

Ćw. 1. Badanie odbiorników fotoelektrycznych

Opracował: dr hab. inż. Marcin Wesolowski



ZAKŁAD TECHNIKI
ŚWIETLNEJ

1. Wprowadzenie teoretyczne

Z punktu widzenia oceny parametrów promieniowania, fotometria może być podzielona na dwie podstawowe kategorie:

- fotometrię wizualną, zajmującą się promieniowaniem widzialnym z zakresu 380 nm – 780 nm i uwzględniającą czułość widmową oka;
- radiometrię, która zajmuje się całkowitymi parametrami energetycznymi promieniowania emitowanego przez zróżnicowane źródła.

W obu przypadkach (fotometria wizualna, radiometria) możliwe jest wyodrębnienie odpowiadających sobie wielkości, co zestawiono w tabelicy 1. Warto nadmienić, że wielkości charakterystyczne dla zagadnień fotometrii wizualnej powstają zasadniczo przez analizę zakresu promieniowania widzialnego oraz wykorzystaniu współczynników pozwalających na uwzględnienie czułości widmowych oka.

Tab. 1. Zestawienie podstawowych wielkości radiometrii i fotometrii

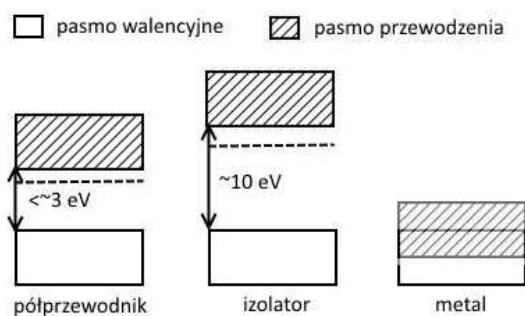
Radiometria	Fotometria
Strumień energetyczny Φ_e (Radiant flux), [W]	Strumień świetlny Φ_v (Luminous flux), [lm] $\Phi_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
Natężenie napromieniowania E_e (Irradiance), [W/m ²]	Natężenie oświetlenia E_v (Illuminance), [lx] $E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} = \int_{2\pi sr} L_v \cos(\theta) d\Omega$
Natężenie promieniowania I_e (Radiant intensity), [W/sr]	Światłość I_v (Luminous intensity), [cd] $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$
Luminancja energetyczna L_e (Radiance), [W/m ² sr]	Luminancja L_v (Luminance), [cd/m ²]

Pomiar wymienionych powyżej wielkości wymaga stosowania odpowiednich czujników oraz wykonywania operacji matematycznych. Istnieje dość szeroka gama elementów wrażliwych na promieniowanie optyczne, dostosowanych do wykorzystania w zróżnicowanych aplikacjach (nie tylko pomiary wielkości świetlnych, lecz również np. w komunikacji światłowodowej). Podstawowy podział czujników światła pozwala na wyodrębnienie czujników lampowych (fotokomórka, fotopowielacz) oraz półprzewodnikowych (fotorezystor, fotodioda, fototranzystor, fotoogniwo). W przypadku

czujników lampowych wykorzystywane jest zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne. We wszystkich czujnikach półprzewodnikowych wykorzystywany jest wewnętrzny efekt fotoelektryczny. **W niniejszym ćwiczeniu wykorzystywane będą jedynie czujniki półprzewodnikowe.**

