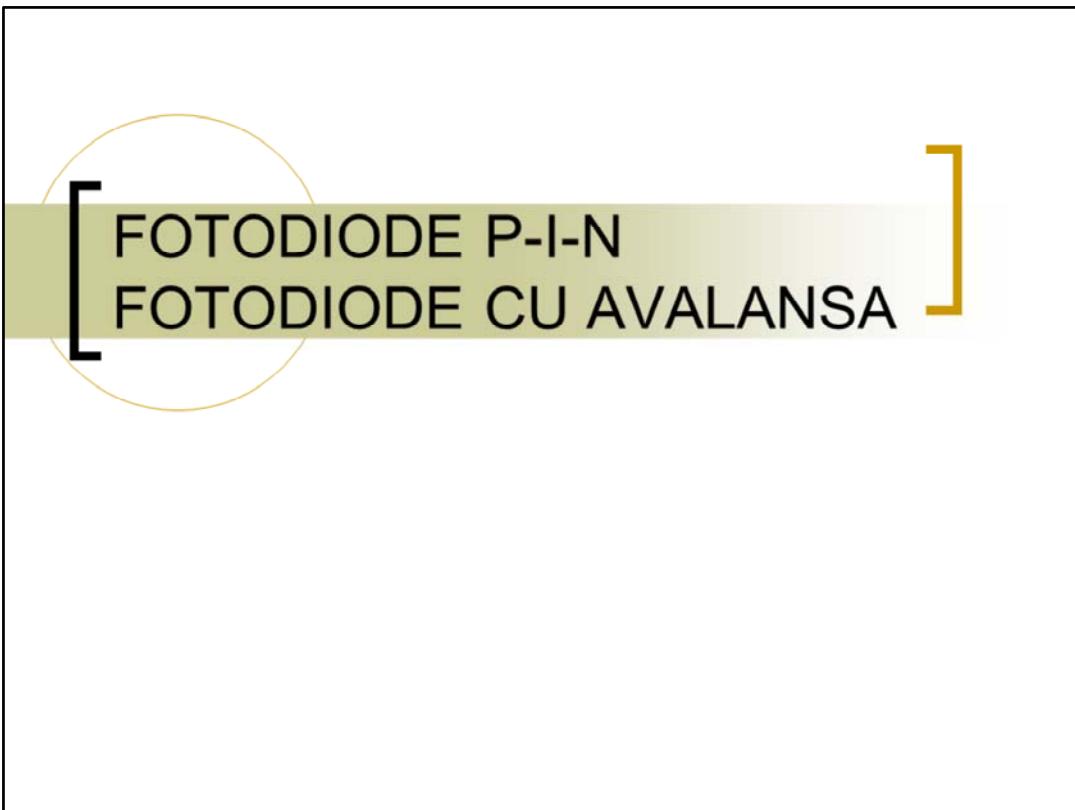


RECEPTOARE OPTICE

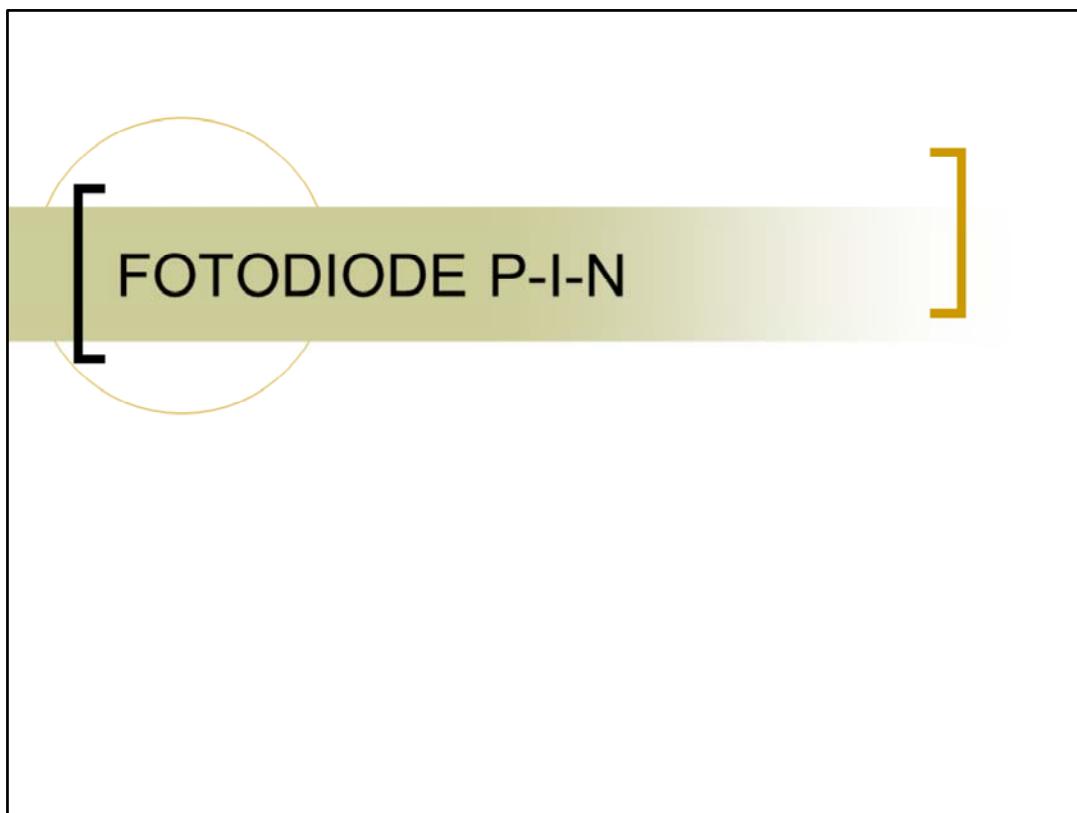


Fotodiodele pe Si sunt dispozitive semiconductoare care raspund la particole de mare energie sau fotoni.

Fotodiodele functioneaza prin absorbtia fotonilor sau particulelor incarcate si genereaza un curent electric in circuitul exterior, proportional cu puterea incidenta.

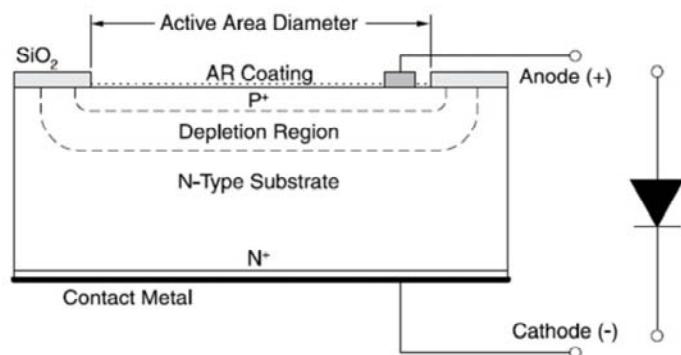
Fotodiodele pot fi calibrate pentru masuratori precise de la intensitati de sub 1 pW / cm² pina la intensitati de peste 100 mW / cm².

Fotodiodele pe Si sunt utilizate in diverse aplicatii cum ar fi: spectroscopie, fotografie, instrumentatie analitica, sensori optici de pozitie, aliniere de fascicole, caracterizare de suprafete, detectoare de lasere, comunicatii optice, instrumentatie pentru imagistica medicala.



Fotodiode

Constructia fotodiodei

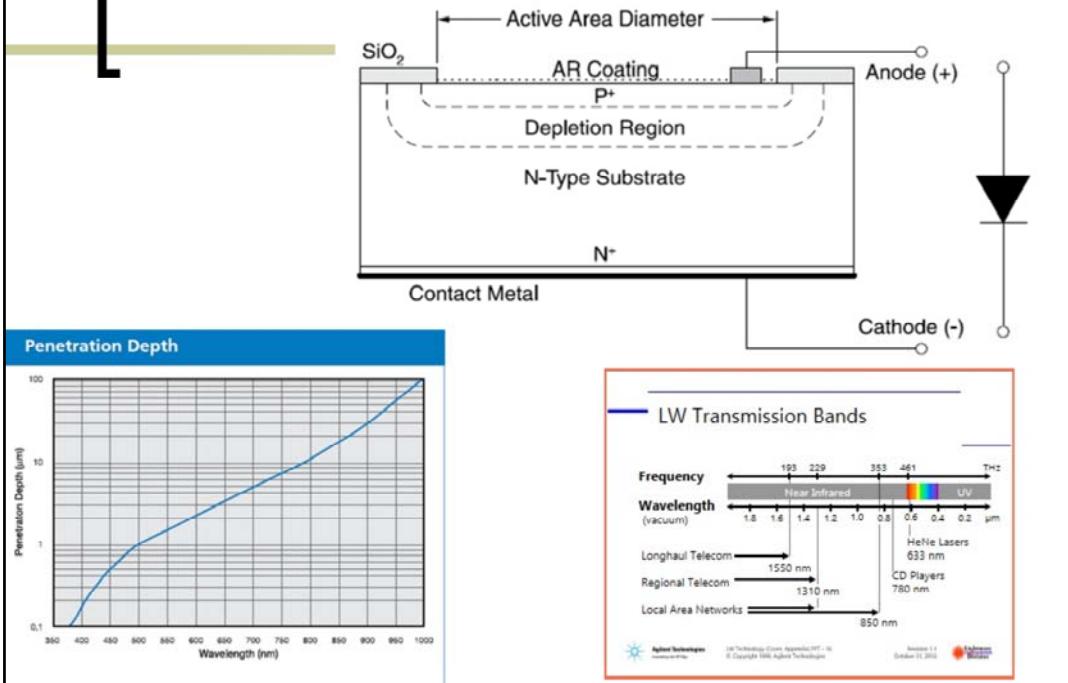


Fotodiodele pe Si realizate prin difuzie planara sunt simple jonctiuni P-N.

