

**Лабораторная работа № 64**  
**Изучение вакуумного диода и определение удельного заряда**  
**электрона**

**Цель работы:** исследование вольтамперных характеристик вакуумного диода и определение удельного заряда электрона  $e/m$  двумя методами. Первый метод основан на использовании уравнения Богуславского-Лэнгмюра (закон «трех вторых»). Во втором методе, так называемом «методе магнетрона», рассматривается движение электронов в пересекающихся однородном магнитном и радиальном электрическом полях.

В вакуумной электронной лампе электрическое поле, действующее на каждый электрон, складывается из внешнего поля, создаваемого разностью потенциалов между электродами, и поля создаваемого всеми остальными электронами, образующими пространственный заряд. Благодаря пространственному заряду, при малых анодных напряжениях анодный ток может быть значительно меньше возможного тока эмиссии катода и постепенно увеличивается при повышении анодного напряжения.

Теоретическое рассмотрение вопроса о зависимости анодного тока от величины анодного напряжения в вакуумном диоде было проведено при следующих допущениях:

- 1) начальные скорости электронов, эмитируемых катод, настолько малы, что можно считать их равными нулю. Так как энергии электронов, покидающих катод, не превышают нескольких десятых электрон-вольта, при анодных напряжениях в десятки вольт это допущение вполне оправдано;
- 2) анодный ток далек от насыщения;
- 3) пространственный заряд создает такое распределение потенциала между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля равно нулю.

При указанных предположениях расчет показывает, что анодный ток  $i_a$  пропорционален анодному напряжению в степени три вторых:

$$i_a = k \cdot U^{3/2} \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, заряда и массы электрона.

В случае коаксиальных цилиндрических электродов выражение (1), называемое *законом трех вторых* или *уравнением Богуславского-Лэнгмюра*, имеет вид

$$i_a = \frac{2\sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{\mathbf{l} \cdot U_a^{3/2}}{r \cdot b^2}, \quad (2)$$

где  $\frac{e}{m}$  - удельный заряд электрона;

$r$  - радиус анода;

$\mathbf{l}$  - длина катода;

$b^2$  - коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода (при отношении радиусов больше 10 близок к единице).

Так как в настоящей работе по вольтамперным характеристикам диода определяется удельный заряд электрона, удобно строить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых. Угловой коэффициент полученной прямой в случае коаксиальных цилиндрических электродов равен

$$k = \frac{2\sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{\mathbf{l}}{r \cdot b^2} \quad (3)$$

Отсюда можно рассчитать удельный заряд электрона  $e/m$ :

$$\frac{e}{m} = \left( \frac{9 \cdot r \cdot b^2}{2\sqrt{2} \cdot \mathbf{l}} k \right)^2 \quad (4)$$

Чтобы получить значение удельного заряда электрона в системе СГСЕ при расчете углового коэффициента прямой  $k$ , необходимо выразить ток и напряжение в этой же системе единиц (напряжение  $1B = \frac{1}{300} \text{ СГСЕ}$ , ток  $1A = 3 \cdot 10^9 \text{ СГСЕ}$ ).

Из факторов, приводящих к отклонениям от закона трех вторых, наиболее существенными являются следующие:

1. начальные скорости электронов, эмитируемых катодом. За счет этого изменяется характер распределения потенциала между электродами; в частности, напряженность электрического поля поверхности катода не равняется нулю;

2. контактная разность потенциалов между катодом и анодом, так как в уравнении (1) или (2) под напряжением  $U_a$  подразумевается истинная величина разности потенциалов между электродами. Влияние контактной разности потенциалов наиболее заметно при малых анодных напряжениях;

3. неэквипотенциальность катода (в случае катодов прямого накала). В этом случае разность потенциалов между анодом и различными участками катода оказывается разной. Этот фактор также является существенным при малых анодных напряжениях;

4. асимметрия системы электродов (например, неконцентричность катода и анода);

5. наличие остатков газа в лампе. При достаточно высоких анодных напряжениях происходит ионизация газа. Положительные ионы нейтрализуют действие отрицательного пространственного заряда, а анодный ток возрастает значительно быстрее, чем следует из закона трех вторых.

Перечисленные выше факторы приводят к заметным отклонениям от закона трех вторых и погрешности при определении удельного заряда электрона по формуле (4). Существенно и то обстоятельство, что величина удельного заряда электрона входит в выражение закона трех вторых (2) под знаком квадратного корня. Поэтому при расчете удельного заряда электрона по формуле (4) погрешность соответственно увеличивается.

