
Photorécepteurs

- CHATELAIN : *Dispositifs à semi-conducteurs*, Chap. 9
- GUILLIEN : *Électronique*, tome 3
- BESSON : *Technologie des composants électroniques*, tome 2, Chap. 13
- HANDBOOK of OPTICS : Chapitre 4
- SEXTANT : *Optique expérimentale*, Chapitre 2
- BUP 762, p 471
- BOTTINEAU : *Expériences d'optique*
- KITTEL : *Physique de l'état solide*

I) [1P] Introduction

On se limite ici aux récepteurs photoélectriques (lumière \rightarrow signal électrique) de type détecteurs (c'est-à-dire qui permettent de faire une mesure)¹. D'autres récepteurs existent, par exemple de type photothermique (chauffage solaire). On peut classer les détecteurs usuels suivant leur principe de fonctionnement.

1) Détecteurs quantiques

Chaque photon crée un porteur de charge (avec une probabilité η , l'efficacité quantique) qui participe à la réponse électrique. Tous ces récepteurs présentent un net effet de seuil en longueur d'onde.

a) Les photons arrachent les électrons à une photocathode

- *cellule photoélectrique à vide* : intéressante dans le principe, elle n'est plus utilisée actuellement. Elle servait autrefois à l'agrégation à la mesure de e/h ;
- *tube photomultiplicateur* : surtout intéressant pour sa grande sensibilité (§ IV).

b) Les photons créent des porteurs mobiles

Soit dans un semi-conducteur homogène – la photorésistance par exemple – soit à la jonction entre deux matériaux semi-conducteurs – c'est le cas des photodiodes, des phototransistors, des photopiles et des composants CCD.

- *photorésistance* : détecteur très sensible mais peu linéaire et peu rapide (cf. TP Semiconducteurs) ;
- *photodiode* : en usage courant, c'est le détecteur le plus utilisé (§ II) ;
- *phototransistor* : photodiode avec amplification interne de courant. Il est peu linéaire et ne sera pas étudié ici.
- *photopile* : composant de grande surface qui sert à obtenir de l'énergie électrique (§ V) ;
- *C.C.D.* : c'est le composant de base des caméras vidéo. On dispose de plusieurs *barrettes* (à 1D) C.C.D. (Charge Coupled Device) de haute résolution qu'on utilisera dans certaines expériences d'optique (fentes d'Young, diffraction...). On illustre ici le principe de fonctionnement de ces dispositifs (§ VI). On pourra aussi utiliser des *matrices* (à 2D) qui sont à la base des caméras vidéo et des «webcams».

2) Détecteurs thermiques

On mesure l'échauffement dû à l'absorption de l'énergie du rayonnement. La sensibilité de ces détecteurs est faible mais indépendante de la longueur d'onde.

- *thermopile* : l'échauffement est mesuré par des thermocouples (cf. TP Thermométrie) ;
- *capteur pyroélectrique* : l'effet pyroélectrique est l'apparition d'une tension entre les faces d'un cristal portées à des températures différentes.

Il n'est pas possible d'étudier ici les propriétés (sensibilité, réponse spectrale, rapidité...) de chaque détecteur. On a donc choisi les propriétés les plus caractéristiques de certains d'entre eux.

¹Sauf dans l'expérience sur la cellule solaire (§ V).

II) Photodiode (détecteur le plus couramment utilisé)

La lumière crée des porteurs dans une jonction p-n et augmente le courant inverse dû aux porteurs minoritaires. Pour un fonctionnement en régime linéaire, une photodiode doit être utilisée avec une polarisation inverse externe (voir plus bas). Nous disposons de photodiodes au silicium (gap indirect à 1,14 eV correspondant à $1,1\mu\text{m}$; modèles BPX 61 et BPW 34) dont le maximum de sensibilité est dans l'infrarouge proche ($\sim 0,85\mu\text{m}$).

1) [1P] Caractéristique courant – tension

On l'obtient à l'oscilloscope grâce au montage de la Fig. 1 (la résistance sert à la fois à mesurer et à limiter le courant) :



FIG. 1 – Montage de la photodiode pour la caractéristique courant-tension

Régler le décalage et le niveau du GBF pour explorer la caractéristique. En l'absence d'éclairement on a la caractéristique usuelle d'une diode (le courant pour des tensions très négatives est alors appelé courant d'obscurité). Observer sa modification quand on augmente le flux lumineux Φ .

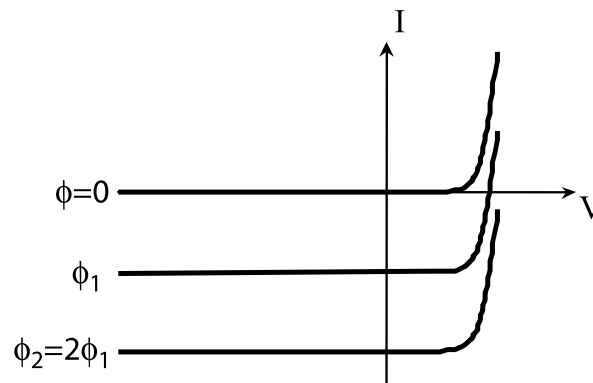


FIG. 2 – Caractéristique courant-tension de la photodiode

On passe d'une caractéristique à l'autre par un *décalage vertical proportionnel au flux* : $I = k\Phi$.

Note : idéalement il faudrait un oscilloscope différentiel pour avoir la tension aux bornes de la diode, sinon la résistance qui sert à mesurer le courant introduit une erreur sur cette tension. L'erreur est cependant sans importance dans la zone où les caractéristiques sont horizontales, l'effet étant dans ce cas un décalage horizontal.

