

6. Приведите график зависимости излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны и сравните его с излучательной способностью вольфрама. Какие выводы можно из этого сделать?

7. Какие тела Кирхгоф называл абсолютно черными?

8. Сформулируйте и запишите закон Вина. Как связана мощность теплового излучения с поверхностью, на которой происходит излучение?

9. Сформулируйте и запишите закон сохранения потока при излучении точечных тел.

10. Как можно трансформировать закон Стефана – Больцмана для излучения нечерных тел?

11. Расскажите о методике измерения температуры абсолютно черных тел пирометром.

12. Для чего в пирометре предназначена фотометрическая лампочка? Дымчатый фильтр? Красный светофильтр?

13. Дайте определение коэффициента яркости.

14. Что такое характеристическая температура пирометра?

15. Запишите выражение, связывающее яркостную температуру пирометра с истинной температурой тела.

16. Сформулируйте энергетические характеристики осветительных приборов, нагреваемых электрическим током.

17. Как зависит энергетическая светимость абсолютно черного тела от температуры?

18. Прямые измерения каких параметров вносят наибольшую погрешность в конечный результат при измерении параметра μ ? Что нужно сделать для того, чтобы ее уменьшить?

603. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

603.1. Цель работы

Изучение законов внешнего фотоэффекта; исследование вольт-амперных характеристик вакуумного фотоэлемента; определение постоянной Планка.

603.2. Разделы теории

Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Работа выхода. Применение фотоэффекта. [1. Гл.2, §9]; [2. Гл.IV, §201 – 204]

603.3. Приборы и принадлежности

Экспериментальная установка. Вакуумный фотоэлемент. Источник света. Светофильтры. Источник питания. Регистрирующие приборы.

603.4. Теоретическое введение

Внешний фотоэффект – это испускание электронов (фотоэлектронов) с поверхности тела под воздействием света. Фотоэлектроны при движении во внешнем электрическом поле создают фототок. Зависимость этого фототока от напряжения на фотоэлементе нелинейна. Для исследования внешнего фотоэффекта используют вакуумные фотоэлементы. Фотоэлемент состоит из стеклянной трубки – колбы, в которой создан высокий вакуум. Часть внутренней поверхности колбы покрыта тонким слоем металла, который служит фотокатодом. В центре колбы расположен анод. Электроны, вырываемые светом из катода, устремляются под действием электрического поля к аноду. Электрический ток, обусловленный этими электронами, называется фототоком. Фототок увеличивается при увеличении напряжения лишь до определенного предельного значения – фототока насыщения I_n . Особенностью вольт - амперной характеристики (ВАХ) фотоэлемента (рис.603.1) является

наличие тока, темнового тока при нулевой разности потенциалов (часть электронов достигает анода).

По закону Столетова, при неизменном спектральном составе света, падающего на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности E_3 катода:

$$I_H \sim E_3.$$

При подаче на анод фотоэлемента отрицательного напряжения фототок постепенно убывает, обращаясь в нуль при некотором напряжении, называемом запирающим. Существование фототока при отрицательных напряжениях на аноде означает, что фотоэлектроны вылетают из катода с некоторой, вообще говоря, различной скоростью (кинетической энергией) и это распределение скорости зависит от частоты падающего, но не от его интенсивности. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов v_{\max} связана с задерживающей разностью потенциалов U_3 соотношением

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e U_3, \quad (603.1)$$

где e и m – заряд и масса электрона соответственно.

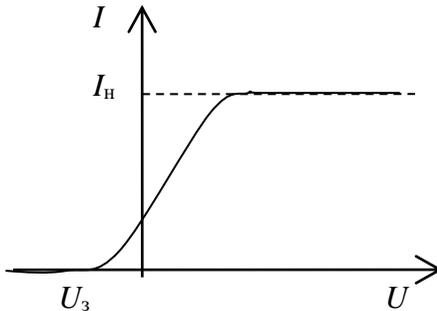


Рис. 603.1

Для каждого фотокатода существует красная граница внешнего фотоэффекта – максимальная длина световой волны λ_0 , при которой еще возможен фотоэффект. Длина волны λ_0 зависит от материала фотокатода и состояния его поверхности.

