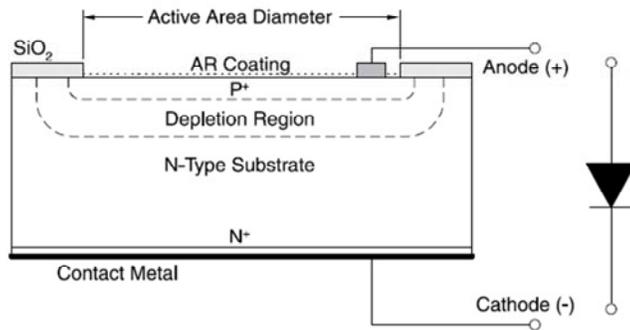


FOTODIODE P-I-N

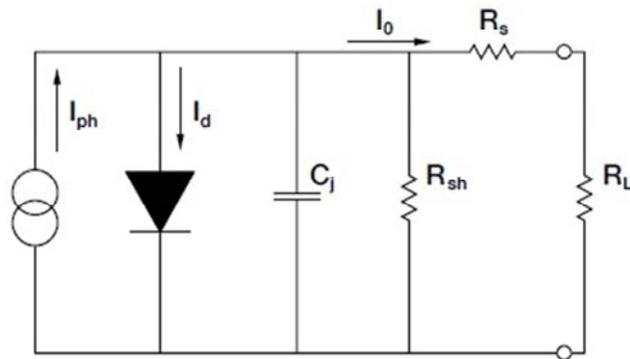
[Constructia fotodiodei]



[Constructia fotodiodei]

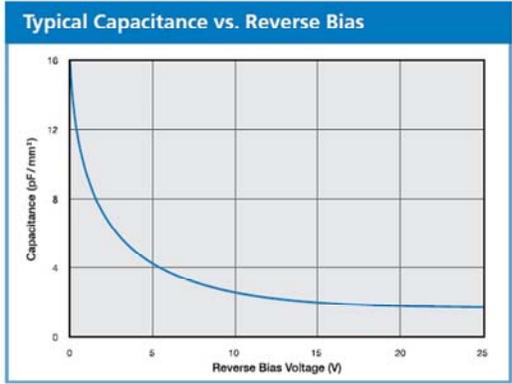


[Constructia fotodiodei]



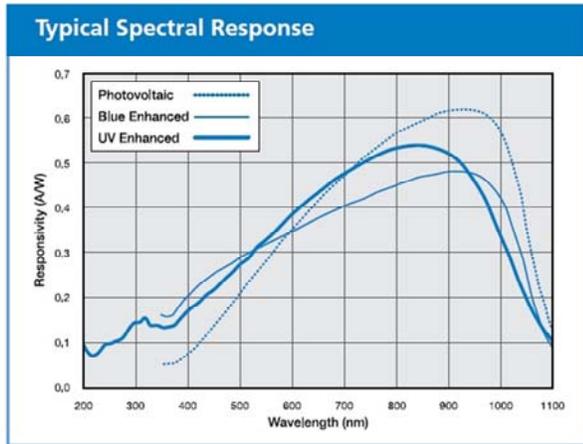
$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c$$

[Constructia fotodiodei]



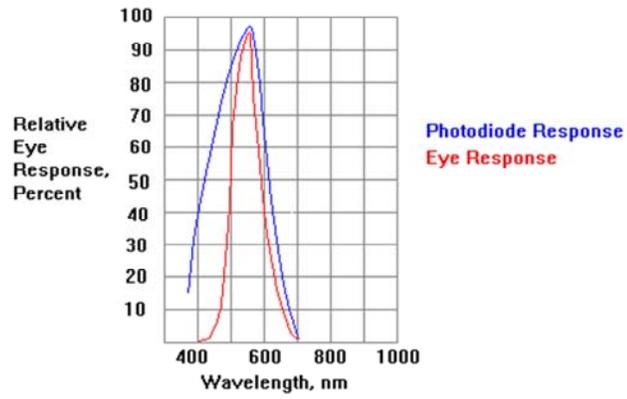
$$C_j = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A}{\sqrt{2\epsilon_{Si}\epsilon_0\mu\rho(V + V_{bi})}}$$
$$= A \sqrt{\frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0}{2\mu\rho(V + V_{bi})}}$$
$$= \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A}{W_d}$$
$$W_d = \sqrt{2\epsilon_{Si}\epsilon_0\mu\rho(V + V_{bi})}$$

