

Badanie fotorezystora

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od napięcia dla różnych wartości natężenia oświetlenia fotorezystora.
- Wyznaczenie zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od natężenia oświetlenia fotorezystora dla różnych wartości napięcia.
- Wyznaczenie zależności rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia fotorezystora.

Wprowadzenie

Wiele urządzeń wykorzystywanych we współczesnym świecie zawiera detektory światła. Bez nich nie mogłyby poprawnie działać np: aparaty fotograficzne, zabezpieczenia drzwi tramwajowych, taśmy sklepowe, automatyczne włączniki świateł. Detektory światła powszechnie nazywa się fotokomórkami, jednak ta nazwa najczęściej nie jest poprawna. Współcześnie bardzo rzadko wykorzystuje się fotokomórki czyli szklane bańki próżniowe z dwiema metalicznymi elektrodami, których zasada działania opiera się na zjawisku fotoelektrycznym zewnętrznym. Najczęściej mamy do czynienia z detektorami półprzewodnikowymi wykorzystującymi *zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne*. Wynika to z ich niezawodności, małych rozmiarów, prostej budowy i niewielkich kosztów produkcji. Do najbardziej popularnych detektorów światła należą fotodiody, fotorezystory, fotoogniwa oraz fototranzystory. W niniejszym ćwiczeniu skoncentrujemy się na fotorezystorze, elemencie światłoczułym, którego rezystancja znacząco zmienia się pod wpływem zmiany jego oświetlenia. Jeżeli umieścimy fotorezystor w obwodzie elektrycznym, to pod wpływem oświetlenia wzrośnie prąd elektryczny, inaczej mówiąc, obserwujemy zjawisko *fotoprzewodnictwa*. Zanim poznamy budowę i zasadę działania fotorezystora, przypomnijmy podstawowe informacje na temat półprzewodników oraz zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego.

Przewodnictwo elektryczne w półprzewodnikach

Półprzewodniki samoistne w temperaturze zera bezwzględnego są izolatorami (wynika to z braku swobodnych nośników prądu elektrycznego), natomiast wskutek wzrostu temperatury zaczynają przewodzić prąd elektryczny. Energia termiczna sprawia, że część elektronów walencyjnych może oderwać się od atomów półprzewodnika i stać się nośnikami prądu elektrycznego. Zgodnie z teorią pasmową ciała stałego powiedzielibyśmy, że elektrony uzyskują energię E_g potrzebną na przejście z *pasma walencyjnego* do *pasma przewodnictwa*. W paśmie walencyjnym pozostają natomiast puste miejsca po "wyrwanym" elektronie tzw. dziury, które są dodatnimi nośnikami prądu. Wartość energii E_g , która oddziela pasmo walencyjne od pasma przewodnictwa, nazywamy *przerwą energetyczną* i zależy od rodzaju półprzewodnika. Należy zaznaczyć, że koncentracja nośników prądu w półprzewodnikach, nawet w stosunkowo wysokich temperaturach, jest o ponad dziesięć rzędów mniejsza w porównaniu z dobrymi przewodnikami. Przydatność półprzewodników samoistnych w technologii można znacznie poprawić, wprowadzając do ich sieci krystalicznych bardzo niewielką ilość odpowiednio dobranych obcych atomów zwanych domieszkami. Istnieją dwa typy domieszkowania zwane typem n oraz typem p .

Prześledźmy proces domieszkowania na przykładzie kryształu krzemu. Krzem jest pierwiastkiem czterowartościowym. Jego atomy tworzące sieć krystaliczną łączą się z czterema najbliższymi sąsiadami, tworząc wiązania kowalencyjne. Jeżeli do sieci krystalicznej krzemu "wbudujemy" na przykład pięciowartościowy atom fosforu, cztery z elektronów walencyjnych atomu fosforu stworzą wiązania z otaczającymi go atomami krzemu. Piąty elektron, niebiorący udziału w wiązaniu, jest słabo związany z rdzeniem jonu fosforu i stosunkowo niewielka energia E_d ($E_d \ll E_g$) wystarczy, aby go oderwać, powodując wzrost przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika. Atom fosforu nazywamy *donorem*, ponieważ łatwo dostarcza elektron do pasma przewodnictwa, natomiast półprzewodnik domieszkowany w powyższy sposób nazywamy półprzewodnikiem typu n , gdyż nośnikami większościowymi prądu są ujemnie naładowane elektrony (j. ang. *negative* - ujemny).

