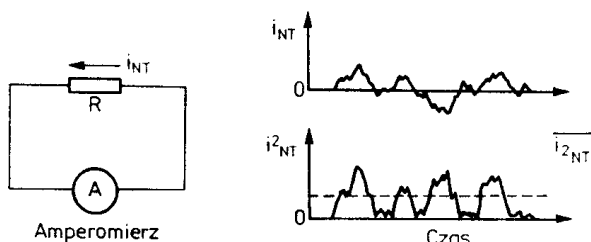


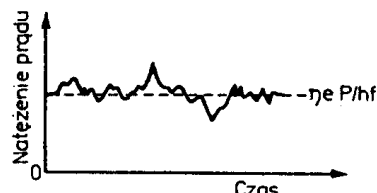
## Wpływ szumów na detekcję

Występowanie szumów w telekomunikacyjnych systemach cyfrowych zwiększa prawdopodobieństwo błędu = potrzeba obliczania stopy błędu.

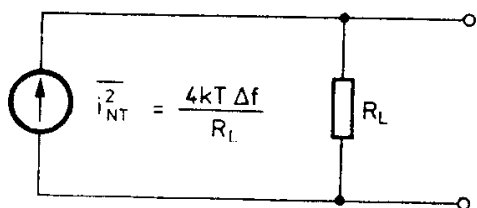
**Szum termiczny** – źródło – rezystancja obciążenia fotodetektora  $R_L$ ; średnia wartość mocy tego szumu -  $R_L \overline{i_{NT}^2}$  przy sygnale fotodiody:  $i = \eta e P / hf$



Rys. 11.1. Prąd szumu cieplnego

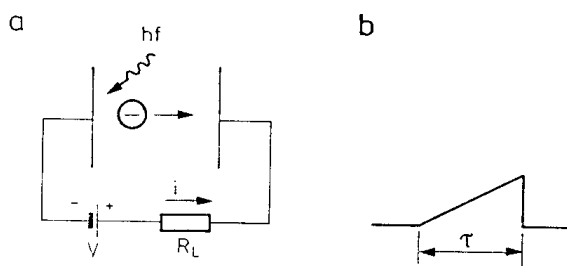


Rys. 11.2. Przebieg natężenia prądu w odbiorniku przy stałej mocy sygnału optycznego. Widoczne pogorszenie jakości sygnału spowodowane szumem cieplnym

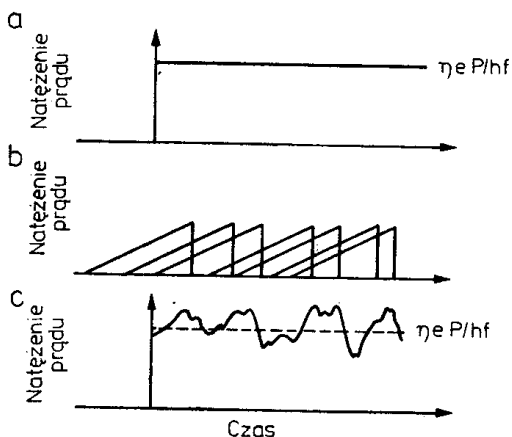


Rys. 11.3. Układ zastępczy źródła szumu cieplnego

**Szum śrutowy** – źródło – kwantowy, ziarnisty charakter elektronów:

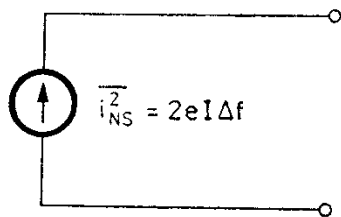


Rys. 11.4. Geneza szumu śrutowego na przykładzie fotodiody próżniowej  
a) emisja pojedynczego fotoelektronu,  
b) elementarny impuls prądu



Rys. 11.5. Szum śrutowy

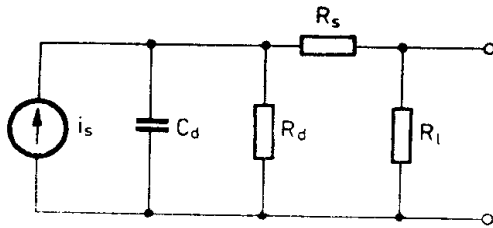
a) oczekiwany przepływ stałego prądu fotoelektrycznego przy oświetleniu sygnałem o stałej mocy optycznej  $P$ , b) przypadkowo rozłożone impulsy prądu wywołane przelotem poszczególnych elektronów, c) wypadkowe natężenie prądu fotoelektrycznego będące sumą elementarnych impulsów



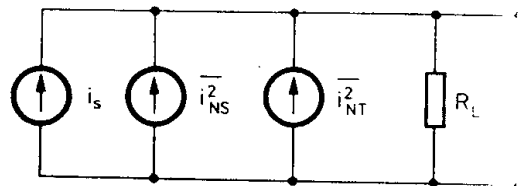
Rys. 11.6. Układ zastępczy źródła szumu śrutowego

$$\overline{i_{NS}^2} = 2e(\overline{i_s} + I_c)\Delta f$$

**Stosunek sygnał-szum: S/N**



Rys. 11.7. Schemat zastępczy półprzewodnikowej fotodiody złączowej



Rys. 11.8. Schemat zastępczy układu odbiorczego z fotodiody oraz źródłami szumu cieplnego i śrutowego

1. Stała moc sygnału optycznego
2. Sinusoidalnie zmienna moc sygnału optycznego

**Stała moc sygnału optycznego**

$$i_s = \frac{\eta e P}{hf}; \overline{P_{ES}} = i_s^2 R_L = \left(\frac{\eta e P}{hf}\right)^2 R_L; \overline{P_{NS}} = 2e\Delta f \left(\frac{\eta e P}{hf} + I_c\right) R_L; \overline{P_{NT}} = i_{NT}^2 R_L = 4kT\Delta f$$

