

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

При выполнении работ лаборатории электронных явлений студенты

изучают физические явления: эмиссию электронов из катода, движение электронов в электрическом и магнитном полях, движение носителей заряда в полупроводниках;

изучают физические законы: закон Ленгмюра—Богуславского и законы движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях;

знакомятся с устройством, принципом действия и применениями электривакуумных и полупроводниковых приборов (диодом, пентодом, транзистором, тиристором);

овладевают методами снятия характеристик этих приборов и расчета их параметров;

приобретают навыки работы с приборами: генератором напряжения звуковых частот, вольтметрами, миллиамперметрами, осциллографом, источниками питания, а также навыки работы с ЭВМ при обработке результатов эксперимента.

Лабораторная работа 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

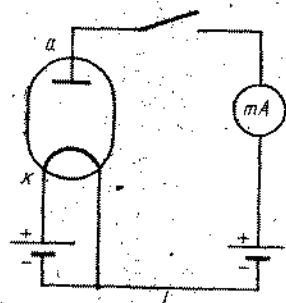


Рис. 1. Схема включения анода

Целью настоящей работы является определение работы выхода электрона из оксидного катода методом компенсации охлаждения нити. Этот метод основан на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, покидающий катод, уносит с собой энергию, часть которой составляет работа выхода электрона Φ . Если катод электронной лампы (рис. 1) нагреть до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, то в случае разомкнутой анодной цепи устанавливается равенство числа электронов, покидающих катод, и числа электронов, возвращающихся на катод из области пространственного заряда. При замыкании анодной

цепи возникает движение электронов от катода к аноду. Вследствие этого происходит понижение температуры катода, связанное с указанным выше переносом энергии каждым электроном. Это

явление аналогично переносу энергии молекулами жидкости при испарении, в результате которого жидкость охлаждается.

При расчете переносимой энергии следует также учесть, что электроны покидают катод при температуре T , а возвращаются к катоду по проводнику, имеющему температуру T_0 . За счет этого каждый электрон переносит в среднем энергию $2k(T-T_0)$, где k — постоянная Больцмана. Это можно показать расчетом средней энергии электронов, способных покинуть катод. Коэффициент 2 здесь получается благодаря тому, что катод могут покинуть лишь быстрые электроны.

При установлении в лампе анодного тока I потеря энергии катодом за одну секунду в результате переноса энергии электронами составляет

$$\Delta W = \frac{I}{e} [\Phi + 2k(T-T_0)], \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Происходящее при замыкании анодной цепи лампы понижение температуры катода можно скомпенсировать увеличением тока накала. В случае катода прямого накала с сопротивлением нити R при повышении тока накала I_n на величину ΔI_n увеличение мощности накала нити-катода равно

$$(I_n + \Delta I_n)^2 R - I_n^2 R = 2RI_n \Delta I_n + R(\Delta I_n)^2 \approx 2RI_n \Delta I_n. \quad (2)$$

Здесь отброшен член, содержащий приращение тока в квадрате, так как этот член значительно меньше первого.

Если подобрать приращение тока накала ΔI_n так, чтобы восстановить прежнее значение температуры нити-катода, будет выполняться соотношение

$$\frac{I}{e} [\Phi + 2k(T-T_0)] = 2RI_n \Delta I_n + R(\Delta I_n)^2. \quad (3)$$

Потери энергии нитью-катодом в результате установления анодного тока в лампе значительно меньше потерь на излучение и потерь из-за теплопроводности держателей катода. Но эти основные потери энергии остаются постоянными, так как при компенсации восстанавливается первоначальное значение температуры нити.

При этом получаем

$$\Phi = \frac{2eRI_n \Delta I_n}{I} - 2k(T-T_0). \quad (4)$$

Таким образом, для определения работы выхода электрона достаточно измерить приращение тока накала ΔI_n , необходимое для компенсации охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока I . Измерение тока накала I_n и сопротивления нити R не представляет трудностей. Температуру нити достаточно знать лишь приблизительно, так как второй член в формуле (4) в 10—20 раз меньше первого. Поэтому даже значительная ошибка

в определении температуры T вызовет небольшую ошибку при расчете работы выхода. В то же время фиксирование восстановления первоначальной температуры при компенсации охлаждения нити должно быть точным. Удобно производить фиксирование равенства температур по величине электрического сопротивления нити. Наибольшую трудность представляет точное измерение приращения тока накала нити ΔI_n , необходимого для компенсации ее охлаждения при установлении анодного тока. Поэтому в лабораторной работе применяется специальная методика измерений, описанная ниже.

