

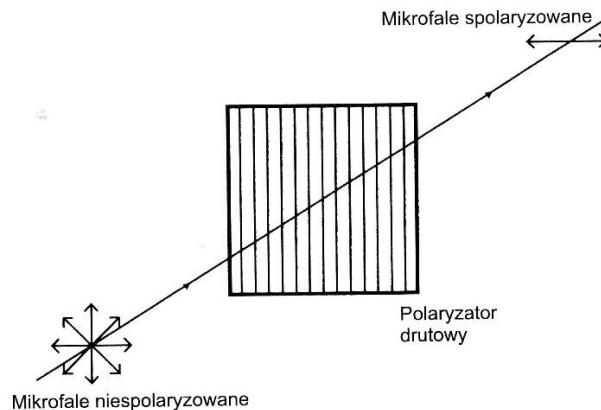
## 1. Elementy i układy optyczne.

Na podstawie: K. Booth, S. Hill „Optoelektronika”; J. Siuzdak, „Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej”; J. Watson, „Elektronika”

**Soczewki:** rozpraszające, skupiające i kolimujące ( $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$  – prawo Snelliusa, równanie soczewki), cienkie, grube, cylindryczne

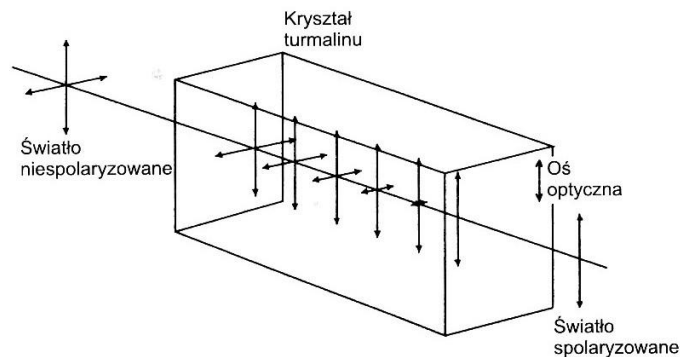
**Zwierciadła:** płaskie, wklęsłe i wypukłe (aluminium na podłożu pokryte  $\text{SiO}_2$  lub  $\text{MgF}_2$ )

**Polaryzatory:** dichroiczne z materiałów, w których absorpcja światła zależy od kierunku polaryzacji i kierunku rozchodzenia się światła, polaryzatory dwójłomne



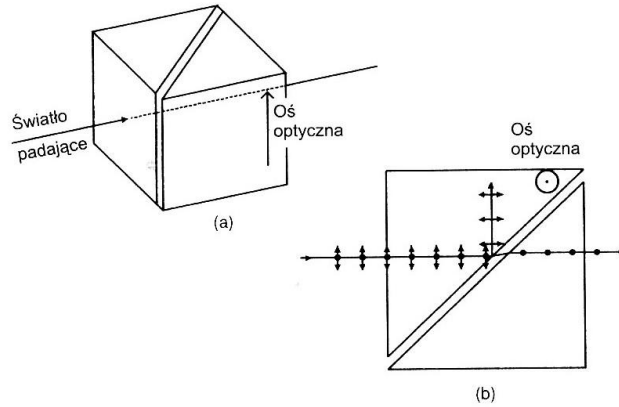
Elektrony z drutów absorbują całą energię pochodzącą ze składowych pola elektrycznego równoległych do drutów.

- materiały dichroiczne (polaroid): turmalin



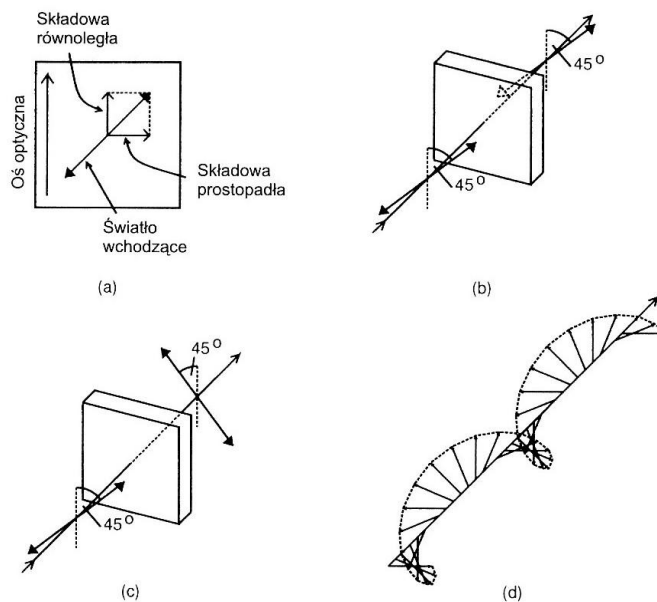
Jeden kierunek polaryzacji jest stopniowo pochłaniany przez ośrodek i na wyjściu pozostaje tylko jeden z dwóch. Polaryzatory z materiałów dwójłomnych (kalcyt, duże współczynniki polaryzacji –  $10^6$ ) – tak jak w materiale dichroicznym ustawienie atomów tworzy płaszczyzny, w których ruch elektronów jest łatwiejszy niż w płaszczyźnie prostopadłej ( $v=c/n$ ).

