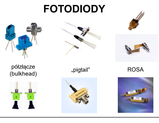
FOTODIODY

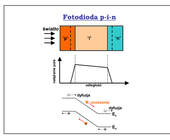


półtlące (bulkhead) | „pigtail" | ROSA

Plan wykładu

- **Fotodioda P-i-N oraz APD**
- **Szybkość działania fotodiod**
- **Szumy fotodetekcji**
- **Polaryzacja APD**

Fotodioda p-i-n



Charakterystyka statyczna fotodiody

$$i_p = i_s\left(\exp\left(U_s/U_t\right)-1\right)-i_d$$

Responsywność fotodiody

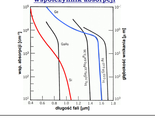
$$R = \frac{I_F}{P_F} = \eta\frac{q}{h}\frac{\lambda_0}{c}$$

$$\eta = \frac{\text{strumień gen. par e-h, pow. przepływ prądu}}{\text{strumień padających fotonów}}$$

η = prawdopodobieństwo, że foton wygeneruje parę e-h

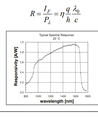
$$\eta = (1-r)(1-\xi)(1-\exp(-\alpha_s W))$$

Współczynnik absorpcji

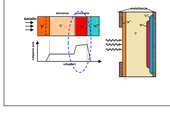


Charakterystyka spektralna fotodiody

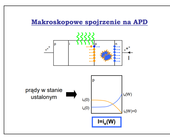
$$R = \frac{I_F}{P_F} = \eta\frac{q}{h}\frac{\lambda_0}{c}$$



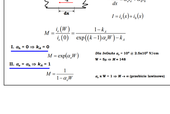
Fotodioda lawinowa
APD – Avalanche Photodiode



Makroskopowe spojrzenie na APD



Wzmocnienie APD



$$\frac{dI_0}{dx} = \alpha_n I_0 + \alpha_p I_0$$

$$\frac{dI_0}{dx} = \alpha_n I_0 + \alpha_p I_0$$

$$I = I_0(x) + I_0(x)$$

$$M = \frac{I_0(W)}{I_0(0)} = \frac{1-k_A}{\exp\left((k-1)\alpha_n W\right)-k_A}$$

I. $\alpha_p = 0 \Rightarrow k_A = 0$

$$M = \exp(\alpha_n W)$$

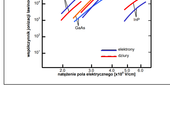
II. $\alpha_n = \alpha_p \Rightarrow k_A = 1$

$$M = \frac{1}{1-\alpha_n W}$$

Dla Ge/InGaAs $\alpha_n = 10^4 \div 2.5\cdot10^4$ 1/cm
W = 5µ ÷ W = 10µ

$\alpha_n \cdot W \approx 1 \Rightarrow M \to \infty$ (przebicie lawinowe)

Współczynniki jonizacji lawinowej α_n, α_p



Prąd unoszenia

$$dW = qEdx \qquad i = \frac{qE}{U}v_d = \frac{q}{m}v_d$$

dx, dt, dW – tw. Shockleya-Ramo

$$i_p = \frac{(-q)}{m}(-v_p) = \frac{q}{m}v_p \quad \leftrightarrow \text{prąd elektronów}$$

$$i_p = \frac{q}{m}v_p \quad \leftrightarrow \text{prąd dziur}$$

$$q_p = q_n \quad i_p = i_n \quad i_p = i_n$$

$$\frac{q_p}{m} = \frac{q_n}{m} \quad \frac{q_p}{m} = \frac{q_n}{m} \quad v_p = v_n \quad \leftrightarrow \text{wypadkowy ładunek}$$