S/N – średnia moc sygnału podzielonego przez średnią moc pochodzącą od wszystkich źródeł szumowych:

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta e P / hf)^2 R_L}{2eR_L\Delta f(I_c + \eta e P / hf) + 4kT\Delta f}$$

1. Pomijalny wpływ prądu ciemnego i szumu termicznego – duża moc optyczna w odbiorniku:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P}{2hf\Delta f} - \text{szum uwarunkowany kwantowo}$$

2. mała moc sygnału optycznego:

$$\frac{S}{N} = \frac{R_L(\eta e P / hf)^2}{4kT\Delta f} - \text{szum uwarunkowany termicznie}$$

Zadanie: system telekomunikacyjny składa się z diody LED emitującej 10 mW mocy optycznej na fali o długości 0.85 mm, kabla światłowodowego o tłumieniu 20 dB i fotodiody p-i-n o czułości 0.5 A/W. Prąd ciemny fotodiody ma natężenie 2nA, rezystancja obciążenia wynosi 50 Ω, odbiornik ma pasmo o szerokości 10 MHz i pracuje w temperaturze 300 K. Tłumienie toru obejmuje ponadto 14 dB strat związanych ze sprzężeniem źródła ze światłowodem oraz 10 dB strat na złączach. Obliczyć: moc odbieranego sygnału optycznego, natężenie i moc prądu sygnału po detekcji, moce szumu śrutowego i termicznego, stosunek sygnał szum.

Zadanie: W w/w systemie zmniejszono straty o 6 dB. Obliczyć S/N.

Dla fotodetektorów z wewnętrznym wzmocnieniem:

$$\frac{S}{N} = \frac{(M\eta eP/hf)^2 R_L}{M^2 2eR_L \Delta f (I_c + \eta eP/hf) + 4kT\Delta f}$$

Zadanie: Fotodioda p-i-n została zastąpiona fotodetektorem o 160 razy większej czułości (M=160). Obliczyć stosunek S/N

Wnioski:

1. Systemy uwarunkowane kwantowo zapewniają lepszą jakość transmisji niż systemy uwarunkowane termicznie
2. Zastosowanie fotodetektora o dużym wzmocnieniu wewnętrznym pozwala zbliżyć się do ideału ograniczenia kwantowego

Szum nadmiarowy fotodiody lawinowej – moc szumu śrutowego powiela się  $M^n$  – krotnie (n=2-3). Współczynnik szumu nadmiarowego:  $M^n/M^2=M^{n-2}$ .

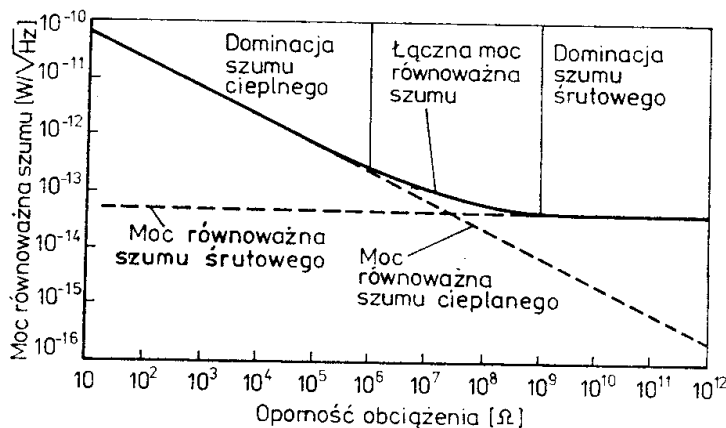
$$\frac{S}{N} = \frac{(M\eta eP/hf)^2 R_L}{M^n 2eR_L \Delta f (I_c + \eta eP/hf) + 4kT\Delta f}; \quad \frac{S}{N} = \frac{1}{M^{n-2}} \frac{\eta P}{2hf\Delta f} = \frac{\text{ograniczenie kwantowe } S/N}{\text{wsp. szumu nadmiar.}}$$

istnieje optimum wartości wzmocnienia wewnętrznego przy którym S/N na wyjściu fotodiody lawinowej osiąga maksimum (regulacja przez zmianę napięcia polaryzacji zaporowej).

### Moc równoważna szumu (NEP)

Jest miarą czułości odbiornika optycznego – minimalna moc sygnału optycznego, który w danym odbiorniku zapewni na wyjściu stosunek S/N=1:

$$NEP = \frac{P_{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{hf}{\eta e} \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_L}} [W/\sqrt{Hz}]; \quad NEP = \frac{hf}{M\eta e} \sqrt{M^n 2eI_D + \frac{4kT}{R_L}}; \quad \rho = \frac{M\eta e}{hf} - \text{czułość det.}$$



Rys. 11.9. Moc równoważna szumu fotodiody p-i-n o czułości 0,5 A/W przy prądzie ciemnym o natężeniu 2 nA w temperaturze 300 K

Stosunek S/N przy modulacji analogowej:

$$P_i = P(1 + m \cos \omega t); \quad i_s = \frac{\eta e P}{hf} (1 + m \cos \omega t); \quad \bar{i}_s = \frac{\eta e P}{hf}$$

po wzmacnieniu wewnętrznym natężenie prądu fotoelektrycznego:

$$i = \frac{M\eta eP}{hf} m \cos \omega t$$

prąd ten płynąc przez rezystancję obciążenia  $R_L$  wydziela średnią moc elektryczną:

$$\overline{P_{ES}} = 0.5R_L i_p^2 = 0.5R_L (mM\eta eP / hf)^2;$$

$$\frac{S}{N} = \frac{(m^2 / 2)(M\eta eP / hf)^2 R_L}{M^n 2eR_L \Delta f (I_c + \eta eP / hf) + 4kT\Delta f}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{m^2 R_L (\eta eP / hf)^2}{2 \cdot 4kT\Delta f} M^2; \text{ termiczne ograniczenie}$$