**Oś optyczna** jest to kierunek w kryształach dwójłomnych, wzdłuż którego światło biegnąc porusza się z tą samą prędkością niezależnie od kierunku polaryzacji. Jeśli światło porusza się wzdłuż osi optycznej nie następuje rozszczepienie wiązki światła na dwie – (promień zwyczajny i nadzwyczajny). **Dwójłomność** – zdolność ośrodków optycznych do podwójnego załamania światła (rozdzielenia promienia świetlnego). Kalcyt ( $\text{CaCO}_3$ ).



Dwa prostokątne pryzmaty cięte tak, aby oś optyczna była prostopadła do trójkątnych ścian (Glan-Foucault, Glan-Thompson) – całkowite wewnętrzne odbicie (zachodzi, gdy światło przechodzi z ośrodka o większym współczynniku załamania do ośrodka o współczynniku mniejszym –  $\Theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$ ). Równoległa składowa światła ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

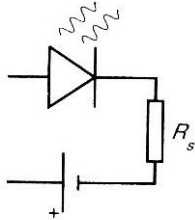
**Retardery**: optyczne układy opóźniające, zmieniające polaryzację fali padającej opóźniając jedną z jej składowych w stosunku do drugiej. Płytki z materiału dwójłomnego lub z pryzmaty. Jedna z krawędzi płytki równoległa do osi optycznej.



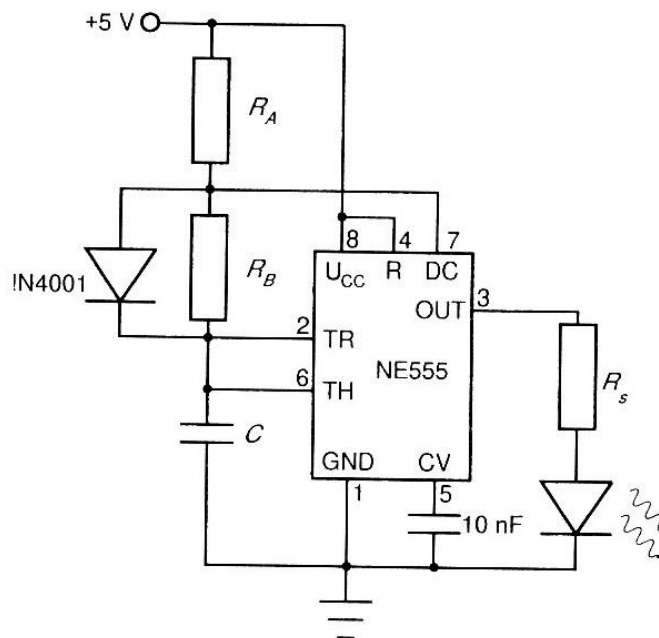
Obie składowe światła ( $\parallel$  i  $\perp$  do osi optycznej) dotrą do drugiego końca płytki przesunięte w

Fazie:  $\Delta\Phi=2\pi/\lambda*L*(|n_p-n_e|)$  (od 0 do  $2\pi$ ) – płytki pełno falowe ( $2\pi$ ) oraz pół- ( $\pi$ ) i ćwierćfalowe ( $\pi/2$ ).

## 2. Sterowanie diód elektroluminescencyjnych i laserowych



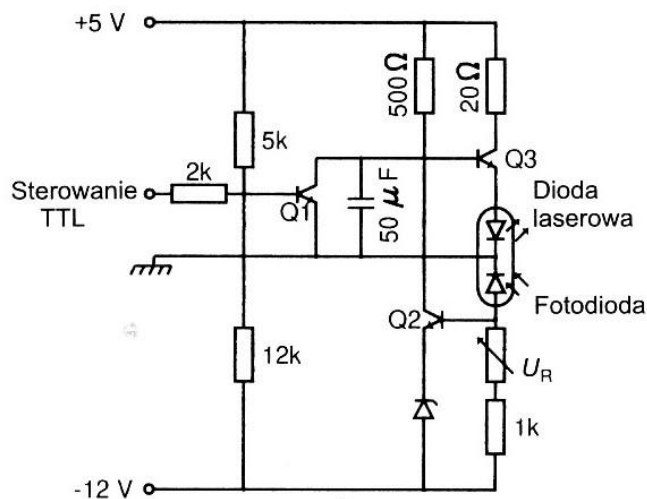
Obliczenia rezystora szeregowego:  $U=I*R_s$ . Układ sterowania diodą LED w celu uzyskania światła ciągłego.



