465 |
| 13.7.8. Чем «выгодно» стратифицированное состояние? .....                               | 466 |
| 13.8. Контракция положительного столба .....                                            | 467 |
| 13.8.1. Результаты эксперимента .....                                                   | 467 |
| 13.8.2. Что необходимо для возникновения контракции .....                               | 470 |
| 13.8.3. Механизмы нелинейного рождения .....                                            | 471 |
| 13.8.4. Контракция в разряде с потоком .....                                            | 471 |
| 13.8.5. Шнур и дуга .....                                                               | 472 |

## Глава 14

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| Дуговые разряды .....                                 | 473 |
| 14.1. Определение и отличительные признаки дуги ..... | 473 |
| 14.2. Виды дуг .....                                  | 474 |
| 14.2.1. Дуга с горячим термоэмиссионным катодом ..... | 474 |



|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.2.2. Дуги с внешним накалом катода .....                                                                       | 474 |
| 14.2.3. Дуги с «холодным» катодом и катодными пятнами .....                                                       | 475 |
| 14.2.4. Вакуумная дуга .....                                                                                      | 475 |
| 14.2.5. Дуга высокого давления .....                                                                              | 475 |
| 14.2.6. Дуга сверхвысокого давления, $p \geq 10$ атм .....                                                        | 475 |
| 14.2.7. Дуги низкого давления .....                                                                               | 476 |
| 14.2.8. Особые виды .....                                                                                         | 476 |
| 14.3. Зажигание дуги .....                                                                                        | 476 |
| 14.3.1. Способы инициирования .....                                                                               | 476 |
| 14.3.2. Переход из тлеющего разряда в дуговой .....                                                               | 477 |
| 14.3.3. Кратковременное прерывание тока .....                                                                     | 477 |
| 14.3.4. Дуга переменного тока .....                                                                               | 477 |
| 14.4. Угольная дуга в свободном воздухе .....                                                                     | 478 |
| 14.5. Прикатодные процессы в дуге с горячим катодом .....                                                         | 480 |
| 14.5.1. Назначение катодного слоя .....                                                                           | 480 |
| 14.5.2. Структура катодного слоя .....                                                                            | 481 |
| 14.5.3. Поле у катода .....                                                                                       | 482 |
| 14.5.4. Баланс энергии на катоде и доля ионного тока .....                                                        | 483 |
| 14.5.5. Результаты измерений .....                                                                                | 485 |
| 14.5.6. Полный катод .....                                                                                        | 486 |
| 14.6. Катодные пятна и вакуумная дуга .....                                                                       | 486 |
| 14.6.1. Основные экспериментальные факты .....                                                                    | 487 |
| 14.6.2. Состояние теории катодных пятен .....                                                                     | 490 |
| 14.6.3. Механизм эмиссии .....                                                                                    | 491 |
| 14.6.4. Взрывная эмиссия .....                                                                                    | 493 |
| 14.7. Анодная область .....                                                                                       | 494 |
| 14.7.1. Падение потенциала .....                                                                                  | 495 |
| 14.7.2. Анод угольной дуги .....                                                                                  | 496 |
| 14.7.3. Баланс энергии .....                                                                                      | 496 |
| 14.8. Дуга низкого давления с искусственным накалом катода .....                                                  | 497 |
| 14.8.1. В чем смысл газового наполнения .....                                                                     | 497 |
| 14.8.2. Катодный слой как вакуумный промежуток с биполярным током,<br>ограниченным пространственным зарядом ..... | 498 |
| 14.8.3. Эксперимент .....                                                                                         | 500 |
| 14.9. Положительный столб дуги высокого давления<br>(экспериментальные факты) .....                               | 500 |
| 14.9.1. Стабилизация .....                                                                                        | 500 |
| 14.9.2. Степень равновесности плазмы .....                                                                        | 501 |
| 14.9.3. Радиальные распределения температуры и плотности<br>электронов .....                                      | 502 |
| 14.9.4. ВАХ .....                                                                                                 | 502 |
| 14.9.5. Излучение столба .....                                                                                    | 503 |
| 14.10. Температура плазмы и ВАХ столба дуги высокого давления .....                                               | 504 |



