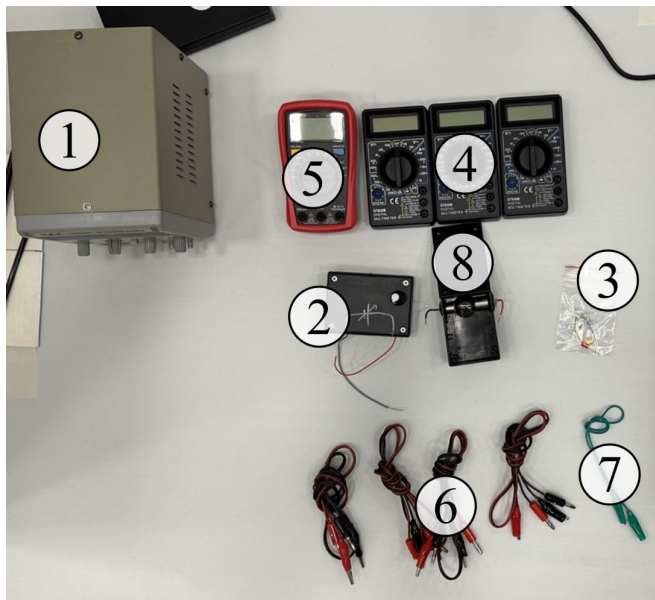


Фотоэффект в СССР

Оборудование:

1. Регулируемый источник питания
2. Портативный блок питания для светодиодов
3. Набор из 8 светодиодов
4. Три черных мультиметра
5. Красный мультиметр
6. 4 пары проводов банан-крокодил
7. Провод крокодил-крокодил
8. Коробка со встроенным фотоэлементом



Фотоэлемент СЦВ-3 перестал производиться еще в СССР, поэтому будьте предельно осторожны с ним и относитесь к нему с уважением!

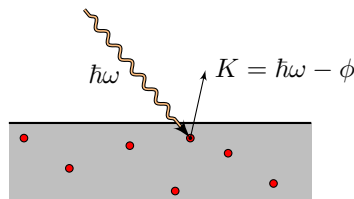
Внутри коробки находится фотоэлемент, на котором будет исследоваться фотоэффект. Этот фотоэлемент представляет из себя вакуумную сферическую колбу, половина которой покрыта сурьмяно-цезиевым напылением и представляет собой исследуемый материал. Вы можете открыть коробку и посмотреть на фотоэлемент, но при проведении экспериментов она должна быть закрыта.

Контакты фотоэлемента выведены через боковую поверхность коробки, в которой он находится. Для подачи напряжения на фотоэлемент используется регулируемый источник питания. Измерение силы тока и напряжения осуществляется мультиметрами в режимах вольтметра.

Источником фотонов в данной задаче являются маркированные светодиоды. Соответствие длины волны, маркировки ножки и цвета головки указаны в таблице. Питание светодиода осуществляется при помощи портативного блока питания. Сила тока через светодиод измеряется при помощи мультиметра в режиме амперметра.

λ , нм	Маркировка ножки	Цвет головки
700	-	Красная
660	Красная	Прозрачная
625	Желтая	Прозрачная
590	-	Желтая
565	-	Зеленая
525	Зеленая	Прозрачная
470	Синяя	Прозрачная
405	Черная	Прозрачная

Фотоэффект — явление взаимодействия света с веществом, при котором энергия фотонов передается электронам вещества. За объяснение фотоэффекта Альберт Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике.