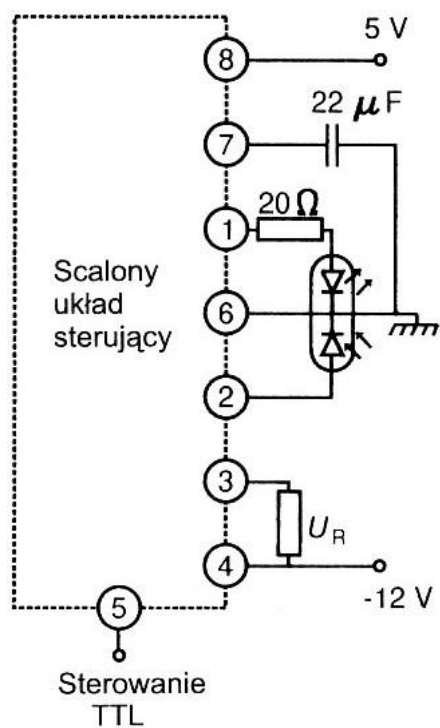
Układ czasowy 555 do modulacji światła diody LED. Na wyjściu przebieg prostokątny (na przemian wartość 0 i wartość mniejszą niż napięcie zasilające) :  $f=1/(0.693(R_A+R_B)C)$ .  $U_{CC}=4.5-16$  V,  $k=R_A/R_B$  – wsp. wypełnienia (stosunek czasów).

W przypadku sterowania diód laserowych: prąd graniczny zmniejsza się w miarę nagrzewania się diody – konieczna automatyczna regulacja mocy przy pomocy monitorującej fotodiody w

pętli sprzężenia zwrotnego. Układ sterujący ma też za zadanie uchronić diodę laserową przed nagłym wzrostem mocy.



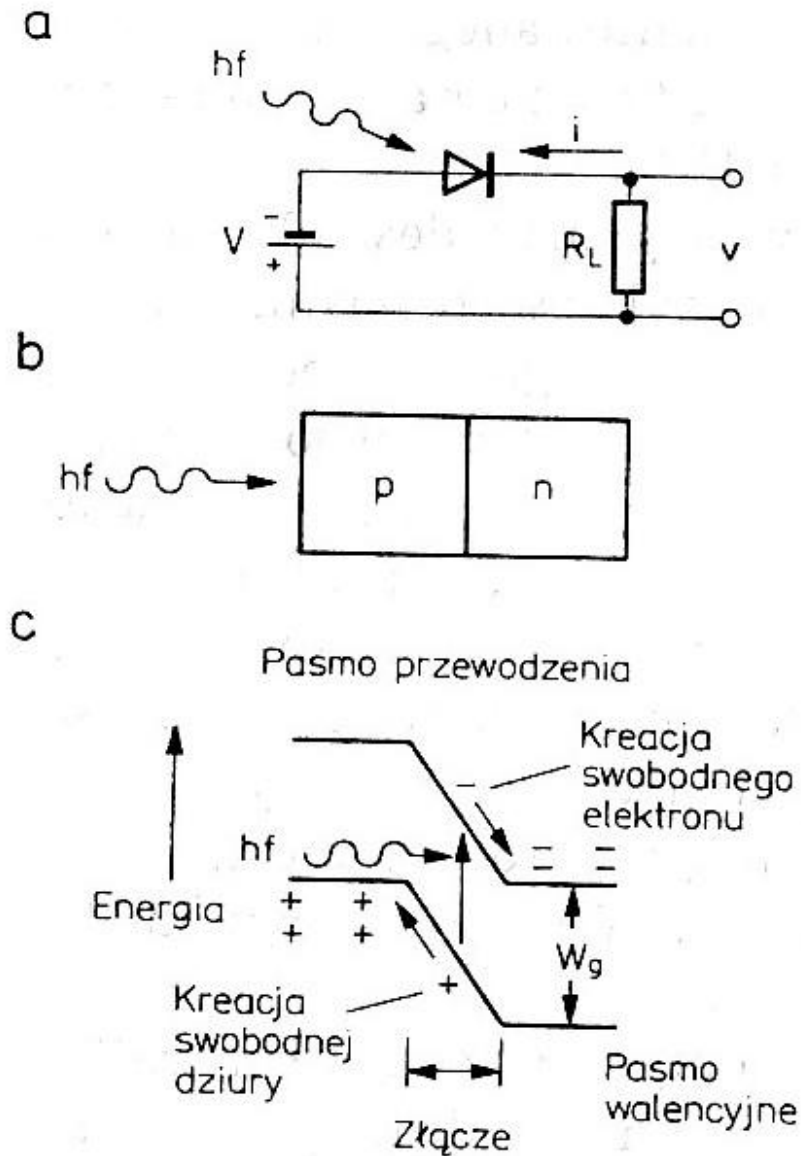
Układ sterujący diody laserowej złożony z elementów dyskretnych



Układ sterujący diody laserowej IR3C01/IR3C01N

## 2. Konstrukcja odbiorników. Projektowanie układów wejściowych. Fotodetektory. $i = \rho P$

### Fotodioda złączowa

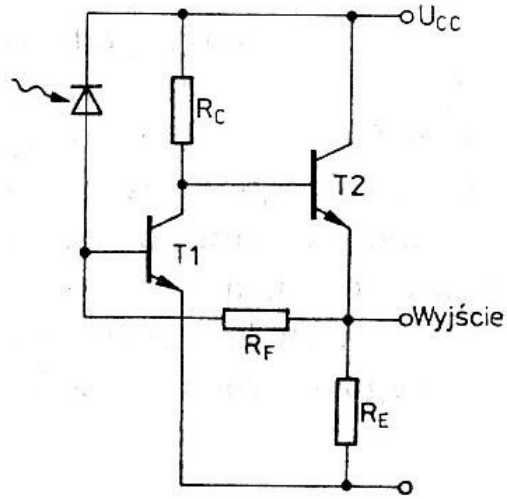


Generacja par elektron-dziura poza złączem zmniejsza sprawność detekcji. Jedną ze stosowanych metod podwyższenia czułości fotodetektora złączowego jest dołączenie do niego scalonego przedwzmacniacza (IDP – detektor zintegrowany z przedwzmacniaczem) – czas narastania rzędu mikrosekund ze względu na prąd wygenerowany przez fotony zaabsorbowane w pobliżu złącza

