

Работа 2.08

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Задача

1. Снять зависимость электронного тока через вакуумный диод от индукции магнитного поля при нескольких значениях анодного напряжения.
2. По данным п.1 вычислить удельный заряд электрона и сопоставить результат с табличным значением.

Введение

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует магнитная сила*

$$\vec{F}_M = e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (1)$$

Здесь e - заряд электрона; \vec{v} - его скорость; \vec{B} - индукция магнитного поля. Так как магнитная сила перпендикулярна скорости, она не меняет модуля этой скорости, изменяя только направление движения электрона. Для случая магнитного поля, перпендикулярного скорости электрона, формула (1) упрощается:

$$F_M = e \cdot v \cdot B. \quad (2)$$

Если, кроме того, магнитное поле однородно, то магнитная (она же центростремительная) сила остается постоянной по модулю, и электрон движется по окружности. Радиус этой окружности ρ легко найти из равенства*

$$\frac{mv^2}{\rho} = evB, \quad (3)$$

где m - масса электрона.

Для электрона, ускоренного в электрическом поле разностью потенциалов U , скорость v можно вычислить из баланса кинетической и потенциальной энергий

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (4)$$

* [3 с.177-178; 381-383], [4, с.122-124; 208-210].

Формула (4) верна, если ускоряющее напряжение U достаточно велико, чтобы можно было пренебречь начальной (до ускорения) кинетической энергией электрона. После исключения из равенств (3) и (4) скорости получается выражение для удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\rho^2 B^2} . \quad (5)$$

Для его вычисления нужно помимо ускоряющего напряжения U и индукции магнитного поля B измерить радиус траектории электронов ρ . Формула (5) справедлива для движения электрона в магнитном и электрическом полях; в этом случае под ρ нужно понимать радиус кривизны траектории электрона в точке, где ускоряющая разность потенциалов равна U .

В этой работе источником электронов служит накаленный катод K (рис. 1). Потенциал его в дальнейших формулах принимается равным нулю. Электроны движутся в вакууме к цилиндрическому аноду A и ускоряются электрическим полем, соответствующим анодному напряжению U_a . Катод и анод соосны, а радиусы их сильно отличаются друг от друга. Магнитное поле направлено вдоль оси катода и анода. На рис. 1 схематически показаны траектории электронов при различных значениях индукции магнитного поля. В отсутствие магнитного поля (рис. 1.а) электроны движутся по прямой - радиусу. Наложение небольшого однородного магнитного поля, перпендикулярного плоскости рисунка, искривляет траекторию электронов, но они по-прежнему достигают анода (рис. 1,б). При достаточно большой индукции магнитного поля траектории искривляются столь сильно, что электроны не могут попасть на анод (рис. 1.в); анодный ток отсутствует [3, с.386-389].

В случае, показанном на рис. 2, разграничены режимы, представленные на рис. 1.б и 1.в. - траектория электрона касается анода; при соответствующей такому случаю индукции магнитного поля $B_{кр}$ и заданном анодном напряжении U_a анодный ток обращается в нуль. Зависимость тока через электронную лампу от индукции магнитного поля называют магнетронным эффектом. На рис. 3 штриховой линией показана такая зависимость для идеального случая "одинаково движущихся всех электронов".

В цилиндрическом конденсаторе напряженность электрического поля обратно пропорциональна расстоянию от оси до исследуемой точки. Можно показать, что при очень большом отношении радиусов анода и катода траектория электрона в точке касания с анодом имеет радиус кривизны, близкий к половине радиуса анода R_a :

