

Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Piotr Targowski i Bernard Ziętek

Pracownia Optoelektroniki

**ELEMENTY OPTOELEKTRONICZNE**

Zakład Optoelektroniki

Toruń 2004

## I Cel zadania

Celem zadania jest zapoznanie z własnościami i metodami pomiarów parametrów różnych elementów optoelektronicznych:

- diod elektroluminescencyjnych i wyświetlaczy,
- fotodetektorów ze złączem  $p-n$ : fotoogniw, diod typu PIN i lawinowych,
- fototranzystorów,
- transoptorów.

## II Elementy optoelektroniczne

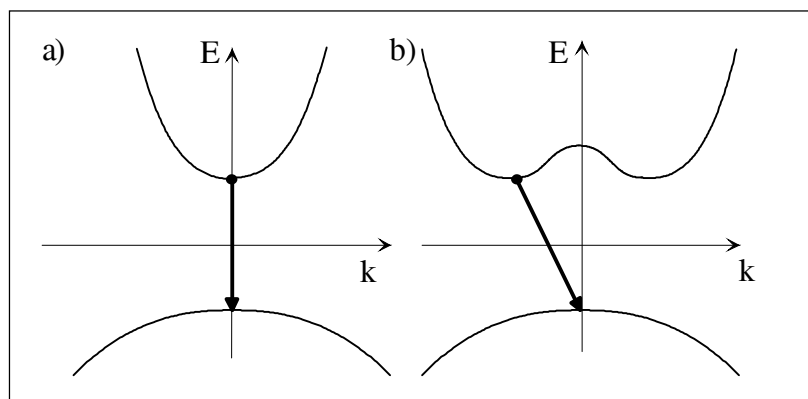
### II.A Diody elektroluminescencyjne

Dioda elektroluminescencyjna (DEL) jest diodą półprzewodnikową, w którym przepływ prądu powoduje generację promieniowania w wyniku rekombinacji wstrzykniętych nośników mniejszościowych przez złącze  $p-n$  spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Jeżeli drogą wstrzykiwania nośników mniejszościowych uzyskamy stan, w którym w pasmie przewodnictwa będą elektrony i w pasmie walencyjnym dziury, to wtedy możliwa jest spontaniczna rekombinacja dziur i elektronów dająca w wyniku foton, czyli "reakcja"

$$e + h \rightarrow h\nu > E_g, \quad (1)$$

gdzie:  $e$  - elektron,  $h$  - dziura i  $E_g$  - przerwa energetyczna.

Występują dwa rodzaje półprzewodników: z *prostą* i *skośną* przerwą energetyczną (rys.1). Ponieważ nośniki mniejszościowe gromadzą się w okolicach minimum energii dla elektronów (w pasmie przewodzenia) i dziur (w pasmie walencyjnym, w tym przypadku jest to maksimum energii elektronu), to w zależności od struktury pasm elektronowych konkretnego półprzewodnika przejścia zachodzą bez zmiany albo ze zmianą pędu pary elektron-dziura. Ponieważ pęd fotonu jest znikomo mały wobec pędu elektronu lub dziury, to emisja promieniowania zachodzi ze znacznie większym prawdopodobieństwem w półprzewodnikach z prostą przerwą energetyczną.



Rys.1. Przejścia proste (a) i skośne (b) w półprzewodniku

Niezbyt wysokie wymagania dotyczące wydajności generacji dają możliwość zastosowania w DEL różnorodnych materiałów nawet z optycznymi przejściami skośnymi. W DEL charakterystyczne są dwa mechanizmy emisji światła: rekombinacja międzypasmowa jak na rys. 1 i rekombinacja z udziałem ekscytonów. Ekscytony są to układy złożone z dziury i związanego z nią elektronu. Istnienie ich powoduje powstanie dodatkowych poziomów energetycznych

leżących w paśmie wzbronionym. Poziomy ekscytonowe wytwarza się wprowadzając odpowiednie domieszki.

Najczęściej stosowane materiały do produkcji DEL to: *GaAs*, *InAs*, *InSb*, *GaSb*, *GaAlAs*, *GaAsP*, *InGaAsP*, *ZnS*, *ZnSe*, *CdTe*, *PbS*, *PbTe*, *InGaN*.