2) [1P] Utilisation de la photodiode en détecteur de lumière linéaire

a) Photodiode non polarisée (ne pas réaliser ce montage)

C'est le montage le plus simple auquel on pourrait penser.

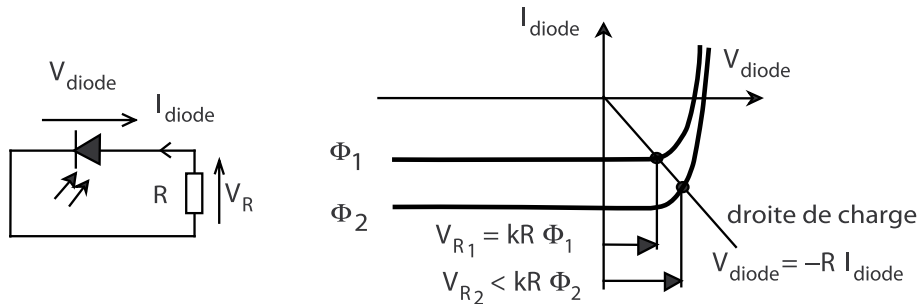


FIG. 3 – Photodiode non polarisée

Déduire de la caractéristique que le fonctionnement n'est linéaire que sur une faible plage d'éclairement. En pratique ce montage n'est utilisé que pour effectuer des mesures de très faibles flux, car le courant d'obscurité (\sim nA) y joue un rôle plus faible que dans le montage avec polarisation inverse.

b) Photodiode polarisée en inverse (montage à utiliser par la suite)

Attention : On utilise dorénavant une **alimentation continue**, et non plus le GBF utilisé précédemment, puisqu'il ne s'agit plus de tracer la caractéristique !

Comprendre pourquoi le fonctionnement est cette fois-ci linéaire : V_R est proportionnelle au flux lumineux. Dans ce cas la photodiode peut être modélisée par un générateur de courant.

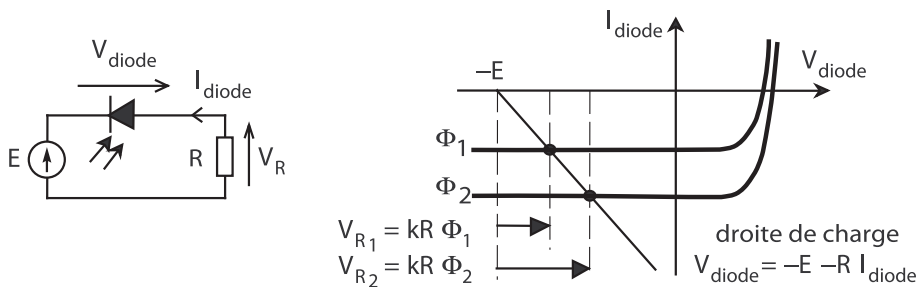


FIG. 4 – Photodiode polarisée en inverse

Afin de travailler dans une zone de fonctionnement linéaire, on contrôlera toujours que la tension aux bornes de la résistance est inférieure à la tension d'alimentation.

On travaille en général avec une tension de polarisation de quelques Volts (attention à ne pas dépasser la tension inverse maximale spécifiée par le fabricant !). Comment faut-il choisir la résistance R ? Se convaincre qu'en choisissant R petit, on améliore la "gamme de linéarité" de la photodiode. Quel problème rencontre-t-on si R est trop faible ?

En pratique, en choisissant $R \simeq E/I_{\max}$, on obtient à la fois un comportement linéaire et des signaux forts.

3) Vérification de la linéarité

Pour ces expériences, utiliser des DELs haute luminosité ayant atteint leur équilibre thermique, ce qui prend plusieurs minutes après leur branchement. Voir le § VII pour leur branchement. Au cours de l'expérience ne pas les éteindre mais masquer leur faisceau au moyen d'un petit écran noir².

On évitera d'utiliser un laser (même polarisé et branché depuis longtemps³) pour lequel il faut prendre garde aux fluctuations lentes de puissance, souvent importantes.

a) [1P] Vérification simple

En utilisant 2 DELs, montrer qu'il y a additivité des réponses en courant I :

$$I(\Phi_1) + I(\Phi_2) = I(\Phi_1 + \Phi_2).$$

Contrôler que le courant d'obscurité est négligeable (ou en tenir compte).

b) [2P] Vérification complète

Opérer avec des *filtres gris*⁴. On rappelle que la densité d'un filtre est

$$D = \log \frac{\Phi_{\text{incident}}}{\Phi_{\text{transmis}}}.$$

On dispose de filtres gris en verre de densité 1 à 4.

- Ces filtres ayant une absorption beaucoup plus faible que prévu dans le proche infrarouge, ce qui coïncide avec le maximum de sensibilité de la photodiode, ne pas utiliser de source de lumière blanche.
- La précision des filtres est environ 0,1 en densité, soit $10^{0,1} = 26\%$ en transmission. Cette imprécision empêche de faire un contrôle direct de la linéarité. Procéder de la façon suivante en présence du faisceau lumineux (vérifier à chaque fois que le signal est négligeable lorsqu'on masque la source, sinon le retrancher) :
 - mesurer $I(0)$, signal en absence de filtre (ne pas le confondre avec le courant d'obscurité) ;
 - mesurer $I(D_1)$, $I(D_2)$ et $I(D_1 + D_2)$.

