



TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

5. FOTODETEKTORY I ODBIORNIKI OPTYCZNE

Spis treści:

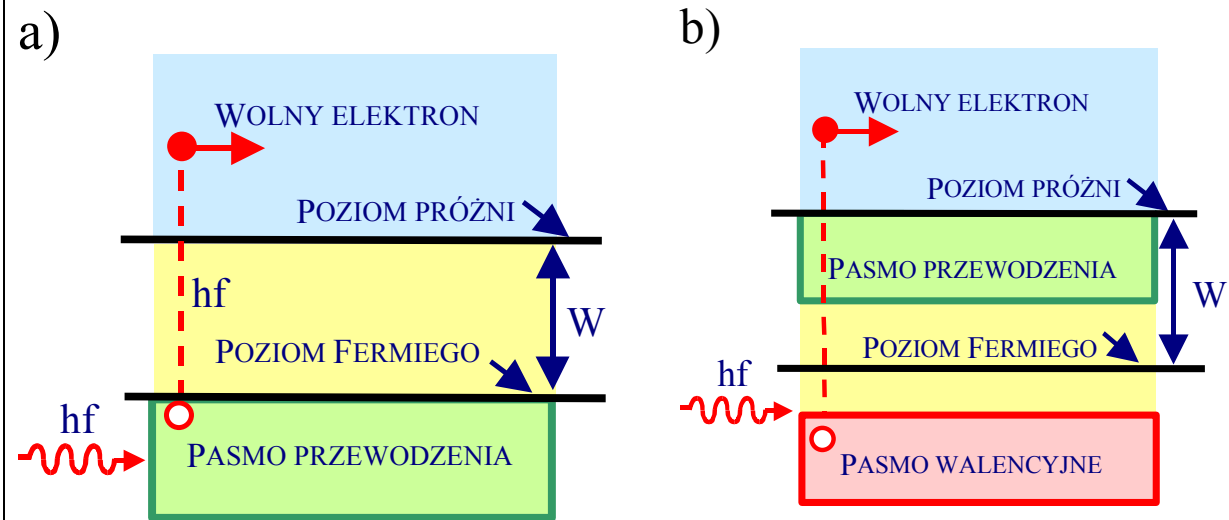
- 5.1. Wiadomości podstawowe
- 5.2. Fotodetektory komunikacji optycznej
 - ❖ Fotorezystory
 - ❖ Fotodetektory diodowe
 - ❖ Fototranzystory
- 5.3. Szumy odbiorników optycznych
- 5.4. Odbiorniki optyczne
- 5.5. Podsumowanie

5.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE – DEFINICJE

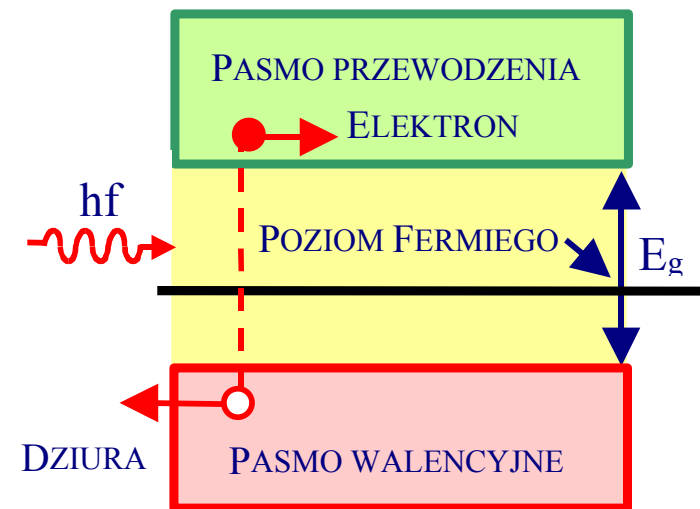
- ↪ **Fotodetektory** są przyrządami do pomiaru sygnału/mocy optycznej.
- ↪ **Fotodetektory termiczne** dokonują przemiany energii sygnału optycznego na ciepło, a następnie mierzą rozmaite efekty związane ze wzrostem temperatury. Przyrządy tego typu wykorzystywane są w miernikach mocy optycznej.
- ↪ **Fotoelektryczne detektory** wykorzystują efekt fotoelektryczny zewnętrzny i wewnętrzny.
- ↪ Efekt fotoelektryczny zewnętrzny to **fotoemisja / emisja fotoelektronowa**, wykorzystywana w fotodetektorach próżniowych i fotopowielaczach.
- ↪ **Efekt fotoelektryczny wewnętrzny** to generacja par elektron-dziura w materiałach półprzewodnikowych, wykorzystywany w półprzewodnikowych fotodetektorach.
- ↪ Rodzaje półprzewodnikowych fotodetektorów:
 - ◆ **fotorezystory,**
 - ◆ **fotodiody pn,**
 - ◆ **fotodiody pin,** (!!)
 - ◆ **fotodiody lawinowe,** (!)
 - ◆ **fotodiody MSM,** (!)
 - ◆ **fototranzystory.** (!)

5.1. WIADOMOŚCI ... – EFEKT FOTOELEKTRYCZNY ZEWNĘTRZNY I WEWNĘTRZNY

Rys.5.1. Ilustracja mechanizmu emisji fotoelektronowej – efekt fotoelektryczny zewnętrzny.
 a) Fotoemisja z metalu.
 b) Fotoemisja z półprzewodnika.



Rys.5.2. Ilustracja mechanizmu efektu fotoelektrycznego wewnętrznego. Pochłonięcie fotonu o odpowiednio dużej energii powoduje przejście elektronu do pasma przewodnictwa i generację pary elektron – dziura.

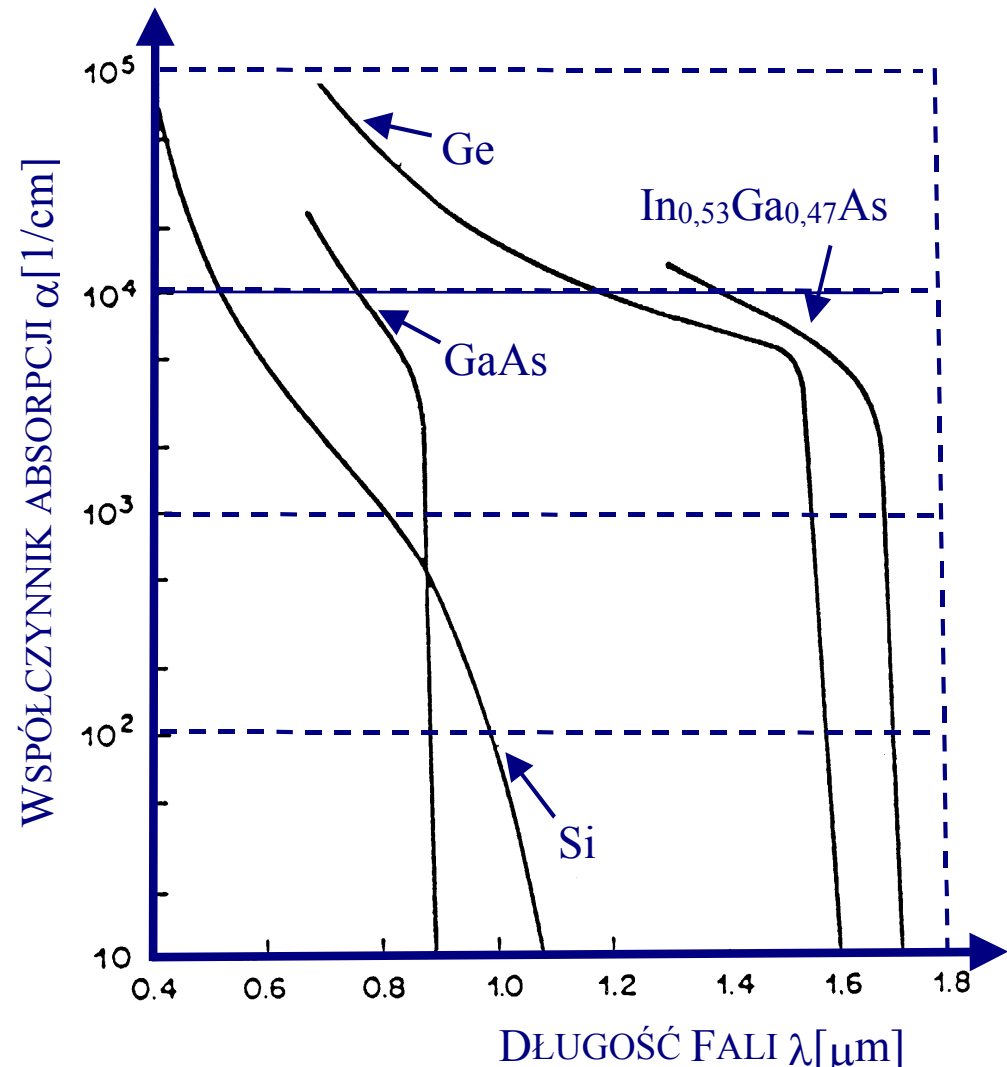


5.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE – ABSORPCJA FOTONÓW

- ◆ Generacja par elektron/dziura może mieć miejsce wtedy, gdy foton został pochłonięty.
- ◆ Proces absorpcji fotonów zachodzi w ten sposób, że wartość mocy optycznej P_{OPT} maleje na długości x do $P_{OPT} \exp(-\alpha x)$.
- ◆ Moc pochłonięta wynosi wtedy $P_{OPT}[1 - \exp(-\alpha x)]$.
- ◆ Wartość współczynnika absorpcji α zależy od długości fali λ i od szerokości przerwy energetycznej E_g materiału.

$$\alpha [\text{cm}^{-1}] = 2 \times 10^4 \sqrt{hf - E_g [\text{eV}]};$$

Rys.5.3. Zależność współczynnika pochłaniania fotonów od długości fali dla różnych materiałów półprzewodnikowych.



