

Московский Государственный технический Университет им. Н.Э. Баумана

И.Н. ФЕТИСОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Методические указания к лабораторной работе Э-21 по курсу общей физики

Под редакцией В.Н. Корчагина

Москва, 2000 г.

Рассмотрены законы движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях, описана лабораторная установка, изложена методика измерения удельного заряда электрона. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

### ВВЕДЕНИЕ

Удельным зарядом частицы называют отношение заряда к массе  $q/m$ . Удельный заряд можно определить, изучая движение частицы в электрическом и магнитном полях под действием сил, законы которых известны. Дж.Дж. Томсон, выполнив подобные опыты с катодными лучами, обнаружил, что эти лучи являются потоком отрицательных частиц, удельный заряд которых примерно в 2000 раз больше, чем у водородных ионов. Так был открыт в 1897 г. электрон [1].

Цель работы - ознакомление с движением заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, определение удельного заряда электрона.

### МЕТОДИКА ОПЫТА

Известно несколько методов измерения удельного заряда электрона [2, 3]. Ниже описан учебный наглядный опыт, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Движение электронов будем изучать в специальной лампе, схематически показанной на рис. 1. В стеклянной трубке 1 диаметром 13 мм и длиной 100 мм натянута тонкая вольфрамовая проволока 2, которая служит катодом. При нагревании током катод испускает электроны (термоэлектронная эмиссия). Проволока имеет специальное покрытие, уменьшающее работу выхода электронов и рабочую температуру катода. Параллельно катоду на расстоянии 1,7 мм расположена изолирующая пластина 3 с семью металлическими электродами (анодами) 4, имеющими положительный потенциал  $U_A$  до 30 В относительно катода. Испущенные катодом электроны разгоняются электрическим полем и бомбардируют аноды, которые покрыты люминофором и светятся в местах, облучаемых электронами. Воздух из лампы откачан, поэтому столкновения электронов с молекулами газа практически отсутствуют.

Постоянный ток, протекающий в катушке 5 с большим числом витков (соленоиде), создает магнитное поле. В средней части лампы, которая используется в измерениях, магнитное поле однородно и направлено вдоль оси лампы (линии поля показаны схематически штрихами на рис. 1).

Магнитное поле искривляет траектории электронов, вследствие чего некоторые участки анода не облучаются и выглядят темными. При увеличении магнитной индукции свечение остается на все меньшей части поверхности и при некотором критическом значении  $B_{кр}$  практически полностью исчезает. Как будет показано ниже, в этом состоянии электроны описывают окружности, диаметр которых равен расстоянию от катода до анода. Рассмотрим более подробно движение электронов в лампе.