Si le comportement est linéaire on doit avoir $I(0) = k\Phi$, $I(D_1) = k\Phi \times 10^{-D_1}$, ... d'où

$$\frac{I(D_1 + D_2)}{I(0)} = \frac{I(D_1)}{I(0)} \frac{I(D_2)}{I(0)},$$

où D_1 et D_2 n'ont pas besoin d'être connus a priori.

Si c'est le cas on peut en déduire :

- que le système de détection est linéaire⁵,
- une mesure précise des densités D_1 et D_2 : $D_1 = -\log \frac{I(D_1)}{I(0)}$.

On peut opérer avec des filtres de densités très différentes ($D_1 \approx 1$ et $D_2 \approx 4$ par exemple) et vérifier ainsi rapidement la linéarité sur 5 décades (grande dynamique).

²Une main est un mauvais écran noir.

³Et en aucun cas un laser non polarisé suivi d'un polariseur (Cf. Sextant p.268).

⁴*Gris* signifie ici que la transmission est relativement plate spectralement.

⁵Il faudrait en toute rigueur le vérifier pour plusieurs couples (D_1, D_2).

4) [1P] Détermination de la sensibilité et du rendement quantique de la photodiode

Mesurer la puissance d'un laser He-Ne grâce au puissance-mètre optique (N.139), outil beaucoup plus adapté aux lasers que le détecteur pyroélectrique décrit plus bas. Il s'agit en fait d'une photodiode calibrée. En déduire la sensibilité de la photodiode dans le rouge (en $A \cdot W^{-1}$) et son rendement quantique en électron par photon (voir le Sextant). Comparer aux valeurs annoncées par le constructeur.

5) [2P] Sensibilité spectrale

La réponse spectrale des photodiodes n'est pas plate. La connaissance de cette réponse est essentielle pour toute expérience de type spectroscopie, où la photodiode sert à mesurer des flux lumineux à différentes longueurs d'onde.

a) Expérience rapide illustrant la sensibilité dans l'IR

Prendre comme source une lampe QI avec condenseur. Comme toute lampe à incandescence, elle émet beaucoup d'IR et très peu d'UV. Attention le faisceau peut être destructeur : ne pas le focaliser sur la matière.

Interpréter le signal donné par la photodiode lorsque l'on place entre elle et la source deux polariseurs soigneusement croisés. Pour confirmation ajouter ensuite un filtre anti-thermique. Cette expérience illustre également les défauts des polaroïds dans l'infrarouge.

b) Étude complète de la sensibilité spectrale (ne pas y passer trop de temps)

On utilise le monochromateur avec son illuminateur (notice 328). Choisir des fentes d'entrée et sortie larges (2,5 mm, la résolution en fonction de la largeur des fentes est indiquée sur l'appareil)⁶. On étudie tout d'abord le spectre émis par le monochromateur au moyen d'un détecteur pyroélectrique dont la réponse spectrale est quasiment plate⁷. On se reportera à la notice 539 et au Sextant pour des informations sur le principe de fonctionnement de cet appareil, qui nécessite une modulation d'intensité lumineuse à l'aide d'un hacheur optique. La tension délivrée est alors proportionnelle à la variation de température de la surface sensible entre les phases faisceau coupé/faisceau passant. Observer le signal à l'oscilloscope. La sensibilité du détecteur est étalonnée pour différentes valeurs de la fréquence de modulation, permettant de remonter, à partir de la tension crête-crête, à la puissance lumineuse reçue (voir la notice). Ici, on ne s'intéresse qu'à des mesures relatives de la sensibilité et on pourra donc plus simplement⁸ mesurer la tension avec un voltmètre RMS⁹. Il est important de bien condenser à l'aide d'une lentille la lumière en sortie du monochromateur sur les détecteurs, car les signaux obtenus sinon sont très faibles, particulièrement pour le détecteur pyroélectrique.

Attention : bien que le détecteur soit protégé par une fenêtre en quartz, il est essentiel de le placer assez loin du hacheur optique, qui fait ventilateur, et de se déplacer le moins possible dans la pièce.

⁶L'appareil étant symétrique, il faut des fentes de même largeur en entrée et sortie. C'est à cause de la faible sensibilité du détecteur pyroélectrique qu'il faut prendre des fentes larges. D'ailleurs la résolution n'est pas essentielle ici.

⁷Ne pas utiliser la thermopile pour cette expérience, sa sensibilité est beaucoup trop faible et dépend beaucoup du point d'impact du faisceau.

⁸Et donc plus rapidement.

⁹Faire toutes les mesures avec la même fréquence pour le hacheur.

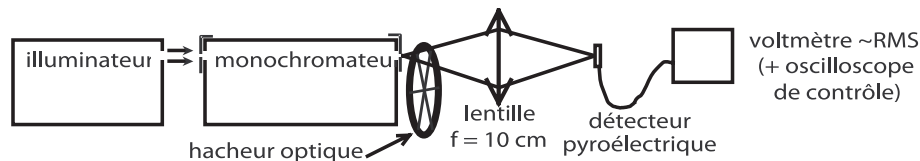


FIG. 5 – Mesure de la sensibilité spectrale du détecteur pyroélectrique

Le réseau utilisé étant "blazé" dans l'ordre 1, on peut a priori continuer l'étude au delà de 800 nm (jusqu'à environ 1000 nm) sans être trop gêné par l'ordre 2 de la partie bleue du spectre¹⁰ qui apparaît alors.

On mesure pour quelques longueurs d'onde (par exemple tous les 50 nm de 400 à 1000 nm), la valeur efficace de la tension alternative délivrée par le pyroélectrique.