Efekt fotoelektryczny – podstawa działania czujników półprzewodnikowych

Wrażliwość fotodetektorów na promieniowanie o określonej długości wynika z podstawowych praw fizyki. Fundamentalną zasadą mechaniki kwantowej jest fakt, że energia układów (kwantowa teoria budowy atomu) nie może zmieniać się w dowolnych granicach, lecz jest ona skwantowana, co oznacza, że może przyjmować konkretne, dyskretne wartości [3]. W półprzewodnikach, obowiązuje podobna zasada. Występują pasma energetyczne mogące być w pełni obsadzone elektronami, obsadzone tylko w części lub w ogóle nie obsadzone. Pasma o najwyższej energii obsadzone przez elektrony nazywamy pasmem walencyjnym. Ponad nim występuje pasmo przewodzenia, które obsadzone jest tylko w części. Pomiędzy tymi pasmami występuje przerwa energetyczna zwana pasmem wzbronionym. Energia tej przerwy energetycznej E_g zawiera się zazwyczaj od ułamka – do kilku eV. Na rysunku 1 pokazano, w uproszczeniu, strukturę energetyczną półprzewodnika. Warto zaznaczyć, że ten podstawowy trójpoziomowy model nie jest uniwersalny i nie wyjaśnia w pełni, często skomplikowanych zagadnień fizyki ciała stałego.



Rys. 1. Uproszczony model pasm energetycznych w ciałach stałych

Przejście atomu pomiędzy poszczególnymi stanami stacjonarnymi może zachodzić jedynie w wyniku absorpcji lub emisji energii. Zjawisko zmiany stanu energetycznego określa warunek Bohra:

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (1)$$

gdzie: h – stała Plancka, E_1 , E_2 – energie atomów, ν – częstotliwość

Ten prosty model (rys. 1) może być wykorzystany do łatwego pokazania, w jaki sposób światło oddziałuje z materią. Zakładamy, że foton o energii $h\nu$ pada na półprzewodnik o przerwie energetycznej E_g . Jeżeli energia fotonu spełnia warunek (2), co odpowiada długości fali (3), zanika on (anihiluje). Jego energia zostaje jednak wykorzystana do przeniesienia elektronu z poziomu walencyjnego do pasma przewodzenia. Przy tym przejściu uzyskiwany jest nie tylko dodatkowy elektron w paśmie przewodzenia, lecz również miejsce po elektronie (dziurę) w paśmie walencyjnym.

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

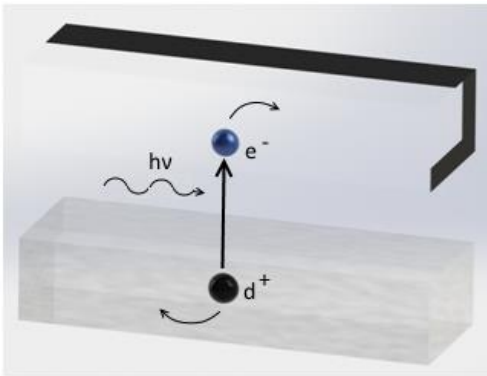
$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (3)$$

gdzie: c – prędkość światła, λ – długość fali.

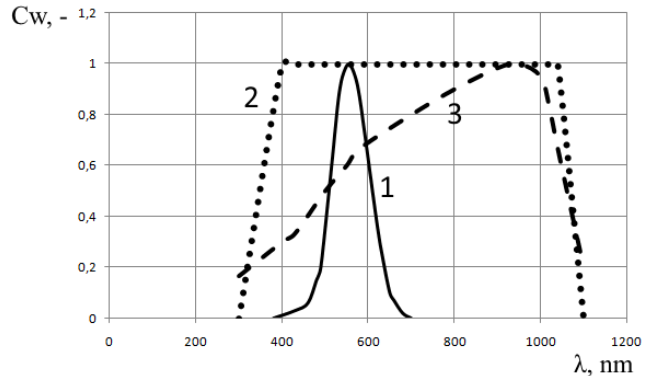
Jak wiadomo, dziura zachowuje się jak ładunek dodatni. Liczba ładunków wyzwolonych w zjawisku fotoelektrycznym zależy bezpośrednio od liczby kwantów światła pochłanianych przez półprzewodnik. Powodują one wzrost przewodnictwa materiału półprzewodnikowego i zmianę jego charakterystyki prądowo – napięciowej opisaną podstawowym równaniem diody (4).

$$I = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) - S\Phi_e \quad (4)$$

gdzie: I_0 – prąd nasycenia złącza p-n generowany ciepłnie (prąd ciemny), S – czułość fotoelektryczna, Φ_e – strumień promieniowania, k – stała Boltzmanna, T – temperatura, U – napięcie elektryczne, e – ładunek elektronu