В электрическом поле напряженности  $\vec{E}$  на заряд  $q$  действует сила

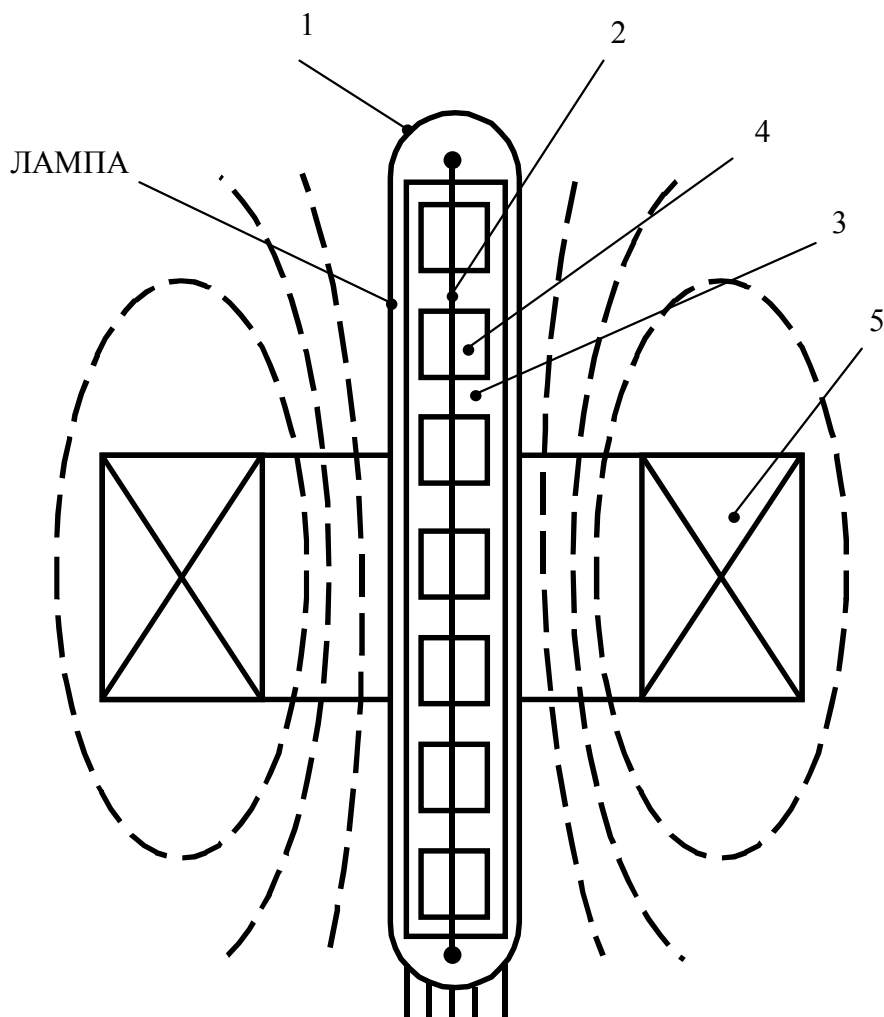


Рис. 1

$$\vec{F}_э = q\vec{E}$$

Испущенный катодом электрон, начальной энергией которого можно пренебречь, приобретает в поле кинетическую энергию, равную работе сил поля на участке от катода до анода, т.е. произведению заряда на анодное напряжение

$$m \frac{v^2}{2} = qU_A$$

Отсюда получаем выражение для конечной скорости электронов:

$$v = (2qU_A/m)^{1/2} \quad (1)$$

Силовые линии электрического поля, схематически показанные на рис. 2, лежат в плоскостях, перпендикулярных оси лампы, поэтому электроны движутся в этих плоскостях. Как видно из рисунка, густота линий, пропорциональная напряженности поля, убывает при удалении от катода. Поэтому основной разгон электронов происходит вблизи катода. Приближенно будем считать, что конечную скорость (1) электроны набирают вблизи катода, а дальше движутся с постоянной скоростью.

В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $\vec{v}$  действует сила Лоренца

$$\vec{F}_M = q[\vec{v}\vec{B}]$$

Модуль силы равен

$$F_M = qvB \sin \alpha$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Направление силы можно определить с помощью правил векторного произведения или левой руки (рис. 3): линии индукции входят в ладонь, четыре пальца направлены в сторону движения частицы, а большой отогнутый палец указывает направление силы, действующей на положительный заряд (для отрицательного заряда направление силы противоположное).

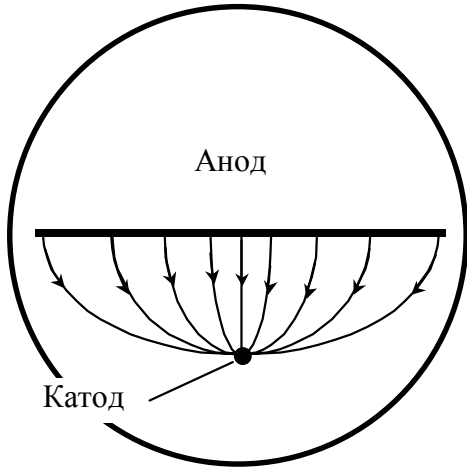


Рис. 2

Поскольку сила Лоренца составляет прямой угол с вектором скорости, она, не изменяя модуля скорости, изменяет направление движения, т.е. создает только нормальную составляющую ускорения. Как отмечалось выше, электроны в лампе движутся в поперечных плоскостях, с которыми вектор  $\vec{B}$  составляет прямой угол. Поэтому, электроны движутся по окружности радиусом  $r$  (рис. 4), который найдем, приравняв силу Лоренца произведению массы электрона на нормальное (центростремительное) ускорение:

$$qvB = mv^2/r.$$

Отсюда получим

$$r = mv/(qB). \quad (2)$$

Как видно из (2), с увеличением магнитной индукции радиус траекторий уменьшается.