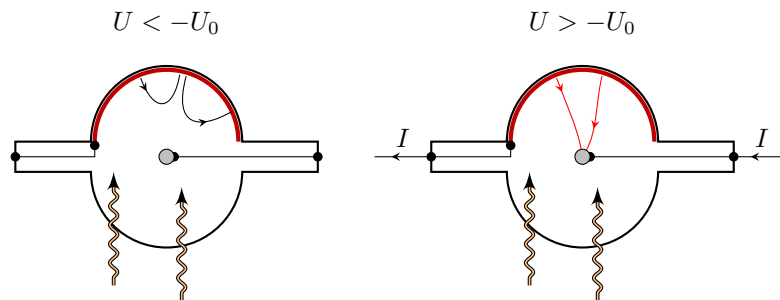


Свет характеризуется длиной волны λ и циклической частотой $\omega = 2\pi c/\lambda$, где $c = 3.00 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. При этом свет состоит из фотонов, каждый из которых обладает энергией $\hbar\omega$, где $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка. В этом заключается квантовая сущность света.

Электроны внутри веществ заперты энергетическим барьером, поэтому чтобы "достать" электрон из вещества, нужно совершить работу, которую называют *работой выхода* ϕ .

Таким образом, если на вещество падает фотон с энергией $\hbar\omega \geq \phi$, то он может выбить электрон из вещества. Этот процесс называют внешним фотоэффектом или *фотоэлектронной эмиссией*.

Фотоэлемент состоит из двух электродов: первый электрод освещается светом и на нем идет фотоэффект, второй электрод используется для сбора эмитированных электронов. Оба электрода запаяны в вакуумной трубке.



В ходе фотоэмиссии фотон поглощается веществом, и из вещества вылетает электрон с кинетической энергией

$$K = \hbar\omega - \phi$$

и попадает в электрическое поле между электродами фотоэлемента.

- При напряжении $U > 0$ электрон ускоряется и практически наверняка долетает до второго электрода. Чем больше напряжение, тем большая часть эмитированных электронов достигает второго электрода. Начиная с какого-то момента ток насыщается: практически все эмитированные электроны достигают второго электрода. Насыщенный ток $I = e\Phi Z$, где Z – количество фотонов, падающих на фотоэлемент в единицу времени, Φ – квантовый выход – вероятность того, что падающий фотон выбьет электрон, а $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.
- Если напряжение $U < 0$, то электроны замедляются полем и с меньшей вероятностью достигают второго электрода. При $U = -U_0 = -QK/e = -Q(\hbar\omega - \phi)/e$, фототок перестает идти и напряжение U_0 называют *запирающим* (Q – некоторое число).

Таким образом, конкретный фотоэлемент описывается тремя параметрами:

1. Зависимостью квантового выхода $\Phi(\lambda)$ от длины волны падающего света λ
2. Геометрическим фактором Q
3. Максимальной длиной волны λ_0 , при которой возможен фотоэффект (т.е. энергия фотона $\hbar\omega_0$ равна работе выхода ϕ)

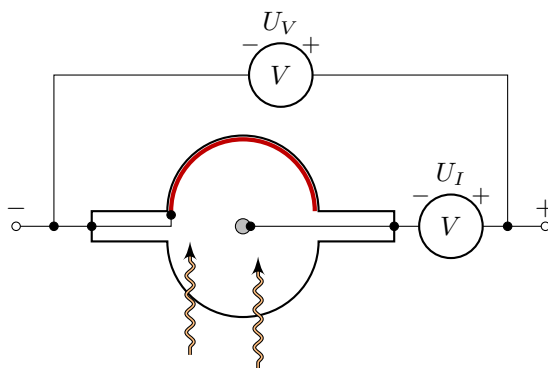
Имейте в виду, что через фотоэлемент течет паразитный фототок в обратном направлении. Его можно воспринимать, как фотоэффект на электроде, который при нормальной работе лампы собирает вылетевшие электроны.

Часть А. ВАХ фотоэлемента (3.3 балла)

Для снятия ВАХ фотоэффекта подключите светодиод с длиной волны $\lambda = 565$ нм к портативному блоку питания. Установите ток через светодиод $I_D = 8$ мА. Меняя напряжение на регулируемом источнике питания в пределах от -15 В до 15 В (изменить полярность можно поменяв местами провода питания), получите зависимость тока I от напряжения U на фотоэлементе.

Обратите внимание, что при больших напряжениях фототок в прямом направлении значительно больше, чем в обратном.