Rys. 2. Generacja pary elektron (e) - dziura (d) przy absorpcji fotonu w materiale półprzewodnikowym



Rys. 3. Względna charakterystyka czułości widmowej oka (1), wyidealizowanej (2) oraz rzeczywistej (3) czułości fotodiody krzemowej

Wytworzone nośniki energii (dziura i elektron) mogą poruszać się w obrębie półprzewodnika. Jeżeli, na przykład, w półprzewodniku występuje pole elektryczne, to nośniki te będą poruszały się z zasadami przyciągania, w kierunku pola wymuszającego. Zasada ta po prostu powoduje powstanie fotoprądu a omawiany element jest fotodiodą. Wartość fotoprądu może być mierzona w zewnętrznym obwodzie.

Można zatem stwierdzić, że półprzewodnikowe czujniki światła nie są tak samo wrażliwe na różne długości fal (patrz rys. 3). Teoretyczna wyidealizowana funkcja czułości tego rodzaju elementów mogłaby przyjmować przebieg „binarny” (poz. 2 na rys. 3). Fotony o energiach większych niż szerokość przerwy pomiędzy pasmem podstawowym i przewodzenia (2) powinny prowadzić do powstawania par nośników elektron – dziura. Jeżeli jednak energia fotonu jest wyższa niż E_g , jej nadmiar przekazywany jest do elektronu i dziury, nadając im pewną energię kinetyczną. Energia ta zostaje szybko wytracona przez niesprężyste zderzenia z innymi elektronami, powodując dodatkowe straty i niepotrzebne podgrzewanie materiału czujnika. Dlatego, w rzeczywistych czujnikach, funkcja czułości charakteryzuje się bardziej skomplikowaną charakterystyką. Czujniki światła charakteryzują się maksymalną czułością

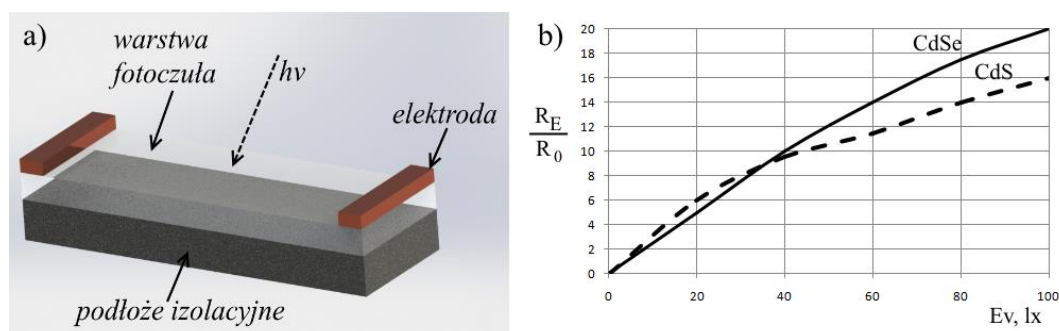
dla fotonów o energiach równych szerokości pasma zabronionego. Dla innych długości fal, czułości fotoelementów są niższe. Na rysunku 3 (poz. 3) pokazano charakterystykę widmową fotodiody krzemowej wraz z czułością widmową oka. Jak widać, charakterystyki widmowe półprzewodnikowych czujników światła są przesunięte w kierunku promieniowania podczerwonego w stosunku do oka ludzkiego. Dlatego, w celu dopasowania tych elementów do oceny światła widzialnego, często wyposaża się je w odpowiednie filtry optyczne i obróbkę sygnału (zarówno analogową, jak i cyfrową).

Elektryczne czujniki światła (podobnie jak inne czujniki wielkości nieelektrycznych) podzielić można na parametryczne i generacyjne. Pierwszą grupę stanowią elementy, których parametry zmieniają się w funkcji padającego strumienia świetlnego. Są to, m.in. fotorezystor, fotodioda, fototranzystor. Czujniki generacyjne reagują wytworzeniem własnego sygnału (napięcie, prąd) w funkcji zmieniającego się mierzonego sygnału świetlnego (fotoogniwo, termostos).