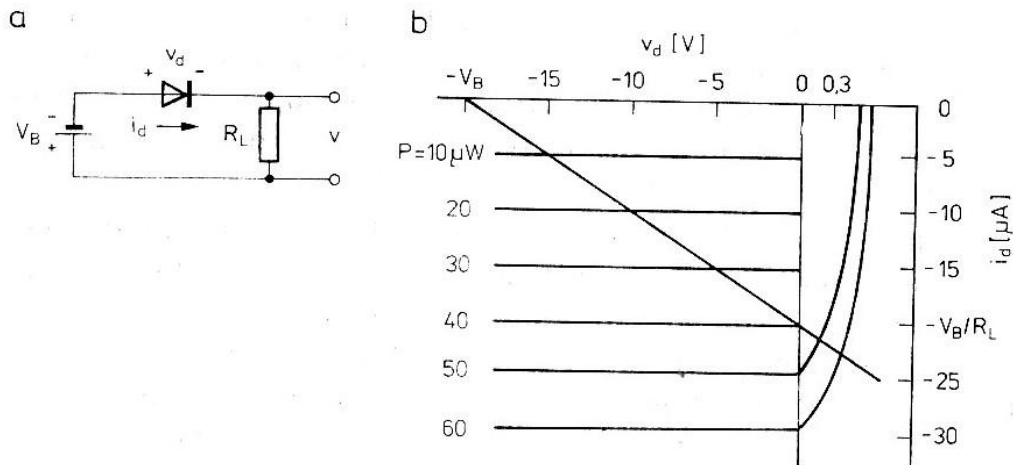
## Przedwzmacniacz scalony z fotodetektorem

Przedwzmacniacz o dużej impedancji wejściowej oraz jeden/dwa stopnie wzmacniające i dopasowujące. Poniższy układ zawiera wzmacniacz transimpedancyjny zbudowany z dwóch tranzystorów T1 i T2 (wtórnik emiterowy zbliżający charakter obwodu wyjściowego do źródła napięciowego) sprzężonych zwrotnie rezystorem  $R_F$ .  $R_E=20\Omega$ , maksymalna czułość  $1,5\text{mV}/\mu\text{W}$ .

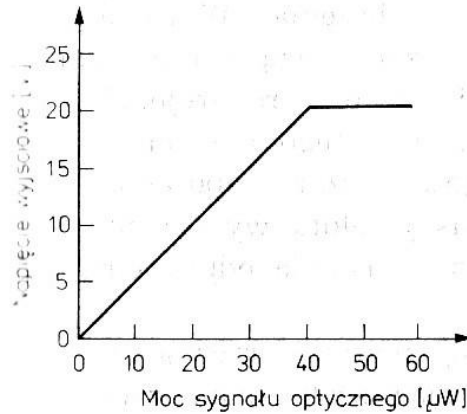
Czas narastania 20 ns, szerokość pasma 17,5 MHz.



## Fotodioda p-i-n

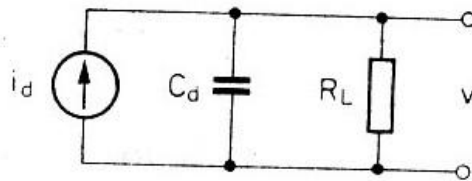


Układ odbiorczy z fotodiodą p-i-n: Prawo Kirchhoffa –  $V_B + V_D + i_D R_L = 0$ . Na podstawie tego wykresu można odczytać wartości charakterystyki przejściowej rozpatrywanego odbiornika (napięcie wyjściowe w funkcji mocy sygnału optycznego)



Przy dużych mocach występuje możliwość nasycenia odbiornika (fotodioda wchodzi w zakres fotowoltaiczny). Aby dostosować odbiornik do odbioru silniejszych sygnałów należy zmniejszyć rezystancję np. z  $1 \text{ M}\Omega$  do  $10 \text{ k}\Omega$ , co daje maksymalna moc  $4 \text{ mW}$  przy czułości fotodiody  $0.5 \text{ A/W}$  i oznacza stukrotne zwiększenie zakresu dynamiki układu odbiorczego (duża rezystancja zwiększa poziom napięcia na wyjściu).

Szybkość działania fotodiody ograniczona jest czasem przelotu swobodnych nośników przez obszar zubożenia, a także przez jej pojemność elektryczną. Podniesienie napięcia zaporowego skraca czas przelotu.



