

## РАБОТА 2.07

### Термоэлектронная эмиссия в вакуумном диоде

#### Цель работы

1. Измерить вольт-амперную характеристику (ВАХ) вакуумного диода.
2. По положительному участку ВАХ ( $U > 0$ ) выделить область действия "закона трех вторых".
3. По отрицательному участку ВАХ ( $U < 0$ ) определить температуру катода.

#### Введение

Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов поверхностью нагретых тел. Этот эффект наиболее сильно проявляется в материалах, имеющих высокую концентрацию свободных электронов.

Термоэлектронную эмиссию удобно изучать в вакуумном диоде, схематически изображенном на рис. 7.1а. Диод конструктивно выполнен как откачанный стеклянный баллон, внутрь которого помещен цилиндрический анод. По оси цилиндра проходит накаливаемая током вольфрамовая нить - катод, непрерывно испускающий электроны.

Если включить диод в замкнутую электрическую цепь, как показано на рис. 7.1б, т.е. подать на анод положительное напряжение по отношению к катоду, то в цепи возникнет ток, обусловленный перемещением электронов от катода к аноду и далее по внешней цепи. Поддача на анод отрицательного напряжения приводит к резкому уменьшению тока.

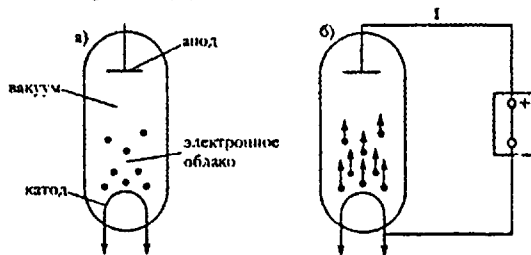


Рис 7.1. Условное изображение вакуумного диода: (а) - в отсутствие напряжения, (б) - при положительном напряжении на аноде

Зависимость тока  $I$  через диод от приложенного напряжения  $U$  - вольт-амперная характеристика - для положительного напряжения на аноде приведена на рис. 7.2а. Она требует пояснений. Казалось бы, анодный ток определяется только количеством электронов, испущенных катодом в единицу времени, и поэтому ток не должен зависеть от напряжения, поскольку в

установившемся режиме через любые сечения электрической цепи проходит одно и то же количество электронов. Так и происходит при больших значениях напряжения  $U$ , в области насыщения ВАХ. Однако при уменьшении напряжения величина тока убывает. Почему?

Рассмотрим сначала область насыщения. Увеличение температуры катода приводит к росту числа излучаемых из катода в единицу времени электронов, вследствие чего ток насыщения растет (рис. 7.26).

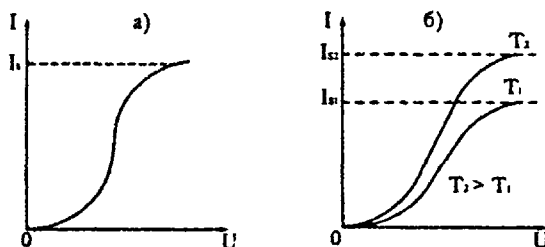


Рис. 7.2. Вольт-амперная характеристика диода для  $U > 0$ :  
(а) - общий вид, (б) - при различных температурах катода

Зависимость плотности тока насыщения  $j_s = I_s/S_k$  ( $I_s$  - ток насыщения,  $S_k$  - площадь поверхности катода) от температуры катода  $T$  описывается формулой Ричардсона-Дэшмана (вывод формулы см. в приложении II.1):

$$j_s = AT^2 \exp(-\Phi/kT), \quad (7.1)$$

где  $\Phi$  - работа выхода электрона,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана,  $A$  — постоянная, теоретическое значение которой равно  $1,2 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>К<sup>2</sup>.