On remplace ensuite le détecteur pyroélectrique par la photodiode à étudier et on mesure son signal aux mêmes longueurs d'onde que précédemment.

En déduire la fonction de réponse de la photodiode (rapport signal photodiode / signal pyroélectrique) pour la douzaine de points pris. Comparer à la courbe du constructeur.

NB : on peut aussi balayer le spectre continûment en utilisant le moteur du monochromateur, utiliser l'ordinateur pour faire un suivi temporel automatisé des courbes de réponse, et faire leur rapport¹¹.

6) [AP] Temps de réponse de la photodiode

La photodiode est un composant rapide, ce qui impose l'emploi d'une source lumineuse rapide pour tester son temps de réponse. Dans cette expérience quantitative, on ne pourra qu'établir une limite supérieure sur le temps de réponse. Pour cette expérience, on choisira impérativement une diode électroluminescente (DEL) rouge de haute luminosité.

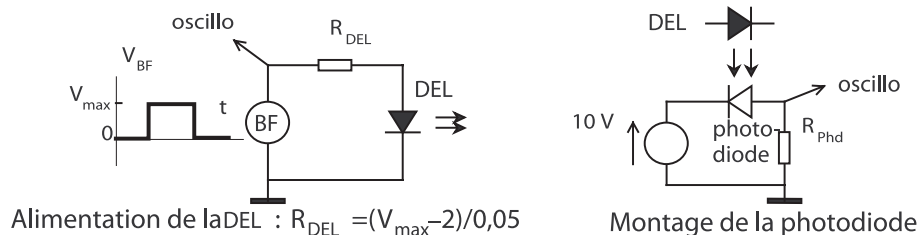


FIG. 6 – Alimentation de la DEL et montage de la photodiode

La Fig. 13 (à gauche) indique comment alimenter la diode électroluminescente (DEL) :

- elle n'aime pas les tensions négatives : utiliser des signaux carrés avec décalage ;
- elle supporte des courants de 50 mA au maximum et la tension à ses bornes lorsqu'elle éclaire vaut approximativement 2 V (pourquoi ?). Donc pour contrôler le courant qui la traverse il faut choisir $V_{max} \gg 2 V$ et prendre R_{DEL} en conséquence (on réalise ainsi un générateur de courant).

Enfin vérifier que le temps de montée des signaux carrés donnés par le GBF ne dépasse pas 0,1 μs , sinon prendre un autre GBF.

¹⁰Si l'on veut l'éliminer, on peut utiliser un filtre (par exemple le filtre OG590).

¹¹Il faut alors prendre garde que les points pris lors des deux acquisitions ne correspondent pas nécessairement exactement aux mêmes longueurs d'onde, mais cet effet est peu important pour un spectre d'émission variant lentement.

a) Mise en œuvre

La démarche proposée consiste à montrer que *dans les conditions usuelles*, le temps de réponse à un échelon d'éclairement n'est pas imposé par la photodiode mais par le circuit électrique qui lui est associé. On montre aussi que ce n'est pas la DEL qui limite la rapidité.

Il n'est pas question de faire ici une étude quantitative poussée : *le signal obtenu n'est qu'approximativement exponentiel*. Cependant pour évaluer simplement la rapidité on mesurera¹² le temps caractéristique τ tel que l'écart à la valeur asymptotique soit divisé par $e \approx 3$.

Commencer avec $R_{\text{Phd}} = 100\text{k}\Omega$. Choisir une période du signal BF suffisamment grande pour que les asymptotes soient atteintes. Ajuster la distance DEL-photodiode pour éviter la saturation. Déterminer τ .

Sans changer l'alimentation de la DEL, passer à $R_{\text{Phd}} = 10\text{k}\Omega$. Ajuster à nouveau la période et la distance.

On en conclut que :

- ce n'est pas l'éclairage qui limite la rapidité quand $R_{\text{Phd}} = 100\text{k}\Omega$;
- ce n'est pas le composant photodiode qui limite la rapidité quand $R_{\text{Phd}} = 100\text{k}\Omega$.

b) Exploitation quantitative

On se donne le modèle *linéaire* suivant pour le circuit¹³ :

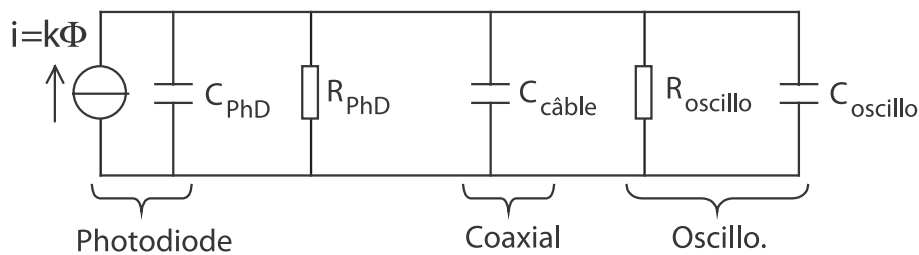


FIG. 7 – Modèle du circuit

avec $C_{\text{PhD}} \simeq 20\text{pF}$ pour la BPW34, $C_{\text{oscillo}} \simeq 25\text{pF}$ et surtout $dC_{\text{cable}}/dL = 100\text{pF/m}$.

Faire un schéma électrique équivalent (avec un générateur de tension), en déduire qu'on attend :

$$\frac{\tau}{(R_{\text{PhD}}/R_{\text{oscillo}})} = \text{Cste avec Cste} = C_{\text{PhD}} + C_{\text{cable}} + C_{\text{oscillo}} \simeq C_{\text{cable}}.$$

On vérifiera que ce modèle concorde avec les mesures pour $R_{\text{Phd}} = 100\text{k}\Omega$ et $10\text{k}\Omega$.