[Responzivitatea fotodiodei]



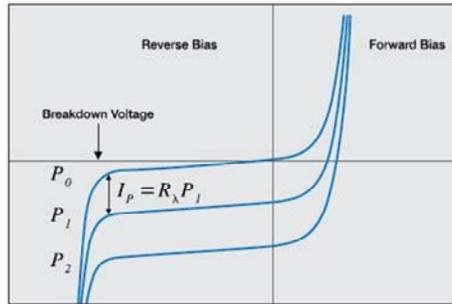
$$R_{\lambda} = \frac{I_P}{P}$$

[Caracteristica spectrala]



[Characteristic I-V]

Photodetector I-V Curves



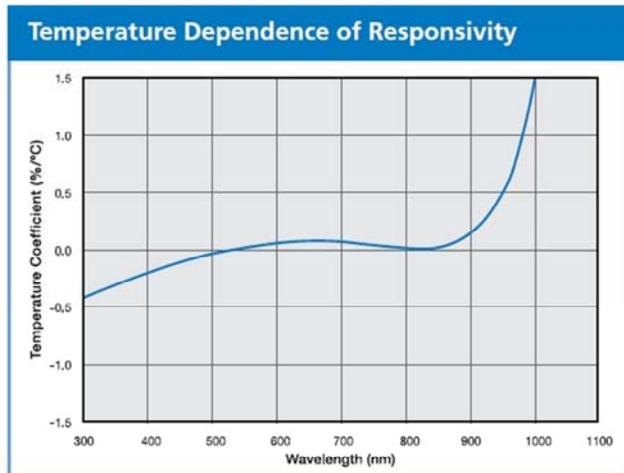
$$I_D = I_{SAT} \left(e^{\frac{kV}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{TOTAL} = I_{SAT} \left(e^{\frac{kV}{kT}} - 1 \right) - I_P$$

[Eficiencia cuantica]

$$Q.E. = \frac{R_{\lambda,real}}{R_{\lambda,ideal}} = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda q} = 1240 \frac{R_{\lambda}}{\lambda}$$

[Influenta temperaturii]



Sursele de zgomot

$$P(n) = e^{-n^*} \frac{(n^*)^n}{n!}$$

$$\langle n \rangle \equiv n^* = \sum_{n=0}^{\infty} n P(n)$$

$$\langle n^2 \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n^2 P(n) = (n^*)^2 + n^*$$

$$\langle (n - n^*)^2 \rangle = n^*$$

$$\langle (I(t) - I^*)^2 \rangle = \langle [(n - n^*)e / \Delta t]^2 \rangle = (n^* e^2) / (\Delta t)^2 = (I^* e) / (\Delta t)$$

Zgomotul de alice

$$S_s(f) = 2q(I_P + I_D)$$

$$\langle I_s^2(t) \rangle = \int_0^{\infty} S_s(f) df$$

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_P + I_D)(\Delta f)_{PD}}$$

$$I_{sN} \left(A/\sqrt{\text{Hz}} \right) = I_{sn} / \sqrt{(\Delta f)_{PD}} = \sqrt{\left[\sqrt{2q(I_P + I_D)} \right]}$$