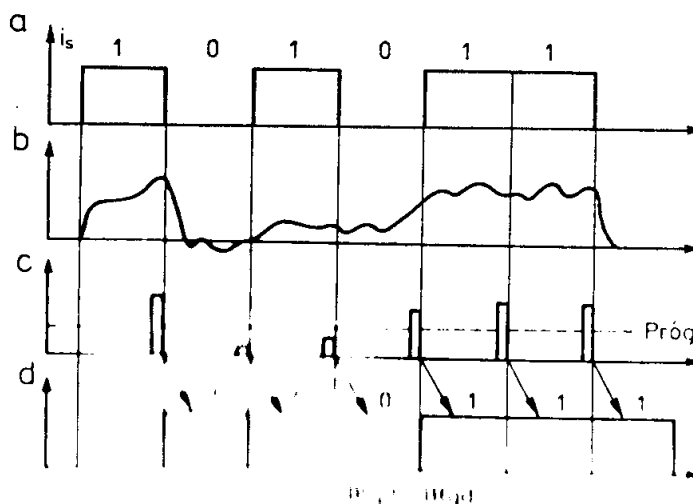
$$\frac{S}{N} = \frac{(m^2 / 2) \eta P}{M^{n-2} 2hf\Delta f}; \text{ kwantowe ograniczenie}$$

### Stosunek S/N przy detekcji heterodynowej

Koherentna wiązka światła z oscylatora lokalnego jest mieszana na wejściu fotodetektora z falą zmodulowaną, zawierającą informację:

$$\frac{S}{N} = \frac{2(\eta e / hf)^2 R_L P_s P_L}{2eR_L \Delta f [I_c + (\eta e P_L / hf)(1 + P_s / P_L)] + 4kT\Delta f}$$

Stopa błędów przy ograniczeniu szumem termicznym:



Rys. 11.10. Błędy detekcji cyfrowej

a) sygnał oryginalny, b) sygnał odebrany, c) próg sygnału, d) zregenerowany sygnał wykryty

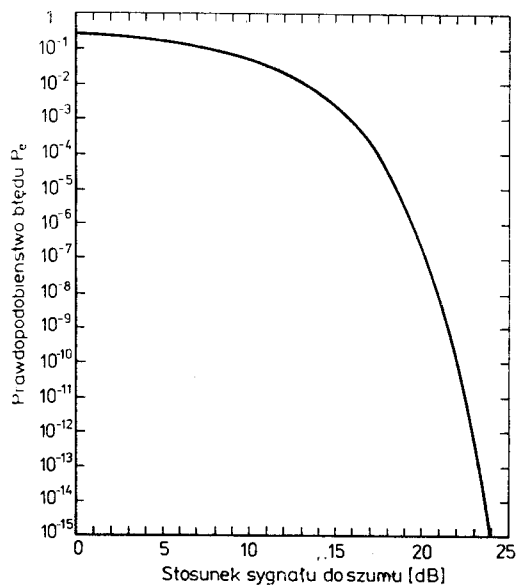
Prawdopodobieństwo błędów detekcji:

$$P_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( 0.354 \sqrt{\frac{S}{N}} \right)$$

Tablica 11.1. FUNKCJA BŁĘDU

| x    | erf x   | x    | erf x   |
|------|---------|------|---------|
| 0,00 | 0,00000 | 1,05 | 0,86244 |
| 0,05 | 0,05637 | 1,10 | 0,88021 |
| 0,10 | 0,11246 | 1,15 | 0,89612 |
| 0,15 | 0,16800 | 1,20 | 0,91031 |
| 0,20 | 0,22270 | 1,25 | 0,92290 |
| 0,25 | 0,27633 | 1,30 | 0,93401 |
| 0,30 | 0,32863 | 1,35 | 0,94376 |
| 0,35 | 0,37938 | 1,40 | 0,95229 |
| 0,40 | 0,42839 | 1,45 | 0,95970 |
| 0,45 | 0,47548 | 1,50 | 0,96611 |
| 0,50 | 0,52050 | 1,55 | 0,97162 |
| 0,55 | 0,56332 | 1,60 | 0,97635 |
| 0,60 | 0,60386 | 1,65 | 0,98038 |
| 0,65 | 0,64203 | 1,70 | 0,98379 |
| 0,70 | 0,67780 | 1,75 | 0,98667 |
| 0,75 | 0,71116 | 1,80 | 0,98909 |
| 0,80 | 0,74210 | 1,85 | 0,99111 |
| 0,85 | 0,77067 | 1,90 | 0,99279 |
| 0,90 | 0,79691 | 1,95 | 0,99418 |
| 0,95 | 0,82089 | 2,00 | 0,99532 |
| 1,00 | 0,84270 | 2,50 | 0,99959 |
|      |         | 3,00 | 0,99998 |

Dla  $x > 3$ ,  $1 - \text{erf } x \approx e^{-x^2}(\chi\pi^{1/2})$



Rys. 11.11. Prawdopodobieństwo błędu  $P_e$  w systemie cyfrowym przy ograniczeniu szumem cieplnym

Zadanie:

Łącze cyfrowe o przepływności 1 Mb/s pracujące w systemie kodowania bez powrotu do zera (NRZ) wymaga zapewnienia stopy błędu  $10^{-4}$ . Długość fali nośnej  $0.82 \mu\text{m}$ , sprawność kwantowa detektora p-i-n 1,  $R_L=100 \Omega$ ,  $T=300\text{K}$ . Obliczyć  $P$ ,  $i$  oraz ilość fotonów przypadających na jeden bit informacji.

W zakresie  $S/N > 15 \text{ dB}$  nieznaczna poprawa stopy błędu wymaga niewielkiego wzrostu mocy sygnału (obniżenie strat w torze transmisyjnym).