O jonctiune P-N poate fi realizata prin difuzarea fie a unor impuritati de tip P (anod), cum ar fi Borul, intr-un wafer de Si de tip N, sau a unor impuritati de tip N, cum ar fi Posforul, intr-un wafer de Si de tip P. Aria difuzata defineste aria activa a fotodiodei. Pentru a forma un contact ohmic este necesara o alta difuzie de impuritati pe partea posterioara a waferului. Impuritatile sunt de tip N pentru arii active de tip P si de tip P pentru arii active de tip N. Padurile de contact se depun pe fata anterioara a ariei active si pe partea posterioara a waferului unde acopera in intregime aria dispozitivului. Aria activa este ulterior pasivizata cu un strat anti-reflectorizant pentru a reduce reflexia luminii la o anumita lungime de unda specifica fotodiodei. Aria non-activa de pe fata anterioara a waferului este acoperita cu un strat gros de oxide de siliciu. Grosimea substratului original din wafer, se poate controla viteza si rezponsivitatea fotodiodei.

Facem observatia de pe acum ca fotodioda , cind este polarizata, trebuie sa functioneze la polarizare inversa, adica o tensiune negative trebuie aplicata pe anod si una pozitiva pe catod.

PRINCIPIUL DE FUNCTIONARE



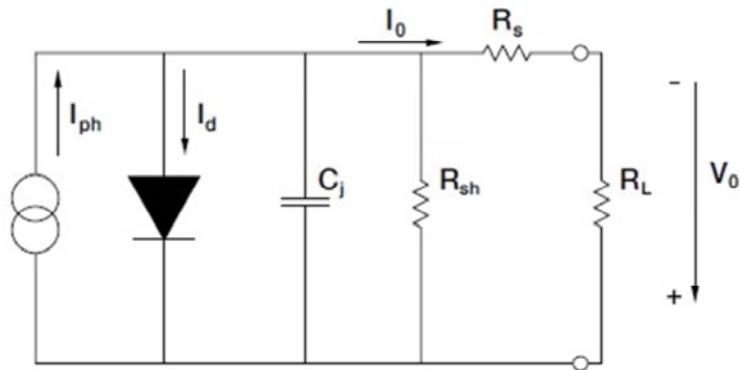
Siliciul este un semiconductor cu o banda interzisa egala cu 1.12 eV , la temperatura camerei.

La temperatura de zero absolut, banda de valenta este complet ocupata cu electroni , iar banda de conductie este complet libera. Daca temperature creste, electronii devin excitati si sar peste banda interzisa pina in banda de valenta folosind energia termica. Electronii pot fi ridicati in banda de conductie si de catre fotoni cu energie mai mare decit 1.12 eV, care corespunde la o lungime de unda de 1100 nm. Electronii din banda de conductie sunt liberi sa conduca curentul electric.

Datorita gradientului de concentratie, difuzia electronilor din regiunea de tip N spre regiunea de tip P si difuzia golorilor din regiunea de tip P spre regiunea de tip N, determina aparitia unei diferente de potential (tensiune interna) in lungul jonctiunii. Inter-difuzia electronilor si golorilor intre regiunile de tip P si N determina aparitia unei regiuni lipsite de purtatori liberi de sarcina. Aceasta este regiunea saracita. Cimpul electric din aceasta regiune are maximul la nivelul jonctiunii si este nul in afara regiunii saracite. Orice polarizare inversa aplicata din exterior creste tensiunea interna si largeste regiunea saracita. Perechile electron-gol create in regiunea saracita de lumina sunt despartite si purtatorii evacuati din regiune prin drift si colectati prin difuzie din regiunile nesaracite. Curentul astfel generat este proportional cu lumina incidenta . Lumina este absorbita exponential cu distanta si este proportional cu coeficientul de absorbtie. Coeficientul de absorbtie este foarte mare pentru lungimi de unda mai mici in regiunea ultraviolet si este mic pentru lungimi de unda mai mari. Astfel, fotonii cu lungime de unda mica , cum ar fi cei din UV, sunt absorbiți intr-un strat subtire la suprafata , in timp ce siliciu devine transparent la fotoni cu lungime de unda mai mare de 1200 nm.

Mai mult decit atit, fotonii cu energii mai mici decit banda interzisa nu sunt absorbiți de loc.

[Caracterisitici Electrice]



$$R_s = \frac{(W_s - W_d) \rho}{A} + R_c \quad (1)$$

O fotodioda pe Si poate fi reprezentata printr-o sursa de current in paralel cu o dioda ideală. Sursa de current reprezinta curentul generat de radiatia incidenta, iar dioda reprezinta jonctiunea p-n. In plus apar capacitatea jonctiunii (C_j) si o rezistenta paralel (R_{sh}), in paralel cu celelalte componente. Rezistenta serie (R_s) este conectata in serie cu toate componentele din model.

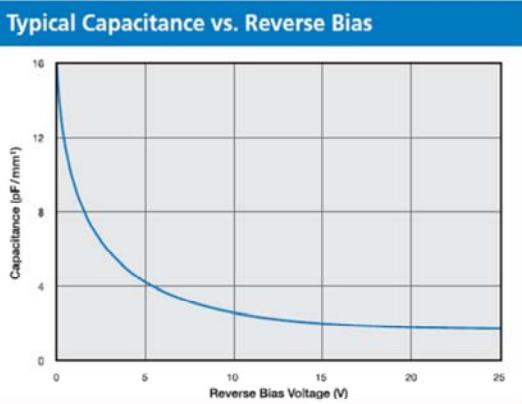
Rezistenta paralel , R_{sh}

Rezistenta paralel este panta caracteristicii current-tensiune a fotodiodei in origine. Desi o fotodioda ideală ar trebui sa aiba o rezistenta paralel infinita, valorile reale sunt cuprinse intre zeci de $M\Omega$ si mii de $M\Omega$. Experimental ea se obtine aplicind o tensiune ± 10 mV si masurind curentul . Rezistenta paralel este folosita pentru a determina curentul de zgomot in fotodioda in regim fotovoltaic (dioada nepolarizata). Pentru cele mai bune fotodiode este de droit o rezistenta paralel cit mai mare.

Rezistenta serie , R_s

Rezistenta serie a fotodiodei apare din rezistenta contactelor si rezistenta siliciului nedopat. Ea este data de relatia (1) in care W_s este grosimea substratului, W_d este latimea regiunii saracite, A este aria de difuzie a jonctiunii, ρ este rezistivitatea substratului si R_c este rezistenta contactului. Rezistenta serie este utilizata pentru a determina liniaritatea fotodiodei in regim fotovoltaic (diode nepolarizata). Desi o fotodioda ideală ar trebui sa aiba rezistenta serie zero, tipic valorile masurate ale ei sunt in intervalul 10Ω 1000Ω .

[Caracterisitici Electrice - 2]



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

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

$$= \frac{\epsilon_{Si} \epsilon_0 A}{W_d}$$

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

Capacitatea jonctiunii, C_j

Faintelele regiunii saracite actioneaza ca si armature ale unui condensator in paralel. Capacitatea jonctiunii este direct proportional cu aria de difuzie si invers proportional cu adincimea , W_d , a regiunii de difuzie. In plus, substraturile cu rezistivitate mai mare au capacitate a jonctiunii mai mica. Mai mult, capacitatea este dependent de tensiunea inversa aplicata, ca in Eq.(2) , unde $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ F/cm , este permitivitatea vidului, $\epsilon(Si) = 11.9$ este permitivitatea relative a Si, $\mu = 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ este mobilitatea electronului la 300 K, ρ este rezistivitatea siliciului, V_{bi} este tensiunea interna a siliciului si V este tensiunea aplicata.

In figura se arata dependent capacitatii de tensiunea inversa de polarizare. Capacitatea jonctiunii este utilizata pentru a determina viteza de raspuns a fotodiodei.

Caracterisitici Electrice - 3

$$t_r = \frac{0.35}{f_{3dB}} \quad (3)$$

$$t_{RC} = 2.2RC \quad (4)$$

$$t_R = \sqrt{t_{DRIFT}^2 + t_{DIFUZIE}^2 + t_{RC}^2} \quad (5)$$

Timpul de crestere / descrestere si raspunsul in frecventa , tr / tf / f3dB

Timpul de crestere si timpul de descrestere al unei fotodiode este definit ca timpul necesar semnalului sa creasca sau sa descreasca de la 10% la 90% sau de la 90% la 10% din valoarea finala. Acest parametru poate fi exprimat si prin raspunsul in frecventa, care este frecventa la care iesirea fotodiodei descreste cu 3 dB. El este grosier aproximat prin relatia (3).