Mikroskopowe spojrzenie na APD

Szybkość działania fotodiody

- stała czasowa
  $\tau = \tau_D + \tau_{RC}$
- czas przejścia nośników
  $\tau_D = w/v_s$ (~ 100 ps)
- stała czasowa „obudowy"
  $\tau_{RC} \approx$ ~ 100 ps
- składowe dyfuzyjne prądu
  - fotodioda heterozłączowa

Składowe dyfuzyjne – fotodioda heterozłączowa

InP
E_g=1.35 eV, l_n=0.92um

InGaAs
E_g=0.75 eV, l_n=1.65um

Szybkość działania fotodiody - APD

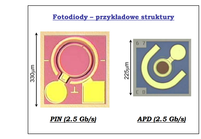
- stała czasowa APD
  $\tau = \tau_{D\,APD} + \tau_{RC}$

$$\tau_{APD} = \frac{w_n}{v_n} + \frac{w_p}{v_p} + \frac{w_n}{v_n}$$

$$\tau_D = \frac{w_n}{v_n} = 0.03 \Rightarrow \tau_D = \frac{w_n}{v_n} = \frac{w_n}{v_n}$$

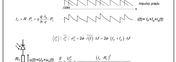
$$4 \Rightarrow 0.12\,\tau_D \approx$$

Fotodiody – przykładowe struktury



PIN (2.5 Gb/s) APD (2.5 Gb/s)

Szumy fotodetekcji - PIN



$$i_s = M \cdot P_s = M\frac{\eta q}{h\nu} \cdot P_s \qquad \text{szum}(L_m, n, p)$$

$$\overline{(i_n^2)} = \overline{i_s^2} = i_s^2 = 2e\,\overline{(i)}\,M^2 = 2e\,(i_s + i_d)\cdot M$$

$$\frac{S}{N} = \frac{i_s^2}{\overline{(i_n^2)}} \qquad \frac{S}{N} = \frac{(i_s R_L)^2}{2e\,(i_s + i_d)\cdot M^2 \cdot M^2 \cdot \Delta f R_L}$$

Szumy fotodetekcji - PIN

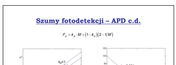
1. Limit_termiczny:

$$\frac{S}{N} = \frac{(i_s R_L)^2}{4kT\Delta f} = \frac{i_s^2 R_L}{4kT\Delta f}$$

2. Limit_śrutowy:

$$\frac{S}{N} = \frac{(i_s R_L)^2}{2e\,(i_s + i_d)\cdot M^2 \cdot M^2 \cdot \Delta f R_L} = \frac{i_s}{2e\,M^2 \cdot \Delta f}$$

Szumy fotodetekcji - APD



$$i_s = M \cdot P_s \qquad M^2 i_s$$

$$\overline{(i_n^2)} = \overline{i_s^2} = i_s^2 = 2e\,M^2 \cdot P_s\,\overline{(i)}\,M^2$$

$$\frac{S}{N} = \frac{i_s^2}{\overline{i_n^2}} \qquad \frac{S}{N} = \frac{(M\,i_s R_L)^2}{2e\,M^2 \cdot P_s\,(i_s + i_d)\cdot M^2 \cdot M^2 \cdot \Delta f R_L}$$

1. Limit_termiczny:

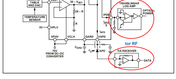
$$\frac{S}{N} = \frac{(M\,i_s)^2 R_L}{4kT\Delta f} \qquad \frac{S}{N} = \frac{(M\,i_s)^2 R_L}{4kT\Delta f}$$

2. Limit_śrutowy:

$$\frac{S}{N} = \frac{(M\,i_s R_L)^2}{2e\,P_s\,M^2\,(i_s + i_d)\cdot M^2 \cdot M^2 \cdot \Delta f R_L} = \frac{i_s}{2e\,P_s \cdot \Delta f}$$

Szumy fotodetekcji – APD c.d.

$P_s = 1$, $M = (1 \div 5)(2 \div 5W)$



Polaryzacja APD

APD-DRIVER
Uapd
Uapd
Uapd