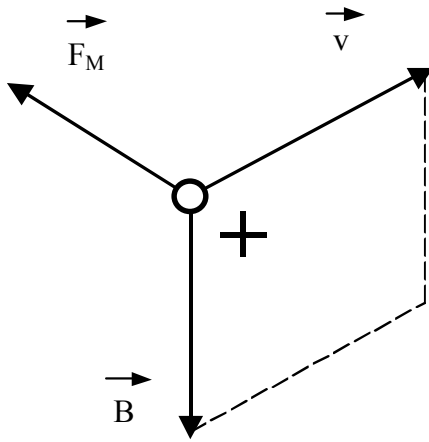


Рис.3

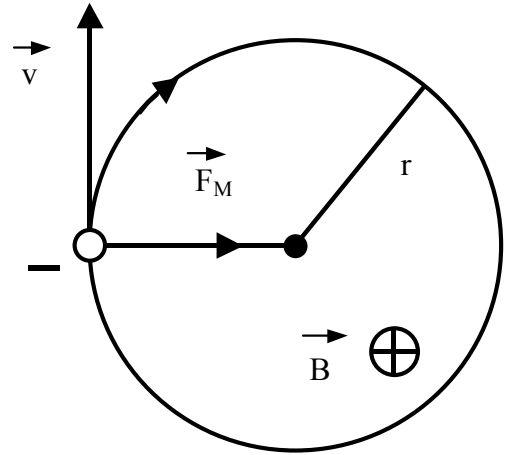


Рис.4

Рассмотрим, как при этом изменяется свечение анода. В отсутствие магнитного поля оно симметрично относительно оси лампы, а при достаточно большом анодном напряжении - практически равномерно. В магнитном поле вследствие отклонения электронов симметрия нарушается.

Пусть магнитное поле направлено так, что электроны отклоняются вправо по пути к аноду. По мере увеличения поля наблюдаются следующие основные картины свечения анода: 1) сначала в слабом поле левая сторона - темная, правая - светлая, причем темная часть увеличивается с ростом поля; 2) затем светлое поле разбивается новой темной полоской на две части - центральную и краевую. Центральная часть сужается с ростом магнитного поля; 3) и, наконец, центральная светлая полоса исчезает. Это состояние мы называем критическим. В критическом состоянии светится только узкая полоска на правом краю

анода; свечение обусловлено побочным эффектом, о котором будет сказано ниже. Добившись критического состояния, измеряют напряжение  $U_C$  на соленоиде (или силу тока) для нахождения магнитной индукции  $B_{кр}$  в критическом состоянии.

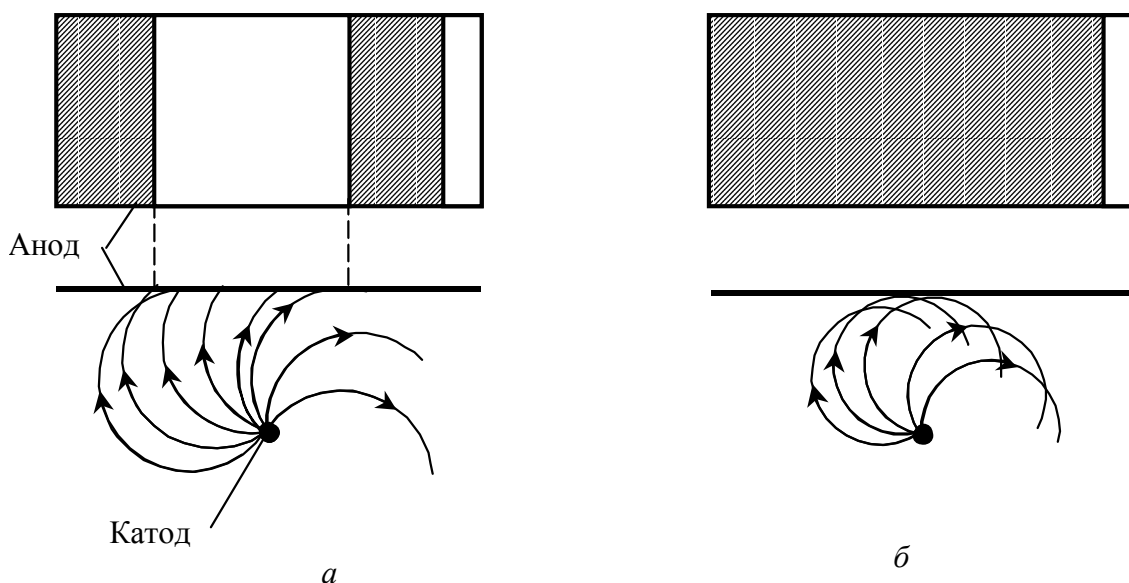


Рис.5

Поясним сказанное выше с помощью рис. 5, где для двух значений магнитного поля схематически показаны распределения яркости свечения анода (вверху) и соответствующие им траектории электронов в поперечном сечении лампы (внизу). Изображенные на рисунке круговые траектории обусловлены только магнитным полем. Мы пренебрегли отклонением частиц электрическим полем, что оправдано для магнитных полей, близких к критическому. Описанная выше вторая картина показана на рис. 5а; при этом магнитная индукция несколько меньше критической. Критическое состояние, при котором радиус окружности равен половине расстояния между анодом и катодом, т.е.  $r_{кр}=0,85$  мм, показано на рис. 5б.