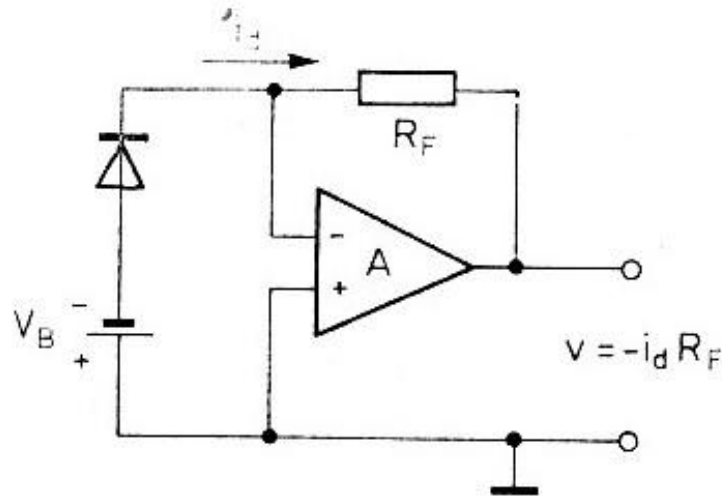
Schemat zastępczy fotodiody p-i-n

Czas narastania impulsu:  $t_r = 2.19 \cdot R_L \cdot C_d$ ,  $f_{3dB} = 1 / (2\pi R_L C_d)$ . Typowo  $C_d$  kilka pF. Zmniejszenie pojemności diody uzyskuje się przez zmniejszenie jej powierzchni światłoczułej.  $t = 0,5 - 10 \text{ ns}$ .

### Przetwornik prądowo-napięciowy

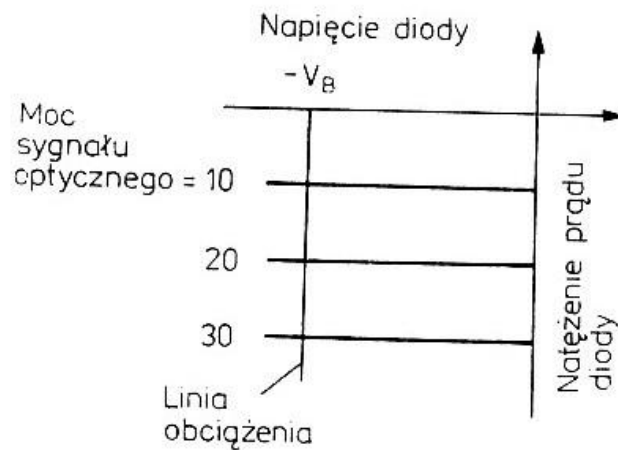
Kryteria wyboru rezystancji obciążenia fotodiody:  $V = \rho P R_L$ ,  $P_{max} = V_B / (\rho R_L)$ ,  $f_{3dB} = (2\pi R_L C_d)^{-1}$ ,  $i_{NT}^2 = 4kT\Delta f / R_L$

Wzrost mocy sygnału optycznego prowadzi do zmniejszenia napięcia na diodzie. Gdy napięcie to osiągnie wartość zero dochodzi do zniekształcenia nieliniowego sygnału. Zmniejszenie rezystancji obciążenia tylko częściowo sprawę ułatwia. Rozwiązanie skuteczne polega na zastosowaniu wzmacniacza transimpedancyjnego, albo inaczej przetwornika prądowo-napięciowego.



Fotodioda ze wzmacniaczem transimpedancyjnym;  $R_F$  – rezystor sprzężenia zwrotnego, A – wzmacniacz operacyjny

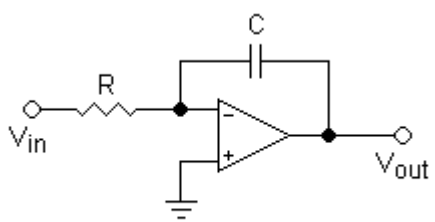
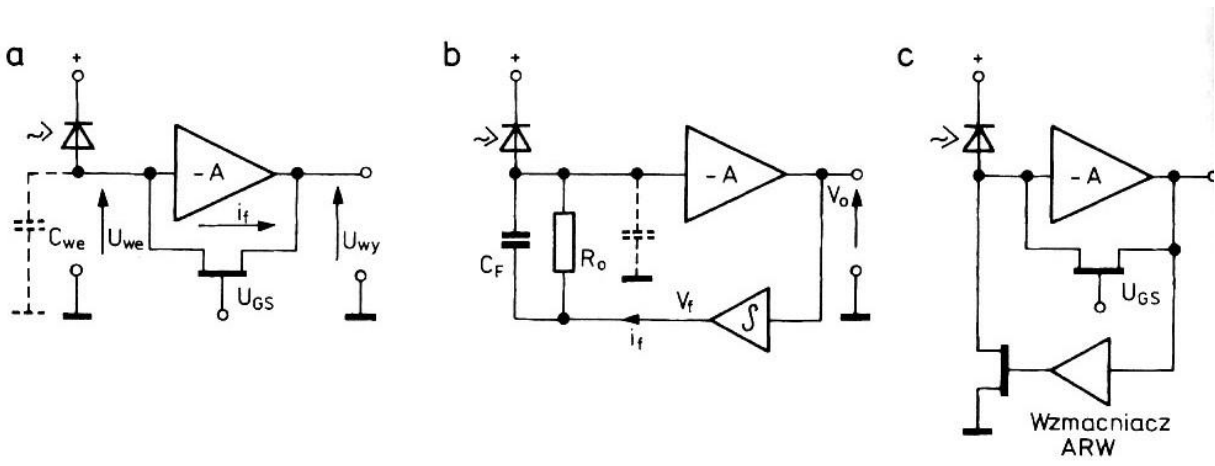
Napięcie na wejściu wzmacniacza A jest mniejsze w porównaniu do  $V_B$ , więc całe napięcie polaryzujące odkłada się na diodzie ( $v_D = -V_B$ )