Sunt trei factori care defines raspunsul in timp al unei fotodiode:

1. $t(DRIFT)$, timpul de colectare a sarcinii purtatorilor in regiunea saracita a fotodiodei.
2. $T(DIFUZIE)$, timpul de colectare a sarcinii purtatorilor in regiunea nedopata a fotodiodei
3. $T(RC)$, contanta de timp RC a combinatiei diode-circuit.

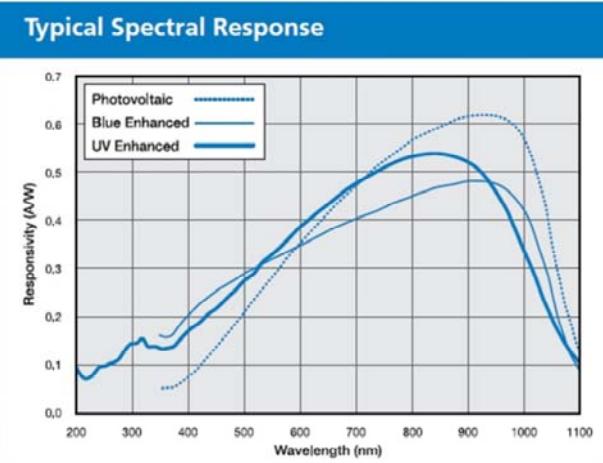
$T(RC)$ este data de relatia (4), unde R este suma dintre rezistenta serie si rezistenta de sarcina, iar C este suma dintre capacitatea jonctiunii si capacitatea parazita. Deoarece capacitatea jonctiunii depinde de aria de difuzie a fotodiodei si de tensiunea de polarizare inversa aplicata, relatia (2), timpi de crestere mai mari sunt obtinuti cu fotodiode cu arie de difuzie mai mica si tensiuni inverse de polarizare mai mari. In plus, capacitatea parazita poate fi minimizata folosind terminale scurte si un layout ingrijit al componentelor.

Timpul total de crestere este determinat de relatia (5).

In general, in regimul fotovoltaic de functionare (diode nepolarizata) , timpul de crestere este dominat de timpul de difuzie pentru arii de difuzie mai mici de 5 mm^2 si de constanta de timp RC pentru arii de difuzie mai mari , pentru orice lungime de unda.

In regimul fotoconductiv (diode polarizata invers), daca fotodioda este complet saracita, dominant va fi timpul de drift. In diodele care nu sunt complet saracite, totusi, toti cei trei factori vor contribui la raspunsul in timp.

Caracteristici optice



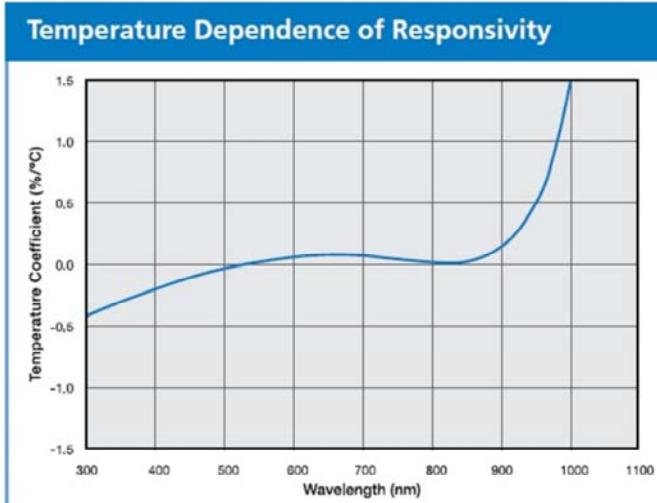
$$R_\lambda = \frac{I_P}{P} \quad (6)$$

Responzivitatea , $R(\lambda)$

Responzivitatea unei fotodiode din siliciu este o masura a sensibilitatii la lumina, si este definite ca raportul dintre photocurentul I_P si puterea luminii incidente P , la o lungime de unda data. Responzivitatea variaza cu lungimea de unda (vezi figura) , precum si cu tensiunea inversa de polarizare aplicata diodei si temperature.

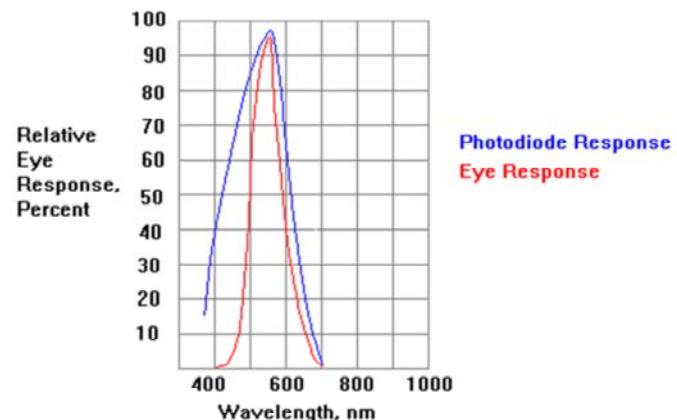
Responzivitatea creste usor cu tensiunea inversa de polarizare aplicata datorita imbunatatirii eficientei colectarii sarcinii in fotodioda.

Influenta temperaturii



Reponsivitatea variaza cu temperatura ca in figura. Aceasta dependent se datoreste scaderii sau cresterii latimii benzii interzise., datorita cresterii sau descresterii temperaturii.

[Caracteristica spectrala]



Spectrul responzivitatii poate varia de la lot la lot si este dependent de lungimea de unda. Prin selectie, variatia relative in responzivitate poate fi redusa la mai putin de 1%.

[Eficiencia cuantica]

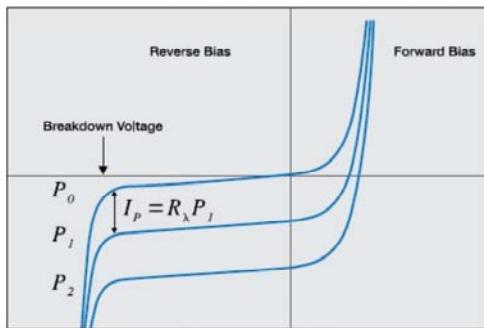
$$Q.E. = \frac{R_{\lambda,real}}{R_{\lambda,ideal}} = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda q} = 1240 \frac{R_{\lambda}}{\lambda} \quad (7)$$

Eficiencia quantica

Eficiencia quantica este definite ca fractia din numarul fotonilor incidenti care contribuie la fotocurent. Ea este legata de responzivitate prin relatia (7), unde, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js , este constanta lui Planck, $c = 3 \times 10^8$ m/s este viteza luminii in vid, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C este sarcina electronului, R_{λ} este responzivitatea in A/W si λ este lungimea de unda in nm.

Caracteristicile I-V

Photodetector I-V Curves



$$I_D = I_{SAT} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$I_{TOTAL} = I_{SAT} \left(e^{\frac{kV}{kT}} - 1 \right) - I_P \quad (9)$$

Caracteristicile I-V

Caracteristica I-V a unei fotodiode , in lipsa luminii incidente, este similara cu a unei diode redresoare. Cind fotodioda este polarizata direct, apare o crestere exponentiala a curentului. Cind este polarizata invers , apare un mic current invers, curentul de saturatie I_{SAT} . Aceasta este legat de curentul de intuneric , ID , prin relatia (8), unde ID este curentul de intuneric al fotodiodei, I_{SAT} este curentul invers de saturatie, q este sarcina electronului, V este tensiunea de polarizare aplicata, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, este constanta lui Boltzmann si T este temperatura absoluta (273 K = 0 °C). Relatia (8) este reprezentata in figura.

Pe baza relatiei (8) se pot define trei regimuri diferite:

- a) $V = 0$, in acest caz curentul de intuneric $ID = 0$.
- b) $V = +V$, in acest caz curentul creste exponential. Suntem in modul de polarizare directa.
- c) $V = -V$, cind se aplica o tensiune inversa importanta pe fotodioda, iar curentul de intuneric devine egal cu curentul invers de saturatie, $ID = -I_{SAT}$.

Iluminind fotodioda , deplasam curba I-V cu o cantitate egala cu photocurrentul (IP), astfel ca curentul total prin fotodioda devine relatia (9), unde IP este definit ca photocurrent si este dat de relatia (6)

Daca polarizarea inversa creste, exista o foarte rapida crestere a photocurrentului. Tensiunea inversa aplicata in acest moment este numita tensiune de strapungere. Aceasta este tensiunea maxima inversa care se poate aplica pe fotodioda. Tensiunea de strapungere variaza de la fotodioda la fotodioda si este masurata , de regula, la un current de intuneric de 10 μA .

Zgomotul in fotodiode

- Zgomot de alice
- Zgomot termic

Intro fotodioda pot fi identificate doua surse de zgomot: zgomot de alice si zgomot termic.

Zgomotul in fotodiode

- Zgomot de alice

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_P + I_D)(\Delta f)_{PD}} \quad (10)$$

Zgomotul de alice

Zgomotul de alice este dat de fluctuațiile aleatorii atât ale photocurentului cât și ale curentului de intuneric. Marimea zgomotului de alice este exprimată prin valoarea efectivă a curentului de zgomot dat de relația (10), care reprezintă din punct de vedere statistic deviația standard a semnalului aleator respectiv. În relația (10), q este sarcina electronului, IP este photocurentul, ID este curentul de intuneric al fotodetectorului și Δf este banda de măsură a zgomotului.