Подобные измерения повторяют при различных напряжениях анода и тока накала.

Из формул (1) и (2) для критического состояния получаем

$$q/m = 2U_A / (r_{кр} B_{кр})^2. \quad (3)$$

Магнитная индукция пропорциональна напряжению на соленоиде

$$B_{кр} = \beta U_C. \quad (4)$$

Методика определения коэффициента пропорциональности  $\beta$  описана ниже.

Из формул (3) и (4) получаем, что квадрат напряжения соленоида в критическом состоянии пропорционален анодному напряжению:

$$U_C^2 = \gamma U_A, \quad (5)$$

где коэффициент пропорциональности

$$\gamma = 2(m/q) / (\beta r_{кр})^2. \quad (6)$$

Зависимость (5) в работе проверяют экспериментально. Для этого при различных анодных напряжениях находят критическое состояние, измеряют для него  $U_C$ , и строят графическую зависимость  $U_C^2$  от  $U_A$  (рис. 6).

Из опыта видно, что зависимость линейная и согласуется с теорией. Однако при аккуратных измерениях прямая немного смещена относительно начала координат (см. рис. 6). Это объясняется контактной разностью потенциалов  $U_{конт} \approx 2В$  между различными материалами катода и анода [3].

Вследствие этого напряжение в вакууме между двумя точками, одна из которых находится вблизи катода, а другая - вблизи анода, меньше на значение контактного напряжения

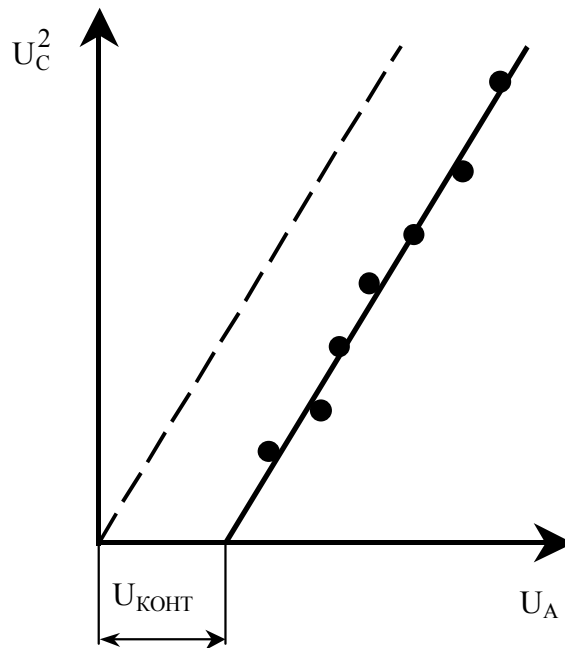


Рис.6

$U_{\text{конт}}$ , чем напряжение между катодом и анодом, измеренное вольтметром. Хотя это напряжение невелико по сравнению с анодным напряжением, для повышения точности опыта учтем его в формуле (5):

$$(U_C)^2 = \gamma(U_A - U_{\text{конт}}). \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) можно вывести рабочую формулу для определения удельного заряда

$$q/m = 2(U_A - U_{\text{конт}}) / (\beta U_C r_{\text{кр}})^2. \quad (8)$$

Контактное напряжение  $U_{\text{конт}}$  находим из полученного графика, как показано на рис. 6 (критический радиус  $r_{\text{кр}} = 0,85 \cdot 10^{-3}$  м, значение  $\beta$  приведено на задней стенке установки). Выше предполагалось, что электрическое поле в лампе создают только заряды на катоде и аноде, а силовые линии примерно такие, как показано на рис. 2. При этом мы не учитывали объемный заряд электронов в пространстве между катодом и анодами, который может влиять на движение электронов. С этим зарядом, по-видимому, связано появление узкой светлой полосы на правом краю анода. Полоса не исчезает даже в сильном магнитном поле, которое в несколько раз больше критического, и не может быть объяснена показанными на рис. 5 траекториями. Мы предполагаем, что объемный заряд, смещаясь в магнитном поле вправо, нарушает симметрию электрического поля. Этим можно, объяснить дрейф электронов на правый край анода, в результате чего возникает это побочное свечение. Можно предположить, что объемный заряд искажает результаты измерения  $q/m$ . Это можно проверить следующим способом: измерить  $q/m$  при различном токе катода, когда количество испускаемых электронов в единицу времени заметно различается, а следовательно, различается и объемный заряд. Если результаты измерений практически совпадут, то влияние объемного заряда незначительно.