Pobór mocy przez wzmacniacz o dużym wzmacnieniu jest pomijalnie mały w porównaniu z prądem diody (praktycznie cały prąd diody płynie przez  $R_F$ ). Napięcie na wyjściu równe jest  $R_F i_D$ . Aby uzyskać duże napięcia sygnału wyjściowego  $R_F$  można zwiększyć do setek  $k\Omega$  bez ryzyka nieliniowości przetwarzania. Szybkość działania przetwornika zależy od stałej czasowej pętli sprzężenia zwrotnego.

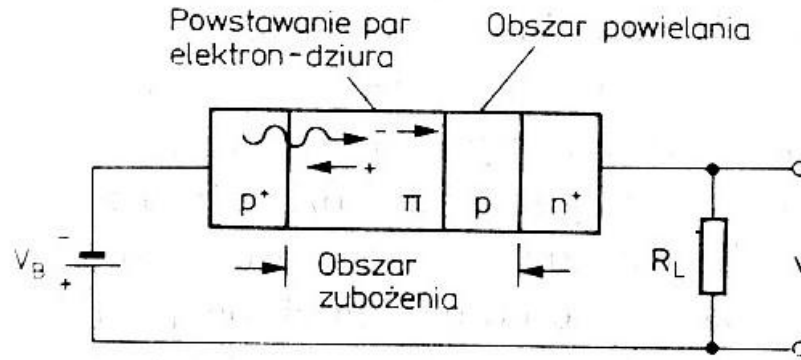
Jednak możliwość zastosowania dużych rezystancji sprzężenia zwrotnego jest tu ograniczona przez pojemność pasozytniczą rezystancji ( $0.05 \text{ pF}$ ). Pojemność ta po sprowadzeniu na wejście układu wzrasta w stosunku wzmacnienia  $A$ . Również wielkość tego wzmacnienia jest ograniczona, a wzrost ilości stopni wzmacnienia prowadzi do niestabilności wzmacniacza. Próba ominięcia tych problemów są odbiorniki z tak zwanym aktywnym sprzężeniem zwrotnym. Składają się z wysokoczułego wzmacniacza szerokopasmowego oraz układu rozszerzania zakresu dynamiki, bądź układu automatycznej regulacji wzmacnienia (mikro-FET, pojemnościowe sprzężenie zwrotne, automatyczna regulacja wzmacnienia).



**Integrator**

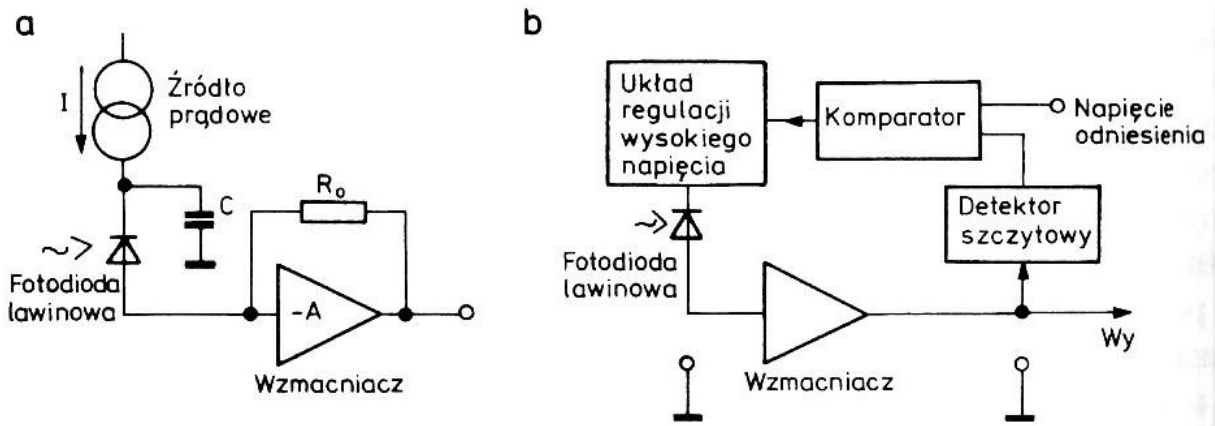
**Fotodioda lawinowa (APD)**

$M=1/(1-V_B/V_{BR})^n$ ;  $V_{BR}=20-500V$ ,  $V_B$  – kilkaset V. Typowe czułości od 20 do 80 A/W.