### Stopa błędu przy ograniczeniu szumem śrutowym

Detekcja – zliczanie liczby elektronów w przedziałach czasu przeznaczonych dla kolejnych bitów i porównywanie ich z progową liczbą („1”, „0”). Odbiór „0” – nagły wzrost prądu ciemnego. Odbiór „1” – chwilowy wzrost prądu szumu. Prawdopodobieństwo błędu detekcji zależy od przeciętnej ilości fotoelektronów wytworzonych przez sygnał optyczny w przedziale czasu  $\tau$  (1 bit).

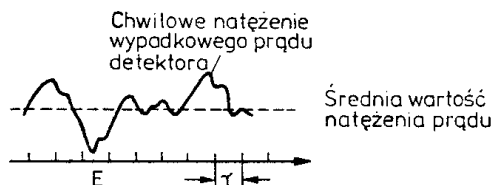
$$n_s = \frac{\eta P \tau}{hf} = \frac{i_s \tau}{e}$$

Stopa błędu zależy też od średniej liczby elektronów  $n_n$  wytworzonych w czasie  $\tau$  przez przepływ prądu ciemnego:

$$n_n = \frac{I_c \tau}{e}; \text{ poziom progowy: } k_T = \frac{n_s}{\ln(1 + n_s/n_n)}, \text{ największa liczba całkowita } k_D.$$

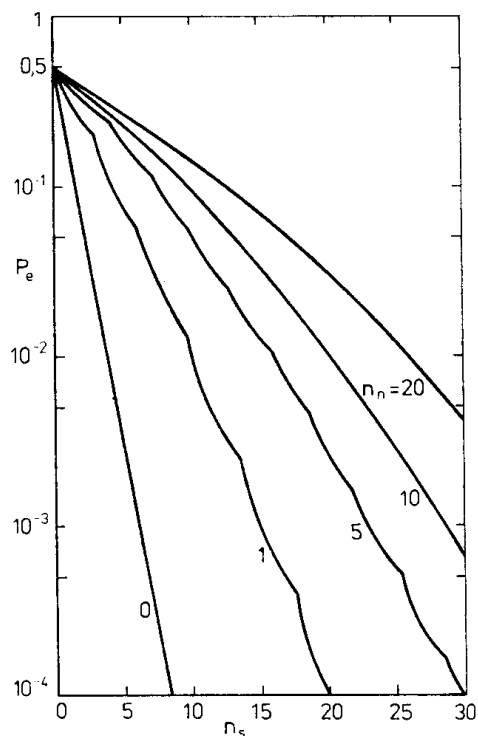
Próg stawia się powyżej średniego poziomu szumów.

Wada transmisji PCM przy ograniczeniu kwantowym: konieczność znajomości a priori poziomów mocy optycznej i szumu dla ustawienia progów detekcji.



Rys. 11.12. Prąd fotoelektryczny zaszumiony szumem śrutowym w przypadku stałej mocy sygnału optycznego opowiadającego szeregowi „1” w kodzie NRZ. W przedziale czasu oznaczonym literą  $E$  wystąpi błąd

Rys. 11.13. Prawdopodobieństwo błędu  $P_e$  w systemie cyfrowym PCM przy ograniczeniu kwantowym.  $n_s$  jest przeciętną ilością fotoelektronów powstałych w detektorze przy odbiorze bitu o wartości „1”. Przeciętna ilość elektronów wytworzonych w tym czasie przez prąd ciemny wynosi  $n_n$  [9]



Tablica 11.2. PRZYBLIŻONE WARTOŚCI STOPY BŁĘDU W SYSTEMACH ŚWIATŁOWODOWYCH PCM PRZY ZEROWYM NATEŻENIU PRĄDU CIEMNEGO

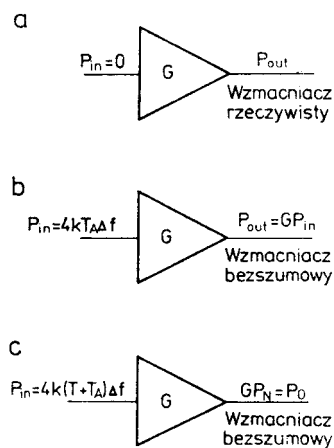
| $P_e$      | $n_s$ |
|------------|-------|
| $10^{-1}$  | 2,3   |
| $10^{-2}$  | 4,6   |
| $10^{-3}$  | 6,9   |
| $10^{-4}$  | 9,2   |
| $10^{-5}$  | 11,5  |
| $10^{-6}$  | 13,8  |
| $10^{-8}$  | 16,1  |
| $10^{-8}$  | 18,4  |
| $10^{-9}$  | 20,7  |
| $10^{-10}$ | 23,0  |
| $10^{-11}$ | 25,3  |
| $10^{-12}$ | 27,6  |

Zadanie:

Ciąg impulsów w kodzie NRZ jest przesyłany z szybkością 1 Mb/s na fali o długości  $0.82\mu\text{m}$  przy ograniczeniu kwantowym. Prąd ciemny jest do pominięcia. Ile fotonów na bit musi docierać do fotodetektora, aby zapewnić stopę błędu  $10^{-4}$ .  $\eta=1$  Obliczyć moc sygnału. Porównać wyniki z uzyskanymi dla ograniczenia termicznego.

Nawet niewielkie zmiany mocy sygnału optycznego doprowadzonego do odbiornika powodują znaczne różnice w stopie błędu.

### Szum wzmacniacza



Rys. 11.16. Szum wzmacniacza

a) wzmacniacz jako źródło szumu, b) układ zastępczy definiujący temperaturę szumu wzmacniacza, c) układ zastępczy do obliczania łącznej mocy szumów cieplnych w systemie

$P_{wy} : P_{we} = \frac{P_{wy}}{G} = 4kT_A\Delta f$ ;  $P_N = 4k(T + T_A)\Delta f = 4kT_e\Delta f$ ,  $T_e$  – równoważna temperatura szumów.