Красная граница фотоэффекта связана с работой выхода электронов $A_{\text{ВЫХ}}$ соотношением

$$hc/\lambda_0 = A_{\text{ВЫХ}}, \quad (603.2)$$

где h и c – соответственно постоянная Планка и скорость света в вакууме.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, отображающее закон сохранения энергии, имеет вид

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{1}{2} m\nu^2_{\text{max}},$$

или с учетом (603.1)

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + eU_3. \quad (603.3)$$

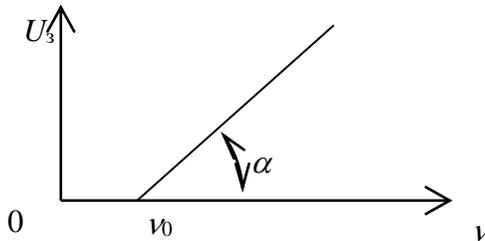


Рис.603.2

Зависимость задерживающей разности потенциалов U_3 от частоты ν света

$$U_3 = (h/e)\nu - A_{\text{ВЫХ}}/e$$

есть уравнение прямой линии (рис. 603.2). Экстраполяция прямой на рис. 603.2 до пересечения с осью абсцисс дает граничную частоту $\nu_0 = A_{\text{ВЫХ}}/h$ фотоэффекта, а тангенс угла наклона прямой к оси частот

$$\text{tg } \alpha = dU_3/d\nu = h/e$$

определяется только постоянной Планка и зарядом электрона.

Запишем уравнение Эйнштейна для частот ν_1 и ν_2 :

$$h\nu_1 = A_{\text{ВЫХ}} + eU_{31}, \quad (603.4)$$

$$h\nu_2 = A_{\text{ВЫХ}} + eU_{32}. \quad (603.5)$$

Вычитая из уравнения (603.4) уравнение (603.5), получим формулу для расчета постоянной Планка:

$$h = \frac{e(U_{з1} - U_{з2})}{\nu_1 - \nu_2}. \quad (603.6)$$

603.5. Описание лабораторного стенда

Для измерения основных свойств фотоэффекта используется лабораторный стенд, упрощенная функциональная схема которого приведена на рис. 603.3.

Стенд состоит из фотоэлемента ФЭ, источника света на лампе L, стабилизированных источников питания ИП1 и ИП2 на +200 В и –2 В соответственно, переключателя напряжения S3 «ПРЯМОЕ 0... 200 V» – «ОБРАТНОЕ 0...2 V», потенциометров R1 – «ГРУБО» и R2 – «ТОЧНО», с помощью которых производится установка напряжения на аноде фотоэлемента $U_{фэ}$, цифрового вольтметра PV1, измеряющего это напряжение, измерителя тока через ФЭ $I_{фэ}$, состоящего из цифрового вольтметра PV2, резистивных шунтов R3, R4, R5 и переключателя S4 – «ТОК ФЭ», имеющего три положения «2 μ А», «20 μ А» и «200 μ А», источника питания ИП3, необходимого для питания