Wybrane czujniki światła

- Fotorezystor

W niektórych materiałach jednorodnych przerwa energetyczna jest na tyle niewielka, że możliwe jest bezpośrednie pochłanianie fotonów powodujących przechodzenie elektronów do pasma przewodzenia. Fakt ten wykorzystuje się, między innymi, w fotorezystorach będących czujnikami nie zawierającymi w swej strukturze złącza półprzewodnikowego. Podstawowym elementem konstrukcji fotorezystora jest warstwa fotoczuła umieszczona na podłożu izolacyjnym (rys. 4a). Między elektrodami istnieje zatem rezystancja R_f , której wartość zależy od padającego strumienia świetlnego Φ_v (5). Na skutek oświetlenia fotorezystora, jego rezystancja zmniejsza się, co bezpośrednio wynika z rosnącej liczny elektronów w paśmie przewodzenia. Charakterystyka $R_f=f(E_v)$ nie jest jednak liniowa (rys. 4b), podobnie jak charakterystyka prądowo – napięciowa.



Rys. 4. Uproszczona konstrukcja fotorezystora (a) oraz przykładowe charakterystyki rezystancji w funkcji natężenia oświetlenia (b)

$$R_f E_v^\gamma = E_v \ln \frac{R(10lx)}{R(100lx)} \quad (5)$$

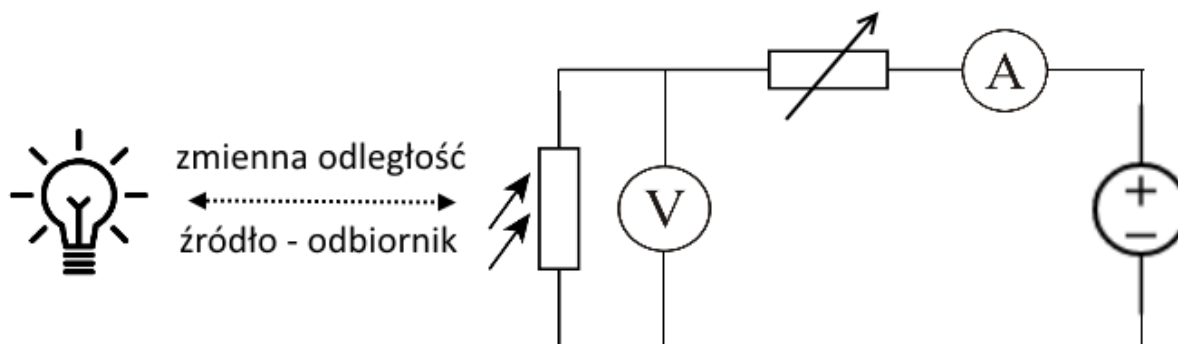
gdzie: R - rezystancja fotorezystora; γ - współczynnik wzmocnienia

Fotorezystory wykonywane są, przede wszystkim z:

- siarczku kadmu (CdS) – czułość w zakresie promieniowania widzialnego;
- selenku kadmu (CdSe) – czułość w zakresie promieniowania podczerwonego.

- Pomiary fotorezystora

Schemat pomiarowy do badania fotorezystora pokazano na rysunku 5. Składa się z źródła światła o kontrolowanym natężeniu emitowanego promieniowania, referencyjnego miernika oświetlenia, źródła napięciowego, amperomierza, woltomierza oraz badanego fotorezystora. Stanowisko pozwala na wyznaczenie rezystancji fotorezystora metodą techniczną, w funkcji natężenia oświetlenia.