Jeżeli w sieć krystaliczną krzemu wbudujemy trójwartościowy atom, na przykład glinu, może on stworzyć wiązania kowalencyjne jedynie z trzema sąsiednimi atomami krzemu. Tym samym w jednym z wiązań pomiędzy atomem glinu i krzemu brakuje elektronu (jest dziura). Jeżeli dostarczymy stosunkowo niewielką energię E_a ($E_a \ll E_g$) elektronowi z sąsiedniego wiązania, zapełnimy tę dziurę, tworząc jednocześnie

kolejną. Proces ten może dalej postępować i dziura będzie poruszać się w sieci krystalicznej. Atom glinu nazywamy *akceptorem*, gdyż przyjmuje elektron z sąsiedniego wiązania lub, inaczej mówiąc, z pasma walencyjnego krzemu. Tak domieszkowany półprzewodnik nazywamy półprzewodnikiem typu *p*, gdyż nośnikami większościowymi prądu są dodatnio naładowane dziury (j. ang. *positive* - dodatni).

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Jak wspomniano, ażeby oderwać elektron walencyjny od atomu półprzewodnika samoistnego, należy dostarczyć mu pewnej minimalnej energii E_g równej przerwie energetycznej. Energię tę mogą dostarczyć drgania termiczne, ale również na przykład promieniowanie świetlne. Jeżeli w wyniku promieniowania świetlnego wewnątrz półprzewodnika powstają pary dziura-elektron, to takie zjawisko nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym. Zjawisko to ukazuje nam cząsteczkową naturę światła. Żeby doszło do uwolnienia elektronu walencyjnego, kwant promieniowania świetlnego (foton) musi mieć energię co najmniej równą E_g . Energia fotonu E_f zależna jest od częstotliwości fali świetlnej ν w następujący sposób:

$$E_f = h\nu, \quad (1)$$

gdzie $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js jest stałą Plancka. Tym samym możemy zapisać warunek na zaistnienie zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego w półprzewodniku samoistnym:

$$h\nu \geq E_g. \quad (2)$$

Jeżeli mamy do czynienia z półprzewodnikami domieszkowanymi typu *n* lub *p*, minimalne energie potrzebne do pojawienia się swobodnych nośników prądu są mniejsze niż E_g i wynoszą E_d i E_a odpowiednio dla półprzewodników typu *n* i *p*. Tym samym zjawisko fotoprzewodnictwa może zostać wywoływane światłem o stosunkowo niewielkiej częstotliwości.

Budowa i zasada działania fotorezystora

Fotorezystor ma najprostszą budowę wśród półprzewodnikowych detektorów światła. W zasadzie wystarczyłaby jedynie płytka półprzewodnikowa z podłączonymi do niej dwiema elektrodami. Zwykle jednak fotorezystory tworzy się tak, jak to schematycznie przedstawiono na rys. 1. Na okrągłą płytkę izolatora nanosi się warstwę półprzewodnika oraz dwie metaliczne, grzebieniowe elektrody. Całość przykryta jest przezroczystą, przeciwo odbiciową warstwą ochronną (nie zamieszczono jej na rysunku).

Prześledźmy działanie fotorezystora przy założeniu, że mamy do czynienia z półprzewodnikiem samoistnym. Jeżeli na fotoogniwo pada światło o dostatecznie dużej częstotliwości ($h\nu \geq E_g$), w jego wnętrzu zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne.