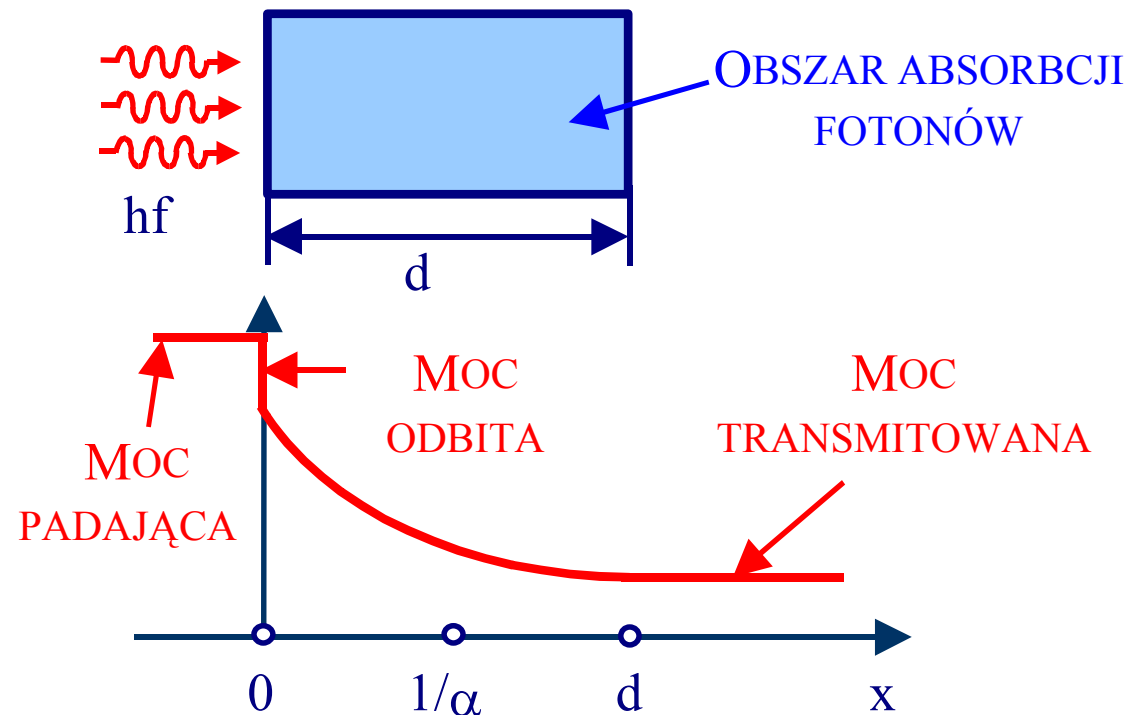
5.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE – WYDAJNOŚĆ KWANTOWA

↪ **Wydatność kwantowa** η ($0 \leq \eta \leq 1$) fotodetektora jest prawdopodobieństwem, że padający foton wygeneruje parę nośników elektron/dziura, która stanie się składnikiem prądu fotodetektora.

↪ Wydatność kwantowa η wyraża się następującą zależnością:

$$\eta = (1 - \rho) \zeta [1 - e^{-\alpha d}]$$

- Czynniki $(1 - \rho)$ reprezentuje efekt odbicia mocy optycznej od powierzchni obszaru absorpcji.
- Czynniki ζ reprezentuje efekt rekombinacji pewnej liczby par elektron-dziura, przez co nie biorą one udziału w prądzie fotodetektora.
- Czynniki $[1 - \exp(-\alpha d)]$ to efekt pochłaniania na drodze d materiału absorbującego fotony.



Rys.5.4. Związek między absorpcją a wydajnością kwantową.

5.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE – CZUŁOŚĆ FOTODETEKTORA

- ↪ **Czułość fotodetektora R_{FD} (ang. *responsivity*)** wiąże ze sobą wartość prądu i_{FD} płynącego przez przyrząd z mocą optyczną P_{OPT} padającą na niego.
- ↪ Gdyby wydajność kwantowa była równa 1, to strumień fotonów Φ [fotony/sekunda] produkuje taką samą ilość elektronów, wtedy $i_{FD} = e\Phi$.
- ↪ Moc optyczna jest związana ze strumieniem fotonów: $P_{OPT} = hf\Phi$.
- ↪ Uwzględniając wydajność kwantową η :

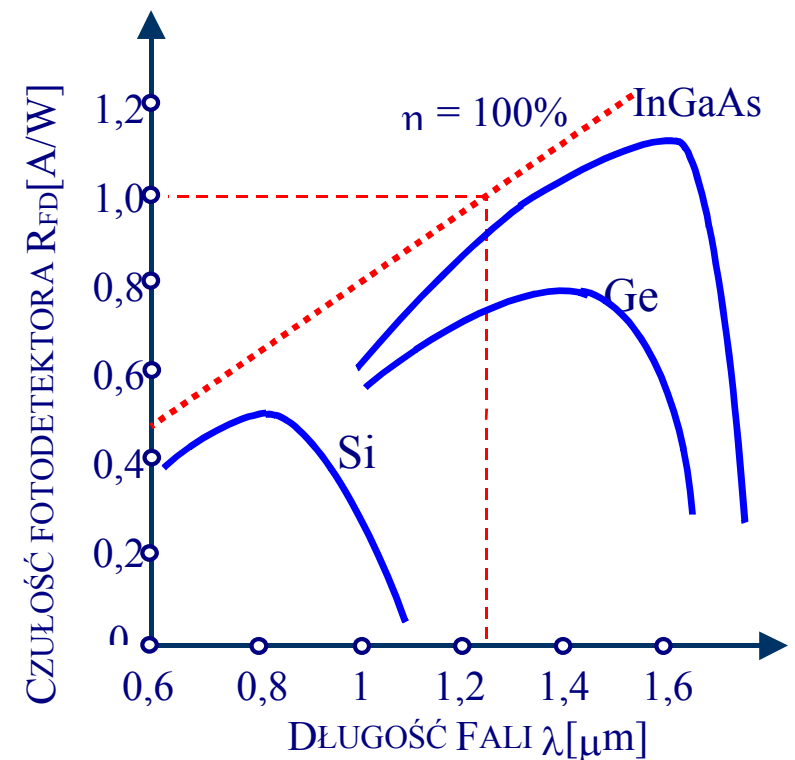
$$i_{FD} = \eta e \Phi = \frac{\eta e}{hf} P_{OPT} = R_{FD} P_{OPT};$$

- ↪ Dla tej samej P_{OPT} liczba fotonów rośnie z długością fali λ , dlatego:

$$R_{FD} = \frac{\eta e}{hf} = \eta \frac{\lambda}{1,24};$$

- ↪ Dla $\eta = 1$ i $\lambda = 1240$ nm otrzymujemy $R_{FD} = 1$ A/W.

Rys.5.5. Teoretyczny przebieg czułości fotodetektora dla różnych wartości wydajności kwantowej.



5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – FOTOREZYSTORY

- ↗ Strumień fotonów generuje w objętości półprzewodnika pary elektron-dziura. Pod wpływem pola elektrycznego wywołanego baterią o napięciu U nośniki wędrują w stronę metalowych elektrod.
- ↗ Absorpcja fotonów detekowana jest albo jako wzrost prądu **fotorezystora** i_{FR} w stosunku do prądu ciemnego, albo jako spadek napięcia na włączonym do obwodu rezystorze R_L .
- ↗ Strumień fotonów Φ generuje pary elektron-dziura w liczbie $\eta\Phi$, w obwodzie płynie prąd i_{FR} :

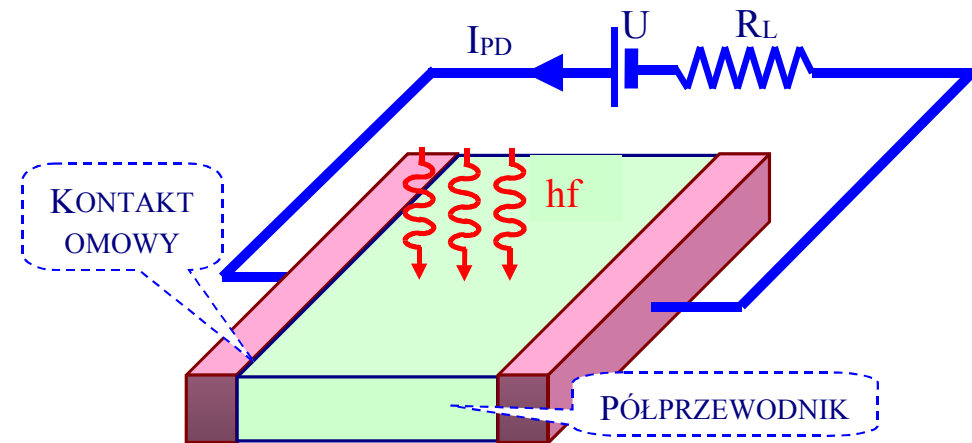
$$i_{FR} \cong e\eta \frac{\tau}{t_n} \Phi = \frac{e\eta}{hf} \frac{\tau}{t_n} P_{OPT};$$

- ◆ Stosunek τ/t_n jest wzmocnieniem G :

$$G = \frac{\tau}{t_n} > 1;$$

- ◆ τ jest tutaj czasem życia nośników większościowych, t_n to czas przepływu elektronów między elektrodami.

- ↗ Pasma pracy B jest odwrotnie proporcjonalne do czasu życia nośników większościowych τ . Parametr wzmocnienie \times pasmo GB jest niezależny od τ , zwykle około 10^9 .
- ↗ Fotorezystory jako przełączniki optyczne służą też do generacji bardzo krótkich impulsów.



Rys.5.6. Uproszczona struktura i sposób włączenia fotorezystora.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – FOTODIODY pn – cz.1

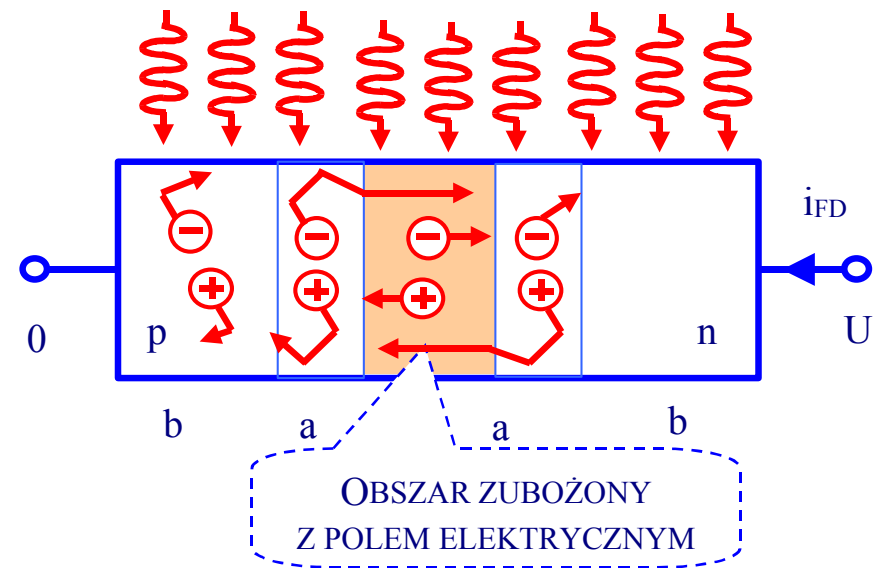
↪ W fotodiodzie ze złączem pn spolaryzowanym zaporowo, prąd płynący w kierunku zaporowym jest zależny od ilości zaabsorbowanych fotonów. Fotony absorbowane są w całej objętości półprzewodnika ze współczynnikiem absorpcji α . Każdy absorbowany foton generuje parę elektron-dziura. Losy generowanych nośników są rozmaite:

- ◆ W obszarze zubożonym istnieje silne pole elektryczne, generowane elektrony poruszają się w stronę obszaru n , dziury w stronę obszaru p (nie ma rekombinacji w obszarze zubożonym).
- ◆ Nośniki generowane w obszarze b szybko rekombinują i nie biorą udziału w prądzie fotodiody.
- ◆ Nośniki generowane w sąsiedztwie warstwy zubożonej a mogą przypadkowo dotrzeć do niej i wziąć udział w prądzie i_{FD} (elektrony od strony p i dziury od strony n).

