

**Включение установки.** Разомкнуть ключ  $S_1$  в цепи резистора  $R_5$  и замкнуть ключ  $S_2$  в анодной цепи лампы.

Проверить положение регуляторов выхода источников питания, обеспечивающих минимальность выходного напряжения.

Включить источник питания и прогреть его в течение 10 мин.

Установить такой ток накала, чтобы при анодном напряжении 10—12 В анодный ток лампы составил 1,5 мА.

**Выполнение измерений.** Изменением сопротивления  $R_3$  производится уравнивание моста. Затем ключ в анодной цепи лампы размыкается. Ток в лампе прекращается. Температура нити и ее электрическое сопротивление повышаются, так как прекращается перенос энергии от катода электронами (теперь эмитируемые электроны возвращаются на катод). Тогда замыкается ключ в цепи сопротивления  $R_5$ , а величина его подбирается такой, чтобы мост вновь оказался уравновешенным. Таким образом, при измерениях осуществляется не компенсация охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока, а компенсация нагрева ее при прекращении анодного тока: существо дела остается прежним. Такое изменение применено для того, чтобы вначале установить подходящую величину анодного тока лампы. Изменение тока накала нити при компенсации отсчитывается непосредственно по миллиамперметру  $mA_3$  в цепи сопротивления  $R_5$ .

Указанные измерения для тока  $I_a=1,5$  мА выполнить три раза. Затем, выключив питание накала лампы, переключить провода, соединяющие концы нити накала с соответствующими клеммами моста, и повторить измерения.

**Обработка результатов измерений.** Вычислить работу выхода электрона из оксидного катода по формуле

$$\Phi = \frac{2RI_n \Delta T_n}{I} - 2k(T - T_0),$$

используя усредненные значения  $\Delta T_n$ , а разность температур  $T - T_0$  положить равной 600 К.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют виды электронной эмиссии?
2. Как изменяется электрический потенциал в области границы металл—вакуум?
3. Как ток термоэлектронной эмиссии зависит от температуры катода?
4. Какие существуют методы измерения работы выхода электрона из металла?
5. В чем состоит метод компенсации охлаждения нити катода при определении работы выхода электрона?
6. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действия при измерениях.
7. В чем заключается активирование катода?

8. Оценить точность полученного экспериментального значения работы выхода.

#### Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 156.
3. Шимони К. Физическая электроника. М.: Мир, 1977.

#### Лабораторная работа 8

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

В задаче экспериментально определяется удельный заряд электрона  $e/m$  двумя методами. Первый основан на использовании закона Богуславского—Ленгмюра или закона «трех вторых». Во втором, так называемом «методе магнетрона», рассматривается движение электронов в пересекающихся однородном магнитном и радиальном электрическом полях.

#### Анализ условий эксперимента

Рассмотрим диод с электродами в виде коаксиальных цилиндров, длина которых  $l$ , а радиусы  $r_k$  (катод) и  $r_a$  (анод). При термоэлектронной эмиссии из катода в пространстве вокруг него образуется облако отрицательного заряда (пространственный заряд). Если обеспечить условия, при которых часть электронов, образующих это облако, возвращается на катод, а часть увлекается электрическим полем на анод, то анодный ток будет подчиняться закону «трех вторых»:

$$I = \frac{8\sqrt{2}\pi e_0}{9} \frac{l}{r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} U^{3/2}, \quad (1)$$

где  $U$  — разность потенциалов между анодом и катодом, а  $r_a \gg r_k$ . Упомянутые условия состоят в том, что электроны должны иметь нулевую начальную скорость, а электрическое поле вблизи катода должно отсутствовать ( $\partial U/\partial r=0$ ) — этим обеспечивается возможность почти беспрепятственного обмена электронами между катодом и облаком (рис. 1). Таким образом, можно сказать, что закон «трех вторых» описывает «вытягивание» электронов из облака, в котором вытягиваемые электроны составляют лишь малую часть. При достижении анодным напряжением достаточно большой величины все электроны облака будут устремляться к аноду — при этом ток анода перестанет зависеть от анодного напряжения (это ток насыщения).

Выполнение условия ( $\partial U/\partial r=0$  вблизи катода) достигается подбором тока накала лампы, определяющего эмиссию катода.

Задача состоит в экспериментальной проверке закона «трех вторых» и определении величины  $e/m$ .