При снятии вольтамперных характеристик вакуумного диода при различных токах накала получается семейство характеристик, несколько различных даже при низких анодных напряжениях. Это связано с тем, что при изменении температуры катода контактная разность потенциалов между катодом и анодом и начальные скорости электронов изменяются.

В настоящей работе используется лампа с подогреваемым оксидным катодом. Оксидный катод отличается той особенностью, что у него не наблюдается резко выраженного, как у катодов из чистых металлов, насыщения анодного тока. Это вызвано сильным влиянием внешнего электрического поля на величину тока эмиссии оксидного катода. Поэтому даже при значительных внешних полях при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток продолжает возрастать.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 1.

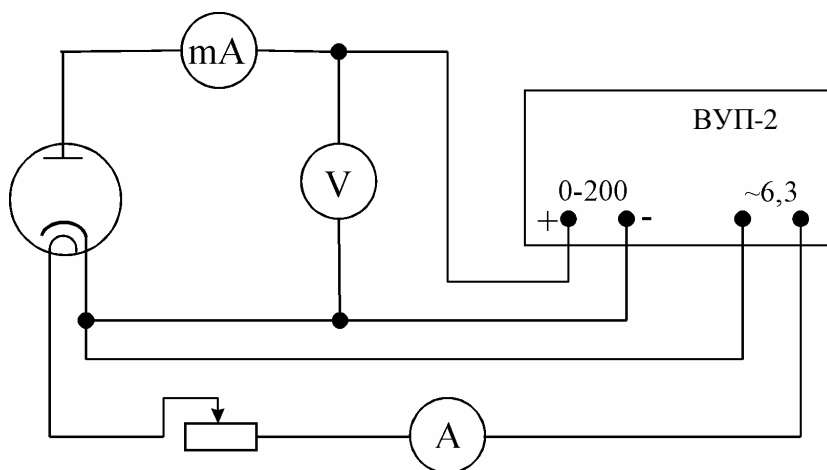


Рис. 1

В работе используется радиолампа типа 2Ц2С (диод). Анодное напряжение подается или через кенотронный выпрямитель, или от сети постоянного тока. Величина напряжения регулируется потенциометром и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется миллиамперметром.. Напряжение накала подается от понижающей обмотки трансформатора выпрямителя. Ток накала регулируется реостатом и измеряется амперметром.

Данные радиолампы типа 2Ц2С: длина катода  $l = 0,9\text{см}$  , радиус анода  $r = 0,95\text{см}$  , отношение радиусов анода и катода приблизительно равно 10, так что  $b^2 = 0,98$ .

### ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 1.
2. Изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя напряжение от 0 до 200 вольт, 15-20 измерений, при токах накала  $1,5A$  ;  $1,6A$  ;  $1,75A$  . Результаты необходимо занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Ток накала	$U_a, \text{В}$	$i_a, \text{А}$	$U^{3/2}$	$k$	$\frac{e}{m}$	$\frac{e}{m} \text{ср}$
1,5A	0					
	10					
	...					
	200					
1,6A	0					
	10					
	...					
	200					
1,75A	0					
	10					
	...					
	200					

3. Построить в одной системе координат зависимость анодного тока и анодного напряжения при различных токах накала.
4. Построить в одной системе координат зависимость анодного тока от анодного напряжения в степени трех вторых. При построении данной зависимости рекомендуется использовать экспе-

риментальные данные, относящиеся к меньшим температурам катода (но в области, где закон трех вторых еще выполняется).

5. Определить угловой коэффициент полученной прямой и рассчитать по нему величину удельного заряда в системе единиц СГСЕ.

6. Сравнить экспериментальное значение удельного значения с табличным значением в системе единиц СГСЕ и оценить точность полученного значения.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Важнейшими характеристиками электрона являются его заряд и масса. При движении электрона в электрических и магнитных полях траектория электрона определяется конфигурацией этих полей и отношением заряда электрона к его массе.

Если структура электрического или магнитного поля задана и из опыта известна траектория электрона в этом поле, то значение

$\frac{e}{m}$  может быть найдено. На этом соображении основаны теперь

многочисленные методы определения отношения заряда к массе для электрона. Впервые этот прием был использован в так называемом методе парабол, когда изучалось отклонение от первоначального направления электронного пучка, пролетающего поперек однородного электрического поля плоского конденсатора. Аналогичные способы определения применяются и в случае ионов и других частиц.

