

MP12 – PHOTORÉCEPTEURS

4 décembre 2015

« Ça va être tout noir... »

François Damon & Timothée Chauviré

RRRRRRRR

Commentaires du jury

Il est important de bien aborder des notions de métrologie telles que la sensibilité, la bande passante, le temps de réponse etc. Faire le lien entre la physique du détecteur et ces caractéristiques métrologiques, par exemple faire la *distinction entre un détecteur photonique et un détecteur thermique* (réponse spectrale et temps de réponse différents). Une étude spectrale peut être validée à condition de bien connaître les réponses spectrales de tout les éléments du montage. La notion de *point de fonctionnement* peut être utile pour un montage avec un photodiode. Le temps de réponse d'un photorécepteur peut dépendre du circuit dans lequel il est inséré.

Bibliographie

↗ <i>Sextant</i> p.57	→ La base
↗ <i>Duffait</i> p.63	→ Montage linéarité Malus
↗ <i>Les capteurs : applications industrielles</i> , G. Asch	→ Beaucoup d'informations concernant les caractéristiques des capteurs
↗ <i>Acquisition de données : Du capteur à l'ordinateur</i> , G. Asch	→ Si jamais vous trouvez pas celui du dessus...
↗ <i>BUP 565</i> p.931	→ Sur l'utilisation des photodiodes en photométrie
↗ <i>Datasheets</i>	→ Très important pour ce montage !

Table des matières

1	Caractéristiques	1
2	Linéarité	3
3	Réponses spectrales de la photodiode	4
4	Temps de réponse de la photorésistance	4
5	Modèle simple d'allumage publique	5

Motivations

Dans le cadre de recherche scientifiques, il est nécessaire régulièrement de mesurer des grandeurs physiques. En particulier en optique, il est essentiel de disposer de capteurs permettant la *conversion de flux lumineux en grandeurs électriques* pouvant être exploiter quantitativement. En ingénierie, l'utilisation de photorécepteur peut jouer le rôle d'éléments pouvant déclencher des mécanismes (ouverture de porte, allumage de phares) ou de régulation (système bouclés). Dans tout les cas, il est indispensable de connaître les caractéristiques de ces capteurs, leurs régimes de fonctionnement et leurs temps de réponse.

1 Caractéristiques

Nous allons voir ici que certaines caractéristiques de ces photorecepteurs émergent de leurs caractéristiques.

Photodiode

Cette photodiode au silicium est composée d'une jonction PN. L'application d'une tension extérieure V , va venir diminuer en direct (augmenter en inverse) la barrière de potentiel créée par la jonction, impliquant une augmentation

(resp. diminution) du courant de porteur de charge majoritaire due à une diminution (resp. augmentation) de la largeur de la zone de déplétion. Le courant ainsi créé est de la forme :

$$I_0 = I_S \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right] \text{ avec : } k_B T / e = 26 \text{ mV},$$

où k_B est la constante de Boltzmann, e la charge de l'électron et $T = 300 \text{ K}$ et I_S le courant de saturation.

L'absorption d'un photon de lumière au niveau de la zone de déplétion crée une paire électron-trou, à condition que son énergie soit supérieure au gap entre la bande de valence et la bande de conduction. Cette paire génère un courant d'origine photoélectrique :

$$I_\Phi = \frac{e\eta(1-r)\lambda}{hc} \Phi \exp(-\alpha d),$$

avec λ la longueur d'onde du photon, η le rendement quantique de l'extraction de l'électron, h la constante de Planck, ϕ le flux lumineux au niveau de la photodiode, c la vitesse de la lumière, α une constante d'atténuation, d l'épaisseur traversée dans la jonction et r le coefficient de réflexion au travers de la surface. Le courant total au travers de la photodiode qui est celui que l'on va étudier est alors : $I_d = I_0 + I_\Phi$.

Caractéristique courant-tension de la photodiode. On réalise le schéma (cf. figure ??) permettant de conditionner le dipôle de sorte à tracer sur un oscilloscope en mode XY (tension d'entrée vs. tension de sortie). On prend une résistance de l'ordre de $10 \text{ k}\Omega$.

