

MP 12 : Photorécepteurs

*« A mesure qu'on est plus éclairé, on a moins de lumière »
Charles Joseph de Ligne*

Bibliographie

- [1] Sextant – Optique expérimentale, Chapitre II
- [2] Duffait - Expériences d'Optique - Agrégation de Sciences Physiques
- [3] BUP 70 (p.1318)

Plan du montage

Introduction.....	1
I) Caractéristique, linéarité et sensibilité.....	2
1) Photodiode.....	2
2) Photorésistance.....	3
II) Réponse spectrale.....	4
1) Photodiode.....	4
2) Photorésistance.....	5
III) Temps de réponse.....	5
1) Photodiode.....	5
2) Photorésistance.....	5
IV) Applications.....	6
1) Détecteur d'obscurité.....	6
2) Barrette CCD : détection d'image.....	6

Introduction

Définition de photorécepteur [1] : Capteurs qui transforment le rayonnement électromagnétique en signal, généralement électrique. Ce sont des détecteurs de flux lumineux.

On distingue 2 grandes catégories de détecteurs :

- détecteurs photoniques : les photons absorbés font passer les électrons du matériau dans un état excité. C'est l'effet photoélectrique.
- détecteurs thermiques : le rayonnement absorbé provoque une élévation de température du matériau, convertie en signal électrique.

Chaque détecteur est caractérisé par plusieurs paramètres : linéarité, sensibilité, réponse spectrale et temps de réponse. *On peut aussi calculer le rendement quantique pour les détecteurs photoniques (nombre moyen d'électrons excités par photon incident de longueur d'onde λ).* La valeur de chaque paramètre caractéristique va déterminer les domaines d'application des différents photorécepteurs.

On choisit de s'intéresser ici à deux détecteurs photoniques : la photodiode et la photorésistance. *Les détecteurs thermiques (comme la thermopile) sont très sensibles aux fluctuations de température et donc peu commode d'utilisation dans notre cas.* L'objet de ce montage est de mettre en évidence

le fonctionnement de ces détecteurs, d'évaluer leurs paramètres caractéristiques et de les comparer pour finalement déterminer le type d'application pour lequel ils seront le plus adaptés.

I) Caractéristique, linéarité et sensibilité

Définitions [1]

- Linéarité : proportionnalité du signal de sortie par rapport au flux lumineux incident. On définit en général une gamme de linéarité.
- Sensibilité pour un détecteur linéaire : $S = I / \phi$ (I : signal électrique de sortie ; ϕ : flux lumineux incident).

1) Photodiode

Description du fonctionnement [1]

La photodiode est une diode (soit une jonction de deux semi-conducteurs : 1 dopé P et 1 dopé N) sensible à l'absorption de photon. En l'absence de rayonnement, on a :

$$I_d = I_s [\exp(qV/k_B T) - 1]$$

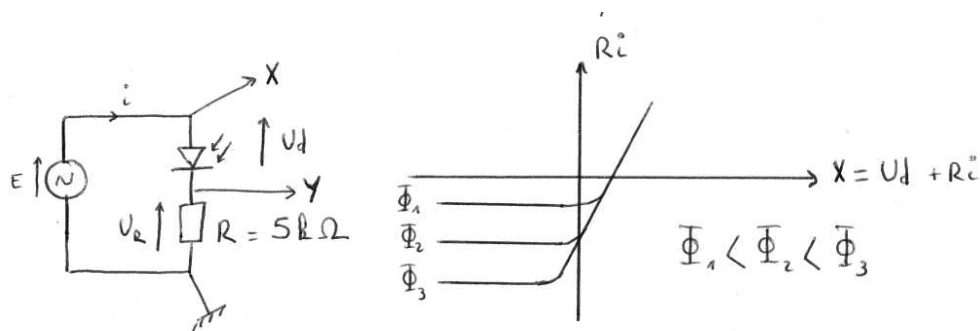
Lorsqu'un photon est absorbé, il crée dans la zone de déplétion une paire électron-trou. Le champ qui règne dans cette zone sépare les deux porteurs, l'électron se déplace vers la zone N à l'intérieur du semi-conducteur, il y a donc création d'un courant inverse appelé photocourant, vérifiant :

