



Politechnika Wroclawska

**Wydział Elektryczny,
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych**
Laboratorium Przetwarzania i Analizy Sygnałów Elektrycznych
(bud A5, sala 310)

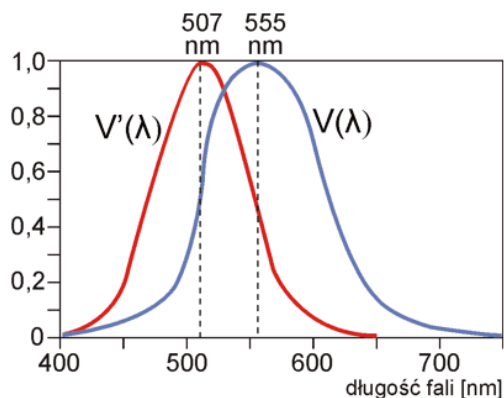
Wydział/Kierunek	Nazwa zajęć laboratoryjnych	Nr zajęć
Elektryczny/ AiR	Czujniki i przetworniki	2
Chemiczny	Pomiary w aparaturze procesowej	6

Tytuł:

Wyznaczanie charakterystyk czujników światła

1 Wstęp - podstawy fotometrii

Fotometria – dział fizyki – optyki, zajmujący się pomiarem parametrów światła. Przez światło rozumie się szeroki zakres od podczerwonego (IR) przez widziane przez człowieka (VIS), do ultrafioletowego (UV).

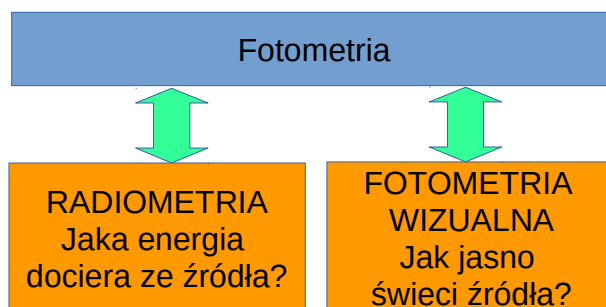


Rysunek 1.1: Krzywa względną czułości oka ludzkiego dla widzenia dziennego $V(\lambda)$ i nocnego $V'(\lambda)$ [1]

Domyślnie za światło przyjmuje się promieniowaniem elektromagnetycznym wywołującym u ludzi i zwierząt wrażenia świetlne umożliwiające widzenie. Widmo fal elektromagnetycznych widzialnym dla człowieka jest bardzo wąskie - obejmuje zakres o długości fali od 380 nm (fiolet) do 780 nm (czerwień). Wyróżnienie tego zakresu promieniowania wynika z fizjologii oka ludzkiego.

Fotometria opisuje zjawiska propagacji energii fal świetlnych emitowanych przez źródła światła na dwa sposoby:

- 1) Subiektywny (fotometria wizualna) – zajmuje się jedynie tą częścią energii promienistej, która jest postrzegana przez ludzkie oko jako światło i uwzględnia czułość oka. Pomiary obejmują opis wrażeń wzrokowych wywoływanych przez działanie światła na oko.
- 2) Obiektywny (fotometria energetyczna - radiometria) - opis opiera się na pojęciu całkowitej energii promienistej emitowanej przez źródło. Pomiary obejmują energetyczne charakterystyki światła.



Rys. 1.2 Opis zjawisk świetlnych

Radiometria mierzy ilość energii docierającej ze źródła (w jednostkach energetycznych), a fotometria wizualna określa jak jasno świeci to źródło. Symbole wielkości radiometrycznych mają odpowiedniki w wielkościach fotometrycznych (tablica 1.1). W tabeli umieszczono także nazwy wielkości w języku angielskim w celu łatwiejszego zapoznania się studenta z danymi katalogowymi czujników (detektorów) światła. Dane katalogowe są załącznikiem do instrukcji.