Rys. 5. Elementy stanowiska do badania fotorezystora

W pierwszej kolejności należy wyznaczyć charakterystykę rezystancji fotorezystora przy minimalnym natężeniu oświetlenia zewnętrznego (ok. 10 lx - rezystancja ciemna) w funkcji prądu. Wykonując charakterystykę prądowo – napięciową przy braku oświetlenia istnieje możliwość określenia zakresu prądów, przy których błąd wynikający z cieplnej generacji par elektron – dziura jest pomijalny. Jedynie w tym zakresie fotorezystor może być wykorzystywany w charakterze „czujnika światła”. Wyniki pomiarów należy zestawić w tablicy nr 2.

Tab. 2. Pomiar rezystancji ciemnej fotorezystora

L. P.	U, V	I, mA	$R = U/I, \Omega$
1			
2			

Na podstawie wykonanych pomiarów (rezystancja ciemna) należy zaprezentować wykres $R=f(I)$. Określić zakres prądów, w których fotorezystor może być wykorzystywany jako „czujnik światła”.

Po zakończeniu pomiarów rezystancji „ciemnej” należy przygotować się do pomiarów rezystancji fotorezystora w funkcji zmieniającego się natężenia oświetlenia. Należy wyznaczyć wartości graniczne (prądu i napięcia) sygnałów, gwarantujące utrzymanie odpowiedniej dokładności wyników. Zmieniając wysterowanie źródła światła należy doprowadzić do utrzymywania natężenia oświetlenia na poziomie 10 oraz 100 lx (wykorzystując referencyjny miernik). W tych warunkach należy odczytać wartości rezystancji fotorezystora, korzystając z metody technicznej (tab. 3). Wyniki sporządzić dla, co najmniej dwóch wartości prądu/napięcia.

Tab. 3. Pomiar rezystancji fotorezystora

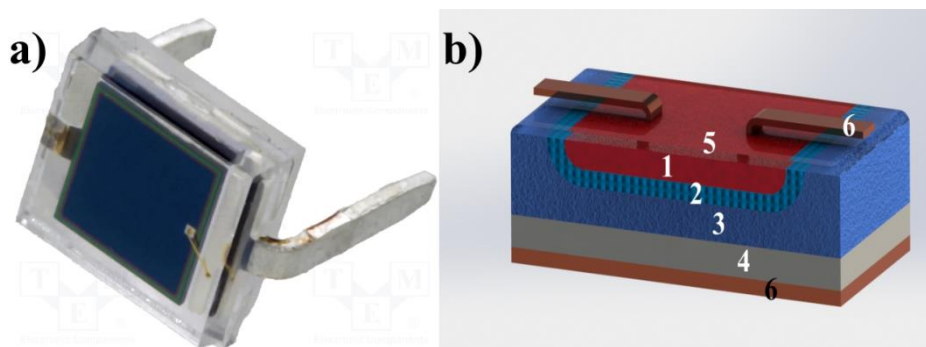
L. P.	E_v, lx	U, V	I, mA	$R = U/I, \Omega$
-------	-----------	------	-------	-------------------

1	10			
2	100			
3	1000			
4	2000			

Na podstawie wykonanych badań wyznaczyć współczynniki wzmocnienia dla zależności (5) [wzmocnienie definiowane jako zmiana sygnału czujnika do zmiany natężenia oświetlenia]. Kolejne badania fotorezystora wykonać w sposób analogiczny do poprzednich, mierząc metodą techniczną rezystancję w funkcji natężenia oświetlenia. Wyniki zebrać w tabeli według wzoru tab. 3, zmieniając natężenie oświetlenia w zakresie 10 – 2000 lx. Na podstawie otrzymanych wyników należy wykreślić charakterystykę rezystancji fotorezystora w funkcji natężenia oświetlenia. Należy również porównać rzeczywistą charakterystykę, z teoretyczną, wykreśloną na podstawie zależności (5) (w tym przypadku wykorzystać współczynnik wyznaczony podczas badań dla 10 i 100 lx).