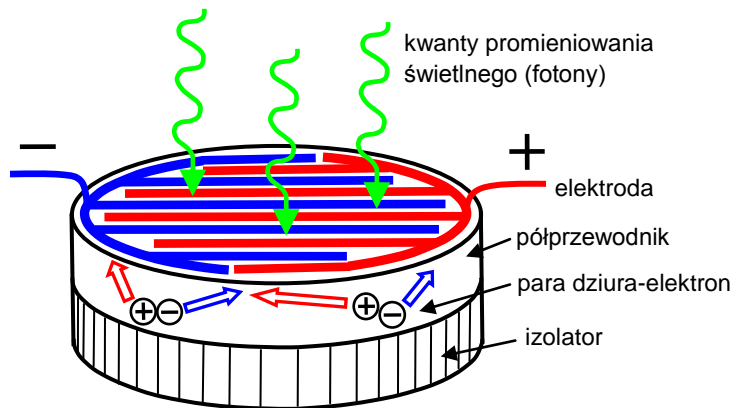
Powstałe pary dziura-elektron (tzw. *fotodziura* i *fotoelektron*) mogą brać udział w przewodnictwie prądu elektrycznego. Są to tak zwane *nośniki nadmiarowe*. Elektrony dyfundują do dodatniej elektrody, natomiast dziury do ujemnej. Ze względu na możliwość wystąpienia *procesu rekombinacji* (ponownego łączenia się dziury i elektronu), elektrody mają kształt grzebieniowy, aby powstałe nośniki prądu elektrycznego dzieliła od nich niewielka odległość. Wzrost koncentracji elektronów Δn oraz dziur Δp prowadzi do proporcjonalnego wzrostu przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika $\Delta\sigma$ zgodnie z zależnością:

$$\Delta\sigma = e(\mu_n\Delta n + \mu_p\Delta p), \quad (3)$$

gdzie e - ładunek elementarny, μ_n i μ_p - ruchliwości elektronów i dziur.

W przypadku, gdy mamy do czynienia z półprzewodnikami domieszkowanymi, budowa fotorezystora jest taka sama, natomiast wpływ oświetlenia na proces przewodnictwa jest bardziej złożony i różnorodny. Jak już wiemy, w tym przypadku energie potrzebne do wywołania przewodnictwa są znacznie mniejsze, dlatego takie fotorezystory są bardziej czułe. Wzrost przewodnictwa pod wpływem oświetlenia uzależniony jest od rodzaju półprzewodnika, sposobu domieszkowania, natężenia i zakresu widmowego światła. Dobierając odpowiednio półprzewodnik, możemy stworzyć fotorezystor o pożądanym zakresie czułości widmowej.

Natężenie prądu fotoelektrycznego płynącego przez fotorezystor można zapisać następująco:



Rys. 1 Schemat budowy fotorezystora.

