

OPTICKÝ VLÁKNOVÝ SPOJ



Obr.1 Všeobecná bloková schéma optického prijímača

Rozhodujúce pre návrh prijímačov sú šumové podmienky. Stredná kvadratická hodnota tepelného šumového prúdu i_t v rezistore s odporom R je určená vzťahom

$$\overline{i_t^2} = \frac{4kTB}{R} \quad (1)$$

kde k je Boltzmannova konštanta, T je absolútna teplota rezistora a B je frekvenčná šírka pásma systému (elektrická frekvenčná šírka pásma po detekcii).

Stredná kvadratická hodnota šumu prúdu za tmy

$$\overline{i_d^2} = 2eBI_d \quad (2)$$

kde e je náboj elektrónu, I_d je prúd za tmy a B je šírka frekvenčného pásma.

Poissonová distribúcia

$$P(z) = \frac{z_m^z \exp(-z_m)}{z!} \quad (3)$$

kde z_m sa rovná hodnote rozptylu distribúcie pravdepodobnosti a z je počet detekovaných fotónov. Počet fotoelektrónov generovaných za čas τ

$$z_e = r_e \tau = \frac{\eta P_o \tau}{\hbar \omega} \quad (4)$$

Počet detekovaných fotónov za čas τ

$$z_m = z_e = \frac{\eta P_o \tau}{\hbar \omega} \quad (5)$$

Boseho—Einsteinova distribúcia pre nekoherentné svetlo

$$P(z) = \frac{z_m^z}{(1 + z_m)^{z+1}} \quad (6)$$

Absolútna citlivosť číslicového optického prijímača

$$P(0/1) = \exp(-z_m) = P(e) \quad (7)$$

kde $P(e)$ je pravdepodobnosť chyby systému. Výstrelový šum

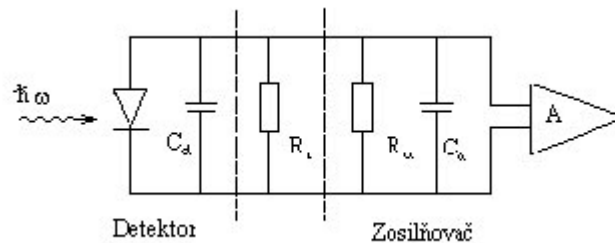
$$\overline{i_s^2} = 2eBI_p \quad (8)$$

Pomer S/N pre analógový optický prijímač (SNR)

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{i_s^2} = \frac{I_p}{2eB} = \frac{\eta P_o}{2\hbar\omega B} \quad (9)$$

Ekvivalentný obvod zapojenia optického prijímača je na obr. 2. Celkový výstrelový šum fotodiódy

$$\overline{i_{TS}^2} = 2eB(I_p + I_d + I_b) \quad (10)$$



Obr.2 Ekvivalentný obvod zapojenia optického prijímača

kde I_b je fotoprúd spôsobený žiarením pozadia. Tepelný šum zaťažovacieho rezistora

$$\overline{i_t^2} = \frac{4kTB}{R_L} \quad (11)$$

kde R_L je odpor zaťažovacieho rezistora. Šum zosilňovača

$$\overline{i_{amp}^2} = \frac{1}{B} \int_0^B (\overline{i_a^2} + \overline{v_a^2} |A|^2) df \quad (12)$$

kde Y je priečna admitancia a f je frekvencia. Zavedenie šumového čísla zosilňovača

$$\overline{i_t^2} + \overline{i_{amp}^2} = \frac{4kTBF_n}{R_L} \quad (13)$$

Pomer S/N pre prijímače s fotodiódou PN a PIN

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{2eB(I_p + I_d) + \frac{4kTB}{RL} + \overline{i_{amp}^2}} = \frac{I_p^2}{2eB(I_p + I_d) + \frac{4kTBF_n}{R_L}} \quad (14)$$

Celková kapacita na vstupe zosilňovača

$$C_T = C_d + C_a \quad (15)$$

C_d – kapacita fotodetektora a C_a – vstupná kapacita zosilňovača. Vzťah medzi časovou konštantou a šírkou frekvenčného pásma prijímača

$$\frac{1}{2\pi R_L C_T} \geq B \quad (16)$$

Výstrelový šum pre lavínovú fotodiódu (APD) s multiplikačným faktorom M

$$\overline{i_{SA}^2} = 2eB(I_p + I_d)M^{2+x} \quad (17)$$

kde x je parameter s hodnotou medzi 0.3 až 0.5 pre Si APD a medzi 0.7 až 1.0 pre Ge III—V zlúčeniny APD. Pomer S/N pre prijímače s lavínovou fotodiódou

$$\frac{S}{N} = \frac{M^2 I_p^2}{2eB(I_p + I_d)^{2+x} + \frac{4kTBF_n}{R_L}} = \frac{I_p^2}{2eB(I_p + I_d)M^x + \frac{4kTBF_n}{R_L} M^{-2}} \quad (18)$$