Tablica 1.1 Wielkości fotometryczne i radiometryczne

Radiometria	Fotometria
Strumień energetyczny Φ_e [W], <i>Radiant power, Radiant flux</i>	Strumień świetlny Φ_v [lm] <i>Luminous flux</i> $\Phi_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
Irradiacja – Natężenie napromieniowania E_e [W/m ²], <i>Irradiance</i> $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int_{2\pi sr} (L_e \cos(\theta) d\Omega)$	Natężenie oświetlenia E_v [lux] <i>Illuminance</i> $E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} = \int_{2\pi sr} (L_v \cos(\theta) d\Omega)$
Radiacja - natężenie promieniowania I_e [W/sr] <i>Radiant intensity</i> $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Światłość – natężenia źródła światła I_v [cd] <i>Luminous intensity</i> $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$
Luminancja energetyczna L_e [W/(m ² sr)] <i>Radiance</i> $L_e = \frac{d\Phi_e}{dA \cos(\theta) d\Omega}$	Luminancja – jasność widzenia L_v [cd/m ²] <i>Luminance</i> $L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cos(\theta) d\Omega}$
Egzytancja energetyczna M_e [W/m ²] <i>Radiant exitance</i> $M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int_{2\pi sr} (L_e \cos(\theta) d\Omega)$	Emitancja świetlna M_v [lm/m ²] <i>Luminous exitance</i> $M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} = \int_{2\pi sr} (L_v \cos(\theta) d\Omega)$

Strumień świetlny Φ_v [lm] jest to ta część promieniowania optycznego emitowanego przez źródło światła, którą widzi oko ludzkie w jednostce czasu. Wielkość tą można wyznaczyć ze strumienia energetycznego z zależności

$$\Phi_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

gdzie K_m to fotometryczny równoważnik promieniowania (w widzeniu fotopowym - w warunkach normalnych wynosi 683 lm/W), $\Phi_e(\lambda)$ – gęstość widmowa mocy promienistej, $V(\lambda)$ – względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego (określa wrażliwość oka na promieniowanie monochromatyczne). Dla fali o długości $\lambda=555nm$ wynosi 1. (rysunek 1.1)

Między strumieniem energetycznym Φ_e a odpowiadającym mu strumieniem świetlnym Φ_v , istnieje zależność

$$\Phi_v = K_m V(\lambda) \Phi_e$$

Jeśli strumień świetlny mierzy się w lumenach a strumień energetyczny w watach, to: $\Phi_v = 683 \Phi_e$.

Natężenie oświetlenia E_v [lux] jest to iloraz elementarnego strumienia świetlnego $d\Phi$ padającego na elementarną powierzchnię dA do jej wielkości

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

Światłość – natężenie źródła światła I_v [cd] - jest to stosunek strumienia świetlnego $d\Phi$ wysyłanego przez punktowe źródło światła w nieskończenie mały kąt bryłowy $d\Omega$ do wartości tego kąta

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

Emitancja świetlna M_v [lm/m^2] – strumień energii wysyłany przez jednostkowy element powierzchni świecącej otaczający dany fragment źródła światła do wielkości tej powierzchni.

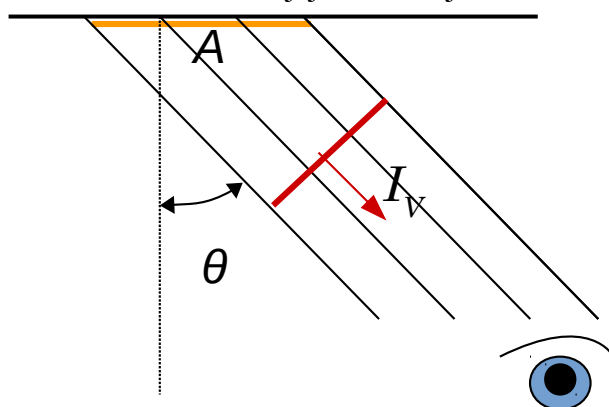
$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

Luminancja – jasność widzenia L_v [cd/m^2]

Rozłożone źródła światła i powierzchnie, które świecą (lub rozpraszają padające nań światło) można scharakteryzować ze względu na odbierane wrażenie jaskrawości. Wprowadzono miarę „jasności” świecących powierzchni - luminancję.

Luminancja jest wielkością zależną od kierunku. Ponadto zależy ona od natężenia oświetlenia na obserwowanym obiekcie, właściwości odbiciowych powierzchni obiektu (barwa, stopień chropowatości) oraz od jego pola pozornej powierzchni świecącej.

Pozorna powierzchnia świecąca jest to wielkość postrzeganej przez obserwatora powierzchni płaszczyzny świecącej uzależniona od kierunku jej obserwacji.



Rys. 1.3 Luminancja obiektu o powierzchni A

Luminancja L_v danego elementu powierzchni świecącej w określonym kierunku jest to iloraz światłości elementarnego pola powierzchni w tym kierunku do pola powierzchni pozornej tego elementu.