Właściwości elektryczne DEL są identyczne jak innych diod złączowych, i tak związek napięcie - prąd ma postać

$$I = I_r \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

gdzie:  $I_r$  jest wielkością charakterystyczną dla określonego materiału i zawiera takie wielkości jak stałe dyfuzji, drogi dyfuzji i gęstości nośników oraz ładunek elektronu  $e$ .

Dla DEL świecących w obszarze widzialnym napięcie sterujące wynosi od 1.5V do 2.5V. Natężenie emitowanego światła jest proporcjonalne do prądu.

Obecnie wytwarzane są diody emitujące promieniowanie w zakresie od podczerwieni do bliskiego ultrafioletu (*InGaN* - 371 nm).

## II.B Fotooporniki

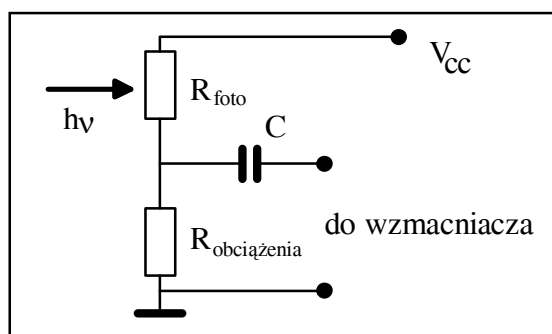
Najprostszym fotodetektorem półprzewodnikowym jest fotoopornik. Wewnętrzny efekt fotoelektryczny (generacja par elektron - dziura) zachodzi, gdy energia fotonu o częstotliwości  $\nu$  jest większa od szerokości przerwy energetycznej  $E_g$

$$h\nu > E_g. \quad (3)$$

Wzrost przewodności elektrycznej  $\sigma$  fotoopornika wynika ze zwiększenia koncentracji nośników: elektronów w paśmie przewodzenia ( $n$ ) i dziur w paśmie walencyjnym ( $p$ )

$$\sigma = e(n_+ \mu_+ + n_- \mu_-), \quad (4)$$

gdzie:  $\mu$  jest ruchliwością odpowiednich nośników.



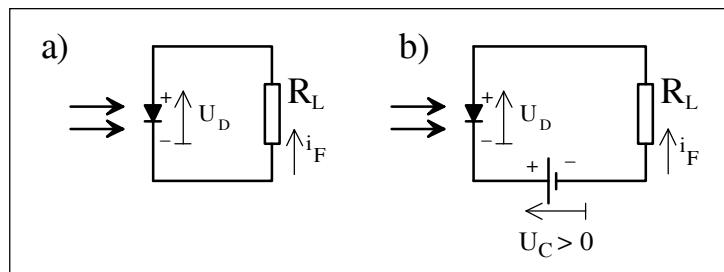
Rys.2. Schemat elektryczny połączenia fotoopornika

Szybkość odpowiedzi w detektorach fotooporowych jest ograniczona czasem życia nośników. Odpowiednie domieszkowanie pozwala regulować czułość spektralną fotooporników.

## II.C Fotodetektory ze złączem p-n

### II.C.1 Fotoogniwo i fotodioda

Generacja par elektron - dziura zachodzi w tym przypadku w obszarze złącza p - n. Musi być oczywiście spełniony warunek (3). Jeżeli złącze nie jest spolaryzowane zewnętrznym napięciem to mamy do czynienia z **fotoogniwem**, zaś w złącze spolaryzowane zaporowo nazywa się **fotodiodą**. Sposób włączenia fotodetektora przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Fotoogniwo (a) i fotodioda (b)

Analizę działania fotoogniwa i fotodiody można dokonać w oparciu o ten sam zespół charakterystyk prądowo - napięciowych (rys. 4). Mocy  $P_0$  detektowanego promieniowania odpowiada  $P_0/h\nu$  fotonów na sekundę tworzących pary elektron - dziura z wydajnością  $\eta$ . Zatem wielkość średniego fotoprądu wyraża się następująco

$$\langle i_{fot} \rangle = e \eta \frac{P_0}{h\nu}. \quad (5)$$

Całkowity prąd diody wynosi więc

$$i_F = i_s \left\{ \exp \left[ \frac{eU_D}{kT} \right] - 1 \right\} - \langle i_{fot} \rangle, \quad (6)$$

gdzie:  $i_s$  jest prądem nasycenia:  $i_s = -i(U_D = -\infty)$ , a  $U_D$  napięciem na złączu p-n.