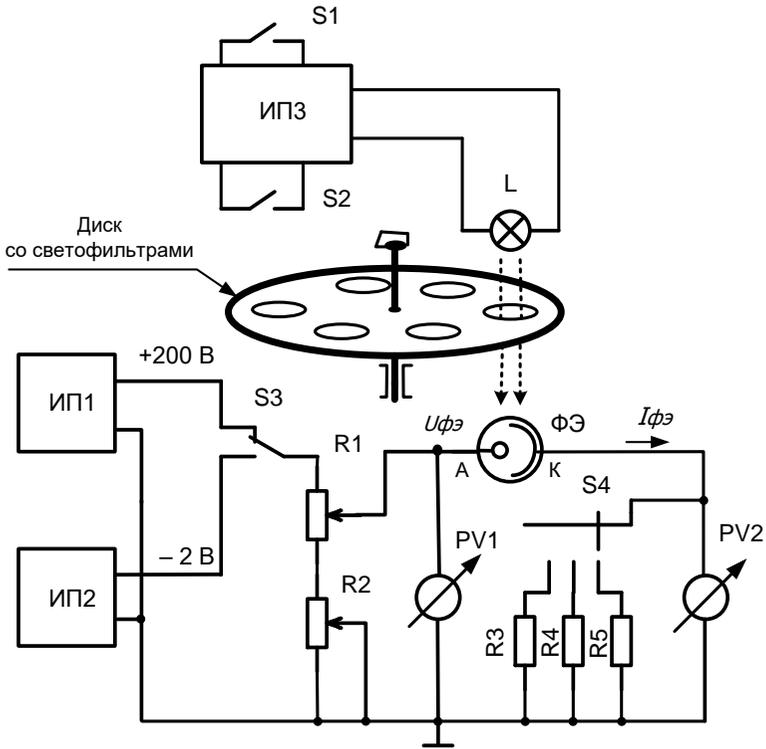


Рис. 603.3

лампы L с установленными в нём переключателями $S1$, $S2$ «СВЕТОВОЙ ПОТОК», с помощью которых можно изменять напряжение питания лампы, а следовательно, и световой поток, проходящий через соответствующий светофильтр и попадающий на фотоэлемент. Светофильтры установлены на диске, который можно вращать с помощью переключателя «СВЕТОФИЛЬТР», выведенного на переднюю панель. Устанавливая диск в соответствующее положение, т.е. устанавливая на пути светового потока различные светофильтры, можно исследовать зависимость фототока от длины волны или частоты света.

Стенд также содержит сетевой трансформатор, батареи для питания цифровых вольтметров, вентилятор для охлаждения

лампы и другие узлы, не показанные на схеме.

Передняя панель стенда показана на рис. 603.4.

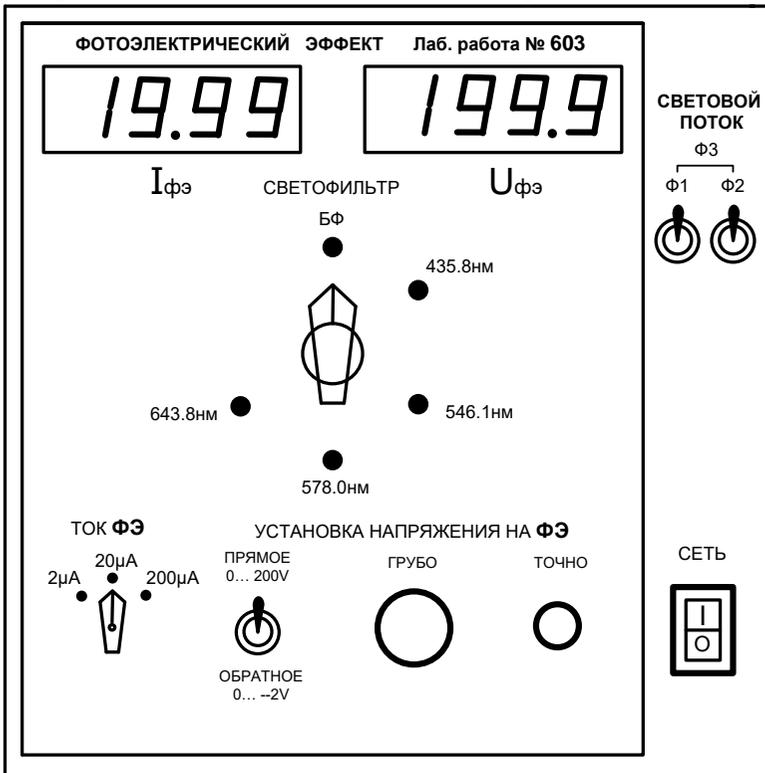


Рис. 603.4

В верхней части панели находятся отсчётные индикаторы цифровых вольтметров PV1 – измерителя напряжения $U_{фэ}$ и PV2 – измерителя тока $I_{фэ}$.