Zgomotul termic

$$S_i(f) = \frac{4kT}{R_{SH}}$$

$$\langle I_m^2(t) \rangle = \int_0^{\infty} S_s(f) df$$

$$I_m = \sqrt{\frac{4kT (\Delta f)_{PD}}{R_{SH}}}$$

$$I_{tN} (A/\sqrt{Hz}) = I_m / \sqrt{(\Delta f)_{PD}} = \sqrt{(4kT/R_L)}$$

Zgomotul total

$$I_n = \sqrt{I_{tn}^2 + I_{sn}^2}$$

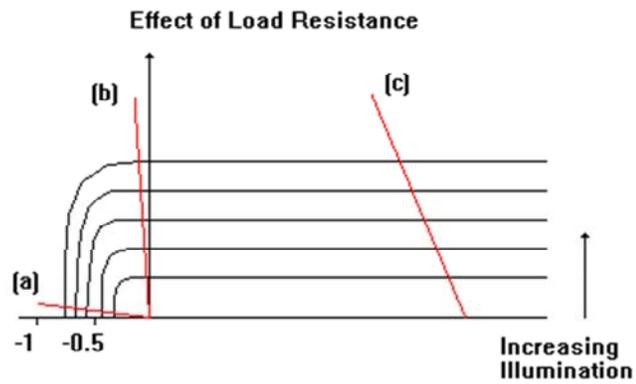
$$NEP = \frac{I_n}{R_\lambda}$$

SOLUTIE

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS RATING (TA)= 23°C UNLESS OTHERWISE NOTED

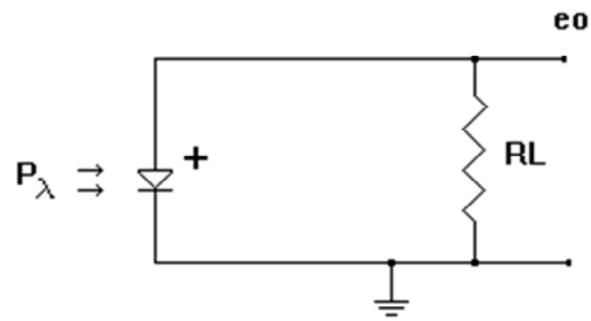
SYMBOL	CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
I_{sc}	Short Circuit Current	H = 100 fc, 2850 K	50	60		μA
I_D	Dark Current	$V_R = 10 V$		2	30	nA
R_{SH}	Shunt Resistance	$V_R = 10 mV$	0.5	2		$G\Omega$
C_J	Junction Capacitance	$V_R = 10 V, f = 1 MHz$		6	10	pF
λ_{range}	Spectral Application Range	Spot Scan	400		1100	nm
V_{BR}	Breakdown Voltage	$I = 10 \mu A$	50	100		V
NEP	Noise Equivalent Power	$V_R = 10V @ \lambda = Peak$		1.8×10^{-13}		W/\sqrt{Hz}
t_r	Response Time	$RL = 1K\Omega, V_R = 50 V$		10		nS

[Efectul rezistentei de sarcina]

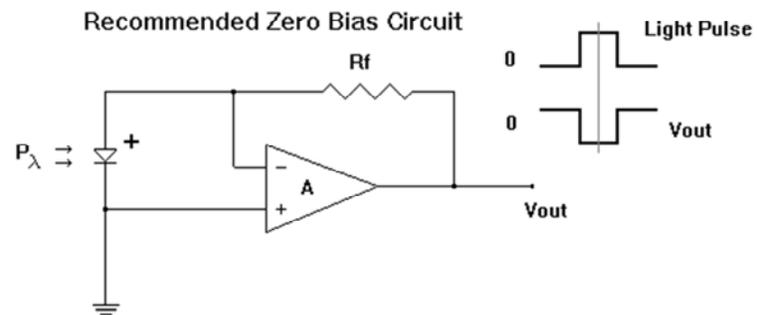


[Regimul fotovoltaic – dreapta (a)]

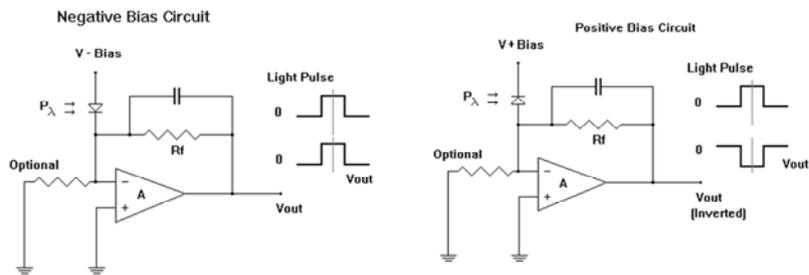
Basic Photovoltaic Circuit



[Regimul fotovoltaic – dreapta (b)]



[Regimul fotoconducitiv–dreapta c]