Zgomotul de alice este zgomotul dominant atunci cind fotodioda funcționează în regim fotoconductiv (polarizată).

Zgomotul in fotodiode

- Zgomot termic

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4k_B T (\Delta f)_{PD}}{R_{SH}}} \quad (11)$$

Zgomotul termic

Rezistenta parallel dintr-o fotodioda produce un zgomot termic datorat generarii termice de purtatori de sarcina in dispozitiv. Marimea curentului de zgomot generat este data de relatia (11), unde k_B este constanta lui Boltzmann, T este temperatura absoluta in grade Kelvin, Δf este banda de masura a zgomotului si R_{SH} este rezistenta parallel a fotodiodei.

Acest tip de zgomot este dominant in modul fotovoltaic (nepolarizat) de functionare a unei fotodiode.

Zgomotul in fotodiode

- Zgomotul total

$$I_{tn} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} \quad (12)$$

Zgomotul total

Curentul de zgomot total generat in fotodioda este dat de relatia (12)

Zgomotul in fotodiode

- Puterea echivalenta de zgomot

$$NEP = \frac{I_{tn}}{R_\lambda} = \frac{I_{tn}/\sqrt{\Delta f}}{R_\lambda} \quad (13)$$

Puterea echivalenta de zgomot

Puterea echivalenta de zgomot este puterea optica incidenta pe fotodioda care ar genera un photocurent egal cu curentul de zgomot. Ea este definita in relatia (13), unde R_λ este rezponsivitatea in A/W si I_{tn} este curentul total de zgomot normalizat al fotodiodei.

Valoarea puterii echivalente de zgomot poate varia de la 10^{-11} W / $\text{sqr}(Hz)$, pentru fotodiode cu arii active largi, in jos pina la 10^{-15} W / $\text{sqr}(Hz)$ pentru fotodiode cu arii active mici

Distributia spectrala a zgomotului

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

$$S_{sn}(f) = 2q(I_p + I_d)$$

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

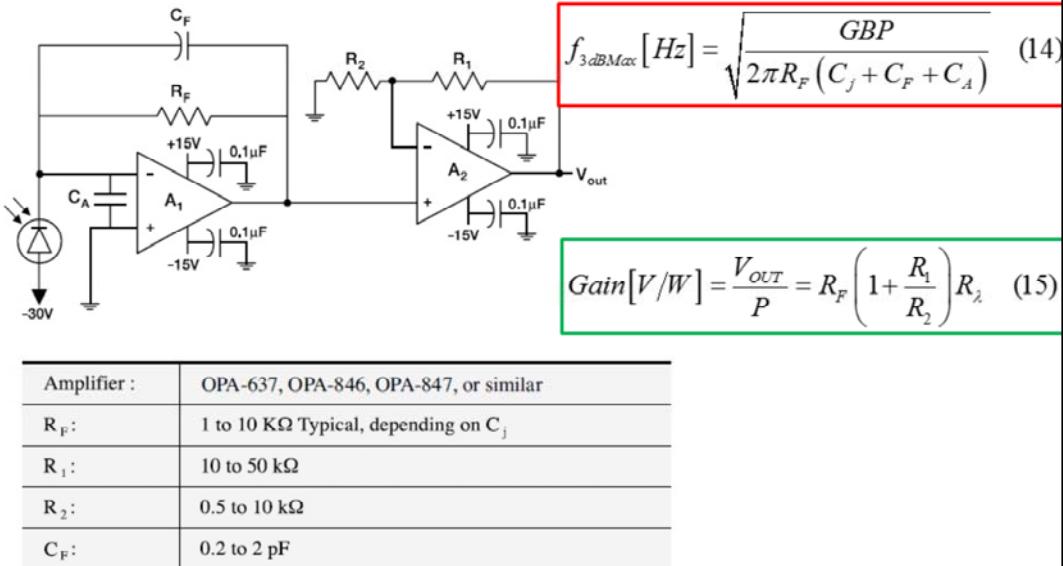
$$I_{sN}\left(A/\sqrt{Hz}\right) = I_{sn}/\sqrt{(\Delta f)_{PD}} = \sqrt{\left[\sqrt{2q(I_p + I_d)}\right]}$$

DATE DE CATALOG

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		GΩ
C _J	Junction Capacitance	V _R = 10 V, f = 1 MHz		6	10	pF
λrange	Spectral Application Range	Spot Scan	400		1100	nm
V _{BR}	Breakdown Voltage	I = 10 μA	50	100		V
NEP	Noise Equivalent Power	V _R = 10V @ λ = Peak		1.8x10 ⁻¹³		W/ √ Hz
t _r	Response Time	R _L = 1KΩ, V _R = 50 V		10		nS

Polarizarea fotodiodei - PC



Polarizarea

Semnalul unei fotodiode poate fi masurat fie ca un current, fie ca o tensiune. Masuratorile in current se dovedesc cele mai liniare si de banda cea mai larga. Fotocurentul generat este proportional cu puterea luminoasa incidenta si el poate fi transformat in tensiune folosind un amplificator cu transimpedanta.

Fotodiada poate fi polarizata sau nu.

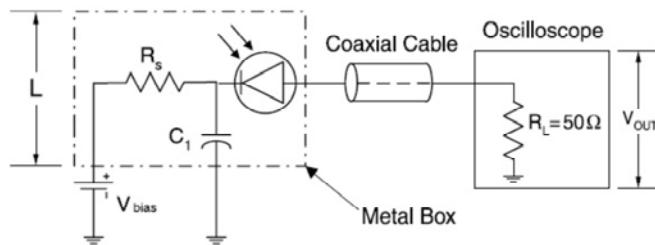
Modul Fotoconductiv – PC (diode polarizata)

Aplicarea unei polarizari inverse poate imbunatatii mult viteza de raspuns si liniaritatea fotodiodei. Acest lucru se datoreste cresterii regiunii saracite si deci, pe cale de consecinta, descresterii capacitatii jonctiunii. Aplicind o polarizare inversa, totusi vom creste curentul de intuneric si curentul de zgomot. In figura se prezinta un circuit pentru nivele mici de iluminare dar cu raspuns rapid, in care fotodiada este in regim fotoconductiv.

In configuratia prezentata, detectorul este polarizat invers pentru a reduce capacitatea jonctiunii si deci pentru a creste timpul de crestere tr. Amplificarea este realizata in doua etaje pentru a asigura atit cerintele de amplificare cit si cele de banda. Cele doua etaje include un pre-amplificator de transimpedanta pentru conversia current – tensiune si un amplificator de tensiune neinvorsor. Cistigul si banda sunt direct determinate de RF, prin ecuatia (14) si (15). Cistigul celui de-al doilea amplificator este (1+R1/R2). Condensatorul de reactie CF limiteaza banda amplificatorului de transconductanta pentru a evita oscilatiile. GBP este produsul cistig-banda al amplificatorului A1, iar CA este capacitatea de intrare a acestuia.

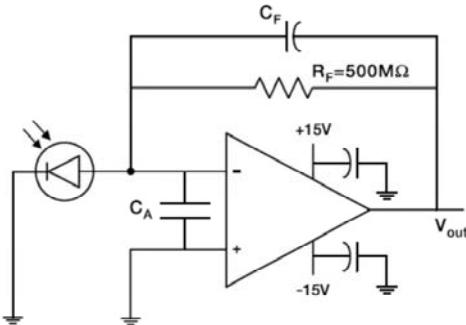
In aplicatiile de viteza mica se poate obtine un cistig mare, de exemplu > 10 MΩ, prin folosirea unei valori mari pentru RF, fara a mai fi necesar al doilea etaj.

Polarizarea fotodiodei – PC_2



In masuratorile de nivel mare si viteza mare, este preferat circuitul din figura. Cel mai cunoscut exemplu este masurarea duratei impulsului produs de un laser pe gaz, sau semiconductorsau orice alta sursa de lumina in impulsuri scurte. Iesirea fotodiodei este direct conectata la un osciloscop sau la un amplificator de viteza mare. Cind utilizam un osciloscop, banda osciloscopului poate fi reglata dupa durata impulsului, astfel incit raportul semnal / zgomot sa fie maxim. Intr-o astfel de aplicatie , tensiunea de polarizare este mare. Doua diode de protective trebuie conectate la intrarea osciloscopului intre intrare si masa. Pentru evitarea ondulatiilor in semnalul de iesire, cablul dintre detector si osciloscop trebuie sa fie scurt (de ex. < 20 cm) si terminat pe 50Ω . Fotodioda trebuie sa fie inchisa intr-o cutie metalica, daca este posibil, cu terminale scurte intre detector si condensator si intre detector si cablul coaxial. Cutia metalica trebuie legata printre-un condensator C_1 , cu termiale de lungime L mai mici de 2 cm, unde $R_L \cdot C_1 > 10\tau$ (τ este latimea impulsului in secunde). R_s se alerge astfel incit $R_s < V_{bias} / 10 \cdot I_{PDC}$, unde I_{PDC} este component de current continuu a photocurrentului. Banda este definite prin relatia $0.35 / \tau$. Tensiunea de polarizare inversa trebuie sa fie de minim 10 V .