## Движение электрона в радиальном электрическом и однородном магнитном полях

Диод, описанный выше, поместим в соленоид так, чтобы вектор магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом, был направлен вдоль оси диода. В таком случае на электроны, вылетающие из катода, помимо радиального электрического поля дей-

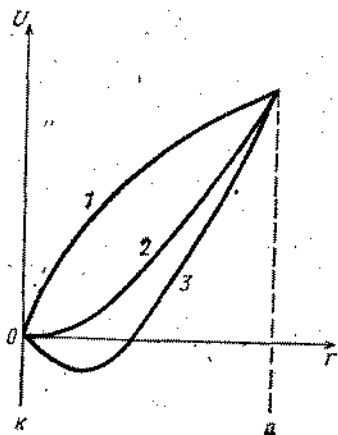


Рис. 1. Характер изменения потенциала в пространстве между катодом и анодом

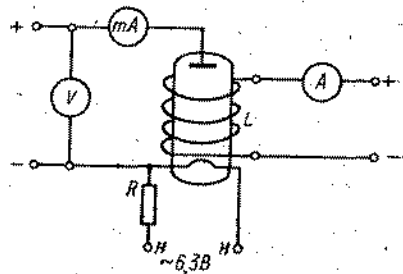


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

ствует однородное магнитное поле. Можно показать, что при достижении индукцией магнитного поля значения

$$B_{кр} = \frac{2}{r_a} \sqrt{\frac{2U_a}{e/m}} \quad (2)$$

электроны перестанут долетать до анода вследствие искривления их траектории магнитным полем, и анодный ток диода резко упадет. Таким образом, измерение величины  $B$  дает возможность определить удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_{кр}^2} \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что распределение электронов по скоростям приводит к «размазыванию» спада анодного тока диода, что затрудняет измерение критического значения индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля, создаваемого соленоидом, вычисляется по формуле

$$B = \mu_0 n I_c \quad (4)$$

где  $n$  — число витков на единицу длины соленоида,  $I_c$  — ток через соленоид.

**Описание экспериментальной установки.** В лабораторной работе используется вакуумный диод 3Ц18П ( $U_a \approx 100$  В,  $I_a \approx 8$  мА,  $I_H = 210$  мА,  $r_k = 0,45$  мм,  $r_a = 5,5$  мм,  $l = 4,38$  мм).

Диод установлен в вертикальном положении на цилиндрической подставке, на которую надевается соленоид так, что диод расположен на оси соленоида в его середине, где магнитное поле наиболее однородно.

Подставка с диодом укреплена на монтажной панели с основной электрической схемой (рис. 2). Для подводки питания к схеме имеются специальные гнезда. Напряжение накала диода берут с одной из пар клемм  $\sim 6,3$  В блока питания. Резистор  $R$ , смонтированный на панели, предназначен для гашения избытка напряжения, так как для накала диода 3Ц18П нужно всего 3,15 В. На анод лампы напряжение подается с выхода источника питания.

Питание соленоида  $L$  осуществляется от специального источника постоянного тока. Регулируется ток через соленоид ручками, выведенными на лицевую сторону источника постоянного тока. Ток соленоида измеряется амперметром.

**Подготовка установки к работе.** Сборка схемы производится в следующем порядке: сначала собрать цепь накала лампы, анодную цепь, цепь питания соленоида. До включения источников убедиться, что все регуляторы выходного напряжения установлены на минимум. Включить в сеть источники питания. После прогрева приборов в течение 10 мин приступить к измерениям.

### Упражнение 1. ПРОВЕРКА ЗАКОНА «ТРЕХ ВТОРЫХ» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Снять зависимость тока диода  $I$  от анодного напряжения  $U_a$ , изменяя напряжение до 90 В.

**Обработка результатов эксперимента.** Зависимость  $I(U_a)$  представить графически, нанеся на плоскость  $(I, U_a)$  экспериментальные точки  $I, U_a$ . Линию по этим экспериментальным точкам проведем не «на глазок», а такую, которая удовлетворяет им наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов. Для этого закон «трех вторых» запишем в виде

$$I = \beta X, \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{8\sqrt{2}\pi e_0 l}{9r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2}, \quad X = U^{3/2}. \quad (6)$$

Метод наименьших квадратов позволяет по определенным формулам вычислить коэффициент  $\beta$  и его квадратичную ошибку. Зна-

чение коэффициента  $\beta$  в свою очередь позволяет на основе соотношений (6) вычислить величину  $e/m$  и ее ошибку.