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cos(\theta) d\Omega}$$

2 Detektory oświetlenia – czujniki natężenia oświetlenia

W rozdziale opisano czujniki zastosowane na stanowisku pomiarowym. Są to czujniki działające na zasadzie efektu fotoelektrycznego wewnętrznego - oddziaływanie kwantów światła z elektronami materiału detektora czemu towarzyszą zmiany prądu płynącego w detektorze (lub oporu materiału detektora).

2.1 Fotorezystor

Fotorezystor wykonywany jest z materiału półprzewodnikowego. Fotorezystor nie zawiera złącza.

Kierunek przepływu prądu nie wpływa na rezystancję. Fotony powodują generację par elektron dziura co zwiększa prąd płynący w obwodzie. Fotorezystory najczęściej wykonane są z:

- Siarczku kadmu CdS – czuły na światło widzialne,
- Selenku kadmu CdSe – czuły na światło podczerwone.

Przy średnich natężeniach oświetlenia rezystancja zależy w przybliżeniu od natężenia oświetlenia wg zależności:

$$R(E_v) \sim E^\gamma$$

gdzie :

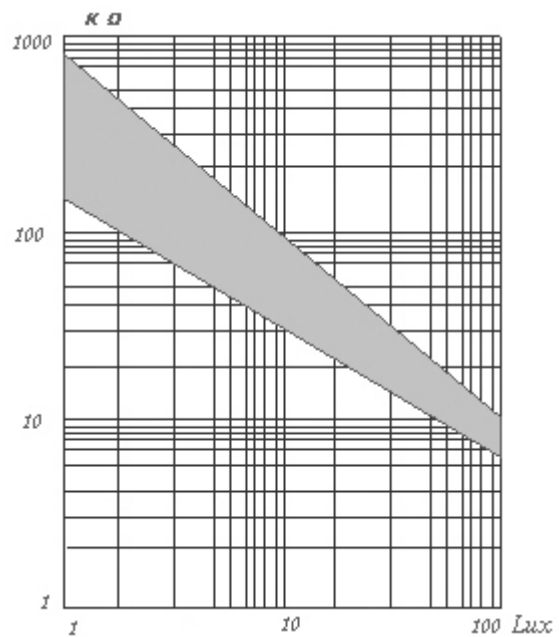
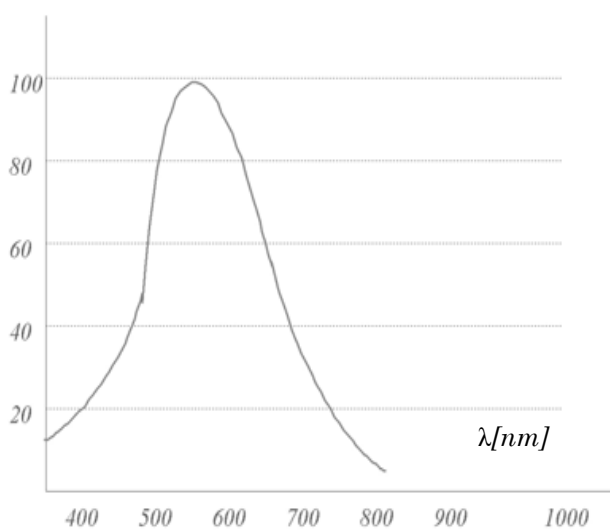
$$\gamma = \ln \frac{R(10lx)}{R(100lx)}$$

a $R(10lx)$ i $R(100lx)$ to rezystancje przy danym natężeniu oświetlenia. Współczynni γ wynosi zawiera się w granicach 0,5...1. W opisie fotorezystorów stosuje się także pojęcia:

- rezystancja jasna – wartość do której zmierza opór przy zwiększaniu oświetlenia,
- rezystancja ciemna – wartość przy braku oświetlenia
- czas przełączania (kilkadziesiąt milisekund),
- długość fali dla maksymalnej czułości oraz zmienność czułości.

Stosunek rezystancji ciemnej do jasnej jest rzędu 10^6 . Fotorezystory mają rozrzuty charakterystyki $R=f(E)$ dochodzące do kilku procent.