Fotodioda lawinowa

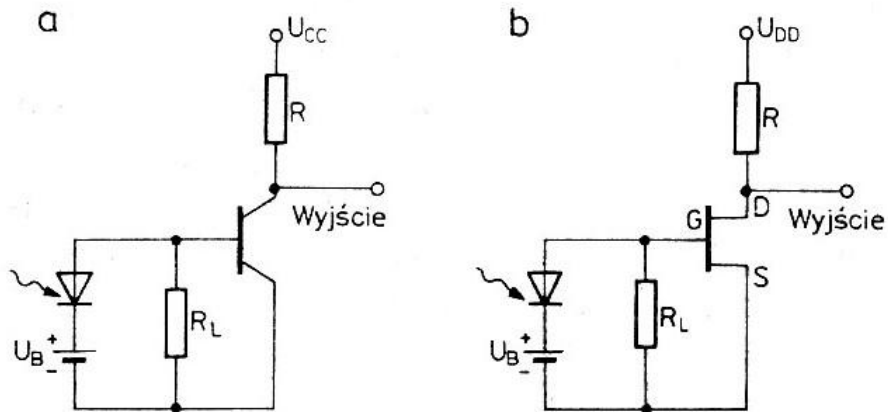
Prawie całe napięcie przyłożone do diody odkłada się na złączu p/n+ i tam ma miejsce powielanie lawinowe. Wzmocnienie tej fotodiody maleje z temperaturą. Współczynnik powielania zmienia się z napięciem wstecznym i temperaturą.



Układy polaryzacji fotodiody lawinowej: zasilanie źródłem prądowym (źródło odsprężone od częstotliwości sygnałowych przez C – wrażliwość na wartość średniej mocy sygnału wejściowego; detekcja szczytowa wzmocnionego sygnału użytecznego – porównanie z wartością odniesienia)

### Projektowanie układów wejściowych odbiornika

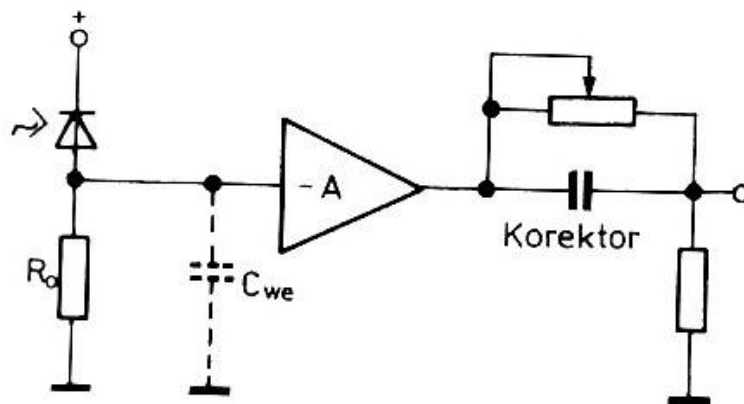
Układy wejściowe: fotodetektor i pierwszy wzmacniacz. Wzmacniacz napięciowy na tranzystorze bipolarnym lub FET dołączony do rezystancji obciążenia detektora. Inne: wzmacniacz o dużej rezystancji wejściowej oraz wzmacniacz transimpedancyjny.



Proste układy wejściowe odbiornika na tranzystorach bipolarnym i polowym

$$f_{3dB} = 1/(2\pi R_T C_T)$$

Dla tranzystora polowego  $R_T = R_L$ , bo rezystancje wejściowa tranzystora i rezystancje obwodu polaryzacji są duże. Dla tranzystora bipolarnego rezystancja wejściowa jest mała (kilka  $k\Omega$ ), może ona znacząco zmienić szerokość pasma. W TP źródłem szumu cieplnego: przewodności kanału dren-źródło oraz rezystancji w obwodzie zasilania, szumu śrutowego: prąd upływu między bramką i źródłem. W TB szum cieplny: rezystancja bazy i obwodu zasilania, szum śrutowy: prądy bazy i kolektora. Wysokie częstotliwości – TB, małe – TP.

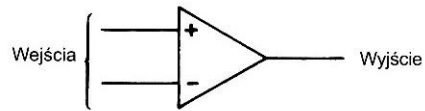


Wzmacniacz o dużej impedancji wejściowej. Podstawowym celem zwiększenia impedancji wejściowej wzmacniacza jest dążenie do zmniejszenia szumu cieplnego (przewodności kanału dren-źródło/rezystancja bazy oraz rezystancje w obwodzie zasilania). Jednak duże oporności zawężają pasmo odbiornika. Przy częstotliwościach powyżej  $f_{3dB}$  wzmocnienie jest znacznie słabsze. Kompensację tego zjawiska uzyskuje się poprzez umieszczenie za przedwzmacniaczem korektora (układ różniczkujący), tłumiącego składowe o niższych częstotliwościach bardziej niż składowe o częstotliwościach wysokich.

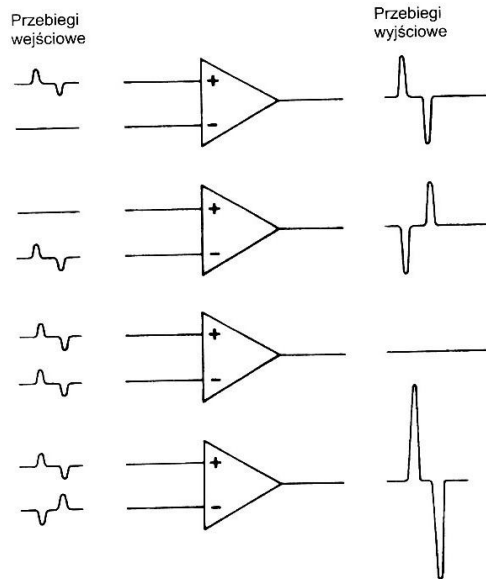
## Układ hybrydowy odbiornika

Oddzielnie wytworzone podzespoły fotodiody i obwodów wzmacniacza, zmontowane we wspólnej obudowie.

