

LP2022 : Cellules Photo-Voltaïques

Sadek Al-Jibouri et Isabelle Safa

Niveau : L3

Prérequis

- Electrocinétique : Charge, Générateur,
- Semi-conducteurs : Jonction P-N,
- Optique : Absorption, Photon.

Expériences

- ☞ Caractéristique d'une photodiode.
- ☞ Faire tourner un petit ventilateur en éclairant une cellule solaire.

Références

- [1] H. Mathieu and H. Fanet. Physique des semiconducteurs et des composants électroniques : cours et exercices corrigés. Sciences Sup. Cours et exercices corrigés. Dunod, 2009.

Intéressant : [1] Ch IX p 479-523

Table des matières

1	Contexte de phénomènes mis en jeu	2
1.1	La jonction p-n	2
1.2	L'effet photoélectrique	2
2	La photodiode	2
2.1	Principe	2
2.2	Calcul du photocourant	3
3	Aspect Énergétique	4
3.1	Puissance fournie	4
3.2	Rendement	4

Introduction

Cellules photovoltaïques = base des panneaux solaires.

[**Manip d'accroche** : faire tourner le petit ventilateur avec la cellule P18.22 et une lampe QI.]

Pour avoir un rendement acceptable et une cellule photovoltaïque petite, on utilise une photodiode.

Historique bref :

1883 : Première cellule photovoltaïque, rendement énergétique de 1 %

1941 : Première Photodiode, rapidement un rendement de 5%

Maintenant : Cellules plus complexes, rendement de 20 à 45 %.

Remarque : On peut définir le rendement dès maintenant et partir de là pour guider la leçon, plutôt que donner un historique. Après la description des phénomènes mis en jeu, on donne la formule du rendement en fonction du photocourant et de la tension à circuit ouvert, ensuite quand on obtient la formule exacte du photocourant on a une formule pour le rendement plus précise et enfin on donne des chiffres.

1 Contexte de phénomènes mis en jeu

Dans cette partie, on explique les phénomènes physiques qui ont lieu dans la photodiode.

1.1 La jonction p-n

Être bref dans cette partie, on a mis les semi-conducteurs en pré-requis.

Jonction PN = mise en contact de deux semi-conducteurs dopés respectivement P et N. Entre les deux se crée la **Zone de Charge d'Espce** (abrégée ZCE) où existe un champ électrique $\vec{\mathcal{E}}$. Cette zone est due à la recombinaison des porteurs contenus dans les deux zones.

Diode en convention récepteur, caractéristique :

$$I(V) = I_s(e^{KV} - 1) \quad (1)$$

I_s : le courant d'inversion ($\ll 1\text{mA}$)

$\frac{1}{K} = \frac{kT}{e}$: la tension thermique ($=_{(300K)} 0,025\text{V}$)

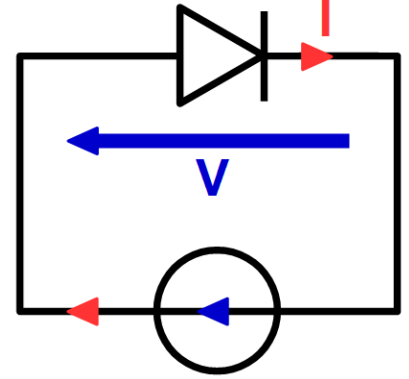


FIGURE 1 – Diode prise en convention récepteur.

1.2 L'effet photoélectrique

Découvert par Becquerel en 1839, expliqué par Einstein en 1905 (prix Nobel 1921). Traduit l'excitation d'électrons par des photons, sous forme de courant ou d'émission de photons. (on peut faire au tableau le schéma classique de l'électron qui passe d'un niveau à l'autre en absorbant un photon d'énergie supérieure au gap).

2 La photodiode

2.1 Principe

On se place maintenant en convention générateur pour la diode. La caractéristique en l'absence d'éclairement est changée :

$$I(V) = -I_s(e^{KV} - 1) + I_{\Phi}$$

où I_{Φ} est le **photocourant**.

Dans les zones p et n : pas de champ électrique, diffusion, finalement recombinaison : contribuent peu au photocourant. Dans la ZCE : accélération des porteurs de charge par le champ électrique \mathcal{E} .

Or, la mobilité des électrons dans un semi-conducteur est bien plus grande que celle des trous.