Czułość fotoelektryczna względna $S(\lambda)$ (%)



Rys. 2.1 Charakterystyki fotorezystora GL55

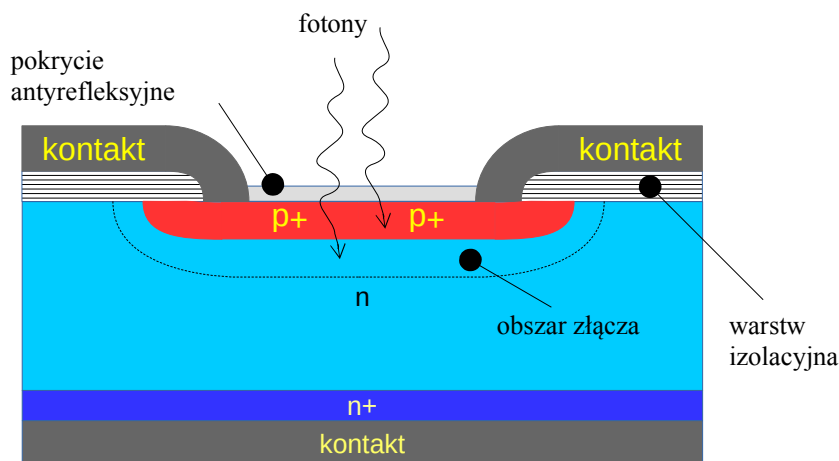
2.2 Fotodioda

Czujnik - fotodioda krzemowa wykonana jest podobnie jak dioda prostownicza z tym , że w obudowie znajduje się okno przepuszczające światło (rysunek 2.2). Charakterystyka $I=f(U)$ nieoświetlonej diody jest opisana wzorem

$$I = I_S e^{\left(\frac{qU}{kT} - 1\right)}$$

gdzie: T – temperatura, ładunek elektronu $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, stała Boltzmana $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K,

I_S - prąd ciemny, wsteczny zależy od wykorzystanej technologii i silnie zależy od temperatury. Podwaja się co 8°C.

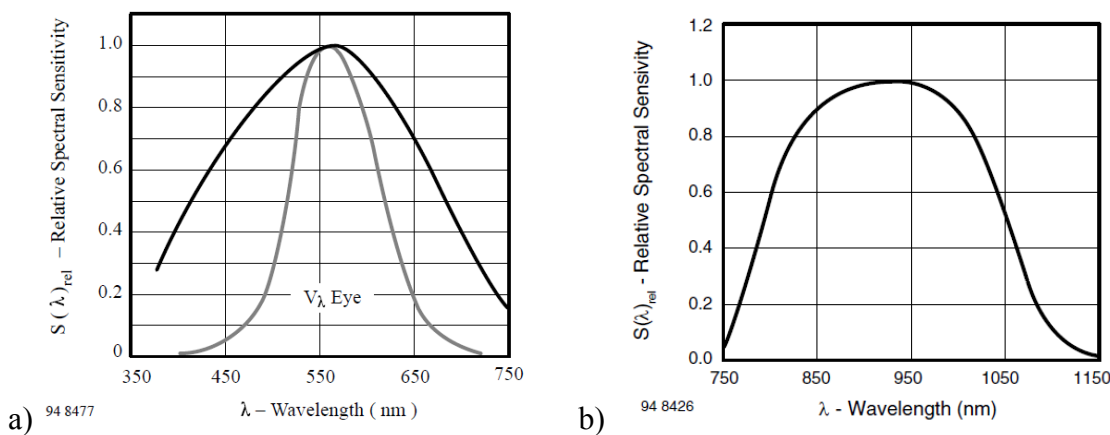


Rys.2.2. Budowa fotodiody

Fotodioda poddana działaniu promieniowania generuje prąd I_r zwany fotoprądem proporcjonalny do padającego strumienia promieniowania Φ_e . (Stosuje się oznaczenie I_r - *ang reverse current* ponieważ dioda w aplikacji układowej najczęściej jest spolaryzowana wstecznie). Iloraz fotoprądu I_r i strumienia promieniowania monochromatycznego Φ_e o długości fali λ przy nazywany jest czułością fotoelektryczną $S(\lambda)$ (odpowiedzią fotoelektryczną na daną długość fali) (*ang. spectral responsibility*).

$$S(\lambda) = \frac{I_r}{\Phi_e}$$

Przykładowy wykres zależności czułości fotoelektrycznej $S(\lambda)$ przedstawia rysunek 2.3



Rys 2.3. Czułość fotoelektryczna względna $S(\lambda)$. a) BPW21 R – na światło widzialne, b)BPW83 - podczerwień

