

Photodiode à jonction pn

Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Défectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

1

Photodiode

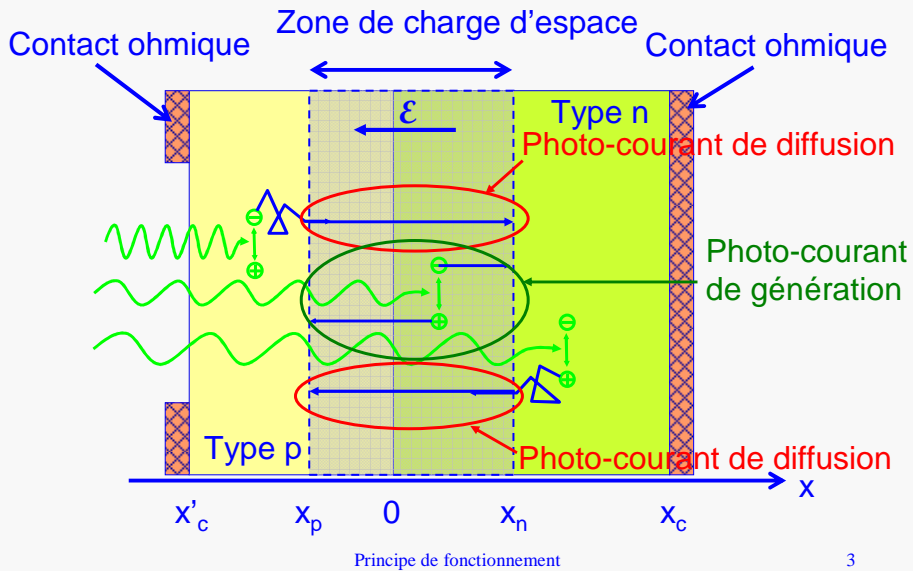
Cellule photovoltaïque

- **Principe de fonctionnement**
- Photo-courant
- Réponse
- Défectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

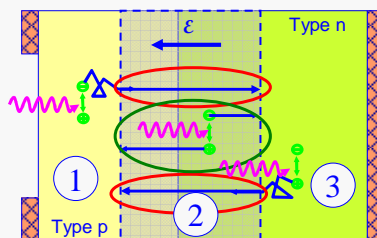
2

Principe de fonctionnement



3

Principe de fonctionnement



Photocourant :

- Courant de diffusion des e dans la zone 1
- Courant de génération dans la ZCE (zone 2)
- Courant de diffusion des trous dans la zone 3

Courant total :
$$I = I_S (e^{eV/kT} - 1) - I_{ph}$$

Principe de fonctionnement

4

Photodiode

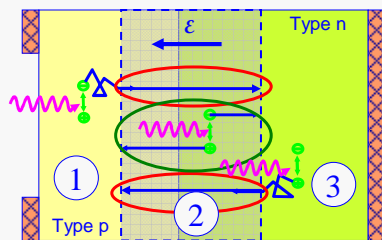
Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- **Photo-courant**
- Réponse
- Défectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

5

Photo-courant



$$J_{ph} = J_{ndiff}(x_p) + J_g(x_n) + J_{pdiff}(x_n)$$

On néglige les recombinaisons dans la ZCE.

Courants de diffusion :

- $J_{ndiff}(x_p) = J_{ndiff}(x_n)$
- $J_{pdiff}(x_n) = J_{pdiff}(x_p)$

Courant de génération :

dans la ZCE $j_g(x) = j_{gp}(x) + j_{gn}(x)$

En limite de ZCE $j_g(x_p) = j_{gp}(x_p)$ ou $j_g(x_n) = j_{gn}(x_n)$

Le photo-courant total :