В центре панели находится переключатель светофильтров, с помощью которого можно вращать диск со светофильтрами. Длины волн фильтров указаны для соответствующих положений переключателя. В положении «БФ» фильтр отсутствует.

В нижней части панели находится переключатель пределов измерителя тока ФЭ «ТОК ФЭ», имеющий три положения «2 мА», «20 мА» и «200 мА», причём при переключении диапазонов изменяется и положение запятой на индикаторе

цифрового измерителя тока.

В нижней части панели также находятся элементы необходимые для установки напряжения на ФЭ: переключатель «ПРЯМОЕ 0... 200 V», «ОБРАТНОЕ 0...2 V», потенциометры, которыми устанавливают напряжение «ГРУБО» и «ТОЧНО», при этом отсчет величины напряжения производится по индикатору цифрового измерителя напряжения. При переключении с прямого напряжения на обратное изменяются пределы цифрового вольтметра, положение запятой на его индикаторе и знак полярности.

В верхней правой части панели находятся переключатели величины светового потока. Если левый переключатель находится в верхнем положении, то будет включён световой поток Φ_1 , а при включённом правом переключателе световой поток -- Φ_2 . Если включить оба переключателя, то световой поток будет Φ_3 , причём

$\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$. Если оба переключателя находятся в нижнем положении, то лампа выключается.

В нижней правой части панели находится выключатель «СЕТЬ» с подсветкой во включённом состоянии.

На задней панели стенда находится сетевой предохранитель и ввод сетевого шнура. Питание стенда производится от сети переменного тока 220 В с частотой 50 Гц. Цифровые приборы, установленные в стенде питаются от батарей 9 В.

Внимание! Диск со светофильтрами имеет относительно большой диаметр и обладает большой инерционностью, поэтому для предотвращения повреждения стенда и для надежной фиксации диска в соответствующих положениях **необходимо плавно вращать ручку переключателя «СВЕТОФИЛЬТР».**

603.6. Методика снятия ВАХ фотоэлемента

Для снятия вольт-амперных характеристик ФЭ при различных величинах светового потока на ФЭ подают

напряжение постоянного тока и измеряют протекающий через него ток. При приложении положительного напряжения («прямого напряжения») на анод ФЭ снимается прямая ветвь ВАХ, а при подаче отрицательного напряжения («обратного напряжения») снимается обратная ветвь.

На рис. 603.5 представлены ВАХ, снятые при различных значениях световых потоков. Видно, что при увеличении светового потока ток, проходящий через ФЭ, увеличивается.