Optimálna hodnota multiplikačného faktora

$$M_{opt}^{2+x} = \frac{4kTF_n}{xeR_L(I_p + I_d)} \quad (19)$$

Závislosť zlepšenia pomeru S/N (Δ SNR) od M_{opt} pri x parametri je pri Si a Ge APD znázornená na obr. 3. Šumový faktor multiplikačného procesu má tvar

$$F(M) = M^x \quad (20)$$

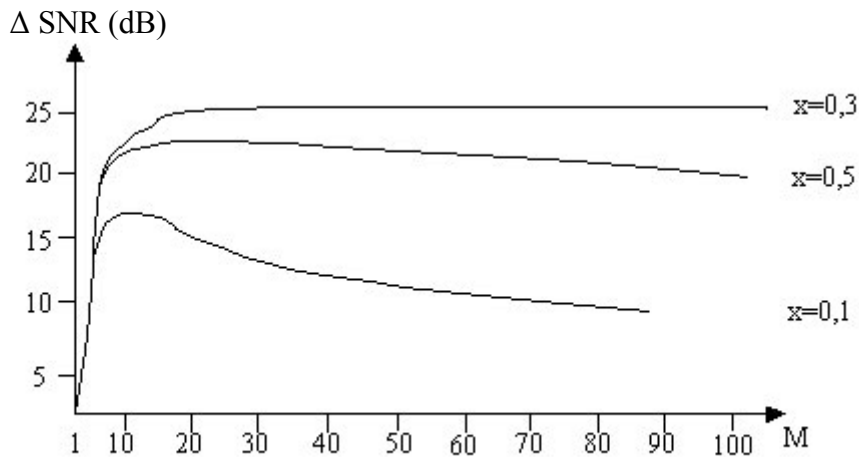
kde sme uvažovali, že vznikajúci šum je Gaussov biely šum. Presnejšie vyjadrenie tejto závislosti je v tvare

$$F(M) = M \left[1 - (1 - \xi) \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right] \quad (21)$$

kde uvažujeme, že nosiče sú injektované elektróny a ξ je pomer ionizačných koeficientov diery a elektrónov. Ak nosiče sú injektované diery, potom

$$F(M) = M \left[1 + \left(\frac{1-\xi}{\xi} \right) \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right] \quad (22)$$

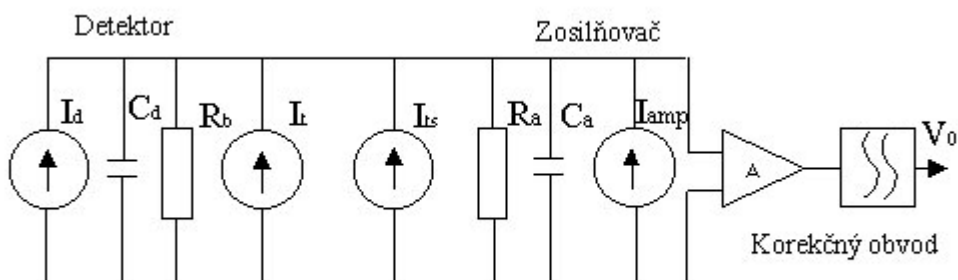
Hodnota ξ je pre Si APD 0.02 až 0.10 a pre Ge, resp. III—V zlúčeniny APD je medzi 0.3 až 1.0.



Obr.3 Závislosť SNR od optimálnej hodnoty M pri x ako parametri

V štruktúre optického prijímača musí byť zapojený korekčný obvod (obr. 4). Frekvenčná prenosová charakteristika korekčného obvodu

$$H_{eg}(\omega) = \frac{F\{h_{out}(t)\}}{F\{h_A(t)\}} = \frac{H_{out}(\omega)}{H_A(\omega)} \quad (23)$$



Obr. 4 Úplný ekvivalentný obvod číslicového optického prijímača

kde $h_{out}(t)$ je požadovaný tvar výstupného impulzu, $F\{ . . . \}$ označuje Fourierovu transformáciu a $h_A(t)$ je tvar korigovaného impulzu. Efektívny zaťažovací odpor fotodetektora

$$R_{TL} = \frac{R_b R_a}{R_b + R_a} \quad (24)$$

Prenosová funkcia optického prijímača

$$H_{c1}(\omega) \doteq \frac{-R_f}{1 + j\omega R_f \left(\frac{C_T}{G} + C_f \right)} \quad (25)$$

kde G je zisk zosilňovača s otvorenou spätnoväzobnou slučkou, R_f – odpor spätnoväzbového obvodu a C_f – kapacita spätnoväzbového obvodu. Gaussova distribučná funkcia je daná