- Fotodioda

Najprostszym półprzewodnikowym czujnikiem światła wykorzystującym złącze p-n jest fotodioda. Prawdą jest, że każdy rodzaj złącza p-n jest elementem wrażliwym na padające promieniowanie. Dlatego konstrukcja najprostszej fotodiody odpowiada zwykłej diodzie prostowniczej, zarówno pod względem budowy wewnętrznej, jak i charakterystyk prądowo – napięciowych. Istotną różnicą wynika z konieczności „dostarczenia” promieniowania w okolice złącza fotodiody, co osiąga się stosując przezroczyste lub częściowo przezroczyste obudowy (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowy widok (a) oraz konstrukcja fotodiody (b). 1 - materiał p+; 2 - obszar złącza; 3 - materiał typu n, 4 - materiał n+; 5 - warstwa antyrefleksyjna; 6 - kontakt

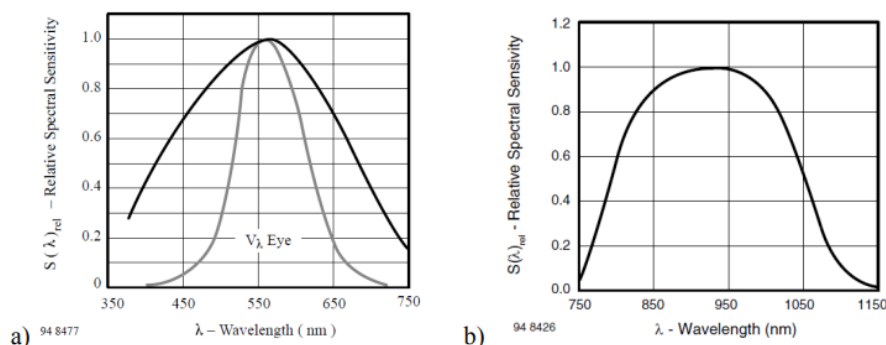
Na skutek pochłaniania w złączu energii w postaci strumienia świetlnego Φ , zwiększa się energia elektronów, które zajmują poziomy w paśmie przewodzenia (patrz. Rozdz. 3 – efekt fotoelektryczny). Zwiększona liczba ładunków w paśmie przewodzenia powoduje możliwości generacji sygnału napięciowego lub prądowego. Istnieją dwie możliwości pracy fotodiody:

- tryb fotoogniwa;
- tryb fotodiody.

Z uwagi na zmiany napięcia występującego na zaciskach diody nie dołączonej do obwodów zewnętrznych (niespolaryzowanej), element ten zachowuje się jak fotoogniwo i w

taki sposób może być eksploatowany. Możliwe jest zatem znalezienie korelacji pomiędzy napięciem na zaciskach fotoogniwa lub prądu fotoogniwa w funkcji natężenia padającego strumienia świetlnego. Tym niemniej, podstawowym obwodem pomiarowym fotodiody jest układ, w którym spolaryzowana jest ona w kierunku zaporowym.

W warunkach wstecznej polaryzacji, pod wpływem padającego promieniowania generowany jest prąd wsteczny I_r o wartości proporcjonalnej do padającego strumienia Φ_v . Prąd ten zwany jest również fotoprądem. Jego wartość odniesiona do strumienia promieniowania monochromatycznego Φ_e o danej długości λ nazywana jest czułością fotoelektryczną $S(\lambda)$ (6). Przykładowe charakterystyki czułości fotodiod pokazano na rysunku 7.

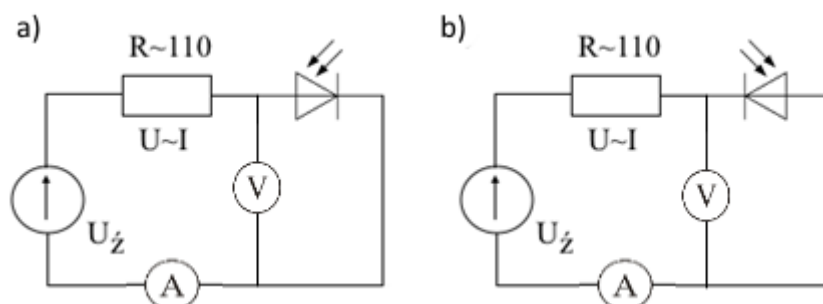


Rys. 7. Przykładowe czułości fotodiod [5]

