



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptak

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Elementy optoelektroniczne

- Fotoemitery
- Fotorezystor
- Fotodioda
- Fotoogniwo
- Fototranzystor
- Transoptor



Podział elementów optoelektronicznych



Optoelektronika – wytwarzanie, przesyłanie i odbiór promieniowania optycznego i jego przekształcanie w sygnały elektryczne.

Elementy optoelektroniczne – wykrywają, emitują lub wykorzystują do działania promieniowanie elektromagnetyczne: widzialne, UV, IR.

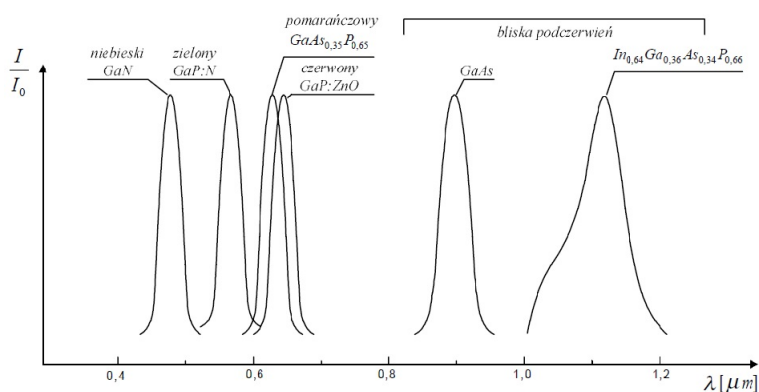
- **Źródła promieniowania** (fotoemitery) – przetwarzają sygnał elektryczny na promieniowanie: diody elektroluminescencyjne, lasery półprzewodnikowe – emitują promieniowanie o różnej długości fali.
- **Detektory promieniowania** (fotodetektory) – przetwarzają energię promieniowania na elektryczną: fotorezystory, fototranzystory, fotoogniwa, fotodiody. Fotodetektory pracują typowym dla nich zakresie widmowym.
- **Transoptory** – składają się z co najmniej jednego fotoemitera i jednego fotodetektora odizolowanych elektronicznie i zamkniętych we wspólnej obudowie.
- **Przetworniki promieniowania** – złożone struktury elementów optoelektronicznych.



Dioda elektroluminescencyjna



Charakterystyki widmowe



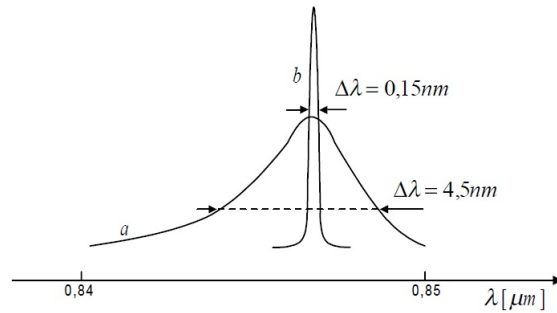
Kuta „Elementy i układy elektroniczne”



Laser półprzewodnikowy



Charakterystyka widmowa – widmo emisyjne lasera po przekroczeniu progu wzbudzenia



Kuta „Elementy i układy elektroniczne”

Cechy promieniowania emitowanego przez laser:

- duża gęstość energii,
- duża monochromatyczność,
- spójność przestrzenna i czasowa,
- mała dyspersja kątowna.