↪ Równanie opisujące prąd złącza pn jest typowe dla niego. Prąd nasycenia i_S jest dla kierunku zaporowego prądem ciemnym,

$$i = i_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - i_{FD}(\Phi);$$

Rys.5.7. Spolaryzowane zaporowo złącze pn oświetlone strumieniem fotonów.

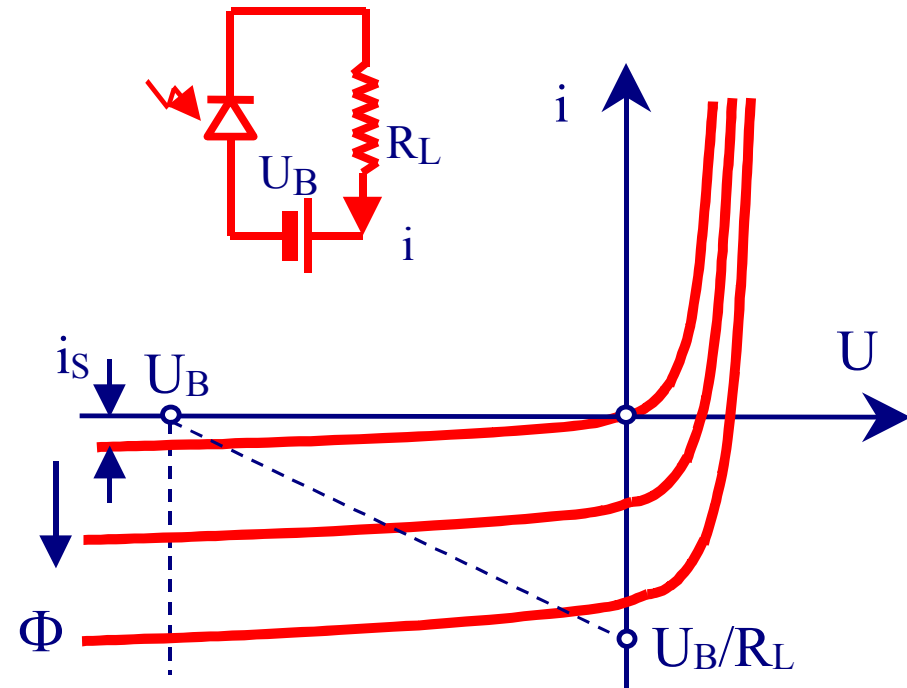


5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – FOTODIODY pn – cz.2

↪ Prąd i_{FD} zapisuje się znanym wzorem, ale wydajność kwantowa jest niewielka, gdyż znaczna część generowanych nośników nie bierze udziału w prądzie.

$$i_{FD} = \eta e \Phi = \frac{\eta e}{hf} P_{OPT};$$

↪ Czas odpowiedzi jest stosunkowo długi, nośniki z warstwy zubożonej usuwane są szybko, ale czas dyfuzji nośników w obszarach sąsiadujących wydłuża czas trwania impulsu prądu.



Rys.5.8. Rodzina charakterystyk fotodiody pn.

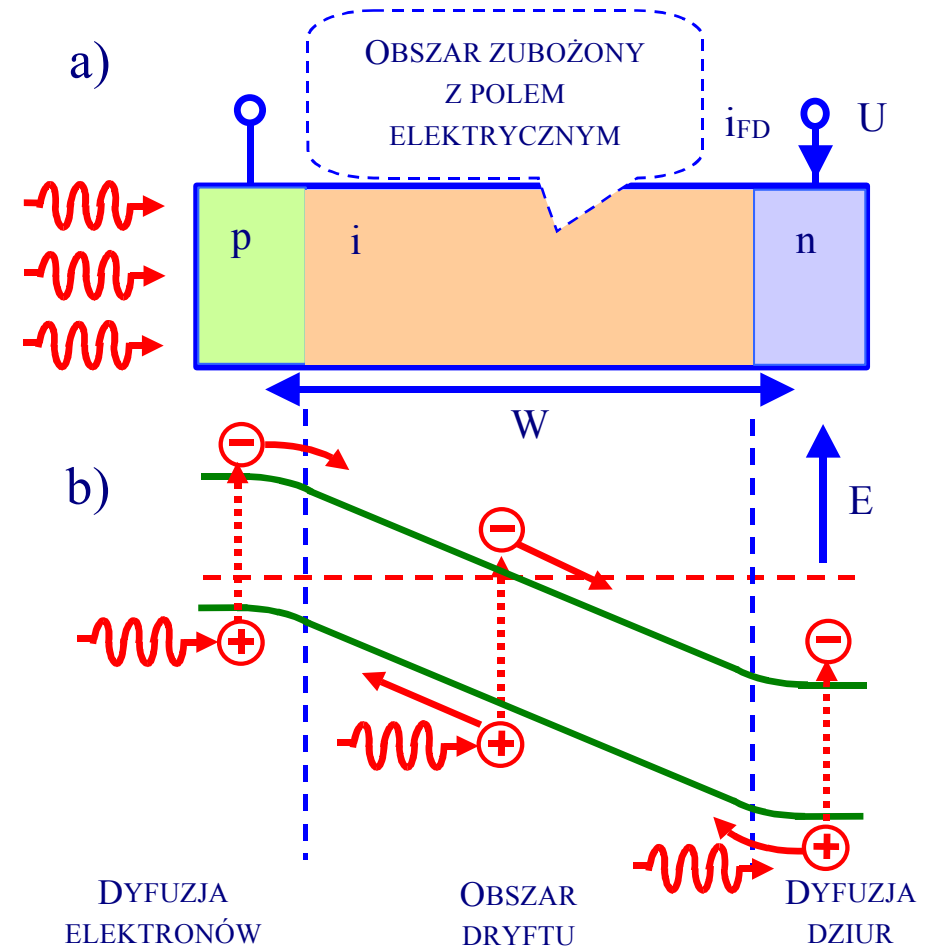
↪ Gdy nie ma źródła napięcie U_B fotodiody staje się przetwornikiem opto-elektrycznym.

↪ Typowe dla fotodetektor warunki pracy to duże zaporowe napięcie U_B . Wtedy:

- ◆ pole elektryczne jest silne i czas przelotu nośników przez warstwę zubożoną jest mały,
- ◆ rośnie szerokość warstwy zubożonej, rośnie więc wydajność kwantowa, a maleje pojemność diody.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – FOTODIODY *p-i-n* – cz.1

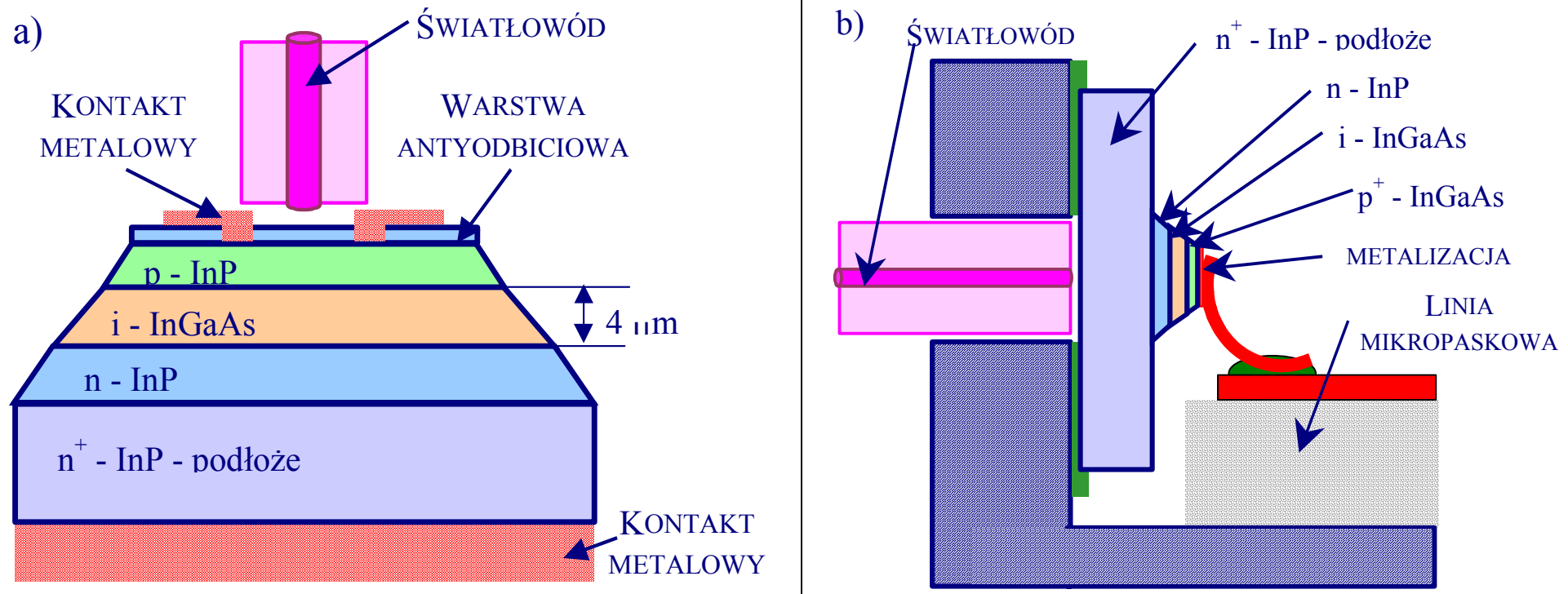
- ↪ W fotodiodzie *p-i-n* między obszarem *p* i *n* umieszczony jest obszar *i* słabo domieszkowany. Obszar *i* jest przy polaryzacji zaporowej silnie zubożony.
 - ↪ Obszar *i* wraz z obszarami dyfuzji po obu stronach zajmują znaczną długość W , znaczna część generowanych przez fotony nośników bierze udział w prądzie, rośnie η .
 - ↪ Długość W jest kompromisem między rosnącym η a rosnącym czasem przelotu, co zmniejsza pasmo pracy fotodiody.
 - ↪ Najlepsze wyniki uzyskano dla podwójnego heterozłącza, warstwy *p* i *n* wykonane z InP, który dla pasma 1,2...1,6 μm jest przezroczysty, warstwa słabo domieszkowana wykonana z InGaAs, absorpcja zachodzi tylko w warstwie *i*.
- dla InP: $E_g = 1,35 \text{ eV}$, $\lambda_{\text{gran.}} = 0,92 \mu\text{m}$.
 - dla InGaAs: $E_g = 0,75 \text{ eV}$, $\lambda_{\text{gran.}} = 1,65 \mu\text{m}$.