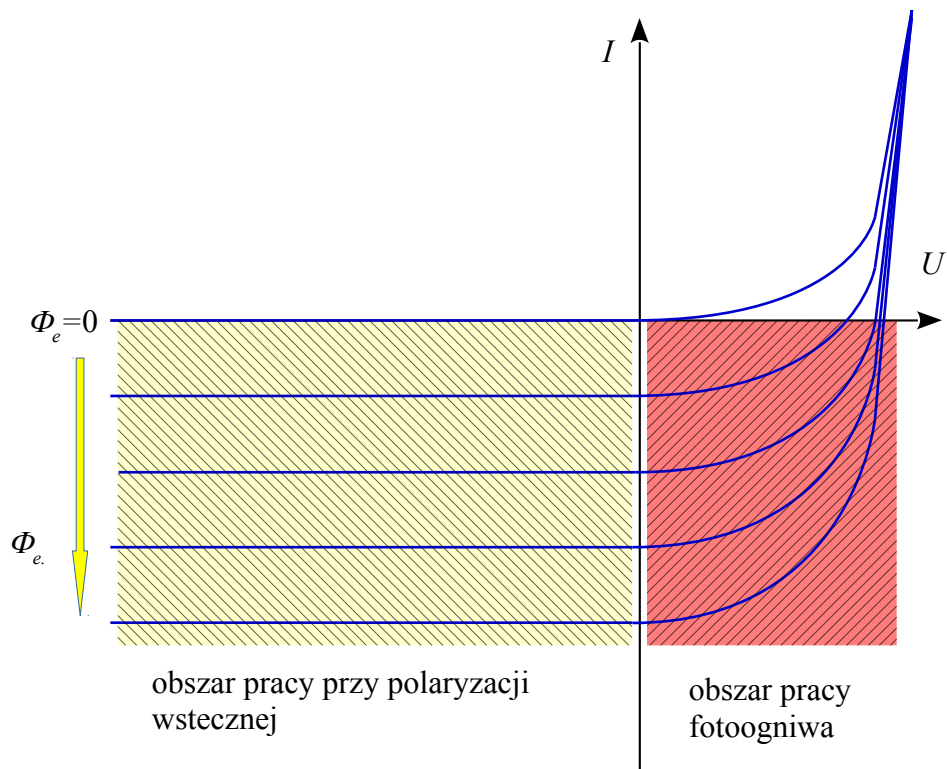
Prąd diody oświetlonej jest równy

$$I = I_s e^{\left(\frac{qU}{kT} - 1\right)} - S(\lambda) \cdot \Phi_e$$

Przy napięciu na diodzie $U=0$ lub przy spolaryzowaniu wstecznym można zapisać

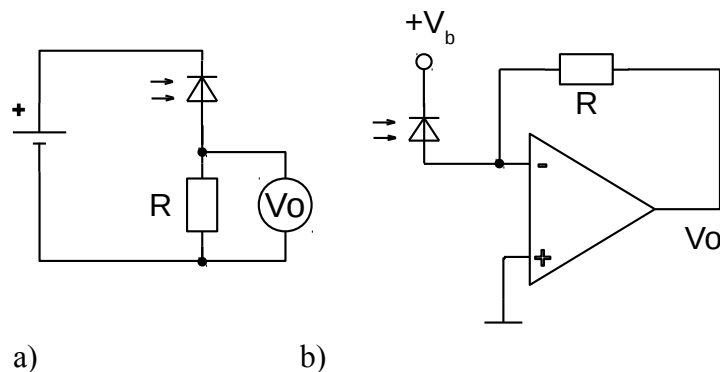
$$I = -I_s - S(\lambda) \cdot \Phi_e$$

Charakterystyki fotodiody przedstawia rysunek 2.4. Prąd przy maksymalnym oświetleniu może mieć wartość kilkuset μA .



Rys 2.4. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody w zależności od padającego strumienia energetycznego

Przy spolaryzowaniu diody w kierunku zaporowym prąd fotoelektryczny zależy proporcjonalnie do strumienia energetycznego padającego na złącze.