Prąd ten płynie w obwodzie z rys. 3. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa związek pomiędzy prądami i napięciami w tym obwodzie jest następujący:

$$-R_L \cdot i_F = U_D + U_C, \quad (7)$$

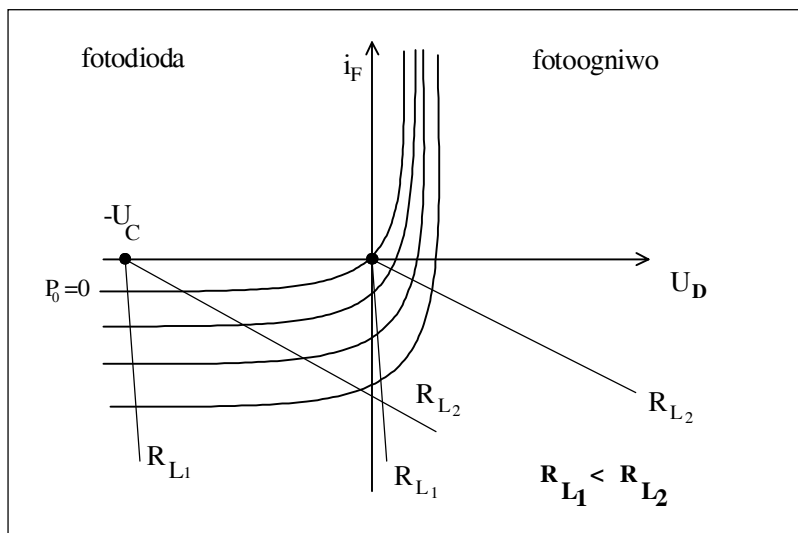
gdzie:  $U_C = 0$  dla fotoogniwa, a  $U_C < 0$  dla fotodiody.

Aby wykreślić ten związek na rysunku 4, należy przekształcić go do postaci  $i_F(U_D)$ :

$$i_F = -\frac{1}{R_L} \cdot U_D + \frac{-U_C}{R_L}. \quad (8)$$

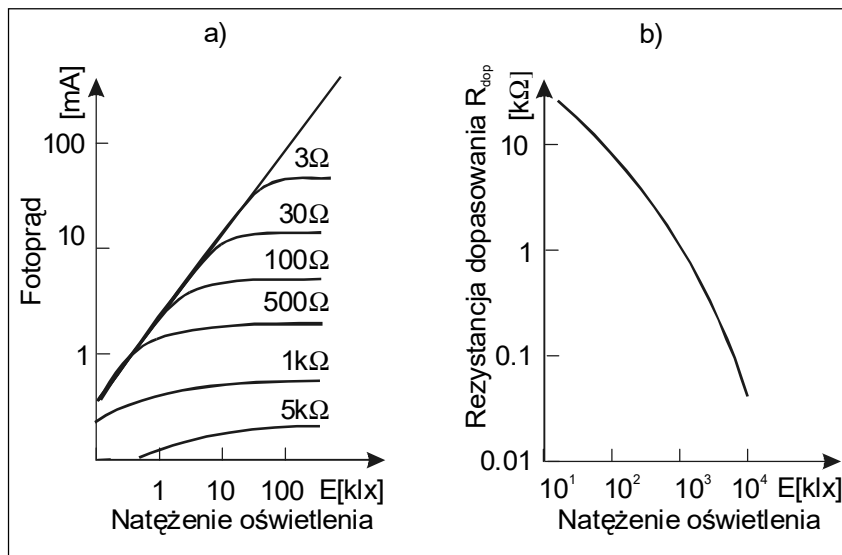
Jak widać, jest uzyskuje się równanie prostej (*obciążenia*) o ujemnym współczynniku kierunkowym. Proste takie, dla dwu wartości  $R_L$  wykreślono na Rys.4 wraz z typową rodziną charakterystyk prądowo- napięciowych fotozłącza p-n .