Работа выхода  $\Phi$  у разных материалов различна. Для чистого вольфрама  $\Phi = 7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж. Внесение в вольфрамовый образец окислов других металлов может в тысячи раз увеличивать ток эмиссии катода за счет значительного уменьшения работы выхода. Объясняется это тем, что добавка как бы "обволакивает" поверхность катода, создавая одноатомный слой вещества с работой выхода, меньшей, чем у вещества катода. Поэтому окисированные вольфрамовые катоды широко применяются в приборах, использующих явление термоэлектронной эмиссии.

Вернемся к ВАХ (рис. 7.2а). Для того чтобы понять причину уменьшения тока при уменьшении напряжения необходимо учесть влияние облака пространственного заряда вблизи катода. Это облако образуется из-за того, что электроны не успевают покинуть область около катода. Существование облака

приводит к тому, что часть испущенных катодом электронов возвращается на катод, а это приводит к уменьшению общего тока. С увеличением  $U$  вылетевшие из катода электроны быстрее покидают прикатодную область, пространственный заряд уменьшается, и ток растет. Теоретический анализ этого процесса (см. приложение П.2) показывает, что зависимость тока от напряжения при  $U > 0$  описывается "законом трех вторых" Богуславского-Лэнгмюра:

$$I = CU^{3/2}, \quad (7.2)$$

где  $C$  — постоянная, определяемая геометрической формой и размерами диода.

При выводе (7.2) предполагалось, что начальная скорость покидающих катод термоэлектронов равна нулю. На самом деле, она определяется температурой катода (тысячи градусов) и составляет в среднем десятки тысяч метров в секунду. Наличие у термоэлектронов начальной скорости объясняет тот факт, что при  $U=0$  через диод все равно течет ток (рис. 7.3; на этом графике масштаб по оси токов сильно увеличен по сравнению с графиком рис. 7.2). Следовательно, закон (7.2) не выполнен вблизи нуля напряжений, ибо дает  $I=0$ .

Закон (7.2) также нарушается при достаточно больших положительных напряжениях на аноде - в области перехода к насыщению тока - когда внешнее электрическое поле значительно превышает поле, созданное облаком объемного заряда. Выделение интервала напряжений, в котором справедлив "закон трех вторых", входит в задачу данной лабораторной работы.

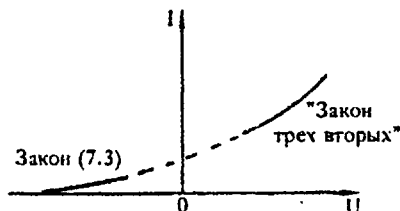


Рис. 7.3. Вольт-амперная характеристика диода вблизи нуля

Для отрицательных (запирающих) анодных напряжений величина тока определяется сравнительно небольшим количеством электронов, кинетическая энергия которых превышает высоту потенциального барьера, возникающего в промежутке катод-анод. При малых по модулю отрицательных напряжениях на вылетевшие электроны сильное тормозящее влияние оказывает объемный заряд вблизи катода, который увеличивает действие внешнего электрического поля. С

увеличением запирающего напряжения  $|U|$  объемное облако уменьшается - основная часть электронов возвращается обратно на катод - и его влиянием можно пренебречь. В этом случае приближенную формулу для тока диода можно получить, если дополнительный потенциальный барьер  $e|U|$  добавить к работе выхода в формуле Ричардсона-Дэшмана:

$$I = S_s A T^2 \exp\left(-\frac{\Phi + e|U|}{kT}\right) = I_s \exp\left(-\frac{e|U|}{kT}\right) \quad (7.3)$$

Согласно (7.3) ток экспоненциально убывает с увеличением запирающего напряжения. Логарифмируя (7.3), получаем:

$$\ln I = \ln I_s - a|U|, \quad (7.4)$$

где  $a = e/kT$  — угловой коэффициент линейной зависимости  $\ln I = f(|U|)$ , который определяется температурой катода.

Отметим некоторые особенности реального диода 2Д2С, исследуемого в лабораторной работе. Во-первых, сильный нагрев катода приводит к его распылению, то есть вещество катода путем возгонки из твердого состояния переходит в газообразное и оседает на аноде и стенках. Наиболее интенсивно распыляется примесь, находящаяся на поверхности катода. Процентное содержание ее в поверхностном слое катода уменьшается. При этом, естественно, растет работа выхода из катода, что приводит к уменьшению тока через диод - диод как бы "старее". Например, ток насыщения исследуемого диода при длительной эксплуатации (порядка 500 часов) убывает от 40 до нескольких миллиампер.