#### ГРАДУИРОВКА СОЛЕНОИДА

Магнитная индукция соленоида пропорциональна силе постоянного тока  $I$  или напряжению  $U_C$ , равному  $IR_C$ , где  $R_C$  - сопротивление постоянному току:

$$B = \beta U_C = \beta R_C I$$

На рис. 7 дана схема опыта по определению коэффициента пропорциональности  $\beta$ . Градуировка выполняется на переменном токе и основана на использовании явления электромагнитной индукции. От генератора  $\Gamma$  через соленоид пропускают ток круговой

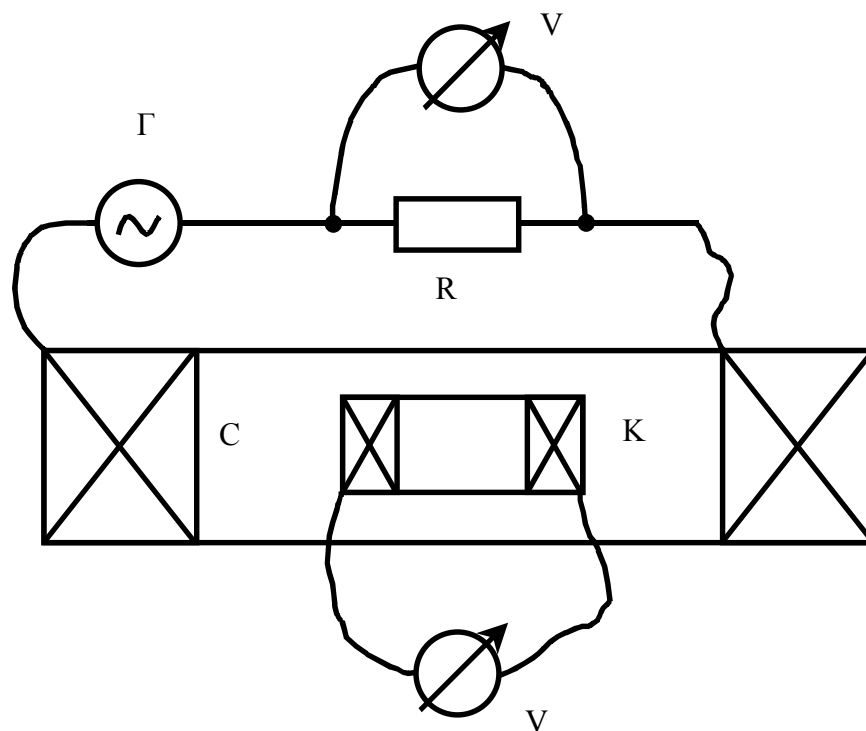


Рис. 7

частоты  $\omega$ :  $I = I_0 \cos \omega t$ . В центре соленоида помещают маленькую измерительную катушку К, содержащую N витков со средней площадью S. В пределах этой катушки поле однородно и направлено по нормали к плоскости витков. Магнитная индукция в катушке равна

$$B = \beta R_C I = \beta R_C I_0 \cos \omega t$$

а магнитный поток

$$\Phi = SB = S\beta R_C I_0 \cos \omega t$$

Согласно закону электромагнитной индукции, в N витках измерительной катушки возникает ЭДС

$$\mathcal{E} = -N d\Phi / dt = \mathcal{E}_0 \sin \omega t ,$$

где

$$\mathcal{E}_0 = SN\beta\omega R_C I_0 , \tag{9}$$

Амплитуду тока соленоида  $I_0$  можно найти, измерив амплитуду напряжения  $U_0$  на активном сопротивлении R, включенном последовательно с соленоидом (см. рис.7):  $I_0 = U_0 / R$ . Теперь из (9) можно получить формулу для нахождения  $\beta$  по результатам измерений:

$$\beta = R \mathcal{E}_0 / (\omega S N R_C U_0)$$

Описанным способом получено численное значение  $\beta$ , приведенное на установке.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Ознакомление с установкой.

Установка (рис. 8) включает в себя: источник питания ИП, вырабатывающий постоянное напряжение 30 В и ток до 1 А; лампу VL, соленоид С, вольтметр V и другие элементы. Зарисовать схему.