Zadanie:

W jednym z poprzednich zadań obliczono  $S/N=12=10.8$  dB dla systemu o stałej mocy optycznej pracującego przy ograniczeniu termicznym. Szerokość pasma 10 MHz, moc sygnału po detekcji  $2*10^{-12}$  W, moc szumu termicznego  $1.66*10^{-13}$  W w temperaturze 300 K. Do detektora dołączono wzmacniacz o temperaturze szumów 454 K, zapewniający wzmocnienie 10 dB. Obliczyć S/N.

Wzmocnienie 10 dB podnosi poziom mocy sygnału i szumu. Szum wprowadzony przez wzmacniacz obniżył S/N z 10.8 do 6.8 dB.

Współczynnik szumu wzmacniacza:

$$F = 1 + \frac{T_A}{T_s}, T_s - \text{temperatura odniesienia}$$

Wzmacniacz o współczynniku szumów 4 dB zmniejsza S/N o 4 dB

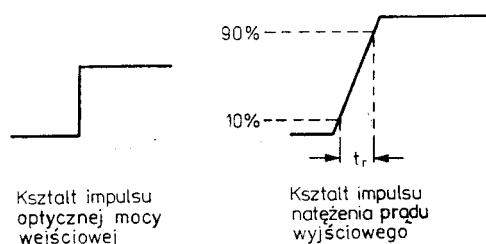
## DETEKTORY ŚWIATŁA W15 SMK

### 1. Zasady fotodetekcji:

- a). zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne – wybijanie elektronów pod wpływem strumienia fotonów (fotodiody próżniowe, fotopowielacze)
- b). zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne – generacja wolnych nośników w efekcie absorpcji fotonów (fotodiody p-n, fotodiody p-i-n, fotodiody lawinowe)

Parametry fotodiód:

- czułość – stosunek natężenia prądu fotodetektora do mocy optycznej wejściowej
- charakterystyka widmowa – zależność czułości od długości fali
- czas narastania – czas w którym natężenie prądu zmienia się od 10% do 90% końcowej wartości przy skokowej zmianie sygnału optycznego



Rys. 7.1. Czas narastania odpowiedzi fotodetektora

- 3-decybelowa szerokość modulacji fotodetektora:

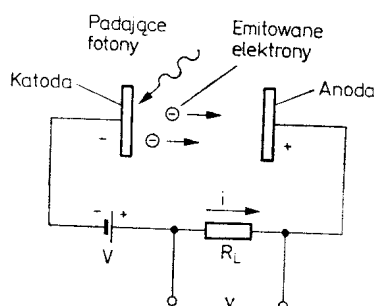
$$f_{3dB} = \frac{0.35}{t_r}$$

Moc sygnału elektrycznego spada do połowy przy przejściu od bardzo małych częstotliwości modulacji do częstotliwości  $f_{3dB}$ .

### 2. Fotopowielacz

Przy testowaniu elementów systemu (bardzo małe moce optyczne).

Fotodioda próżniowa:



Rys. 7.2. Fotodioda próżniowa



Przy braku oświetlenia prąd nie płynie, nie ma napięcia na rezystancji obciążenia. Uwolnienie elektronu z katody pochłania energię – praca wyjścia:

$$hf \geq \Phi, f = \Phi/h, \lambda_o = \frac{hc}{\Phi}; \lambda_o = \frac{1.24}{\Phi[eV]}[\mu m]$$

Zadanie:

Obliczyć długość odcięcia dla cezu ( $\Phi=1.9$  eV)

Fotodiody próżniowe mają małą czułość dla długości fal  $>0.85$   $\mu m$ , duże rozmiary i wymagają dużego napięcia zasilania.

- sprawność kwantowa materiału:

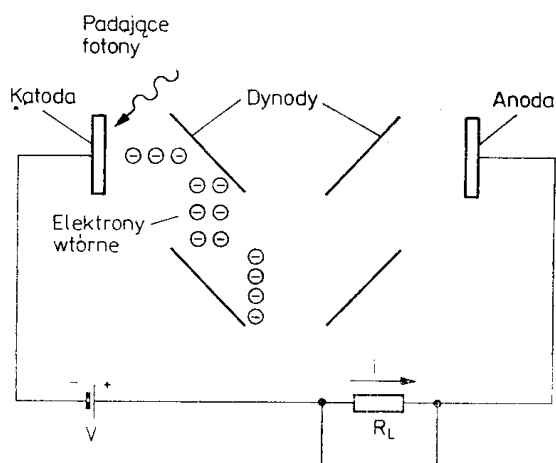
$$\eta = \frac{\text{liczba uwolnionych elektronów}}{\text{liczba padających fotonów}}$$

$$i = \frac{\eta e P}{hf}, \rho = \frac{i}{P} = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc}; V = \frac{\eta e P R_L}{hf} = \rho P R_L$$

Zadanie:

Obliczyć czułość fotodetektora o sprawności kwantowej 1% przy długości fali 0.8  $\mu m$ . Zakładając, że detektor ten absorbuje moc optyczną 1  $\mu W$  obliczyć napięcie sygnału wyjściowego powstające na rezystancji obciążenia 50  $\Omega$ .

Fotopowielacz wykazuje większą czułość (przyrząd z wewnętrznym wzmocnieniem 2-6).



Rys. 7.3. Fotopowielacz

Elektrony wybite z katody są przyspieszane w kierunku pierwszej dynody (100V), następuje emisja wtórna z powielaniem.

