

**Пояснительная записка**  
к курсу «Вакуумная и плазменная электроника»

1. Целью курса является знакомство студентов с основами современной вакуумной и плазменной электроники. Это обусловлено интенсивным использованием ее методов в современных технологиях производства микроэлектронных приборов, а также фундаментальным физическим характером изучаемых в курсе процессов. Курс является, по существу, междисциплинарным, интегрируя элементы физики твердого тела, квантовой физики, электродинамики, физики плазмы и магнитной гидродинамики. Изучаемый здесь материал может затем использоваться в дисциплинах технологического цикла (например, раздел «Источники плазменных потоков»), или в других специализированных курсах (например, раздел «Сильноионизованная плазма»). В построении самой дисциплины автор старался использовать фундаментальные физические представления, сведя к минимуму использование эмпирического материала, который широко используется при традиционном подходе.

**Вакуумная электроника**

1. Эмиссия заряженных частиц из поверхности твердого тела.
  - 1.1. Основы электронной теории твердого тела.
  - 1.2. Природа сил, препятствующих выходу электронов из катода. Потенциальный барьер. Работа выхода.
  - 1.3. Термоэлектронная эмиссия: основной закон (формула Ричардсона – Дэшмана), эффект Шоттки, дробовой эффект.
  - 1.4. Автоэлектронная эмиссия: основной закон (формула Фаулера-Нордгейма), условия его реализации.
  - 1.5. Вторично-электронная и фотоэлектронная эмиссия: основные характеристики, области применения.
  - 1.6. Взрывная эмиссия, характеристики микровыступов на поверхности катода, вакуумный пробой, переход от АЭЭ к ВЭ.
2. Движение электронного потока в вакууме.
  - 2.1. Движение заряженных частиц в однородном электрическом и магнитном полях. Виды траекторий, дрейф в скрещенных полях.
  - 2.2. Отклонение и фокусировка потока заряженных частиц в однородных полях. Электрические и магнитные линзы, основные параметры, построение изображения, матричная техника.
  - 2.3. Электронный пучок, ограниченный объемным зарядом (закон Чайльда – Ленгмюра).
  - 2.4. Формирование неинтенсивных электронных пучков: принципы, электростатические электронные линзы и прожекторы.
  - 2.5. Формирование интенсивных электронных пучков. Метод прямолинейной оптики. Пушки Пирса. Распределение потенциала в пучке. Виртуальный катод, условие возникновения, влияние на параметры пучка.
  - 2.6. Динамическое управление электронным потоком, фазовая фокусировка.
  - 2.7. Преобразование энергии электронного пучка в электромагнитное излучение. Типы преобразующих устройств. Устройства на объемных резонаторах. СВЧ- генерация, приборы вакуумной СВЧ электроники: магнетрон, клистрон.

**Плазменная электроника**

3. Ионизованный газ и плазма. Основные понятия
  - 3.1. Квазинейтральность, дебаевское экранирование, степень ионизации, уравнение ионизационного равновесия (формула Саха).
  - 3.2. Элементарные процессы в плазме: кулоновские столкновения, возбуждение и ионизация атомов, упругие и неупругие столкновения, каналы энергопотерь.
  - 3.3. Движение заряженных частиц в неоднородном магнитном поле. Дрейфовое приближение, виды дрейфа. Пример дрейфа: пробочная ловушка.
4. Газовые разряды.

- 4.1. Возникновение самостоятельного газового разряда: теория Таунсенда, критерий пробоя, кривые Пашена, вакуумный пробой, искровой пробой.
- 4.2. Тлеющий разряд в условиях правой ветви кривой Пашена: прикатодная область, положительный столб. ВЧ- разряд.
- 4.3. Явления переноса в тлеющем разряде: проводимость слабоионизованной плазмы, диффузия, амбиполярная диффузия и подвижность заряженных частиц, электронная теплопроводность.
5. Сильноионизованная плазма.
  - 5.1. Плазма в магнитном поле. Закон Ома в магнитном поле, основные уравнения магнитной гидродинамики. Простейшие случаи решения МГД уравнений.
  - 5.2. Кинетическое описание плазмы: функция распределения, кинетическое уравнение, учет столкновений, переход к гидродинамике.
  - 5.3. Колебания и неустойчивости плазмы. Дисперсионные уравнения ленгмюровских, ионно-звуковых, электромагнитных колебаний. Падение электромагнитной волны на границу плазма-вакуум. Типы простейших неустойчивостей: пучковая, токовая.
  - 5.4. Излучение плазмы: тормозное, рекомбинационное, линейчатое. Простейшие излучательные модели.
6. Источники плазменных потоков.
  - 6.1. Ускорители с замкнутым дрейфом электронов: механизм ускорения, основные параметры, приложения.
  - 6.2. Вакуумно-дуговые ускорители металлической плазмы: механизм ускорения, основные параметры, приложения.
  - 6.3. Магнетронный разряд: механизм генерации, параметры потока.

### Литература

1. Гапонов В.И. Электроника, Часть I, М.:ГИФМЛ, 1960 г, 517 с.
2. Смирнов Б.М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1982, 224 с.
3. Швилкин Б. Н. Сборник задач по физике плазмы. М.: Высшая школа, 1985, 104 с.
4. Ионные инжекторы и плазменные ускорители. Под ред. А.И. Морозова и Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990, 226 с.
5. Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга, М.: Наука, 2000.
6. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ-электронике для физиков в 2 т.-М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003 – 496 с.

### Вопросы

по курсу «Вакуумная и плазменная электроника»

1. Элементы зонной теории твердых тел. Понятие о валентной зоне и зоне проводимости. Динамика электронов в кристалле. Закон дисперсии, эффективная электронная масса.
2. Поверхностный потенциальный барьер. Зависимость энергии электрона от координаты вблизи поверхности кристалла.
3. Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона-Дэшмэна. Распределение термоэлектронов по энергиям. Зависимость тока термоэмиссии от задерживающего потенциала.
4. Термоэлектронная эмиссия с ускоряющим полем. Эффект Шоттки.
5. Автоэлектронная эмиссия. Модель потенциального барьера. Зависимость тока эмиссии от электрического поля.
6. Фотоэлектронная эмиссия. Спектральная зависимость фототока.

7. Вторичная электронная эмиссия. Энергетический спектр вторичных электронов. Качественная теория ВЭЭ. Взрывная эмиссия, качественная теория.
8. Появление и исчезновение заряженных частиц в газовом разряде. Упругие и неупругие столкновения частиц, каналы неупругих потерь. Ионизация и рекомбинация. Ионизационное равновесие, формула Саха. Закон Ома и отклонения от него.
9. Виды газовых разрядов: дуга, тлеющий разряд, корональный разряд. Самостоятельный и несамостоятельный разряды. Условие самоподдержания разряда. Кривая Пашена. Структура тлеющего разряда.
10. Токоперенос в вакууме. Ограничение тока объемным зарядом. Закон Чайлда-Ленгмюра («закон  $3/2$ »).
11. Параллельный пучок электронов в вакууме. Виртуальный катод.
12. Пространственный заряд в электронных пучках. Расширение пучка под действием объемного заряда. Фокусировка пучка электродами. Пушка Пирса.