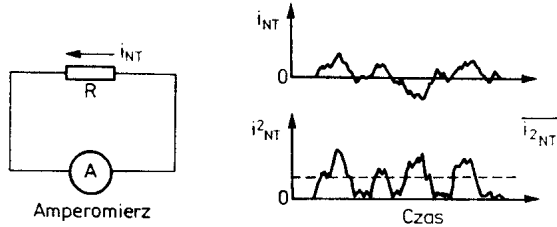


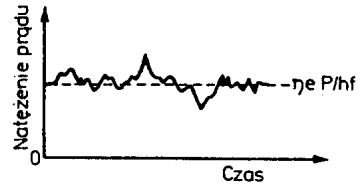
Wpływ szumów na detekcję

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

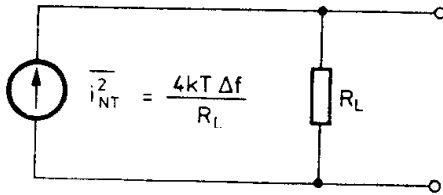
Szum termiczny – źródło – rezystancja obciążenia fotodetektora R_L ; średnia wartość mocy tego szumu - $R_L \overline{i_{NT}^2}$ przy sygnale fotodiody: $i = \eta e P / hf$



Rys. 11.1. Prąd szumu cieplnego

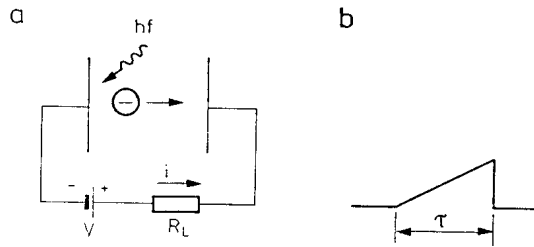


Rys. 11.2. Przebieg natężenia prądu w odbiorniku przy stałej mocy sygnału optycznego. Widoczne pogorszenie jakości sygnału spowodowane szumem cieplnym



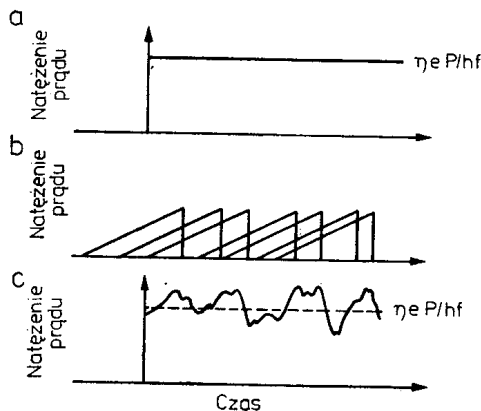
Rys. 11.3. Układ zastępczy źródła szumu cieplnego

Szum śrutowy – źródło – kwantowy, ziarnisty charakter elektronów:



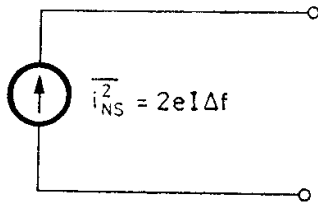
Rys. 11.4. Geneza szumu śrutowego na przykładzie fotodiody próżniowej

a) emisja pojedynczego fotoelektronu,
b) elementarny impuls prądu



Rys. 11.5. Szum śrutowy

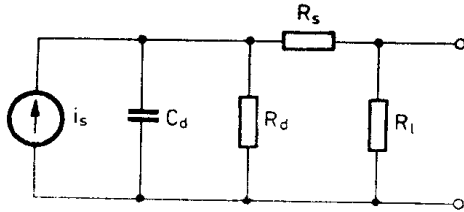
a) oczekiwany przepływ stałego prądu fotoelektrycznego przy oświetleniu sygnałem o stałej mocy optycznej P , b) przypadkowo rozłożone impulsy prądu wywołane przelotem poszczególnych elektronów, c) wypadkowe natężenie prądu fotoelektrycznego będące sumą elementarnych impulsów



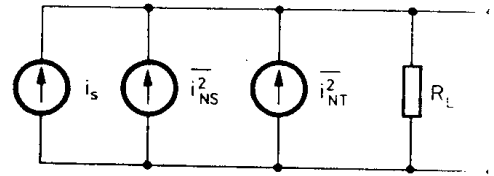
Rys. 11.6. Układ zastępczy źródła szumu śrutowego

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

Stosunek sygnał-szum: S/N



Rys. 11.7. Schemat zastępczy półprzewodnikowej fotodiody złączonej



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 wzmacnieniem:

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

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 wzmacnieniu 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: $M^n/M^2=M^{n-2}$.