$$J_{ph} = J_{ndiff}(x = x_p) + J_{gn}(x = x_n) + J_{pdiff}(x = x_n)$$

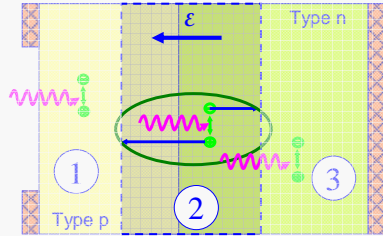
J_{diff} zone 1

$J_{photo-courant}$ zone 2

J_{diff} zone 3

6

Photo-courant



Zone 2 : ZCE
Courant de génération

$$J_{gn} = J_{gp}$$

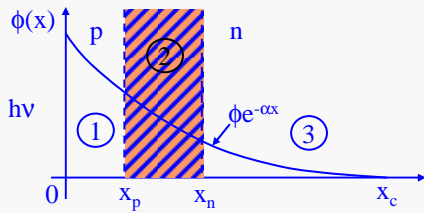
Equation de continuité pour les e

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} + g + r$$

Etat stationnaire

$$0 = \frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} + g \Rightarrow j_{gn}(x_n) = -e \int_{x_p}^{x_n} g dx$$

Taux de génération $g = \phi \alpha e^{-\alpha x}$

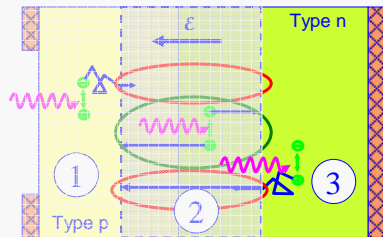


$$j_{gn}(x_n) = -q \phi \left(e^{-\alpha x_p} - e^{-\alpha x_n} \right) = -q \phi e^{-\alpha x_p} \left(1 - e^{-\alpha W} \right)$$

Le photo-courant

7

Photo-courant



Zone 3
Région neutre de type n

courant de diffusion de trou

$$j_{pdiff} = -q D_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

$$\Delta p = A e^{-x/L_p} + B e^{x/L_p} + \frac{\phi \alpha \tau_p}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha x}$$

Conditions aux limites

$\Delta p = 0$ en $x = x_c \rightarrow +\infty$ car $L_p \ll d_n$ et $1/\alpha \Rightarrow B = 0$

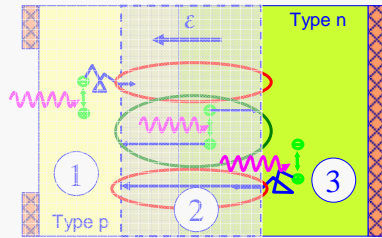
$\Delta p = 0$ en $x = x_n$ à cause de $\mathcal{E} \Rightarrow$

$$A = - \frac{\phi \alpha \tau_p}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha x_n + x_n/L_p}$$

Le photo-courant

8

Photo-courant



Zone 3
Région neutre de type n

courant de diffusion de trou

$$j_{\text{pdiff}} = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

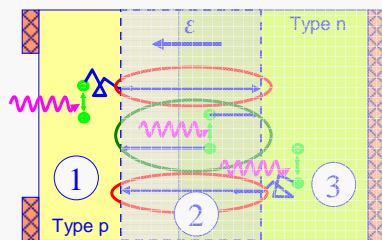
$$\Delta p = \frac{\phi\alpha\tau_p}{1-\alpha^2L_p^2} e^{-\alpha x_n} \left(e^{-\alpha(x-x_n)} - e^{-(x-x_n)/L_p} \right)$$

$$j_{\text{pdiff}}(x_n) = -q\phi \frac{\alpha L_p}{1-\alpha L_p} e^{-\alpha x_n}$$

Le photo-courant

9

Photo-courant



Zone 1
Région neutre de type p

courant de diffusion d'électrons

$$j_{\text{ndiff}} = qD_n \frac{d\Delta n}{dx}$$

$$\Delta n = Ae^{-x/L_n} + Be^{x/L_n} + \frac{\phi\alpha\tau_n}{1-\alpha^2L_n^2} e^{-\alpha x}$$

Conditions aux limites (constante A_n et B_n)

$\Delta n = 0$ en $x = x_p$ à cause de \mathcal{E}

en $x=x'_c$ $\Delta n(x'_c)$ définit par la vitesse de recombinaison en surface (s_0)

$$j_{\text{ndiff}}(x_n) = qD_n \left(-\frac{A_n}{L_n} e^{-x_p/L_n} + \frac{B_n}{L_n} e^{x_p/L_n} - \frac{\phi\alpha^2\tau_n}{1-\alpha^2L_n^2} e^{-\alpha x_p} \right)$$