Для измерений используйте схему, приведенную ниже.



- A1** Запишите напряжение U на фотоэлементе и ток I , текущий через него. Ответ выразите через показания вольтметров U_V , U_I и внутреннее сопротивления R_V вольтметра. **0.3**

Для измерений тока используйте черный мультиметр в режиме вольтметра (его показаниям соответствует столбец **UI(black)** в таблице, его внутреннее сопротивление $R_b = 1.00$ МОм). Для измерения очень маленьких токов (< 10 нА) можете заменить черный мультиметр на красный мультиметр в режиме вольтметра (его показания пишите в столбец **UI(red)**, при этом его внутреннее сопротивление $R_r = 10.00$ МОм).

Показания U_V мультиметра заносите в столбец **UV**. Запишите значение тока через светодиод в таблице в столбце **ID**. Не забудьте заполнить строку **Units** – в ней должны быть написаны единицы измерения!

- A2** Снимите ВАХ фотоэлемента (зависимость I от U) в диапазоне напряжений $-15 \text{ В} \leq U \leq 15 \text{ В}$. Запишите исходные данные в таблицу и пересчитайте их в напряжение U и ток I . Выполните 25 измерений. Загрузите таблицу, заполненную по шаблону. **2.0**

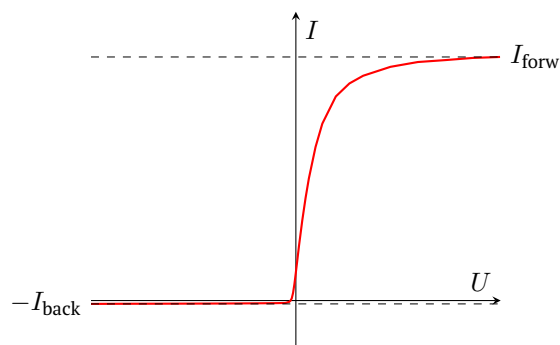
- A3** Постройте график ВАХ фотоэлемента: зависимость I от U . Загрузите скриншот графика. **0.4**

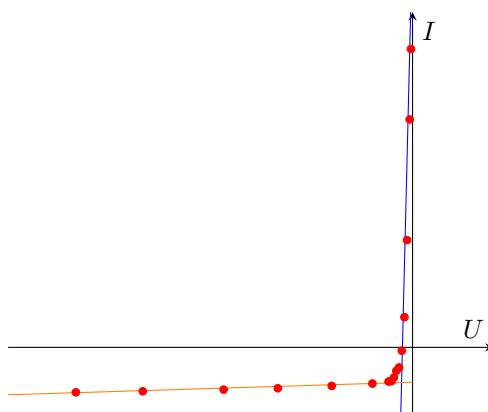
График имеет S-образный вид, и нам требуется определить запирающее напряжение U_0 . Максимальный ток в прямом направлении назовем I_{forw} , а максимальный ток в обратном направлении назовем I_{back} .

Для определения напряжения U_0 будем аппроксимировать прямыми две области:

1. Область обратного тока: $I \leq -0.9 \cdot I_{\text{back}}$
2. Область появления прямого тока: $-0.5 \cdot I_{\text{back}} \leq I \leq 0.25 \cdot I_{\text{forw}}$

Точке пересечения этих прямых соответствует U_0 .





A4 Загрузите скриншот участка ВАХ фотоэлемента, на котором проведены указанные прямые. **0.4**

A5 Запишите значение U_0 . **0.2**

Часть В. Фотоэффект и интенсивность падающего света (2.4 балла)

Продолжайте использовать светодиод с длиной волны $\lambda = 565$ нм. Установите напряжение $U = 15$ В на регулируемом источнике.