[Raportul semnal-zgomot (SNR)]

$$SNR = I_p^{*2} / i_{zg}^2$$

$$SNR = (R^2 P^{*2}) / i_{zg}^2$$

$$i_{zg} = \sqrt{(i_s^2 + i_t^2 + i_d^2 + i_{1/f}^2)}$$

$$SNR_t = (R^2 P^{*2}) / i_t^2 = (R^2 P^{*2} R_L) / [(4k_B T) BW_{PD}]$$

pentru a îmbunătăți raportul semnal-zgomot al unei fotodiode p-i-n, trebuie crescută rezistența de sarcină

[Puterea echivalenta de zgomot (NEP)]

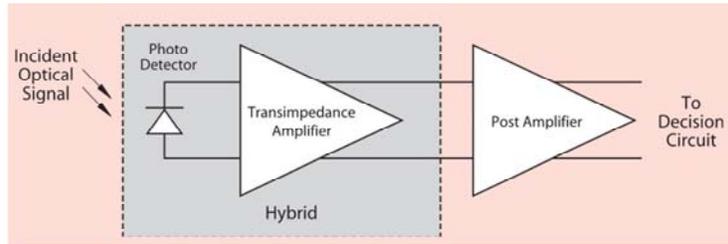
$$NEP(W) = i_{zg} / R$$

$$NEP_N(W / \sqrt{Hz}) = NEP / \sqrt{BW_{PD}} = i_{zgN} / R$$

$$NEP = \sqrt{\left\{ [NEP_{BW1} \sqrt{BW1}]^2 + [NEP_{BW2} \sqrt{BW2}]^2 + \dots + [NEP_{BWn} \sqrt{BWn}]^2 \right\}}$$

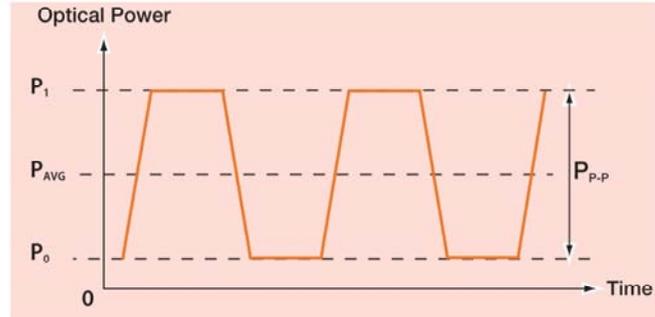
$$NEP(\lambda) = NEP_N [R_{\max} / R(\lambda)] \sqrt{BW}$$

Proiectarea Receptorului Optic



Una din cele mai critice parti ale unui sistem de comunicatii pe fibra optica este receptorul optic. Receptorul optic determina performanta intregului sistem deoarece el este partea de semnal cel mai mic. Asa cum se vede in figura, receptorul optic in comunicatiile digitale contine, tipic, un fotodetector, un amplificator de transimpedanta si un post-amplificator care este urmat de circuitul de decizie. Fotodetectorul produce fotocurentul proportional cu puterea optica incidenta. Amplificatorul cu transimpedanta converteste acest fotocurent intr-o tensiune, iar post-amplificatorul aduce aceasta tensiune la un anumit nivel standard, astfel incit ea sa poata fi utilizata de un circuit de decizie.

Proiectarea Receptorului Optic



$$P_{AVG} = \frac{P_0 + P_1}{2}$$
$$P_{P-P} = P_1 - P_0$$

În sistemul de comunicații optice digitale, șirul de date binare este transmis prin modularea semnalului optic. Semnalul optic cu codare NRZ poate avea una din cele două stări posibile ale puterii optice, în timpul transmiterii unui bit: nivel de putere optică ridicat ce corespunde la nivelul logic 1, sau nivel de putere optică redusă ce corespunde la nivelul logic 0. Într-un sistem real, puterea optică nu este niciodată zero când se transmite nivelul logic 0. Să presupunem că puterea corespunzătoare lui 0 este P_0 , iar cea corespunzătoare lui 1 este P_1 , ca în figura.

Sistemul este descris în termenii puterii medii P_{avg} și a Amplitudinii Modulației Optice sau Putere Optică virf-la-virf P_{p-p} .

Este important de notat că se consideră sisteme cu probabilități egale, 50%, de a avea 0 sau 1 la ieșire.

