

Лабораторная работа 5.1.1

Фотоэффект

Симанович Александр
Б01-108

23.09.2023

Аннотация

В работе экспериментально подтверждено явление испускания электронов из металла под действием излучения оптической частоты (одноквантовый фотоэффект). Изучен фотоэлемент с материалом катода $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$. Зафиксированы особенности зависимости фототока от напряжения анод-катод. Определено значение постоянной Планка $\hbar = (1.07 \pm 0.05) \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Оценена работа выхода $W \sim 1.6$ эВ.

Теоретическое введение

Базовые принципы фотоэффекта

Подвергая поверхность фотокатода освещению можно обнаружить испускание электронов с поверхности катода. Данное явление называется одноквантовым фотоэлектрическим эффектом. Свойства фотоэффекта не имеют объяснения в рамках классической физики, но их обоснование существует в рамках квантовой физики. Для этого используется модель квантов света – фотонов.

Рассмотрим случай монохроматического излучения частотой ω . При взаимодействии фотона с электроном в веществе фотон может полностью поглотиться, передав энергию электрону:

$$\hbar\omega = E_{max} + W, \quad (1)$$

где W – работа выхода, E_{max} – максимальная энергия, которую может приобрести электрон.

Фотоэффект в металле

Рассмотрим распределение фотоэлектронов по энергии в металле.

Как известно, электроны в металлах могут легко перемещаться под действием электрического поля. Эти электроны являются валентными электронами металла; они слабо связаны с кристаллической решеткой. Поведение этих свободных электронов хорошо описывается моделью идеального газа.

Электроны являются фермионами, имея спин $+\frac{1}{2}$. Фермионы подчиняются принципу Паули: на одно квантовое состояние приходится не более двух фермионов с противоположными спинами. Из этого следует, что в потенциальной яме, образованной металлом, все электроны не могут расположиться на дне $E = 0$: они распределяются по разрешенным уровням до некоторой энергии E_F – энергии Ферми (см. 1). Образуется зона проводимости.

Энергия Ферми определяется концентрацией и составляет $(1 \div 10)$ эВ, намного превышая тепловую энергию электронов ≈ 25 мэВ. Поэтому влиянием температурных явлений можно пренебречь.

Для выхода электрону необходимо преодолеть притяжение к металлу – совершить *работу выхода*. Ее можно оценить как работу по разнесению электрона и его "изображения" на бесконечное расстояние: $W = \frac{e^2}{r_0}$.

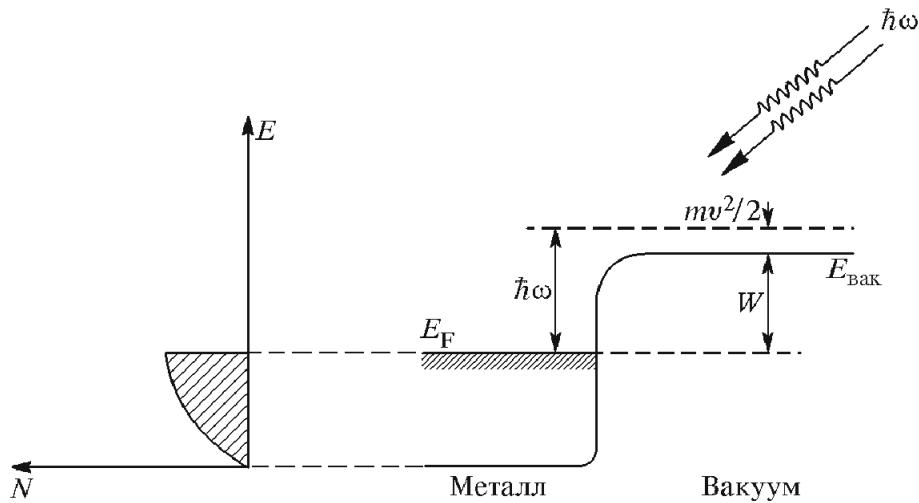


Рис. 1: Модель металла как потенциальной ямы с электронным газом. Слева от оси энергий: распределение электронов по энергиям. Справа от оси энергий: схема зон.

Таким образом, для выхода электрона из металла нужно совершить работу выхода W , равную разности потенциальной энергии электрона в вакууме $E_{\text{вак}}$ и энергии Ферми E_F . При этом фотоны, имеющие энергию $E > W$ могут выбивать электроны с более глубоких уровней. Этим объясняется распределение энергии электронов при фотоэффекте. Отметим, что квантовый выход металлов $\frac{N_{\text{электронов}}}{N_{\text{фотонов}}}$ мал, поскольку большая часть фотонов отражается.