B1 Снимите зависимость прямого тока I_{forw} через фотоэлемент от тока I_D текущего через светодиод. Запишите исходные данные! Проведите 10 измерений. **0.8**

B2 Постройте график зависимости I_{forw} от I_D . Загрузите скриншот графика. **0.4**

B3 Снимите зависимость обратного тока I_{back} через фотоэлемент от тока I_D через светодиод. Запишите исходные данные! Проведите 10 измерений. **0.8**

B4 Постройте график зависимости I_{back} от I_D . Загрузите скриншот графика. **0.4**

Часть С. Фотоэффект и длина волны (11.5 балла)

В этой части вам нужно будет снять много ВАХ фотоэлемента. На каждой ВАХ нужно измерить две точки при $U \approx \pm 15$ В, а также 17 точек в диапазоне $[-15 \text{ В}, 5 \text{ В}]$ (т.е. в сумме 19 точек).

C1.1 Возьмите светодиод с длиной волны $\lambda = 405$ нм и с помощью портативного источника питания пустите через него минимальный ток I_D . Запишите значение этого тока в таблице. Снимите ВАХ фотоэлемента. Запишите исходные данные в таблицу и пересчитайте их в напряжение U и ток I . Шаблон подробно описан перед вопросом A2. **1.5**

C1.2 Повторите измерения из пункта C1.1 для светодиода с длиной волны $\lambda = 470$ нм. **1.5**

C1.3 Повторите измерения из пункта C1.1 для светодиода с длиной волны $\lambda = 525$ нм. **1.5**

C2.1 Возьмите светодиод с длиной волны $\lambda = 590$ нм и пустите через него такой ток I_D , чтобы $I_{\text{forw}} \approx 100$ нА. Запишите значение I_D в таблице. Снимите ВАХ фотоэлемента. Запишите исходные данные в таблицу и пересчитайте их в напряжение U и ток I . **1.5**

C2.2 Повторите измерения из пункта C2.1 для светодиода с длиной волны $\lambda = 625$ нм. **1.5**

C2.3 Повторите измерения из пункта C2.1 для светодиода с длиной волны $\lambda = 660$ нм. **1.5**

C3 Возьмите светодиод с длиной волны $\lambda = 700$ нм и пустите через него максимальный ток I_D . Запишите значение этого тока в таблице. Запишите значения I_{back} и I_{forw} . **0.1**

C4 Для каждого измеренного ВАХ определите значение запирающего напряжения U_0 . **1.2**

C5 В каких координатах график зависимости U_0 от λ должен быть линейным? **0.4**

C6 Постройте линеаризованный график зависимости U_0 от λ . **0.4**

C7 Чему равен геометрический фактор Q у выданного фотоэлемента. Эта величина определена перед частью А. **0.4**

Часть D. Квантовый выход фотоэлемента (2.8 балла)

Светодиод представляет из себя устройство, которое преобразует электрический ток в свет. Фактически, электроны при прохождении через рп-переход теряют свою энергию, излучая фотоны (т.е. происходит процесс обратный фотоэмиссии). Каждый электрон, проходящий через светодиод, с вероятностью Y порождает фотон, где Y называют *квантовым выходом*. Квантовый выход светодиода Y является его важнейшей характеристикой.

D1 Как из теоретических соображений должно зависеть напряжение открытия (т.е. напряжение на светодиоде, когда он начинает активно излучать) от его длины волны излучения? **0.4**

В таблице предложена мощность излучения P выданных вам светодиодов при протекании через них тока $I_0 = 20$ мА. Элементарный заряд $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ К.

λ , нм	700	660	625	590	565	525	470	405
P , мВт	2.72	2.97	2.10	0.063	0.023	4.027	5.964	2.834

D2 Вычислите квантовый выход Y у каждого светодиода. **1.0**

Будем считать, что весь излучаемый светодиодом свет попадает на фоточувствительную часть фотоэлемента и возбуждает фотоэмиссию.

D3 Получите зависимость квантового выхода фотоэлемента Φ от длины волны λ . Квантовый выход фотоэлемента определен перед началом части А. **1.0**

D4 Постройте график зависимости Φ от λ . Сделайте шкалу Φ логарифмической. **0.4**

