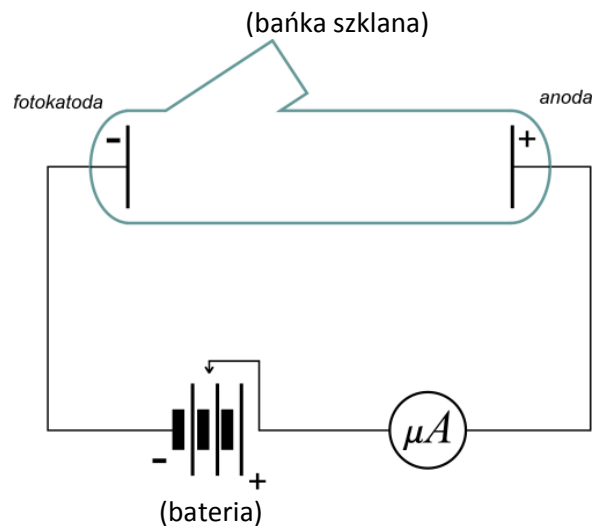


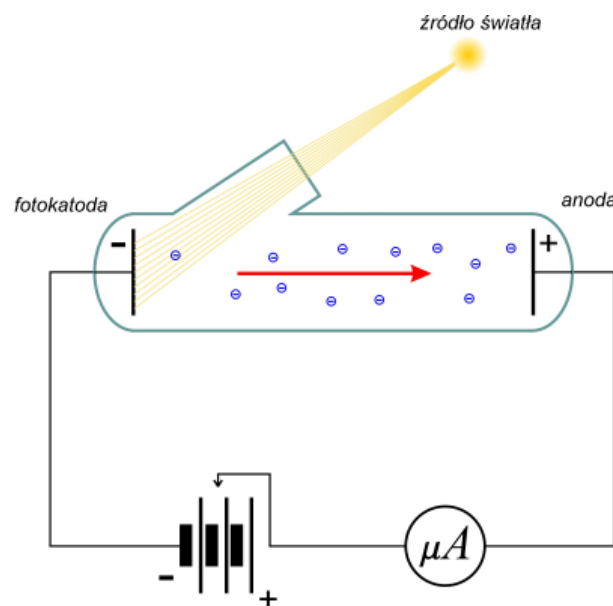
Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (Efekt fotoelektryczny)

Założenie: obwód elektryczny składa się z mikroamperomierza (μA), baterii o regulowanej wartości napięcia elektrycznego U , przezroczystej bańki szklanej (z której odpompowano powietrze) z dwoma elektrodami: podłączoną do bieguna ujemnego katodą (tzw. fotokatodą) i podłączoną do bieguna dodatniego anodą, oraz przewodów łączących.



Ponieważ w bańce szklanej nie ma nośników prądu elektrycznego, którymi w rozpatrywanym obwodzie mogłyby być tylko elektrony, to mikroamperomierz nie wykazuje przepływu prądu elektrycznego ($I = 0 A$) w obwodzie.

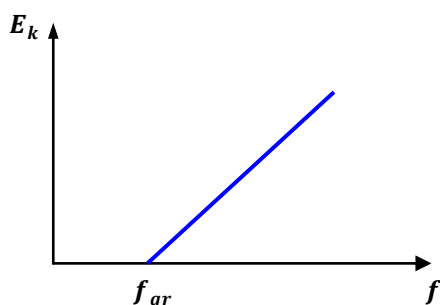
Po oświetleniu fotokatydy odpowiednio dobranym promieniowaniem elektromagnetycznym (falą elektromagnetyczną), amperomierz wskazuje przepływ prądu elektrycznego ($I > 0 A$) w obwodzie. Oznacza to, że pomiędzy elektrodami pojawiły się nośniki prądu elektrycznego, tzn. elektrony. Elektrony te mogły zostać tylko wybite z materiału (metal), z którego została wykonana fotokatoda.



Zjawisko polegające na wybijaniu elektronów (tzw. fotoelektronów) z metalu poddanego działaniu promieniowania elektromagnetycznego (w przypadku pewnych metali efekt ten może powodować światło) nazywa się **zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym**.

Badając doświadczalnie to zjawisko stwierdzono, że:

1. zjawisko zachodzi natychmiastowo po rozpoczęciu naświetlania fotokatody, o ile użyte promieniowanie elektromagnetyczne miało częstotliwość większą od pewnej wartości granicznej ($f > f_{gr}$) lub długość jego fali była mniejsza od pewnej wartości granicznej ($\lambda < \lambda_{gr}$). Jeżeli warunki te nie były spełnione, to pomimo dowolnie długiego czasu naświetlania i natężenia padającego promieniowania, przepływ prądu w obwodzie nie następował.
2. Wartości graniczne częstotliwości i długości promieniowania elektromagnetycznego zależą tylko od rodzaju materiału, z którego została wykonana fotokatoda.
3. Natężenie prądu płynącego w obwodzie jest wprost proporcjonalne do natężenia padającego promieniowania.
4. Wartość energii kinetycznej wybitych elektronów jest proporcjonalna do częstotliwości padającego promieniowania i nie zależy od natężenia tego promieniowania.



