



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki



LABORATORIUM
ELEMENTÓW i UKŁADÓW
ELEKTRONICZNYCH

Opracował zespół: Marek Panek, Waldemar Oleszkiewicz, Ryszard Korbutowicz, Iwona Zborowska-Lindert, Bogdan Paszkiewicz, Małgorzata Kramkowska, Zdzisław Synowiec, Beata Ściana, Irena Zubel, Tomasz Ohly, Bogusław Boratyński

Ćwiczenie nr 8

Elementy optoelektroniczne

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- źródła promieniowania optycznego: diody LED, diody laserowe - budowa, parametry
- fotodetektory półprzewodnikowe; rodzaje, parametry
- transoptory; budowa i zasada działania, zastosowania
- pomiary oscyloskopowe przebiegu impulsowego

II. Program zajęć

- pomiary stałoprądowe transoptorów.
- pomiary impulsowe odpowiedzi czasowych fotodetektorów.
- wyznaczanie parametrów charakterystycznych transoptorów

III. Literatura

1. Notatki z WYKŁADU
2. U. Tietze, Ch. Schenk *Układy półprzewodnikowe*, WNT, Warszawa, 2009,
3. M. Rusek, J. Pasierbiński *Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1997

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

1. Wprowadzenie

Termin „*elementy optoelektroniczne*” lub „*przyrządy optoelektroniczne*” wskazuje na to, że pracują one w zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego, które przypada na obszar tzw. promieniowania optycznego. Widmo rozciąga się zgodnie z definicją na fale o długości od 10nm (0,01 μ m) do 1mm (1000 μ m) i składa się z podzakresów: ultrafioletu (UV), promieniowania widzialnego ($\lambda=400 \div 750$ nm) i podczerwieni (IR).

Dwie podstawowe grupy przyrządów półprzewodnikowych składające się na rodzinę elementów optoelektronicznych to półprzewodnikowe źródła światła (zwane często emiterami) oraz fotodetektory. U podstaw ich działania leży wykorzystanie dwóch fundamentalnych procesów optycznych: **rekombinacji promienistej nadmiarowych nośników** w półprzewodniku (w źródłach światła), która prowadzi do emisji fotonów oraz **absorpcji fotonów** w oświetlonym półprzewodniku (w fotodetektorach).

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania, podstawowymi parametrami oraz zastosowaniem diod elektroluminescencyjnych (LED), fotodetektorów oraz transoptorów. Transoptory to elementy scalające dwa pierwsze wymienione przyrządy, czyli źródło światła i fotodetektor, w jednej obudowie.

1.1 Półprzewodnikowe źródła światła

Diody elektroluminescencyjne LED (**L**ight **E**mitting **D**iode) oraz diody laserowe LD (**L**aser **D**iode) albo inaczej lasery (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) półprzewodnikowe należą do najważniejszych półprzewodnikowych źródeł promieniowania. Diody LED znalazły szerokie zastosowanie w wielu urządzeniach technicznych, zwłaszcza jako elementy sygnalizacyjne (wskaźniki), oświetlacze i żarówki LED, podświetlacze ekranów LCD, matryce dużych ekranów świetlnych. Współcześnie stosowane są szeroko (małe koszty wytwarzania) diody z półprzewodników organicznych tzw. OLEDy.

Rozwinięciem konstrukcji diody LED jest struktura diody laserowej. Ze względu na niski koszt produkcji, małe rozmiary i prostotę zasilania lasery półprzewodnikowe znajdują wielorakie zastosowanie w takich urządzeniach jak np.: czytniki i nagrywarki CD, DVD, BlueRay, celowniki i dalmierze, narzędzia chirurgiczne i dermatologiczne, w technice holografii i innych. **Jednym z najważniejszych zastosowań laserów półprzewodnikowych jest modulowane źródło sygnału optycznego (w zakresie podczerwieni) w światłowodowym łączu telekomunikacyjnym.** Sygnał wyjściowy ze światłowodu jest odbierany przez fotodetektor (np. dioda PIN) i zamieniany ponownie na sygnał elektryczny.

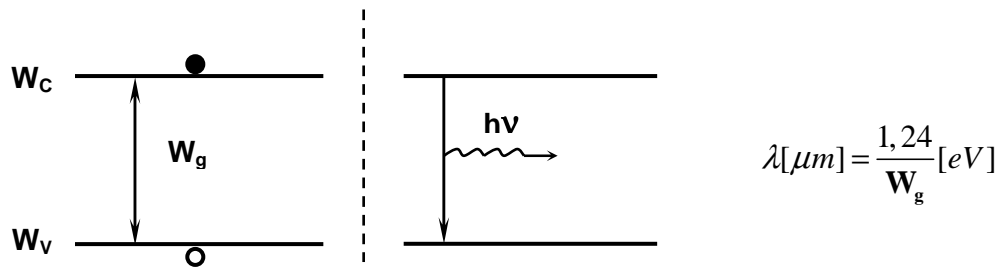
Podstawowe pojęcia

Generacja światła – jest skutkiem **rekombinacji promienistej** nadmiarowych par nośników elektron-dziura w półprzewodniku.