=> Finalement, seuls les électrons générés dans la ZCE contribuent au photocourant. On va calculer le photocourant vu en $x = x_p$, il s'agit de l'endroit où tous les électrons générés dans la ZCE passent, de plus. En $x = x_n$, on va négliger le courant généré par les trous pour la raison donnée précédemment.

On écrit la densité de photocourant : $\vec{j}_{\Phi} = j_{ge}(x_n)\vec{e}_x$ où $j_{ge}(x)$ est la densité de courant créée en x par les électrons photogénérés dans la ZCE en $x' < x$.

Approximations :

$$\left| \begin{array}{l} x_n \simeq 0 \\ x_p \simeq w \end{array} \right.$$

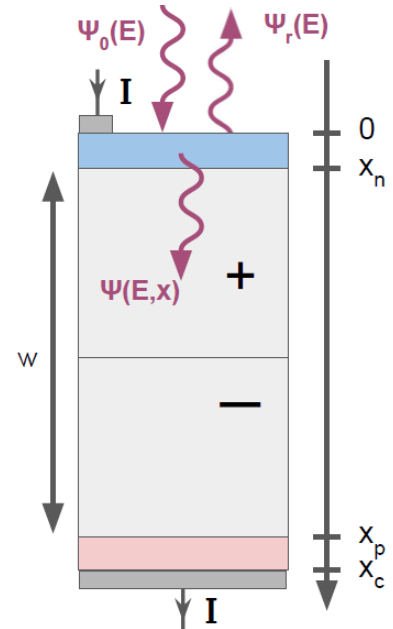


FIGURE 2 – Principe de fonctionnement de la photodiode, arrivée du flux lumineux.

2.2 Calcul du photocourant

Voir Figure 2, On pose les grandeurs suivantes, liées au flux de photons incident :

$\psi_0(E)$: Densité énergétique de flux de photons incidents.

$\psi(E, x)$: Densité énergétique de flux de photons dans la photodiode.

$R(E)$: Coefficient de réflexion en énergie de la photodiode.

$\alpha(E)$: Coefficient d'absorption du semiconducteur.

La réflexion à la surface du semi-conducteur fait que :

$$\psi(E, x = 0) = (1 - R(E))\psi_0(E)$$

Puis l'absorption nous donne une diminution exponentielle, comme pour les diélectriques :

$$\psi(E, x) = \psi(E, x = 0) e^{-\alpha(E)x}$$

Pour simplifier, on va faire l'hypothèse que $R(E) = R$, $\alpha(E) = \alpha$ pour $E > E_g$. On suppose les grandeurs constantes peu importe l'énergie du photon. L'absorption en dessous de E_g n'est pas importante puisque les photons d'énergie inférieure seront soit réfléchis, soit "perdus" en phonons.

Un photon donne un électron de conduction. Ainsi, en définissant :

- $g(E, x)$: Densité énergétique de porteurs générés par les photons d'énergie E absorbés.

$$g(E, x) = -\frac{d\psi}{dx} \quad \text{pour } E > E_g$$

$$= 0 \quad \text{sinon.}$$

- $G(x)$: Nombre de porteurs générés par le flux complet de photons. C'est à dire l'intégrale de g sur les énergies des photons.

$$G(x) = \int_{E_g}^{+\infty} g(E, x) dE$$

$$= \alpha e^{-\alpha x} \Phi_g$$

où $\Phi_g = \int_{E_g}^{+\infty} \psi(E, x) dE$ est le flux de photons d'énergies $E > E_g$

Par conservation de la charge :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j}_{ge}(x) = -e G(x)$$

En régime stationnaire (justifié car les temps de diffusion sont faibles devant les temps d'observation, la diffusion est de l'ordre de 1×10^{-10} s), $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$. De plus, \vec{j}_{ge} étant selon \vec{e}_x , l'équation devient

$$\frac{\partial j_{ge}(x)}{\partial x} = -e G(x)$$

qu'on intègre entre 0 et w .

Finalement

$$I(V) = S e \Phi_g - I_s (e^{KV} - 1)$$

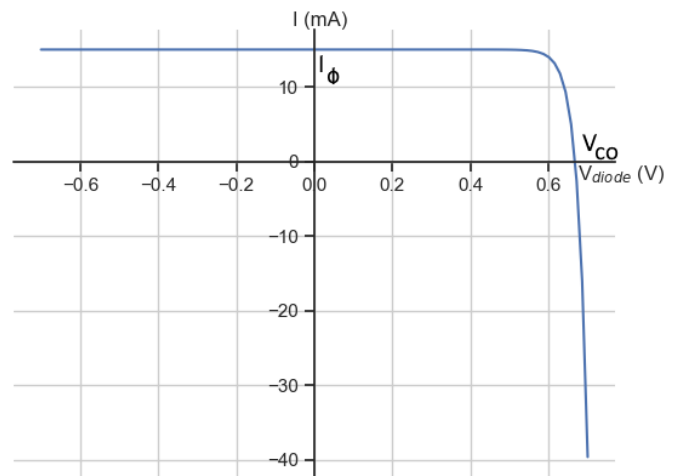


FIGURE 3 – Caractéristique de la photodiode en convention générateur. On voit bien que la caractéristique passe par le quadrant générateur (I et V positifs).