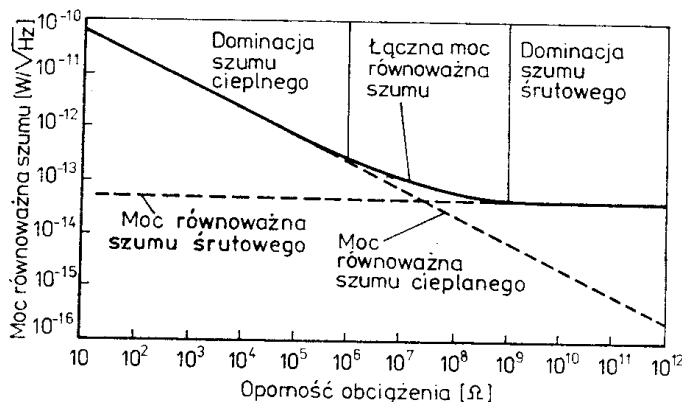
$$\frac{S}{N} = \frac{(M\eta eP/hf)^2 R_L}{M^n 2eR_L \Delta f (I_c + \eta eP/hf) + 4kT\Delta f}; \quad \frac{S}{N} = \frac{1}{M^{n-2}} \frac{\eta P}{2hf\Delta f} = \frac{\text{ograniczenie kwantowe } S/N}{\text{wsp. szumu nadmiar.}}$$

istnieje optimum wartości wzmacnienia 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:

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

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

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

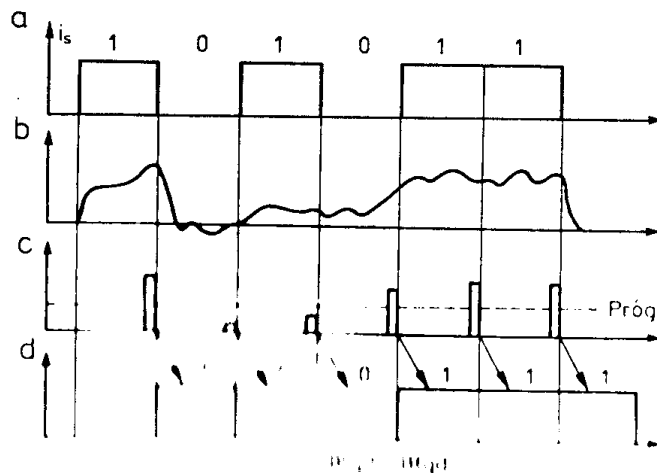
$$\frac{S}{N} = \frac{(m^2 / 2) \eta P}{M^{n-2} 2hf\Delta f}; \text{ kwantowe ograniczenie}$$

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) zrekonstruowany sygnał cyfrowy

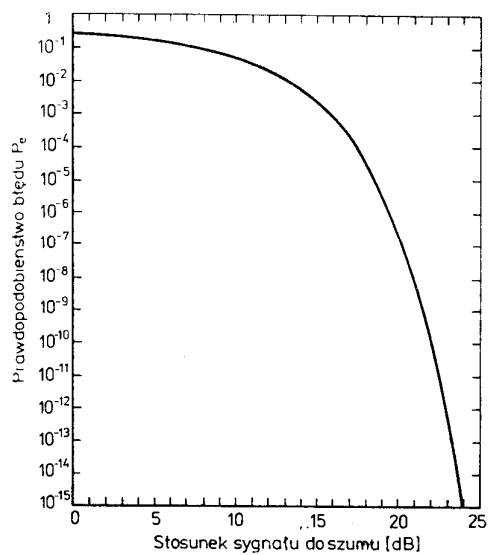
Prawdopodobieństwo błędów detekcji:

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

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 τ (1 bit).

