

Matière et Génération Photovoltaïque

SOLUTION DE L'EXERCICE 1 : Rayonnement solaire et énergie des photons

1. Calcul de l'énergie des photons

La formule pratique est : $E_{\text{photon}}(\text{eV}) = 1240/\lambda(\text{nm})$

1. Pour $\lambda = 400 \text{ nm}$: $E = 1240/400 = 3,10 \text{ eV}$.
2. Pour $\lambda = 800 \text{ nm}$: $E = 1240/800 = 1,55 \text{ eV}$.
3. Pour $\lambda = 1200 \text{ nm}$: $E = 1240/1200 \approx 1,033 \text{ eV}$.

2. Possibilité de génération d'électricité

Un photon peut générer une paire électron-trou si son énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap (E_g) du matériau.

Matériau	$E_g(\text{eV})$	Photon 400 nm (3,10 eV)	Photon 800 nm (1,55 eV)	Photon 1200 nm (1,033 eV)
Silicium	1,12	Oui (3,10 > 1,12)	Oui (1,55 > 1,12)	Non (1,033 < 1,12)
GaAs	1,42	Oui	Oui (1,55 > 1,42)	Non
CdTe	1,45	Oui	Oui (1,55 > 1,45)	Non
Pérovskite	1,55	Oui	Oui (1,55 = 1,55)	Non
TiO₂	3,2	Non (3,10 < 3,2)	Non	Non

3. Conclusion

Les photons de 400 nm et 800 nm peuvent être convertis par le silicium, GaAs, CdTe et la pérovskite. Le photon de 1200 nm n'est converti par aucun de ces matériaux car son énergie est trop faible. TiO₂ ne convertit aucun photon visible.

SOLUTION DE L'EXERCICE 2 : Profondeur de pénétration optique

1. Calcul de la profondeur de pénétration : $\delta = 1/\alpha$

Pour le silicium : $\alpha_{Si} = 10^4 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \delta_{Si} = 1/10^4 = 10^{-4} \text{ cm} = 1 \mu\text{m}$

Pour le GaAs : $\alpha_{GaAs} = 10^5 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \delta_{GaAs} = 1/10^5 = 10^{-5} \text{ cm} = 0,1 \mu\text{m}$

2. Comparaison

Le GaAs a un coefficient d'absorption 10 fois plus élevé que le silicium, donc la lumière est absorbée sur une épaisseur beaucoup plus faible (0,1 μm contre 1 μm). Le GaAs est un matériau à absorption directe, contrairement au silicium (absorption indirecte).

3. Impact sur l'épaisseur d'une cellule

Une cellule solaire doit avoir une épaisseur suffisante pour absorber la majorité des photons. Avec un fort coefficient d'absorption, on peut utiliser des couches très minces (quelques centaines de nm pour GaAs, quelques μm pour Si). Cela réduit la quantité de matériau nécessaire et permet d'utiliser des matériaux coûteux en couches minces. De plus, une faible épaisseur facilite la collecte des porteurs si leur longueur de diffusion est faible.

SOLUTION DE L'EXERCICE 3 : Condition de génération électrique

1. Pourquoi le silicium génère de l'électricité ?

Le silicium est un semi-conducteur avec une bande interdite (gap) de 1,12 eV. Les photons d'énergie supérieure à ce gap peuvent exciter des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, créant des paires électron-trou. Ces porteurs peuvent ensuite être séparés par un champ électrique interne (jonction p-n) et collectés pour produire un courant.

2. Absence de génération exploitable

Cuivre (métal) : Dans un métal, il n'y a pas de gap ; les électrons sont dans une bande de conduction partiellement remplie. L'absorption de photons crée des électrons excités, mais ils se relaxent rapidement par interactions avec les autres électrons (effet Joule), sans génération de courant durable. De plus, les métaux réfléchissent fortement la lumière.