Во-вторых, в диоде 2Д2С использован катод прямого накала, т.е. он разогревается током, текущим вдоль катода. Значит, согласно закону Ома, различные участки катода имеют разные потенциалы относительно анода (разность потенциалов между концами катода составляет 1,5 В). Это приводит к неучтенным теоретически искажениям ВАХ диода, особенно значительным вблизи  $U=0$ . По этой причине участок ВАХ вблизи нуля напряжении проведен на рис. 7.3 штриховой линией.

### Экспериментальная установка

Схема электрических цепей установки представлена на рис.7.4. Исследуемый диод и основные элементы схемы смонтированы на рабочей плате, находящейся на рабочем столе. Источники питания и измерительные приборы подключены к плате с помощью соединительных проводов.

Источник питания G1 напряжением 1,5 В служит для нагрева катода.

Делитель  $R1, R2$  собран из одинаковых резисторов и использован для смещения падения напряжения на диоде: концы катода имеют напряжения  $\pm 0,75$  В, средняя точка катода заземлена. Такое включение уменьшает искажение ВАХ диода.

Для подачи анодного напряжения использована цепь, включающая в себя источники питания  $G2$  и  $G3$ , переключатели  $SA1$  и  $SA2$ , а также переменные резисторы - потенциометры  $R3$  и  $R4$ . Источник  $G2$  обеспечивает напряжения в интервале 15 - 200 В. Напряжение от  $G2$  подается на диод, когда переключатель  $SA1$  находится в положении 1 (на плате это положение переключателя отмечено надписью "Ток насыщения"). При этом установка нужного напряжения осуществляется ручками ступенчатой и плавной регулировки на лицевой панели источника  $G2$  (универсальный источник питания УИИ-2, описание см. в [1]).

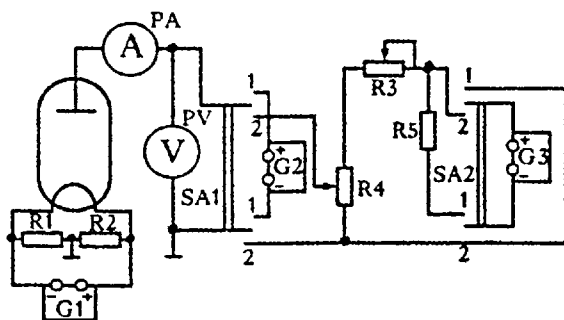


Рис. 7.4 Электрическая схема экспериментальной установки

Во всех других интервалах напряжений использован источник питания  $G3$ , который подключен к диоду при установке переключателя  $SA1$  в положение 2 ("малые токи"). При этом, чтобы подать на диод положительное напряжение от 0 до 15 В, следует установить переключатель  $SA2$  в положение 1 "Прямой ток". Регулировка напряжения в этом интервале осуществляется потенциометрами  $R3$  ("Грубо") и  $R4$  ("Плавно"). Чтобы подать на диод отрицательное (запирающее) напряжение, переключатель  $SA2$  устанавливают в положение 2 ("Обратный ток"). Регулировку отрицательного напряжения производят теми же потенциометрами  $R3$  к  $R4$ . Резистор  $R5$  ограничивает диапазон регулировки отрицательных напряжений.

Снятие ВАХ диода, т.е. совместное измерение напряжения  $U$  и тока  $I$  через диод, производят с помощью вольтметра  $PV$  и амперметра  $PA$ .

### Проведение эксперимента

1. Ознакомьтесь с общими правилами техники безопасности.