Proiectarea Receptorului Optic



$$r_e = \frac{P_1}{P_0}$$

$$r_e (dB) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$P_{AVG} = \frac{1}{2} \frac{(r_e + 1)}{(r_e - 1)} P_{p-p} \quad (2)$$

Raportul de stingere, r_e , este raportul dintre P_1 si P_0 . Acest raport poate fi exprimat in dB. Astfel, puterea medie in termenii puterii virf-la-virf si a raportului de stingere, este data in relatia 2.

EXEMPLU

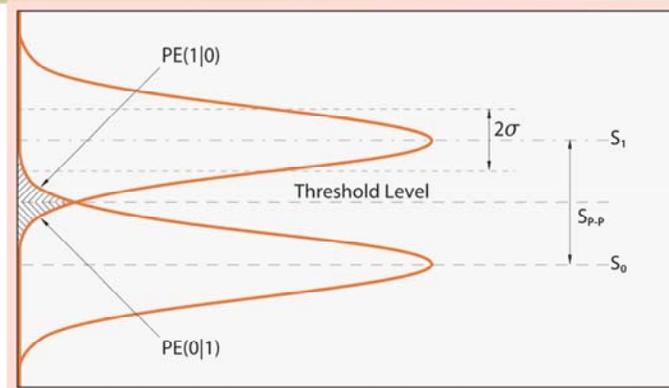
Proiectarea Receptorului Optic

$$\begin{aligned} P_{AVG} &= -17dBm \\ r_e &= 9dB \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{AVG} &= 20\mu W \\ r_e &= 7.94 \end{aligned}$$

$$P_{P-P} = 2 \frac{(r_e - 1)}{(r_e + 1)} P_{AVG} = 2 \frac{(7.94 - 1)}{(7.94 + 1)} \times 20\mu W = 1.55 \times 20\mu W = 31\mu W_{P-P}$$

Sensibilitate si BER



$$PE = \frac{1}{2} [PE(0|1) + PE(1|0)]$$

$$D_p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

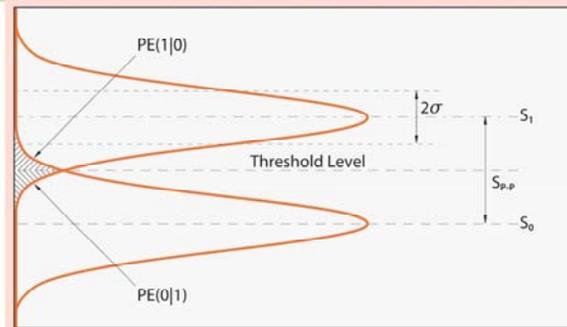
Numarul de erori la iesirea circuitului de decizie va determina calitatea receptorului si, evident, si a sistemului de comunicatii. BER (Bit-error-rate) este raportul dintre erorile in bitii detectati si numarul total de biti transmisi. Sensibilitatea receptorului optic, S , este puterea optica minima a semnalului optic incident care este necesara pentru a mentine un BER dat. Sensibilitatea poate fi exprimata in termeni de putere medie (dbm, uneori microW) la un raport de stingere (dB) dat, sau in termeni de putere optica virf-la-virf (microWp-p). Cerintele asupra BER-ului sunt specificate pentru diferite aplicatii, de exemplu in anumite aplicatii de telecomunicatii se specifica un BER de $10e(-10)$ sau mai bun; pentru anumite comunicatii digitale el trebuie sa fie egal sau mai bun decit $10e(-12)$.

Zgomotul este unul din cei mai importanti factori de eroare. Zgomotul fotodiodei PIN in sistemul pentru aplicatii digitale de mare viteza este, de regula, mult mai mic decit zgomotul amplificatorului cu transimpedanta (TIA). Considerind zgomotul termic al TIA ca singurul zgomot intr-un astfel de sistem, obtinem, de regula, rezultate bune pentru analiza ansamblului PD/TIA.

Putem estima probabilitatea erorii, PE, in cazul in care presupunem o distributie Gauss a zgomotului termic al amplificatorului, ca fiind data de relatia 1, unde PE(0/1) si PE(1/0) sunt probabilitatea de a decide 0 in loc de 1; respectiv 1 in loc de zero, in conditiile unor probabilitati egale de existenta in sistem a lui 0 sau 1.

Densitatea de probabilitate, D_p , pentru distributia Gauss este data in relatia 2., unde X este variabila aleatoare, sigma este deviatia standard si miu este valoarea medie.