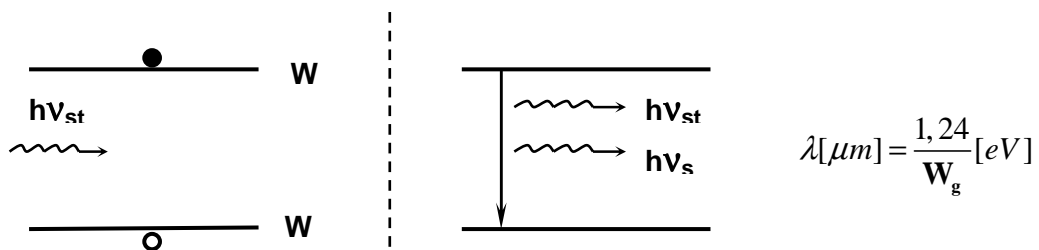
Proces rekombinacji promienistej jest przejściem elektronu z pasma przewodnictwa (W_C) do pasma walencyjnego (W_V), energia tracona w tym procesie przez elektron jest emitowana w postaci fotonu o energii $h\nu = W_g$ (rys.1). W wyniku, obserwujemy zjawisko **emisji spontanicznej** światła na zewnątrz półprzewodnika noszące nazwę **elektroluminescencji** (elektron \rightarrow świecenie). Najczęściej, w **diodach LED**, występuje w wyniku przepływu prądu elektrycznego (wstrzykiwania nośników) w spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złącza p-n lub heterozłącza p-n.

W laserach półprzewodnikowych wykorzystuje się **emisję stymulowaną** (zwaną też **wymuszoną**), która jest wynikiem rekombinacji promienistej wymuszonej przez już obecne fotony (rys. 2). Cechą charakterystyczną emisji stymulowanej jest to, że *wyemitowany foton*

będzie miał fazę drgań i kierunek rozchodzenia się zgodny z fotonem wywołującym przejście wymuszone (jest to promieniowanie spójne – czyli zgodne w fazie).



Rys. 1. Schemat procesu rekombinacji promienistej, prowadzącej do emisji spontanicznej fotonu.



Rys. 2. Schemat procesu emisji stymulowanej.

1.1.1 Diody elektroluminescencyjne

Materiałem półprzewodnikowym stosowanym do wytwarzania diod elektroluminescencyjnych są związki półprzewodników grupy III-V z tzw. prostą przerwą energetyczną, np. GaAs–arsenek galu. Stosuje się zarówno dwu-, trzy- jak i czteroskładnikowe półprzewodniki, np. AlGaAs, InGaAsP,. Istotą konstrukcji i technologii struktury LED jest dobranie składu, który zapewni odpowiednią wartość przerwy energetycznej, W_g , a więc długość emitowanej fali, λ oraz jednocześnie dopasowanie sieci kryształu struktury do kryształu podłoża. W Tab.1. przedstawiono zależność długości emitowanej fali od szerokości przerwy energetycznej materiału diody. Dioda LED wymaga polaryzacji złącza p-n w kierunku przewodzenia. Zwiększona koncentracja nośników mniejszościowych w obszarze o przeciwnym typie przewodnictwa prowadzi do rekombinacji par elektron-dziura. Energia wyzwolona w tej rekombinacji jest w przybliżeniu równa wartości przerwy energetycznej W_g .

Tab.1. Barwa emitowanego promieniowania optycznego diod LED

kolor	podczerwień	czerwony	pomarańczowy	żółty	zielony	niebieski	UV > biały
materiał	GaAs	GaP(Zn,O) GaAs _{0,6} P _{0,4} Al _{0,3} Ga _{0,7} As	GaAs _{0,35} P _{0,65} Ga _{0,7} In _{0,3} P GaAs _{0,15} P _{0,85} N	GaInN:Mg GaP:N ⁺⁺	GaP:N (In,Ga)N:Mg	InGaN	*GaN ↓ luminofor

* w tym przypadku LED emituje promieniowanie UV, które pobudza luminofor dający światło białe.

Podstawowymi parametrami diod LED są:

- *sprawność kwantowa (zewnętrzna) η_{zew}* czyli stosunek liczby emitowanych fotonów do liczby nośników ładunku prądu płynącego w złączu p-n:

$$\eta_{zew} = \frac{\phi_z}{n} = \frac{q}{hv} \cdot \frac{P_{opt}}{I}$$

gdzie: ϕ_z - liczba fotonów wyemitowana przez LED,
n - liczba elektronów przepływająca przez obszar, w którym zachodzi rekombinacja,
P - wyjściowa moc optyczna diody,
I - prąd płynący przez diodę.

- *sprawność energetyczna η* opisana zależnością

$$\eta = \frac{P_{opt}}{P_{wej}} = \frac{P_{opt}}{U \cdot I}$$

gdzie: P_{opt} - wyjściowa moc optyczna diody,
 P_{wej} - moc wejściowa elektryczna diody.