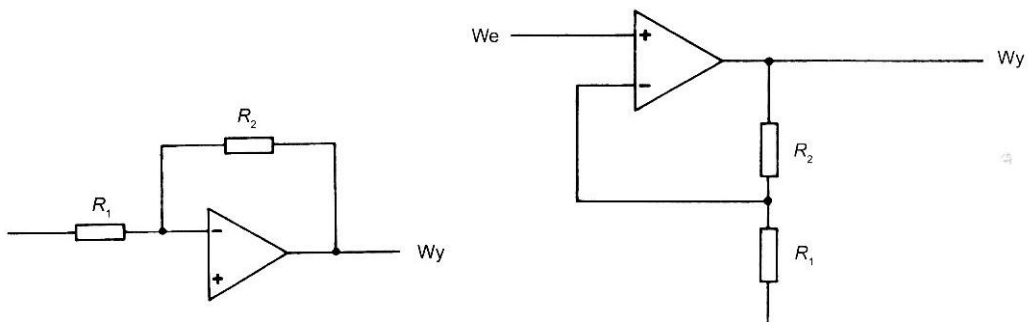
## Wzmacniacz operacyjny



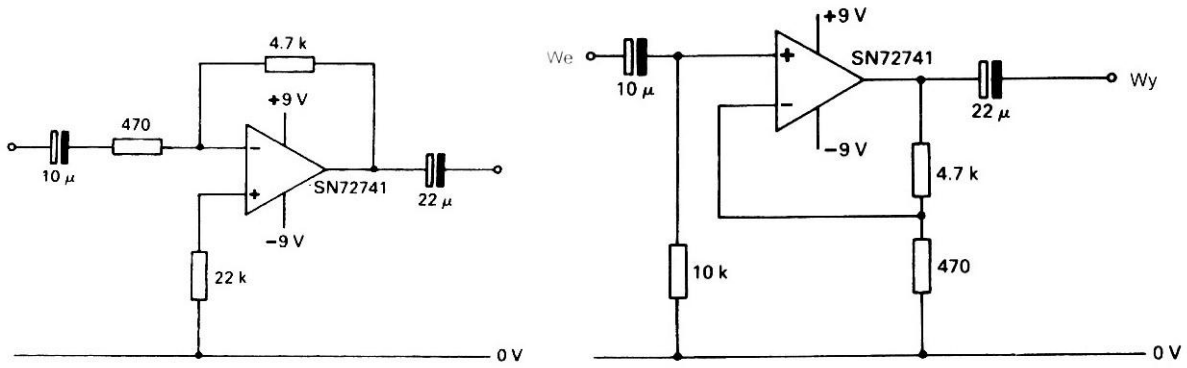
Symbol



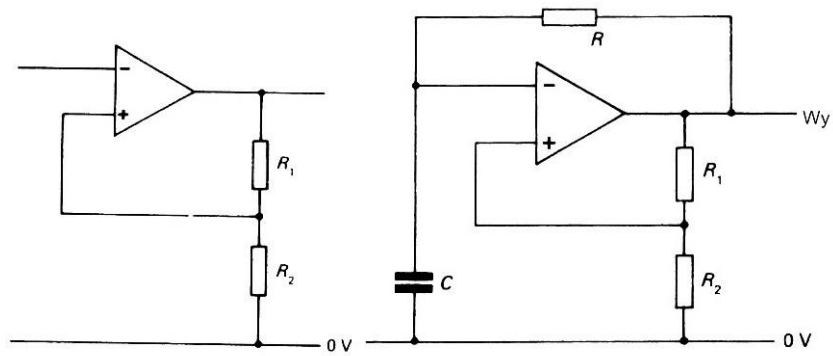
Przebiegi na wyjściu wzmacniacza operacyjnego;  $A=R_2/R_1$



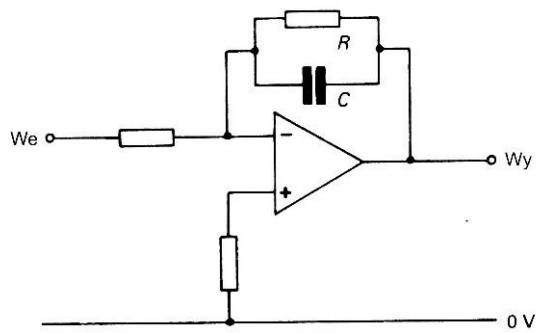
Wzmacniacze odwracający i nieodwracający – ujemne sprzężenie zwrotne



Praktyczne schematy obu wzmacniaczy



Wzmacniacz operacyjny z dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Praktyczny układ generatora



Sprężenie zwrotne częstotliwościowe (filtr dolnoprzepustowy)