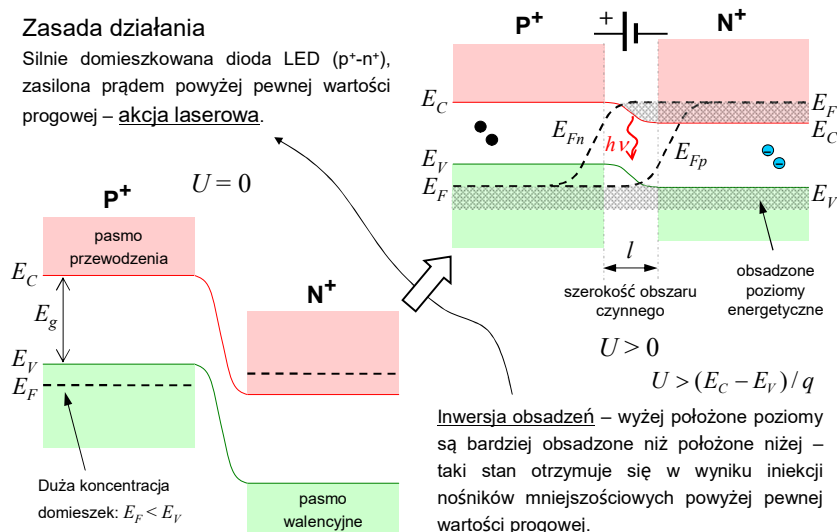


Laser półprzewodnikowy



Zasada działania

Silnie domieszkowana dioda LED (p⁺-n⁺), zasilona prądem powyżej pewnej wartości progowej – akcja laserowa.



Inwersja obsadzeń – wyżej położone poziomy są bardziej obsadzone niż położone niżej – taki stan otrzymuje się w wyniku iniekcji nośników mniejszościowych powyżej pewnej wartości progowej.



Laser półprzewodnikowy



Zasada działania

Inwersja obsadzeń umożliwia akcję laserową – nośniki ładunku są pobudzone do rekombinacji, której towarzyszy emisja promieniowania.

- złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia napięciem:

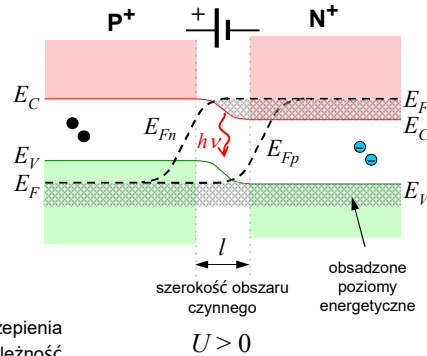
$$U > (E_C - E_V) / q$$

- w obszarze czynnym dochodzi do rozszczepienia poziomu Fermiego, które spełnia zależność (warunek konieczny uzyskania akcji laserowej):

$$E_{Fn} - E_{Fp} \geq h\nu$$

- przejścia pasmo przewodnictwa - pasmo walencyjne są dozwolone – nastąpi emisja fotonów na skutek rekombinacji elektronów i dziur. Dla fotonów o energiach z zakresu:

$$E_{Fn} - E_{Fp} > h\nu > E_g \quad \text{wystąpi wzmocnienie wskutek emisji wymuszonej.}$$



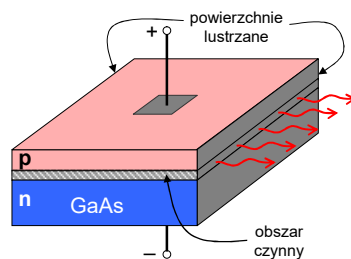
Laser półprzewodnikowy



Budowa – silnie domieszkowane złącze p-n uformowane w kształcie rezonatora optycznego

Rezonator optyczny jest istotnym warunkiem zajścia akcji laserowej (jest konieczny do spełnienia warunku dodatniego sprzężenia zwrotnego).

Laser półprzewodnikowy w postaci rezonatora optycznego:



Powierzchnie lustrzane:

- powodują wielokrotne odbijanie fotonów od zwierciadeł, wywołując emisję wymuszoną,
- nadają promieniowaniu ściśle określony kierunek.

Właściwości:

- małe rozmiary,
- duża sprawność energetyczna,
- prostota zasilania,
- łatwość modulacji promieniowania,
- niskie koszty wytwarzania.



Stosowane materiały

- Domieszkowane złącza p-n.
- Heterozłącza, np. GaAs-AlGaAs – ograniczona jest dyfuzja nośników mniejszościowych, przez to mniejszy jest prąd progowy i możliwa ciągła generacja w niechłodzonych złączach w temperaturze pokojowej.
- Mieszane kryształy półprzewodnikowe, np. CdZnS, CdSSe, InGaAs, AlGaAs, GaAsP, PbSnTe – otrzymuje się lasery promieniujące w pełnym zakresie długości fal z obszaru widzialnego i podczerwieni.

Zastosowania:

- telekomunikacja światłowodowa,
- optoelektronika,
- odtwarzacze laserowe,
- zestawy alarmowe,
- czujniki i wiele innych.