$$\rho_{кр} = \frac{1}{2} R_a. \quad (6)$$

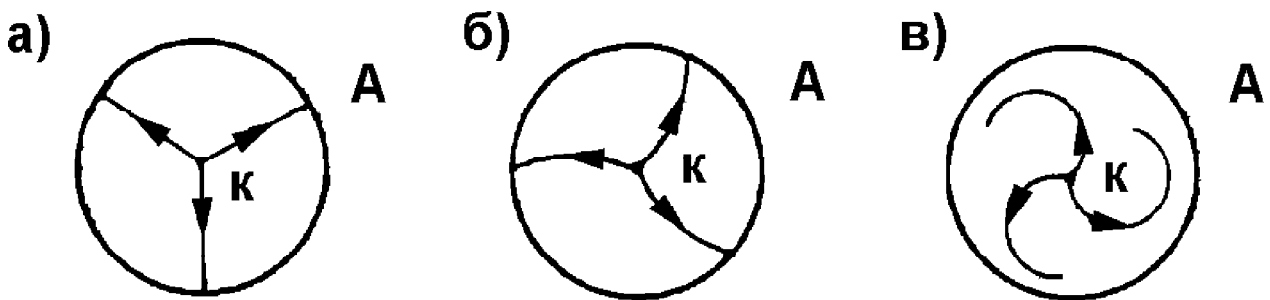


Рис. 1.

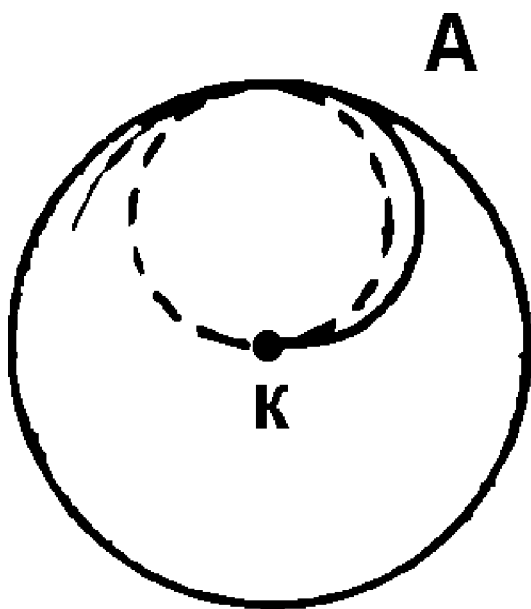


Рис. 2.

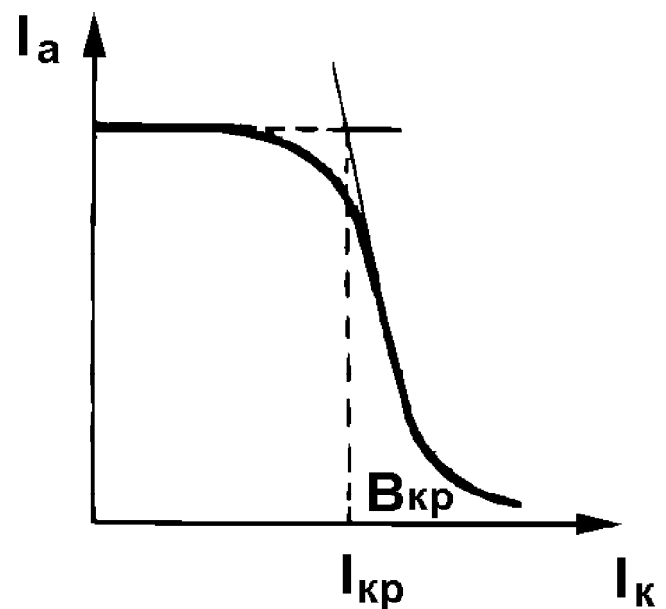


Рис. 3.

Задав анодное напряжение U_a , следует увеличивать индукцию магнитного поля до значения $B_{кр}$, при котором прекратится анодный ток I_a , и подставить это значение вместе с критическим радиусом кривизны (6) и условием $U = U_a$ в формулу для расчета удельного заряда (5):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{R_a^2 B_{кр}^2}. \quad (7)$$

Более полный вывод формулы (7) см. в [6. с.233-239].

В действительности же анодный ток плавно убывает с увеличением индукции (сплошная кривая на рис. 3), и не так-то легко выделить на этой зависимости нужную индукцию $B_{кр}$. Конечно, к этому ведет несовершенство прибора: отнюдь не нулевой радиус катода, неточное совпадение его оси с осью анода и направлением магнитного поля, неполная однородность последнего. Но если говорить только о физических процессах в лампе, основных причин плавного спада тока две.

Начальные кинетические энергии электронов могут оказаться сравнимыми с приобретаемыми в электрическом поле (4), и делается заметным распределение электронов по скоростям. При значениях индукции, близких к $B_{кр}$, все больше электронов не достигает анода. возрастает объемный заряд между катодом и анодом и оказывается неточной формула (6).