|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.10.1. Термическая ионизация .....                                                                                                              | 504 |
| 14.10.2. Уравнения столба равновесной плазмы .....                                                                                                | 506 |
| 14.10.3. Каналовая модель и принцип минимума мощности .....                                                                                       | 509 |
| 14.10.4. Баланс энергии в токопроводящем канале .....                                                                                             | 510 |
| 14.10.5. Количественное определение понятия канала и замыкание<br>системы уравнений канальной модели .....                                        | 511 |
| 14.10.6. Температура плазмы .....                                                                                                                 | 512 |
| 14.10.7. Закономерности столба .....                                                                                                              | 513 |
| 14.10.8. Достижение возможно более высоких температур .....                                                                                       | 515 |
| 14.11. Отрыв электронной и газовой температур в равновесной<br>плазме .....                                                                       | 515 |
| 14.11.1. Уравнение баланса энергии электронов, взаимодействующих<br>с полем и нагретым газом .....                                                | 516 |
| 14.11.2. Критерий равновесия .....                                                                                                                | 516 |
| 14.11.3. Почему при одинаковых условиях для поддержания равновесной<br>плазмы требуется меньшее поле, чем для поддержания<br>неравновесной? ..... | 517 |
| 14.11.4. Когда плазма бывает равновесной? .....                                                                                                   | 518 |

## Глава 15

### Поддержание и генерация равновесной плазмы в разрядах различных

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| частотных диапазонов .....                                                                   | 519 |
| 15.1. Введение. Баланс энергии плазмы .....                                                  | 519 |
| 15.1.1. Уравнение баланса энергии .....                                                      | 519 |
| 15.1.2. Закон сохранения полного потока энергии в стационарных<br>статических разрядах ..... | 520 |
| 15.1.3. Интеграл потоков .....                                                               | 521 |
| 15.2. Столб дуги в постоянном поле .....                                                     | 521 |
| 15.3. Высокочастотный индукционный разряд .....                                              | 522 |
| 15.3.1. Вводные замечания .....                                                              | 522 |
| 15.3.2. Уравнения разряда в длинном соленоиде .....                                          | 523 |
| 15.3.3. Индукционный нагрев материалов .....                                                 | 524 |
| 15.3.4. Модель металлического цилиндра .....                                                 | 524 |
| 15.3.5. Радиус плазменного проводника .....                                                  | 526 |
| 15.3.6. Температура плазмы .....                                                             | 526 |
| 15.3.7. Точное соотношение для температуры .....                                             | 527 |
| 15.3.8. Примеры вычислений и экспериментальные измерения .....                               | 528 |
| 15.3.9. Пороговые условия существования равновесной плазмы .....                             | 529 |
| 15.3.10. Устойчивые и неустойчивые состояния .....                                           | 530 |
| 15.4. Сверхвысокочастотные разряды .....                                                     | 531 |
| 15.4.1. Разряд в волноводе .....                                                             | 531 |
| 15.4.2. Разряд в резонаторе .....                                                            | 532 |
| 15.4.3. Поддержание плазмы плоской электромагнитной волной .....                             | 533 |
| 15.4.4. Приближенное решение .....                                                           | 534 |