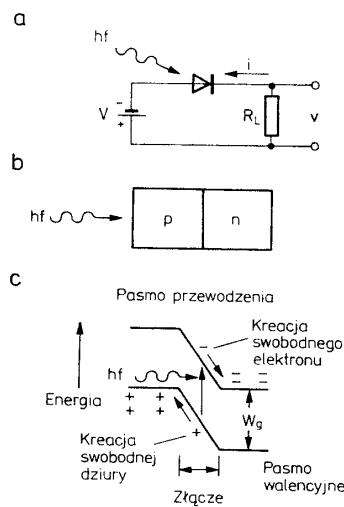
Po przejściu N dynod:  $M = \delta^N$ ;  $i = \frac{M \eta e P}{hf}$ ; dla N=9,  $\delta=5$ ,  $M=1.95 \cdot 10^6$ .

Zadanie:

Fotopowielacz o wzmocnieniu jak wyżej użyto do odbioru sygnału optycznego o mocy 1  $\mu W$  przy długości fali 0.8  $\mu m$ . Sprawność kwantowa katody 1%. Obciążenie 50  $\Omega$ . Obliczyć czułość fotopowielacza, natężenie prądu w obwodzie i napięcie wyjściowe.

Fotopowielacze – bardzo szybkie detektory światła. Czasy narastania 0.1 ns. Duży koszt, pokaźne rozmiary, duży ciężar, konieczność stosowania zasilania.

### 3. Fotodioda



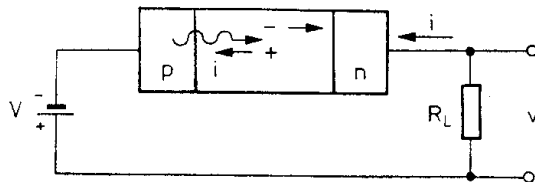
Rys. 7.4. Półprzewodnikowa fotodioda złączowa

a) układ pracy z polaryzacją zaporową, b) złącze p-n, c) poziomy energetyczny

Mała, lekka, czuła, szybka, napięcie polaryzacji – kilka V. Złącze (obszar zubożenia) bez nośników ładunku, o dużej rezystancji, cały spadek napięcia odkłada się na nim. Ruch wyzwolonych pod wpływem absorpcji fotonu nośników powoduje przepływ prądu. Fotony mogą być absorbowane w obszarach p i n – wtedy wykazują się wolniejszą odpowiedzią impulsową. Typowe czasy narastania 1  $\mu$ s – nie nadają się do systemów o dużej przepływności.

Dla uzyskania emisji diodę polaryzuje się w kierunku przewodzenia. Do detekcji w kierunku zaporowym

### 4. Fotodioda p-i-n



Rys. 7.5. Fotodioda p-i-n

$$\text{Długość fali odcięcia: } \lambda = \frac{1,24}{W_g [\text{eV}]} [\mu\text{m}]$$

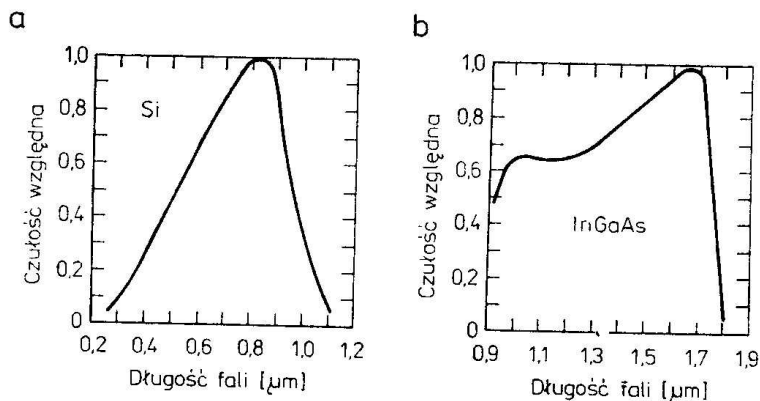
Zadanie:

Obliczyć długość fali odcięcia dla fotodiod p-i-n wykonanych z krzemu ( $W_g=1.1$  eV) i germanu ( $W_g=0.67$  eV).

Materiały:

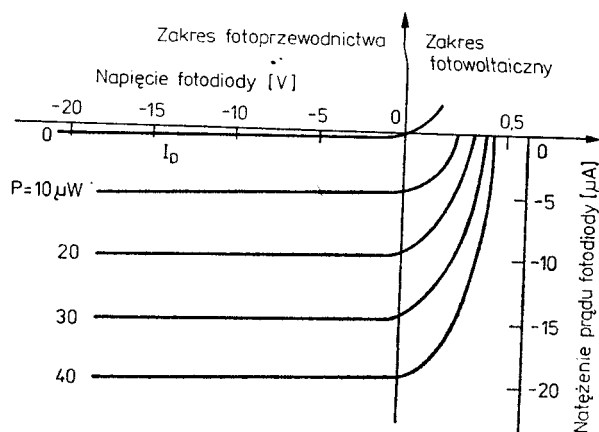
Tablica 7.1. PÓŁPRZEWODNIKOWE FOTODIODY p-i-n

| Material | Zakres widmowy<br>( $\mu\text{m}$ ) | Długość fali przy<br>maksimum czułości<br>( $\mu\text{m}$ ) | Czułość maksymalna<br>(A/W) |
|----------|-------------------------------------|---|-----------------------------|
| Si       | 0,3 ÷ 1,1                           | 0,8   | 0,5                         |
| Ge       | 0,5 ÷ 1,8                           | 1,55  | 0,7                         |
| InGaAs   | 1,0 ÷ 1,7                           | 1,7   | 1,1                         |



Rys. 7.6. Charakterystyki widmowe fotodiód p-i-n wykonanych z: a) krzemu, b) arsenku galowo-indowego

