

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Изучение токопереноса в вакуумном диоде

Вакуумный диод является простейшим электронным прибором и обычно представляет собой коаксиальные цилиндрические электроды: накаливаемый катод и анод, помещенные в вакуумную колбу. Катод при нагревании эмитирует электроны, которые движутся к аноду при подаче на него положительного напряжения, таким образом возникает анодный ток I_a . Эмитированные катодом электроны движутся в вакуумном промежутке, где, в отличие от других сред, они не сталкиваются с тяжелыми частицами, т.е. отсутствуют силы трения, препятствующие свободному движению электронов. Однако, как показывает опыт, если к аноду приложить ускоряющее электроны, положительное напряжение U_a , то анодный ток I не возрастает скачком до максимального значения I_m , а плавно нарастает от нуля до I_m . После этого рост тока прекращается, т.е. на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диода $I_a(U_a)$ наблюдаются участки роста и насыщения. Токи на этих участках определяются разными физическими механизмами, которые изучаются в данной работе.

1. Изучение токопереноса в вакуумном промежутке

1.1. Краткая теория

Рассмотрим сначала растущую часть ВАХ. Для простоты считаем электроды плоскими и достаточно большими, чтобы можно было пренебречь краевыми эффектами. Тогда, в отсутствие тока, т.е. зарядов в межэлектродном промежутке, потенциал j растет линейно от катода к аноду

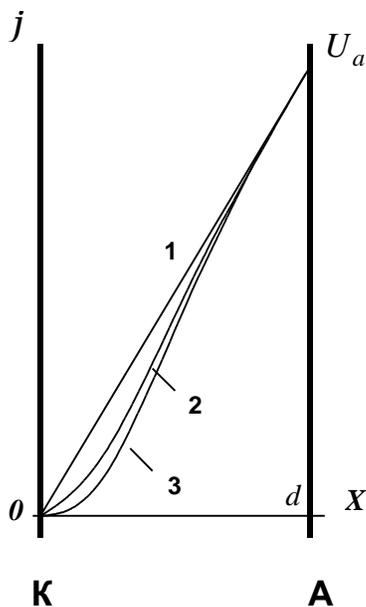


Рис.1

(прямая 1 на рис.1). Вследствие термоэмиссии электроны с поверхности катода попадают в межэлектродный промежуток, где возникает объемный заряд электронов плотностью r . Согласно уравнению Пуассона

$$-\nabla^2 j = -r/e_0, \quad (1)$$

(e_0 - электрическая постоянная) этот заряд создает распределение потенциала, которое искажает исходное распределение в отсутствие тока (кривая 2 на рис.1). С увеличением тока эмиссии возрастает объемный заряд и поле искажается сильнее (кривая 3 на рис. 2). Таким образом, эмитированные катодом электроны движутся в суммарном электрическом поле задаваемом электродами и собственным

объемным зарядом электронов, которое определяется уравнением (1) и ограничивает величину тока, протекающего через диод.

Пренебрежем тепловым разбросом эмитированных электронов, т.е. полагаем, что все электроны движутся с одинаковой токовой скоростью u от катода к аноду. Мы рассматриваем стационарную задачу, т.е. распределение поля и заряда не меняется со временем ($dr/dt = 0$), поэтому в силу уравнения непрерывности

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0,$$

$dj/dx = 0$, т.е. $j = enu = ru = \text{const}$ по оси X . Поскольку электроны все время движутся в ускоряющем поле, их скорость возрастает, а плотность, вследствие сохранения j – падает. Следовательно, поле электродов искажается, в основном, вблизи катода, где поле объемного заряда является основным, причем с увеличением потенциала анода, область влияния заряда уменьшается, а ток возрастает. Найдем распределение потенциала в межэлектродном промежутке, определяемое пространственным зарядом согласно уравнению (1), которое преобразуем следующим образом:

$$\frac{d^2 j}{dx^2} = \frac{r}{e_0} = \frac{j}{ue_0} = \frac{j}{(2ej/m)^{1/2} e_0} = Ajj^{-1/2}, \quad (2)$$

где введено обозначение $A = (2e/m)^{-1/2} e_0^{-1}$. Граничные условия для уравнения (2) выберем следующим образом:

$$\begin{aligned} j(x=0) &= 0, \\ \frac{dj}{dx}(x=0) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Первое граничное условие – очевидно, второе условие определяется тем, что в пренебрежении тепловым разбросом скоростей эмитированных катодом электронов, при $\frac{dj}{dx}(x=0) > 0$ они все попадают на анод независимо от U_a ,