|                                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.4.5. Предел геометрической оптики .....                                                                                                 | 536        |
| 15.4.6. Предел квазистационарного поля (ВЧ-разряд) .....                                                                                   | 536        |
| 15.5. Непрерывный оптический разряд .....                                                                                                  | 537        |
| 15.5.1. Особенности оптического способа поддержания плазмы .....                                                                           | 537        |
| 15.5.2. Схема экспериментов .....                                                                                                          | 538        |
| 15.5.3. Поглощение излучения $\text{CO}_2$ -лазера в плазме .....                                                                          | 539        |
| 15.5.4. Температура плазмы и пороговая мощность .....                                                                                      | 540        |
| 15.5.5. Необходимые лазерные мощности .....                                                                                                | 542        |
| 15.5.6. Почему в оптическом разряде получается необычно высокая температура .....                                                          | 542        |
| 15.5.7. Измерения температур и порогов .....                                                                                               | 543        |
| 15.5.8. Двумерные расчеты и одномерная модель .....                                                                                        | 545        |
| 15.6. Генераторы плотной низкотемпературной плазмы —<br>плазмотроны .....                                                                  | 547        |
| 15.6.1. Дуговые плазмотроны .....                                                                                                          | 547        |
| 15.6.2. ВЧ-плазмотрон .....                                                                                                                | 548        |
| 15.6.3. СВЧ-плазмотроны .....                                                                                                              | 549        |
| 15.6.4. Оптический плазмотрон .....                                                                                                        | 550        |
| 15.7. Некоторые общие черты равновесных разрядов в потоке газа .....                                                                       | 552        |
| 15.7.1. Обтекание или протекание? .....                                                                                                    | 552        |
| 15.7.2. Нормальная скорость распространения разряда .....                                                                                  | 553        |
| 15.7.3. Течение в плазмотроне .....                                                                                                        | 555        |
| 15.7.4. Распространение разрядов .....                                                                                                     | 556        |
| <b>Глава 16</b>                                                                                                                            |            |
| <b>Искровой разряд .....</b>                                                                                                               | <b>557</b> |
| 16.1. Общие представления .....                                                                                                            | 557        |
| 16.1.1. Внешняя картина. Искровой и коронный разряды .....                                                                                 | 557        |
| 16.1.2. Неприемлемость таунсендовской схемы пробоя в случае<br>высоких давлений, длинных промежутков, значительных<br>перенапряжений ..... | 559        |
| 16.1.3. Стримерная теория .....                                                                                                            | 560        |
| 16.1.4. Лидер .....                                                                                                                        | 561        |
| 16.1.5. Что считать пробоем? .....                                                                                                         | 561        |
| 16.2. Одинокная электронная лавина .....                                                                                                   | 562        |
| 16.2.1. Числа и диффузионные пространственные распределения<br>зарядов .....                                                               | 562        |
| 16.2.2. Видимые очертания лавины .....                                                                                                     | 563        |
| 16.2.3. Экспериментальное исследование лавин .....                                                                                         | 564        |
| 16.2.4. Искажение поля пространственным зарядом .....                                                                                      | 565        |
| 16.2.5. Расталкивание электронов .....                                                                                                     | 567        |
| 16.3. Понятие о стримере .....                                                                                                             | 568        |
| 16.3.1. Механизм образования катодонаправленного стримера .....                                                                            | 568        |