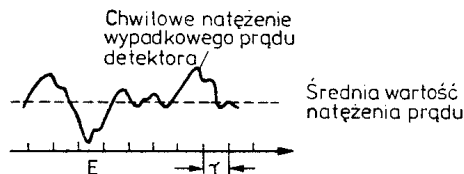
$$n_s = \frac{\eta P \tau}{hf} = \frac{i_s \tau}{e}$$

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

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

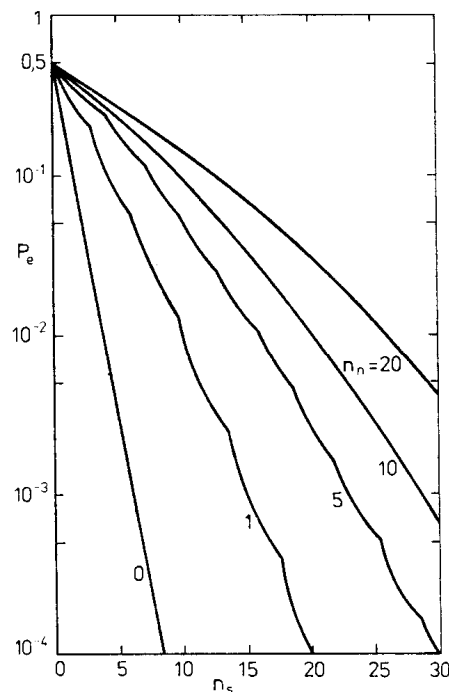
Próg stawia się powyżej średniego poziomu szumów.

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

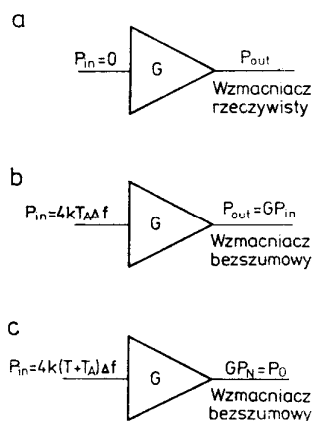
P_e	n_s
10^{-1}	2,3
10^{-2}	4,6
10^{-3}	6,9
10^{-4}	9,2
10^{-5}	11,5
10^{-6}	13,8
10^{-8}	16,1
10^{-8}	18,4
10^{-9}	20,7
10^{-10}	23,0
10^{-11}	25,3
10^{-12}	27,6

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 $2 \cdot 10^{-12}$ W, moc szumu termicznego $1.66 \cdot 10^{-13}$ 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:

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

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

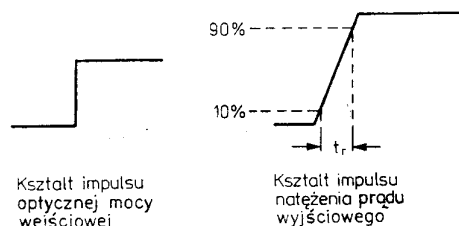
DETEKTORY ŚWIATŁA W15 SMK

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:

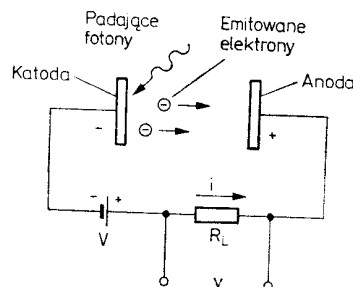
$$f_{3dB} = \frac{0.35}{t_r}$$

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 μm , duże rozmiary i wymagają dużego napięcia zasilania.