Расчет выполняется на ЭВМ. При работе на дисплее в машину вводятся следующие данные: число измерений  $N$  при снятии зависимости  $I(U)$ , радиус анода  $r_a$ , длина катода  $l$  и массивы значений тока  $I$  и напряжения  $U$ . После окончания вычислений ЭВМ выдает значения силы тока, вычисленные по формуле (5), в которую в качестве коэффициента  $\beta$  подставлено его значение, найденное методом наименьших квадратов. Таким образом, точки  $[A, U]$  лежат на искомой линии, которую и следует провести на графике.

ЭВМ выдает также данные для графического построения зависимости  $I(U^{3/2}) = I(X)$ .

Построить эту зависимость, нанеся на плоскость  $(I, X)$  точки  $[I, X]$ , а прямую линию через них провести под углом, тангенс которого есть  $\beta$ . Эта линия — лучшая в смысле МНК.

## Упражнение 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Включить ток через соленоид  $I_c$ . Снять 2—3 кривые зависимости  $I = f(I_c)$  при разных анодных напряжениях  $U_a$  и построить графики  $I(B)$ . Отметив на каждой кривой индукцию  $B_0$  соленоида, при которой анодный ток начинает уменьшаться, подставить это значение индукции  $B_0$  в формулу (3).

Значения  $B_0$  на графике выбирать в самом начале спада кривой тока. Проанализировать возможные погрешности определения  $e/m$  за счет «размазывания» спада.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулировать закон «трех вторых». При каких условиях он выполняется?
2. Почему ток диода должен быть далек от насыщения?
3. Как влияет объемный заряд на распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом?
4. Каков характер электрического и магнитного полей в диоде, помещенном внутрь соленоида?
5. Какие траектории описывает электрон при разных индукциях магнитного поля?
6. Чему равно отношение  $e/m$  в системе СИ?
7. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действий при измерениях. Перечислите основные правила техники безопасности при работе на установке.
8. Какова точность приборов, используемых на установке?
9. Чем определяется «размазывание» спада анодного тока диода при увеличении индукции магнитного поля?
10. Какие факторы приводят к неточности определения  $e/m$  на данной установке в упражнениях 1 и 2?

## Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 157.

## Лабораторная работа 9

### ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА

Изучается устройство вакуумного пентода, снимаются его анодно-сеточные и анодные характеристики, определяются его основные параметры. В заключение студенты знакомятся с простейшим усилителем на пентоде.

### Устройство лампы

Электрический ток в лампе образуется электронами. Их источником служит катод — электрод, нагреваемый до высокой температуры (600—1200°С). В простейшем случае катод делают в виде металлической проволоочки, накаливаемой вспомогательным током. Такие катоды называют катодами прямого или непосредственного накала. Большое распространение получили также катоды косвенного накала, иначе называемые подогревными. Катод такого типа имеет металлический цилиндр, поверхность которого покрыта активным слоем, испускающим электроны при меньшей по сравнению с чистым металлом температуре. Подогреватель в виде проволоочки находится внутри цилиндра.

Электроны, покинувшие анод, устремляются к электроду лампы, называемому анодом, — на него обычно подают положительный потенциал относительно катода.

Для управления электронным потоком в лампе служат электроды, называемые сетками. Обычно они представляют собой тонкие проволоочки, навиваемые на специальный держатель так, чтобы сетка охватывала катод.

Вакуум в электронных лампах, необходимый для свободного движения электронов, должен быть не хуже  $10^{-6}$  мм рт. ст.

### Основные типы ламп

**Диод** — двухэлектродная лампа. Анодное напряжение создает в пространстве между анодом и катодом электрическое поле, которое заставляет электроны, вылетевшие из катода, лететь к аноду. Эти электроны в пространстве катод—анод создают отрицательный объемный (пространственный) заряд. Наибольшую плотность заряд, называемый часто «электронным облаком», имеет вблизи катода. Отрицательный объемный заряд затрудняет движение электронов от катода к аноду. Результирующее электрическое поле в пространстве катод—анод таково, что между анодным током  $I_a$  и напряжением на аноде  $U_a$  (все напряжения в лампе измеряются относительно катода) существует зависимость, выра-