Одним из важнейших вариантов этих методов является метод магнетрона, в котором используется отклонение движущегося электрона магнитным полем. Последнее, как известно, действует на движущийся заряд с силой

$$\vec{F} = \frac{e}{c} [\vec{J} \times \vec{H}] \quad (\text{СГСЕ}), \text{ где } c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$$
$$\vec{F} = e [\vec{J} \times \vec{B}] \quad (\text{СИ})$$

всегда нормальной к направлению скорости движения электрона.

Сущность метода магнетрона заключается в том, что электронная лампа с коаксиальными цилиндрическими анодом и катодом помещается в аксиальное магнитное поле. Поле создается питаемым постоянным током соленоида (схема питания соленоида на рис. 2). Этот соленоид надевается на баллон электронной лампы, и направление напряженности магнитного поля совпадает с осью симметрии лампы, вдоль которой расположен подогреваемый катод.

При таком расположении катода и цилиндрического анода лампы электроны, вылетающие с поверхности катода, в отсутствие магнитного поля движутся на анод прямо по радиусам. После включения постоянного тока в соленоиде его магнитное поле начнет действовать на электроны и отклонять их перпендикулярно к направлению вектора скорости электронов в каждый данный момент времени.

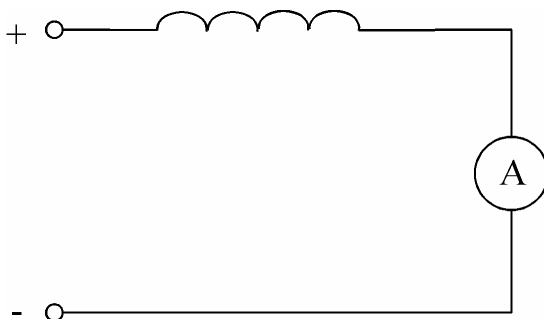


Рис. 2

Под действием отклоняющей силы движение электронов приобретает более сложный характер, и их траектория станет криволинейной; кривая будет начинаться на катоде и кончаться на аноде лампы. При определенном соотношении между их скоростью  $J$  и значением вектора  $\vec{H}$  электроны совсем перестанут достигать анода и анодный ток в лампе прекратится.

Электроны образуют в лампе объемный отрицательный заряд, который будет двигаться в пространстве между катодом и

анодом, но сила анодного тока будет равна нулю. В этом проявится эффект отклоняющего действия магнитного поля на радиально летевшие электроны.

Эксперимент по определению  $\frac{e}{m}$  этим методом заключается в том, что в лампе магнетрона устанавливается постоянное напряжение накала и постоянная разность потенциалов между катодом и анодом, т.е. создаются условия для постоянства анодного тока. Затем, изменяя от нуля значение силы тока в соленоиде и тем самым увеличивая напряженность аксиального магнитного поля, добиваются прекращения анодного тока в лампе. Зная геометрию магнетрона, т.е. радиусы его цилиндрических катодов и анода, величину примененного анодного напряжения и напряженность критического магнитного поля, при котором прекратился анодный ток, можно найти и величину отношения  $\frac{e}{m}$ .

Если произвести расчет движения электрона в этих условиях, то окажется, что величину  $\frac{e}{m}$  можно представить так:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{b^2 \cdot B_k^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2} \quad (5)$$

где  $U_a$  - величина анодного напряжения в лампе;

$B_k$  - критическое значение магнитной индукции магнитного поля;

$a$  - радиус катода;

$b$  - радиус анода.

По этой формуле и найденным из опыта значения  $U_a$  и  $B_k$  вычисляется величина  $\frac{e}{m}$  в настоящей работе.

Характерной особенностью метода является то, что он исключает необходимость изучения траектории электрона в магнитном поле. Наоборот, изменением величины  $H$  (а следовательно, и



$B$ ) при заданном  $U_a$  достигается наперед заданная траектория электронов, при котором они могут попасть на анод лампы, вопреки действию электрического поля. Таким образом, опыт сводится к снятию так называемой сбросовой характеристики лампы, т.е. к снятию зависимости  $i_a$  при ( $U_a = const$ ) от  $B$ . Резкий спад над кривой (резкое уменьшение анодного тока лампы) соответствует искомым критическим условиям работы магнетрона.

### ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Измерения сводятся к установлению фиксированного напряжения на аноде лампы и определенного тока накала 1,75А и к изменению силы тока в соленоиде впредь до падения анодного тока. Схема включения диода представлена на рис.1. Схема питания соленоида изображена на рис. 2. Результаты необходимо занести в таблицу 2.

Таблица 2.