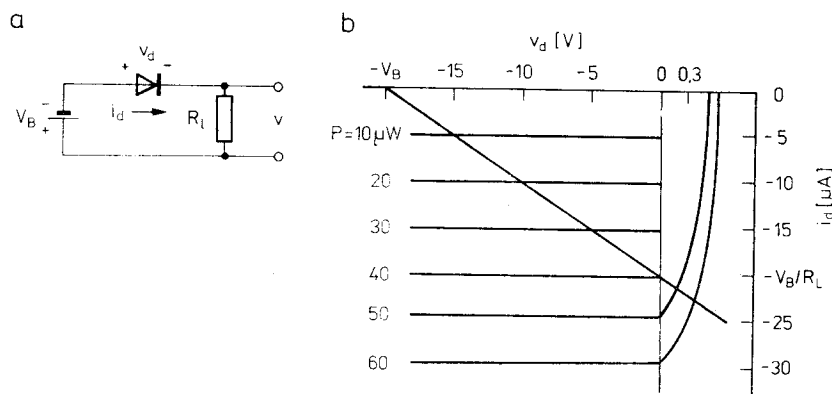
Charakterystyki prądowo-napięciowe:



Rys. 7.7. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody krzemowej

Zadanie:

Oszacować najmniejszą moc sygnału optycznego P, która może być odebrana przez fotodiode p-i-n o czułości 0.5 A/W i natężeniu prądu ciemnego 1 nA

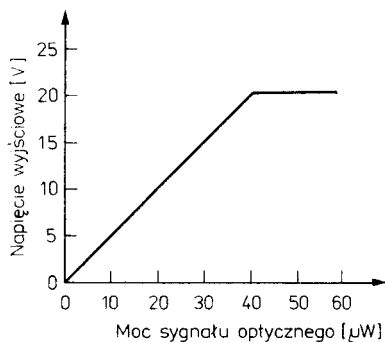


Rys. 7.8. Układ odbiorczy z fotodiode p-i-n a) schemat, b) analiza graficzna

$$V_B + v_D + i_D R_L = 0$$

Charakterystyka przejściowa odbiornika z fotodiode p-i-n i rezystancja obciążenia 1 MΩ. - zakres dynamiki fotodiody, większy dla mniejszych rezystancji obciążenia

$$P_{\max} = \frac{V_B}{\rho R_L}$$



Rys. 7.9. Charakterystyka przejściowa odbiornika z fotodiodą p-i-n i rezystancją obciążenia 1 MΩ. Czułość fotodiody wynosi 0,5 A/W

### Szybkość działania

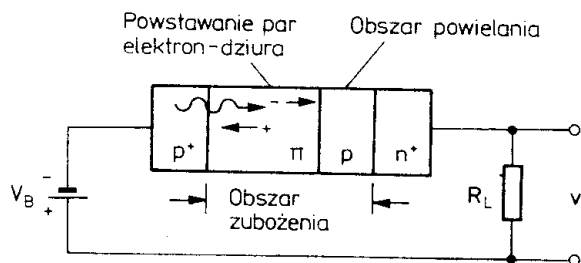
Ograniczona czasem przelotu swobodnych nośników ładunku przez obszar zubożenia oraz przez pojemność elektryczną fotodiody (złączowa i oprawki):

$$t_r = 2.19R_L C_d$$

| Równanie definicyjne            | Wniosek   |
|---------------------------------|---|
| $v = \rho P R_L$                | Duże $R_L$ zwiększa poziom napięcia na wyjściu            |
| $P_{\max} = V_B / (\rho R_L)$   | Małe $R_L$ dopuszcza większą dynamikę sygnału wejściowego |
| $f_{3dB} = (2\pi R_L C_d)^{-1}$ | Małe $R_L$ pozwala na szerokie pasmo modulacji            |
| $i_{NT}^2 = 4kT\Delta f / R_L$  | Duże $R_L$ zmniejsza wpływ szumu cieplnego                |

- $v$  — napięcie sygnału wyjściowego,
- $\rho$  — czułość,
- $P$  — moc optyczna sygnału wejściowego,
- $R_L$  — oporność obciążenia,
- $V_B$  — napięcie polaryzacji,
- $C_d$  — pojemność diody,
- $i_{NT}^2$  — średniokwadratowa wartość natężenia prądu szumu cieplnego,
- $k$  — stała Boltzmann,
- $T$  — temperatura,
- $\Delta f$  — szerokość pasma odbiornika.

### 5. Fotodioda lawinowa:



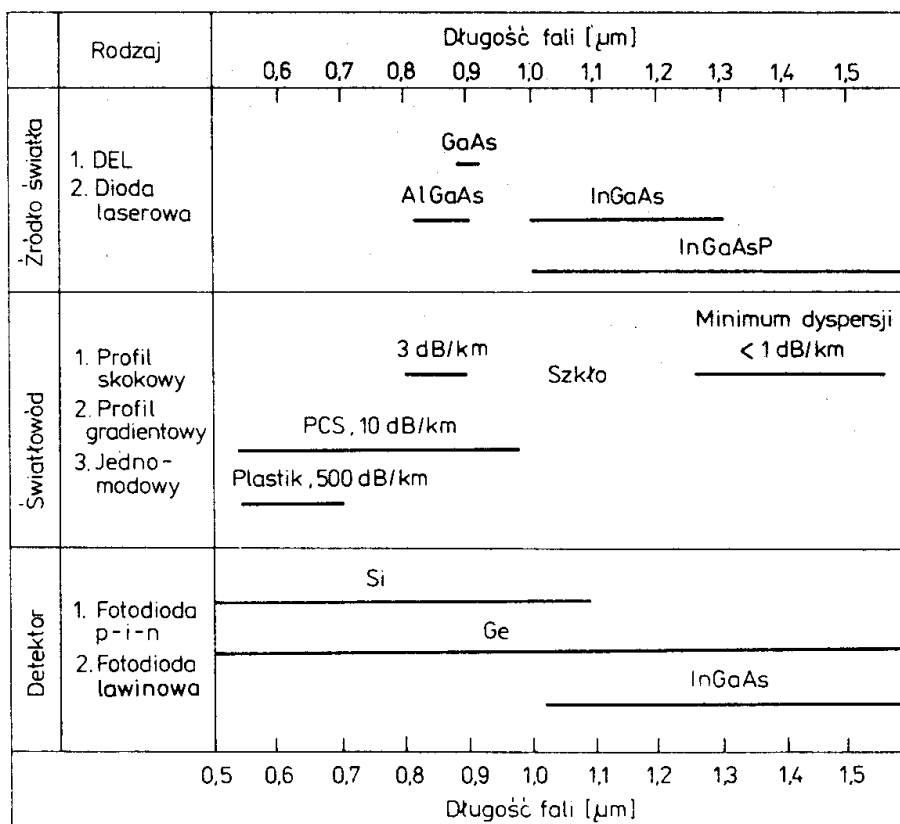
Rys. 7.13. Fotodioda lawinowa p<sup>+</sup>-π-p-n<sup>+</sup>