$$I_{ph} = \eta q \phi \lambda / hc$$

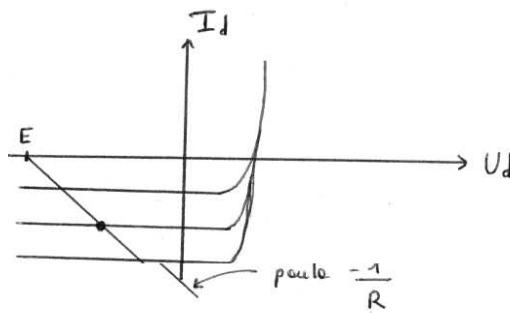
(η : rendement quantique, fonction de λ)

Expérience 1 : tracé de la caractéristique de la photodiode

Montage réalisé en « longue dérivation » (cf schéma ci-dessous pour les mesures de tension) pour éviter que tout le courant ne passe dans l'oscilloscope lorsque la diode est en inverse. On visualise les caractéristiques en mode XY sur l'oscilloscope, en faisant varier l'éclairement.



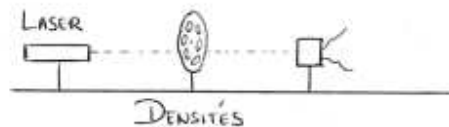
Caractéristique de la photodiode (théorique) et point de fonctionnement avec une résistance R dans le circuit:



But pour la suite : utiliser la photodiode lorsqu'elle se comporte en photorécepteur, donc quand elle est polarisée en inverse. On utilise le circuit pour polariser la diode : le circuit détermine le point de fonctionnement du montage ($U_d = E - Ri$), on ajuste E et R pour placer ce point de fonctionnement donc le cadran $i < 0$, $U_d < 0$. On choisit $R = 5 \text{ k}\Omega$ et $E = -10 \text{ V}$.

Expérience 2 : Etude de la linéarité de la photodiode

On cherche à mesurer le courant inverse en fonction de l'éclairement incident. Pour cela, on utilise des densités, qui transmettent un pourcentage calibré du flux incident : $\phi = P \cdot \phi_0$ avec P le pourcentage transmis par la densité, et ϕ_0 le flux sans atténuation mesuré avec un puissancemètre (détails en II)1) sur l'utilisation du puissancemètre). On réalise le montage ci-dessous :



On mesure $\phi_0 =$

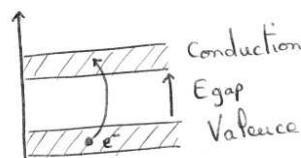
On trace $\phi = f(\cos^2(\theta))$. Modélisation linéaire : $\phi = a \cos^2(\theta) + b$.

Sensibilité (pente a) : $S =$ $\pm$

2) Photorésistance

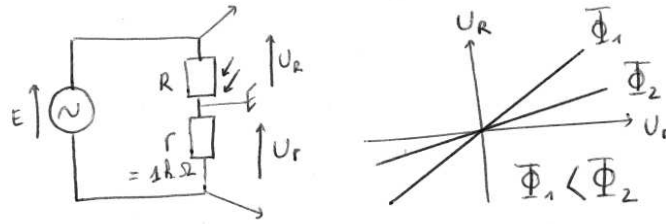
Description du fonctionnement [1]

La photorésistance est un semi-conducteur intrinsèque, c'est-à-dire homogène, non dopé. Les photons incidents d'énergie supérieure à E_{gap} créent des paires électrons/trou, l'électron passe dans la bande de conduction. Il y a ainsi augmentation de la conductivité donc diminution de la résistance avec l'éclairement. C'est le phénomène de photoconduction.