Sprawność najczęściej podaje się w procentach (np. $\eta=0,47$ lub $\eta=47\%$)

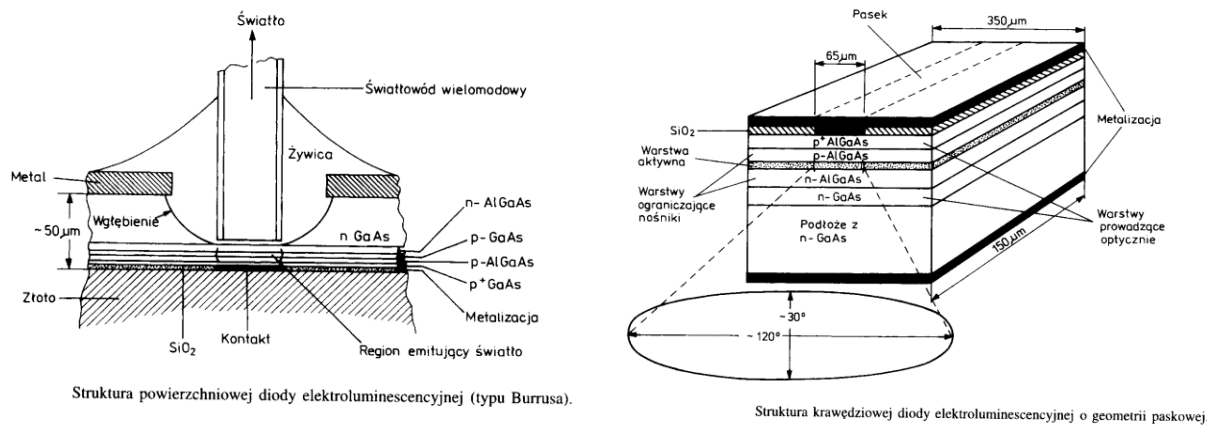
Do najważniejszych parametrów diod LED należą:

- długość fali emitowanego światła: λ [nm], np. $\lambda = 1300\text{nm}$
- szerokość widmowa: $\Delta\lambda$ [nm], np. $\Delta\lambda=20\text{nm}$
- moc wyjściowa (optyczna): P [μW],
- częstotliwość graniczna lub czas narastania/opadania: f_c [MHz], τ [ns],
- maksymalny prąd zasilający: I_F [mA],
- maksymalne napięcie wsteczne: U_r [V] (**zwykle jedynie kilka [V] !**).

Spośród kilku możliwych struktur diod elektroluminescencyjnych na rys.3. pokazano:

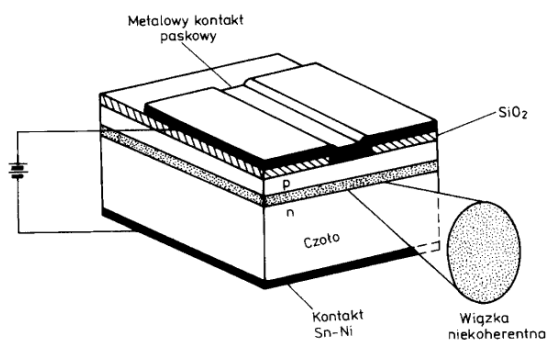
- diodę powierzchniową,
- diodę krawędziową,
- diodę superluminescencyjną.

Jak widać na rys.3. emitowana wiązka światła ma sporą rozbieżność i wymaga skupienia. Dlatego obudowy diod LED zawierają dodatkowo soczewki formujące (skupiające) strumień świetlny.



Struktura powierzchniowej diody elektroluminescencyjnej (typu Burrusa).

Struktura krawędziowej diody elektroluminescencyjnej o geometrii paskowej.



Struktura diody superluminescencyjnej.

Rys. 3. Różne struktury diod LED. Elipsy na rysunku, to przekroje wiązki promieniowania optycznego emitowanego z obszaru złącza p-n.

1.1.2 Lasery półprzewodnikowe

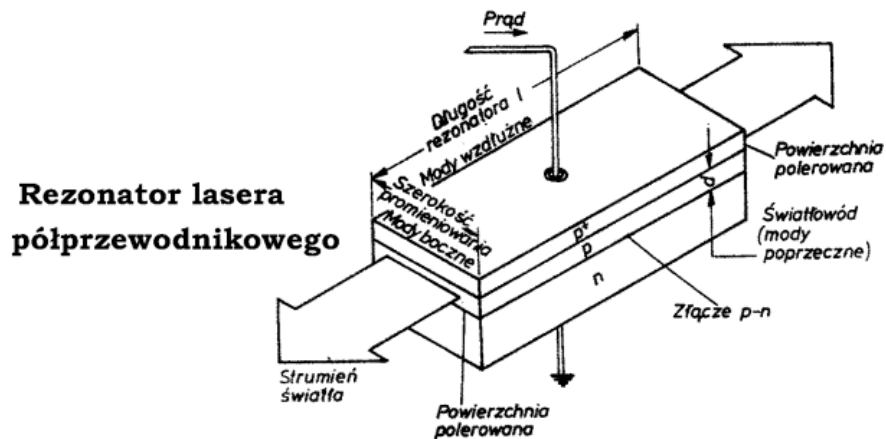
Lasery półprzewodnikowe, czyli kwantowe generatory optyczne są laserami złączowymi (złącze p-n), w których ośrodkiem czynnym (aktywnym) jest półprzewodnik. Warunkami uzyskania akcji laserowej przy wykorzystaniu rekombinacji promienistej są:

- inwersja obsadzeń,
- wzmocnienie optyczne, które powinno być, co najmniej równe stratom,
- promieniowanie powinno być spójne.

Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych (inaczej pompowanie) uzyskuje się poprzez wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku do obszaru złącza p-n (lub heterozłącza) spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. *Spójność* może być osiągnięta przez umieszczenie źródła promieniowania we *wnęce rezonansowej*, która preferuje wzmocnienie jednej częstotliwości i jednej fazy promieniowania. Takie selektywne wzmocnienie jest konsekwencją dodatniego sprzężenia zwrotnego dla fal elektromagnetycznych, które mogą być falami stojącymi we wnęce. *Wnęka rezonansowa* czyli rezonator (rys. 4) ma najczęściej kształt prostopadłościanu o rozmiarach rzędu ułamka milimetra. Sprzężenie optyczne uzyskuje się dzięki parze zwierciadeł prostopadłych do płaszczyzny obszaru złącza p-n (*rezonator Fabry'ego-Perota*). Obszar czynny leży w płaszczyźnie złącza p-n i jest zwykle ograniczony do wąskiego paska.

Emisja wymuszona jest emisją w dużym stopniu uporządkowaną, a emitowana wiązka światła ma niewielką rozbieżność kątową, zazwyczaj kilka stopni. Stosowane w telekomunikacji lasery dają dużą moc optyczną, dochodzącą do jednego wata. Istotną zaletą diody laserowej jest jej wąskie widmo częstotliwościowe promieniowania, rzędu kilku

nanometrów lub nawet kilku dziesiątych części nanometra. Jednakże, obecność zwierciadeł na końcach struktury może spowodować wytworzenie kilku fal stojących i emisję fal o różnych długościach. Dlatego też widmo częstotliwościowe promieniowania laserowego jest widmem dyskretnym z jednym dominującym modem.



Rys. 4. Struktura krawędziowego lasera półprzewodnikowego.

1.2 Półprzewodnikowe detektory promieniowania optycznego

Fotodetektory to takie elementy optoelektroniczne, które zamieniają sygnał optyczny na sygnał elektryczny. Pod wpływem absorpcji promieniowania optycznego może zachodzić w półprzewodniku *zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne* czyli powstawanie swobodnych nośników prądu, **najczęściej par nośników elektron-dziura**.

Podstawowe pojęcia

Absorpcja promieniowania w półprzewodniku może powodować:

- **generację par elektron-dziura, jeżeli energia padającego fotonu jest większa od przerwy energetycznej półprzewodnika;** w takim przypadku maksymalna długość fali optycznej absorbowanej przez fotodetektor (tzw. krawędź absorpcji) opisana jest zależnością:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{W_g} = \frac{1,24}{W_g} [\mu m]$$

gdzie: h – stała Plancka

c – prędkość światła

W_g – szerokość przerwy zabronionej półprzewodnika w [eV].

- generację nośników jednego typu (dziur, albo elektronów), gdy energia fotonu jest mniejsza od przerwy energetycznej, ale większa od energii jonizacji domieszki w tym półprzewodniku. Jest to możliwe, o ile atomy domieszek nie są zjonizowane (wymagane jest chłodzenie półprzewodnika do temperatury ciekłego azotu czyli 77K lub niższej). W takim przypadku maksymalna długość fali absorbowanej przez fotodetektor opisana jest zależnością:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{W_j} = \frac{1,24}{W_j} [\mu m]$$

gdzie W_j [eV] - energia konieczna do przeniesienia nośnika z pasma walencyjnego do poziomu akceptorowego (generacja dziury) lub z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa (generacja elektronu). (przy czym $W_j < W_g$)

Efekt wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego może być zmiana przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika oraz powstanie fotoprądu lub siły elektromotorycznej w półprzewodniku ze złączem p-n (w złączu p-n istnieje wbudowane pole elektryczne oddziaływujące na nośniki).

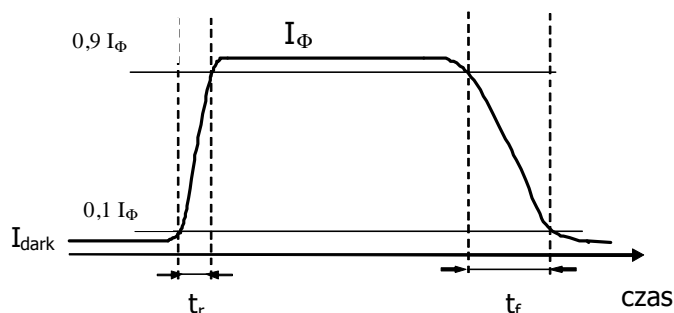
Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi właściwości fotodetektorów są:

- **czułość widmowa** S_λ (dla określonej długości fali λ) – definiowana jako:

$$S_\lambda = \frac{\Delta I_\Phi}{P_\lambda} \quad \text{lub} \quad S_\lambda = \frac{\Delta I_\Phi}{\Phi_\lambda},$$

gdzie: P_λ - moc padającego promieniowania, Φ_λ - strumień świetlny,
 ΔI_Φ - przyrost fotoprądu w stosunku do prądu ciemnego;

- **prąd ciemny (dark current, I_{dark})** – prąd, który płynie w odpowiednio spolaryzowanym nieoświetlonym fotodetektorze;
- **szybkość odpowiedzi** impulsowej wyrażana za pomocą czasów narostu i opadania impulsu fotoprądu I_Φ . **Czas narastania t_r impulsu fotoprądu definiowany jest jako czas w jakim amplituda fotoprądu zmienia się od 10% do 90% swojej wartości maksymalnej. Czas opadania t_f impulsu fotoprądu to czas w jakim amplituda fotoprądu zmienia się od 90% do 10% swojej wartości maksymalnej.** Sposób określania wartości czasu narastania i opadania pokazano na rys.5.