Utilisation d'un AO TL081.

On prend une tension d'entrée sinusoïdale dont l'amplitude peut être choisie de manière à explorer toute la caractéristique. La fréquence (de typiquement 20 Hertz) doit être choisie de sorte à ce que la période soit bien plus grande que le temps de récupération de la diode de manière à éviter de voir (et discuter) la figure d'hystérésis pouvant survenir dans le cas contraire. On éclaire la photodiode avec un faisceau convergent provenant d'une lampe Quartz-Iode. On montre que le courant en inverse dépend de l'intensité de la lumière arrivant sur le détecteur. Jouer avec le variateur pour changer cette intensité.

On peut distinguer trois régimes de fonctionnement différents :

- $U < 0$ et $I < 0$: **capteur**,
- $U > 0$ et $I < 0$: **générateur** (photovoltaïque),
- $U > 0$ et $I > 0$: **luminescent** (DEL).

On se placera, par la suite, dans le premier cas en polarisant la photodiode en inverse. Attention : à tension inverse très élevée ($U < -60 \text{ V}$ d'après constructeur) on peut polariser suffisamment pour faire *claquer* la photodiode (tension Zener).

Mesure du courant d'obscurité. La diode est sous un voile noir. En utilisant le générateur en mode continu on branche la photodiode en inverse de manière à négliger le terme exponentiel et avoir $I_d \approx I_\phi$. On peut faire la mesure directement avec un voltmètre que l'on branche ici en *série*. L'impédance du multimètre étant de l'ordre de $10 \text{ M}\Omega$, peut mesurer directement le courant d'obscurité en mesurant la tension au borne du voltmètre divisée par son impédance.

$$I_S = \quad \text{A} \quad (T = \quad \text{K})$$

Le constructeur donne une gamme 2-30 nA (à $T \approx 300 \text{ K}$. Attention : l'intensité I_0 varie quand même exponentiellement avec l'inverse de la température!). Montrer en passant que ce courant dépend de la tension appliquée ce qui montre que l'approximation d'une tension de saturation constante n'est valable que lorsque l'on considère des flux de lumière suffisamment grand.

Photorésistance

La photorésistance est aussi un semi-conducteur (Sélénure de Cadmium CdS) pouvant, lors de absorption d'un photon, créer une paire électron-trou. Ce faisant la concentration d'électrons n dans la bande de conduction au cours du temps est proportionnelle au flux reçu. D'un autre côté, des processus de recombinaison vont entraîner une diminution de cette concentration. On peut établir l'équation suivante du courant :

$$\frac{dn}{dt} = a\Phi - b(n^2 - n_{eq}^2), \quad (1)$$

avec $a < 0$ et $b < 0$. Ici, n_{eq} est la concentration de porteurs à l'équilibre provenant de l'agitation thermique.

Caractéristique courant-tension de la photorésistance. Remplacer la photodiode par une photorésistance de manière à faire la caractéristique. Montrer (cf. plus haut) que la pente (i.e. la résistance) dépend de l'intensité lumineuse.

On peut profiter de l'occasion pour mettre en avant le fait que la photodiode est un *capteur actif*, dans le sens où la grandeur mesurée crée directement une fem. À l'inverse la photorésistance est un *capteur passif* qui a besoin d'être alimentée, la grandeur mesurée crée une modification de l'impédance.

2 Linéarité

On fait ici l'étude de la linéarité de ces deux capteurs photoélectriques à l'aide d'une étude photométrique basée sur la loi de Malus. Cette loi stipule que le flux Φ d'une source lumineuse, au travers d'un polariseur puis d'un analyseur placée à un angle de θ est réduite de sorte que :

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_0 \cos^2(\theta).$$

En pratique on considère que $\Phi_0 \ll \Phi_1$. On peut alors tracer la variation de l'intensité au niveau du photodétecteur $\Phi(\cos^2(\theta))$, de sorte à caractériser sa linéarité. Comme il est difficile de définir un montage pour lequel l'angle entre le polariseur et l'analyseur est connue on peut tracer la valeur moyenne $[\Phi(\theta) + \Phi(-\theta)]/2$, de manière à éliminer l'erreur systématique que l'on fait à chaque valeur d'angle. On peut se convaincre facilement que cette somme simplifie *de facto* le terme d'ordre 1.