Prąd płynący w układzie można wyznaczyć z Rys. 4, z przecięcia charakterystyki diody odpowiadającej danemu oświetleniu z właściwą prostą obciążenia, albo rozwiązując odpowiednie równania Kirchhoffa.



Rys. 4. Charakterystyka  $i(U)$  złącza p-n. Poszczególne krzywe odpowiadają kolejnym liniowo narastającym oświetleniom. Zaznaczono również proste obciążenia dla dwu wartości  $R_L$  : mniejszej (1) i większej (2)

Jak wynika z rys 4. liniowa praca fotodiody i fotoogniwa możliwa jest dla małych oporności obciążenia  $R_L$  . Dobór właściwej oporności obciążenia jest kluczowy dla prawidłowej pracy detektora. Zbyt mała oporność może oznaczać niewystarczającą czułość układu, zbyt duża - nieliniową charakterystykę prąd - napięcie (rys 5). Dodatkowo fotodioda pracująca jako detektor szybkich impulsów musi być dopasowana falo- wo do kabla koncentrycznego i wejścia oscyloskopu. Oznacza to zazwyczaj, że rezystancja  $R_L$  jest opornością falową kabla -  $50\Omega$ . Z kolei fotoogniwo wykorzystywane jako źródło SEM powinno być obciążone  $R_L=R_{dopasowania}$  taką, na której wydzielana moc jest maksymalna. Wartość tej rezystancji zależy od natężenia oświetlenia.



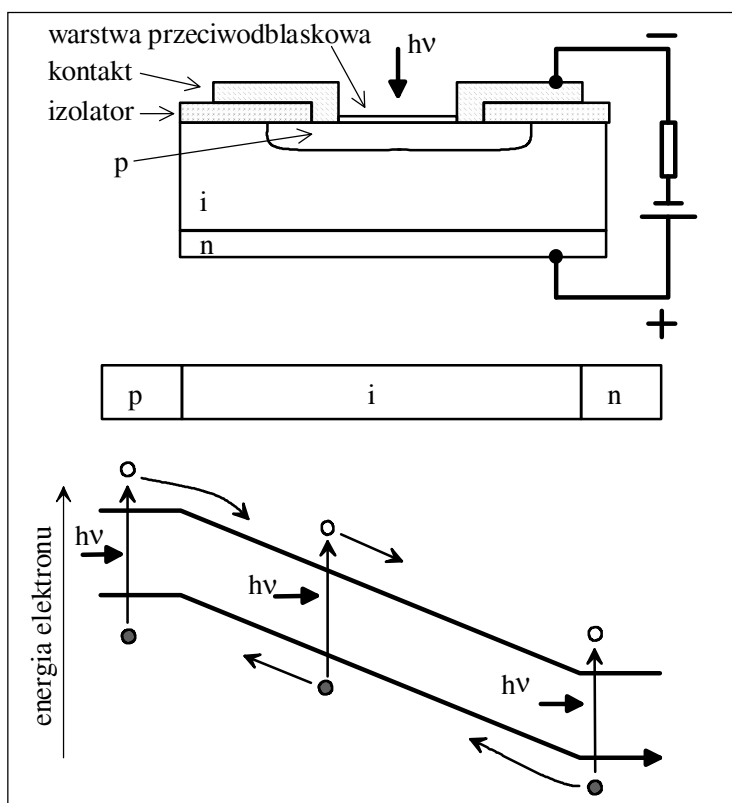
Rys 5. a) Zależność fotoprądu fotoogniwa od natężenia oświetlenia dla różnych rezystancji obciążenia. b) Zależność  $R_{dop}$  od fotoprądu i natężenia oświetlenia dla fotoogniwa krzemowego BPY48 (Siemens)

W praktyce rozwiązania techniczne elementów ze złączem p-n zależą od ich przeznaczenia. Fotoogniwa wytwarza się zazwyczaj z dużą powierzchnią światłoczułą, zaś fotodiody optymalizuje dla szybkiej odpowiedzi (p-i-n) lub dużej czułości (lavinowe).