Rys.5. Sposób wyznaczania czasu narastania t_r i czasu opadania t_f impulsu prądu w fotodetektorze

Do grupy fotodetektorów zaliczamy następujące elementy półprzewodnikowe:

- fotorezystory
- fotodiody w tym diody typu p-n, p-i-n,
- fotodiody lawinowe
- fototranzystory

Fotorezystory są elementami, w których energia światła generując dodatkowe nośniki prądu zmienia jego konduktywność zgodnie z zależnością:

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma \qquad \Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)$$

gdzie: σ_f , σ_0 - konduktywności fotorezystora oświetlonego i nieoświetlonego,
 $\Delta\sigma$ przyrost konduktywności wywołany wygenerowanymi nośnikami
 q – ładunek elementarny,
 μ_n , μ_p – ruchliwość, odpowiednio elektronów i dziur.

Zgodnie z tą zależnością należy spodziewać się, że konduktywność fotorezystora będzie wzrastać liniowo wraz ze wzrostem generowanych w nim nośników. W normalnych warunkach pracy fotorezystor jest spolaryzowany napięciem o dowolnej polaryzacji. Oświetlenie spowoduje zmianę natężenia prądu w obwodzie fotorezystora.

Fotodiody są przyrządami półprzewodnikowymi, które pracują przy polaryzacji zaporowej złącza p-n. Przy takiej polaryzacji bez oświetlenia w strukturze płynie mały prąd (tzw. prąd ciemny). Jeżeli tak spolaryzowaną strukturę półprzewodnikową oświetlimy promieniowaniem o odpowiedniej energii, to generowane nośniki będą „wymiatane” w polu elektrycznym złącza p-n i prąd diody wzrośnie. Za wzrost tego prądu odpowiada przede wszystkim generacja nośników w obszarze warstwy zaporowej złącza p-n. Dla typowej polaryzacji diody grubość warstwy zaporowej jest znacznie mniejsza od głębokości wnikania (absorpcji) fotonów w półprzewodnik. Sprawność zbierania generowanych nośników czyli fotoprąd można zwiększyć, jeżeli zwiększymy grubość obszaru, w którym istnieje pole elektryczne. Jednym ze sposobów jest wbudowanie pomiędzy warstwę typu **-p**, a warstwę typu **-n** warstwy słabo domieszkowanej (typu **-i**). W takiej strukturze (**fotodioda PIN**) pole elektryczne, które separuje wygenerowane nośniki istnieje w znacznie grubszej warstwie niż w przypadku, gdy mamy tylko typowe złącze p-n. Dodatkową zaletą jest to, że zwiększenie szerokości warstwy złącza zmniejsza pojemność złączową struktury, a co za tym idzie wzrasta maksymalna częstotliwość pracy fotodetektora.

Fotodiody lawinowe pracują przy polaryzacji zaporowej w warunkach bliskich przebicia złącza. Wykorzystywane jest zjawisko powielania lawinowego. Pojawia się ono wskutek zwiększania koncentracji nośników wytworzonych w wyniku fotogeneracji. Przyrost prądu spowodowany powielaniem lawinowym jest tym większy im większe będzie napięcie wstecznej polaryzacji. Diody lawinowe zapewniają wewnętrzne wzmocnienie fotoprądu ale równocześnie mają większy współczynnik szumów.

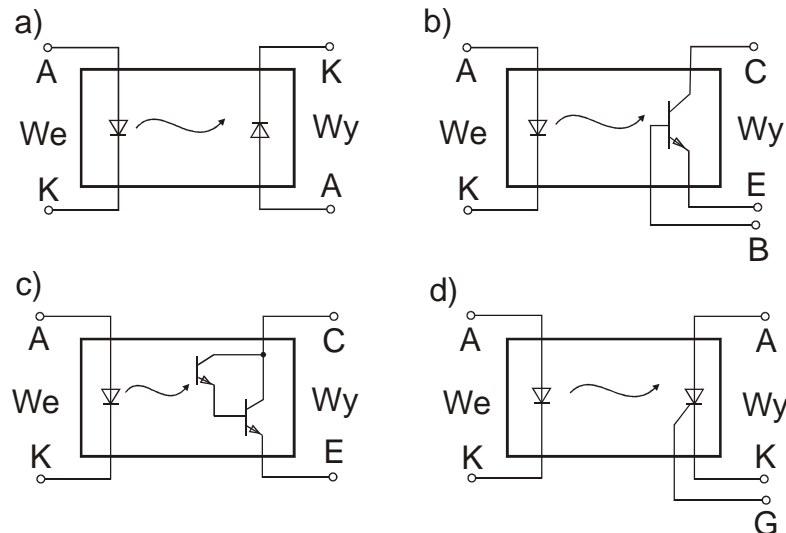
Fototranzystory to elementy z zaciskami E, B, C lub dwukońcówkowe (E, C, baza nie ma wyprowadzenia), w których element działa przy polaryzacji typowej dla układu pracy WE tranzystora. Mimo braku prądu bazy tranzystor zapewnia wzmocnienie fotoprądu. Zasada jest następująca. Jeżeli dla tranzystora NPN w obszarze bazy pod wpływem oświetlenia wygenerowane zostaną pary elektron-dziura, to wygenerowane elektrony zwiększą bezpośrednio wartość prądu kolektora tranzystora. Równocześnie wygenerowane dziury powodując obniżenie napięcia emiter-baza spowodują zwiększenie ilości wstrzykniętych nośników większościowych, a co za tym idzie wzrasta wzmocnienie tranzystora. Zwiększeniu wzmocnienia, a więc także czułości fototranzystora, towarzyszy spadek szybkości działania w porównaniu z fotodiodami.