Sensibilitate si BER



$$PE(1|0) = \int_{Prag}^{\infty} D_{P_0}(X) dX \quad PE(1|0) = \int_{S_{p-p}/2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X)^2}{2\sigma^2}\right) dX \quad (2)$$

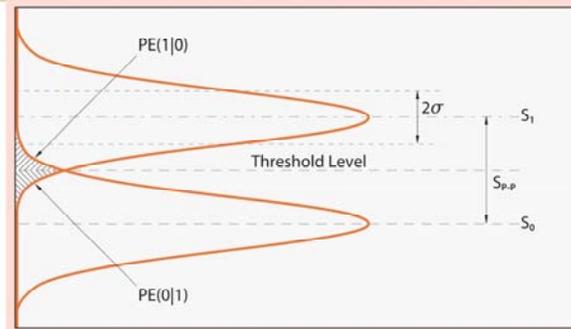
$$t = \frac{X}{\sigma} \quad (3)$$

$$PE(1|0) = \int_{S_{p-p}/2\sigma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (4)$$

Pentru a estima probabilitatea unei decizii incorecte, de exemplu $PE(1|0)$, trebuie sa integram densitatea de probabilitate pentru distributia 0, peste nivelul de prag, relatia 1. Considerind distributii simetrice (pragul este jumatate din semnalul virf-la-virf S_{p-p}), obtinem relatia 2.

Normalizind folosind relatia 3, obtinem relatia 4.

Sensibilitate si BER



$$PE = \operatorname{erfc}\left(\frac{SNR}{2}\right) \quad (1)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2)$$

Daca deviatiiile de la nivelele pentru 0 si 1 sunt egale, probabilitatea totala de eroare va fi data de relatia 1, unde $\operatorname{erfc}(x)$ este functia complementara de eroare data de relatia 2. In SNR, semnalul este in termeni de virf-la-virf si zgomotul este in termeni de valoare efectiva.

Sensibilitate si BER



<i>BER</i>	10^{-08}	10^{-09}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
<i>SNR</i>	11.22	11.99	12.72	13.40	14.06

In figura este prezentata functia $erfc(x)$, iar citeva valori ale SNR vs. BER sunt prezentate in Tabel 1.

In Tabel 1 s-a presupus ca $PE=BER$. Acest lucru se intimpla numai in cazul sistemului ideal in care timpul de masura se considera infinit.

Sensibilitate si BER

$$SNR = \frac{I_{p-p}}{I_{N,ef}} = \frac{P_{p-p} \times R_\lambda}{I_{N,ef}} \quad (1)$$

$$P_{p-p} = \frac{SNR \times I_{N,ef}}{R_\lambda} \quad (2)$$

$$S = P_{AVG@BER} = \frac{SNR \times I_{N,ef}}{2R_\lambda} \frac{r_e + 1}{r_e - 1} \quad (3)$$

r_e, dB	7.00	8.00	9.00	10.00	∞
r_e	5.01	6.31	7.94	10.00	∞
Power Penalty, dB	1.76	1.39	1.10	0.87	0

Prin urmare, putem calcula semnalul virf-la-virf de care avem nevoie pentru a obtine BER-ul cerut, din relatia 1, unde I_{p-p} este fotocurentul semnal, R este responsivitatea fotodiodei exprimata in A/W, iar $I_{N,ef}$ este valoarea efectiva a zgomotului la intrarea TIA. Obtinem relatia 2.

Pentru a estima sensibilitatea PD/TIA, la un anumit BER, avem nevoie sa calculam SNR necesar din Tabel 1 si apoi sa calculam puterea medie folosind relatia 3, unde primul factor este sensibilitatea pentru un raport de stingere infinit, iar al doilea factor este corectia pentru un raport de stingere finit.

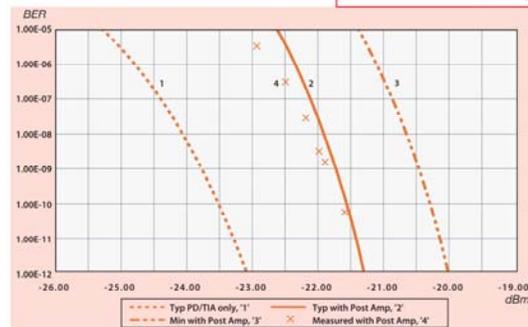
In Tabelul 2 sunt date citeva rezultate pentru diferite rapoarte de stingere.