Zjawiska fotoelektryczne – zjawiska elektryczne zachodzące pod wpływem promieniowania

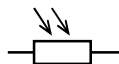
- **Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne** – zachodzi, gdy energia fotonów jest na tyle duża, że pobudzone optycznie elektrony opuszczają powierzchnię materiału – następuje fotoemisja.
 - **Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne** – zachodzi, gdy energia fotonów jest mniejsza, tak że nie jest możliwa fotoemisja, a jedynie zmiana stanu energetycznego elektronów materiału. W półprzewodnikach zjawisko to polega na generowaniu swobodnych nośników ładunku wskutek absorpcji promieniowania optycznego. Wykorzystywane jest w fotodetektorach.
- Zjawisko fotoprzewodnictwa – wzrost przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika lub dielektryka na skutek zjawiska fotoelektrycznego.
 - Zjawisko fotowoltaiczne – powstanie siły elektromotorycznej w półprzewodniku z ukształtowanym złączem p-n na skutek zjawiska fotoelektrycznego.



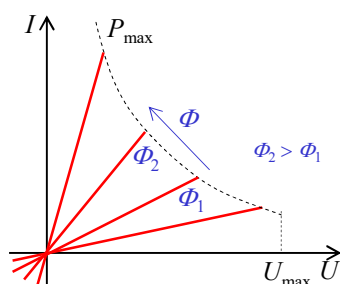
Fotorezystor



Fotorezystor – element półprzewodnikowy bezzłączowy – nieliniowy rezystor o rezystancji zależnej od oświetlenia (LDR – Light Dependent Resistor)



charakterystyka prądowo-napięciowa



$$I = I_0 + I_F$$

I_0 – prąd ciemny

I_F – prąd fotoelektryczny

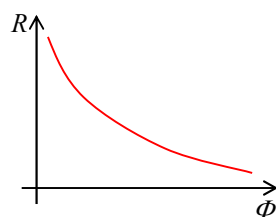
Materiały: CdS, CdSe, CdTe, HgCdTe, PbS, PbSe, InSb, PbSnTe, AlGaIn, inne



Fotorezystor



ch-ka rezystancyjno-oświetleniowa



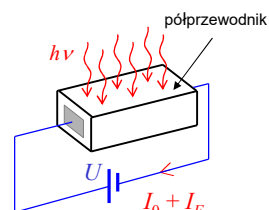
$$R_\Phi = R_0 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi} \right)^\gamma$$

R_Φ – rezystancja fotorezystora

Φ – natężenie oświetlenia

R_0 – rezystancja przy Φ_0

γ – współczynnik materiałowy ($\gamma = 0,5 - 1$ dla CdS)



konduktywność: $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$

ilość nadmiarowych,

samoistnych nośników: $\Delta n = \Delta p = G_L \tau_p$

G_L – szybkość generacji

τ_p – czas życia nośników mniejszościowych

wzrost konduktywności:

$$\Delta \sigma = e \cdot \Delta p \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

Fotoprzewodnictwo



Fotorezystor



Parametry fotorezystora

- czułość widmowa – zależność rezystancji od natężenia padającego światła,
- rezystancja ciemna (bez oświetlenia),
- rezystancja przy określonym oświetleniu (np. 10lx, 100lx),
- długości fali dla maksymalnej czułości,
- dopuszczalna moc strat,
- czas odpowiedzi (przełączania),
- wzmacnienie fotoprzewodnictwa Γ :

$$\Gamma \approx \frac{\tau_p}{t_n} \quad t_n - \text{czas przelotu nośników przez fotorezystor}$$

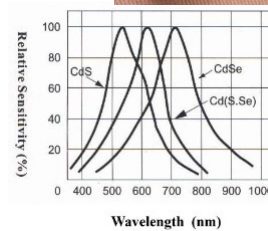
Czułość fotorezystorów na różne długości fal zależy od użytego materiału półprzewodnikowego oraz od technologii wytworzenia, np.:

CdS – czuły na światło widzialne,
CdSe – czuły na promieniowanie podczerwone.

Zastosowanie:

- proste mierniki oświetlenia,
- automatyczne włączanie oświetlenia,
- detektory promieniowania kosmicznego.