Fototyristory, fototriaki to nie detektory, ale elementy przełączające dużej mocy, w których proces włączania przyrządu zachodzi na skutek oświetlenia. Często w jednej obudowie znajduje się dioda LED zasilana z obwodu załączającego małej mocy (patrz - transoptory). Tyristor znajdujący się w stanie blokowania w efekcie generacji nośników może przejść w stan przewodzenia, ponieważ wygenerowanie nośników na skutek oświetlenia odpowiada wprowadzeniu nośników przez spolaryzowane złącze bramka-katoda w tradycyjnym tyristorze.

1.3 Transoptory

Transoptor to optoelektroniczny przyrząd półprzewodnikowy, złożony z elektrycznie izolowanej, a optycznie sprzężonej pary fotoemiter - fotodetektor umieszczonej we wspólnej obudowie. Transoptor jest elementem unilateralnym, tj. umożliwiającym jedynie jednokierunkowy przepływ sygnału od obwodu wejściowego, w którym znajduje się

fotoemiter, do obwodu wyjściowego, zawierającego fotodetektor. Fotoemiterem w transoptorze jest zwykle dioda elektroluminescencyjna z arsenku galu (GaAs) emitująca promieniowanie w zakresie podczerwieni, natomiast fotodetektorem jest najczęściej fotodioda lub fototranzystor krzemowy, niekiedy, w konstrukcjach specjalnych fototyrystor lub fotorezystor. Przykłady układów transoptorów pokazano na rys.6.



Rys. 6. Schematy transoptorów z emiterem LED i fotodetektorem: a) fotodiodą, b) fototranzystorem, c) fototranzystorem w układzie Darlingtona*, d) fototyrystorem.

* Układ Darlingtona to połączenie dwóch tranzystorów dające w wyniku duże wzmocnienie prądowe, równe iloczynowi wzmocnienia β każdego z tranzystorów.

Sprężenie optyczne wewnątrz obudowy zapewnia warstwa materiału elektroizolacyjnego (np. szkło, żywica epoksydowa) w transoptorach zamkniętych, tzw. monolitycznych lub powietrze w transoptorach otwartych, tzw. szczelinowych.

Parametry charakterystyczne

Transoptor z fotodiodą i tranzystorami ma zbliżoną do liniowej charakterystykę przenoszenia sygnałów elektrycznych (zazwyczaj natężenia prądu) pomiędzy wejściem a wyjściem. Parametrem charakterystycznym jest nachylenie tej charakterystyki przejściowej, wyrażone za pomocą *stałoprądowego współczynnika przełożenia prądowego CTR* (Current Transfer Ratio) nazywanego też *przekładnią prądową transoptora* określa zależność:

$$CTR = \frac{I_{WY}}{I_{WE}} 100\%$$

gdzie: I_{WY} i I_{WE} są to wartości prądów płynących, odpowiednio, w obwodzie wyjściowym i wejściowym transoptora.

Pasmo przenoszenia, a zarazem górna częstotliwość pracy transoptora, zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanego fotodetektora – najszersze jest dla transoptora z fotodiodą, średnie z fototranzystorem, bardzo wąskie z fotorezystorem. Ważnymi parametrami transoptora są również maksymalny dopuszczalny prąd i napięcie w obwodzie wejściowym (tak jak dla LED) i wyjściowym (tak jak dla fotodetektora), rezystancja izolacji, napięcie przebicia między wejściem a wyjściem oraz zakres temperaturowy pracy.

Transoptory w urządzeniach elektronicznych stosuje się przede wszystkim w celu elektrycznego odizolowania między sobą układów współpracujących przy dopuszczalnej różnicy napięć między nimi nie przekraczającej wartości przebicia transoptora. Interesującym

przykładem jest transoptor z fototyrystorem (Rys. 6d), gdzie tyrystor może przełączać prąd w układzie wysokiego napięcia znajdujący się na dużo wyższym potencjale niż układ sterujący, w którym włączona jest dioda LED transoptora.