Rys.5.9. a) Uproszczona struktura fotodiody *pin*,
b) Pasma energetyczne przy polaryzacji zaporowej

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – FOTODIODY *p-i-n* – cz.2

- ↪ Wydajność kwantowa rośnie po zastosowaniu pokrycia warstwą antyodbiciową.
- ↪ Duża pojemność diody i czas przepływu ograniczają pasmo pracy fotodiody. Zmniejszając W aby zmniejszyć czas przepływu należy zmniejszyć średnicę złącza, aby zmniejszyć pojemność.



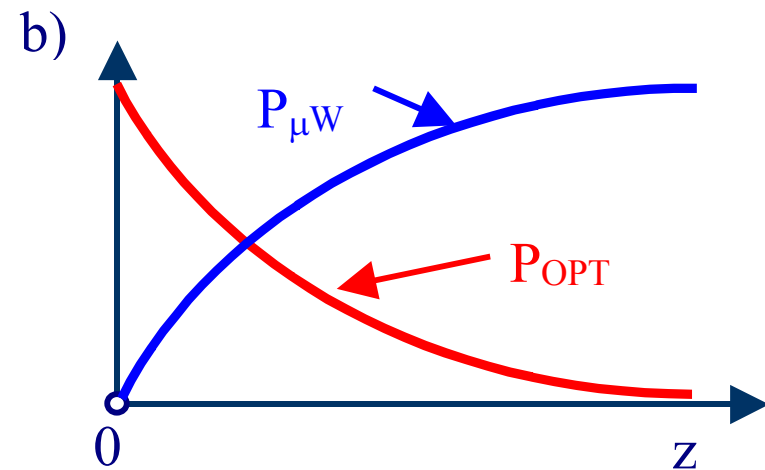
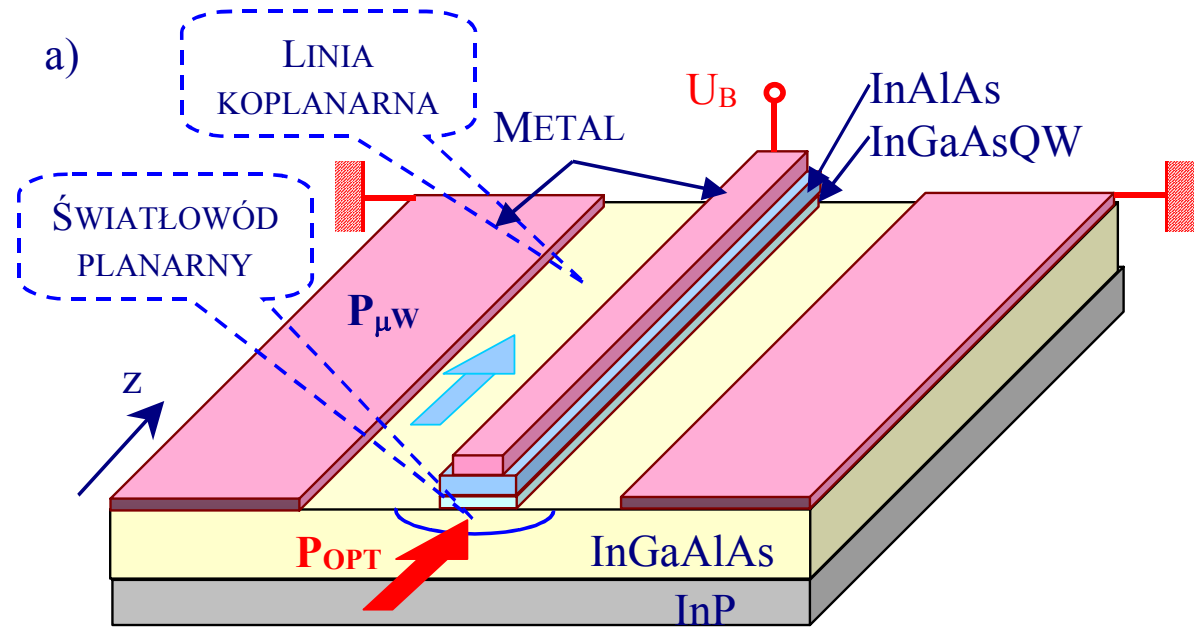
Rys.5.10. Fotodiody pin z warstwą pochłaniającą z InGaAs i z przezroczystymi obszarami p oraz n wykonanymi z InP. a) Dioda oświetlona światłowodem „od przodu”. b) Dioda oświetlona światłowodem od strony podłoża, „od tyłu”.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI ... – FOTODIODY *p-i-n* – Z FALĄ BIEŻĄCĄ

↳ Fotodetektor *p-i-n* z falą bieżącą jest połączeniem planarnego światłowodu wykonanego na podłożu InP z mikrofalową linią koplanarną.

↳ Sygnał optyczny wędruje wzdłuż światłowodu w obszarze diody *p-i-n* spolaryzowanej zaporowo i ulega absorpcji w obszarze studni kwantowej InGaAs.

↳ Jednocześnie w linii koplanarnej zostaje wzbudzona fala o częstotliwości modulacji sygnału optycznego.



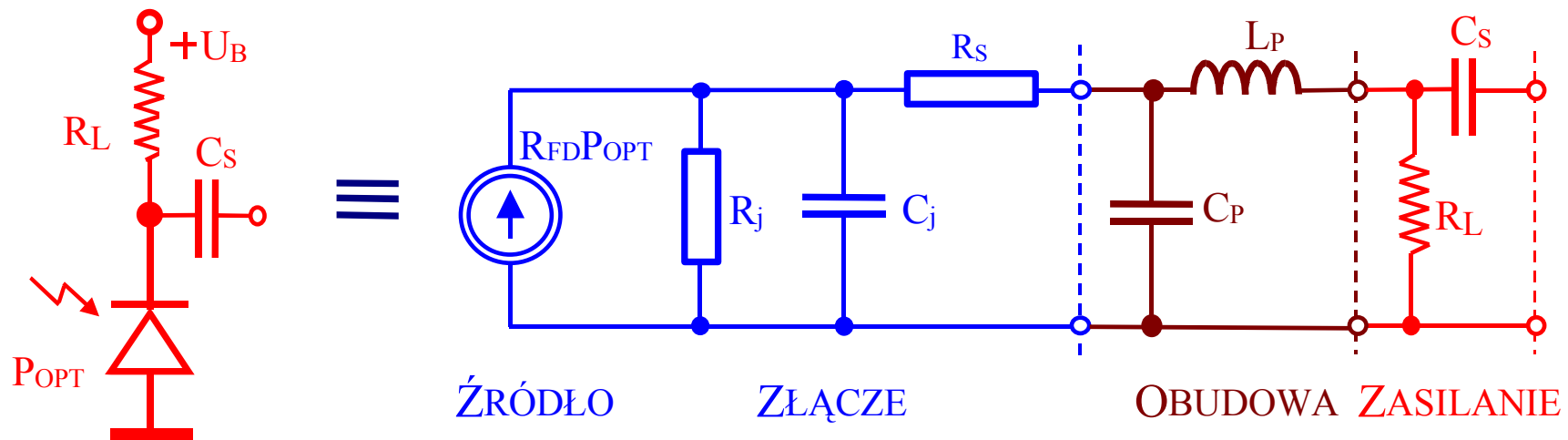
Rys.5.11. Fotodetektor *p-i-n* z falą bieżącą.

a) Podstawowa struktura fotodetektora.

b) Pochłanianie sygnału optycznego w światłowodzie i wzbudzenie sygnału mikrofalowego w linii koplanarnej.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ - OBWÓD ZASTĘPCZY DIODY *p-i-n* – 1

- ↪ Proces fotodetekcji mocy P_{OPT} reprezentowany jest w obwodzie zastępczym przez źródło prądowe $R_{FD}P_{OPT}$, (typowo $R_{FD} \cong 1\text{A/W}$) modulacja mocy P_{OPT} zamienia się na modulację prądu.
- ↪ Elementy R_j , C_j i R_S reprezentują złącze. W stanie zaporowym $R_j = 0,1 \dots 1\text{ M}\Omega$, $C_j = 0,01 \dots 1\text{ pF}$, $R_S = 1 \dots 10\ \Omega$, w zależności od typu diody i pasma pracy.
- ↪ Elementy L_S i C_P reprezentują oprawkę, typowo $C_P = 0,01 \dots 0,1\text{ pF}$, $L_P = 0,03 \dots 0,3\text{ nH}$. Elementy C_j , R_S i L_P tworzą obwód rezonansu szeregowego, impedancja wejściowa początkowo pojemnościowa powyżej rezonansu ma charakter indukcyjny.
- ↪ Pojemność sprzęgająca C_S nie ma znaczenia, często jej nie ma, natomiast wartość R_L ma ogromne znaczenie, stała czasu $R_L C_j$ decyduje o pasmie odbioru, a samo R_L o czułości odbiornika.



Rys.5.12. Fotodioda *p-i-n* w obwodzie z polaryzacją i obwód zastępczy fotodiody.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ - OBWÓD ZASTĘPCZY DIODY *p-i-n* - 2

↗ Najważniejsze elementy obwodu z rys.5.12 mogą być znalezione w oparciu o prosty pomiar współczynnika odbicia $\Gamma(f)$ fotodiody, co pokazano na rys.5.13.

- ◆ Dla małych częstotliwości f_1 wartość Γ odpowiada susceptancji $b(f_1)$:

$$b(f_1) = 2\pi(C_j + C_p)Z_0;$$

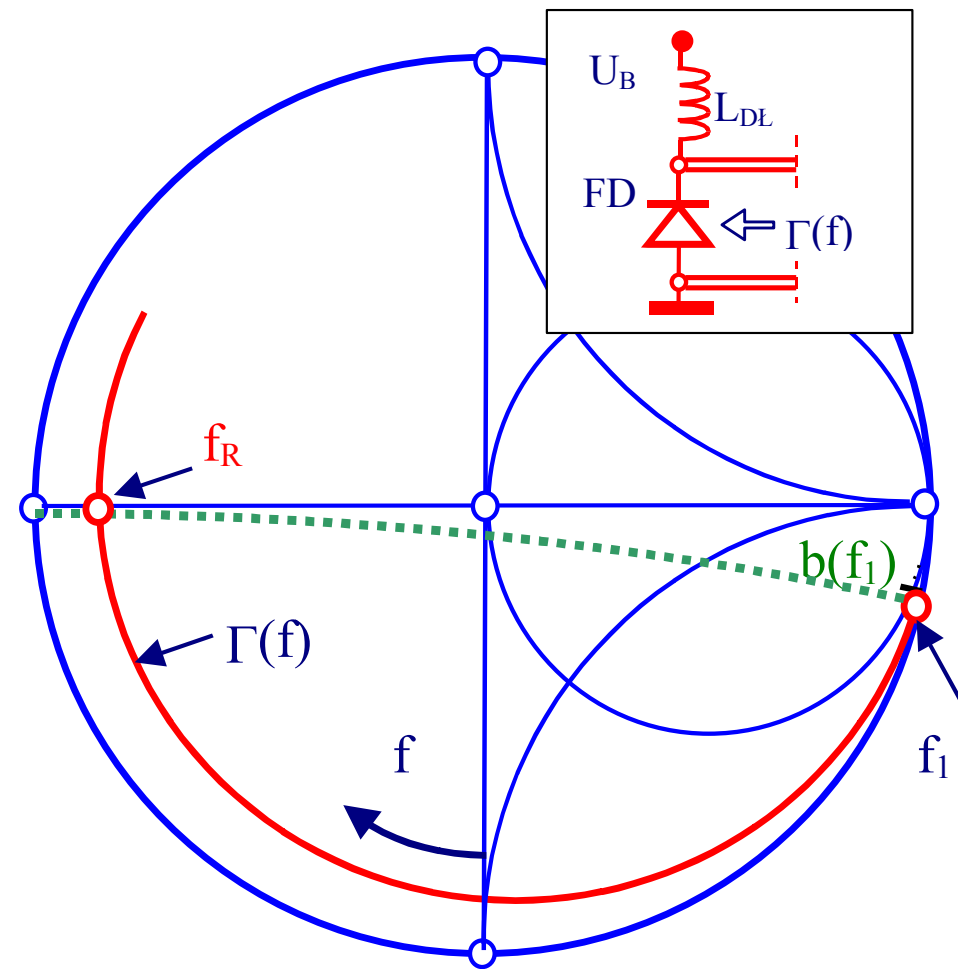
- ◆ Dla częstotliwości rezonansowej f_R :

$$2\pi f_R L_p - \frac{1}{2\pi(C_j + C_p)} \cong 0;$$

- ◆ W rezonansie współczynnik odbicia Γ_R jest rzeczywisty i ujemny, wtedy:

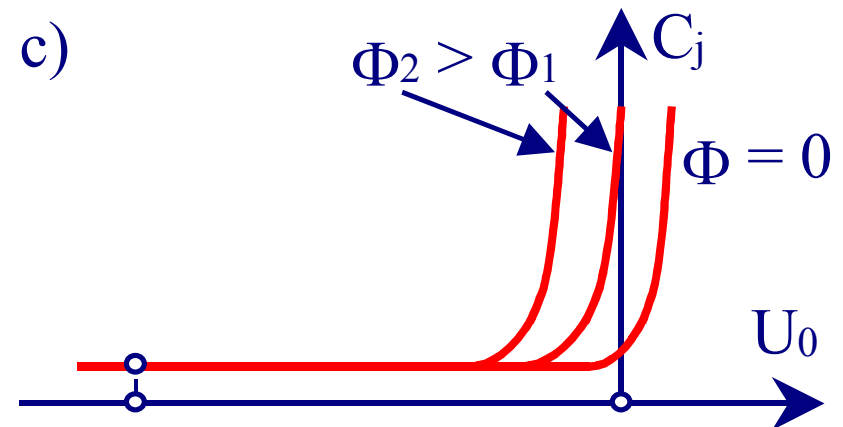
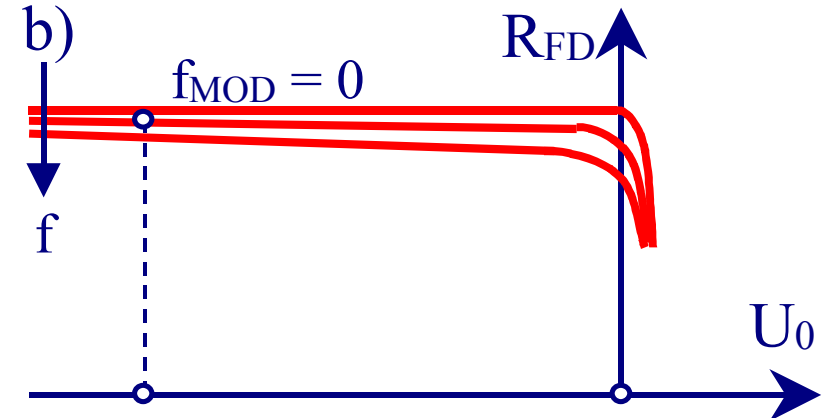
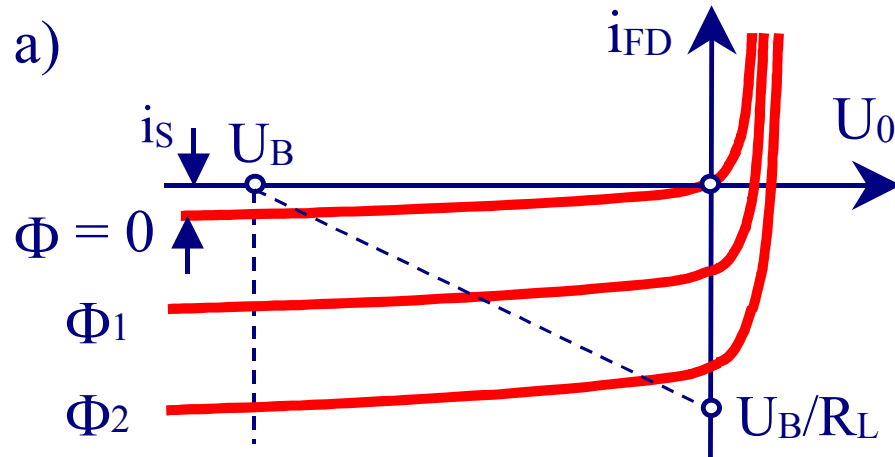
$$\frac{R_s}{Z_0} \cong \frac{1 + \Gamma_R}{1 - \Gamma_R};$$

- ◆ Zwykle $R_j \gg Z_0$, pomijamy.



*Rys.5.13. Współczynnik odbicia diody *p-i-n* spolaryzowanej zaporowo na wykresie Smitha.*

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ – CHARAKTERYSTYKI DIODY *p-i-n*



Rys.5.14. Charakterystyki fotodiody *p-i-n*.

- a) Charakterystyki statyczne prądu fotodiody dla różnych wartości oświetlenia Φ .
- b) Wydajność źródła prądowego (czułość fotodetektora) w funkcji napięcia polaryzacji dla różnych częstotliwości modulacji.
- c) Zależność pojemności złącza w funkcji napięcia polaryzacji dla różnych wartości oświetlenia Φ .

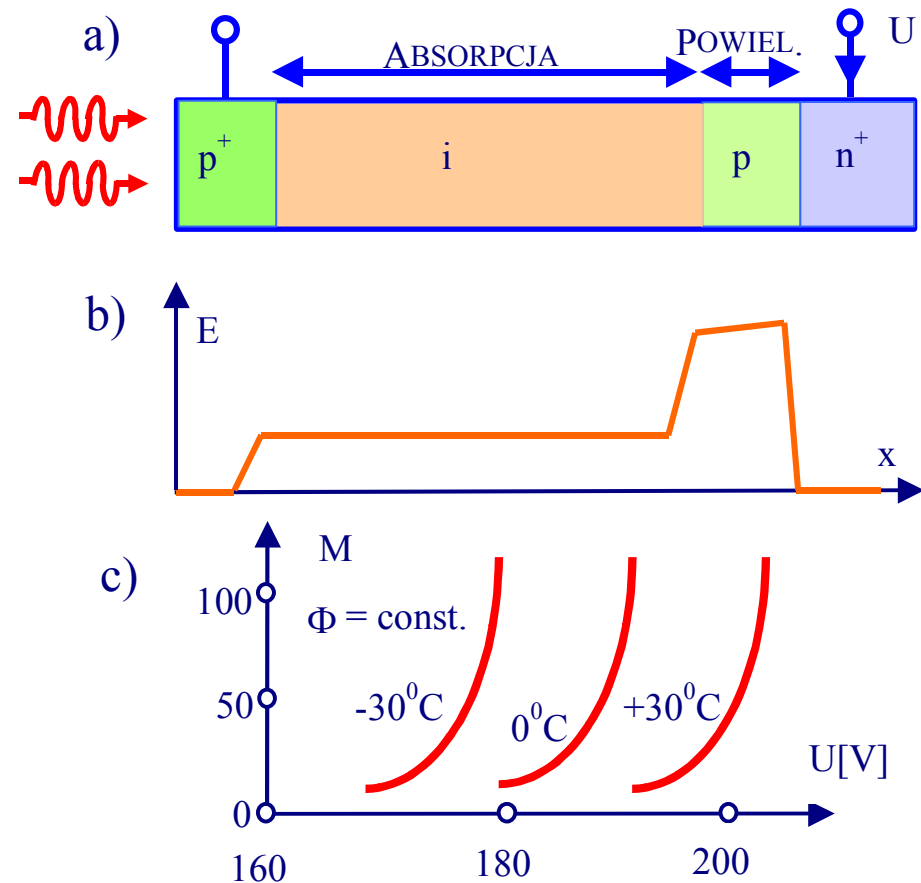
↳ Gdy napięcie polaryzacji diody zbliża się do 0 pojawiają się efekty nieliniowe, gdy jest mniejsze od -3 V proces fotodetekcji jest w szerokim zakresie mocy optycznych liniowy.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI ... – FOTODIODY LAWINOWE

W fotodiodach lawinowych wprowadza się do struktury diody $p-i-n$ dodatkowy obszar p . Przy polaryzacji zaporowej w obszarze tym występuje silne pole elektryczne. Przepływające elektrony nabierają energii i generują kolejne pary elektron-dziura, zachodzi proces jonizacji zderzeniowej, powielania lawinowego. Prądu diody rośnie wielokrotnie (M razy).

$$i_{FD} = M(U, f, T)R_0P_{OPT};$$

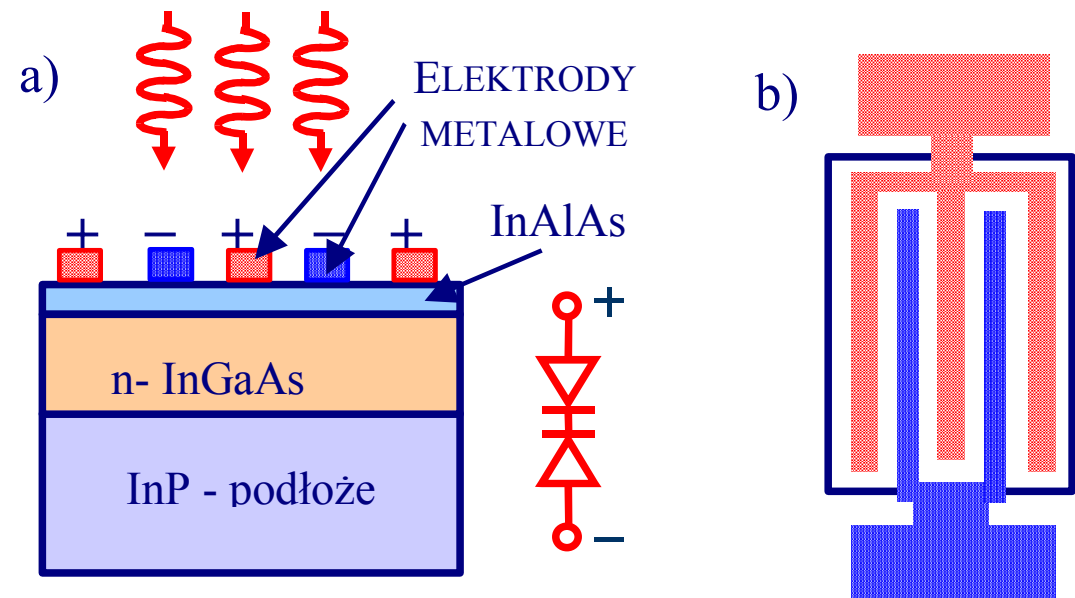
- ◆ Prąd diody rośnie wykładniczo ze wzrostem U aż do przebicia lawinowego.
- ◆ Typowe wartości $M \cong 100$.
- ◆ Wady:
 - ◆ duże napięcia polaryzacji,
 - ◆ zmniejszenie pasma pracy $\propto \sqrt{M}$,
 - ◆ silna zależność od temperatury,
 - ◆ duże szумы.