Rys. 2.5 Układ pomiaru prądu fotodiody przy polaryzacji wstecznej

W układach pomiarowych przedstawionych na rysunku 2.5 napięcie V_o wynosi

$$V_o = -R \cdot S(\lambda) \cdot \phi_e$$

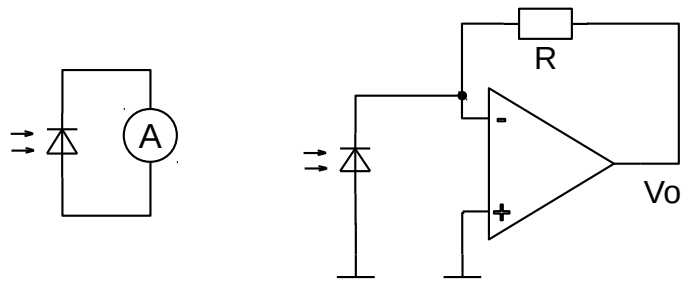
2.3 Fotoogniwo

Niespolaryzowana fotodioda pracuje jako fotoogniwo. Wykorzystuje się dwa stany pracy:

- a) stan zwarcia - rezystancja obciążająca diodę $R_L = 0\Omega$
- b) stan jałowy, otwarty rezystancja obciążająca diodę $R_L = \infty$.

Dla *stanu „zwarcia”* prąd jest proporcjonalny do strumienia padającego na fotodiode (podobnie jak dla diody spolaryzowanej wstecznie).

Pomiar prądu odbywa się w układach przedstawione na rysunku 2.6



a)

b)

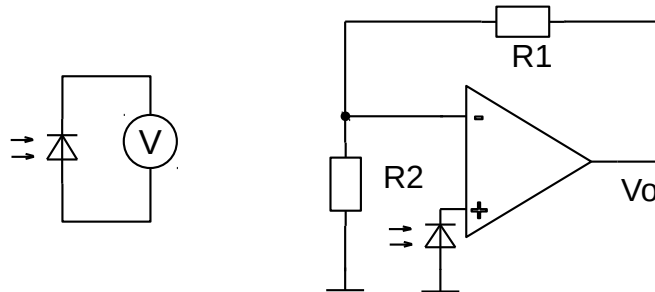
Rys. 2.6 Układ pomiaru prądu fotodiody – praca w trybie zwarte fotoogniwo

Dla układu z rysunku 2.26 napięcie wyjściowe jest równe

$$V_0 = -R \cdot S(\lambda) \cdot \phi_e$$

Dla **stanu „pracy jałowej”** fotodiody (nieobciążone fotoogniwo) napięcie mierzonego woltomierzem o bardzo dużej rezystancji (dążącej do ∞) jest równe:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{S(\lambda) \cdot \phi_e}{I_s} + 1\right)$$



a)

b)

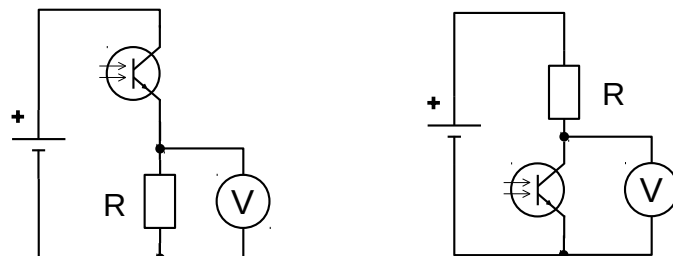
Rys. 2.7 Układ pomiaru prądu fotodiody – praca w trybie nieobciążone fotoogniwo

Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego zmniejsza prąd obciążenia fotodetektora (Rys 2.2b)

Napięcie jest proporcjonalne do logarytmu strumienia padającego na czujnik. Wadą jest duża zależność sygnału od temperatury.

2.4 Fototranzystor

Fototranzystor zbudowany jest podobnie jak fotodioda. Czule na strumień świetlny jest złącze baza-kolektor. Typowe układy pracy fototranzystora przedstawia rysunek 2.7.



a)