Фотоэффект в полупроводниках

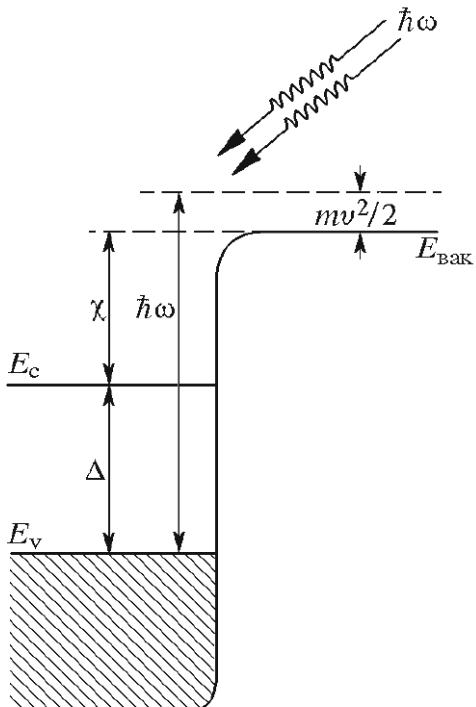


Схема зон в полупроводниках и металлах сильно различаются. В полупроводнике при абсолютном нуле валентные электроны полностью заполняют *валентную зону*. Особенностью полупроводников является *запрещенная зона*, которая отделяет валентную зону от зоны проводимости. Этим объясняется низкая проводимость полупроводников: проводящими являются электроны, которые попали в проводящую зону за счет тепло- или фотовоизбуждения.

Принципиальное описание фотоэффекта аналогично фотоэффекту в металлах, выполняется соотношение Эйнштейна:

$$\hbar\omega = \Delta + \chi + E_{\max}.$$

На рис. 2 приведены основные обозначения, используемые для описания зон полупроводника.

- E_v – потолок валентной зоны,
- E_c – дно зоны проводимости,
- $E_c - E_v = \Delta$ – ширина запрещенной зоны,
- $E_{\text{вак}} - E_c = \chi$ – электронное сродство.

Рис. 2: Модель полупроводника как потенциальной ямы.

Измерение энергии электронов

Для измерения энергии фотоэлектронов используются пара фотокатод-анод. Между ними создается *ускоряющий* ($V < 0$) или *задерживающий* ($V > 0$) потенциал.

При увеличении напряжения V фототок достигает насыщения: все фотоэлектроны достигают анода. При уменьшении напряжения существует точка $V = -V_0$ в отрицательной области напряжений, где фототок обнуляется: даже самые высокоэнергетичные электроны не могут преодолеть барьер. V_0 называется *потенциалом запирания*.

Таким образом, мы можем модифицировать (1):

$$eV_0 = \hbar\omega - W. \quad (2)$$

Если бы фотокатод был очень тонким ($\sim 10 \text{ \AA}$), зависимость (см. рис. 3) имела бы скачок возле $eV_0 = \hbar\omega - W$, так как почти все электроны бы имели одинаковые кинетические энергии. Но фотокатод имеет $10^2 \div 10^3$ атомных слоев в толщину, что видоизменяет зависимость на плавную.

В опыте ВАХ экстраполируется к нулевому току для оценки запирающего потенциала V_0 . Расчет для геометрии плоских параллельных анода и фотокатода дает

$$\sqrt{I} \propto (V_0 - V). \quad (3)$$

В работе опыты проводятся для различных частот ω . Из экстраполированных потенциалов запирания строится зависимость $V_0(\omega)$. В соответствии с (2):

$$V_0(\omega) = \frac{\hbar\omega - W}{e} \quad (4)$$

Из графика $V_0(\omega)$ можно определить постоянную Планка \hbar и работу выхода W .

Методика эксперимента

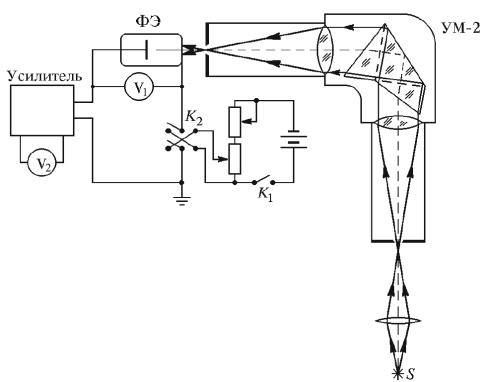


Рис. 4: Схема установки для изучения фотоэффекта.