Описание экспериментальной установки. Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 2. Для измерения

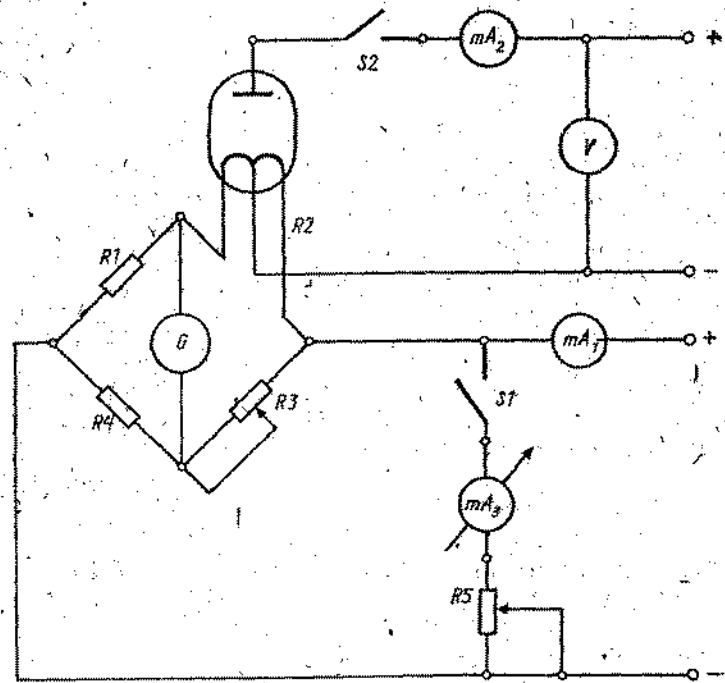


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

электрического сопротивления нити и фиксирования восстановления первоначальной температуры используется мост Уитстона на постоянном токе, в одно из плеч которого включена нить накала лампы R_2 . Чтобы на уравновешивании моста не сказывалось дополнительное падение напряжения на нити, вызванное протеканием по ней анодного тока, используется лампа, имеющая отвод от середины нити; к этому отводу присоединяется анодная цепь. Сопротивление плеч моста R_3 и R_4 в 100 раз больше сопротивле-

ний R_2 и R_1 соответственно. Для точного измерения малых приращений тока накала служит цепь с реостатом R_5 и миллиамперметром, которая может включаться параллельно мосту. Так как $R_5 \gg R_1 + R_2$, то при замыкании ключа S_1 полное сопротивление нагрузки выпрямителя практически не изменяется, и потребляемый схемой ток остается прежним. Происходит лишь перераспределение тока между мостом и цепью сопротивления R_5 . Поскольку $R_3 + R_4 = 100(R_1 + R_2)$, то в плечах моста R_3 и R_4 протекает лишь 1% полного тока. Поэтому можно считать, что уменьшение тока накала нити равно величине тока в цепи сопротивления R_5 . Таким образом, малые изменения тока накала нити можно точно определять измерительным прибором с соответствующим пределом измерений.

В лабораторной работе используется радиолампа типа 2П1П с оксидным катодом прямого накала, включенная диодом (управляющая и экранная сетки соединены с анодом). У полупроводникового оксидного катода, состоящего из смеси окислов бария, кальция и стронция, работы выхода, в отличие от катодов из чистых металлов, может изменяться в зависимости от соотношений компонент, технологии изготовления, срока службы и т. д. Широкое применение оксидных катодов связано с малой работой выхода, что позволяет получать большие токи эмиссии при низких температурах.

Анодная цепь и цепь накала питаются от разных выходов стабилизированного источника ($I_a < 3$ мА, $I_n < 100$ мА). Величины анодного напряжения и тока накала изменяются с помощью регуляторов источника, а измеряются приборами: вольтметром V (шкала 15 В) и миллиамперметром mA_1 (шкала 100 мА). Сила анодного тока измеряется миллиамперметром mA_2 (шкала 3 мА).

Отвод нити накала делит ее обычно на несимметричные части, т. е. при протекании анодного тока на нити создается дополнительное падение напряжения, не связанное с изменением ее электрического сопротивления. Это дополнительное падение напряжения на нити приводит к ошибке в установлении равновесия моста. При изменении направления тока накала знак этой ошибки изменится. Поэтому работу выхода электрона следует определять как среднее значение результатов, полученных при разных направлениях тока накала. Изменение направления тока накала достигается простым переключением проводов, соединяющих концы с соответствующими клеммами моста Уитстона.

Мост Уитстона собирается на базе моста постоянного тока типа МВЛ.

Монтаж экспериментальной установки. Собрать схему в соответствии с рис. 2. В качестве резисторов R_1 , R_3 и R_4 используются резисторы, смонтированные в измерительном мосте. Установить переключатель отношения плеч моста $R_1 : R_4$ в положение 1 : 100, а сопротивление резистора R_3 установить равным примерно 3000 Ом. Подключить к схеме источник питания,

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 эммитируемые 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

$$\Phi = \frac{2RI_5\Delta I_3}{I} - 2k(T - T_0),$$

используя усредненные значения ΔI_3 , 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 Бугулавского—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»:

$$I = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0}{9} \frac{l}{r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} U^{3/2}, \quad (1)$$

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 .