Passer à $R_{\text{PhD}} = 1\text{k}\Omega$ (il faut alors accoller DEL et photodiode). Il se peut que le modèle ne convienne plus : $\tau/R_{\text{PhD}} \gg C_{\text{cable}}$. Mais attention, on ne peut pas savoir si c'est à cause du circuit d'éclairage ou du modèle de photodiode.

Pour des valeurs plus faibles de R_{PhD} le signal, trop faible, est probablement très bruité.

Le modèle s'avère donc valable pour des temps caractéristiques de l'ordre de la microseconde.

¹²Ne pas utiliser la méthode de la tangente qui est très sensible aux écarts à la loi exponentielle.

¹³Pour la modélisation de la photodiode par un générateur de courant voir II.2.b. On ajoute le condensateur "PhD" pour traduire le comportement de la photodiode à haute fréquence.

c) Suggestions

- Pour avoir un point de mesure en plus, on peut supprimer la résistance R_{PhD} .
- En utilisant un adaptateur BNC-BNC, accroître la longueur du câble coaxial de liaison avec l'oscilloscope.

III) Cellules photovoltaïques

1) [1P] Généralités

a) Introduction

Les cellules photovoltaïques permettent de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Elles se présentent sous la forme de plaques sombres, équipées de bornes pour brancher des charges (accumulateur ou charge utile en utilisation directe). Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques, nous allons uniquement nous intéresser aux technologies silicium, qui constituent la grande majorité des cellules commerciales.

Les cellules photovoltaïques au silicium sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium, sur le même principe que la photodiode. La différence entre ces deux objets est technologique : les photodiodes sont optimisées pour avoir le plus fort courant inverse sous éclairage, dans un domaine spectral donné, afin d'être utilisées comme capteur. Les cellules photovoltaïques sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairage dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire. Deux paramètres importants d'une photopile sont le courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} , ces deux paramètres dépendant de l'éclairage incident.

b) Jonction PN au silicium

Au § II, nous avons étudié la jonction PN en convention récepteur, comme capteur de flux lumineux (voir Fig. 9, cas a). On remarque que pour un éclairage non nul, il existe une région de la caractéristique de la jonction où la puissance reçue est négative. C'est ce domaine qui est exploité dans les cellules photovoltaïques.

Désormais, nous considérons la jonction en convention générateur, soumise à un éclairage. On obtient alors la caractéristique de la Fig. 9 (cas b).

Au niveau microscopique, la génération du courant provient de l'absorption d'un photon aboutissant à la création d'une paire électron-trou au niveau de la jonction, schématisée sur la Fig. 10. L'énergie du photon $h\nu$ est absorbée et transférée à un électron excité de la bande de valence vers la bande de conduction. Cet électron relaxe très rapidement vers le minimum de la bande de conduction, cédant son énergie cinétique $h\nu - E_g$ au cristal sous forme de chaleur, où E_g est la largeur de la bande interdite ("gap"). Sous l'action du champ électrique régnant dans la jonction, il est collecté par une électrode. Symétriquement, le trou associé relaxe également dans la bande de valence et est collecté par une deuxième électrode. Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif une tension en circuit-ouvert de l'ordre de E_g/q (en pratique $V_{co} \approx E_g/2q$) où q est la charge de l'électron. Le courant de court-circuit correspond au flux d'électrons photocréés. Il correspond donc au flux de photons absorbés multiplié par q et par le rendement quantique (voir Sextant).

Une faible valeur de E_g permet l'absorption de la plupart des photons du spectre solaire (et donc un courant important). Une grande valeur de E_g permet d'obtenir une tension élevée. Un compromis