Photo-courant

Simplifications :

- $d_p \ll 1/\alpha \Rightarrow j_{ndiff} \approx 0$
(condition nécessaire à l'obtention d'une photodiode efficace)

- On pose $x_p = 0$ et $x_n = W$

$$j_g(x_n) = -q\phi(1 - e^{-\alpha W})$$

$$j_{pdiff}(x_n) = -q\phi \frac{\alpha L_p}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha W}$$

$$j_{ph} = -q\phi \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha W} \right)$$

Courant maxi pour $\alpha W \gg 1$ (utilisation de jonctions *pin*)

$$j_{ph} = -q\phi$$

11

Photodiode Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Défectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

12

Réponse

Réponse = photocourant/ puissance incidente

Surface A

$$I_{ph} = j_{ph} A = A q \phi_0 (1-R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)$$

Photocourant

Puissance incidente $P_{inc} = hv\phi_0 A$

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{q\phi_0(1-R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)}{hv\phi_0} = \eta \frac{1}{hv/q} = \eta \frac{\lambda(\mu m)}{1,24}$$

Rendement quantique $\eta = (1-R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)$

$$\eta = \frac{\text{flux de photo-porteurs}}{\text{flux de photons incidents}}$$

13

Photodiode Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- **Défectivité**
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

14

Défectivité

Les deux mécanismes sources de bruit sont :

- le bruit de génération sans recombinaison
- le bruit de fluctuation d'arrivée des photons

$$i_B^2 = 2qI_0 \Delta v = 2qI_{\text{sat}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} + 1 \right) \Delta v$$

À $V = 0$ les courants directs et inverses s'annulent. En revanche les contributions au bruit s'ajoutent.

Le rapport signal sur bruit s'écrit :

$$\frac{i_s}{i_B} = \frac{\mathfrak{R} P_{\text{inc}}}{\sqrt{2qI_{\text{sat}} \left(1 + e^{\frac{qV}{kT}} \right) \Delta v}} \implies \text{NEP} = \frac{\sqrt{2qI_{\text{sat}} \left(1 + e^{\frac{qV}{kT}} \right) \Delta v}}{\mathfrak{R}}$$

La puissance équivalente de bruit

Défectivité P_{inc} à la limite de détection (c.a.d $S/B=1$)

Défectivité

Défectivité :

$$D^* = \frac{\sqrt{A \Delta v}}{\text{NEP}} = \frac{\mathfrak{R}}{\sqrt{2qJ_{\text{sat}} \left(1 + e^{\frac{qV}{kT}} \right)}}$$

La déféctivité (D^*) augmente si la jonction est polarisée.

Inconvénient bruit additionnel

Pour $V = 0$, D^* s'écrit :

$$D^* = \frac{\eta}{hv/q} \frac{1}{\sqrt{4qJ_{\text{sat}}}}$$

Défectivité

16

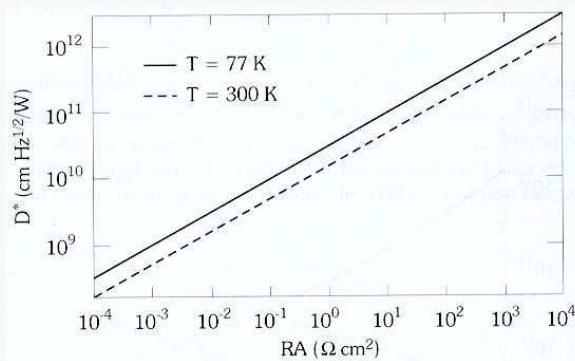
Délectivité

Remarque : $\left. \frac{dJ}{dV} \right|_{V=0} = \frac{1}{RA} = \frac{q}{kT} J_{\text{sat}}$

RA est le produit de la résistance de la jonction par sa surface (Ωcm^2)