Rys.5.15. a) Uproszczona struktura diody lawinowej z obszarem p powielania prądu. b) Rozkład pola elektrycznego dla polaryzacji zaporowej. c) Zależność współczynnika powielania M od napięcia i temperatury.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI ... – FOTODIODY Z BARIERĄ SCHOTTKY’EGO

- ↪ W fotodiodzie z barierą Schottky’ego jeden z materiałów złącza $p-n$ – zwykle p – zastąpiony został metalem. Warstwa metalu jest zwykle przezroczysta dla promieniowania optycznego.
- ↪ W łączu metal-półprzewodnik warstwa zubożona formuje się w pobliżu powierzchni, przez co eliminuje rekombinację powierzchniową.
- ↪ Diody MSM o planarnej strukturze z elektrodami międzypalczastymi mają najmniejsze wartości pojemności C .
- ↪ Przy niewielkiej rezystancji szeregowej R_S stałe czasu $R_S C$ są niewielkie i dlatego diody MSM charakteryzują się najwyższymi częstotliwościami pracy powyżej 100 GHz.
- ↪ Częstotliwość pośrednia w układach mieszania optycznego dochodzi do 3000 GHz.
- ↪ Fotodiody MSM są jedynymi konkurentami fotodiod $p-i-n$.

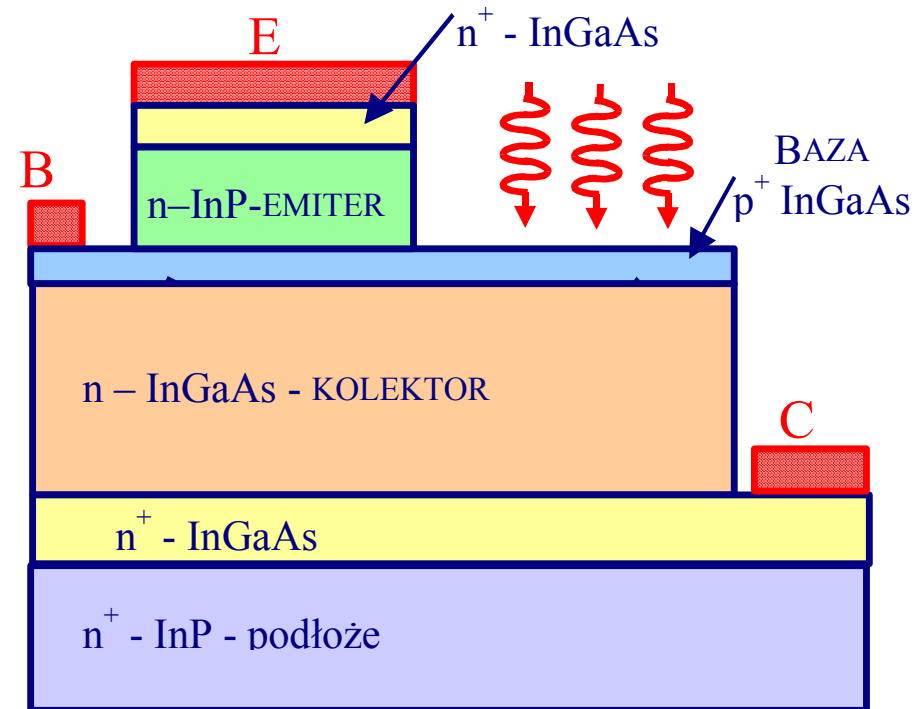


Rys.5.16. Fotodiody z barierą Schottky’ego.

- a) Struktura planarnej fotodiody Schottky’ego typu MSM – (ang. Metal-semiconductor-metal).
b) Widok z góry elektrod fotodiody MSM..

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI ... – FOTOTRANZYSTORY

- ↪ Tranzystory są przyrządami półprzewodnikowymi wrażliwymi na promieniowanie optyczne.
- ↪ Tranzystory polowe FET i MESFET wykonane na bazie GaAs nie detekują promieniowania w pasmach 1300 i 1550 nm, ponieważ GaAs jest przezroczysty dla tych λ ($E_g = 1,41$ eV).
- ↪ Bardzo obiecujące są próby z tranzystorami HBT wykonywanymi na bazie InP, z warstwami pochłaniającymi z InGaAs.
- ↪ Wykonane właściwie tranzystory HBT mają doskonałe parametry mikrofalowe, niektóre struktury mogą pracować do 60 GHz.
- ↪ Oświetlenie tranzystora zmienia jego parametry rozproszenia, co pozwala:
 - ◆ detekować promieniowanie optyczne z dużą czułością, wykorzystując wzmocnienie tranzystora,
 - ◆ mieszać sygnały mikrofalowe i optyczne,
 - ◆ wpływać drogą optyczną na parametry oscylatora z tranzystorem.
- ↪ Badania nad HBT trwają.



Rys.5.17. Struktura fototranzystora HBT z obszarem absorpcji promieniowania w pasmach transmisji światłowodowej.

5.2. FOTODETEKTORY KOMUNIKACJI OPTYCZNEJ –PORÓWNANIE

- ↪ Fotorezystory ze względu na niewielką czułość nie są stosowane w odbiornikach optycznych, używane jako przełączniki optyczne, do generowania krótkich impulsów prądu.
- ↪ Fotodiody p-n mają w tym momencie znaczenie historyczne, zostały zastąpione przez fotodiody p-i-n ze względu na większą wydajność kwantową.
- ↪ Fotodiody p-i-n są konstrukcyjnie najbardziej dojrzałe, są powszechnie stosowane i nadal rozwijane (konstrukcje z falą bieżącą).
- ↪ Fototranzystory są najbardziej obiecującymi przyrządami, ciągle w sferze badań i prób.

Typ fotodetektora	Fotodiody p-i-n,	Fotodiody lawinowe	Fotodiody MSM	Fototranzystory.
Materiał	Si, Ge, InGaAs	Si, Ge, InGaAs	Si, Ge, InGaAs	InGaAs
Pasmo	do 3 GHz	do 100 GHz	do 3000 GHz	do 30 GHz
Czułość	0,5...1 A/W	1...100 A/W	0,1...0,3 A/W	1...5 A/W
Szumy	małe	duże	małe	małe i średnie
Wymagania układowe	proste	wysokie napięcie zasilania, stabilizacja temperatury	proste	Stabilizacja napięć zasilających
Zakres zastosowań	powszechnie stosowane, rozwijane nowe konstrukcje	stosowane w układach starszych generacji	rozwijane	intensywnie rozwijane

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – ŹRÓDŁA SZUMÓW - 1

↪ Fotodetektor jest źródłem prądu i_{FD} , który jest miarą strumienia fotonów Φ lub mocy optycznej P_{OPT} . Jest to jednakże prąd średni, jego wartość przypadkowo zmienia się, fluktuuje. Te zmiany reprezentują prądy szumów.

↪ Głównymi źródłami szumów w procesie fotodetekcji są:

- ◆ **Szumy śrutowe** reprezentowane przez prąd $i_{SR}(t)$, (ang. *shot noise*) zawierają 3 wymienione niżej źródła fluktuacji fotoprądu diody łącznie z ograniczeniami częstotliwościowymi i filtrującym wpływem obwodu.
 - **Szumy strumienia fotonów**. Przy średniej wartości strumienia fotonów Φ gęstości chwilowe zmieniają się w szerokich granicach, zgodnie ze statystyką Poisson'a.
 - **Szumy fotoelektronów**, proces fotodetekcji zachodzi ze średnią wydajnością kwantową $\eta < 1$, foton generuje parę elektron-dziura z prawdopodobieństwem η , ta wartość fluktuuje.
 - **Szumy procesu powielania**, występują w fotodiodach lawinowych, procesy jonizacji zderzeniowej zachodzą przypadkowo, średnio 1 elektron produkuje M nośników, wartości chwilowe fluktuują wokół średniej.
- ◆ **Szumy termiczne** reprezentowane przez prąd $i_T(t)$, są to:
 - ◆ szumy rezystorów $i_{TR}(t)$,
 - ◆ tranzystorów w obwodach wzmacniaczy $i_{TW}(t)$.

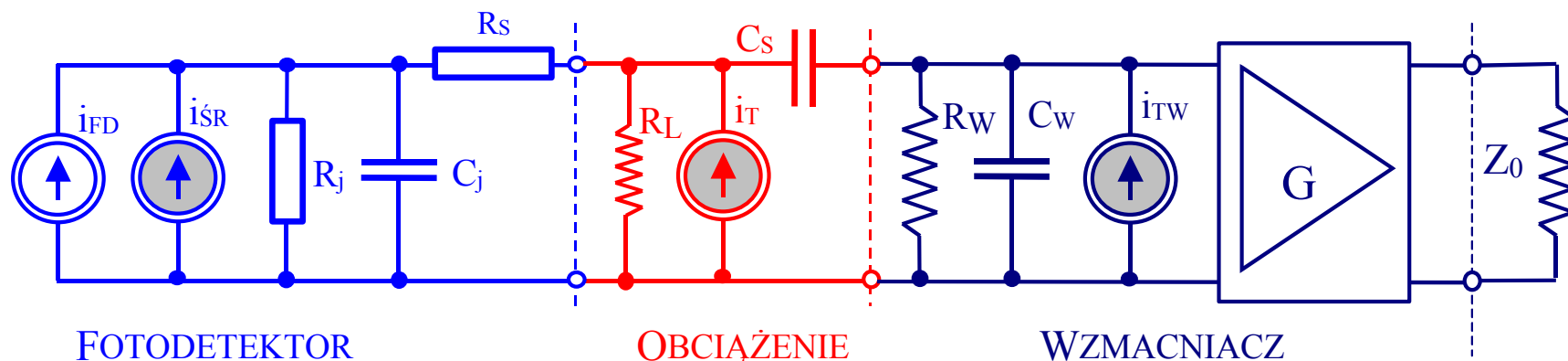
5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – ŹRÓDŁA SZUMÓW - 2

↪ W rezultacie otrzymujemy:

$$i(t) = i_{FD} + i_{\dot{S}R}(t) + i_T(t);$$

↪ 2 dodatkowe źródła szumów, o mniejszym znaczeniu:

- ◆ szumy tła: promieniowanie słoneczne, gwiazd, szczątkowe promieniowanie termiczne, mają znaczenie w dalekiej podczerwieni,
- ◆ szumy prądu ciemnego, jako rezultat termicznej generacji par elektron-dziura, efektu tunelowego, czy też prądu upływu.