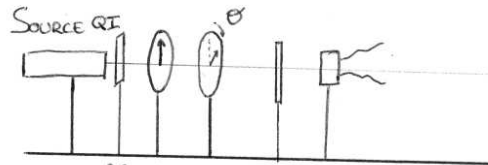
Expérience 3 : Tracé de la caractéristique de la photorésistance

On réalise le montage suivant et on trace la caractéristique de la photorésistance en mode XY sur l'oscilloscope pour différents éclaircissements :



Expérience 4 : Etude de la linéarité de la photorésistance

Comme pour la photodiode, on cherche à mesurer la réponse de la photorésistance en fonction de l'éclairement incident. On réalise le montage suivant, avec analyseur/polariseur, et une lentille qui focalise le flux sur la photorésistance :



La variation de l'éclairement en fonction de l'angle entre analyseur et polariseur est donnée par la loi de Malus :

$$\phi = \phi_0 \cos^2(\theta + \epsilon)$$

avec θ l'angle entre les polariseurs et ϵ l'erreur systématique totale incluant la lecture de l'angle et le décalage entre les graduations des polariseurs/analyseurs.

On s'affranchit en partie de l'erreur systématique ϵ en mesurant $\phi(\theta)$ et $\phi(-\theta)$ puis en faisant la moyenne des 2 valeurs. On mesure la résistance du détecteur avec un ohmmètre pour différentes valeurs de θ . On trace ensuite $1/R = f[\cos^2(\theta)]$. On choisit de tracer $1/R$ et non R car le phénomène de photoconduction traduit une augmentation de conductivité, il est donc plus facile d'interpréter la courbe obtenue.

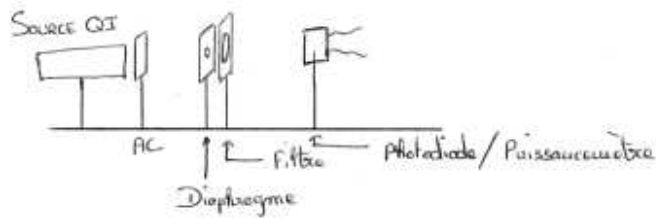
La photorésistance n'a pas un comportement linéaire en fonction de l'éclairement. Sa sensibilité est meilleure pour de faibles intensités lumineuses, on préférera donc l'utiliser en détection d'obscurité.

II) Réponse spectrale

1) Photodiode

Expérience 5 : Détermination de la réponse spectrale de la photodiode [2]

Pour un rayonnement de longueur d'onde λ , la photodiode nous donne un signal $I(\lambda) = R(\lambda) \cdot \phi(\lambda)$, avec $R(\lambda)$ la réponse spectrale que l'on cherche, et $\phi(\lambda)$ le flux incident provenant de la source. Le rayonnement de longueur d'onde fixée s'obtient avec un filtre interférentiel en sortie de la lampe QI (OG de la bande passante des filtres : ± 5 nm). Le circuit électrique de mesure de courant est identique à l'étude de linéarité.



Il faut dans un premier temps mesurer $\phi(\lambda)$. On peut pour cela utiliser une thermopile, dont la réponse spectrale est plate, donnant donc $\phi(\lambda)$ à un facteur près. Comme décrit en introduction, l'utilisation de cet instrument est longue et laborieuse. On préfère donc ici utiliser un puissance-mètre (Thorlab) : la réponse spectrale est quasi-affine en λ de 400 à 900 nm. On utilise le logiciel adapté dans lequel on rentre la longueur d'onde de travail, qui corrige la puissance mesurée grâce à la calibration et affiche directement la puissance reçue. On effectue donc la mesure du flux incident $\phi(\lambda)$ pour chaque longueur d'onde disponible.

On réalise le même montage en remplaçant le puissance-mètre par la photodiode. On mesure $I(\lambda)$, puis on trace $R(\lambda) = I(\lambda)/\phi(\lambda) = f[\lambda]$.

Conclusion : la photodiode est plus sensible dans le rouge. On préférera donc l'utiliser plutôt pour des longueurs d'onde dans le rouge ou l'infrarouge.

2) Photorésistance

La photorésistance étant un photorécepteur non-linéaire, on ne peut pas déterminer sa réponse spectrale en utilisant le même protocole (on ne peut pas écrire une relation du type $1/R(\lambda) = C(\lambda) * \phi(\lambda)$).