2. Pomiary

Program pomiarów obejmuje wykonanie pomiarów statycznych (dla prądu stałego) i dynamicznych (praca impulsowa) następujących układów transoptorów:

dwóch, zbudowanych z dyskretnych elementów optoelektronicznych:

dioda LED – fotodioda PIN oraz **dioda LED – fotorezystor**,

a także,

transoptora zintegrowanego: dioda LED - fototranzystor

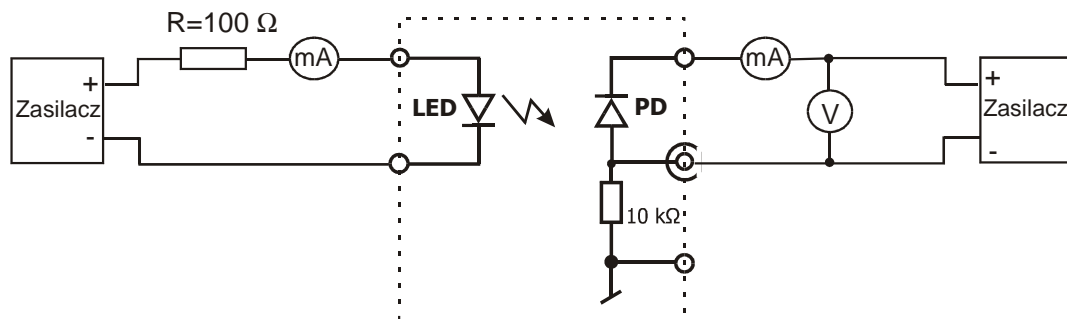
Pomiary statyczne prowadzą do wyznaczenia prądowej charakterystyki przenoszenia i obliczenia współczynnika przełożenia prądowego transoptora CTR. Pomiary dynamiczne pozwalają na porównanie szybkości odpowiedzi fotodetektorów ze złączem p-n (fotodioda) i bez złącza p-n (fotorezystor).

Przed pomiarami należy sprawdzić w katalogach przyrządów parametry dopuszczalne wszystkich mierzonych elementów. Podczas pomiarów elementy należy osłaniać zaciemniającą osłoną, chroniącą przed oświetleniem pokojowym.

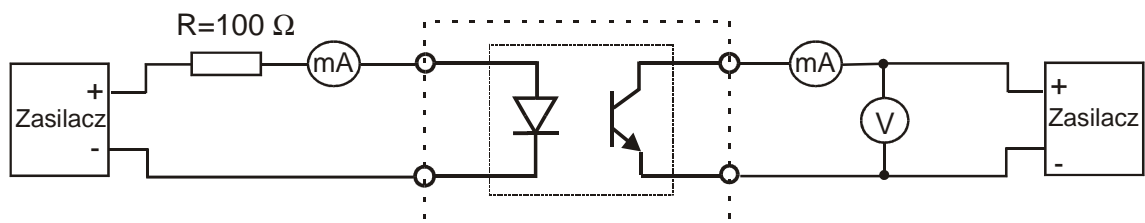
2.1 Pomiar charakterystyki przenoszenia transoptorów

Pomiar przeprowadzić wg schematu przedstawionego na Rys.7 stosując układy transoptorów zmontowane na płytce.

a)



b)



Rys.7. Schemat do pomiaru prądowej charakterystyki przenoszenia układu: a) z elementów dyskretnych (dioda LED – fotodioda PIN), b) transoptora zintegrowanego (dioda LED – fototranzystor)

Dla każdego układu na rys.7:

1. Zmierzyć zależność prądu wyjściowego transoptora I_{WY} od prądu wejściowego $I_{WE} = I_{LED}$. Zmieniać wartość I_{WE} w zakresie dopuszczalnych wartości diody LED (np. $I_{LED} = 1 \div 15 \text{mA}$). Przy ustalonym napięciu polaryzacji fotodetektora (np. 10V) odczytywać wartość prądu na wyjściu I_{WY} .
2. Wykreślić prądową charakterystykę przenoszenia $I_{WY} = f(I_{WE})$ dla każdego zmierzonego układu.
3. Wyznaczyć współczynnik przełożenia prądowego transoptora: $CTR = I_{WY}/I_{WE}$

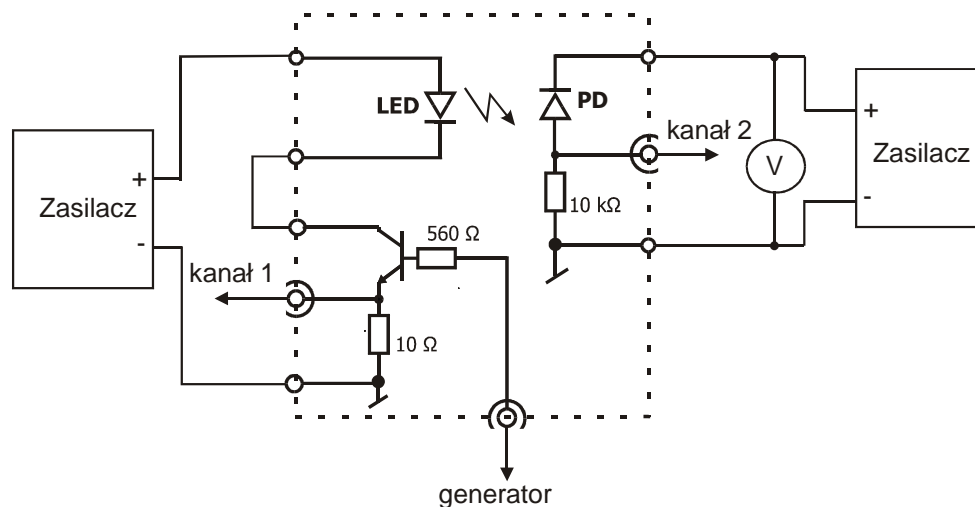
2.2 Pomiary właściwości dynamicznych transoptorów

Pomiary porównawcze odpowiedzi czasowej dwóch transoptorów z różnymi typami fotodetektorów (fotodiody i fotorezystor) należy przeprowadzić w takich samych warunkach układowych (takie samo pobudzenie optyczne, taka sama wartość rezystora w obwodzie wyjściowym).