Rys.5.18. Obwód zastępczy fotodetektora z pierwszym stopniem wzmacniacza i prądowymi źródłami szumów. $i_{\dot{S}R}(t)$ – prąd szumów śrutowych, $i_{TR}(t)$ oraz $i_{TW}(t)$ to szumy termiczne rezystora R_L i pierwszego stopnia wzmacniacza, R_W i C_W impedancja wejściowa wzmacniacza.

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – PARAMETRY SZUMOWE ODBIORNIKÓW

↗ Odbiornik optyczny jako element w systemie transmisji informacji charakteryzowany jest kilkoma podstawowymi parametrami:

- ◆ **Stosunek sygnału do szumu SNR** (ang. *signal-to-noise ratio*) jest definiowany jako stosunek średniej mocy sygnału do mocy szumów. Dla zmiennych jak prąd lub napięcie o wartościach zmieniających się przypadkowo jest to stosunek: (wartość średnia)²/średnie odchylenie.
- $$\text{SNR} = \frac{\bar{i}^2}{\sigma_i^2};$$
- ◆ **Minimalny sygnał detekowany MDS** (ang. *minimum-detectable signal*) definiowany jest jako średnia wartość sygnału, dla której $\text{SNR} = 1$.
 - ◆ **Moc równoważna szumom NEP** (ang. *noise equivalent power*) definiowana jest jako minimalna moc optyczna na jednostkę pasma wymagana do uzyskania $\text{SNR} = 1$.
 - ◆ **Czułość odbiornika** definiowana jest jako średnia wartość sygnału, dla której $\text{SNR} = \text{SNR}_0$, przy czym wartość SNR_0 dobierana jest różnie dla rozmaitych systemów, zwykle w granicach $10 \dots 10^3$, w mierze logarytmicznej od 10 dB do 30 dB powyżej poziomu szumów.
 - ◆ **Stopa błędów BER** (ang. *bit error rate*) - prawdopodobieństwo popełnienia błędów. Opisuje czułość odbiorników cyfrowych w systemie *on-off keying*, jest to minimalna moc optyczna - np. liczba fotonów - dla której stopa błędów jest mniejszą od 10^{-9} . Jeśli p_0 to prawdopodobieństwo potraktowania "1" jako "0", a p_1 to prawdopodobieństwo wzięcia "0" za "1" to:
- $$\text{BER} = \frac{p_0 + p_1}{2} < 10^{-9};$$

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – SZUMY FOTONÓW I FOTOELEKTRONÓW

- ↪ Rozpatrzmy składniki szumów śrutowych: szumy strumienia fotonów i szumy fotoelektronów.
- ↪ Do fotodetektora dociera strumień fotonów $\Phi = P_{\text{OPT}}/hf$. W przedziale czasu ΔT dociera do detektora średnio fotonów $\bar{n} = \Phi\Delta T$.
- ↪ Rozkład gęstości dochodzących fotonów jest zgodny z rozkładem Poisson'a. Średnie kwadratowe odchylenie równe jest $\sigma_n^2 = \bar{n}$. Można teraz obliczyć dla szumów strumienia fotonów wartość SNR:
- $$\text{SNR} = \frac{\bar{n}^2}{\sigma_n^2} = \bar{n};$$
- ↪ Przykłady: Gdy $\bar{n} = 100$ fotonów, to liczba fotonów mieści się w granicach 100 ± 10 . Dla $\text{SNR} = 1$ wartość minimalnego detekowalnego sygnału równa jest 1 foton, co dla $T = 1 \mu\text{s}$ i $\lambda = 1240 \text{ nm}$ daje minimalną detekowalną moc równą $0,16 \text{ pW}$. Dla uzyskania $\text{SNR} = 1000$ (30 dB) potrzeba 1000 fotonów, gdy $T = 10 \text{ ns}$ i $\lambda = 1240 \text{ nm}$ potrzeba na to 10^{11} fotonów/sek., co dla $\lambda = 1240 \text{ nm}$ daje moc 16 nW .
- ↪ Ze strumienia fotonów $\Phi = P_{\text{OPT}}/hf$, w przedziale czasu ΔT dociera do detektora średnio fotonów $\bar{n} = \Phi\Delta T$, które generują średnio $\bar{m} = \eta\bar{n}$ par elektron dziura (η jest wydajnością kwantową, prawdopodobieństwem wystąpienia takiej generacji).
- ↪ Rozkład gęstości dochodzących fotonów jest także teraz zgodny z rozkładem Poisson'a, średnie kwadratowe odchylenie równe jest teraz $\sigma_m^2 = \bar{m}$, a SNR dla szumów fotoelektronów zapisuje się następująco:
- $$\text{SNR} = \frac{\bar{m}^2}{\sigma_m^2} = \eta\bar{n};$$
- ↪ Przykłady liczbowe te same z uwzględnieniem wydajności kwantowe η .

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – SZUMY ŚRUTOWE

- ↪ Fotodetektor jest źródłem prądu o średniej wartości i_{FD} , który jest miarą strumienia fotonów Φ lub mocy optycznej P_{OPT} . Miarą fluktuacji tego prądu jest prąd szumów śrutowych $i_{SR}(t)$.
- ↪ Szum śrutowy jest szumem białym, jego gęstość widmowa S_{SR} jest niezależna od częstotliwości i proporcjonalna do prądu i_{FD} (e jest ładunkiem elektronu).

$$S_{SR}(f) = ei_{FD};$$

- ↪ Do obliczenia prądu szumów śrutowych i jego średniego odchylenia σ_{SR}^2 należy uwzględnić pasmo odbiornika optycznego B [Hz], związane z funkcją przenoszenia $H_T(f)$:

$$B = \int_0^{\infty} |H_T(f)|^2 df;$$

- ↪ Można teraz obliczyć średnie kwadratowe odchylenie σ_{SR}^2 :

$$\sigma_{SR}^2 = \langle i_{SR}^2(t) \rangle \int_{-\infty}^{\infty} S_{SR}(f) df$$

- ↪ Ostatecznie otrzymujemy:

$$\sigma_{SR}^2 = 2eBi_{FD};$$

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – SZUMY TERMICZNE

↪ Opis promieniowania ciała czarnego, dokładnie i z dobrym przybliżeniem (K stała Boltzman'a):

$$P_n = \frac{hfB}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \cong kTB; \quad \text{gdy} \quad \frac{hf}{kT} \cong \frac{f[\text{GHz}]}{20T[\text{K}]} \ll 1;$$

↪ Na zaciskach zwartego rezystora R_L w temperaturze $T[\text{K}]$ występuje prąd szumów termicznych $i_T(t)$ wywołany przypadkowym ruchem elektronów. Jego średnia wartość $i_T(t) = 0$, ale wartość skuteczna $\neq 0$.

↪ Kwadrat prądu szumów termicznych wynosi: $i_T^2 = \frac{4kTB}{R_L};$

↪ Szum termiczny jest „biały”, gęstość widmowa $S_T(f)$ zapisuje się wzorem: $S_T(f) = \frac{2kT}{R_L};$

↪ Można teraz obliczyć średnie kwadratowe odchylenie σ_T^2 : $\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle \int_{-\infty}^{\infty} S_T(f) df$

↪ Ostatecznie otrzymujemy:

$$\sigma_T^2 = \frac{4kTB}{R_L};$$

↪ A jeśli uwzględnić współczynnik F szumów wzmacniacza:

$$\sigma_T^2 = \frac{4kTBF}{R_L};$$

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – SZUMY ODBIORNIKA OPTYCZNEGO

↪ Prąd szumów odbiornika optycznego z fotodetekтором p-i-n ma na rys.5.19. 3 składniki:

$$i_{\text{SZUMY}} = i_{\text{SR}}(t) + i_{\text{T}}(t) + i_{\text{TW}}(t);$$

↪ Suma wariancji składników prądu wynosi:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{SR}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2 = 2eBi_{\text{FD}} + \frac{4kTBF}{R_L};$$

↪ Obliczamy teraz stosunek SNR odbiornika optycznego:

$$\text{SNR} = \frac{i_{\text{FD}}^2}{\sigma^2} = \frac{R_{\text{FD}}^2 P_{\text{OPT}}^2}{2eR_{\text{FD}}P_{\text{OPT}}B + \frac{4TkBF}{R_L}};$$

↪ Jeśli pominąć szumy śrutowe jako małe w stosunku do termicznych, to otrzymujemy:

$$\text{SNR} = \frac{R_{\text{FD}}^2 P_{\text{OPT}}^2 R_L}{4TkBF};$$

↪ A jeśli szumy śrutowe przeważają:

$$\text{SNR} = \frac{R_{\text{FD}} P_{\text{OPT}}}{2eB};$$

5.3. SZUMY ODBIORNIKÓW OPTYCZNYCH – SZUMY NADAJNIKA LASEROWEGO

- ↪ Analiza szumów odbiornika optycznego bierze pod uwagę jego szumy własne, to znaczy szumy śrutowe fotodetektora, powiększone w przypadku fotodetektorów lawinowych, oraz szumy pierwszego stopnia wzmacniacza. Analizowane szumy fotonów wynikają ze statystyki Poisson'a, a nie z szumów lasera nadajnika.
- ↪ Z wielu złożonych przyczyn moc wyjściowa lasera półprzewodnikowego nie jest stała w czasie. Jeżeli stałą jest moc średnią lasera, to moc chwilowa fluktuuje wokół tej średniej wartości.
- ↪ Miarą szumów nadajnika laserowego jest wartość **szumów natężenia RIN(f)** (ang. *relative intensity noise*). Gęstość szumów natężenia jest funkcją częstotliwości. Obecność szumów natężenia w mocy optycznej docierającej do odbiornika, różna dla różnych laserów, pogarsza stosunek sygnału do szumu w porównaniu do wartości określonej parametrami odbiornika.
- ↪ Prąd szumów odbiornika optycznego z fotodetektorem p-i-n uzyskuje nowy składnik $i_L(t)$ związany z fluktuacją mocy lasera:

$$i_{\text{SZUMY}} = i_{\text{ŚR}}(t) + i_T(t) + i_{\text{TW}}(t) + i_L(t);$$

- ↪ Rośnie też suma wariancji składników prądu szumów:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{ŚR}}^2 + \sigma_T^2 + \sigma_L^2;$$