Verre (isolant) : Le verre a un très grand gap (> 5 eV). Les photons visibles n'ont pas assez d'énergie pour faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Ils sont transmis ou absorbés par d'autres mécanismes (vibrations), mais sans création de paires électron-trou.

3. Condition fondamentale de conversion photovoltaïque

Il faut un matériau semi-conducteur avec une énergie de gap adaptée au spectre solaire, et une structure (jonction p-n ou équivalente) permettant de séparer les porteurs photo générés avant leur recombinaison.

SOLUTION DE L'EXERCICE 4 : Rendement quantique et courant généré

Données : Surface $S=1\text{ m}^2$, $\lambda=600\text{ nm}$, puissance incidente $P=100\text{ W/m}^2$ (donc puissance totale $P_{tot}=100\text{ W}$), rendement quantique $QE=85\%$.

1. Nombre de photons incidents par seconde

Énergie d'un photon à 600 nm :

$$E_{ph}=1240/600=2,0667\text{ eV}.$$

$$\text{Conversion en joules : } 1\text{ eV}=1,602\times 10^{-19} \rightarrow E_{ph}=2,0667\times 1,602\times 10^{-19}=3,311\times 10^{-19}\text{ J}.$$

Nombre de photons incidents par seconde :

$$N=P_{tot}/E_{ph}=100/3,311\times 10^{-19}=3,02\times 10^{20}\text{ photons/s}.$$

2. Courant généré

$$\text{Photons absorbés : } N_{abs}=QE\times N=0,85\times 3,02\times 10^{20}=2,567\times 10^{20}\text{ photons/s}$$

Chaque photon absorbé génère un électron, donc courant :

$$I=N_{abs}\times e=2,567\times 10^{20}\times 1,602\times 10^{-19}=41,1\text{ A}.$$

3. Comparaison avec une cellule en silicium

Le courant est proportionnel au nombre de photons absorbés. Si une cellule en silicium a le même QE à 600 nm, le courant serait identique (41,1 A). En pratique, le silicium a un gap plus faible, mais cela n'affecte pas le QE à cette longueur d'onde si l'absorption est totale.

SOLUTION DE L'EXERCICE 5 : Matériaux non silicium et production électrique

1. Classement par gap croissant

1. CIGS : 1,15 eV
2. CdTe : 1,45 eV

3. Pérovskite : 1,55 eV
4. TiO_2 : 3,2 eV
5. GaN : 3,4 eV

2. Production sous rayonnement visible (400–800 nm)

Le visible correspond à des énergies de 1,55 eV (800 nm) à 3,10 eV (400 nm). Un matériau peut produire de l'électricité si son gap est inférieur ou égal à l'énergie du photon.

- CIGS (1,15 eV) : absorbe jusqu'à 1080 nm, donc tout le visible.
- CdTe (1,45 eV) : absorbe jusqu'à 855 nm, donc visible jusqu'à 800 nm.
- Pérovskite (1,55 eV) : absorbe jusqu'à 800 nm exactement.
- TiO_2 (3,2 eV) : absorbe en dessous de 387 nm (UV), pas de visible.
- GaN (3,4 eV) : absorbe en dessous de 365 nm (UV), pas de visible.

3. Matériaux adaptés aux UV uniquement

TiO_2 et GaN, car leur gap est supérieur à 3,1 eV, donc ils n'absorbent que les UV (< 400 nm).

4. Pourquoi certains matériaux absorbent mais ne produisent pas de courant ?

- Dans les métaux, l'absorption crée des électrons excités mais ils se recombinent rapidement par relaxation (effet Joule) et il n'y a pas de champ interne pour séparer les charges.
- Dans les isolants à très grand gap, l'absorption de photons visibles est impossible. Même si des défauts permettent une absorption, les porteurs sont piégés ou se recombinent, et l'absence de champ interne empêche leur collecte.
- Pour une conversion efficace, il faut un semi-conducteur avec un gap adapté et une structure de type jonction pour séparer les porteurs.