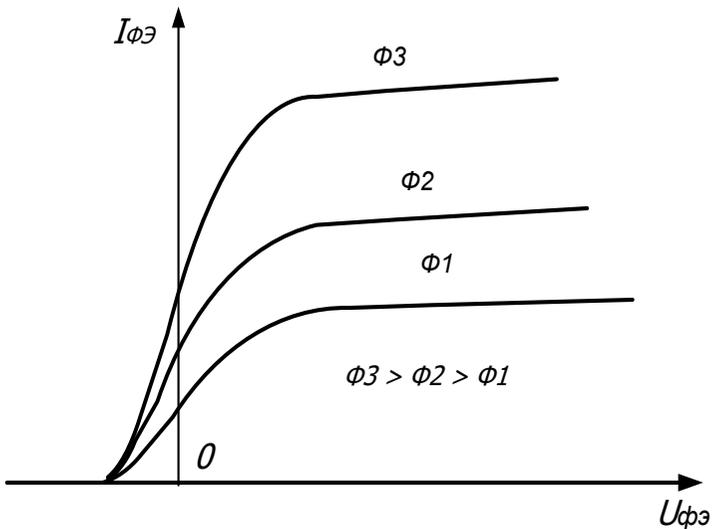


Рис. 603.5

В лабораторном стенде измерение ВАХ производится подачей напряжения с потенциометров R1 и R2 на анод ФЭ и измерением тока, протекающего через ФЭ $I_{\text{ФЭ}}$. Этот ток создает падение напряжения на одном из резисторов R3, R4 или R5. Это падение напряжения измеряется цифровым вольтметром PV2 и будет прямо пропорционально протекающему току. Пределы измерителя тока задаются переключателем S4.

Ток, протекающий через ФЭ, зависит от величины светового потока, падающего на ФЭ от лампы. В данном стенде величина светового потока задается изменением яркости

свечения лампы с помощью переключателей $S1$ и $S2$ «СВЕТОВОЙ ПОТОК», изменяющих напряжения питания лампы.

603.7. Порядок выполнения работы по измерению ВАХ

1. Установить потенциометры «УСТАНОВКА НАПРЯЖЕНИЯ на ФЭ» в крайнее левое положение, переключатель напряжения в положение «ПРЯМОЕ 0... 200 V», переключатель диапазонов измерителя тока в положение «200 μ A», переключатель светофильтров в положение «БФ». Переключатели светового потока – оба в нижнее положение.

Выключатель «Сеть» установить в выключенное состояние, нажав на нижнюю часть его клавиши.

2. Включить вилку сетевого шнура в розетку сети ~ 220 V.

3. Включить выключатель сеть, нажав на верхнюю часть его клавиши, при этом включится лампочка подсветки внутри сетевого выключателя, появятся цифры на индикаторах и будет слышен шум вентилятора охлаждения лампы.

4. Включить левым переключателем световой поток $\Phi 1$. При этом измеритель тока покажет начальный ток ФЭ (ток при $U_{\text{фэ}} = 0$).

5. Переключая диапазоны, измерителя тока и устанавливая с помощью потенциометров «ГРУБО» и «ТОЧНО» различные напряжения на ФЭ, произвести измерения прямой ветви ВАХ ФЭ. При этом надо учитывать инерционность измерительных приборов и производить плавную установку напряжения, а при регистрации тока ФЭ также необходимо учитывать время установления соответствующего прибора (как правило, 2...3 с).

6. Данные занести в таблицу. Устанавливать напряжение можно в пределах до 190 В, причём в начале ВАХ (0...10 В) напряжение устанавливаются через 1 В, а на участке до 50 В через 5 В, а далее через 10 В. Преподаватель может задать и другие режимы измерений.

7. Для измерения обратной ветви ВАХ ФЭ необходимо установить потенциометрами нулевое напряжение на ФЭ, а затем установить переключатель из положения «ПРЯМОЕ 0...200 В» в положение «ОБРАТНОЕ 0...2 В».

8. Изменяя с помощью потенциометров напряжение на ФЭ, регистрируют обратную ветвь ВАХ ФЭ. При этом надо учитывать, что измеритель напряжения показывает значение напряжения в единицах милливольт ($2 \text{ В} = 2000 \text{ мВ}$), а измеритель тока – в единицах наноампер ($2 \text{ мА} = 2000 \text{ нА}$).

9. Для снятия ВАХ при других величинах светового потока устанавливают соответствующие переключатели в положение Ф2 или Ф3 и повторяют измерения в соответствии с пп.5 – 8.

10. На миллиметровой бумаге построить графики ВАХ ФЭ для различных величин световых потоков.

603.8. Методика определения постоянной Планка

Одной из особенностей ФЭ является наличие тока при нулевом напряжении на ФЭ, обусловленного тем, что часть электронов, выбитая потоком света из катода, достигает анода. Для того чтобы этот ток прекратился, необходимо к ФЭ приложить обратное напряжение – задерживающий потенциал U_z . На рис. 603.6 представлены начальные участки – обратные ветви ВАХ ФЭ, снятые при различных длинах волн падающего света.