Autre expression de D^*

$$D^* = \frac{\eta}{hv/q} \sqrt{\frac{RA}{4kT}}$$



$\lambda=5\mu\text{m}$
 $\eta=50\%$

17

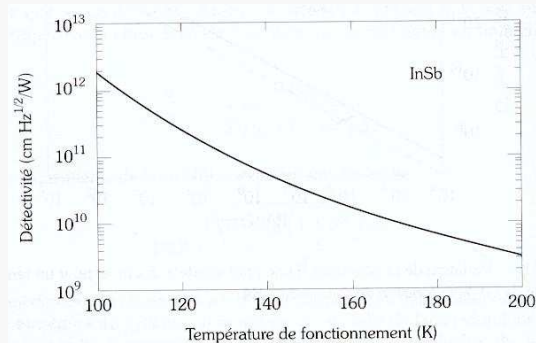
Délectivité

Courant de saturation :

$$j_{\text{sat}} = \frac{qD_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{N_c N_v}{N_D} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$$D^* = \frac{\eta}{hv/q} \frac{1}{\sqrt{4qJ_{\text{sat}}}}$$

jonction pn InSb
 $E_g(300\text{K})=0.24\text{eV}$
 $E_g(4\text{K})=0.17\text{eV}$



Il est donc plus intéressant de travailler à basse température

Photodiode

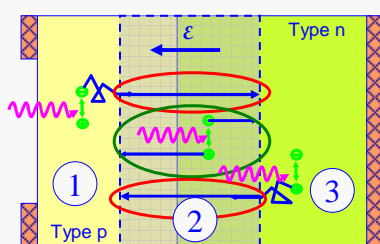
Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Défectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

19

Réponse temporelle d'une photodiode



La réponse temporelle d'une photodiode s'obtient en résolvant les équations de continuité.

Le photo-courant total :

$$J_{ph} = J_{gn} + J_{pdiff}$$

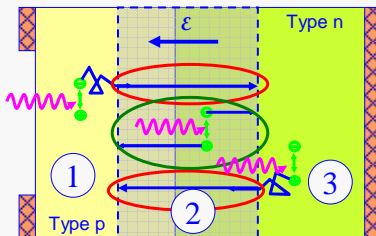
Trois effets doivent être pris en compte :

- Constante de temps due au courant de diffusion
- Constante de temps capacitive
- Constante de temps due au transit des porteurs dans la ZCE

Réponse temporelle

20

Réponse temporelle d'une photodiode



Courant de diffusion :
La réponse temporelle est fonction de la durée de vie des porteurs.
 $10^{-4} < \tau_p < 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow 10 \text{ kHz à } 100 \text{ MHz}$
(trop faible pour les télécommunications)

Constante de temps capacitive :

La ZCE se comporte comme une capacité, C ($C = \epsilon A/w$).

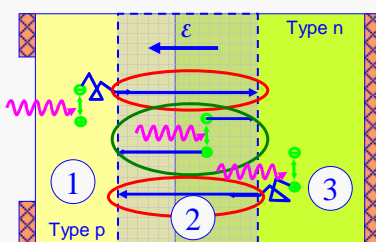
Dans le circuit de mesure C est en série avec la résistance du circuit adapté, $R = 50 \Omega$. Ce montage sera donc limité à la fréquence de coupure $1/2\pi RC$.

C devra être le plus faible possible (100 MHz).

Réponse temporelle

21

Réponse temporelle d'une photodiode



Temps de transit dans ZCE :
Effet moins important que les précédents.

Ex : Pour un SC de faible mobilité ($\mu = 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), une ZCE de $1 \mu\text{m}$ et $E = 10^4 \text{ V/cm}$
 $f_c = 10 \text{ GHz}$.