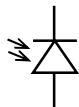
Karta katalogowa GL20528:



Fotodioda



Fotodioda – przyrząd półprzewodnikowy z pojedynczym złączem p-n spolaryzowanym zaporowo przez zewnętrzne źródło napięcia, w którym pod wpływem oświetlenia wzrasta prąd wsteczny.



Fotodioda pracuje w zakresie liniowym (kierunek zaporowy).

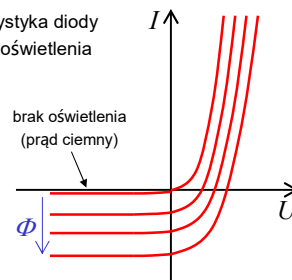
$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{\eta U_T}\right) - 1 \right] - S\Phi$$

Dla $U < 0$: $I = -I_s - S\Phi \approx -S\Phi$

$I_p = S\Phi$ – prąd świetlny; zwrotny prąd wsteczny proporcjonalny do oświetlenia

S – czułość prądowa fotodiody

charakterystyka diody w funkcji oświetlenia



$I \sim \Phi$ – dla $|U| \gg U_T$

$I_p \approx \text{const} (I_p \neq U)$

– fotoprąd nie zależy od U



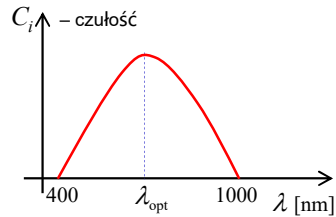
Fotodioda



Fotodioda Si:

- zakres pracy od UV (nadfiolet) do NIR (bliska podczerwień),
- zastosowania: czujniki w sprzęcie fotograficznym, kolorymetria, spektrofotometria, czujniki UV, czujniki dymu.

charakterystyka widmowa

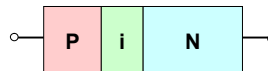


Fotodioda



Fotodioda Si p-i-n:

- szeroka warstwa zaporowa \approx szerokości warstwy samoistnej,
- bardzo mała pojemność złącza,
- mała bezwładność działania fotodiody,
- duża szybkość działania (czas odpowiedzi krótszy od 1 ns),
- zastosowania: telekomunikacja optyczna, zdalne sterowanie optyczne, dyski optyczne, detekcja promieniowania.



Fotodioda Si lawinowa – powstaje w zakresie przebicia lawinowego złącza p-n – wykorzystywane jest zjawisko lawinowe:

- duże wzmocnienie wewnętrzne (~ 100),
- mały czas odpowiedzi,
- najbardziej czuły półprzewodnikowy detektor światła.

Fotodiody GaAsP:

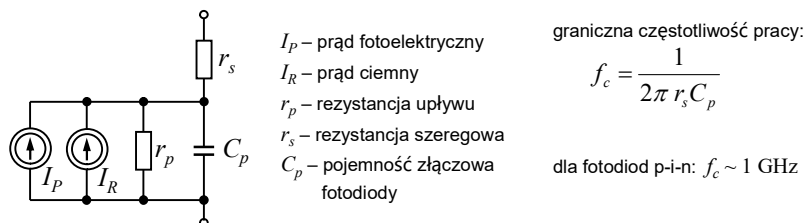
- charakterystyka spektralna podobna do charakterystyk ludzkiego oka,
- zastosowania: sprzęt fotograficzny, spektrofotometria, detektory kolorów.



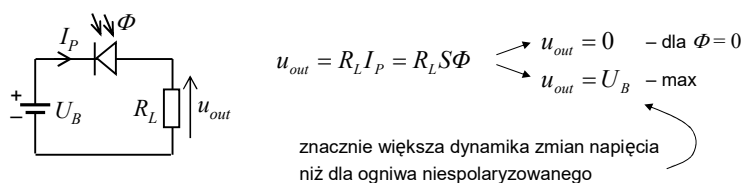
Fotodioda



Schemat zastępczy fotodiody (zmiennoprądowy)



