

Лабораторная работа 2.05

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА ПО ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА

А.М. Попов

Цель работы: изучение вольт-амперных характеристик вакуумного диода и определение удельного заряда электрона на основании закона Богуславского – Ленгмюра.

Задание: снять вольт-амперные характеристики вакуумного диода при различных значениях напряжения накала и построить соответствующие графики. Для одной из зависимостей, выделив на ней область пространственного заряда, построить для этой области график функции $I_a = f(U_a^{3/2})$. Рассчитать угловой коэффициент C линейного участка этого графика, а затем модуль удельного заряда электрона e/m .

Подготовка к выполнению лабораторной работы: изучить материал, изложенный в рекомендованной литературе; прочитать данное описание лабораторной работы; оформить конспект к отчёту; ознакомиться с экспериментальной установкой и ответить на контрольные вопросы.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц - СПб.: Издательство «Лань», 2019, гл. 9, §§ 60, 61.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2020, гл. 13, §§ 104, 105.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называется *термоэлектронной эмиссией*?
2. Что такое *работа выхода* электрона из металла?
3. Каково устройство вакуумного диода?
4. Что называется *вольт-амперной характеристикой* диода?
5. Как образуется *пространственный заряд*?
6. Почему ток в диоде не подчиняется закону Ома?
7. Что такое *ток насыщения*, чем он определяется?
8. При каких условиях выполняется закон Богуславского–Ленгмюра («закон $3/2$ »)?
9. При каких допущениях и как теоретически выводится закон Богуславского–

Ленгмюра?

10. Чему равно теоретическое значение коэффициента пропорциональности C в законе Богуславского–Ленгмюра для плоского диода?
11. Как находят значение коэффициента пропорциональности закона Богуславского–Ленгмюра в данной работе?
12. Как в данной работе определяют удельный заряд электрона?
13. Нарисуйте схему экспериментальной установки.
14. Расскажите порядок выполнения работы.

Теоретическое введение

Вакуумный диод представляет собой вакуумную стеклянную колбу, которая содержит два электрода (рис. 1): подогреваемый катод 1, который испускает электроны за счёт *термоэлектронной эмиссии*, и анод 2, собирающий термоэлектроны.

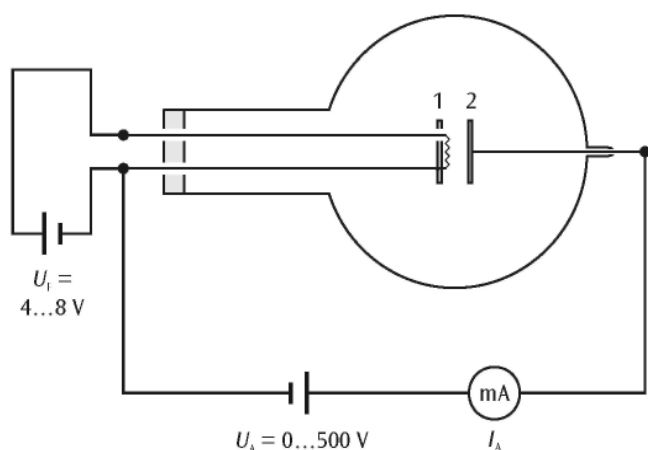


Рис. 1

При холодном катоде ток в цепи не возникает, так как сильно разреженный газ внутри диода не содержит заряженных частиц. Если же раскалить катод, пропуская через его подогреватель электрический ток, то с помощью микроамперметра можно обнаружить, что в цепи анода появляется ток даже в отсутствие

положительного, по отношению к катоду, напряжения на аноде. Если приложить такое напряжение, то анодный ток начинает увеличиваться с ростом напряжения. Если изменить знак разности потенциалов между катодом и анодом, то тока в цепи не будет, как бы мы не раскаляли катод.

Таким образом, ток в цепи анода возникает за счёт испускания отрицательно заряженных частиц сильно разогретым катодом. Это явление объясняется тем, что в металлах имеются электроны проводимости, участвующие в тепловом движении. Вблизи поверхности металла существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Эти силы возникают вследствие притяжения между электронами и положительными ионами кристаллической решётки, т. е. вблизи поверхности металла существует так называемый потенциальный барьер. Для того чтобы выйти из металла, электрон должен совершить определённую работу по преодолению этого барьера за счёт полученной извне энергии. Минимальная энергия,

которую надо сообщить электрону, чтобы он смог покинуть поверхность металла называется *работой выхода* $A_{\text{вых}}$.