Étude simultanée de la photodiode et de la photorésistance. On réalise le montage suivant (cf. figure). On comprend bien qu'il n'est pas nécessaire de connaître le flux relatif dans chaque bras car on peut définir deux valeurs différentes de Φ_0 . Comme on ne connaît pas la réponse spectrale des polaroids, on peut placer en amont un filtre interférentiel autour de la longueur d'onde $\lambda = ?$ nm par exemple. On peut tracer alors la valeur de la fonction :

$$\langle \Phi(\cos^2(\theta)) \rangle = \frac{\Phi(\theta) + \Phi(-\theta)}{2}$$

On a choisit le partie pris de conditionner la photodiode et la photorésistance avec un montage inverseur (cf. figure 1), pour lequel le courant traversant le circuit est mesurer au travers de la tension de sortie (convertisseur tension-courant). On peut ainsi s'affranchir des considérations liée à la linéarité du montage en lui-même discuté plus haut car la droite de charge sera désormais verticale ($R \approx 0$).

Photodiode

Dans le cas de la photodiode on trouve une pente donnant la sensibilité :

$$S = \frac{I}{\Phi} = \pm \text{ A.W}^{-1}$$

La photodiode est linéaire vis-à-vis du flux lumineux quelle reçoit (dans notre gamme de paramètre).

Photorésistance

En régime stationnaire l'équation (1) peut se réécrire :

$$n_{stat}(\Phi) = n_{eq} \sqrt{1 + \frac{a}{bn_{eq}^2} \Phi}.$$

Comme le courant est proportionnel à cette concentration, on en déduit que la photorésistance n'est pas linéaire vis-à-vis du flux lorsque celui-ci est grand, tel que : $\Phi \gg bn_{eq}^2/a$. Afin de vérifier cette loi en $R \propto \Phi^\gamma$, on peut tracer la fonction : $\log(R) = f(\log(\Phi))$. On obtient alors une droite de pente :

$$\gamma = \pm$$

pour une valeur théorique de $\gamma_{théo} = -1/2$.