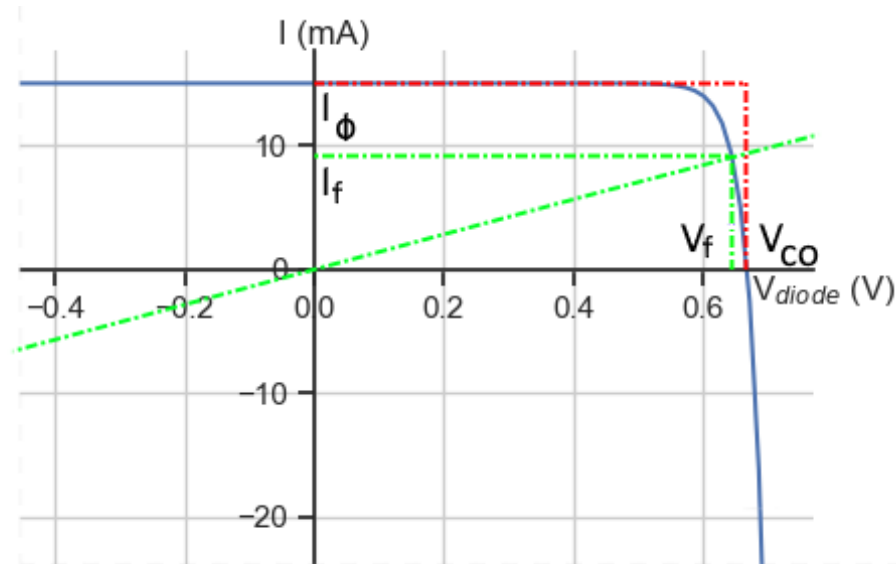


FIGURE 4 – Caractéristique de la diode en convention génératrice, avec la droite caractéristique de la résistance. Le point de fonctionnement est le croisement des deux courbes. La puissance idéale pour une diode parfaitement passante serait au point (I_{ϕ}, V_{co})

3 Aspect Énergétique

3.1 Puissance fournie

La puissance fournie est donnée par le point de fonctionnement, qu'on visualise au croisement entre les caractéristiques de la photodiode et de la résistance. On va chercher le rendement maximal de la photodiode.

Pour une diode, on définit le facteur de forme **FF**, qui quantifie l'écart à P_{max} pour une diode parfaite (on a FF entre 0,9 pour une diode idéale et 0,25 pour une diode de très grande résistance interne). FF est défini par la relation :

$$P_{max} = FF \times I_{\phi} \times V_{co}$$

où V_{co} est la tension de circuit ouvert.

On va donc comparer cela à l'énergie solaire apportée.

3.2 Rendement

On a définit le rendement comme :

$$\eta = \frac{P_{fournie}}{P_{lux}} \leq \frac{FF j_{\phi} V_{co}}{\Phi_{tot}} = \eta_0$$

(on simplifie ici la section de la cellule solaire d'où la densité de courant et le flux lumineux plutôt que les deux).

En terme d'ordre de grandeurs, on a :

$$\begin{cases} FF = 0.8 \\ j_{\phi} = 30 \text{ mA/cm}^2 \\ V_{co} = 0.7 \text{ V} \\ \Phi_{tot} = 1 \text{ kW/cm}^2 \end{cases}$$

Avec ces grandeurs, on obtient $\eta_0 = 17\%$.

Le rendement est aussi très dépendant de l'énergie de gap du semiconducteur. Pour un petit gap, on a presque tous les photons qui donnent des électrons, mais les photons d'énergie supérieure au gap ne donnent

quand même lieu qu'à une paire d'électron trous. Dans l'autre sens, si le gap est trop grand, très peu de photons génèrent des électrons et trous, alors on perd beaucoup d'énergie lumineuse dans l'intégration g.

Voir graphe dans le diapo.