При комнатных температурах практически все электроны в металлах не обладают кинетической энергией достаточной для того чтобы его покинуть. Однако

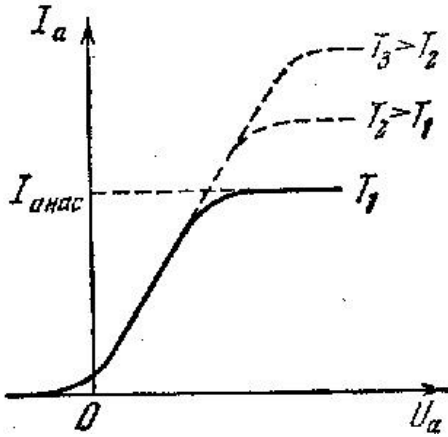


Рис. 2

им можно сообщить дополнительную энергию. В этом случае часть электронов металла получает возможность покинуть металл, и мы наблюдаем явление испускания электронов. Если электроны получают дополнительную энергию за счёт тепловой энергии тела при повышении его температуры, то явление испускания электронов называется *термоэлектронной эмиссией*.

Сила термоэлектронного тока в диоде зависит от величины потенциала анода относительно катода. Кривая, изображающая зависимость силы тока в диоде от анодного напряжения называется

вольт-амперной характеристикой диода. На рис. 2. приведены экспериментальные вольт-амперные характеристики вакуумного диода, соответствующие разным значениям температуры катода. Из рисунка видно, что когда потенциал анода равен нулю, сила тока через диод мала. При увеличении анодного напряжения U_a сила тока I_a сначала растёт, а затем, при некотором значении этого напряжения, достигает некоторого максимального значения $I_{a, \text{нас}}$, называемого *током насыщения* диода, и почти перестаёт зависеть от напряжения анода. Значения тока насыщения быстро увеличиваются при возрастании температуры катода. При этом увеличивается и то анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения.

Мы видим, что вольт-амперная характеристика вакуумного диода оказывается нелинейной, и, следовательно, вакуумный диод представляет собой пример проводника, который не подчиняется закону Ома.

Нелинейная зависимость тока диода от напряжения связана с тем, что при наличии термоэлектронной эмиссии в пространстве между катодом и анодом нахо-

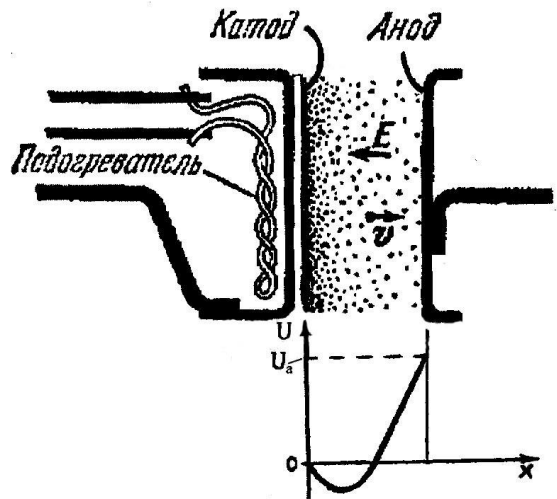


Рис. 3.

дятся электроны, которые образуют отрицательный *пространственный заряд*. Этот пространственный заряд существенно влияет на распределение потенциала в диоде. Если катод и анод представляют собой плоские пластины, параллельные друг другу, то, в отсутствие пространственного заряда (при холодном катоде), распределение потенциала между ними (плоский конденсатор) линейно. При наличии термоэлектронного тока, распределение потенциала изменяется (рис. 3).

Образующееся вблизи катода электронное облако приводит к тому, что в некоторой области пространства потенциал принимает отрицательные значения, и, под действием этого поля, часть электронов возвращается обратно в катод. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается и анодный ток увеличивается. В этой области значений анодного напряжения (область пространственного заряда) зависимость тока диода от потенциала анода довольно хорошо следует полученному теоретически Ленгмюром и Богуславским *закону трёх вторых*

$$I_a = CU_a^{3/2}, \quad (1)$$

где C - коэффициент, которой определяется геометрией электродов.