Sensibilitate si BER

$$\Delta I_{PA} = \frac{V_{TH}}{R_{TIA}} \quad (1)$$

$$P_{P-P} = \frac{SNR \times I_{N,ef} + \Delta I_{PA}}{R_{\lambda}} \quad (2)$$

$$S = \frac{SNR \times I_{N,ef} + \frac{V_{TH}}{R_{TIA}}}{2R_{\lambda}} \times \frac{r_e + 1}{r_e - 1} \quad (3)$$



Pentru a calcula sensibilitatea totala a receptorului, trebuie sa consideram si sensibilitatea post-amplificatorului sau Tensiunea de prag la intrare V_{th} . Sensibilitatea post-amplificatorului ar trebui sa fie indicata in datele sale de catalog, si se exprima, de regula, prin Volti virf-la-virf (mVp-p). Pentru a obtine acelasi BER, trebuie sa crestem curentul virf-la-virf la cel putin valoare data de relatia 1, unde R_{tia} este coeficientul de transimpedanta al TIA.

Puterea optica virf-la-virf va fi data de relatia 2, iar sensibilitatea de relatia 3.

In figura se arata sensibilitatea tipica pentru sistemul InGaAs PD/TIA singur, sensibilitatile tipice si minime ale dispozitivului calculate cu 10 mVp-p prag pentru Post amplificator si valorile reale masurate pentru sistemul cu post amplificator.

Sensibilitate si BER

Exemplu

Sa calculam sensibilitatea unui hibrid InGaAs PD/TIA, pentru 2.5 Gbps, la un BER = 10e(-10), presupunind responsivitatea detectorului de 0.9 A/W, curentul efectiv de zgomot transpus la intrarea amplificatorului cu transimpedanta egal cu 500 nA, si raportul de stingere al semnalului optic 9 dB.

$$BER = 10^{-10} \quad SNR = 12.72$$

$$r_e = 9dB = 7.94$$

$$S = \frac{12.72 \times 0.5 \mu A (7.94 + 1)}{2 \times 0.9 A/W (7.94 - 1)} = 4.56 \mu W = -23.4 dBm$$

$$V_{TH} = 10mV \quad R_{TIA} = 2,8k\Omega$$

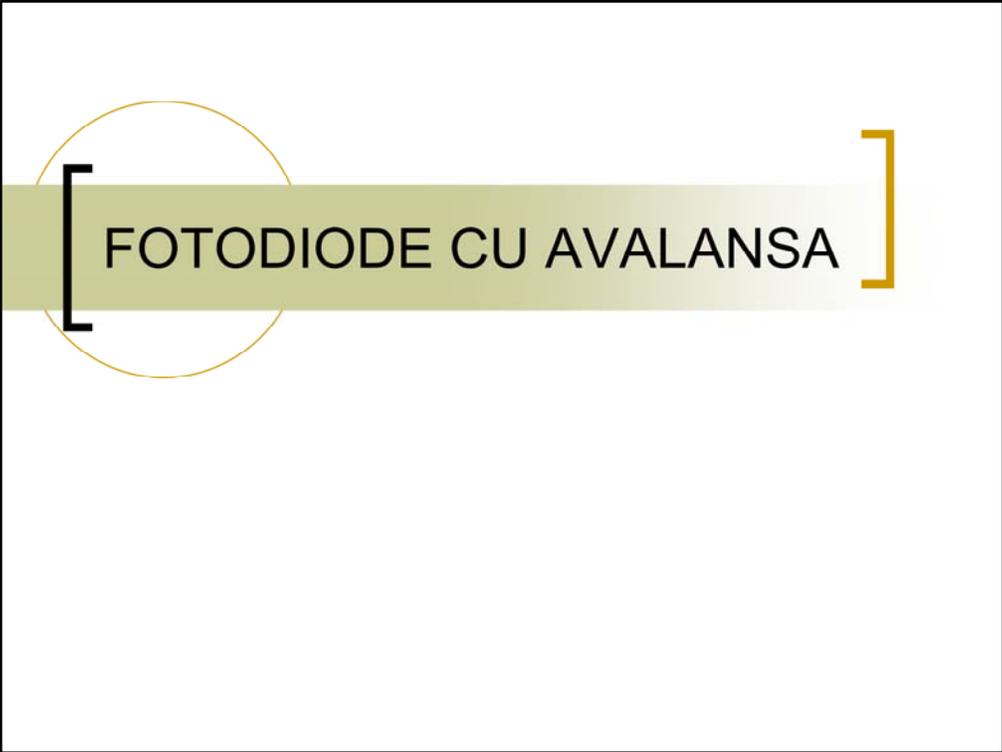
$$S = \frac{12.72 \times 0.5 \mu A (7.94 + 1) + \frac{10mV}{2.8k\Omega}}{2 \times 0.9 A/W (7.94 - 1)} = 7.11 \mu W = -21.5 dBm$$