$$S(\lambda) = \frac{I_r}{\phi_e} \quad (6)$$

- Pomiary fotodiody

Charakterystyka $I = f(U)$ fotodiody oświetlonej opisać można zależnością typu (4), przy czym ciemny prąd wsteczny I_0 silnie zależy od temperatury i podwaja się co ok. 8 K. Przy maksymalnym oświetleniu, wartości prądu fotoelektrycznego osiągają kilkaset μA . Niewątpliwą zaletą takiej pracy jest niemal liniowa zależność prądu fotoelektrycznego od natężenia strumienia energetycznego padającego na złącze. Do pomiarów charakterystyk fotodiody należy wykorzystać układy pomiarowe według rysunku 8.



Rys. 8. Układy do badania charakterystyk fotodiody

Układ pomiarowy pokazany schematycznie na rysunku 8a pozwala na pomiar charakterystyki prądowo - napięciowej fotodiody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. W ramach tego eksperymentu należy wyznaczyć charakterystyki $I=f(U)$ w przypadku braku oświetlenia oraz przy natężeniu $\Phi_e=100$ lx, 500 lx oraz 1000 lx. Należy pamiętać, by prąd fotodiody podczas pomiarów nie przekraczał wartości 100 mA. Wyniki zestawić w tablicy nr 4.

Tab. 4. Pomiary fotodiody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

Φ_e, lx	U, V	U_R, V	I, mA	P, mW
0				
0				
...				
100				
...				

Na podstawie wykonanych pomiarów należy wykreślić i porównać charakterystyki $I=f(U)$ oraz $P=f(I)$ diody. Na tej podstawie określić maksymalny prąd powodujący samopodgrzewanie diody, wpływający na jej czułość. Dodatkowo należy wyznaczyć czułość "napięciową" i "prądową" fotodiody, określając wzrost mierzonych parametrów (napięcia lub prądu) w zależności od natężenia padającego promieniowania.

Zdecydowanie częściej fotodiody wykorzystywane jest w warunkach polaryzacji zaporowej (rys. 8b). Badania statyczne dla tego przypadku należy wykonać w następujących cyklach:

- charakterystyka $I=f(U)$ diody spolaryzowanej zaporowo przy stałym oświetleniu;
- charakterystyka $I=f(\Phi_e)$ diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym przy stałym napięciu.

W przypadku charakterystyki (a), po spolaryzowaniu diody w kierunku zaporowym, ustawić źródło światła na wartość Φ_e na stałą wartość z zakresu 100 – 1000 lx (podobnie jak w przypadku badań fotodiody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia). Zmieniając wartości napięcia źródła w zakresie 0,5 – 10 V (z krokiem 0,2 V) odczytywać wartość prądu płynącego przez diodę. Wyniki zestawić w tabeli według tab. 5.

Tab. 5. Zestaw parametrów potrzebnych do wyznaczenia charakterystyki fotodiody

L.P.	U_z, V	U_0, V	I_0, mA	Φ_e, lx	R, Ω
1					
2					

Po spolaryzowaniu diody w kierunku zaporowym należy dodatkowo wyznaczyć charakterystykę napięcia U_0 proporcjonalnego do prądu fotodiody w funkcji natężenia oświetlenia. Na tej podstawie należy wyliczyć charakterystykę czułości fotodiody według zależności (6) [przy stosowaniu źródła prądowego, zamiast I_r w tej zależności podstawić należy wartość napięcia]. Wyniki zestawić w tablicy według tab. 6. Przy pomiarach należy ustawić stałą wartość napięcia na zewnętrznym źródle. Wartość ta powinna być dobrana w oparciu o pomiary wykonane w części (a), w taki sposób, by zagwarantowana była liniowa zależność prądu od strumienia świetlnego. Wartości natężenia oświetlenia zmieniać od 0 do 1000 lx.