Резисторы R3 и R4 ограничивает напряжение на катоде К. Когда переключатель SA1 замкнут, напряжение равно примерно 3 В, а эмиссия электронов нормальная. В другом положении переключателя эмиссия катода пониженная. Все аноды А соединены вместе, их потенциал регулируют переменным резистором R5. Включение тока соленоида

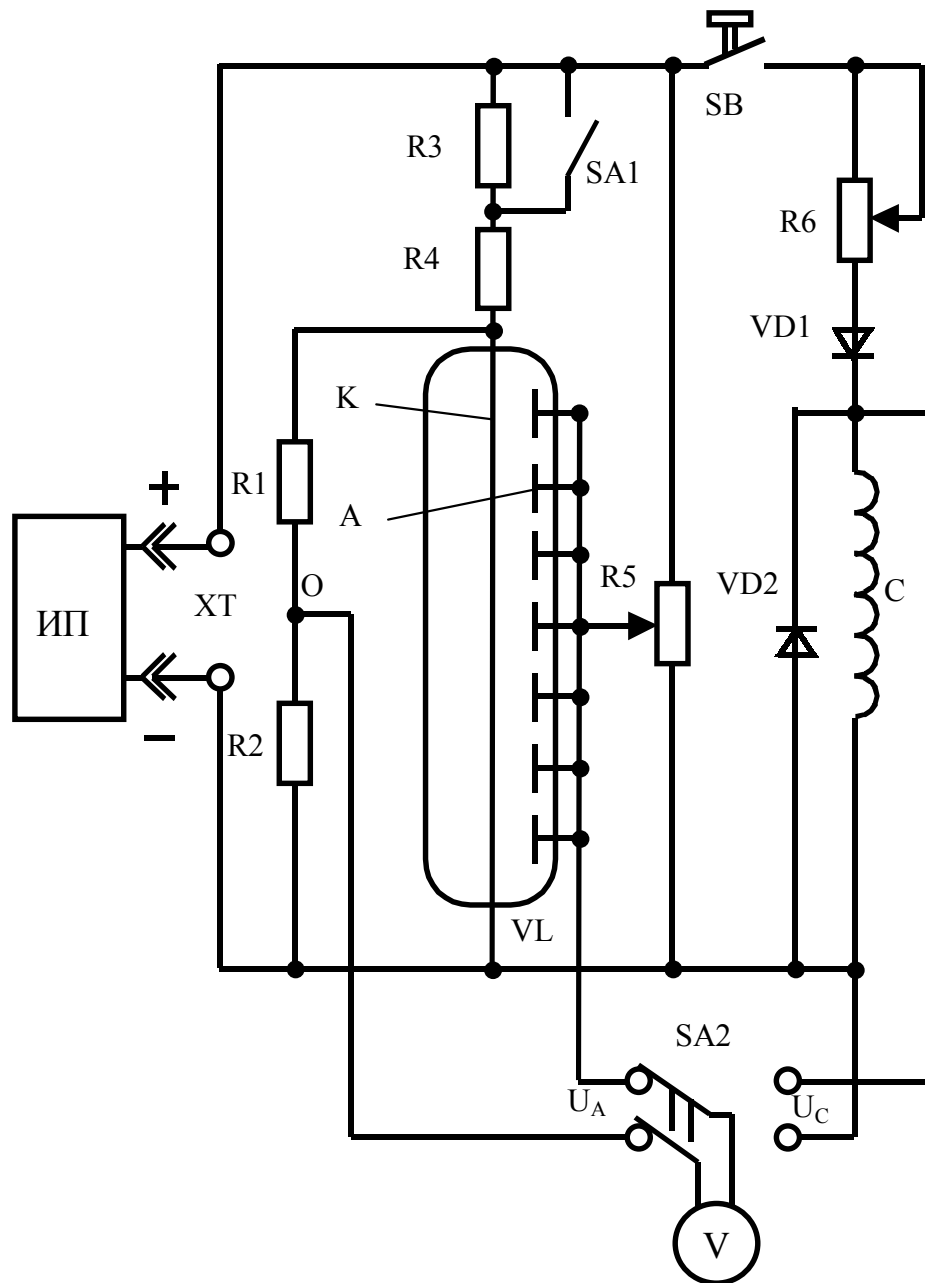


Рис.8

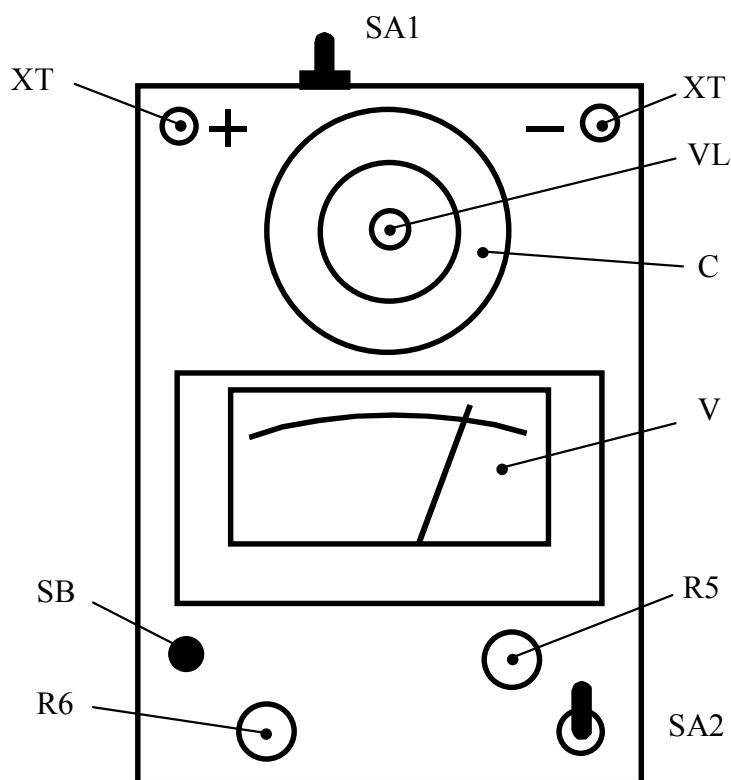
осуществляют кнопкой SB, а ток регулируют резистором R6. С помощью вольтметра V и переключателя SA2 можно поочередно измерить напряжения  $U_C$  и  $U_A$ .

Поясним особенности измерения анодного напряжения  $U_A$ . Описанная выше процедура визуального нахождения критического состояния проводится с помощью среднего анода. Для вычисления удельного заряда необходимо знать напряжение между этим анодом и противоположным участком нити катода. Потенциал всех анодов одинаковый, а потенциал различных точек катода отличается примерно на 3В. Середина нити имеет потенциал 1,5В относительно нижней (общей) точки. Поскольку вольтметр невозможно подключить к середине катода, создана дополнительная цепь из одинаковых резисторов R1 и R2, в которой точка O имеет такой же потенциал, что и середина катода. Как видно из схемы, вольтметр подключают к анодам и точке O.

Полупроводниковые диоды VD1 и VD2 играют вспомогательную роль. Они пропускают ток только в направлении, которое совпадает с острием в изображении диода на схеме.

При выключении тока соленоида в нем возникает ЭДС самоиндукции, равная  $\mathcal{E} = -Ldi/dt$ , где L, - индуктивность. ЭДС во много раз больше анодного напряжения и может повре-