Podstawowy układ pracy fotodiody



Fotodioda



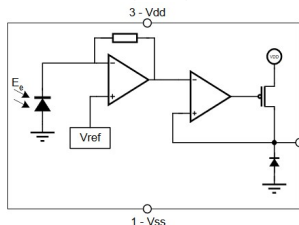
MLX75305 Przetwornik światło-napięcie

<https://www.melexis.com>

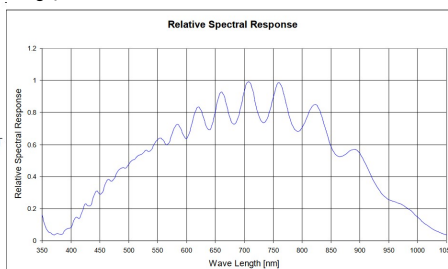
Application Examples

General: Ambient Light Sensor, LCD Backlight Sensor, LED Power Monitoring,
Automotive: Automatic light dimming of instrument panels and displays,
Electrochrom Dimming, Headlights on/off control,
Printers/Copiers: Paper feed detection, Paper size and orientation detection, Toner cartridge presence detection

Schemat funkcjonalny



Względna czułość widmowa

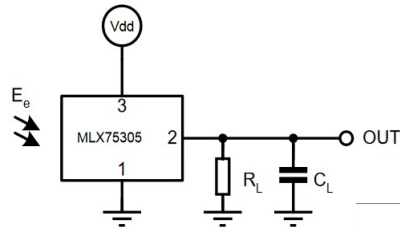




Fotodioda

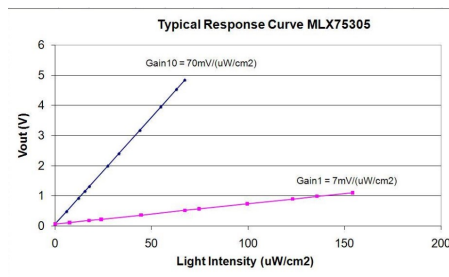


MLX75305 Przetwornik światło-napięcie



Schemat podłączenia

R_L – ustala poziom napięcia na wy
 C_L – wynika z pojemności wejściowej układu podłączonego do wyjścia przetwornika, pojemności przewodów i pojemności wyjściowej przetwornika



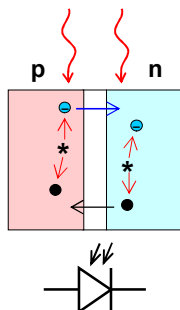
Fotoogniwo



Fotoogniwo – zasada działania jest taka sama jak fotodiody – oparta na zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym.

Fotoogniwo:

- przyrząd z pojedynczym złączem p-n (p-i-n lub heterozłącze), w którym pod wpływem światła powstaje siła elektromotoryczna (zjawisko fotowoltaiczne),
- pracuje bez dodatkowego zewnętrznego napięcia polaryzującego,
- wykorzystuje się jako źródła energii lub jako czujniki w układach automatyki.



Zasada działania:

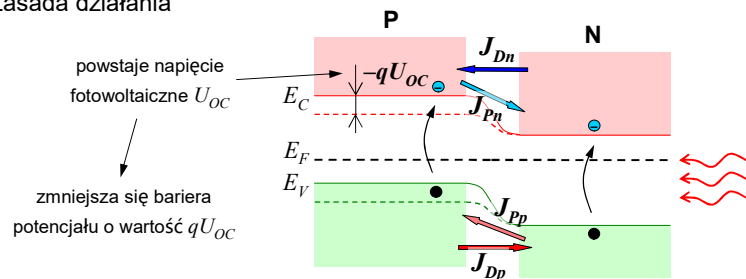
- światło wyzwala z całej objętości półprzewodnika elektrony i dziury,
- ładunki mniejszościowe w danej warstwie, znajdujące się w pobliżu bariery potencjału, przechodzą przez nią bez przeszkód (dla nich bariera nie istnieje),
- po przejściu stają się nośnikami większościowymi, więc już nie mogą powrócić do poprzedniej warstwy i powstaje różnica potencjałów,
- jeśli do takiego półprzewodnika przyłączy się obwód zewnętrzny, to popłynie przez niego prąd wytworzony przez ładunki, które przeszły przez barierę potencjału, a powracają przez obwód zewnętrzny.