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (26)$$

kde m je stredná hodnota a σ je štandardná odchýlka. Citlivosť fotodetektora

$$R = \frac{\eta e}{\hbar\omega} = \frac{\eta e\lambda}{hc} = \frac{I_p}{P_0} \quad (27)$$

e - náboj elektrónu, \hbar - Planckova konštanta, λ - vlnová dĺžka, ω - kruhová frekvencia a c - rýchlosť svetla, I_p je fotoprúd pre vlastnú absorpciu vytvorený dopadajúcim optickým výkonom P_0 .

PRÍKLADY

Príklad 1 Kremíková fotodióda PIN má na vlnovej dĺžke $0,8\mu\text{m}$ kvantovú účinnosť 65%. Vypočítajte: (a) Strednú hodnotu fotoprúdu, ak na ňu na vlnovej dĺžke $0,8\mu\text{m}$ dopadá optický signál s výkonom $5\mu\text{W}$; (b) Strednú kvadratickú hodnotu šumového prúdu, pre šírku frekvenčného pásma po detekcii 20 MHz; (c) Pomer S/N v dB, ak signál má úroveň strednej hodnoty fotoprúdu.

((a) $I_p=2,0124\mu\text{A}$, (b) $\overline{i_s^2} = 2eBI_s = 1,288 \cdot 10^{-17} \text{A}^2$; efektívna hodnota je $3,5887\text{nA}$, (c) S/Š (dB)=54,9755dB)

Príklad 2 Kremíková fotodióda PIN použitá v optickom prijímači pracujúcom na vlnovej dĺžke $0,9\mu\text{m}$ má kvantovú účinnosť 60%. V pracovnom bode má fotodióda prúd za tmy 3nA a jej zaťažovacia impedancia je $4 \text{k}\Omega$. Dopadajúci optický výkon je 200nW a šírka frekvenčného pásma signálu po detekcii je 5 MHz. Porovnajme celkový výstrelový šum, t.j. šum za tmy + výstrelový šum, vznikajúci vo fotodióde s tepelným šumom na zaťažovacej impedancii pri teplote 20°C .

($I_p=87,108\text{nA}$; výstrelový šum $\overline{i_{TS}^2} = 2eB(I_d + I_p) = 1,4437 \cdot 10^{-19} \text{ A}^2$, ef. hodnota $\sqrt{\overline{i_{TS}^2}} = 3,7996 \cdot 10^{-10} \text{ A}$; tepelný šum zaťažovacieho rezistora $\overline{i_t^2} = \frac{4kTB}{R_L} = 2,0226 \cdot 10^{-17} \text{ A}^2$, $\sqrt{\overline{i_t^2}} = 4,497 \cdot 10^{-9} \text{ A}$; **Vidíme, že efektívna hodnota tepelného šumu je 12-krát väčšia, ako efektívna hodnota výstrelového šumu.**)

Príklad 3 Fotodióda v príklade (Príklad 1) má kapacitu 8 pF. Vypočítajte : (a) Minimálnu hodnotu zaťažovacieho odporu, pri ktorej je šírka frekvenčného pásma po detekcii 20 MHz ; (b) Strednú kvadratickú hodnotu tepelného šumového prúdu pre tento rezistor pri teplote 25°C; (c) Pomer S/N v dB pre dopadajúci signál podľa príkladu (Príklad 1) ak prúd za tmy fotodiódy je 1nA.

((a) Minimálna hodnota zaťažovacieho odporu $R_L=995,22\Omega$; (b) hodnota tepelného šumového prúdu zaťažovacieho rezistora $\overline{i_t^2} = \frac{4kTB}{R_L} = 3,3081 \cdot 10^{-16} \text{ A}^2$ z čoho efektívna hodnota tepelného

šumového prúdu je $\sqrt{\overline{i_t^2}} = 18,188\text{nA}$; (c) šumový prúd vplyvom prúdu za tmy $\overline{i_d^2} = 2eBI_d = 64,085 \cdot 10^{-22} \text{ A}^2$, ef. hodnota $\sqrt{\overline{i_d^2}} = 80,05\text{pA}$ odstup S/Š

$$\frac{S}{N} = 20 \log \frac{I_p}{\sqrt{\overline{i_s^2} + \overline{i_d^2} + \overline{i_t^2}}} = 39,2749\text{dB} .)$$