- ↪ Ostatni ze składników zapisuje się wzorem:

$$\sigma_L^2 = \frac{i_{\text{FD}}^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{RIN}(\omega) d\omega;$$

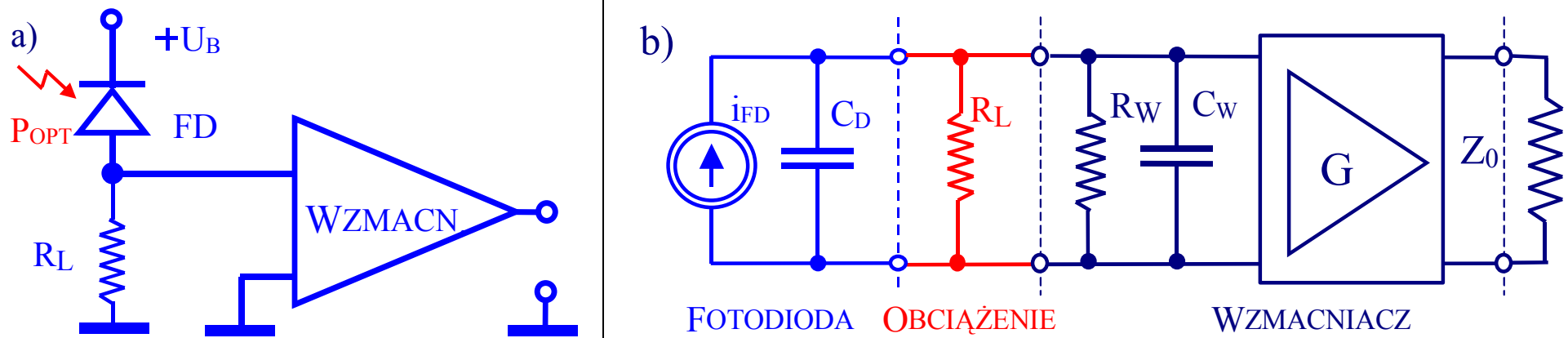
- ↪ Jak widać stosunek $i_{\text{FD}}^2 / \sigma_L^2$ jest niezależny od mocy optycznej docierającej do fotodetektora.

5.4. ODBIORNIKI OPTYCZNE – STOPIEŃ WEJŚCIOWY WYSOKOIMPEDANCYJNY

- ↗ Jedną z podstawowych struktur stopnia wejściowego odbiornika optycznego jest układ wysokoimpedancyjny. Jego uproszczony obwód zastępczy pokazuje rys.5.17b.
- ↗ W uproszczeniu reprezentują: fotodiodeę źródło prądowe $i_{FD} = R_{FD}P_{OPT}$ oraz pojemność $C_D = C_j + C_P$, wzmacniacz R_W i C_W , obciążenie $R_L \gg Z_0$, elementy szeregowe R_S , L_S i C_S pominięto.
- ↗ Admitancja wejściowa „widziana” przez źródło prądowe:
- ↗ Pasma odbiornika określają rezystancje R_L i R_W oraz pojemności fotodiody C_{FD} i wzmacniacza C_W :

$$Y_{WE}(\omega) = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_W} + j\omega(C_D + C_W);$$

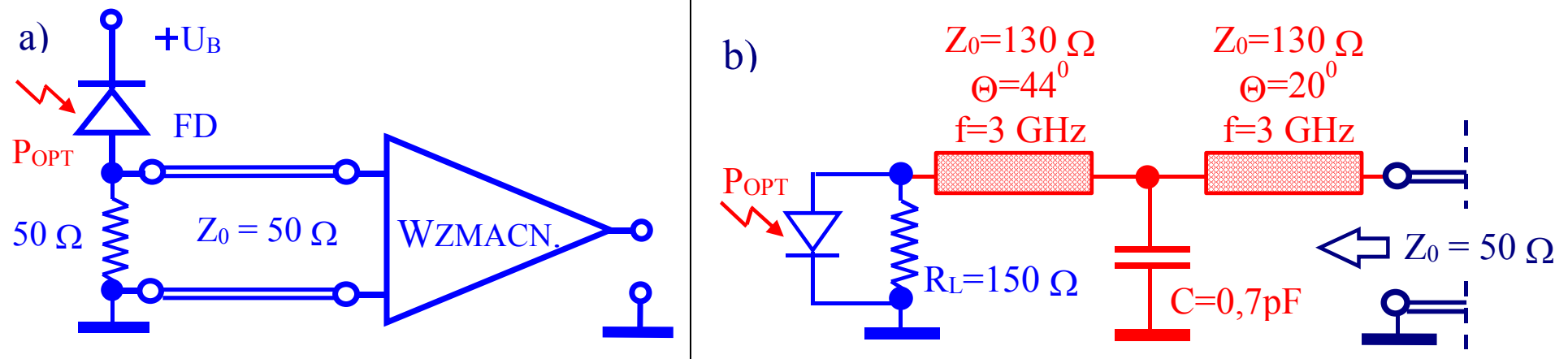
$$B = \frac{R_L + R_W}{2\pi R_L R_W (C_D + C_W)};$$



Rys.5.19. Wysokoimpedancyjny stopień wejściowy odbiornika optycznego. a) Fotodiody i wzmacniacz. b) Obwód zastępczy stopnia wejściowego.

5.4. ODBIORNIKI OPTYCZNE – STOPIEŃ WEJŚCIOWY NISKOIMPEDANCYJNY

- ↪ Duże wartości rezystancji R_L i R_W utrudniają uzyskanie dużej wartości szerokości pasma pracy B. Ponadto najpopularniejsze wzmacniacze szerokopasmowe są dopasowane do $Z_0 = 50 \Omega$. Z tego powodu chętnie stosuje się mniejsze wartości $R_L = 50 \dots 300 \Omega$.
- ↪ Zastosowanie szerokopasmowego wzmacniacza dopasowanego do $Z_0 = 50 \Omega$ wymaga:
 - ◆ znalezienia elementów obwodu zastępczego fotodetektora z obciążeniem R_L ,
 - ◆ zastosowania odpowiedniego szerokopasmowego obwodu dopasowującego.



Rys.5.20. Odbiornik optyczny ze stopniem wejściowym niskoimpedancyjnym.

a) Stopień wejściowy z $R_L = 50 \Omega$, bez obwodu dopasowującego, b) Obwód dopasowujący dla przypadku $R_L = 150 \Omega$.

5.4. ODBIORNIKI OPTYCZNE – STOPIEŃ WEJŚCIOWY TRANSIMPEDANCYJNY

↪ Szerokie pasmo pracy i dobre właściwości szumowe uzyskuje się w układzie odbiornika optycznego w konfiguracji ze wzmacniaczem transimpedancyjnym.

↪ Zachowanie układu opisane jest transimpedancją $Z_G(f)$:

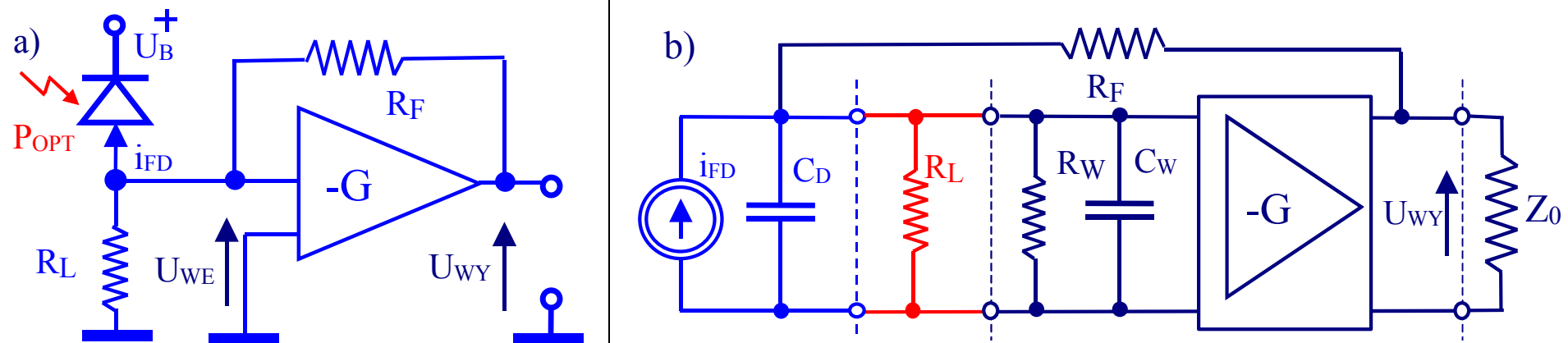
$$Z_G(f) = \frac{U_{WY}(t)}{i_{FD}(t)};$$

↪ W oparciu o obwód zastępczy uzyskujemy:

$$Z_G(\omega) = \frac{G}{\frac{1}{R_F}(G+1) + \frac{1}{R_L} + j\omega(C_D + C_W)} \cong \frac{G}{\frac{G}{R_F} + j\omega C_{WE}};$$

↪ Dobierając wzmocnienie G i wzmacniacz o odpowiednio dużym pasmie uzyskuje się dobre parametry odbiornika.

$$B = \frac{G}{2\pi(C_D + C_W)R_F};$$



Rys.5.21. Konfiguracja odbiornika ze wzmacniaczem transimpedancyjnym a) i jego obwód zastępczy b).

5.5. PODSUMOWANIE

- ↪ Fotodetektory użyteczne w telekomunikacji optycznej winny wydajnie absorbować promieniowanie optyczne o długościach fali 1200...1600 nm, odpowiadających oknom transmisji światłowodowej. W chwili obecnej jest to rodzina trzyczłonowa: fotodiody p-i-n, fotodiody lawinowe i fototranzystory.
- ↪ Fotodiody p-i-n są w ostatnich latach powszechnie uznane za najlepsze rozwiązanie problemu fotodetekcji sygnałów telekomunikacji optycznej. Ich atuty to:
 - ◆ duża wydajność kwantowa,
 - ◆ odbiór sygnałów optycznych o modulacji do 60...100 GHz,
 - ◆ niski poziom szumów śrutowych,
 - ◆ stabilne parametry w szerokim pasmie częstotliwości i łatwość dopasowania do wzmacniaczy odbiornika optycznego.
- ↪ Fotodiody lawinowe, do niedawna bardzo popularne ze względu na uzyskiwane wzmocnienie zostały wyparte ze względu na duże szумы i ograniczenia pasma pracy.
- ↪ Duże nadzieje, ze względu na możliwość uzyskiwania wzmocnienia i zwiększenia czułości fotoodbiorników, wiązane są z fototranzystorami i to zarówno tranzystorami polowymi HEMT, jak i tranzystorami bipolarnymi HBT. Jednak obecne konstrukcje są ciągle niedojrzałe do praktycznych zastosowań.