Polarizarea fotodiodei - PV



$$f_{OP} [Hz] = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad (16)$$

$$V_{OUT} = R_F \times I_P \quad (17)$$

$$I_N \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right] = \sqrt{\frac{4k_B T}{R_F}} \quad (18)$$

Amplifier : OPA111, OPA124, OPA627 or similar

R_F : 500 MΩ

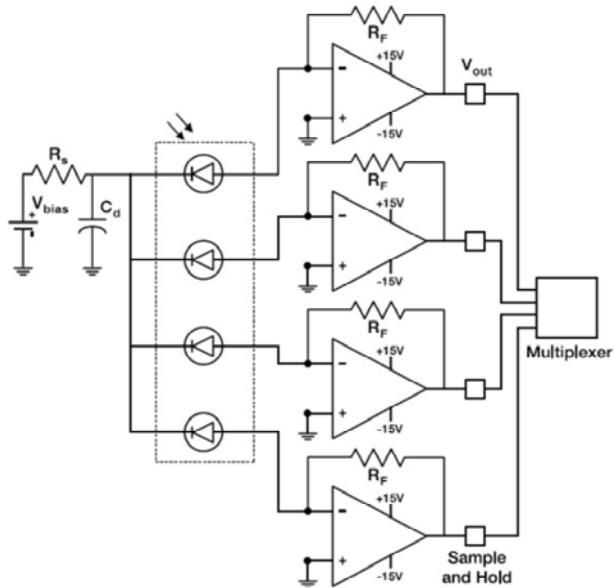
$$\sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F (C_j + C_F + C_A)}} > \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad (19)$$

Modul Fotovoltaic – PV (diode nepolarizata)

Modul fotovoltaic este preferat cind o fotodioda este utilizata in aplicatii de joasa frecventa (pina la 350 kHz) ca si la nivel de lumina ultra redus. In plus fata de configuratia de circuit mult mai simpla, fotocurentul are mai putine variatii in responzivitate cu temperature.

In exemplul prezentat, sunt utilizati un amplificator operational cu FET la intrare si un resistor in reactie, RF , de valoare mare. Detectorul este nepolarizat. Tensiunea totala de iesire este data de relatia (17) , iar currentul de zgomot al amplificatorului operational este dat de relatia (18). Pentru stabilitate se allege un condensator CF care sa verifice relatia (19). Banda de functionare este data de relatia (16).

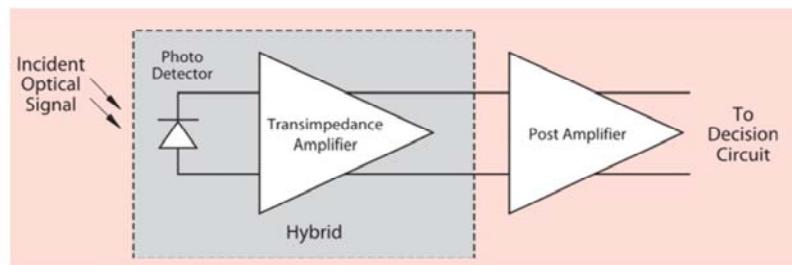
Polarizarea fotodiodei – PV_2



Modul Fotovoltaic – PV (diode nepolarizata)

Configuratia de mai sus poate fi folosita pentru retele monolitice de fotodiode cu substrat comun. Iesirea primului etaj de amplificare poate fi conectata la un circuit de iesantionare si apoi la un multiplexor.

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 photocurentul proportional cu puterea optica incidenta. Amplificatorul cu transimpedanta converteste acest photocurent 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



$$P_{AVG} = \frac{P_0 + P_1}{2} \quad (20)$$

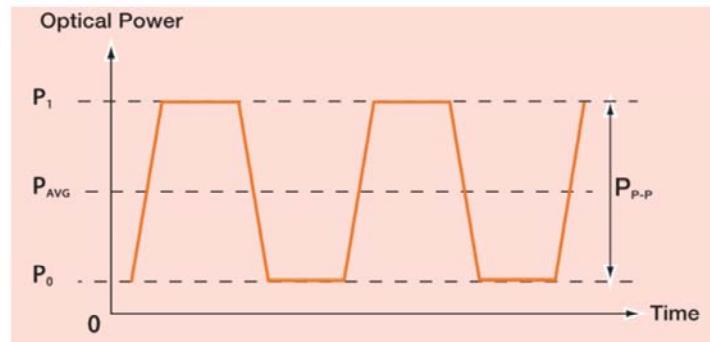
$$P_{P-P} = P_1 - P_0 \quad (21)$$

In sistemul de comunicatii optice digitale, sirul de date binare este transmis prin modularea semnalului optic. Semnalul optic cu codare NRZ poate avea una din cele doua stari posibile ale puterii optice, in timpul transmiterii unui bit: nivel de putere optica ridicata ce corespunde la nivelul logic 1, sau nivel de putere optica redusa ce corespunde la nivelul logic 0. Intr-un sistem real, puterea optica nu este niciodata zero cind se transmite nivelul logic 0. Sa presupunem ca puterea corespunzatoare lui 0 este P_0 , iar cea corespunzatoare lui 1 este P_1 , ca in figura.

Sistemul este descris in termenii puterii medii P_{avg} , relatia (20) si a Amplitudinii Modulatiei Optice sau Putere Optica virf-la-virf, P_{p-p} , relatia (21).

Este important de notat ca se considera sisteme cu probabilitati egale, 50%, de a avea 0 sau 1 la iesire.

Proiectarea Receptorului Optic



$$r_e = \frac{P_1}{P_0} \quad (22)$$

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

$$P_{AVG} = \frac{1}{2} \frac{(r_e + 1)}{(r_e - 1)} P_{P-P} \quad (23)$$

Raportul de stingeră, r_e , este raportul dintre P_1 și P_0 , relația (22). Acest raport poate fi exprimat în dB.

Așa că, puterea medie în termenii puterii virf-la-virf și a raportului de stingeră, este date în relația (23).

EXEMPLU

Proiectarea Receptorului Optic

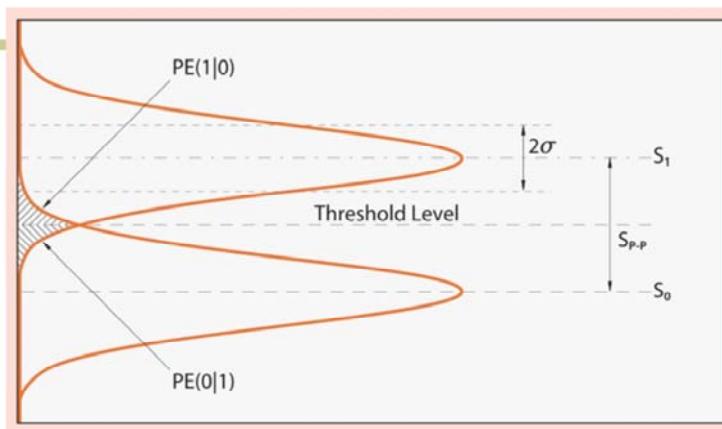
$$P_{AVG} = -17 \text{ dBm}$$
$$r_e = 9 \text{ dB}$$

$$P_{AVG} = 20 \mu\text{W}$$
$$r_e = 7.94$$

$$P_{P-P} = 2 \frac{(r_e - 1)}{(r_e + 1)} P_{AVG}$$
$$= 2 \frac{(7.94 - 1)}{(7.94 + 1)} \times 20 \mu\text{W} = 1.55 \times 20 \mu\text{W} = 31 \mu\text{W}_{P-P} \quad (24)$$

De exemplu, daca puterea optica medie a semnalului incident este -17 dBm, in timp ce raportul de stingere este 9 dB, atunci puterea medie este 20 μW si $r_e = 7.94$. Puterea virf-la-virf va fi data de relatia (24)

Sensibilitate si BER



$$PE = \frac{1}{2} [PE(0|1) + PE(1|0)] \quad (25)$$

$$D_p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (26)$$

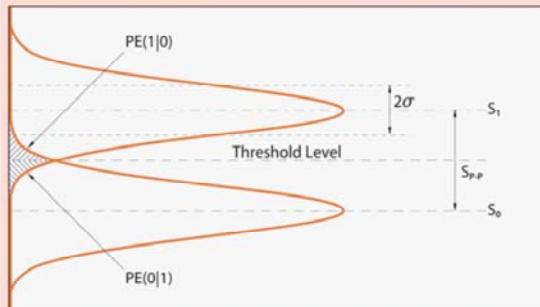
Numarul de erori la iesirea circuitului de decizie va determina calitatea receptorului si, evident, si a sistemului de comunicatii. BER (Bit-error-rate) este raportul dintre erorile in bitii detectati si numarul total de biti transmisi. Sensibilitatea receptorului optic, S , este puterea optica minima 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 stingeri (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 importanți 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 (25), 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 ralatia (26), unde X este variabila aleatoare, σ este deviatia standard si μ este valoarea medie.