Fotoogniwo



Zasada działania



J_p – prąd świetlny nośników mniejszościowych

J_D – prąd diody (dziur i elektronów) pod wpływem U_{OC}

Gdy ogniwo jest rozwarne, ustala się takie napięcie U_{OC} , aby: $I = I_p - I_D = 0$

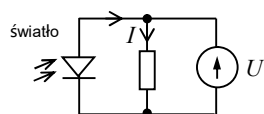
Jeśli do takiego półprzewodnika przyłączy się obwód zewnętrzny, to popłynie przez niego prąd wytworzony przez ładunki, które przeszły przez barierę potencjału, a powracają przez obwód zewnętrzny.



Fotoogniwo

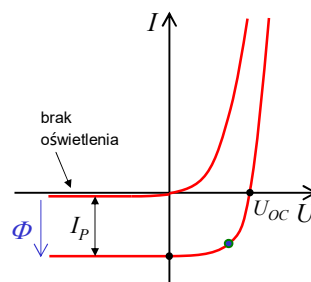


Charakterystyka fotoogniwa w funkcji oświetlenia



$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{\eta U_T}\right) - 1 \right] - I_p$$

I_p – prąd świetlny



W kierunku zaporowym:

$I_p \approx \text{const} (I_p \propto U)$ – prąd nośników mniejszościowych zależy jedynie od domieszkowania, temperatury i oświetlenia (Φ).



Fotoogniwo



Parametry fotoogniwa

- I_{SC} – prąd zwarcia, przy zwarcu ogniwa ($U = 0$),
- napięcie $U = U_{OC}$ przy rozwarciu ogniwa ($I = 0$):

$$U_{OC} = \eta U_T \ln \left(1 + \frac{I_p}{I_s} \right)$$

- Maksymalne napięcie dostępne z ogniwa:

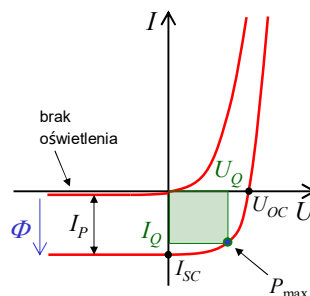
$$U_{OCmax} \approx (E_c - E_v) / q$$

- Maksymalna moc dostępna z elementu przy danym oświetleniu:

$$P_{max} = U_Q \cdot I_Q \quad \text{– uzyskuje się w określonym } Q, \text{ przy odpowiednio dobranej rezystancji obciążenia}$$

- Współczynnik wypełnienia:

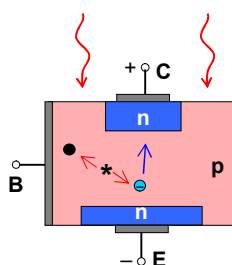
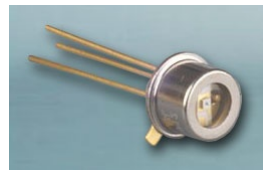
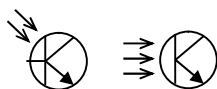
$$FF = \frac{I_Q U_Q}{I_{SC} U_{OC}}$$



Fototranzystor



Fototranzystor – konstrukcja jest zbliżona do zwykłego tranzystora bipolarnego, z tą różnicą, że jego obudowa umożliwia oświetlenie złącza B-C, które jest powierzchnią światłoczułą.



Zasada działania:

- wskutek oświetlenia bazy powstają elektrony (nośniki mniejszościowe) i dziury (nośniki większościowe),
- elektrony dyfundują przez złącze kolektorowe (zwiększają I_C),
- dziury gromadzą się w bazie tworząc nieskompensowany ładunek dodatni obniżający barierę B-E, co powoduje zwiększoną iniekcję elektronów z emitera do bazy,
- dodatkowe elektrony silnie zwiększają I_C , co daje duże wzmocnienie – czułość fototranzystora jest dużo większa niż fotodiody.

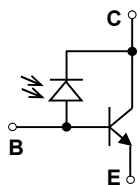


Fototranzystor

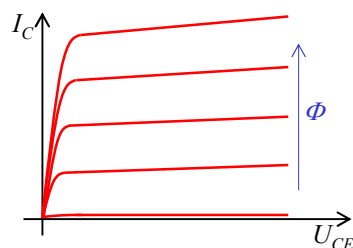


Właściwości

Schemat zastępczy:



Charakterystyka wyjściowa:



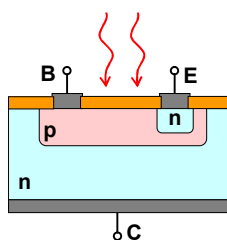
- Pracuje w układzie WE, a I_C zależy od natężenia padającego promieniowania (a nie od I_B).
- Nieliniowa zależność sygnału elektrycznego od mocy promieniowania.
- Duża czułość i wzmacnienie (100 – 1000), ale niezbyt duża szybkość działania.
- Przeważnie produkowane jako elementy dwukońcówkowe – wyprowadzone są E i C.
- Przy braku oświetlenia płynie prąd zerowy (termiczna generacja nośników) – prąd zaporowo spolaryzowanego złącza B-C.
- Zakres widmowy fototranzystorów jest taki jak odpowiadających im fotodiod.



Fototranzystor



Budowa i właściwości



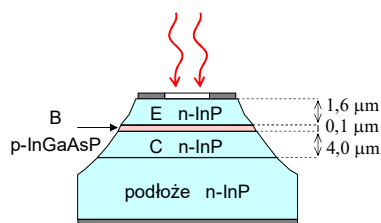
Fototranzystor na bazie Si:

- prosta budowa,
- niskie koszty produkcji,
- duża pojemność złącza B-C,
- duży czas przelotu nośników przez obszar bazy,
- niska częstotliwość graniczna ~ kilkaset kHz – (znacznie mniejsza niż fotodiody):

$$f_c = \frac{1}{2\pi \beta r_L C_{bc}}$$

Struktura heterozłącza n-p-n typu MESA:

- szybszy czas działania,
- InP – większa przerwa energetyczna,
- E pełni rolę okna,
- zasadnicze pochłanianie zachodzi w B.





Fototranzystor

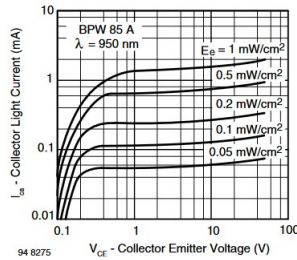


BPW85 – Si NPN fototranzystor

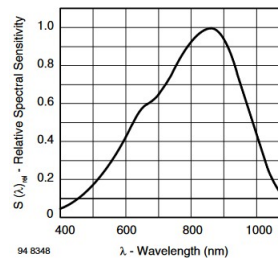
www.vishay.com

BPW85 is a silicon NPN phototransistor with high radiant sensitivity in clear, T-1 plastic package. It is sensitive to visible and near infrared radiation.

APPLICATIONS: Detector in electronic control and drive circuit.



Prąd kolektora w funkcji napięcia U_{CE} i natężenia światła E_e



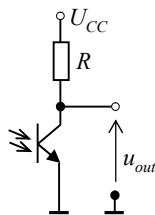
Względna czułość widmowa



Fototranzystor



Zastosowania



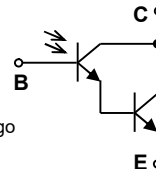
Fototranzystor w układzie fotodetektora:

- zacisk bazy może być niewyprowadzony (podwójna fotodioda),
- jeśli prąd złącza C-B wynosi I_p , to:

$$u_{out} = U_{CC} - \beta I_p R$$

Fototranzystor w układzie Darlingtona:

- pozwala uzyskać duże wzmocnienie prądowe,
- częstotliwość graniczna mniejsza niż zwykłego fototranzystora ($\sim 30 \text{ kHz}$).



Inne zastosowania:

detektory światła podczerwonego, urządzenia biurowe – kontrola marginesów, monitor położenia papieru, piloty zdalnego sterowania, detektory zmian oświetlenia, inne.



Transoptor



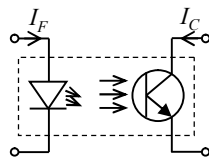
Transoptor (optoizolator) – przyrząd półprzewodnikowy, w którym istnieje sprzężenie optyczne między układami wejściowym i wyjściowym przy ich jednoczesnym odseparowaniu galwanicznym (przy różnych poziomach składowych stałych).

- Parę sprzężoną optycznie stanowią fotoemiter i fotodetektor zamknięte we wspólnej obudowie.
- Różnica napięć może dochodzić do kV; R_{we} , $R_{wy} \sim G\Omega$.