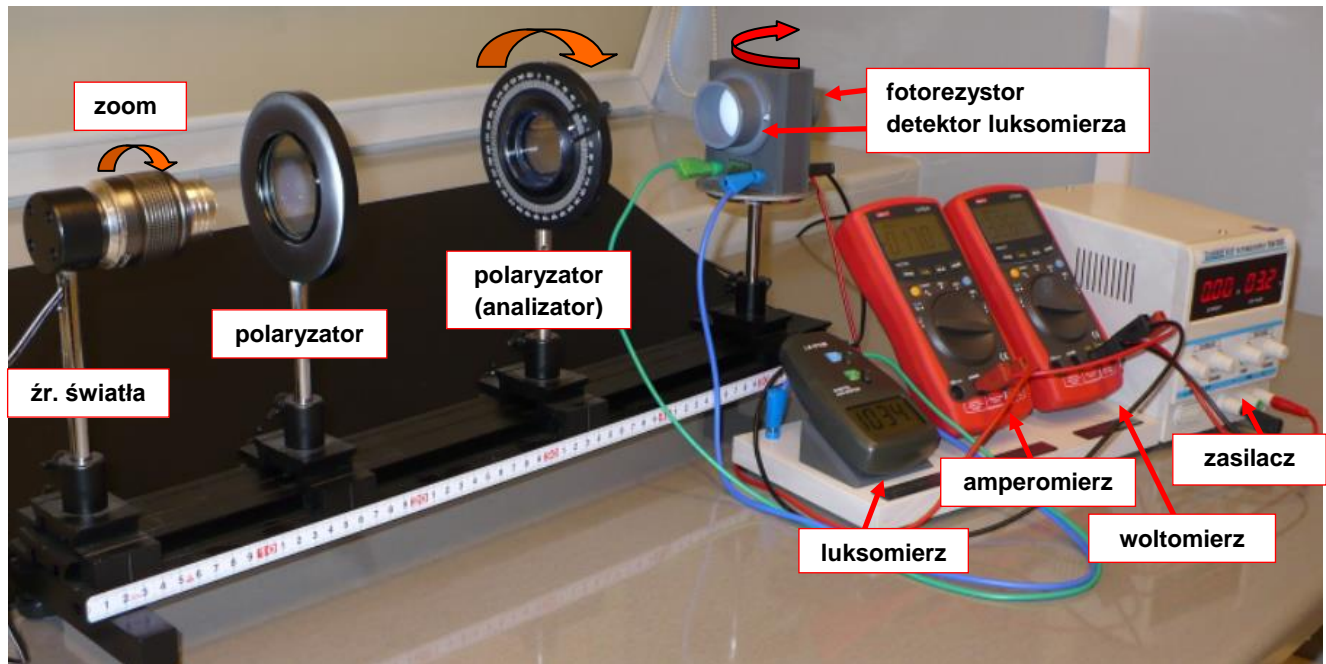
$$I = kUE^\gamma, \quad (4)$$

gdzie: U - napięcie na fotorezystorze, E - natężenie oświetlenia, k i γ - stałe zależne od półprzewodnika i rodzaju domieszki ($0,5 < \gamma < 1$).

Warto dodać, że przewodnictwo półprzewodnika zależy nie tylko od oświetlenia, ale również od temperatury, przez co fotorezystory są wrażliwe jej zmianę. Jest to jedna z ich wad.

Układ pomiarowy

Do badań fotorezystora wykorzystywany jest układ przedstawiony na rys. 2. Składa się on ze źródła światła (lampa LED), dwóch polaryzatorów, luksomierza, zasilacza, woltomierza, miliamperomierza oraz fotorezystora. Źródło światła posiada pokrętko zoom umożliwiający ogniskowanie strumienia światła.



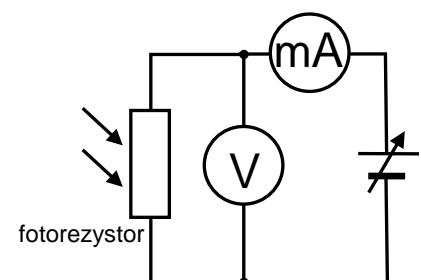
Rys. 2 Układ eksperymentalny do badania fotorezystora.

Fotorezystor (FR) oraz detektor luksomierza (DL) znajdują się po przeciwnych stronach obrotowej oprawy. Ich zamiany dokonuje się poprzez obrót kółka oprawy o 180 stopni. Polaryzatory służą do regulacji natężenia światła padającego na fotorezystor. Pierwszy z nich polaryzuje światło wysyłane przez źródło, a drugi (zwany dalej analizatorem) służy do osłabienia strumienia światła. Analizator zamocowany jest w obrotowej oprawie wyposażonej w podziałkę kątową, dzięki czemu można precyzyjnie zmieniać kąt α pomiędzy kierunkami polaryzacji polaryzatora i analizatora. Korzystając z prawa Malusa oraz założenia, że natężenie oświetlenia jest proporcjonalne do natężenia światła, można zapisać następującą zależność:

$$E = E_0 \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

gdzie E_0 jest natężeniem oświetlenia fotorezystora w przypadku, gdy polaryzator i analizator mają równe kierunki polaryzacji ($\alpha = 0$), natomiast E to natężenie oświetlenia fotorezystora dla dowolnego kąta α .

Aby zrealizować cele ćwiczenia, konieczna jest możliwość pomiaru: natężenia oświetlenia fotorezystora, napięcia na fotorezystorze oraz natężenia prądu płynącego przez fotorezystor. Posłużą do tego luksomierz, woltomierz i miliamperomierz. Układ elektryczny został schematycznie zaprezentowany na rys. 3. Źródłem prądu stałego jest stabilizowany zasilacz o zakresie napięcia 0 - 15V, natomiast dwa multimetry spełniają rolę woltomierza i miliamperomierza. Do badań wykorzystano fotorezystor zbudowany na bazie siarczku kadmu (CdS) o maksymalnej czułości dla światła o długości fali $\lambda = 560 \text{ nm}$.