III) Temps de réponse

1) Photodiode

Mesure du temps de réponse de la photodiode, [1] p.69

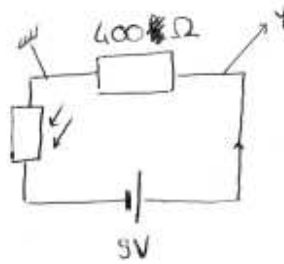
On utilise une diode laser dont l'alimentation est commandée par un signal TTL (1 MHz). On mesure le temps de réponse τ de la photodiode toujours polarisée en inverse. On visualise sur l'oscilloscope le signal TTL (X) et le courant de la photodiode (Y).

On mesure un temps de réponse pour $R = 5k\Omega$ en résistance de charge. Cela nous donne un ordre de grandeur pour la capacité totale du circuit $C = \tau/R$. Les effets capacitifs de la photodiode sont indissociables des capacités de l'oscilloscope ($C = 12$ pF) et du câble coaxial (environ 100 pF/m).

2) Photorésistance

Expérience 6 : Mesure du temps de réponse de la photorésistance

On éclaire la photorésistance avec un stroboscope et on réalise le montage électrique suivant



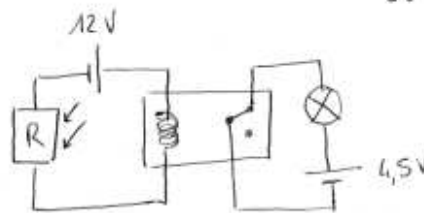
On visualise la tension de la résistance de $400\ \Omega$ sur l'oscilloscope et on mesure $\tau = \pm$

IV) Applications

1) Détecteur d'obscurité

On a vu que la photorésistance est plus sensible aux faibles éclairéments et possède un temps de réponse adapté aux réponses tout-ou-rien. Une application majeure est la détection d'obscurité.

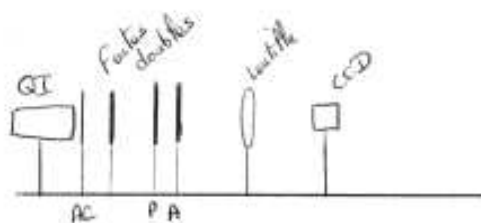
Expérience 7 : Détecteur d'obscurité [3]



Lorsque le relais reçoit un courant suffisant dans la bobine, c'est à dire lorsque la résistance de la photorésistance n'est pas trop grande (obscurité), l'interrupteur est en position de travail, la lampe est allumée. Lorsque la photorésistance reçoit un flux lumineux suffisant, le courant diminue dans la bobine jusqu'à faire basculer l'interrupteur en position de repos.

2) Barrette CCD : détection d'image

Expérience 8 : Barrette CCD, application à la détection d'image [2]



Les polariseurs/analyseurs servent à atténuer le flux lumineux. On focalise les fentes sur la barrette CCD (Caliens) à l'aide de la lentille. On visualise le signal de synchronisation et le signal de sortie de la barrette sur l'oscilloscope en plaçant la barrette à environ 1m des fentes. On peut voir les pixels correspondant à chaque photodétecteur de la barrette, expliquer le fonctionnement du système (vitesse de balayage, sensibilité réglable,...) et l'appliquer à la détection d'image (limite de résolution par exemple).

Conclusion :

Nous avons ainsi caractérisé deux photodétecteurs et constaté que la photodiode (polarisation inverse) est bien adaptée pour mesurer un flux lumineux, alors que la photorésistance est mieux adaptée pour un système 'tout ou rien'.

Les photorécepteurs ont aussi un rôle pour se renseigner sur les propriétés d'émission de la source (astrophysique, biotraceurs émetteurs de photon).

Nous avons utilisé ici des photodétecteurs pour des rayonnements de longueur d'onde dans le visible (NB : la photodiode est sensible dans l'IR : on peut s'en servir pour détecter un signal de télécommande par exemple). En ce qui concerne les UV, (soit les RX en fréquence), il existe des scintillateurs (on image la fluorescence due à l'absorption d'une photon X) ou le compteur Geiger. Pour les IR, on peut utiliser par exemple des microbolomètres pour les caméras thermiques, à base de résistance qui change avec la température sous l'effet du champ.