Sensibilitate si BER - 2



$$PE(1|0) = \int_{Prag}^{\infty} D_{P_0}(X) dX \quad (27)$$

$$PE(1|0) = \int_{S_{p-p}/2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X)^2}{2\sigma^2}\right) dX \quad (28)$$

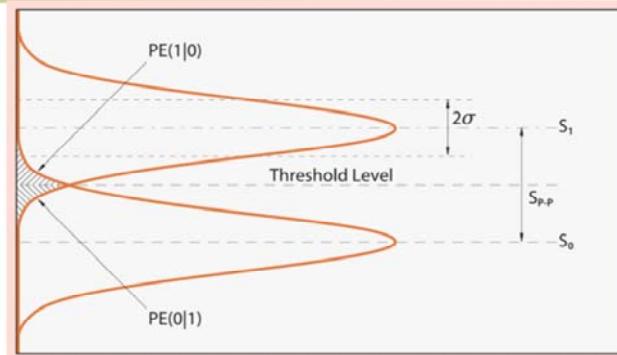
$$t = \frac{X}{\sigma} \quad (29)$$

$$PE(1|0) = \int_{S_{p-p}/2\sigma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (30)$$

Pentru a estima probabilitatea unei decizii incorecte, de exemplu $PE(1|0)$, trebuie sa integrăm densitatea de probabilitate pentru distributia 0, peste nivelul de prag, relația (27). Considerind distributii simetrice (pragul este jumătate din semnalul virf-la-virf, S_{p-p}), obținem relația (28).

Normalizând folosind relația (29), obținem relația (30).

Sensibilitate si BER - 3



$$PE = erfc\left(\frac{SNR}{2}\right) \quad (31)$$

$$erfc(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (32)$$

Daca deviatiile de la nivelele pentru 0 si 1 sunt egale, probabilitatea totala de eroare va fi data de relatia (31), unde $erfc(x)$ este functia complementara de eroare data de relatia (32), iar SNR este raportul semnal-zgomot, in care semnalul este in termeni de virf-la-virf si zgomotul este in termeni de valoare efectiva.

Sensibilitate si BER - 4



BER	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
SNR	11.22	11.99	12.72	13.40	14.06

In figura este prezentata functia $\text{erfc}(x)$, iar cteva valori ale SNR vs. BER sunt prezentate in Tabel.

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

Sensibilitate si BER - 5

$$SNR = \frac{I_{P-P}}{I_{N,ef}} = \frac{P_{P-P} \times R_\lambda}{I_{N,ef}} \quad (33)$$

$$P_{P-P} = \frac{SNR \times I_{N,ef}}{R_\lambda} \quad (34)$$

$$S = P_{AVG@BER} = \frac{SNR \times I_{N,ef}}{2R_\lambda} \frac{r_e + 1}{r_e - 1} \quad (35)$$

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 (33), unde I_{p-p} este photocurrentul semnal, R_λ este responsivitatea fotodiodei exprimata in A/W, iar $I_{N,ef}$ este valoarea efectiva a zgomotului la intrarea amplificatorului cu transimpedanta. Obtinem relatia (34).

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 (35), unde primul factor este sensibilitatea pentru un raport de stingere infinit, iar al doilea factor este corectia pentru un raport de stingere finit.

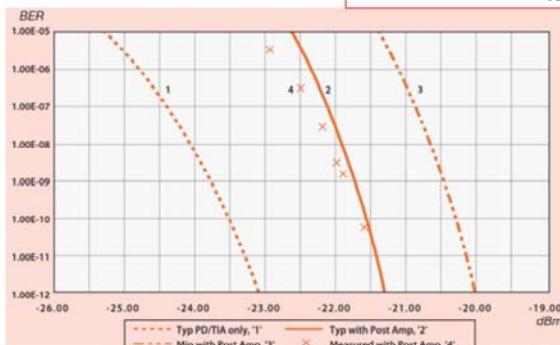
In Tabelul 2 sunt date cteva rezultate pentru diferite rapoarte de stingere.

Sensibilitate si BER - 6

$$\Delta I_{PA} = \frac{V_{TH}}{R_{TIA}} \quad (36)$$

$$P_{P-P} = \frac{SNR \times I_{N,ef} + \Delta I_{PA}}{R_\lambda} \quad (37)$$

$$S = \frac{SNR \times I_{N,ef} + \frac{V_{TH}}{R_{TIA}}}{2R_\lambda} \times \frac{r_e + 1}{r_e - 1} \quad (38)$$



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 (36), unde R_{tia} este coeficientul de transimpedanta al TIA.

Puterea optica virf-la-virf va fi data de relatia (37), iar sensibilitatea de relatia (38).

In figura se arata sensibilitatea tipica pentru sistemul InGaAs PD/TIA singur (curba 1), sensibilitatile calculate cu 10 mV prag pentru post-amplificator tipice (curba 2) si minime (curba 3), si valorile reale masurate pentru sistemul PD/TIA-post amplificatory (punctele X, 4).

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 stingeri al semnalului optic 9 dB.

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

$$r_e = 9 \text{ dB} = 7.94$$

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

$$V_{TH} = 10 \text{ mV} \quad R_{TIA} = 2.8 \text{ k}\Omega$$

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

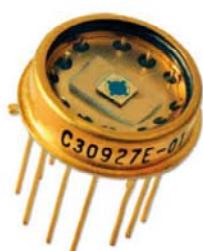
Mai intii vom gasi SNR necesar pentru obtinerea unui BER = 10e(-10), din Tabel. Prin urmare, SNR = 12.72.

Apoi calculam sensibilitatea S, considerind $r_e = 7.94$.

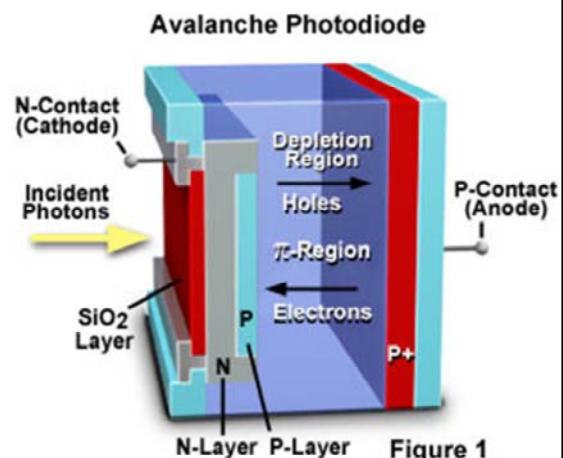
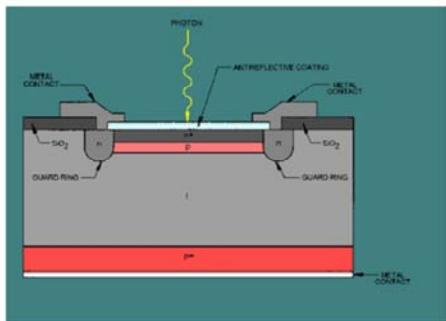
Pentru combinarea acestui hibrid PD/TIA cu un Post Amplificator avand pragul de 10 mV, si presupunind $R_{TIA} = 2.8 \text{ k}\Omega$, sensibilitatea devine $7.11 \mu\text{W}$ sau $S = -21.5 \text{ dBm}$.

Post Amplificatorul afecteaza sensibilitatea cu 1.9 dB.

FOTODIODE CU AVALANSA



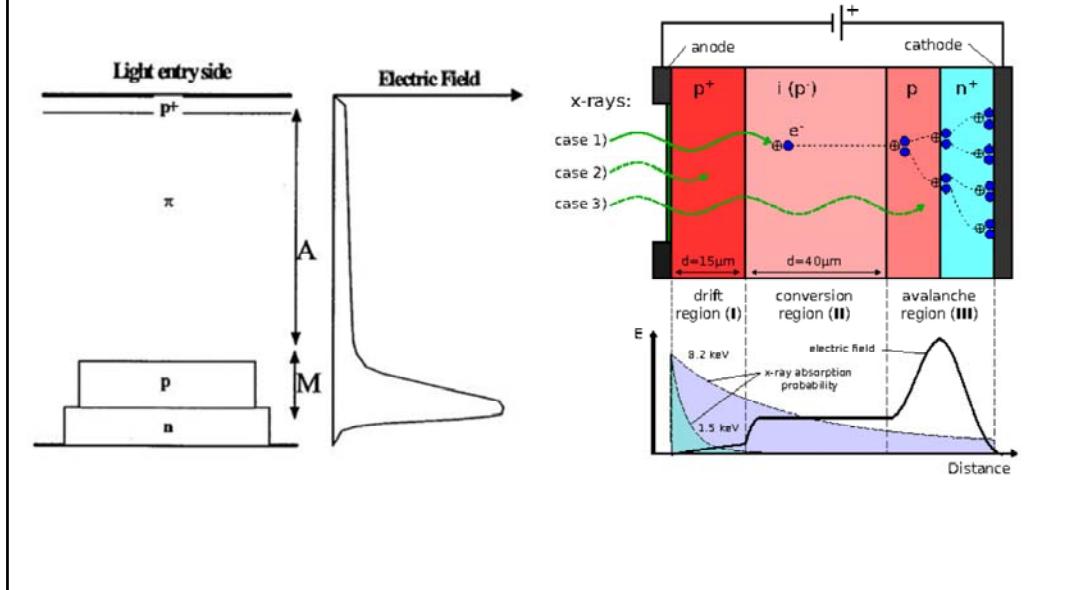
Constructia fotodiodei cu avalansa



O fotodioda cu avalansa ideală ar avea zgomot de intuneric zero, zgomot in exces zero, un raspuns larg in freventa, un cistig intre 1 si 10^6 si pret mic.