|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.3.2. Критерий возникновения .....                                                                 | 570 |
| 16.3.3. Анодонаправленный стример .....                                                              | 571 |
| 16.4. Пробой в электроотрицательных газах (воздухе) в недлинных промежутках с однородным полем ..... | 572 |
| 16.4.1. Пробивающие поля .....                                                                       | 572 |
| 16.4.2. Элегаз .....                                                                                 | 573 |
| 16.4.3. Размножение лавин или стример? .....                                                         | 574 |
| 16.4.4. Влияние перенапряжения на механизм пробоя .....                                              | 575 |
| 16.4.5. Влияние присутствия отрицательных ионов на образование стримера .....                        | 576 |
| 16.5. Искровой канал .....                                                                           | 576 |
| 16.5.1. Обратная волна сильного поля и ионизации .....                                               | 576 |
| 16.5.2. Расширение искрового канала .....                                                            | 577 |
| 16.6. Стримерный процесс .....                                                                       | 578 |
| 16.6.1. Ранние модели .....                                                                          | 578 |
| 16.6.2. Процесс в стримерной головке как волна ионизации .....                                       | 579 |
| 16.6.3. Оценка стримерных параметров .....                                                           | 580 |
| 16.6.4. Процессы в канале и рост стримера .....                                                      | 583 |
| 16.6.5. Среднее внешнее поле, нужное для продвижения положительного стримера .....                   | 586 |
| 16.6.6. Температура газа в стримерном канале .....                                                   | 587 |
| 16.6.7. Отрицательный стример .....                                                                  | 588 |
| 16.6.8. Взаимосвязанные разнополярные стримеры .....                                                 | 589 |
| 16.6.9. Стримерная вспышка .....                                                                     | 590 |
| 16.6.10. Возможен ли стримерный пробой? .....                                                        | 591 |
| 16.7. Пробой длинных воздушных промежутков с сильно неоднородным полем (эксперимент) .....           | 593 |
| 16.7.1. Влияние неоднородности поля на пробивные напряжения .....                                    | 593 |
| 16.7.2. Влияние полярности .....                                                                     | 595 |
| 16.7.3. О чем говорит малость средних пробивных полей? .....                                         | 596 |
| 16.7.4. Влияние скорости нарастания напряжения .....                                                 | 597 |
| 16.7.5. Сверхдлинные промежутки .....                                                                | 598 |
| 16.8. Лидерный процесс; положительный лидер .....                                                    | 598 |
| 16.8.1. Почему длинная искра не может быть простым плазменным каналом типа стримерного? .....        | 598 |
| 16.8.2. Структура положительного лидера .....                                                        | 600 |
| 16.8.3. Стримерно-лидерный переход .....                                                             | 601 |
| 16.8.4. Микроступенчатый рост и средняя скорость положительного лидера .....                         | 604 |
| 16.8.5. Некоторые данные о параметрах лидера, извлеченные из экспериментов .....                     | 605 |
| 16.8.6. Простейшая полужемпирическая модель роста лидера .....                                       | 607 |
| 16.8.7. Напряжение, нужное длинной искре, и прочность длинных промежутков .....                      | 608 |



|                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.9. Отрицательный ступенчатый лидер .....                                                                                           | 609        |
| 16.10. Обратная волна (возвратный удар) .....                                                                                         | 612        |
| 16.11. Молния .....                                                                                                                   | 615        |
| 16.11.1. Грозовое облако .....                                                                                                        | 615        |
| 16.11.2. Методы исследования .....                                                                                                    | 617        |
| 16.11.3. Ход событий .....                                                                                                            | 617        |
| 16.11.4. Как зарождается молния? .....                                                                                                | 619        |
| 16.11.5. Несхожесть первого и последующих лидеров .....                                                                               | 620        |
| 16.11.6. Возвратный удар .....                                                                                                        | 622        |
| <b>Глава 17</b>                                                                                                                       |            |
| <b>Коронный разряд .....</b>                                                                                                          | <b>624</b> |
| 17.1. Распределения поля в простейших случаях .....                                                                                   | 624        |
| 17.2. Зажигание короны .....                                                                                                          | 625        |
| 17.2.1. Критерии зажигания .....                                                                                                      | 625        |
| 17.2.2. Пороги зажигания в воздухе .....                                                                                              | 626        |
| 17.2.3. Запаздывание зажигания .....                                                                                                  | 627        |
| 17.3. Перенос тока за пределами области размножения и ВАР .....                                                                       | 628        |
| 17.4. Потери на корону в высоковольтных линиях .....                                                                                  | 629        |
| 17.5. Прерывистая корона .....                                                                                                        | 630        |
| 17.5.1. Положительное острие .....                                                                                                    | 631        |
| 17.5.2. Отрицательное острие .....                                                                                                    | 631        |
| 17.6. Нестационарная корона в естественных условиях .....                                                                             | 632        |
| 17.6.1. Коронирование высоких сооружений при грозе .....                                                                              | 632        |
| 17.6.2. Нестационарная сферическая корона .....                                                                                       | 634        |
| 17.6.3. Влияние земли .....                                                                                                           | 636        |
| 17.6.4. Предельный ток бесстримерной короны .....                                                                                     | 638        |
| 17.6.5. Замечания о влиянии короны на молнию .....                                                                                    | 639        |
| 17.7. Корона и пробой газа постоянным полем в сферическом<br>и цилиндрическом промежутках .....                                       | 639        |
| <b>Глава 18</b>                                                                                                                       |            |
| <b>Высокочастотный емкостный разряд .....</b>                                                                                         | <b>642</b> |
| 18.1. Дрейфовые качания электронного газа .....                                                                                       | 642        |
| 18.1.1. Вводные замечания .....                                                                                                       | 642        |
| 18.1.2. Распределения пространственного заряда, поля и потенциала<br>в плоском промежутке .....                                       | 643        |
| 18.2. Идеализированная модель протекания быстропеременного тока<br>через длинный плоский промежуток при повышенных<br>давлениях ..... | 645        |
| 18.2.1. Уравнения электрического процесса в безэлектродном случае .....                                                               | 645        |
| 18.2.2. Уравнения в случае оголенных электродов .....                                                                                 | 647        |
| 18.2.3. Решение для случая изолированных электродов .....                                                                             | 647        |
| 18.2.4. Вариант с оголенными электродами .....                                                                                        | 649        |