- sprawność kwantowa materiału:

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

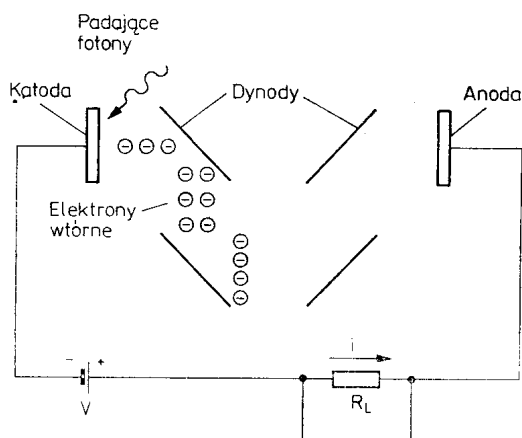
$$i = \frac{\eta e P}{hf}, \rho = \frac{i}{P} = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc}; V = \frac{\eta e P R_L}{hf} = \rho P R_L$$

Zadanie:

Obliczyć czułość fotodetektora o sprawności kwantowej 1% przy długości fali 0.8 μm .

Zakładając, że detektor ten absorbuje moc optyczną 1 μW obliczyć napięcie sygnału wyjściowego powstające na rezystancji obciążenia 50 Ω .

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.

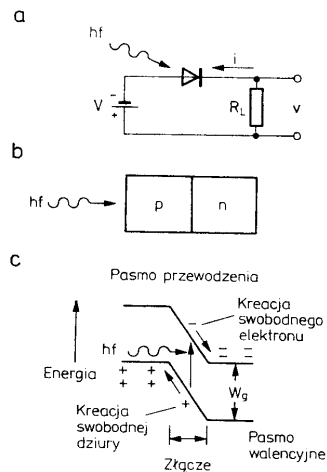
Po przejściu N dynod: $M = \delta^N$; $i = \frac{M \eta e P}{hf}$; dla N=9, $\delta=5$, $M=1.95 \cdot 10^6$.

Zadanie:

Fotopowielacz o wzmocnieniu jak wyżej użyto do odbioru sygnału optycznego o mocy 1 μW przy długości fali 0.8 μm . Sprawność kwantowa katody 1%. Obciążenie 50 Ω . 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

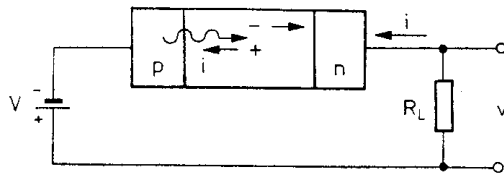


Rys. 7.4. Półprzewodnikowa fotodioda złączowa
a) układ pracy z polaryzacją zaporową,
b) złącze p-n, c) poziomy energetyczne

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 μ 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

$$\text{Długość fali odcięcia: } \lambda = \frac{1.24}{W_g [eV]} [\mu\text{m}]$$

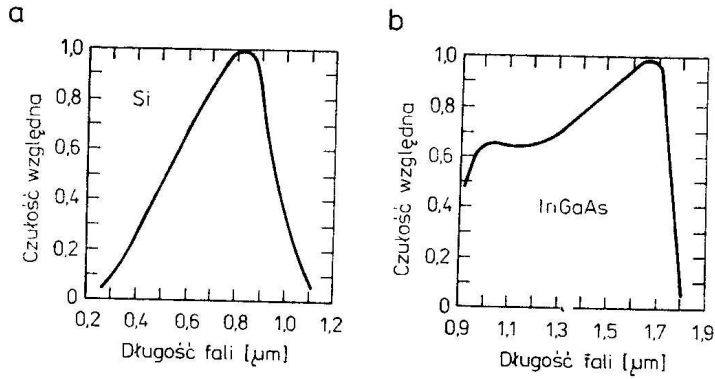
Zadanie:

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:

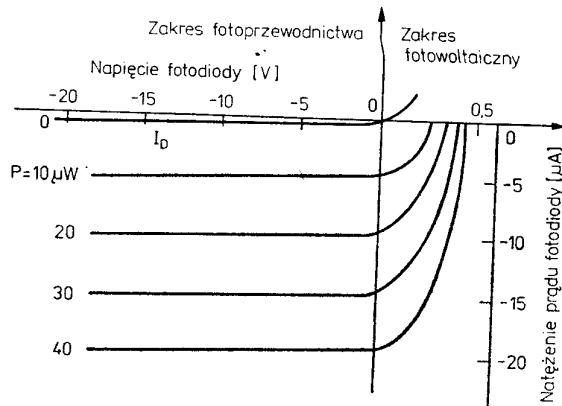
Tablica 7.1. PÓLPRZEWODNIKOWE FOTODIODY p-i-n

Materiał	Zakres widmowy (μm)	Długość fali przy maksimum czułości (μm)	Czułość maksymalna (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

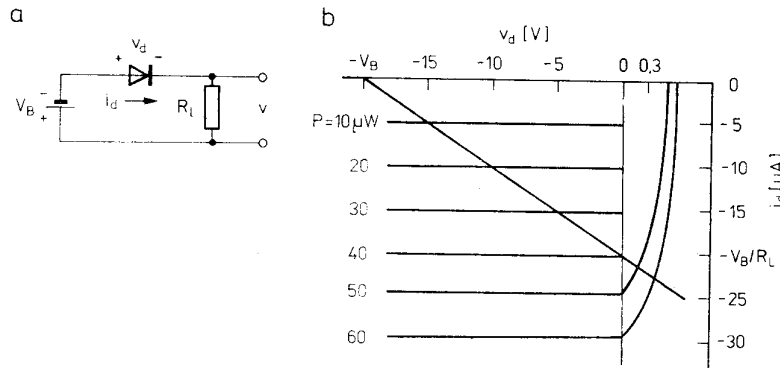
Charakterystyki prądowo-napięciowe:



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

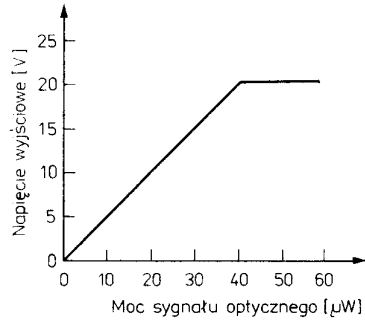


Rys. 7.8. Układ odbiorczy z fotodiode p-i-n a) schemat, b) analiza graficzna

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

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. Czulość fotodiody wynosi 0,5 A/W

Szybkość działania

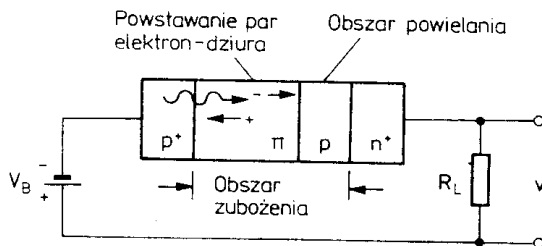
Ograniczona czasem przelotu swobodnych nośników ładunku przez obszar zubożenia oraz przez pojemność elektryczną fotodiody (złącza i oprawki):

$$t_r = 2.19R_L C_d$$

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,
 ρ — czulość,
 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,
 Δf — szerokość pasma odbiornika.