Rys. 3 Schemat elektryczny układu.

Pomiary i obliczenia

Ćwiczenie składa się z kilku etapów. Na początku należy wykonać szereg pomiarów natężenia oświetlenia w zależności od kąta skręcenia analizatora α . W tym celu musimy włączyć źródło światła oraz luksomierz, a następnie ustawić jego detektor w kierunku źródła światła. Posługując się pokrętkiem zoom źródła światła, należy zogniskować strumień światła tak, aby dla kąta skręcenia analizatora $\alpha = 0^\circ$ wartość natężenia oświetlenia wynosiła około 1800 lx. Zmieniając kąt skręcenia analizatora, należy zapisywać wartości natężenia oświetlenia. W ten sposób przyporządkujemy wartościom kąta α wartości natężenia oświetlenia E . Następnie należy obrócić fotorezystor w kierunku źródła światła, włączyć elementy układu elektrycznego i wyznaczyć zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od napięcia $I = f(U)$ dla trzech wybranych wartości natężenia oświetlenia E (trzech wartości kąta α). Kolejnym etapem ćwiczenia jest wyznaczenie zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ dla trzech wybranych napięć U na fotorezystorze. Natężenie oświetlenia należy zmieniać poprzez obrót analizatora. Następnie, korzystając z wyników pomiarów, należy wyznaczyć rezystancję R fotorezystora uzyskaną dla różnych natężeń oświetlenia stosując prawo Ohma:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (6)$$

Ostatecznie należy wykreślić zależności $I = f(U)$ ($E = \text{const}$), $I = f(E)$ ($U = \text{const}$), $R = f(E)$ ($U = \text{const}$) oraz zapisać wnioski.

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie zależności natężenia oświetlenia E od kąta skręcenia analizatora α

1. Włączyć lampę i luksomierz, obrócić detektor luksomierza (DL) w stronę lampy a analizator ustawić pod kątem $\alpha = 0^\circ$. Obracając pokrętkę zoom lampy, ustawić natężenie oświetlenia na około 1800 lx.
2. Zmieniać kąt skręcenia analizatora α co 5° w zakresie $0 - 90^\circ$ oraz mierzyć natężenie oświetlenia E . Pomiary powtórzyć, a następnie uśrednić wyniki natężenia oświetlenia uzyskane dla poszczególnych wartości α .

B. Wyznaczenie zależności natężenia prądu od napięcia $I = f(U)$

1. Wyłączyć luksomierz i obrócić fotorezystor (FR) w stronę światła.
2. Włączyć zasilacz, woltomierz i miliamperomierz, a następnie, zmieniając napięcie zasilacza co 1 V w zakresie $0 - 10 V$, wykonać pomiary natężenia prądu I przy stałej wartości natężenia oświetlenia E (dla $\alpha = 0^\circ$). Pomiar powtórzyć dwukrotnie dla innych wartości natężenia oświetlenia.
3. Na wspólnym wykresie przedstawić zależności natężenia prądu od napięcia $I = f(U)$ oraz zapisać wnioski.

C. Wyznaczenie zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ oraz rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia $R = f(E)$

1. Ustawić na zasilaczu napięcie $U = 6 V$, a następnie, zmieniając kąt skręcenia analizatora α co 5° w zakresie $0 - 90^\circ$, zapisywać wartości natężenia prądu. Pomiar powtórzyć dla dwóch kolejnych napięć ($4 V$ i $2 V$).
2. Korzystając z wyników uzyskanych w punkcie A, przyporządkować kątom skręcenia analizatora α odpowiadające im wartości natężenia oświetlenia E .
3. Na wspólnym wykresie przedstawić zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ oraz zapisać wnioski.
4. Wyliczyć rezystancję fotorezystora R dla różnych wartości natężenia oświetlenia E , korzystając z wyników pomiarów natężenia prądu I dla napięcia $U = 6 V$.
5. Wykreślić zależność rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia $R = f(E)$ oraz zapisać wnioski.