Tab. 6. Zestaw parametrów do pomiaru charakterystyki $I=f(\Phi_e)$ fotodiody

L.P.	Φ_e, lx	R, Ω	U_0, V	S
1				
2				

3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy podać następujące informacje:

- podać zwięzły opis podstaw działania badanych czujników światła;
- zrealizować wszystkie zadania opisane w rozdziale 4 oraz wskazane przez prowadzącego;
- określić przyczyny odmienności charakterystyk rzeczywistych od teoretycznych;
- podać wnioski i spostrzeżenia.

4. Pytania weryfikacyjne

- Opisz podstawowe wielkości radiometrii i fotometrii

Patrz tab. 1.

- Scharakteryzuj podstawy fizyczne efektu fotoelektrycznego

Model pasm energetycznych (rys. 1) może być wykorzystany do łatwego pokazania, w jaki sposób światło oddziałuje z materią. Zakładamy, że foton o energii $h\nu$ pada na półprzewodnik o przerwie energetycznej E_g . Jeżeli energia fotonu jest większa niż przerwa, zanika on (anihiluje). Jego energia zostaje jednak wykorzystana do przeniesienia elektronu z poziomu walencyjnego do pasma przewodzenia. Przy tym przejściu uzyskiwany jest nie tylko dodatkowy elektron w paśmie przewodzenia, lecz również miejsce po elektronie (dziurę) w paśmie walencyjnym. Wytworzone nośniki energii (dziura i elektron) mogą poruszać się w obrębie półprzewodnika.

- Opisz podstawowe układy pracy fotodiody

Istnieją dwa podstawowe układy pracy fotodiody:

- tryb fotoogniwa;
- tryb fotodiody.

Z uwagi na zmiany napięcia występującego na zaciskach diody nie dołączonej do obwodów zewnętrznych (niespolaryzowanej), element ten zachowuje się jak fotoogniwo i w taki sposób może być eksploatowany. Możliwe jest zatem znalezienie korelacji pomiędzy napięciem na zaciskach fotoogniwa lub prądu fotoogniwa w funkcji natężenia padającego strumienia świetlnego. Tym niemniej, podstawowym obwodem pomiarowym fotodiody jest układ, w którym spolaryzowana jest ona w kierunku zaporowym.

- Scharakteryzuj czynniki wpływające na parametry pracy fotodiody

Charakterystyki wyjściowe fotodiody zależą, między innymi od:

- Natężenia padającego promieniowania;
- Rozkładu widmowego promieniowania.
- Temperatury (cieplna generacja nośników energii);
- Polaryzacji fotodiody;
- Wielkości aktywnej powierzchni fotodiody;
- Prądu płynącego przez złącze.

- Opisz czynniki wpływające na czułość fotorezystora

Podstawowym elementem konstrukcji fotorezystora jest warstwa fotoczuła umieszczona na podłożu izolacyjnym. Wartość rezystancji tej warstwy zależy od padającego strumienia świetlnego. Na skutek oświetlania fotorezystora, jego rezystancja zmniejsza się, co bezpośrednio wynika z rosnącej liczby elektronów w paśmie przewodzenia. Czułość fotorezystora zależy, między innymi od:

- Natężenia padającego promieniowania;
- Temperatury (cieplna generacja nośników energii);
- Prądu płynącego przez fotorezystor (efekt samopodgrzewania);
- Wielkości aktywnej powierzchni fotorezystora;
- Rozkładu widmowego promieniowania.

5. Literatura

- [1] Bielecki Z., Rogalski A.: Detekcja Sygnałów Optycznych, Warszawa, WNT 2001
- [2] Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy Techniki Świetlnej i Elektrotermii, WPP 2006
- [3] Hawking S.: Krótka Historia Czasu,
- [4] Yan J.: Optical Electronics: An Introduction, De Gruyter 2019, ISBN: 978-3110500493
- [5] BPW 85A Datasheet, rev. 2018