5. Fotodioda lawinowa:



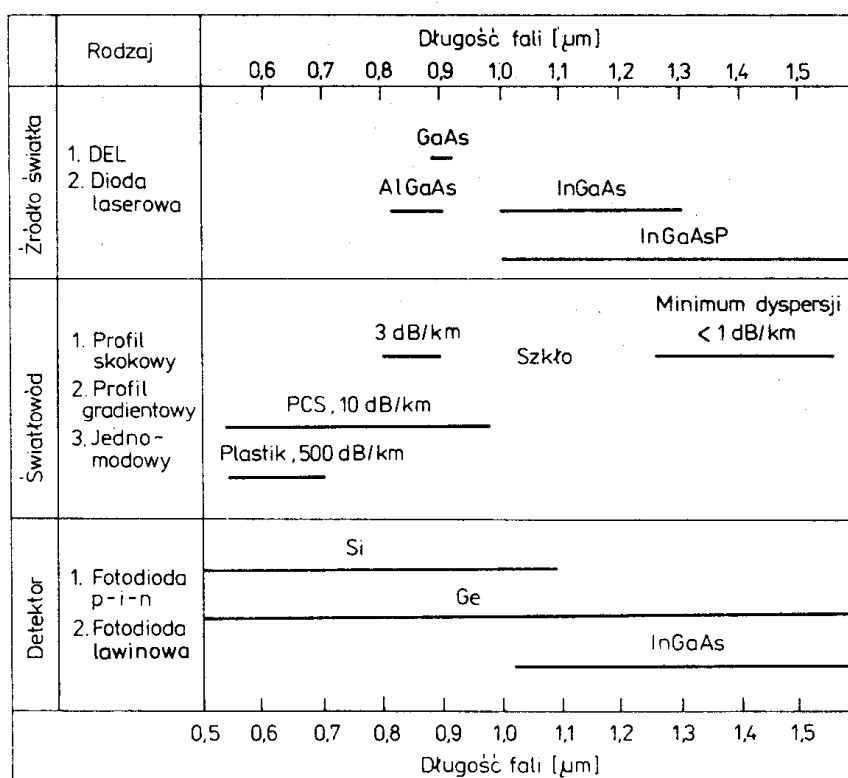
Rys. 7.13. Fotodioda lawinowa p⁺-π-p-n⁺

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

$$i = \frac{M \eta e P}{h f}; \rho = \frac{M \eta e}{h f}$$

Tablica 7.4. TYPOWE WARTOŚCI NAJWAŻNIEJSZYCH PARAMETRÓW FOTODETEKTORÓW ZŁĄCZOWYCH

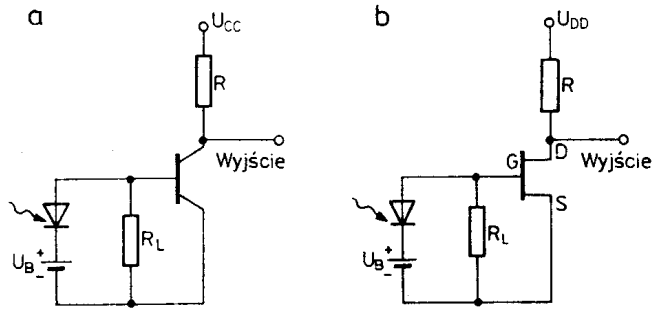
Material	Typ	Czas narasta- (ns)	Długość fali (nm)	Czułość (A/W)	Prąd ciemny (nA)	Wzmoc- nienie we- wnętrzne
Krzem	<i>p-i-n</i>	0,5	300 ÷ 1100	0,5	1	1
German	<i>p-i-n</i>	0,1	500 ÷ 1800	0,7	200	1
Arsenek galowo-indowy	<i>p-i-n</i>	0,3	1000 ÷ 1700	0,6	10	1
Krzem	dioda lawinowa	0,5	400 ÷ 1000	77	15	150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



Rys. 7.14. Podstawowe elementy systemu telekomunikacji światłowodowej

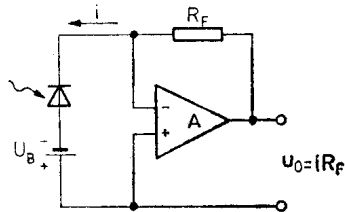
5. Układy wejściowe odbiornika (fotodetektor, pierwszy wzmacniacz)

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



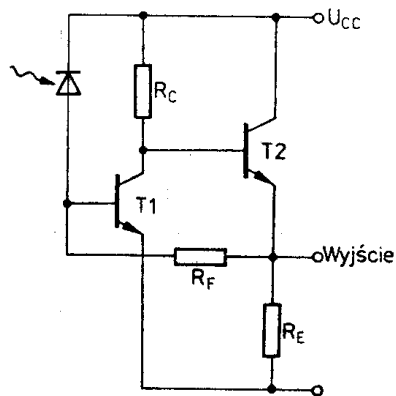
Rys. 11.17. Proste układy wejściowe odbiornika optycznego

- 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