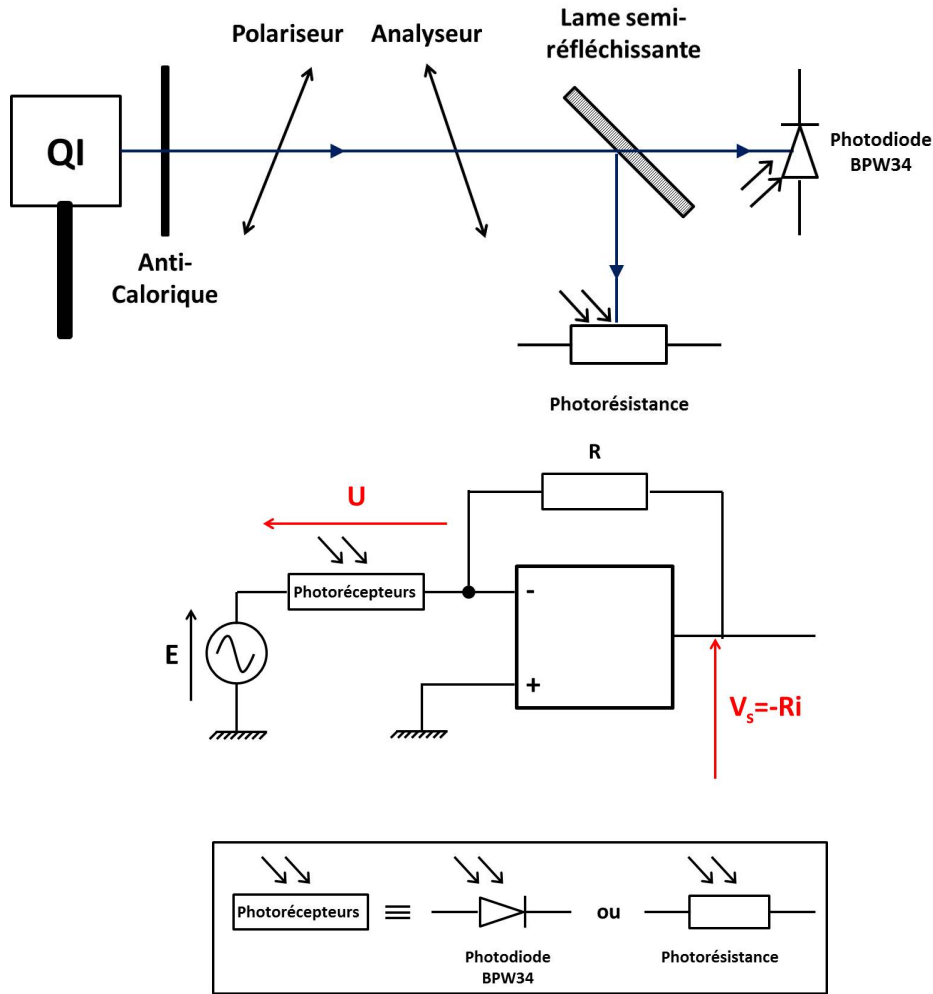


FIGURE 1 – (Haut) : Représentation schématique du montage permettant l'évaluation simultanée de la linéarité de deux photorécepteurs. (Bas) : On utilise préférentiellement un montage inverseur pour avoir une droite de charge verticale de sorte à s'affranchir d'une intersection éventuelle avec la caractéristique dans la zone photovoltaïque.

3 Réponses spectrales de la photodiode

La *sensibilité spectrale* de la photodiode s'écrit : $S(\lambda) = I/\Phi$, et s'exprime en $A.W^{-1}$. Ce photorécepteur peut être qualifié de *photonique* et cette sensibilité permet de calculer son rendement quantique au travers de la relation :

$$\eta(\lambda) = S(\lambda) \frac{hc}{e\lambda} < 1.$$

Comme on ne dispose pas de source dont le spectre est constant, le choix d'un photodétecteur étalonné se révèle être indispensable ici. Encore une fois, plusieurs choix s'offre à nous : la photopile, la thermorésistance (beaucoup trop sensible), le pyromètre (+ détection synchrone car signal très faible). Nous utilisons ici un puissance mètre étalonné (de la marque ThorLabs).

On réalise l'image d'un diaphragme à l'aide d'une lentille achromatique de petite focale (120 mm). On peut placer les photorécepteurs au niveau de cette image tout en veillant à ce que l'image éclaire toute la zone photosensible. Ce montage a l'avantage de réaliser un éclairage homogène sur toute la surface du photodétecteur.

On cherche ici à mesurer la sensibilité spectrale de la photodiode. Comme celle-ci est égale à un rapport (mesure relative), il n'est pas nécessaire de connaître la réponse de l'ensemble des composant du montage. On place juste après le diaphragme un filtre interférentiel de sorte à sélectionner une longueur d'onde et on mesure la puissance de la lumière reçue au niveau du plan focal. Puis on mesure le courant passant au travers de la photodiode polarisée en inverse.

La réponse est linéaire (affine?) sur une gamme de longueur d'onde allant de 400 nm à 800 nm, puis atteint un maximum autour de 950 nm. Le choix d'une grande résistance permet de réduire les incertitudes associées à ces

mesures.