Sam fakt wybijania elektronów można było wyjaśnić zakładając, że padające promieniowanie jest falą elektromagnetyczną. Fala ta przenosi energię, która jest przekazywana jest także elektronom, co skutkuje wzrostem ich energii, a w końcu wybiciem z naświetlanego materiału. Na gruncie teorii falowej nie można było jednak wyjaśnić innych faktów stwierdzonych doświadczalnie, na przykład, że energia kinetyczna wybitych elektronów nie zależy od natężenia użytego promieniowania. Według teorii falowej, przy większym natężeniu fali elektromagnetycznej przenosi ona w jednostce czasu większą energię. Powinno to oznaczać absorpcję większej energii przez elektrony, a tym samym wybijanie ich z większą wartością energii kinetycznej.

Wyjaśnienie tego zjawiska wymagało przyjęcia, że użyte promieniowanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez tzw. fotony, których energia jest wprost proporcjonalna do częstotliwości tego promieniowania. Pod pojęciem fotonu należy rozumieć najmniejszy, niepodzielny nośnik promieniowania elektromagnetycznego, nie posiadający masy spoczynkowej, poruszający się z prędkością światła w próżni ($v \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = c$). Według Maxa Plancka wartość energii kwantu takiego promieniowania (który później został nazwany fotonem) wyraża zależność (1900 r.):

$$E = h \cdot f$$

gdzie: f – częstotliwość użytego promieniowania [Hz], h – stała Plancka, $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$.

Ponieważ pomiędzy prędkością dowolnej fali v , jej długością λ i częstotliwością f zachodzi zależność:

$$v = \lambda \cdot f = c \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

to wartość energii fotonu można również wyrazić następująco:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Rightarrow E \sim \frac{1}{\lambda}$$

Oznacza to, że jest ona odwrotnie proporcjonalna do długości użytego promieniowania. Tym samym najdłuższe fale z zakresu widzialnego dla człowieka (kolor czerwony) są przenoszone przez fotony o najmniejszej energii z tego zakresu.

Poprawne wyjaśnienie zjawisko fotoelektrycznego zewnętrznego zostało podane w roku 1905 przez Alberta Einsteina.

Bilans energii w tym zjawisku:

$$\boxed{\text{Energia padającego fotonu } E} = \boxed{\text{Energia konieczna do wybicia elektronu z fotokatody, jest to tzw. praca wyjścia } W} + \boxed{\text{Energia kinetyczna wybitego fotoelektronu } E_k}$$

Czyli:

$$E = W + E_k$$

Jest to tzw. równanie **Einsteina – Millikana**.

Jeżeli prędkość wybitych fotoelektronów jest znacznie mniejsza od prędkości światła w próżni ($v \ll c$), to wartość tej energii wyraża zależność:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

gdzie: m – masa elektronu, $m \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne zajdzie, jeżeli energia padającego fotonu będzie większa od energii koniecznej do wybicia elektronu z fotokatody (tj. pracy wyjścia, której wartość zależy tylko od rodzaju materiału, z którego wykonana została fotokatoda).

$$E > W$$

Zatem:

$$h \cdot f > W \Rightarrow f > \frac{W}{h} = f_{gr}$$

lub

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} > W \Rightarrow \lambda < \frac{h \cdot c}{W} = \lambda_{gr}$$

Powyższe zależności uzasadniają fakty doświadczalne przedstawione w punktach 1 i 2. Ponadto z równania będącego bilansem energii wynika, że:

$$E = W + E_k \Rightarrow h \cdot f = W + E_k \Rightarrow E_k = h \cdot f - W$$

Jeżeli przyjmie się, że:

$$E_k = y, \quad h = a, \quad f = x, \quad -W = b$$

to otrzymuje się równanie:

$$y = a \cdot x + b$$

gdzie: $a > 0, b < 0$, co odpowiada przebiegowi wykresu z punktu 4.

Uwaga:

- za wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego, w roku 1921 Albert Einstein otrzymał nagrodę Nobla.
- Idea kwantu energii została zapożyczona przez Einsteina z prac Maxa Plancka dotyczących wyjaśnienia zjawiska promieniowania ciała doskonale czarnego.
- Często na poziomie atomowym używa się jako jednostek energii tzw. elektronowoltów (eV).

$$1 \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ J} \approx 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

- Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne wykorzystywane jest w bateriach słonecznych, fotokomórkach, noktowizorach, elementach CCD w aparatach cyfrowych itd. W urządzeniach tych pochłaniane światło wytwarza prąd elektryczny i generuje ładunek elektryczny, którego ilość można zmierzyć.
- Równanie $E = W + E_k$ zostało doświadczalnie potwierdzone przez Roberta Millikana. Był on przeciwnikiem koncepcji Einsteina i przez około 10 lat przeprowadzał eksperymenty, które zamiast obalić teorię Einsteina, potwierdziły słuszność kwantowej teorii światła. Ponadto pomiary Millikana umożliwiły bardzo dokładne wyznaczenie stałej Plancka.