Assez faible comme rendement, d'où l'ouverture :

Conclusion - Ouverture

On pourrait penser que le faible rendement des panneaux solaires en fait une source d'énergie peu utile. Mais il faut relativiser, en effet, la source de base, celle dont l'énergie est perdue, est l'énergie solaire, qui est une source quasi infinie, et inutilisable en tant que telle.

On doit donc en réalité comparer l'énergie fournie à l'énergie demandée pour fabriquer le panneau solaire.

En terme de chiffres, une cellule de $1,67 \text{ mm}^2$ fournit une puissance de l'ordre de 300 W. Elle conserve ses capacités pendant une durée de l'ordre de la vingtaine d'année, ce qui fait qu'une installation de 30 panneaux solaires fournit sur sa durée de vie entre 30 000 et 40 000 € en France, contre un coût d'installation et d'entretiens de l'ordre de 20 000 €.

De plus, les panneaux sont désormais presque à 100% recyclés, en faisant une source d'énergie efficace et peu polluante.

Compléments

Questions

- **Question 1 : Différence panneau photovoltaïque, cellule, photodiode ?** Panneau composé de cellules composées d'une photodiode et armatures en métal
- **Question 2 : ODG nombre de cellules, photodiodes dans un panneau ?** 100 cellules dans un panneau, pour les photodiodes c'est plus compliqué parce qu'une cellule peut être composée de plusieurs jonctions ?
- **Question 3 : ODG taille jonction p-n ?** Dizaine de micromètres
- **Question 4 : ODG taille ZCE ?** Pas si grande parce qu'effet de proximité pour recombinaison électrons/trous. De l'ordre de 100 nm.
- **Question 5 : Est-ce que tu peux dessiner la caractéristique d'une diode ? Qu'est-ce qu'il se passe tout à fait à gauche ?** On peut avoir effondrement. **Correspond à quoi d'un point de vue physique ?** Polarisation trop forte en inverse : passage dans électrons de la partie n vers la partie p, la diode est inutilisable car elle n'empêche plus le courant de passer.
- **Question 6 : Quelle vitesse des électrons dans une ampoule domestique ?** Deux vitesses : vitesse des électrons et vitesse de phase (de l'information) : plutôt lent, $\mu\text{m/s}$. **Idée d'un calcul pour le déterminer (sans le réaliser) ? Quelle grandeur on pourrait utiliser ?** AN faite ici
- **Question 7 : Pourquoi c'est important d'intégrer sur l'énergie ?** Rayonnements par homogènes en énergie (schéma $\psi(E)$ en fonction de E, zB rayonnement du corps noir). Tous les phénomènes optiques dépendent de la pulsation et $E = \hbar\omega$, par exemple l'absorption dont on néglige la dépendance ici.
- **Question 8 : Tu as parlé de corps noir, quelles en sont les caractéristiques ?** Matériau qui ne fait qu'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, ne réfléchit rien, absorbe tout. **Quel paramètre caractérise un corps noir ?** Température. **Quelle est la température de corps noir du soleil ? Quelle longueur d'onde majoritaire ?** Vert, soit environ 500 nm. **Quelle est la puissance fournie ?** 1 kW/m^2 , comme utilisé dans l'AN de la dernière partie. **Est-ce que tu pourrais, à partir de ces données, remonter à la T de corps noir du soleil ?** Plus la formule en tête. [NB : la température de corps noir de la surface du soleil se situe autour de 5800 K]

- **Question 9 : Quels autres types de rendements utiles ?** Comparer ce qui est produit par un parc solaire et une centrale d'énergie autre.
- **Question 10 : Quels paramètres nous intéressent sur un panneau solaire, par exemple dans l'espace ?** Leur poids : on veut qu'ils soient légers. **Qu'est-ce qu'on peut utiliser pour les rendre plus légers ?** Cellules multicolores ? Un max de puissance pour un min de place
- **Question 11 : Quels sont les problèmes environnementaux actuels des panneaux solaires ?** Courant intermittent, demande stockage par batterie : on ne peut pas s'en servir comme une source directe. **En supposant qu'on ait un moyen de stocker parfaitement, et un panneau avec un super rendement, produisant chaque jour suffisamment d'énergie, est-ce que je peux être indépendant du réseau EDF et brancher mon téléphone dessus trkl ?** Ne génère pas un courant alternatif mais continu, demande un alternateur. **Tu peux expliquer le principe ? À partir zB de très peu de puissance en 50 Hz et bcp de puissance en continu, comment on génère un courant de puissance en continu ?** euh Ça s'appelle un onduleur. **Dessine-moi un redresseur ?**