### II.C.2 Fotodioda p-i-n

Można istotnie zwiększyć szybkość odpowiedzi fotodiody na sygnał świetlny, jeśli między silnie domieszkowane półprzewodniki n i p wstawi się warstwę półprzewodnika samostannego *i*. Padające promieniowanie osiąga obszar *i*, w nim jest absorbowane i tym samym generowane są nośniki. Dziury poruszają się w lewo (patrz rys.6), a elektrony - w prawo. Obszar *i* charakteryzuje się małym przewodnictwem (nie jest domieszkowany) i dlatego przyłożone z zewnątrz napięcie  $U_0$  (zwykle kilkadziesiąt V) odkłada się wzdłuż tego obszaru tworząc gradient potencjału rozdzielający wygenerowane pary elektron - dziura (wzrost  $\eta$ ) oraz przyspieszający ich ucieczkę przez obszary n i p (wzrost szybkości działania).

Typowy czas narastania impulsu stanowiącego odpowiedź prądową na krótki impuls światła jest mniejszy niż 1ns, a w specjalnych wykonaniach 100 ps. Sprawność generacji jest około 80%.



Rys. 6. Budowa i schemat energetyczny fotodiody p - i - n

### II.C.3 Fotodioda lawinowa

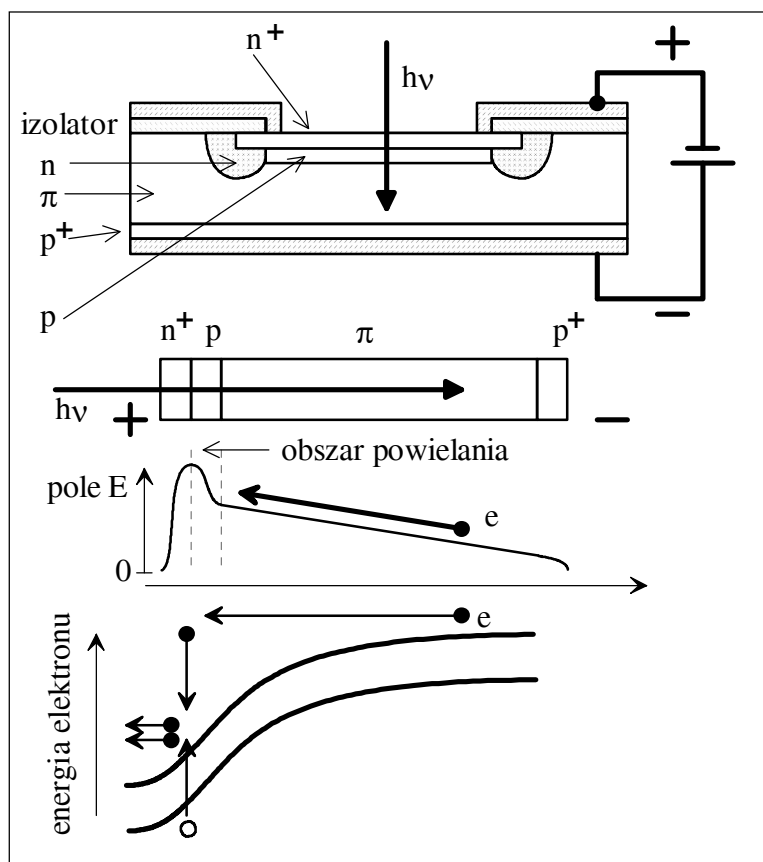
W opisanych wyżej fotodiodach otrzymuje się stosunkowo niewielkie prądy (rzędu  $10^{-9}$  A). Rozwiązaniem jest fotodioda lawinowa, gdzie wykorzystuje się wzmocnienie wewnętrzne. Taka fotodioda jest urządzeniem pracującym w warunkach bliskich przebicia lawinowego. Polaryzuje się ją zaporowo, ale w pobliżu potencjału przebicia. Generowane przez światło nośniki znajdując się w silnym polu powodują dalszą jonizację pomnażając płynący prąd.