2. Подготовьте установку к работе, проверив подключение к плате измерительных приборов и источников питания. Найдите переключатели SA1 и SA2, а также соответствующие ручки регулировки, обеспечивающие установку напряжения в разных диапазонах. Включите сетевые тумблеры измерительных приборов и источника G1, дайте им прогреться 5-10 минут. Выведите ручки регулировки выходного напряжения G2 (УИП-2) на минимум. Включите источники G2 и G3.

3. Переходите к снятию положительной ветви ВАХ. Сначала следует использовать источник питания G3 (переключатель SA1 — в положение 2 “малые токи”, SA2 — в положение 1 “Прямой ток”). Рекомендуемый шаг изменения напряжения в этом диапазоне 2 - 3 В. При достижении 15 В нужно перейти на источник G2 (SA1 — в положение 1 “Ток насыщения”). В области применимости “закона трех вторых” (примерно до 60 В) шаг изменения напряжения равен 4-5 В, при более высоких напряжениях - 10-20 В.

Повышая напряжение на диоде от 0 до 200 В, измеряйте одновременно падение напряжения  $U$  и ток диода  $I$ . Показания измерительных приборов заносите в левую часть таблицы 7.1.

Таблица 7.1 Вольт-амперная характеристика вакуумного диода

№ опыта	Прямая ветвь ВАХ			Обратная ветвь		
	$U_{пр}, В$	$I_{пр}, мА$	$U_{пр}^{3/2}, В$	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, мкА$	$\ln I_{обр}$
1						

4. Для снятия обратной ветви ВАХ установите переключатель SA1 в положение 2 “малые токи”, SA2 - в положение 1 “Обратный ток”. Потенциометрами R3 и R4 установите  $U=0 В$  и измерьте “нулевой” ток  $I$ . Увеличивая запирающее напряжение, измеряйте одновременно напряжение  $U$  и ток диода  $I$ . Показания измерительных приборов вписывайте в правую часть таблицы 7.1.

**Примечание.** При увеличении запирающего напряжения ток диода уменьшается очень быстро (экспоненциально), и поэтому необходимо последовательно переходить на все более чувствительные диапазоны измерений амперметра РА, вплоть до самого чувствительного. Будьте осторожны при переключениях диапазонов, не допуская перегрузки прибора!

Учитывая методику дальнейшей обработки обратной ветви ВАХ, в интервале  $0 < |U| < 2$  В используйте шаг изменения напряжения 0,5 В, а при  $|U| > 2$  В – 0,2 В.

### Обработка результатов

1. По результатам табл. 7.1 постройте график 1 - положительную ветвь ВАХ диода. Из графика оцените ток насыщения  $I_s$  как предельное значение, к которому стремится ток диода при больших напряжениях. Сравните полученное значение с номинальной величиной 40 мА и сделайте вывод о "старении" катода.

2. В области  $0 < U < 60$  В вычислите  $U^{3/2}$  и занесите в таблицу 7.1. Постройте график 2 – зависимость тока диода  $I$  от  $U^{3/2}$ . Выделите область применимости "закона трех вторых", в которой экспериментальные точки ложатся на прямую, проходящую через начало координат. Проведите такую "усредняющую" прямую, оцените значение постоянной  $C$  в (7.2). Укажите в отчете примерные границы этой области (по напряжениям).

3. Постройте график 3 — отрицательную ветвь ВАХ диода.

4. По участку экспоненциального спада тока найдите температуру катода. Для этого нанесите экспериментальные точки на вспомогательный график 4 - зависимость  $\ln I$  от  $|U|$  в области значений  $|U| > 2$  В. Выделите область линейности этой зависимости. Проведите "усредняющую" прямую. Найдите константу  $a$  этой линейной зависимости одним из методов, описанных в [2]: методом наименьших квадратов или методом парных точек.

По величине константы вычислите температуру катода  $T$ .

### Контрольные вопросы

1. Объясните вид ВАХ вакуумного диода качественно в области положительных и отрицательных напряжений.

2. Почему происходит увеличение эмиссии термоэлектронов при введении в вольфрам добавок других материалов?

3. Чем вызвано "старение" катода?

5. Каким образом в лабораторной работе определяют температуру катода?