Zastosowania:

- galwaniczne rozdzielanie obwodów w układach sterowania i automatyki,
- zamiennik dla przekazywników i transformatorów,
- transmisja sygnałów z prędkością do kilkudziesięciu Mbit/s,
- czujniki optyczne.

Transoptor z diodą LED i fototranzystorem:



współczynnik transmisji
(sprężenia CTR):

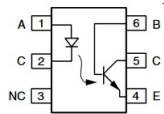
$$K = \frac{I_C}{I_F} \Big|_{U_O = \text{const}}$$



Transoptor



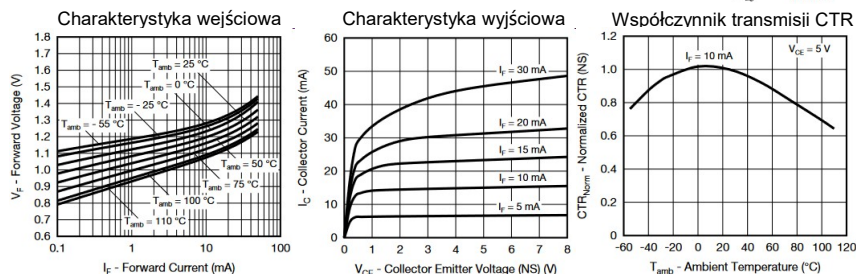
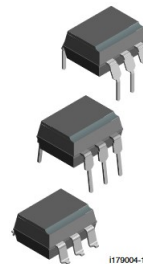
Transoptor CNY17 – zbudowany z diody emitującej w zakresie podczerwieni (GaAs) sprzężonej optycznie z fototranzystorem npn (Si)



Wybrane parametry:

- maksymalne napięcie izolacji: 5000 Vrms,
- czas włączania: 3 μ s,
- częstotliwość graniczna: 110 kHz.

www.vishay.com

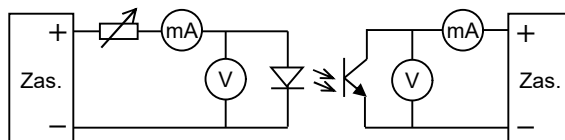




Pomiar charakterystyk transoptora



Pomiar ch-k transoptora (z wyprowadzoną bazą fototranzystora)



• Ch-ka diody LED: $I_F = f(U_F)$.

• Ch-ki wyjściowe fototranzystora: $I_C = f(U_{CE})|_{I_F=const}$

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_F=0} \quad \text{– prąd ciemny}$$

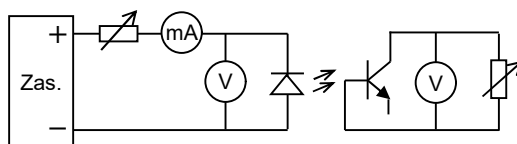
$$K = \frac{I_C}{I_F} = f(I_F)|_{U_{CE}=const}$$



Pomiar charakterystyk transoptora



Pomiar ch-k fotodiody (złącze B-C transoptora – przy braku zewnętrznej polaryzacji można je traktować jako fotoogniwo)



• $U_{CB} = f(I_F)$ – zależność napięcia fotoelektrycznego (fotowoltaicznego) złącza B-C od oświetlenia (I_F), przy odłączonym E

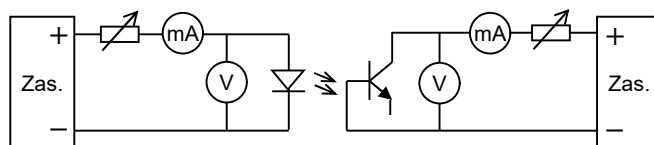
• $I_C = f(U_{CB})|_{I_F=const}$ przy zmianie R obciążenia fotoogniwa – ch-ka $I-V$ fotoogniwa

• $U_{BE} = f(I_F)$ – zależność napięcia fotowoltaicznego złącza B-E od oświetlenia

Oba złącza (B-C i B-E) są fotoogniwami.



Pomiar ch-k fotodiody



- $I_C = f(U_{CB})|_{I_F=const}$ – ch-ka I - V fotodiody (złącza B-C tranzystora) – I i III ćwiartka ukl. wsp.
- $I_C = f(I_F)|_{U_{CB}=const}$ – ch-ka fotodiody w zależności od oświetlenia