$U_a, В$	$i_c, А$	$i_a, А$	$B, Вб$
15В	0,05		
	0,1		
	...		
	0,5		
20В	0,05		
	0,1		
	...		
	0,5		
25В	0,05		
	0,1		
	...		
	0,5		

Индукция магнитного поля, если известно число витков на единицу длины  $n = \frac{N}{l}$  в обмотке соленоида, легко может быть вычислена по величине питающего соленоида постоянного тока:

$$B = 0,24 \cdot m_0 \cdot n \cdot i_c = 0,24 \cdot m_0 \cdot H ,$$

где  $m_0 = 4 \cdot p \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная.

Критическое значение индукции магнитного поля находится для нескольких значений анодного напряжения лампы  $15B$ ,  $20B$  и  $25B$ , в результате чего получается семейство сбросовых характеристик. Необходимо построить зависимость тока магнетрона от индукции магнитного поля, для того, что определить из графика  $B_k$ .

Надо иметь в виду, что зависимость тока магнетрона от индукции магнитного поля в действительности имеет вид, изображенный на рис. 3.

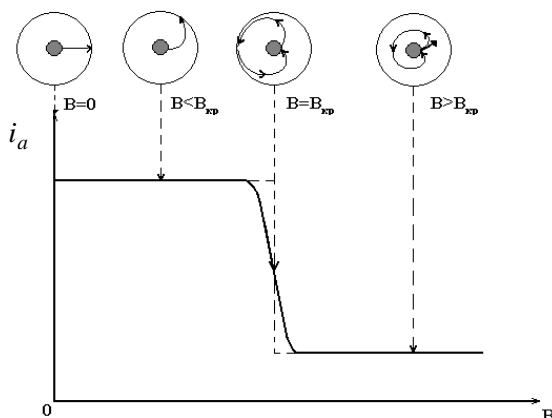


Рис.3 Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля.

При  $B < B_k$  ток остается строго постоянным. Однако при  $B = B_k$  вместо резкого обрыва тока наблюдается более или менее размытый спад кривой. Это объясняется различного рода несовершенствами устройства магнетронов и условий опыта. Сюда относятся: неточная коаксиальность катода и анода, краевые эффекты, наличие остатков газа внутри прибора, падение напряже-

ния вдоль катода и др. Наиболее правильно брать значение  $B_k$  из верхней части участка крутого спада сбросовой характеристики.

Работа ведется с лампой 2Ц2С: радиус катода  $a = 0,9 \text{ мм}$ , радиус анода  $b = 9,6 \text{ мм}$ .

Соленоид питается током от регулятора напряжения с приставкой. **Внимание:** ток на соленоиде не должен превышать  $0,5 \text{ А}$ .

Зная критическое значение индукции магнитного поля, а также значения фиксированного напряжения на аноде лампы по формуле (5) определить удельный заряд электрона в системе СИ.

Сравнить экспериментальное значение удельного значения с табличным значением в системе единиц СИ и оценить точность полученного значения.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулировать закон «трех вторых». При каких условиях он выполняется?
2. Почему ток диода должен быть далек от насыщения?
3. Как объемный заряд влияет на распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом?
4. Как найти индукцию магнитного поля в соленоиде?
5. Каково распределение электрического и магнитного полей в диоде, помещенном внутри соленоида?
6. Какие траектории описывает электрон при различных индукциях магнитного поля?
7. Чему равно отношение  $\frac{e}{m}$  в системе единиц СИ и СГСЕ?
8. Что такое критическая индукция и как ее определить?
9. Как будет выглядеть характеристика магнетрона, если снять зависимость  $i_a = f(U_a)$  при постоянном магнитном поле?
10. Как изменится характеристика магнетрона  $i_a = f(B)$  при постоянном анодном напряжении, если увеличить ток накала?
11. Оцените (приблизительно) сколько времени движется электрон от катода к аноду?

## **Литература**

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Калашников С.Г. Электричество. М. Физматлит, 2004. – 276 с.
2. Тамм И. Е. Основы теории электричества.- М. : Наука , 1989.- 504с.
3. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. Учеб. пособие для студ. вузов.- М. : ОНИКС 21 век: Мир и Образование , 2005.- 463с
4. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Электричество. : учеб. пособие для студ. физических спец. вузов- 4-е изд., стереотип.- М. : Физматлит: МФТИ , 2002.- 656с.
5. И.Е. Иродов. Электромагнетизм. Основные законы. М., ЛБЗ, 2001.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Савельев И.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. учеб. пособие для вузов- М. : Астрель : АСТ , 2003.- 336с
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, вып. 5,6. Электричество и магнетизм. М., Мир, 1966.