4 Temps de réponse de la photorésistance

Le montage consiste ici à caractériser la réponse d'un photorécepteur lorsqu'il est soumis à une « impulsion » lumineuse. Il est donc nécessaire de disposer d'une source dont l'intensité est connue au cours du temps. On dispose de plusieurs sources dans la collection délivrant un signal lumineux proche d'un créneau. Il y a le hacheur de faisceaux (qui ne permet pas de réaliser un créneau avec une vraie discontinuité), il y a une diode laser pouvant être modulée en intensité par un signal TTL (mais on ne connaît pas la réponse temporelle de la diode), et le stroboscope (qui délivre des impulsions dont on ignore aussi la forme temporelle). Dans tous les cas, aucune de ces sources n'est vraiment fiable intrinsèquement dans le sens où l'on ne peut pas connaître avec certitude le moment exact où la source s'est arrêtée d'émettre¹

Ce que l'on peut faire néanmoins c'est utiliser un photorécepteur possédant un temps de réponse rapide (par exemple la photodiode) relativement au détecteur que l'on souhaite étudier qui est ici la photorésistance. Ainsi, en prenant le moment pour lequel l'intensité générée par la photodiode est nulle comme origine du temps, on peut réaliser une mesure du temps de réponse de la photorésistance.

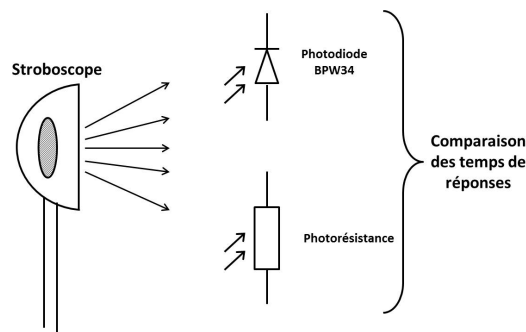


FIGURE 2 – On peut utiliser une source délivrant des pulses lumineux périodique et éclairant à la fois la photodiode et la photorésistance de manière simultanée. On utilise ici la photodiode comme référence.

L'acquisition de la tension aux bornes de la photorésistance peut se faire à l'aide d'une carte d'acquisition. Même si on peut se convaincre facilement que la décroissance de la tension n'est pas exponentielle, on peut quand même faire une mesure de la pente à l'origine de manière à extraire une constante de temps. Cette mesure doit être absolument argumentée parce qu'elle ne repose pas sur un modèle existant. Il est difficile de remonter à une relation liant directement le flux au cours du temps à la tension aux bornes de la résistance.

5 Modèle simple d'allumage public

En pratique, la photorésistance est utilisée comme photorécepteur dans les lampadaires, de manière à les allumer en fonction de l'intensité de la lumière du jour. On propose ici un montage électrique où une photorésistance est alimentée par un générateur. Ce circuit primaire est relié à un circuit secondaire par un commutateur qui ferme ou ouvre ce circuit secondaire lorsque la tension aux bornes de la photorésistance dépasse une tension de consigne d'environ 8 V. Lorsque le circuit est fermé un générateur de courant d'environ 8 mA, vient alimenter une ampoule.

1. On pourra choisir par exemple le stroboscope qui présente l'avantage d'éclairer de manière homogène les capteurs.

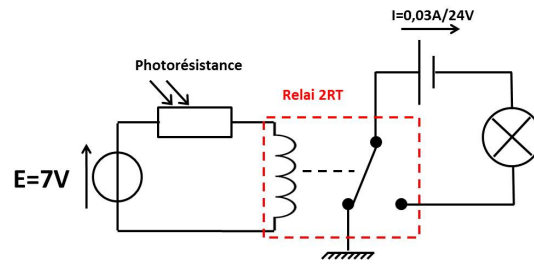


FIGURE 3 – Le montage se fait en deux parties distinctes. Le basculement du relais 2RT se fait autour de la valeur de 8 V. La chute de tension due à la photorésistance amène à la fermeture du circuit secondaire et ainsi, à l'allumage de l'ampoule.

Conclusion

Photodiode : pas cher, linéaire dans le visible, temps de réponse court. → Utilisation : télécommandes, mesures quantitatives.

Photorésistance : pas cher, peu linéaire, long temps de réponse, bonne sensibilité dans le visible. → Utilisation : éclairage urbain, détection de système de commande.

↷ **Questions, commentaires, dessins :**