Stosunek całkowitego prądu do prądu pierwotnego określa współczynnik powielania. Dla słabych fotoprądów określa się go ze wzoru

$$M_0 = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_b}\right)^v} \quad (9)$$

gdzie:  $U$  - napięcie polaryzacji,  $U_b$  - napięcie przebicia,  $v$  - wielkość zależna od szybkości jonizacji w funkcji natężenia pola elektrycznego zawarta między 1.5 i 6.

Sprawność wynosi około 100%, szerokość pasma kilkaset GHz i współczynnik powielania około 1000. Ceną za wysokie wzmocnienie jest niestety duży prąd ciemny i około dwukrotnie dłuższa odpowiedź impulsowa układu.



Rys.7. Schemat fotodiody lawinowej

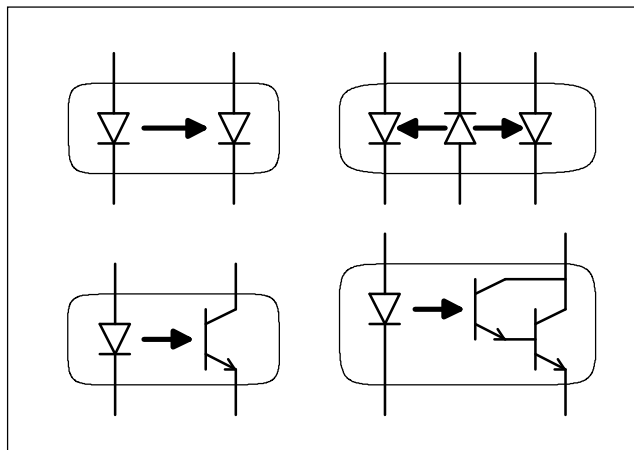
### II.D Transoptory

Transoptory są urządzeniami transmisyjnymi złożonymi z DEL i fotodetektora sprzężonych optycznie.

Transoptory zamknięte służą zazwyczaj do optoizolacji obwodów po stronie nadajnika od obwodów odbiornika. Sygnał użyteczny jest przekazywany drogą optyczną. Eliminuje się więc np. zakłócenia elektryczne, wytwarzane po stronie odbiornika. Transoptory mogą przekazywać zarówno sygnały cyfrowe (istotna jest wówczas szybkość i pewność transmisji) lub analogowe. W tym drugim przypadku przydatność transoptora w danym zastosowaniu określa CTR (Current Trasfer Ratio) zdefiniowany następująco:

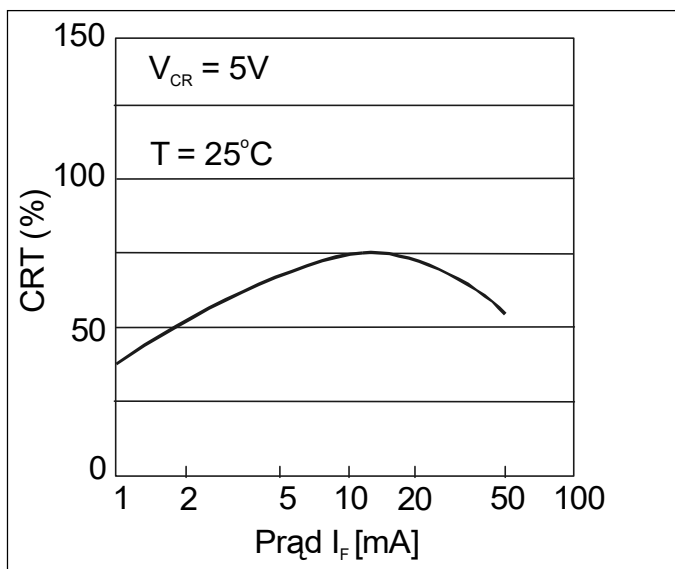
$$CTR(I_F) = \frac{I_c(I_F)}{I_F} \times 100\% \tag{10}$$

gdzie  $I_C$  jest prądem odbiornika a  $I_F$  nadajnika. Zazwyczaj przedstawia się go w postaci funkcji  $CTR(I_F)$ .