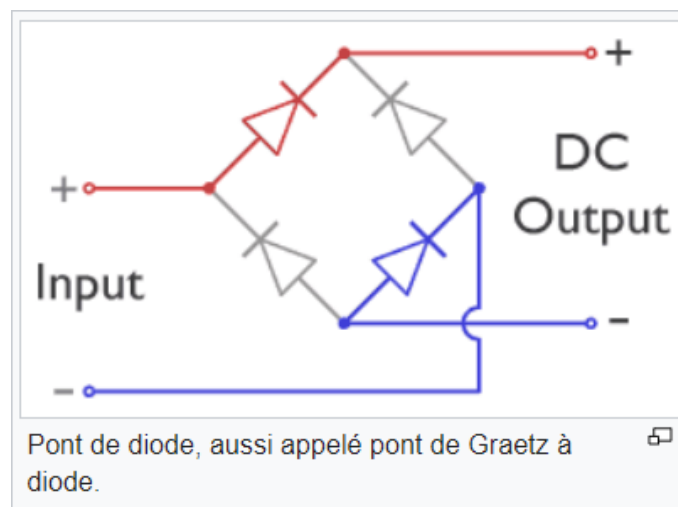


FIGURE 5 – Redresseur selon Wikipédia (lorsque l'entrée s'inverse, le courant en sortie est toujours dans le même sens).

- **Question 12 : Pour avoir une puissance optimale, il ne faut pas mettre n'importe quelle résistance de charge. Comment se placer effectivement au point de puissance optimal de la caractéristique ?** Sadek dit que ça dépend de l'éclairement mais non, il faut voir le montage qu'on a fait en TP photorécepteurs. **Réponse du correcteur : Il faudrait pas faire une adaptation d'impédance ?** Oui **Est-ce que, si on n'a pas assez d'éclairement pour faire tourner le ventilateur, on peut faire une adaptation d'impédance pour que ça tourne qd mm ?** Oui.
- **Question 13 : Tu as parlé de mobilité, peux-tu en donner la définition ?** Dans le modèle de Drude pour la conduction, on définit la mobilité d'un porteur de charge : $\mu_p = \left| \frac{q\tau}{m_p^*} \right|$ Dessin des bandes de valence et de conduction : l'inverse de la masse effective donne leur courbure.

Commentaires

- Bien d'avoir réussi à introduire du calcul alors que c'est un titre de leçon délicat. La petite expérience en accroche mobilise l'attention de l'auditoire. Dans l'ensemble, la leçon a bien été gérée.
- Bien de mettre les SC en prérequis. On passe peut-être trop de temps à en parler, il vaudrait mieux aborder plus d'aspects expérimentaux et orienter plus vers l'électrotechnique. Parler des pb de : conversion d'énergie, de courant alternatif, courant continu, avec quelles machines on peut utiliser une cellule photovoltaïque.

- Présente correctement les éléments du montage.
- Souligne les titres, encadre des choses, mets de la couleur.
- Il aurait mieux valu définir le rendement dès le début et tout chercher pour le déterminer. Manque de fil rouge. Le plan est bien, il faut juste le lier ensemble.
- Point de vue posture : Ne pas dire qu'on est perdu. Quand on l'est, il vaut mieux faire une pause, réfléchir un peu, boire de l'eau en attendant.
- Exploiter les courbes expérimentales et les construire en direct peut être bien (ou en tout cas, interagir avec).
- Bien de dire que le rendement énergétique on ne s'y intéresse finalement pas : le défi est d'optimiser les techniques pour s'adapter aux contraintes effectivement rencontrées. (cf électrotechnique)
- Réfléchir un peu plus avant de répondre aux questions, et faire attention à ne pas s'embrouiller.
- **Dans l'intro, parler de contexte énergétique plutôt qu'historique.** Introduire dès le début les quadrants dans les caractéristiques courant-tension (celui où on produit de l'énergie notamment).
- Bien introduire les notations utilisées, les répéter plusieurs fois pour qu'on comprenne de quoi on parle. (plutôt que de dire juste la lettre qui lui correspond, dire le nom complet).
- Indiquer quand on arrive à la conclusion. Peut sauver la fin de la présentation en empêchant d'être coupé.
- Ouvre la porte à plein d'électrotechnique, y faire attention, bien préparer la matière.
- Ne pas hésiter à mettre les schémas sur diapositive pour gagner du temps.