Теоретическое рассмотрение вопроса было проведено при следующих допущениях: начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, настолько малы, что можно считать их равными нулю; анодный ток далёк от насыщения; непосредственно у поверхности катода напряжённость электрического поля равна нулю.

Для плоского диода расчёт, проделанный в работе [2] даёт

$$C = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \frac{S\sqrt{2}}{d^2} \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (2)$$

где e - элементарный заряд (модуль заряда электрона), m - масса электрона, d - расстояние между катодом и анодом, S - площадь поверхности катода (равная площади поверхности анода), ε_0 - электрическая постоянная.

С учётом того, что для нашего диода $S = \pi D^2/4$, где D - диаметры катода и анода, из (2) получим

$$\frac{e}{m} = \frac{81C^2 d^4}{2\pi^2 \varepsilon_0^2 D^4}. \quad (3)$$

Когда потенциал анода становится настолько большим, что все электроны, испускаемые катодом, попадают на анод, анодный ток достигает своего максимального значения и практически перестаёт зависеть от анодного напряжения. Сила тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от материала катода и его температуры.

Описание аппаратуры и метода измерений

Вид экспериментальной установка представлен на рис. 4, а соответствующая принципиальная схема на рис. 5, где 1 – стабилизированный источник постоянных напряжений, 2 – вакуумный диод, 3 – вольтамперметр с зеркальной шкалой, 4 – цифровой миллиамперметр.