В качестве источника света используется обыкновенная лампа накаливания. Свет фокусируется с помощью конденсора на входную щель монохроматора, который выделяет узкую спектральную полосу. После монохроматора свет попадает на фотокатод. Ток фотокатод-анод усиливается внутри фотоэлемента. Показания тока и потенциала запирания измеряются двумя вольтметрами.

Калибровка монохроматора

Спектральная линия, выделяемая монохроматором, выбирается с помощью лимба. Для проведения измерений необходима предварительная калибровка, позволяющая пересчитывать показания лимба в длину волны выделяемого излучения.

Для калибровки используется неоновая лампа (Л) и окуляр (5) (см. рис. 5). Неоновая лампа имеет известный дискретный спектр. Спектр наблюдается в окуляр монохроматора, установленный вместо фотоэлемента. Вращая лимб (7) можно выставить необходимую спектральную линию напротив указателя (10). Таким образом собирается набор точек $\lambda_n(N)$ и экстраполируется до зависимости $\lambda(N)$.

Фотоэлемент

Фотоэлемент представляет собой стеклянный баллон (25x30 мм), откачанный до высокого ваккума. Внутри расположен фотокатод – тонкая пленка $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$, и анод, напыленный на стекло напротив фотокатода. Протекающие через фотоэлемент токи очень малы, поэтому используется усилитель постоянного тока. Усилитель смонтирован в один корпус с фотоэлементом для уменьшения наводок.

Отметим, что из-за использования разных веществ проводников возникает контактная разность потенциалов. Она влияет на определение W – работы выхода, но не оказывает влияния на измерение \hbar (см. формулу 2).

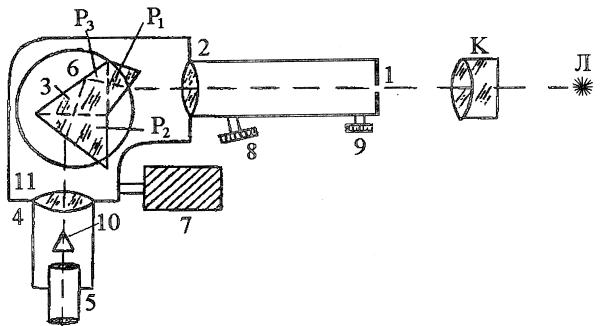


Рис. 5: Схема монохроматора.



Рис. 6: Фотоэлемент Ф25.

Результаты

Проводим калибровку монохроматора в соответствии с методикой, описанной выше.