|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 18.3. ВАХ однородного положительного столба .....                                                                        | 649 |
| 18.3.1. Частота ионизации ВЧ-полем .....                                                                                 | 649 |
| 18.3.2. Пример расчета ВАХ .....                                                                                         | 650 |
| 18.3.3. Пример расчета электрических параметров безэлектродного<br>разряда .....                                         | 651 |
| 18.4. Эксперимент — о двух формах существования ВЧЕ-разрядов<br>и постоянном положительном потенциале пространства ..... | 652 |
| 18.4.1. Скачки на кривых потенциала зажигания .....                                                                      | 652 |
| 18.4.2. $\alpha$ - и $\gamma$ -разряды .....                                                                             | 653 |
| 18.4.3. Постоянный потенциал пространства в ВЧЕ-разряде низкого<br>давления .....                                        | 653 |
| 18.4.4. Слаботочный и сильноточный ( $\alpha$ и $\gamma$ ) ВЧЕ-разряды среднего<br>давления .....                        | 655 |
| 18.4.5. Область существования слаботочного разряда .....                                                                 | 659 |
| 18.4.6. Безэлектродный электродный и электродный безэлектродный<br>разряды .....                                         | 659 |
| 18.5. Электрические процессы в непроводящем приэлектродном слое<br>и механизм замыкания тока .....                       | 660 |
| 18.5.1. Что такое ток смещения .....                                                                                     | 660 |
| 18.5.2. Поле в слоях .....                                                                                               | 662 |
| 18.5.3. Заряды и токи .....                                                                                              | 663 |
| 18.5.4. Реальность и символы .....                                                                                       | 663 |
| 18.5.5. Изолированные электроды .....                                                                                    | 664 |
| 18.6. Постоянный положительный потенциал плазмы слаботочного<br>разряда .....                                            | 664 |
| 18.6.1. Определение .....                                                                                                | 664 |
| 18.6.2. Электроны совершают дрейфовые колебания, газ заряжен .....                                                       | 665 |
| 18.6.3. Влияние неоднородности распределения ионов .....                                                                 | 665 |
| 18.6.4. Дрейфовые колебания, газ электронейтрален .....                                                                  | 666 |
| 18.6.5. Низкие давления .....                                                                                            | 666 |
| 18.7. Сильноточный режим .....                                                                                           | 667 |
| 18.7.1. Общее со слаботочным .....                                                                                       | 667 |
| 18.7.2. Сущность отличия .....                                                                                           | 668 |
| 18.7.3. Вторичное зажигание .....                                                                                        | 669 |
| 18.7.4. Плотность тока .....                                                                                             | 670 |
| 18.7.5. Простейшая модель функционирования «катодных» слоев .....                                                        | 671 |
| 18.7.6. Контракция разряда и условия ее отсутствия .....                                                                 | 673 |
| 18.8. Структура разряда среднего давления по результатам численного<br>моделирования .....                               | 674 |
| 18.8.1. Уравнения .....                                                                                                  | 674 |
| 18.8.2. Результаты .....                                                                                                 | 675 |
| 18.8.3. Отрицательное свечение и темное фарадеево пространство .....                                                     | 679 |
| 18.9. Нормальная плотность тока в слаботочном режиме и пределы<br>его существования .....                                | 680 |
| 18.9.1. Физическая причина .....                                                                                         | 680 |