Mai simplu spus, o fotodioda cu avalansa ideală ar fi o fotodioda PIN buna dotata cu cistig.

Functionarea fotodiodei cu avalansa

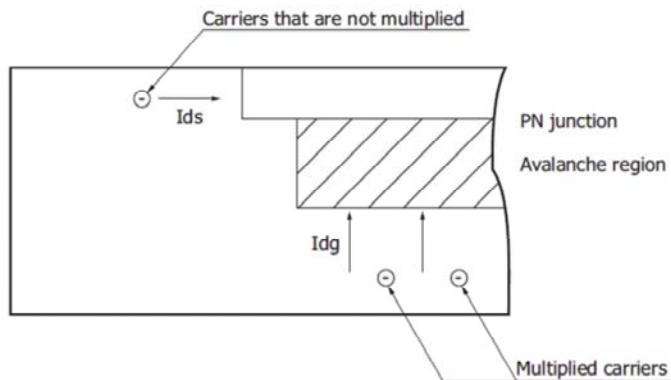


O secțiune schematică prin APD este prezentată pe slide. Elementele structurale de bază considerate de proiectant sunt regiunea de absorbtie "A" și regiunea de multiplicare "M". În lungul regiunii A este present un cimp electric "E" care servește la separarea perechilor electron-gol fotogenerate și dirijarea unuia din purtatori spre regiunea de multiplicare. Regiunea de multiplicare "M" este proiectată să prezinte un cimp electric mare astfel încit să se producă o amplificare a photocurrentului prin fenomenul de ionizare de impact.

Principiul multiplicării prin avalansa

Mecanismul generării photocurentului în APD este același cu cel dintr-o fotodiode normală: cind lumina intră în fotodiode, perechi electron-gol sunt generate dacă energia luminii este mai mare decât energia benzii interzise. Raportul dintre numărul de perechi electron-gol și numărul de fotoni incidenti este definit ca eficiență quantică (QE), exprimată în procente. Dar, APD este diferit de fotodiode prin aceea că are și o funcție de multiplicare a purtatorilor generate. Cind perechile electron-gol sunt generate în regiunea săracă a fotodiodei cu avalansa polarizată invers, cimpul electric creat în lungul jonctiunii PN face ca electronii să capete o mișcare de drift spre regiunea N+, iar gologurile o mișcare de drift spre regiunea P+. Cu cât cimpul electric este mai mare, cu atât este mai mare viteza de drift a purtatorilor. Astfel, cind cimpul electric atinge un anumit nivel, purtatorii sunt mult mai predispuși să se ciocnească de retea și astfel viteza de drift se satură la o anumită valoare. Dacă cimpul electric este crescut peste această valoare, electronii care scapă de asemenea coliziuni vor avea o energie foarte mare și cind, într-un final, vor suferi o asemenea coliziune cu rețeaua cristalina, va apărea un fenomen în care sunt generate noi perechi electron-gol. Acest fenomen se numește ionizare. Acești perechi electron-gol apoi vor crea perechi electron-gol suplimentare, ceea ce generează o reacție în lanț de ionizare. Aceasta este fenomenul numit *multiplicare prin avalansa*. Numărul de perechi electron-gol generate în intervalul de timp în care purtatorii se deplasează pe unitatea de distanță se numește ratea de ionizare. Uzual, rata de ionizare a electronilor este notată cu " α " și cea a gologilor cu " β ". Aceste rate de ionizare sunt factori importanți în determinarea mecanismului de multiplicare. În cazul siliciului, rata de ionizare a electronilor este mai mare decât cea a gologilor ($\alpha > \beta$), astfel încât raportul în care electronii contribuie la multiplicare crește. Astfel, electronii vor trebui să fie favorizați să intre în regiunea de avalansa. Adincimea la care purtatorii sunt generate depinde de lungimea de undă a luminii incidente.

Curentul de intuneric



$$I_D = I_{ds} + M I_{dg} \quad (39)$$

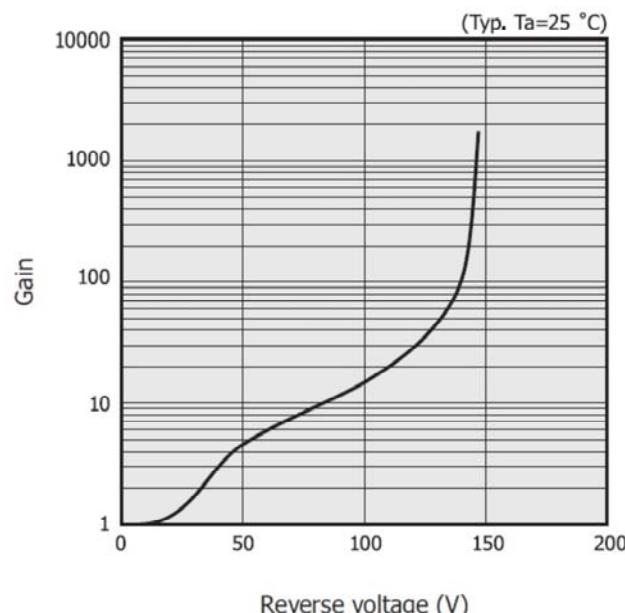
Curentul de intuneric al APD constă din curentul de pierderi de suprafață (I_{ds}) care curge prin jonctiunea PN sau interfata filmului de oxid și curentul generat (I_{dg}) în interiorul substratului.

Curentul de pierderi de suprafață nu este multiplicat deoarece el nu trece prin regiunea de avalansa, dar curentul generat este multiplicat deoarece el trece prin regiunea de avalansa.

Prin urmare, curentul total de intuneric (I_D) este dat de relația (39).

I_{dg} , curentul de intuneric care este multiplicat, afectează major caracteristicile de zgomot.

Caracteristica cistig – tensiune de polarizare

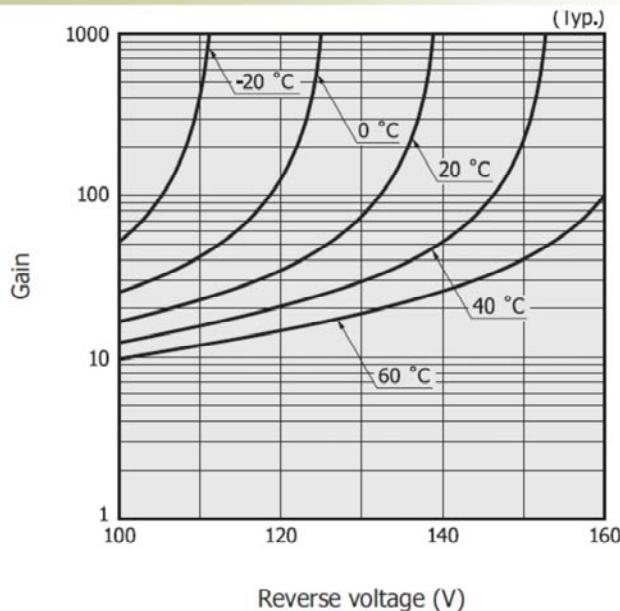


Cistigul APD este determinat de rata de ionizare, iar rata de ionizare depinde puternic de cimpul electric in lungul stratului saracit.

In intervalul normal de functionare, cistigul APD creste cu tensiunea inversa aplicata.

Daca tensiunea inversa este crescuta si mai mult, tensiunea in lungul jonctiunii PN a APD descreste datorita caderii de tensiune cauzate de rezistentei serie; prin urmare cistigul incepe sa scada.

Caracteristica cistig – tensiune de polarizare



Cistigul APD depinde puternic si de temperatură.

Dacă temperatura crește, rețeaua cristalina vibrează mai puternic, crescând posibilitatea ca purtătorii accelerate să aibă ciocniri cu rețeaua înainte de a atinge energia suficientă pentru a produce ionizare. Prin urmare cistigul la o anumita tensiune inversă devine pe măsură ce temperatura crește.

Pentru a obține un răspuns independent de temperatură, trebuie ca tensiunea inversă să fie ajustată pentru a compenă modificările de temperatură, sau diode trebuie menținute la temperatură constantă.

Parametrii de performanta ai APD

$$I_S = M \cdot R_0(\lambda) \cdot P_S \quad (40)$$

O fotodioda cu avalansa, APD, difera de o fotodioda PIN prin aceea ca ofera intern o amplificare a semnalului fotoelectric.

Curentul de semnal la iesire, I_S , va fi dat de relatia (40), unde $R_0(\lambda)$ este rezponsivitatea intrinseca a APD la un cistig $M = 1$ si la lungimea de unda λ , iar M este cistigul fotodiodei cu avalansa si P_S este puterea optica incidenta.

Asa cum am vazut, cistigul M este o functie de tensiunea inversa aplicata pe diode, VR .

Zgomotul in APD

$$I_n^2(APD) = 2q(I_L + I_{dg})M^2FB + 2qI_{ds}B \quad (41)$$

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \quad (42)$$

$$F = kM + (1-k)(2-1/M) \quad (43)$$

$$F = k^{-1}M + (1-k^{-1})(2-1/M) \quad (44)$$

Atita vreme cit tensiunea inversa este constanta, cistigul APD este media fiecarei multiplicari de purtatori. Rata de ionizare a fiecarui purtator nu este uniforma , ci are fluctuatii statistice.