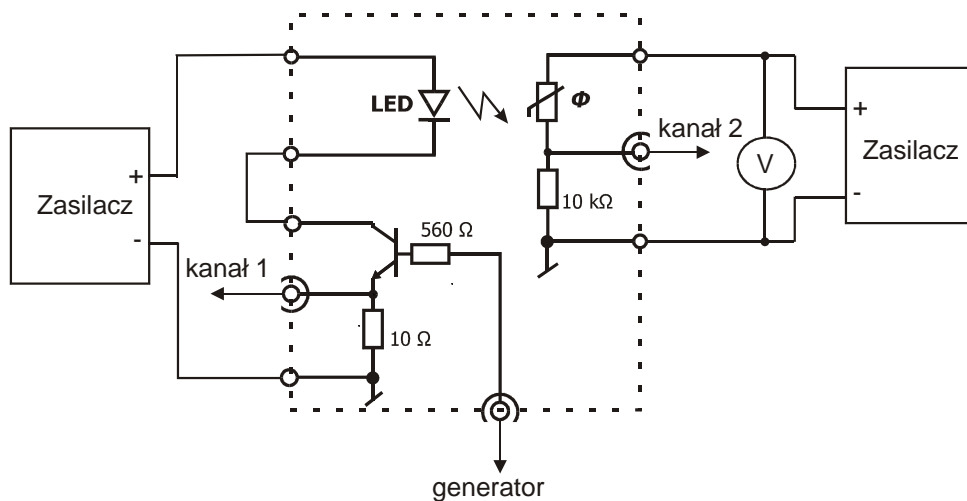
Diody LED (emiter promieniowania) zasilana jest impulsowo prądem kluczowanym za pomocą tranzystora bipolarnego spełniającego rolę przełącznika w obwodzie wejściowym. Tranzystor na wejściu (baza) jest sterowany z generatora impulsów prostokątnych. Przełączanie tranzystora polega na pracy dwustanowej nasycenie-odcięcie z szybkim przejściem między tymi stanami. Za pomocą oscyloskopu mierzymy sygnał wyjściowy fotodetektora. Jest nim spadek napięcia na rezystorze $10 \text{k}\Omega$ wywołany przepływem fotoprądu. Sygnał wyjściowy odnosimy do mierzonego sygnału wejściowego, którym jest spadek napięcia na rezystorze 10Ω wywołany przepływem prądu diody LED (równy prądowi kolektora tranzystora). Układy pomiarowe przedstawiono na Rys.8 oraz Rys.9.

Procedura pomiarów:

1. Ustalić warunki pracy diody LED i fotodetektora:
 - wyjście transoptora polaryzujemy napięciem stałym (np.:10V),
 - wejście transoptora zasilamy prostokątnymi impulsami prądowymi. W tym celu wykorzystujemy przełącznik tranzystorowy znajdujący się na płytce. Na wejście przełącznika (bazę tranzystora) podajemy dodatnie impulsy prostokątne z generatora.



Rys.8 Schemat do pomiaru odpowiedzi impulsowej fotodetektora w układzie: dioda LED – fotodiody PIN



Rys.9. Schemat do pomiaru odpowiedzi impulsowej fotodetektora w układzie: dioda LED – fotorezystor

2. Ustawienie dodatnich impulsów generatora:
Podłączyć generator funkcyjny do wejścia 1 oscyloskopu. Oscyloskop ma pracować w trybie DC z włączoną podstawą czasu. Wybrać w generatorze sygnał prostokątny, ustalić zerową składową stałą („offset” = 0V), sprawdzić możliwość regulacji amplitudy sygnału w zakresie $0 \div 5$ V.
3. Przełączyć przewód koncentryczny generatora na wejście przełącznika tranzystorowego. Ustalić wartość prądu kolektora, czyli wartość prądu diody LED z pomiaru spadku napięcia na rezystorze emiterowym (kanał 1 oscyloskopu). Można przyjąć wartość natężenia prądu w impulsie 5mA lub 10mA. Sygnałem wyjściowym jest spadek napięcia na rezystorze 10 kΩ obciążającym fotodetektor.
4. Obserwując przebieg sygnału na oscyloskopie (kanał 2) wyznaczyć czasy narostu i opadania impulsu wyjściowego zgodnie z definicją przebiegów impulsowych (Rys.5.). Wskazane jest zarejestrowanie przebiegów (wydruk ekranu oscyloskopu).
5. Oszacować f_{3dB} czyli górną częstotliwość 3 dB pasma przenoszenia transoptora zdefiniowaną wzorem (tu podanym bez wyprowadzania):

$$f_{3dB} = 0.35/\tau$$

gdzie: τ jest to czas włączania t_r lub wyłączania t_f (dłuższy z nich) fotodetektora

3. Opracowanie wyników

Wyniki pomiarów powinny zawierać porównanie parametrów zmierzonych fotodetektorów i transoptorów . **Należy dołączyć uzyskane wydruki (ewentualnie rysunki) przebiegów.**