$$M = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_B}{B_{BR}}\right)^n}; \quad n < 1, \quad V_{BR} \text{ od } 20 - 500 \text{ V}$$

$$i = \frac{M \eta e P}{hf}; \quad \rho = \frac{M \eta e}{hf}$$

Tablica 7.4. TYPOWE WARTOŚCI NAJWAŻNIEJSZYCH PARAMETRÓW FOTODETEKTORÓW ZŁĄCZOWYCH

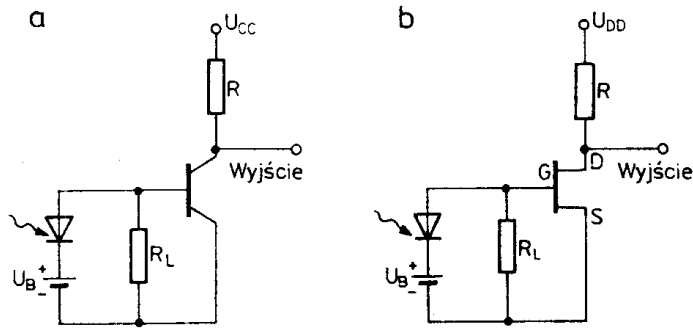
| Material              | Typ            | Czas narasta-<br>(ns) | Długość fali<br>(nm) | Czułość<br>(A/W) | Prąd ciemny<br>(nA) | Wzmoc-<br>nienie we-<br>wnętrzne |
|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------------------|
| Krzem                 | <i>p-i-n</i>   | 0,5                   | 300 ÷ 1100           | 0,5              | 1                   | 1                                |
| German                | <i>p-i-n</i>   | 0,1                   | 500 ÷ 1800           | 0,7              | 200                 | 1                                |
| Arsenek galowo-indowy | <i>p-i-n</i>   | 0,3                   | 1000 ÷ 1700          | 0,6              | 10                  | 1                                |
| Krzem                 | dioda lawinowa | 0,5                   | 400 ÷ 1000           | 77               | 15                  | 150                              |
| German                | dioda lawinowa | 1                     | 1000 ÷ 1600          | 30               | 700                 | 50                               |



Rys. 7.14. Podstawowe elementy systemu telekomunikacji światłowodowej

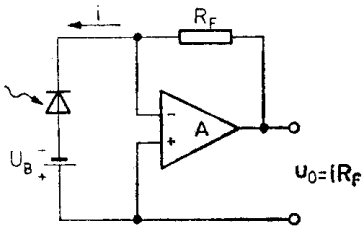
### 5. Układy wejściowe odbiornika (fotodetektor, pierwszy wzmacniacz)

Wzmacniacz napięciowy na tranzystorze bipolarnym i polowym, wzmacniacz o dużej rezystancji wejściowej, wzmacniacz transimpedancyjny.



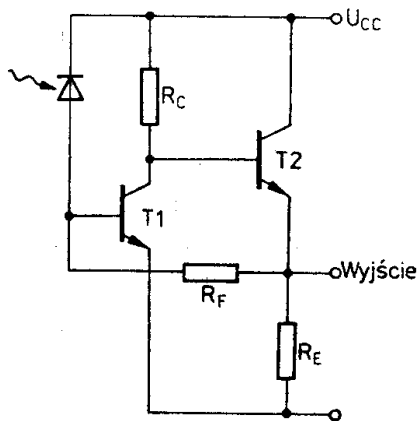
Rys. 11.17. Proste układy wejściowe odbiornika optycznego

a) wzmacniacz z tranzystorem bipolarnym,  
b) wzmacniacz z tranzystorem polowym



Rys. 11.18. Wzmacniacz transimpedancyjny  
A — wzmacniacz operacyjny,  $i$  — łączne natężenie prądu fotoelektrycznego i prądu ciemnego fotodetektora

|                               | Tranzystor bipolarny | Tranzystor polowy | Wzmacniacz o dużej impedancji wejściowej | Wzmacniacz transimpedancyjny |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|--|------------------------------|
| Stopień komplikacji układowej | mały                 | mały              | znaczny                                  | średni                       |
| Czy potrzebny korektor?       | nie                  | nie               | tak                                      | nie                          |
| Względny poziom szumu         | średni               | średni            | bardzo niski                             | niski                        |
| Szerokość pasma               | duża                 | mała              | średnia                                  | duża                         |
| Zakres dynamiki               | średni               | średni            | wąski                                    | szeroki                      |



Rys. 11.19. Przedwzmacniacz scalony z fotodetektorem. Schemat przykładowy

Na podstawie: J.C. Palais, „Zarys telekomunikacji światłowodowej”, WKŁ, Warszawa 1991