Ясно, как учесть первое из названных искажений. Выше расчет велся для нулевой начальной энергии электрона, т.е. для наименьшей его скорости вблизи анода. Поэтому под $B_{кр}$ следует понимать наименьшее значение индукции, при котором обнаруживается заметное уменьшение анодного тока. Неплохие результаты дает прием обработки, схематически показанный на рис. 3. Линейно экстраполируют начальный и средний участки зависимости $I_a = I_a(B)$. Индукцию, соответствующую точке пересечения экстраполяционных прямых, принимают за $B_{кр}$.

Установка

Принципиальная схема установки показана на рис. 4. Серийная двухэлектродная лампа Л конструктивно размещена внутри катушки, создающей магнитное поле. Питание всех цепей установки осуществляется от универсального источника питания (УИП) [1, с.84-67].

Ток катушки I_L регулируют соответствующей ручкой на панели УИП и измеряют цифровым миллиамперметром mA . Пропорциональную этому току индукцию B магнитного поля катушки вычисляют по формуле

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} K I_L, \quad (8)$$

где μ_0 - магнитная постоянная; N - число витков в обмотке катушки; l - ее длина; K - коэффициент, учитывающий потоки рассеяния.

Для накала лампы служит выход УИП $\sim 6,3$ В. Анодное напряжение берется с выхода УИП, обеспечивающего регулировку его в пределах от 3 до 9 В; для измерения анодного напряжения U_a служит цифровой вольтметр V1.

Анодный ток I_a измеряют цифровым вольтметром V2 в комбинации с резистором R и вычисляют по формуле

$$I_a = \frac{U_2}{R}, \quad (9)$$

где U_2 , - отсчет по вольтметру V2, сопротивление резистора R составляет десять в целой степени Ом, поэтому вычисление (9) без труда производится в уме. Собственно, сила анодного тока в окончательный расчёт не входит, поэтому нет необходимости в точном подборе сопротивления R.

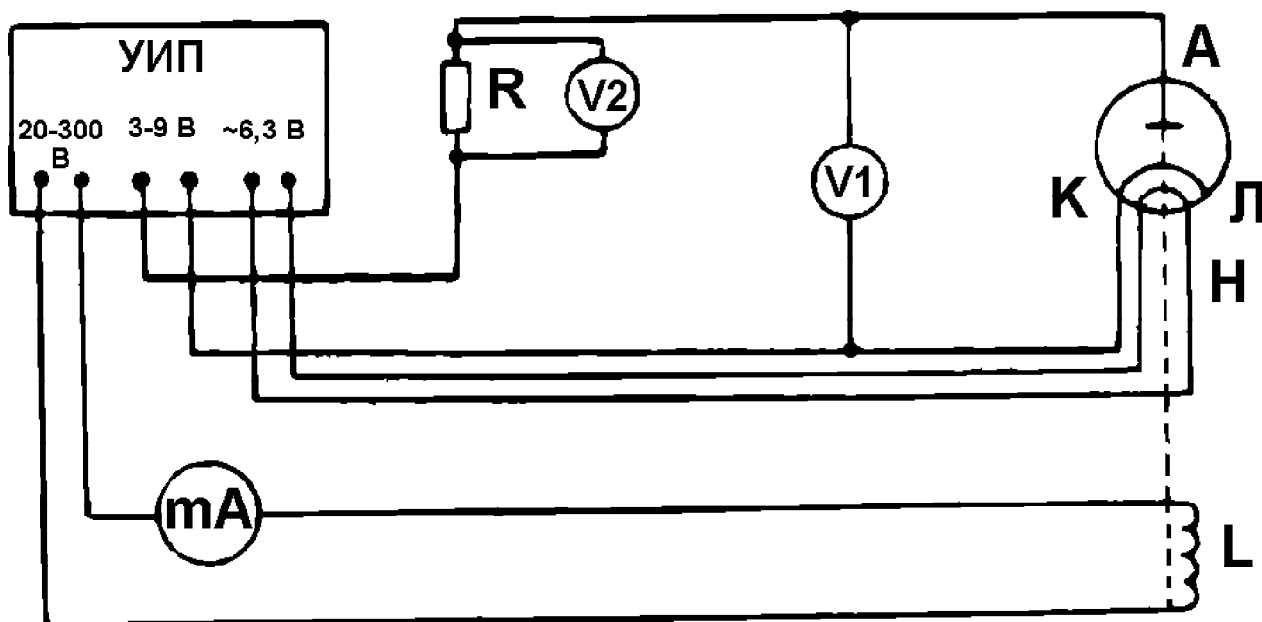


Рис. 4.