а при $\frac{dj}{dx}(x=0) < 0$ – все возвращаются на катод тормозящим полем опять-таки независимо от U_a . Оба этих результата противоречат опыту, поэтому остается предположить вид (3) граничных условий задачи. В реальных условиях второе граничное условие (3) выполняется при $x \leq 0.1$ мм, таким образом являясь хорошим приближением. Дважды интегрируя уравнение (2) с граничными условиями (3), получаем

$$j = \frac{4}{9} e_0 \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{j^{3/2}}{x^2}. \quad (4)$$

Если расстояние между электродами равно d , а напряжение - U_a , то формула (4) примет вид

$$j = \frac{4}{9} e_0 \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{U^{3/2}}{d^2}. \quad (4')$$

Выражение (4') носит название закона Ленгмюра (закон «трех вторых») и связывает плотность тока и анодное напряжение диода при заданном расстоянии между электродами d . Как правило, электроды вакуумного диода имеют не плоскую, а цилиндрическую форму, в этом случае формула (4') сохраняет свой вид, лишь производится замена: Γ U , где r_a и r_k – радиусы анода и катода, соответственно, а функция $b(r_a/r_k)$ зависит только от отношения радиусов, обычно задается графиком, и при $r_a/r_k > 6$ с хорошей точностью можно полагать $b \approx 1$. В эксперименте наблюдаются отклонения от закона Ленгмюра как при малых, так и при больших значениях U_a . В первом случае они связаны с влиянием начальных тепловых скоростей электронов, а также с наличием потенциала, распределенного вдоль катода, вследствие приложенного к его концам напряжения накала. Во втором случае отклонения от закона Ленгмюра связаны с переходом к участку насыщения ВАХ. Таким образом, ток на растущей части ВАХ диода определяется действием объемного заряда электронов и заведомо меньше тока термоэлектронной эмиссии катода.

1.2. Экспериментальная часть

1. Собрать установку, изображенную на рис.2.
2. Установить напряжение накала $U_n = 2.15$ В, снять ВАХ диода до области насыщения. Область малых анодных токов снимать с шагом 0.5 В, больших – с шагом 1 В.
3. Установить напряжение накала 2.5 В, 4 В и выполнить те же операции.
4. Построить ВАХ диода $I(U_a)$ для всех случаев, затем, на отдельном графике – начальный, нелинейный, участок ВАХ в координатах $I(U_a^{3/2})$.
5. Аппроксимировать графики $I(U_a^{3/2})$ линейным трендом. По формуле (4') найти отношение e/m для всех случаев, сравнить с табличными данными. При расчетах принять длину центральной части катодной нити, откуда происходит основная эмиссия, равной 8 см; радиус катода $r_k \approx 0.4$ мм, радиус анода $r_a \approx 2.5$ мм.

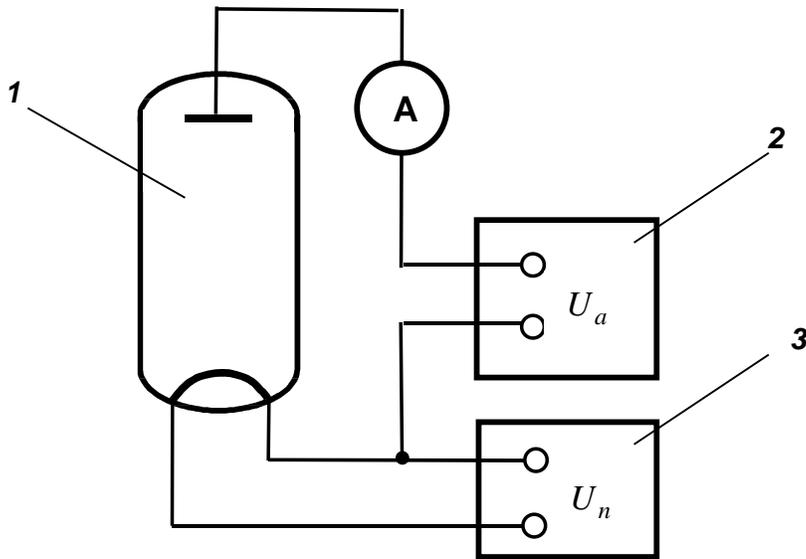


Рис.2. 1- вакуумный диод 2Ц3С, 2- источник анодного напряжения Б5-44, 3- источник накального напряжения УИП-1

1.3. Вопросы и задания

1. С помощью формулы (4) убедитесь в том, что плотность объемного заряда действительно падает с удалением от катода.
2. Почему для малых напряжений накала анодный ток близок к нулю при $U_a = 0$, а для $U_n = 4$ В анодный ток при этом условии имеет заметную величину?
3. Каковы возможные причины различия экспериментальных и табличного значений отношения e/m ?
4. Нарисуйте качественный график $j(x)$, предполагая, что электроны эмитируются катодом с тепловым разбросом скоростей. Как меняется график при увеличении тока эмиссии?

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. Токотенос 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.