дить вольтметр. Диод VD2 не мешает работе соленоида, так как его сопротивление велико для полярности рабочего напряжения  $U_C$ . При обратной полярности, которую имеет ЭДС самоиндукции, сопротивление



диода мало, поэтому и напряжение на нем мало.

Диод VD1 защищает источник питания от короткого замыкания в случае неправильного по полярности его подключения к схеме, так как в этом случае сопротивление диода VD2 мало. Таким образом, диод VD1 автоматически защищает аппаратуру от неосторожного обращения. (Эта функция называется «защитой от дурака» - от английского «foolproof»).

Внешний вид установки схематически показан на рис. 9. На верхней панели прибора расположены: соленоид C и лампа VL внутри прозрачного защитного кожуха; вольтметр V; ручки регулировки анодного напряжения (R5) и магнитного поля (R6); кнопка SB включения тока соленоида; переключатель вольтметра SA2; клеммы XT, на которые подается напряжение 30В от источника питания. Переключатель тока накала

Рис. 9

SA1 установлен на задней стенке прибора.

#### Задание 2. Измерение удельного заряда.

1. Включить установку. Для этого включить в сеть источник питания. Установить максимальное анодное напряжение, повернув ручку «Регулировка анодного напряжения» по ходу часовой стрелки; при этом должно наблюдаться свечение анодов. Если его нет, проверить правильность (по полярности) подключения источника питания.
2. Задать нормальный ток накала, установив переключатель SA2 на задней стенке в верхнее положение.
3. Подключить тумблером SA2 вольтметр к анодной цепи, установить напряжение  $U_A$  30В и записать его в таблицу \*.