Электронная лампа Л и катушка L смонтированы на монтажной плате. На ней же выполнена часть соединений и вмонтирован резистор R.

В инструкции при установке приведены параметры катушки, сопротивление резистора R, а также марки источника питания и измерительных приборов, используемых в конкретной установке, выбор диапазонов, порядок манипуляций на них (см. также [1. с.16-26]).

Измерения и обработка результатов

Внимание! Проверьте заземление корпусов УИП и всех измерительных приборов.

1. Изучите инструкцию при установке, найдите на приборах все упомянутые в ней зажимы, гнезда, ручки управления. Не включая в сеть, подготовьте приборы к работе согласно инструкции.
2. Соберите или проверьте электрическую цепь внешних соединений. Особенно внимательно проверьте правильное включение накала лампы (ошибка здесь ведет к немедленному выходу лампы из строя).
3. После проверки цепи преподавателем включите в сеть измерительные приборы. Включите в сеть УИП и убедитесь в исправности действия установки. Установите малый (по возможности нулевой) ток I_L катушки.
4. При одном из заданных преподавателем значений анодного напряжения U_a снимите зависимость анодного тока от тока катушки $I_a = I_a(I_L)$. Для этого устанавливайте ток катушки от нуля до 60 мА через каждые 5 мА, а затем от 60 до 120 мА через каждые 10 мА, отсчитайте соответствующее каждому из этих значений I_L значения анодного тока I_a . Результаты измерений заносите в таблицу.

$R_a =$	$N =$	$l =$	$K =$	$R =$	
$I_L,$ мА	$I_a, \text{ мкА}$				
	$U_a =$	$U_a =$	$U_a =$	$U_a =$	$U_a =$
0					
5					
·					
·					
60					
70					
·					
·					
120					
$I_{кр}, \text{ мА}$					
$B_{кр}, \text{ мТл}$					
$e/m, \text{ Кл/кг}$					

5. Постройте график зависимости $I_a = I_a(I_L)$. Предъявите его преподавателю. Произведите графическую экстраполяцию начального и среднего участков кривой, как это показано на рис. 3. По пересечению экстраполяционных прямых найдите $I_{кр}$ - силу тока катушки, соответствующую критическому значению индукции $B_{кр}$. Результат занесите в таблицу.
6. Вычислите по формуле (8) критическую индукцию $B_{кр}$, а затем по формуле (7) - удельный заряд электрона e/m . Занесите их в таблицу. Сравните e/m с табличным значением (см. приложение), чтобы убедиться в отсутствии грубой ошибки в измерениях и вычислениях.
7. Продолжайте операции п. 4,5,6 для каждого из заданных преподавателем значений анодного напряжения.
8. Расположите полученные значения e/m в порядке возрастания анодного напряжения U_a . Если нет систематической зависимости e/m от U_a , усредните полученные частные значения удельного заряда e/m и оцените погрешность его измерения. Рекомендуется оценивать эту погрешность по отклонениям от среднего (см.[2. с.27-28]). Запишите окончательный результат.
9. Сравните полученное значение e/m с табличным.

Контрольные вопросы

1. Какова задача этой работы? Попробуйте кратко охарактеризовать способ решения этой задачи.
2. Каков механизм влияния магнитного поля на анодный ток диода?
3. Что здесь названо критической индукцией? Почему при индукции, больше критической, анодный ток отличен от нуля (почему вообще анодный ток плавно зависит от индукции)?
4. Как Вы собираетесь найти критическое значение силы тока катушки? Как по этому значению вычислить критическую индукцию?
5. Нужно ли, строго говоря, для обработки данных знать сопротивление резистора R (рис. 4)?