Mai intii vom gasi SNR necesar pentru obtinerea unui BER = 10e(-10), din Tabel.

Apoi calculam sensibilitatea considerind $r_e = 7.94$.

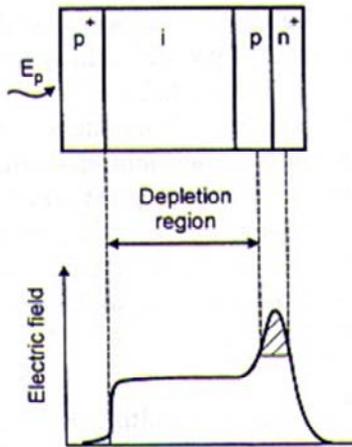
Pentru combinarea acestui hibrid PD/TIA cu un Post Amplificator avinf pragul de 10 mV, si presupunind $R_{tia} = 2.8 kohmi$, sensibilitatea devine 7.11. microW.

Post Amplificatorul afecteaza sensibilitatea cu 1.9 dB.



FOTODIODE CU AVALANSA

[Constructia fotodiodei cu avalansa]



$$R_{APD} = MR_{p-i-n} = M(\eta/1248)\lambda$$

[Banda fotodiodei cu avalanșă]

$$M \times BW = 1/(2\pi\tau_e)$$

$$\tau_e = k_A \tau_{tr}$$

$$\tau_{tr} = w/v_{sat}$$

$$M(\omega) = M/\sqrt{1 + (\omega\tau_e M)^2}$$

Zgomotul și raportul semnal-zgomot

$$i_s^2(\text{APD}) = M^2 [2eF_s(\text{RP})\text{BW}_{\text{PD}}] \quad F_s = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M)$$

$$i_t = \sqrt{(4k_B T / R_L) \text{BW}_{\text{PD}}}$$

$$\text{SNR}(\text{APD}) = I_P^{*2} / I_{\text{zgomot}}^2 = (\text{MRP})^2 / (i_s^2 + i_t^2) = (\text{MRP})^2 / \left\{ \left[2eM^2 F_s \text{RP} + (4k_B T) / R_L \right] \text{BW}_{\text{PD}} \right\}$$

$$\text{SNR}(\text{APD})_s = \text{RP} / (2eF_s \text{BW}_{\text{PD}})$$

$$\text{SNR}(\text{APD})_t = (\text{MRP})^2 / [(4k_B T / R_L) \text{BW}_{\text{PD}}]$$

$$M_{\text{opt}} = \left[(4k_B T) / (k_A R_L e \text{RP}) \right]^{1/3}$$

[EXEMPLU]

Să se calculeze SNR_s SNR_t

și raportul semnal-zgomot global pentru fotodiode cu avalanșă pe Si și InGaAs, dacă $M = 20$, $P = 0.1\mu W$, $R = 0.9 A/W$,

$$R_L = 50k\Omega \quad BW_{PD} = 2.5GHz \quad T = 300^\circ K$$

[SOLUTIE]

$$SNR_S = 45.2 \text{ pt.Si} \quad SNR_S = 8.8 \text{ pt.InGaAs} \quad SNR_t = 3912.3$$

$$\text{Pentru dioda pe Si} \quad F_S = 2.49 \quad SNR = 44.67$$

$$\text{Pentru dioda pe InGaAs} \quad F_S = 12.78 \quad SNR = 8.78$$

Interpretarea datele de catalog