Solution : Utilisation de diodes PIN

La zone désertée est augmentée par la zone intrinsèque (w_i)

$$w_{\text{pin}} = w_{\text{pn}} + w_i$$

Conséquence la capacité diminue.

$$j_{\text{ph}} = -q\phi \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha W} \right)$$

Réponse temporelle

Courant de diffusion négligeable de plus $\alpha W \gg 1$

22

Photodiode

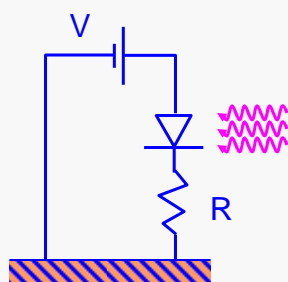
Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Détectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

23

Modes de fonctionnement



Fonctionnement en photo-courant :

La diode polarisée (V) est reliée à un circuit de faible impédance (R faible ou ampèremètre)

Photo détecteurs

$$I = I_S (e^{qV/kT} - 1) - I_{ph}$$

Tension de polarisation inverse

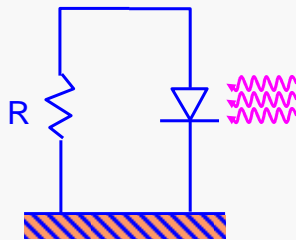
$$|V| \gg kT/q \Rightarrow I = -I_S - I_{ph} \quad I_{ph} > I_S \Rightarrow I \approx -I_{ph}$$

Le courant mesuré est égal au photo-courant et donc proportionnel au rayonnement incident.

Principe de fonctionnement

24

Modes de fonctionnement



Fonctionnement en photo-voltage :

la diode est reliée à un circuit de forte impédance (R grand ou voltmètre)

Photopile

Dans le mode photovoltaïque la diode est connectée à un forte impédance de sorte que $I = 0$

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) - I_{ph} = 0 \Rightarrow V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

Le photo-voltage est proportionnel au logarithmique du photo-courant

Principe de fonctionnement

25

Photodiode Cellule photovoltaïque

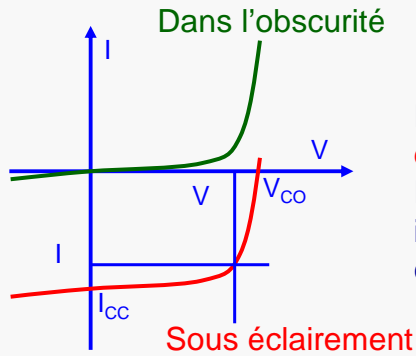
- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Détectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- **Cellule solaire**
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

26

Cellule solaire - photopile

Une photopile est une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure, et débite dans une charge.

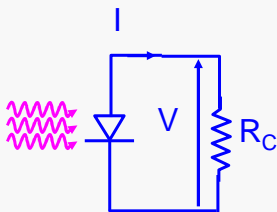


Il existe une région où la puissance $P=I \times V$ est négatif, la diode fournit de l'énergie électrique. Pour optimiser la puissance fournie il faut d'ajuster la résistance de charge.

photopile

27

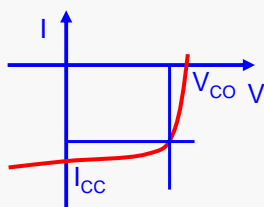
Cellule solaire - photopile



Convention : le courant inverse de la photodiode est compté positivement. Dans ce cas I s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{eV/kT} - 1)$$

V = chute de potentiel aux bornes de R_C



Caractéristique de la photopile :

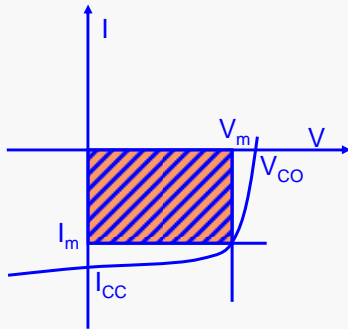
- Courant électromoteur = courant de court-circuit
- Force électromotrice = tension de circuit ouvert

$$I_{cc} = I_{ph} \quad V_{co} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

Remarque : La puissance débitée est toujours $< V_{co} I_{cc}$

Cellule solaire - photopile

Puissance fournit : $P = VI = V(I_{ph} - I_s(e^{eV/kT} - 1))$



Le maximum de puissance est obtenu pour $dP/dV = 0$.