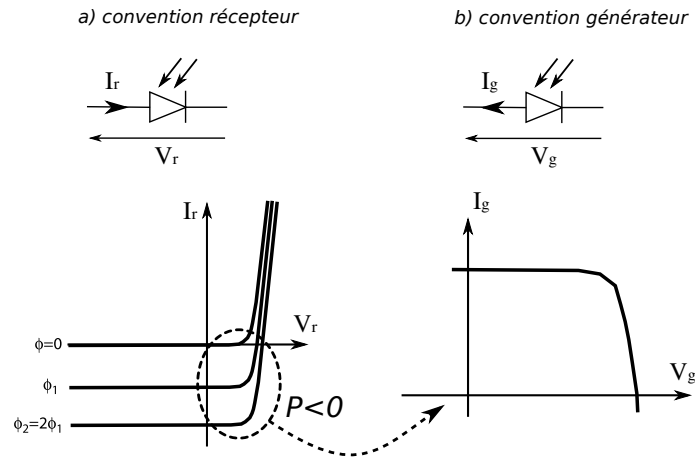


FIG. 8 – Caractéristique de la cellule photovoltaïque

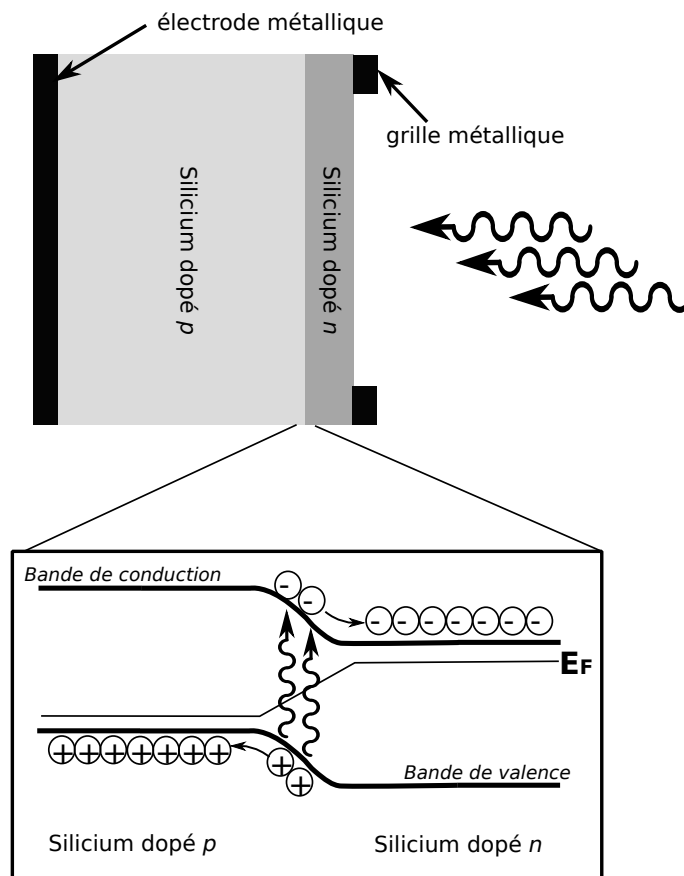


FIG. 9 – Jonction p-n d'une cellule photovoltaïque

entre les deux permet d'optimiser la puissance, en pratique pour des gaps de l'ordre de 1 à 2 eV. Le silicium avec un gap de 1,1 eV est bien adapté, et possède également de nombreux avantages au niveau industriel (légèreté et faible coût, maîtrise des techniques de la microélectronique).

c) Associations série ou parallèle

La tension en circuit ouvert est liée au gap du matériau utilisé ($V_{co} \approx 0,6V$ pour le silicium). Afin d'augmenter la tension délivrée, à charge donnée, on associera plusieurs cellules ("une cellule = une jonction") en série. Ainsi, la tension en circuit ouvert de N jonctions en série, éclairées identiquement, est alors $V_{N,co} = NV_{co}$, où V_{co} est la tension en circuit ouvert d'une cellule unique.

De manière similaire, si à éclairage donné la charge nécessite un courant plus élevé que celui d'une cellule unique, on les associera en parallèle.

Au final, le nombre d'association en série ou en parallèle sera adapté suivant la charge à alimenter.

2) [1P] Mesure des caractéristiques de cellules photovoltaïques

Outre le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert, on se propose de tracer la caractéristique complète de plusieurs cellules photovoltaïques. Pour cela, nous disposons de trois types de cellules photovoltaïques différentes :

- cellules en silicium amorphe,
- cellules en silicium polycristallin,
- cellules en silicium monocristallin.

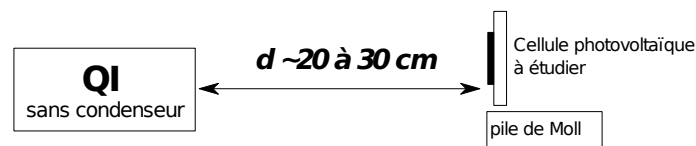


FIG. 10 – Etude des cellules photovoltaïques

Afin d'avoir un éclairage le plus homogène possible, placer la cellule à étudier à une trentaine de centimètres d'une quartz-iode sans condensateur. Placer également à côté (à la même distance du filament) une pile de Moll (notice 80) permettant de mesurer le flux surfacique incident. Réaliser le montage électrique suivant

On pourra éventuellement remplacer l'ensemble ampèremètre+voltmètre par un wattmètre. Comme charge, on prendra une résistance variable allant de $1\ \Omega$ à $1\ k\Omega$ (boîte à décades).

Pour chaque type de cellule, mesurer la tension et le courant délivré pour plusieurs valeurs de résistance de charge, et reconstruire la caractéristique.

3) [1P] Rendement maximal

Tracer également la puissance utile en fonction de la charge. A l'aide de la pile de Moll (dont on aura enlevé le filtre anti-thermique), calculer le flux lumineux surfacique incident, et en déduire le rendement (en mesurant précautionneusement la surface des cellules utilisées) pour chaque type de cellules. Quelle hiérarchie de rendement suivant le type de cellule observe-t-on ?

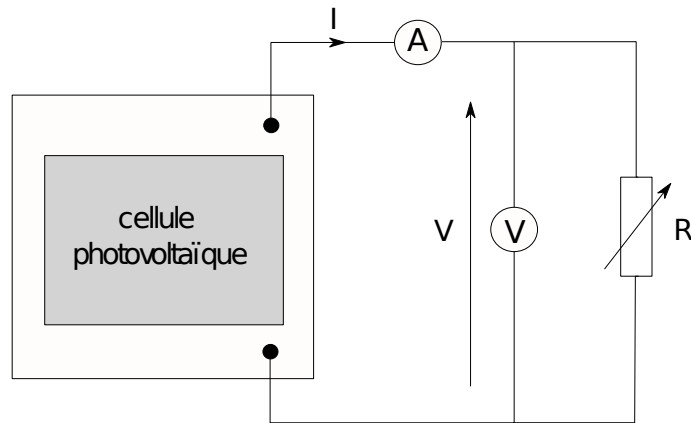


FIG. 11 – Montage électrique de la cellule photovoltaïque

Une des sources de pertes dans les cellules photovoltaïques sont les recombinaisons de porteurs. Ces dernières sont particulièrement importantes au niveau des défauts (de surface et de volume) et des impuretés du matériau utilisé. A la lumière de cela, commenter le résultat précédent.