|                                                                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.9.2. О роли нагрева газа и расширении области существования<br>слаботочного режима .....                                             | 680        |
| 18.9.3. Замечание о ВЧЕ-разрядах низкого давления .....                                                                                 | 681        |
| <b>18.10. Диэлектрический барьерный разряд .....</b>                                                                                    | <b>681</b> |
| 18.10.1. Плазменный дисплей .....                                                                                                       | 682        |
| 18.10.2. Индивидуальный разрядный импульс .....                                                                                         | 684        |
| 18.10.3. Периодический разрядный процесс. Оптимальный режим .....                                                                       | 685        |
| 18.10.4. Общий случай частичного уничтожения поля .....                                                                                 | 689        |
| 18.10.5. «Вольт-кулонные» характеристики .....                                                                                          | 689        |
| 18.10.6. Анализ периодического режима на устойчивость .....                                                                             | 690        |
| 18.10.7. Области устойчивых состояний на фактических характеристиках<br>и диапазон допустимых рабочих напряжений .....                  | 692        |
| 18.10.8. Барьерный разряд таунсендовского типа .....                                                                                    | 694        |
| 18.10.9. «Копланарная» схема .....                                                                                                      | 696        |
| <b>Глава 19</b>                                                                                                                         |            |
| <b>Разряды в мощных <math>\text{CO}_2</math>-лазерах непрерывного действия .....</b>                                                    | <b>698</b> |
| 19.1. Принцип работы электроразрядного лазера на $\text{CO}_2$ .....                                                                    | 698        |
| 19.1.1. Лазерный переход в молекуле $\text{CO}_2$ .....                                                                                 | 698        |
| 19.1.2. Механизм создания инверсной заселенности .....                                                                                  | 699        |
| 19.1.3. Недопустимость сильного нагрева .....                                                                                           | 700        |
| 19.1.4. Лазерная смесь .....                                                                                                            | 700        |
| 19.2. Два типа лазеров, различающихся способом теплоотвода .....                                                                        | 701        |
| 19.2.1. Лазеры с диффузионным охлаждением .....                                                                                         | 701        |
| 19.2.2. Быстропроточные лазеры с конвективным охлаждением .....                                                                         | 703        |
| 19.3. Способы борьбы с неустойчивостями .....                                                                                           | 704        |
| 19.3.1. Задача достижения принципиального предела по энерговыкладу .....                                                                | 704        |
| 19.3.2. Секционирование катода .....                                                                                                    | 705        |
| 19.3.3. Управление потоком .....                                                                                                        | 706        |
| 19.3.4. Применение несамостоятельного разряда .....                                                                                     | 707        |
| 19.4. Пути организации разряда в больших объемах с протоком газа .....                                                                  | 708        |
| 19.4.1. Поперечный самостоятельный разряд .....                                                                                         | 708        |
| 19.4.2. Продольный самостоятельный разряд .....                                                                                         | 709        |
| 19.4.3. Несамостоятельный разряд с ионизацией электронным пучком .....                                                                  | 709        |
| 19.4.4. Комбинированный разряд с постоянным и ВЧ-полем .....                                                                            | 710        |
| 19.4.5. Несамостоятельный разряд с ионизацией газа повторяющимися<br>емкостными импульсами .....                                        | 711        |
| 19.4.6. Разряд переменного тока .....                                                                                                   | 713        |
| 19.4.7. Самостоятельный высокочастотный емкостный разряд .....                                                                          | 714        |
| <b>Дополнение .....</b>                                                                                                                 | <b>716</b> |
| <b>Принцип работы магнитогидродинамического генератора .....</b>                                                                        | <b>716</b> |
| <b>Приложение .....</b>                                                                                                                 | <b>718</b> |
| Некоторые константы, формулы, соотношения между единицами, часто<br>встречающиеся и часто употребляемые в физике газового разряда ..... | 718        |
| <b>Список литературы .....</b>                                                                                                          | <b>725</b> |