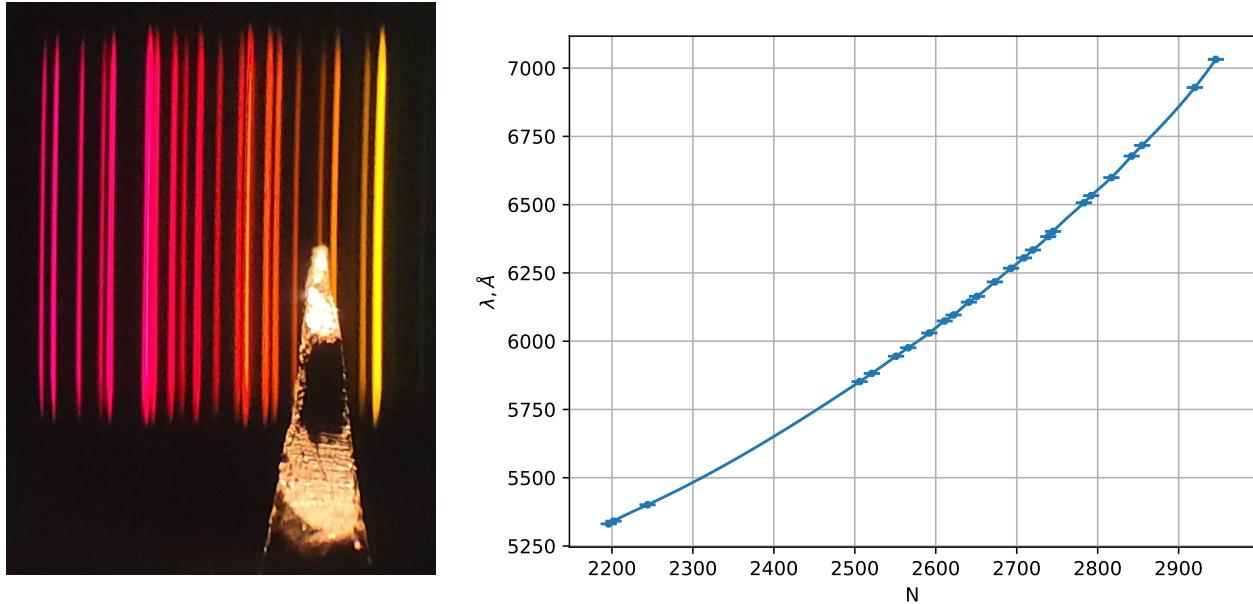


Рис. 7: Фотография полос и указателя в окуляре монохроматора (слева).
Зависимость выбранной полосы неона от положения лимба (справа).

Так как нас не интересуют конкретные значения I будем измерять напряжение $U_I \sim I$. Измеряем зависимости $U_I(V)$ для различных длин волн. Для наглядности построим графики для двух длин волн:

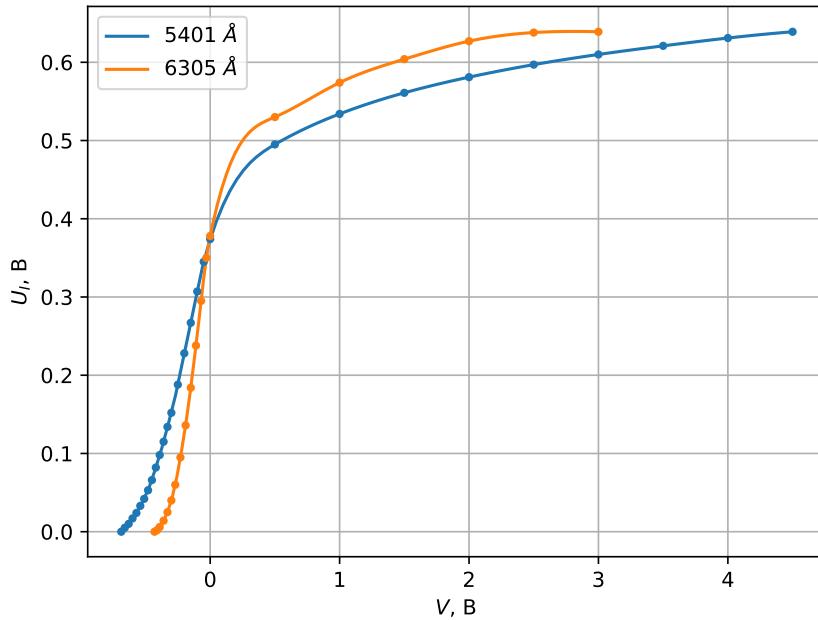


Рис. 8: Зависимость напряжения U_I от напряжения между анодом и фотокатодом V .

На графиках наблюдаются характерные особенности: напряжение запирания и насыщения. В соответствии с (3) построим линеаризацию $\sqrt{U_I}(V)$:

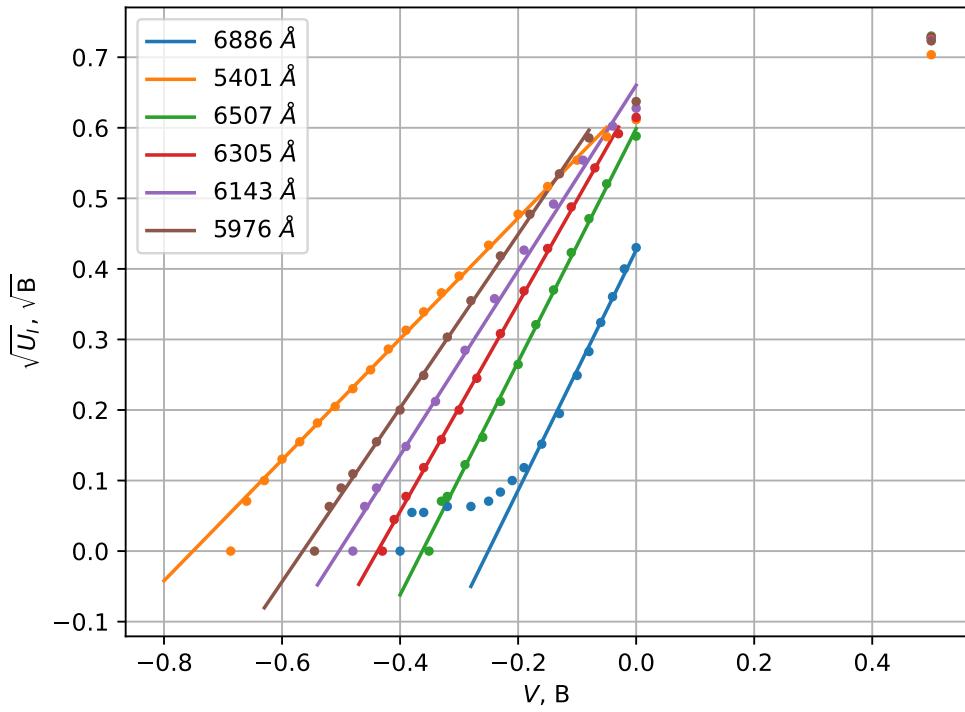


Рис. 9: Линеаризованная зависимость напряжения U_I от напряжения между анодом и фотокатодом V .

Из графиков определяем запирающие потенциалы V_0 и их погрешности.
Построим график $V_0(\omega)$ – запирающего напряжения от частоты света:

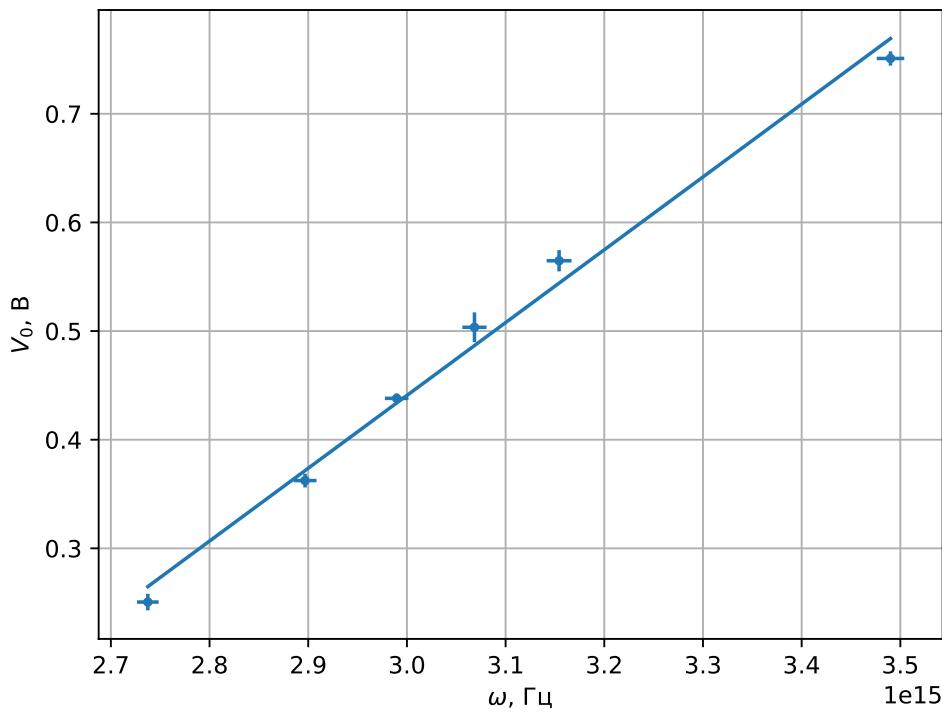


Рис. 10: Зависимость запирающего напряжения V_0 от частоты облучающего света ω .

В соответствии с (4) получим:

$$\hbar = (1.07 \pm 0.05) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$W \sim 1.6 \text{ эВ}$$

Заключение и выводы

Данная работа подтверждает существование фотоэффекта.

Получена ожидаемая зависимость (3), подтверждено существование напряжения запирания и напряжения насыщения. Проверена зависимость напряжения запирания V_0 от частоты падающего на фотокатод излучения ω .

Получено значение постоянной Планка $\hbar = (1.07 \pm 0.05) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$. Справочное значение $\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Оценена работа выхода из материала фотокатода $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ $W \sim 1.6 \text{ эВ}$. Из-за контактных разностей потенциалов в схеме оценка может иметь значительную систематическую погрешность.