4) [AP] Estimation du nombre de cellules

Pour une jonction PN, on a le lien entre le courant et la tension (en convention récepteur) suivant : $I_p = I_{cc}(\Phi) + I_s \left(e^{\frac{eV_p}{k_B T}} - 1 \right)$, où $I_{cc}(\Phi)$ est le courant parcouru par la cellule court-circuitée, pour un flux surfacique Φ donné. Dans le cas de N cellules en série, on obtient alors $I = I_{cc}(\Phi) + I_s \left(e^{\frac{eV}{Nk_B T}} - 1 \right)$, où V et I sont les tension et courant mesurés.

En procédant à un ajustement des caractéristiques tracées précédemment, estimer le nombre de cellules branchées en série pour chaque type considéré. Vérifier que cela est cohérent avec l'estimation que l'on peut faire à partir de la tension en circuit ouvert (nombre de cellules en série = $V_{co}/0,6V$ pour le silicium).

On pourra également associer en série ou parallèle deux cellules de même type, et tracer les caractéristiques correspondantes.

IV) [2P] Photoconductivité : création de porteurs par un rayonnement lumineux

Lorsqu'on éclaire un échantillon de semiconducteur, l'absorption des photons d'énergie supérieure au gap génère des paires électron-trou (voir Kittel). L'apparition de ces porteurs excédentaires provoque l'augmentation de la conductivité du matériau. Lorsque l'éclairement s'interrompt, les concentrations de porteurs retournent vers leurs valeurs à l'équilibre avec une constante de temps caractéristique qui est le temps de vie des porteurs photocréés. Dans le domaine visible, on utilise les photorésistances (ou cellules photoconductrices) au sulfure de cadmium (CdS).

1) Mise en évidence de la photoconductivité

Comme on souhaite un signal donnant accès à la conductivité, proportionnelle à $1/R_L$, où R_L est la résistance électrique du photoconducteur, le schéma le plus simple auquel on pourrait penser est le montage A de la Fig. 6.

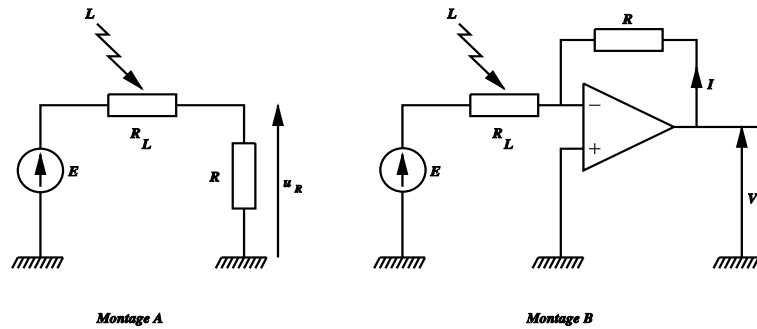


FIG. 12 – Mesure de la photoconductivité

La mesure de la tension aux bornes de la résistance R donne alors $u_R = ER/(R + R_L) \simeq ER/R_L$ à condition que $R \ll R_L$. Or le domaine de variation des résistances des cellules photoconductrices est important : de quelques $M\Omega$ pour la résistance d'obscurité à quelques centaines d'Ohms pour les niveaux d'éclairage usuels. Cette approche pose donc un problème de linéarité, sauf si R est petite. Mais dans ce cas la précision de la mesure de u_R est limitée.

On propose donc le schéma à amplificateur opérationnel (A.O.) du montage B de la Fig. 6. Ce montage permet d'imposer une différence de potentiel constante aux bornes de la cellule, et le courant I qui la traverse est alors proportionnel à la conductance de la cellule : $V_s = RI = -ER/R_L$. Il n'y a cette fois pas de condition sur R et on choisira pour celle-ci une boîte AOIP $\times 1\text{ k}\Omega$. Attention néanmoins à la saturation possible de l'A.O. On prendra pour E la partie négative (-12 V ou -15 V) d'une alimentation d'A.O.

Élargir un faisceau laser pour éclairer entièrement la photorésistance. Interposer des densités ou utiliser deux polariseurs pour faire varier l'intensité. On notera la non-linéarité du photocourant par rapport à l'éclairage.

2) Temps de réponse

Éclairer avec une DEL ultra-luminescente alimentée en signaux carrés dissymétriques (0,+E) de façon à avoir un courant inférieur à 30 mA ($E=10\text{ V}$ avec une résistance de $300\ \Omega$). Faites attention à ne pas griller la DEL.

Observer à l'oscilloscope le signal de sortie V_s . On obtient un temps de réponse de l'ordre de 10 ms. Il n'est pas ici nécessaire de mesurer précisément ce temps de réponse, car il dépend du niveau d'éclairage.

Ce temps de réponse, très grand, n'est pas lié à un éventuel temps électrique RC comme cela peut être parfois mentionné¹⁴. Il est directement relié au temps de vie des électrons dans le composant photorésistance (voir Asch page 156). C'est d'ailleurs ce temps de vie élevé des porteurs qui explique la grande sensibilité de la photorésistance.

¹⁴Confusion, en général, avec la photodiode (voir le § VII).

3) Réponse spectrale

Mettre la photorésistance derrière la fente de sortie du monochromateur. Déterminer à la main (sans enregistrement) la longueur d'onde correspondant au maximum de photoconductivité. En déduire une valeur approchée du gap de CdS.