$$I_{ph} - I_s(e^{eV_m/kT} - 1) - V_m I_s \frac{e}{kT} e^{eV_m/kT} = 0$$

La puissance maximale débitée est donnée : $P_m = I_m V_m$

$$\left(1 + \frac{eV_m}{kT}\right) e^{eV_m/kT} = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s}$$

$$I_m = I_s \frac{eV_m}{kT} e^{eV_m/kT}$$

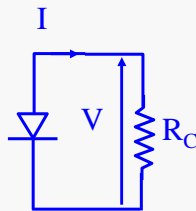
La puissance débitée est représentée par la zone hachurée. Cette valeur est de l'ordre de ^{photopile} 80% du produit $I_{cc} V_{co}$.

29

Cellule solaire - photopile

Effet de la résistance série:

Ex :



- surface 30 cm²
- rendement quantique 10%
- $V_m \sim 0,6$ V
- $I_m \sim 20$ mA/cm²
- puissance ~ 300 mW

Calcul de la résistance de charge permettant d'utiliser la puissance maximum : $R_C = V_m / I_m \sim 1 \Omega$

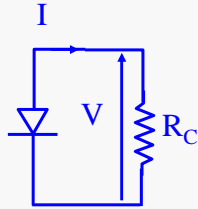
La résistance de charge typique est donc de l'ordre de l'ohm ce qui implique que la résistance série liée à la jonction pn n'est pas négligeable et au contraire va limiter la puissance débitée.

photopile

30

Cellule solaire - photopile

Effet de la résistance série:

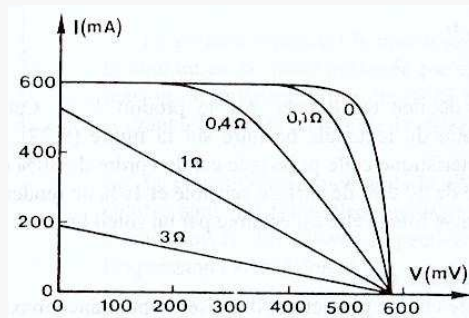


$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{eV_{jct}/kT} - 1 \right) \text{ et } V = V_{jct} - r_s I$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{e(V+r_s I)/kT} - 1 \right)$$

Remarque :

Pour $r_s = 0,4 \Omega$, la puissance débitée n'est plus que de 60%.



photopile

31

Cellule solaire - photopile

Le rendement d'une photopile est donné par le rapport entre la puissance maximum débitée et la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{\text{solaire}}}$$

Exemple :

- $P_{\text{solaire}} \sim 1 \text{ kW/m}^2$
- $V_{CO} \sim 0,6 \text{ V}$
- $I_{CC} \sim 20 \text{ mA/cm}^2$
- $V_m I_m \sim 0,8 V_{CO} I_{CC}$

$$\eta = 10 \%$$

Les cellules Si ont un rendement de 15 %.

On atteint 28 % avec des cellules bicolores Si-GaAs.

32

Cellule solaire - photopile

Limitations du rendement

- Perte par réflexion

Couches anti-réfléchissantes

- Perte lors de la conversion énergie optique en énergie électrique

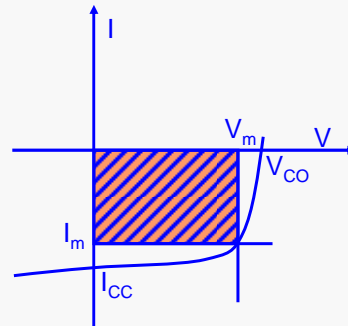
Cellules multicolores

- Polarisation directe de la jonction pn,

$$I_{\text{total}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{direct}}$$

- V limitée par V_{CO}

polarisation directe nécessaire à créer $I = I_{\text{ph}}$.



Minimisation de ces deux effets en diminuant I_{S} .