Видно, что задерживающий потенциал тем больше, чем меньше длина волны. Кроме того, сравнивая ВАХ, снятые для одной длины волны λ_3 , но для разных световых потоков Ф1 и Ф2, видим, что величина потока не влияет на величину задерживающего потенциала.

Для измерения задерживающего потенциала и определения постоянной Планка в лабораторном стенде используется освещение ФЭ световым потоком от лампы, прошедшим через светофильтр. Величина обратного напряжения, подаваемого на ФЭ, измеряется при токе, равном нулю. Измерения проводятся

при разных светофильтрах. Вычисления постоянной Планка производятся по формулам (603.4) – (603.6).

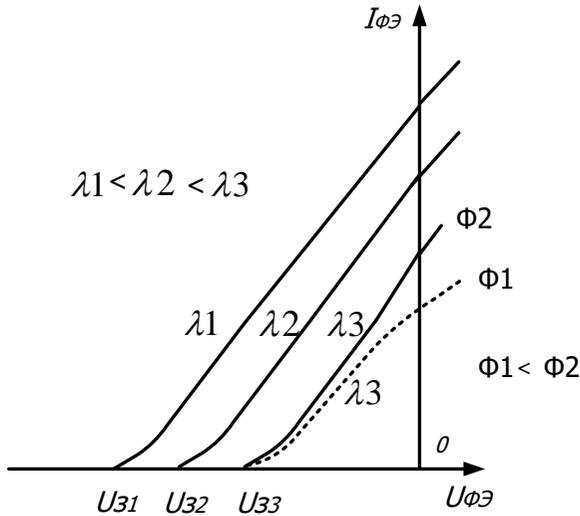


Рис. 603.6

603.9. Порядок проведения измерений задерживающего потенциала

1. Подготовить и включить стенд, выполнив пп. 1 – 3 из порядка выполнения работы по измерению ВАХ.

2. Если стенд уже включен, то, установив переключатель «СВЕТОФИЛЬТР» в одно из положений, переключатель «СВЕТОВОЙ ПОТОК» в положение «Ф3», переключатель установки напряжения на ФЭ в положение «ОБРАТНОЕ 0...2 В», а переключатель «ТОК ФЭ» в положение максимальной чувствительности – «2 μ А», необходимо медленно изменять напряжение на ФЭ до тех пор, пока ток, протекающий через ФЭ, не станет равным нулю. Это напряжение и есть величина задерживающего потенциала $U_{з1}$, соответствующего длине волны выбранного светофильтра λ_1 .

Повторить измерения 3 – 4 раза и вычислить среднюю величину $U_{з1}$.

3. Выбрав новый светофильтр с длиной волны λ_2 , аналогично определить величину задерживающего потенциала $U_{з2}$.

4. Для увеличения точности рекомендуется выбирать значения длин волн фильтров с максимальной разностью ($\lambda_1 - \lambda_2$).

5. При измерениях необходимо очень плавно менять напряжение на ФЭ и учитывать время установления цифровых приборов.

6. Пересчитав величины длин волн в соответствующие частоты, по формуле (603.6) определить постоянную Планка.

7. Оценить погрешность определения постоянной Планка.

Внимание! Для питания цифровых приборов стенда используется батарейное электропитание, поэтому для предотвращения разряда батарей необходимо по окончании измерений стенд немедленно отключить от сети!

Контрольные вопросы

1. В чем суть явления внешнего фотоэффекта?
2. Что такое задерживающий потенциал? От чего и как он зависит?
3. От чего зависит энергия фотоэлектронов?
4. Что такое красная граница фотоэффекта?
5. Запишите и объясните формулу Эйнштейна.
6. Какие законы Столетова не подтверждаются волновой теорией?

604. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ МОНОХРОМАТОРА