Zgomotul de multiplicare cunoscut sub numele de zgomot in exces, se va adauga in timpul procesului de multiplicare.

Zgomotul de alice al APD (I_n) devine mai mare decit cel al fotodiodei PIN si este dat de relatia (41), unde:

q = sarcina electronului

I_L = photocurentul la $M = 1$

I_{dg} = curentul generat in interiorul substratului (currentul de intuneric multiplicat)

B = Banda de frecventa

M = cistigul

F = factorul de zgomot in exces

I_{ds} = curentul de fuga de suprafata (currentul de intuneric care nu este multiplicat)

Raportul dintre rata de ionizare a electronilor (α) si rata de ionizare a golurilor (β) este numit raport de ionizare, relatia (42).

Factorul zgomotului in exces, F , se poate exprima in functie de k prin ecuatia (43), atunci

cind electronii sunt injectati in regiunea de avalansa. Atunci cind golurile sunt injectate, factorul zgomotului in exces F se calculeaza cu relatia (44)

Zgomotul in exces depinde de lungimea de unda. Unele APD au zgomot mic la lungimi de unda mici, altele la lungimi de unda mari.

Raportul semnal-zgomot si NEP in APD

$$\frac{S}{N} = \frac{I_L^2 M^2}{2q(I_L + I_{dg})FBM^2 + 2qI_{ds}B + \frac{4kTB}{R_L}} \quad (45)$$

$$NEP = \frac{I_n}{MS} \quad (46)$$

Așa cum s-a explicitat, APD generează zgomot datorită procesului de multiplicare, prin urmare zgomotul în exces crește odată cu creșterea cistigului.

În același timp, semnalul este și el crescut în funcție de creșterea cistigului.

Prin urmare va exista un cistig la care raportul Semnal-Zgomot este maxim.

S/N pentru APD este dat de relația (45), unde:

$2q(I_L + I_{dg})FBM^2 + 2qI_{ds}B + \frac{4kTB}{R_L}$ = zgomot de arie

$(4kTB)/R_L$ = zgomot termic

K = constanta lui Boltzman

T = temperatură absolută

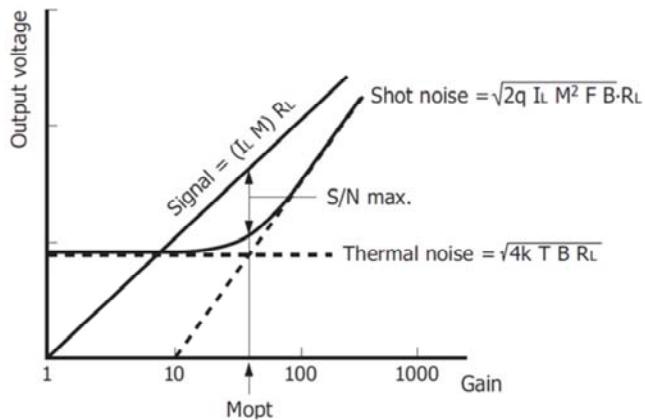
RL = rezistența de sarcină

Puterea echivalentă de zgomot (NEP) a APD este data de relația (46), unde:

M = cistig

S = fotosensibilitatea [A/W]

Raportul semnal-zgomot si NEP in APD



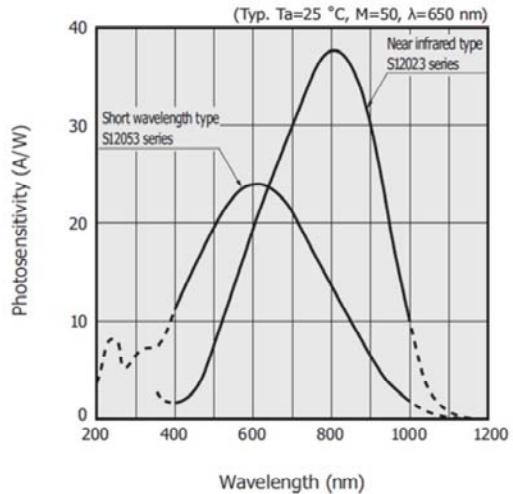
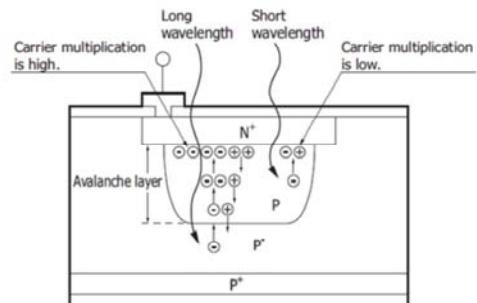
$$M_{opt} = \left[\frac{4kT}{q(I_L + I_{dg})R_L} \right]^{\frac{1}{2+x}} \quad (47)$$

In cazul unei fotodiode PIN, folosind o rezistenta de sarcina de valoare mare reducem zgomotul termic, dar in acelasi timp incetinim raspunsul. Prin urmare nu este practice sa reducem zgomotul termic si, in multe cazuri, limita inferioara a detectiei lumинii este determinata de zgomotul termic.

In cazul APD, semnalul poate fi multiplicat fara cresterea totala a zgomotului pina cind zgomotul de alce atinge un nivel egal cu cel al zgomotului termic.. Asta inseamna ca folosind APD putem imbunatatiti raportul S/N, mentinind in acelasi timp viteza de raspuns. Acest comportament este prezentat in figura.

In acest caz, cistigul optim se obtine folosind conditia maximizarii raportului S/N din relatia (45). Daca neglijam I_{ds} , expresia cistigului optim este data de relatia (47)

Raspunsul spectral



Raspunsul spectral al APD este aproape acelasi cu al unei fotodiode obisnuite, daca nu se aplica o tensiune inversa pe diode.

Adincimea la care penetreaza lumina in fotodioda pe Si depinde de lungimea de unda.

Adincimea la care patrund lungimile de unda scurte este mica, astfel purtatorii sunt generate linga suprafata.

Prin contrast, lumina de lungimi de unda lungi genereaza purtatori la adincimi mai mari.

Caracteristica de frecventa

$$f_c(RC) = \frac{1}{2\pi C_t R_L} \quad (48)$$

$$t_r = \frac{0.35}{f_c(RC)} \quad (49)$$

$$f_c(t_{rd}) = \frac{0.44}{t_{rd}} \quad (50)$$

Factorii care determina viteza de raspuns a fotodiodelor sunt constanta de timp CR, timpul de transit al purtatorilor (timpul de drift) in regiunea saracita, timpul necesar pentru multiplicare (timpul de multiplicare) si intirzirea in timp determinate de difuzia purtatorilor din afara regiunii saracite..

Frecventa de taiere $f_c(CR)$ determinata de constanta de timp RC este data de relatia (48), unde

C_t = capacitatea la terminale

R_L = rezistenta de sarcina

Pentru a imbunatatiti viteza de raspuns a fotodiodei, capacitatea la terminale trebuie redusa, de exemplu facind aria fotosensibila mai mica si stratul saracit mai gros.

Relatia dintre frecventa de taiere R_C si timpul de crestere , t_r , este (49).

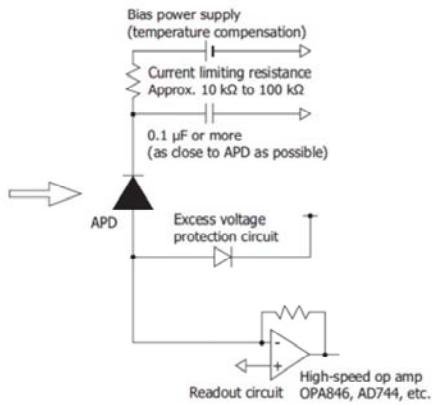
Daca regiunea saracita este largita, timpul de drift nu poate fi ignorat. Viteza de transit prin regiunea saracita tinde sa se satureze cind cimpul electric atinge intensitatii de ordinal 10^4 V/cm, viteza de drift saturata la aceste valori fiind de cca 10^7 cm/s.

Ionizarea are loc cind purtatorii ajunsi in regiunea de avalansa produc perechi electron-gol. Totusi, gurile se deplaseaza in directia opusa electronilor, timpul de drift in APD devenind mai mare decat in fotodioda PIN.

Daca consideram timpul de drift (trd), atunci frecventa de taiere $f_c(trd)$ determinata de timpul de drift este data de relatia (50).

Facind regiunea saracita mai groasa pentru a reduce capacitatea, lungim timpul de drift, prin urmare va trebui sa luam in consideratie atit $f_c(CR)$ determinat de constanta de timp RC cit si $f_c(trd)$ determinat de timpul de transit.

Conectarea la circuitul exterior



APD poate fi folosita la fel ca si o fotodioda normal, doar ca este necesara o tensiune inversa de polarizare mare.

Totusi trebuie luate in considerare urmatoarele precautii.

- 1) Puterea consumata de APD este produsul dintre nivelul luminii incidente \times sensitivitatea ($M = 1$) \times cistigul \times tensiunea inversa. Aceasta este considerabil mai mare decit in cazul unei fotodiode obisnuite. Prin urmare este necesar sa introducem un resistor intre sursa de alimentare si APD si astfel sa obtinem un limitator de current.
- 2) Circuitul de citire a photocurrentului poate fi distrus ca raspuns la o supratensiune. Prin urmare trebuie folosit un circuit de protective la supratensiuni.