33

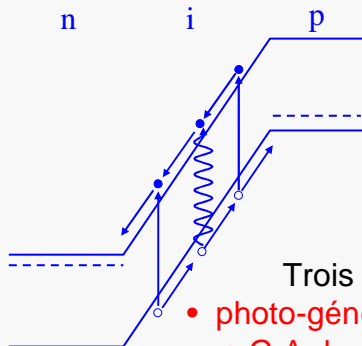
Photodiode Cellule photovoltaïque

- Principe de fonctionnement
- Photo-courant
- Réponse
- Détectivité
- Réponse temporelle
- Modes de fonctionnement
- Cellule solaire
- Photo-diode à avalanche

Principe de fonctionnement

34

Photo-détecteur à avalanche

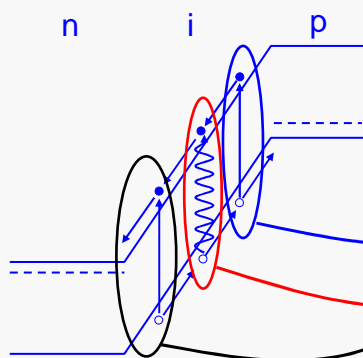


Utilisation de la multiplication des porteurs par effet d'avalanche pour augmenter la réponse d'une photodiode.

Trois sources de courants :

- photo-génération ou création thermique $q G A dx$ dans une couche d'épaisseur dx
- génération par impacts dus aux électrons $\alpha_n I_n dx$ (α_n coefficient de multiplication des e)
- génération par impacts dus aux trous $\alpha_p I_p dx$ (α_p coefficient de multiplication des h)

Photo-détecteur à avalanche



$$-\frac{dI_n}{dx} = \alpha_n I_n + \alpha_p I_p + A q G$$

$$\frac{dI_p}{dx} = \alpha_n I_n + \alpha_p I_p + A q G$$

Courant total $I = I_n + I_p$

$$\frac{dI_p}{dx} = (\alpha_p - \alpha_n) I_p + \alpha_n I + A q G$$

$$I_p(x) = C e^{-(\alpha_n - \alpha_p)x} + \frac{\alpha_n I + A q G}{\alpha_n - \alpha_p}$$

La constante C est définie par les conditions aux limites.

Photo-détecteur à avalanche

Cas idéal

Tout les photons sont absorbés dans la zone de déplétion

❖ le contact n ne peut pas injecter de trou ($I_p(0) = 0$)

❖ contact p ne peut pas injecter d'électron ($I_n(L) = 0$)

Conservation du courant total $\Rightarrow I = I_n(0) = I_p(L)$

$$I = A q G \frac{e^{((\alpha_n - \alpha_p)L)} - 1}{\alpha_n - \alpha_p e^{((\alpha_n - \alpha_p)L)}}$$

Courant en l'absence d'effet d'avalanche ($\alpha_n = \alpha_p = 0$) : $A q G L$

facteur multiplicatif $M = \frac{I}{A q G L} = \frac{1}{L} \frac{e^{((\alpha_n - \alpha_p)L)} - 1}{\alpha_n - \alpha_p e^{((\alpha_n - \alpha_p)L)}}$

Photo-détecteur à avalanche

37

Photo-détecteur à avalanche

Si L augmente M tend vers l'infini. Cela pourra détruire la diode (claquage).

Donc pour L minimale il faudra trouver un matériau dont les coefficients d'avalanche sont très différents.

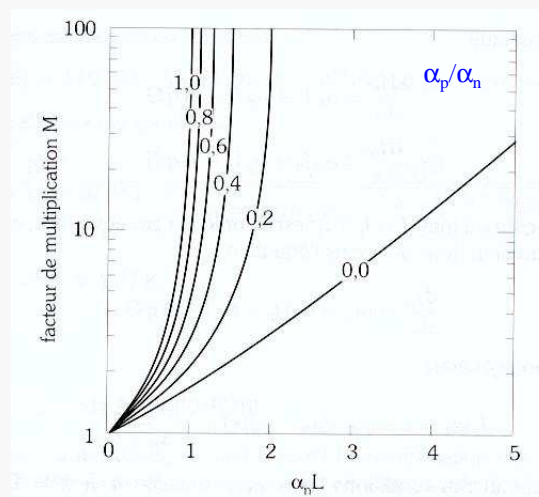


Photo-détecteur à avalanche

38