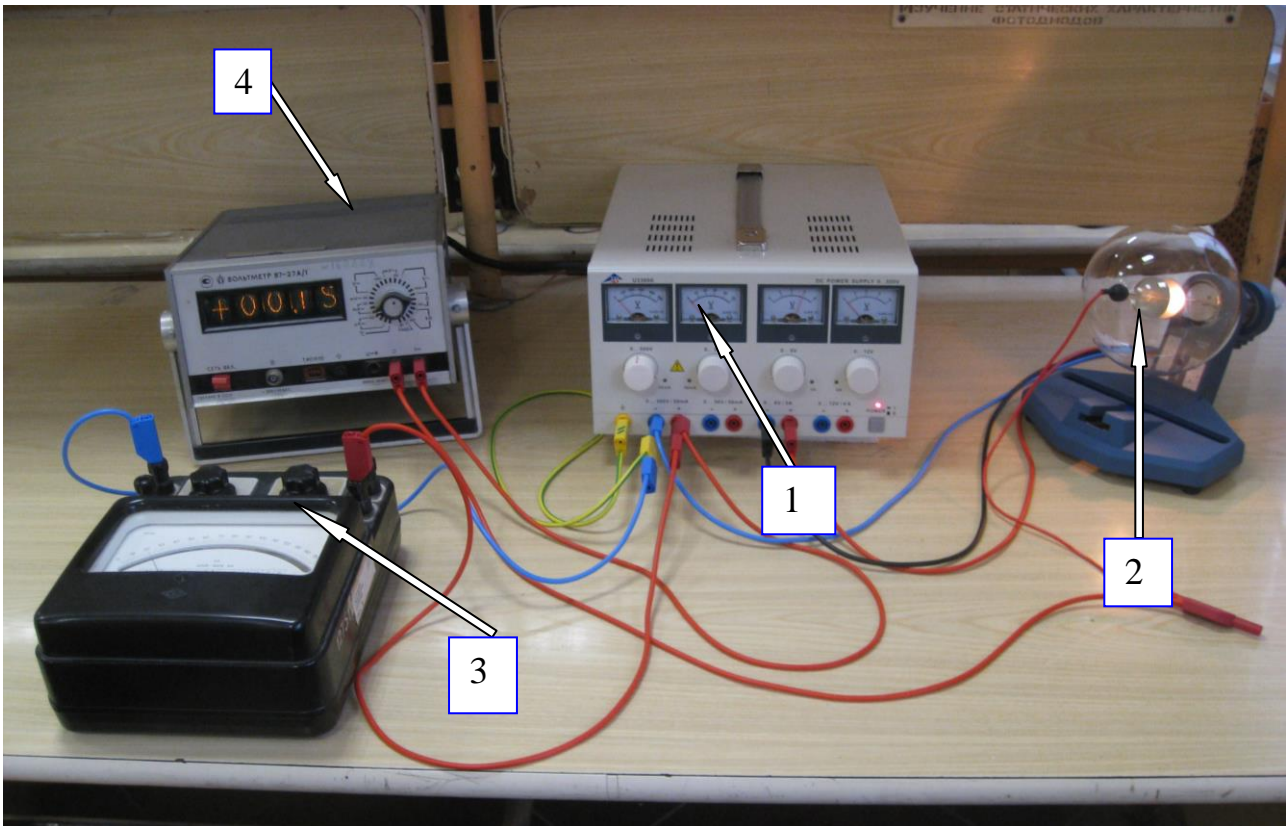


Рис. 4

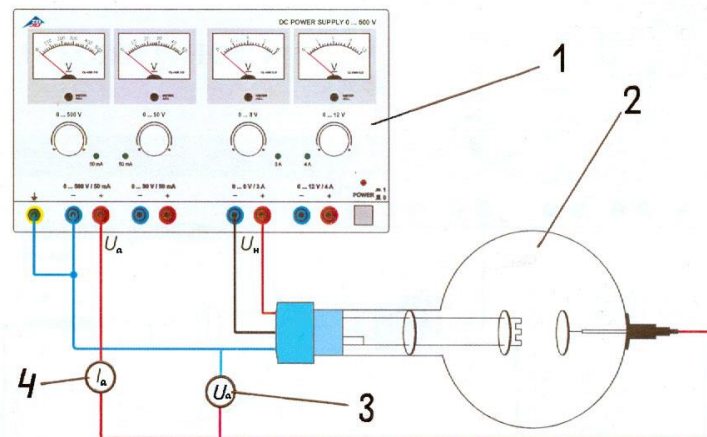


Рис 5

Стабилизированный источник 1 служит для питания подогревателя катода U_H и как источник анодного напряжения U_a . Вакуумный диод 2 представляет собой вакуумную стеклянную колбу, внутри которой на расстоянии $d = 2,6$ см расположены катод и анод – две круглые, параллельные, плоские пластины диаметром $D = 2,8$ см. Вольтамперметр 3 служит для измерения анодного напряжения U_a . В качестве измерителя тока диода в работе используется цифровой миллиамперметр 4.

Порядок выполнения работы

1. Вывести все регулировочные ручки источника напряжений до упора против часовой стрелки.
2. Проверить, по схеме, правильность соединений.
3. Включить источник напряжений и установить напряжение накала подогревателя катода 6,0 В.
4. Подождать 1 – 2 минуты, чтобы катод прогрелся.
5. Включить миллиамперметр.
6. Увеличивая анодное напряжение от 0 В до 280 В с шагом 10 В, измерить анодный ток, и занести измеренные значения в таблицу.

Таблица 1

$U_a, \text{ В}$	$U_H = 6,0 \text{ В}$	$U_H = 6,5 \text{ В}$	$U_H = 7,0 \text{ В}$	$U_a^{3/2}, \text{ В}^{3/2}$
	$I_a, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мА}$	
0				
10				
20				
...				

7. Повторить сделанные в пункте 5 измерения ещё при двух напряжениях накала 6,5 В и 7,0 В и занести результаты в таблицу.
8. Закончив измерения вывести все регулировочные ручки источника напряжений до упора против часовой стрелки и выключить источник и миллиамперметр.

Обработка результатов измерений

1. На одном листе миллиметровой бумаги, по результатам таблицы, построить вольтамперные характеристики вакуумного диода при трёх значениях напряжений накала катода.

2. На отдельном листе миллиметровой бумаги, для области напряжений 0 – 100 В, построить график зависимости анодного тока диода от анодного напряжения в степени $3/2$ при напряжении накала 7,0 В.
3. Рассчитать экспериментальное значение коэффициента C закона $3/2$, как угловой коэффициент линейного участка этого графика.
4. По найденному значению C рассчитать модуль удельного заряда электрона по формуле (3).
5. Сравнить полученное значение удельного заряда с табличным значением.