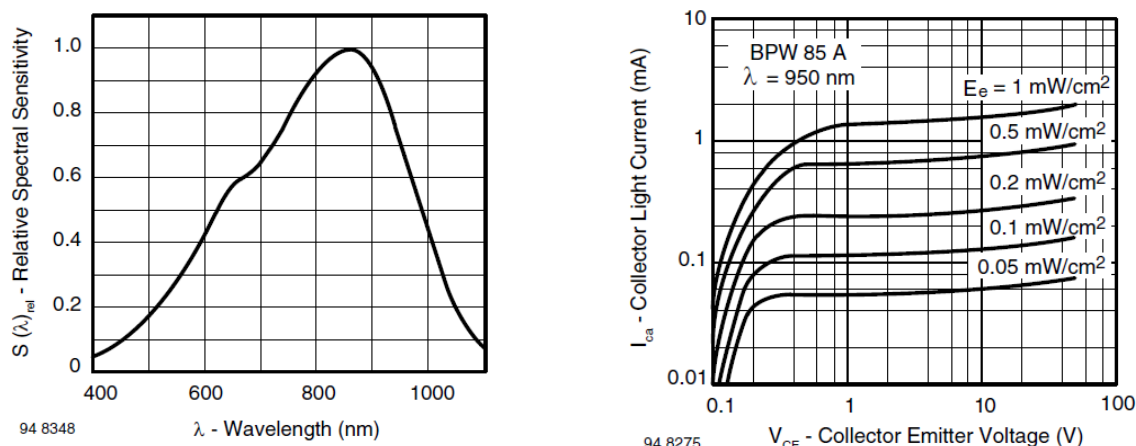
b)

Rys. 2.8. Układ pracy fototranzystora

Napięcie wskazywane przez woltomierz w układzie na rysunku 2.8.b wynosi

$$U = V_{cc} - \beta \cdot S(\lambda) \cdot \phi_e \cdot R$$

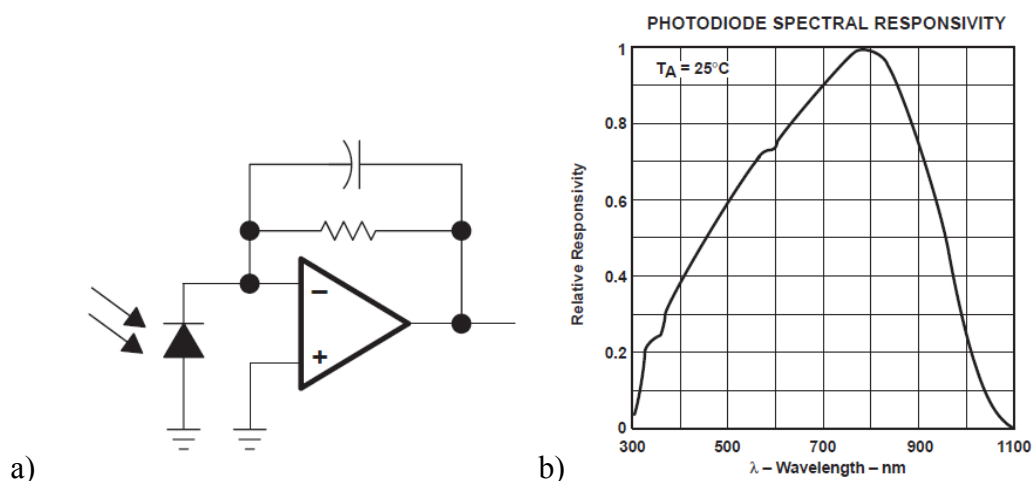
gdzie β to wzmacnienie prądowe tranzystora a V_{cc} to napięcie zasilające.



Rys 2.9. Charakterystyki tranzystora BPW85A a) Czulość fotoelektryczna względna $S(\lambda)$. b) Prąd kolektora w zależności od napięcia UCE i iradiacji (natężenie napromieniowania).

2.5 TSL 250

Układ TSL 250 jest przetwornikiem natężenia światła na napięcie. Zbudowany jest z fotodiody i wzmacniacza transimpedancyjnego.



Rys. 2.7 Czujnik TSL250 a) Blok funkcjonalny b) Czulość fotoelektryczna względna $S(\lambda)$.