Rys.8. Podstawowe typy transoptorów

Oczywistym jest, że aby transoptor mógł być zastosowany do przekazywania sygnałów analogowych wymagana jest stała wartość CTR w jak największym zakresie  $I_F$ . W praktyce jest to trudne do uzyskania i stosuje raczej układy złożone z transoptora podwójnego (rys. 8) tak połączonych, aby uzyskać kompensację nieliniowości CTR.



Rys 9. Przykładowa charakterystyka CTR

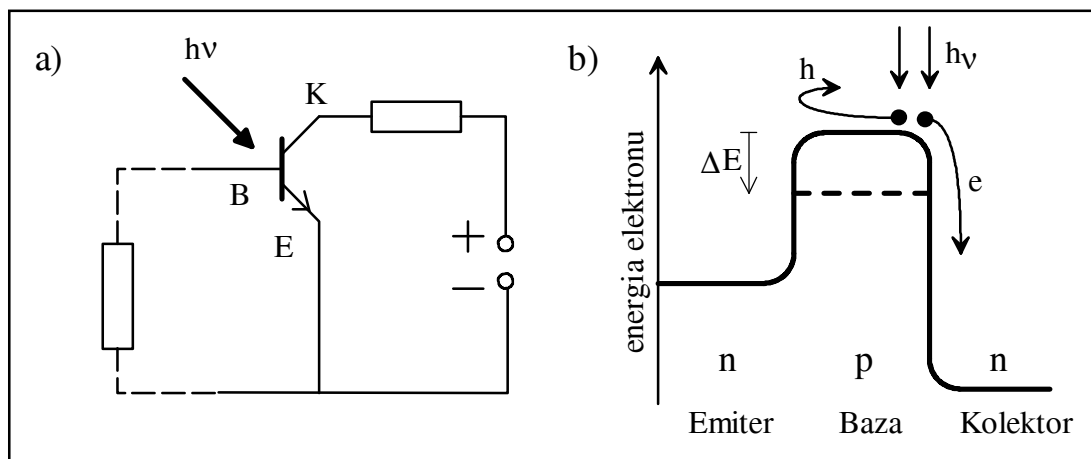


Transoptory otwarte są używane jako detektory położenia i ruchu.

Rys 10. Niektóre zastosowania transoptorów

### II.E Fototranzystory

Tranzystor bipolarny z dostępnym dla promieniowania złączem bazą - kolektor staje się fotodetekтором z wbudowanym wzmacnieniem.



Rys.11. Fototranzystor: a) układ pracy, b) zasada działania

Elektrony wytworzone w wyniku zjawiska fotoelektrycznego wewnątrz w obszarze złącza B-K swobodnie odpływają do kolektora. Dziury odpychane są od obu obszarów typu n - gromadzą się w obszarze bazy. Ich ładunek częściowo neutralizuje ładunek przestrzenny nieruchomych akceptorów w bazie występujących w pobliżu złącz p-n. Powoduje to obniżenie barier potencjałów na złączach ( $\Delta E$ ). Zwiększa to prawdopodobieństwo dyfuzji elektronów z emitera do bazy. Ponieważ czas życia dziury w obszarze bazy jest znacznie dłuższy niż dyfuzji elektronu przez obszar p, jedna dziura może spowodować przepływ wielu elektronów - pojawia się efekt wzmacnieniowy.

Fototranzystory znajdują zastosowanie tam, gdzie nie są wymagane szybkie czasy reakcji detektora. Duże wzmacnienie i stosunkowo małe szумы czynią z fototranzystora bardzo przydatny detektor.

### III Literatura

1. A.Pawlaczyk, *Elementy i układy optoelektroniczne*.
2. B. Ziętek, *Optoelektronika*.
3. K. J. Eberling, *Integrated Optoelectronics*.
4. J. T. Verdeyen, *Laser electronics*.
5. M. G. Unger, *Telekomunikacja optyczna*.
6. A. Smoliński, *Optoelektronika światłowodowa*.
7. M. Szustakowski, *Elementy Techniki Światłowodowej*.