При нормальном накале катода			При пониженном накале катода		
$U_A, В$	$U_C, В$	$U_C^2, В^2$	$U_A, В$	$U_C, В$	$U_C^2, В^2$
...	...	...			
$q/m = \dots$			$q/m = \dots$		

\*Примечание. В таблице 15-20 строк.

4. Определить критическое состояние. Переключатель вольтметра перевести в положение для измерения напряжения соленоида. Регулятор тока соленоида (R6) повернуть против часовой стрелки до упора (минимум тока). Нажать кнопку SB для включения тока соленоида. Наблюдая свечение среднего (четвертого с краю) анода и увеличивая ток соленоида, найти критическое состояние. При приближении к нему свечение анода разбивается темной полосой на две части, как показано на рис. 5а. Затем, медленно увеличивая ток катушки, добейтесь исчезновения левой светлой полосы; это - критическое состояние (рис. 5б). В критическом состоянии остается узкая светлая полоса на правом краю анода. Изме-



ритель напряжение соленоида  $U_C$  и записать его в таблицу.

5. Описанные в п. 4 измерения повторить для различного анодного напряжения, уменьшая его с шагом 2 В до 6 В. Результаты записать в таблицу.

6. Уменьшить ток накала, установив переключатель SA1 в нижнее положение, и полностью повторить все измерения, описанные выше в пп. 3-5.

7. Записать в отчет значение  $\beta$ , приведенное на задней стенке установки.

Задание 3. Определение знака заряда электрона.

1. Получить компас у лаборанта. Северный (синий) конец стрелки указывает направление вектора  $\vec{B}$ . Располагая компас вблизи соленоида, найти направление вектора  $\vec{B}$  внутри соленоида. При исследовании поля необходимо учитывать, что линии поля замкнутые, охватывающие витки катушки. Определить знак заряда по правилу левой руки. Результаты опыта описать в отчете.

2. Отключить источник питания от сети.

### ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Для каждой серии измерений, выполненных при различном накале построить отдельно графические зависимости  $U_C^2$  от  $U_A$ , как показано на рис. 6. Через экспериментальные точки провести наилучшую «на глаз» прямую. Сделать вывод о соответствии полученной зависимости формуле (7) или (5).

2. Для каждого графика определить контактное напряжение  $U_{\text{КОНТ}}$  (см. рис. 6) и по формуле (8) вычислить удельный заряд, взяв значения  $U_A$  и  $U_C$  для точки, лежащей на проведенной прямой в верхней части графика. Результаты определения  $q/m$  записать в таблицу.

3. Сравнивая значения  $q/m$ , полученные при различном накале, сделать вывод о влиянии объемного заряда на результат опыта.

4. Из результатов двух опытов вычислить среднее значение  $q/m$ .

5. Привести результат измерения с погрешностью 30%, основной вклад в которую вносят погрешности измерения расстояния между катодом и анодом и градуировки соленоида.

6. Сравнить полученный результат с табличным значением  $q/m = 1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

7. Уточнить физическую картину опыта, выполнив следующие расчеты и приведя их результаты в виде таблицы:

а) вычислить максимальную скорость  $v$  электронов в лампе и сравнить ее со скоростью света  $c$ . Сделать вывод о допустимости использования классических (нерелятивистских) формул;

б) вычислить нормальное (центростремительное) ускорение  $a_n$  при движении электронов по окружности критического радиуса. Сравнить его с ускорением свободного падения  $g$ . Влияет ли сила тяжести на движение электронов?

в) Вычислить кинетическую энергию электронов  $W_K$  при минимальном анодном напряжении и сравнить ее с энергией, с которой электроны покидают катод при термоэлектронной эмиссии. Последняя по порядку величины равна произведению постоянной Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К на температуру катода, равную примерно  $T = 1000$  К. Оправдано ли сделанное нами пренебрежение начальной энергией электронов?

г) Вычислить рабочий диапазон изменения магнитного поля соленоида и сравнить его с магнитным полем Земли, равным примерно  $B_3 = 10^{-4}$  Тл. Может ли земное поле исказить результат опыта?

$v = \dots$	$v/c = \dots$
$a_n = \dots$	$a_n/g = \dots$
$W_K = \dots$	$W_K/(kT) = \dots$
$B = \dots$	$B/B_3 = \dots$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие силы действуют на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях?
2. Как движется заряженная частица в магнитном поле?
3. В чем сущность методики измерения  $q/m$  электрона?
4. Как определяют в работе знак заряда электрона?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. / Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978.
3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985.