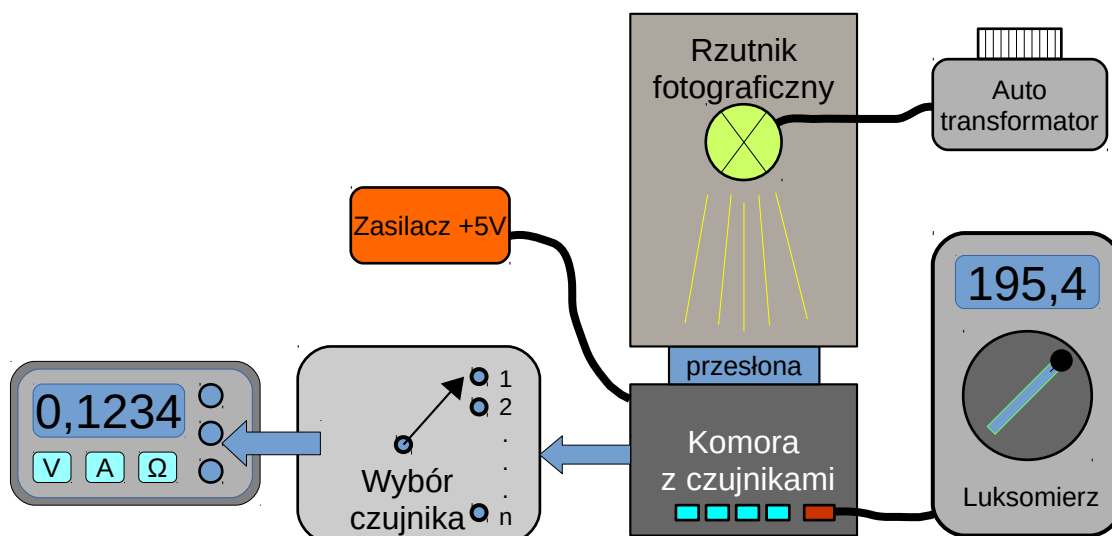
3 Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z rzutnika fotograficznego oświetlającego wnętrze komory zawierającej badane czujki światła oraz sondę luksomierza. Regulacja natężenia oświetlenia możliwa jest przez zmianę stopnia przesłony lub napięcia zasilającego źródło światła (autotransformator albo „ściemniacz tyrystorowy”). Do wyboru mierzonego czujnika służy przełącznik. Czujnikom przypisano następujące pozycje:

1. Fotodioda,
2. Fototranzystor,
3. TSL 250 – scalony czujnik zawierający fotodiodę oraz wzmacniacz operacyjny.
4. Fotoogniwo

5. Fotorezystor.

Układy pomiarowe fotodiody, fototranzystora i TSL250 powinny być zasilone napięciem z zakresu od 4 do 12V.



Rys 3.1. Schemat poglądowy stanowiska do badania właściwości czujników światła.

4 Przebieg ćwiczenia

Prze wykonaniem pomiarów sprawdź czy czujniki są oświetlane przez źródło światła. W tym celu ustaw maksymalne napięcie zasilające żarówkę. Natężenie oświetlenie mierzone luksomierzem powinno wynosić ponad 300Lux. Jeżeli jest niższe to otwórz przysłonę. Można także ściągnąć przednią ściankę komory i sprawdzić czy światło pada na czujniki. Można skorygować położenie komory.

Gdy komora jest prawidłowo umieszczona pod rzutnikiem włącz zasilacz +5V.

- Wybierz przełącznikiem czujnik.
- Ustaw multimetr do pomiaru wielkości wyjściowej (napięcie stałe lub oporność dla fotorezystora).
- Wykonuj dla czujnika serię pomiarów w całym zakresie natężenia oświetlenia

Po wykonaniu serii pomiarów wybierz kolejny czujnik.

W zakresie natężenia oświetlenia do 100Lux punkty wybieraj co 10Lux. Powyżej 100Lux co 50Lux aż do maksymalnej możliwej do ustawienia wartości.

Tabela pomiarowa

	fotodioda	fototranzystor	TSL250	fotogniwo	fotorezystor
E [Lux]	U[mV]	U[V]	U[V]	U[mV]	R [kΩ]
0					
10					
...
100					

150					
...

W sprawozdaniu

Wykreślić charakterystyki sygnału wyjściowego czujników w funkcji natężenia oświetlenia

Wyznaczyć względną czułość lokalną oraz średnią (dla aproksymacji liniowej).

We wnioskach porównać czujniki. Określić zakres pracy oraz podać propozycję zastosowania czujnika.

5 Literatura

- [1]. <http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materialy/fotometria/index.html> (30.01.2017)
- [2]. GL55 Series- CdS Photoresistor Manual www.sbcde.com.cn (30.01.2017)
- [3]. karta fotodiody BPW21 – www.vishy.com, (30.01.2017)
- [4]. karta fotodiody BPW83 – www.vishy.com, (30.01.2017)
- [5]. karta fotodiody BPW85a – www.vishy.com, (30.01.2017)
- [6]. karta katalogowa czujnika TSL250, TSL251 TSL252 – www.ti.com, (30.01.2017)