Interprétation de la courbe "en cloche" observée pour la réponse spectrale complète :

- du côté des grands λ , le signal chute quand le cristal devient transparent ($\lambda > \lambda_g$, seuil de l'absorption fondamentale) ;
- du côté des petits λ , le coefficient d'absorption devient très grand. La lumière est absorbée en surface, où les porteurs photocréés ont une durée de vie trop faible pour contribuer efficacement à la conduction.

V) [AP] Photomultiplicateur

1) Principe

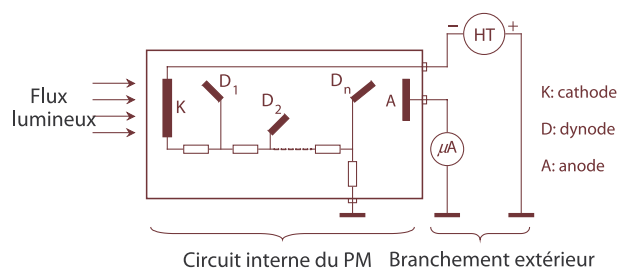


FIG. 13 – Schéma de principe du tube photomultiplicateur

La face avant du photomultiplicateur (PM) est constituée d'une photocathode (K sur le schéma de la Fig. 7) qui émet des électrons quand elle reçoit des photons (effet photoélectrique). Ces électrons sont accélérés par la haute tension appliquée, et à partir d'un électron reçu, chaque dynode émet plusieurs électrons secondaires, d'où une amplification importante du courant. Le courant final croît très vite avec la tension d'alimentation ($I \propto V^n$ avec n un peu inférieur au nombre de dynodes).

On utilisera en général le PM "Universel" 2013B sensible dans tout le visible. Il possède 10 dynodes. Voir sa notice (numéro 300).

Le culot du PM comporte 2 bornes de sortie BNC : l'une est à connecter au pôle négatif de l'alimentation HT, l'autre est à brancher sur l'appareil de mesure¹⁵. Le PM se comportant comme un générateur de courant, on peut placer un microampèremètre sur sa sortie de mesure, mais il est préférable de mettre une résistance de mesure ($R \sim 10\text{ k}\Omega$) et de recueillir la tension à ses bornes (Fig. 8).

Précautions d'emploi :

- **Régler d'abord la haute tension au minimum ($\sim 500\text{ V}$) et l'augmenter progressivement en surveillant l'intensité ;**
- **Le courant maximum toléré est $100\ \mu\text{A}$ et la haute tension maximum $1800\ \text{V}$ ¹⁶.**

¹⁵Les connecteurs sont tels qu'il est impossible de se tromper.

¹⁶Valeurs indiquées sur le tube.

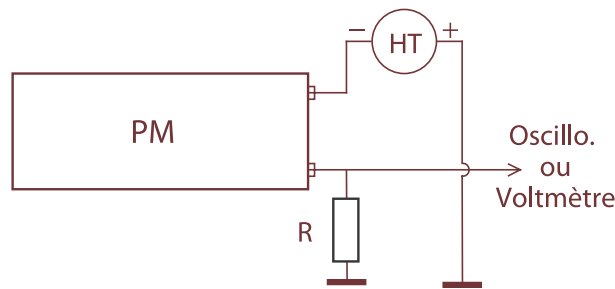


FIG. 14 – Branchement du PM

2) Comparaison de la sensibilité du PM et de la photodiode

Vérifier qu'il n'y a aucun filtre dans le PM. Placer dans le porte-filtre prévu pour être vissé sur l'entrée du PM (il élimine tout flux parasite) des filtres gris en verre de densités suffisantes (3+2 devrait convenir). Éclairer avec le laser. Alimenter le PM sous une tension moyenne ($\sim 1000V$). Mesurer le courant de sortie. Calculer, en tenant compte de l'absorption des filtres (on pourra la mesurer par la méthode suggérée au § II.3.b), la sensibilité en A/W du PM pour cette tension. Comparer à celle de la photodiode.

3) Influence de la tension d'alimentation sur la sensibilité (facultatif)

Accroître légèrement la tension d'alimentation du PM (de par exemple 10%) et vérifier que le signal de sortie subit une augmentation relative très supérieure. Conclure sur la nécessité d'avoir une tension d'alimentation très stable.

Facultatif : il est possible de vérifier que la sensibilité du PM obéit à la loi : $s = kV_{\text{alim}}^n$ où n est un nombre un peu inférieur au nombre de dynodes¹⁷.

VI) [AP] Dispositifs de type CCD

Voir le BUP 762 (p. 471). Ces dispositifs permettent de visualiser les variations spatiales d'éclairement. Grâce à un système de balayage qui lit les différents détecteurs élémentaires (photodiode associée à une capacité, CMOS¹⁸...) les uns après les autres, les variations spatiales de l'éclairement sont transformées en variations temporelles de la tension de sortie.

On pourra visualiser la diffraction d'un laser par une fente grâce à la caméra CCD Mightex (notice 189) et ajuster le signal observé par un sinus cardinal carré. Un filtre de densité devant la caméra s'avèrera probablement nécessaire si le capteur sature ; comme les filtres de densité ne sont pas très propres, cela ajoute du bruit au signal.

Remarques :

- ces détecteurs ayant un maximum de sensibilité dans l'infrarouge, ajouter un filtre antithermique si la source est une lampe à incandescence ;
- pour adapter la luminosité à la sensibilité de la caméra, interposer deux polariseurs plus ou moins croisés.

¹⁷Cet écart entre n et le nombre de dynodes a deux causes : relation non linéaire entre émission secondaire et tension, et efficacité de collection des électrons d'une dynode à l'autre dépendant de la tension.

¹⁸Complementary Metal Oxide Semiconductor