

MP12 – PHOTORÉCEPTEURS

13 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Rapports de jury

2017 : Il ne faut pas perdre de vue les aspects de métrologie dans ce montage. Il faut aussi connaître les principes physiques des photodétecteurs utilisés et pouvoir justifier les liens entre ces principes et les caractéristiques métrologiques. Il faut également, lorsqu'on cherche à effectuer une étude spectrale, faire attention à la réponse spectrale de tous les éléments du montage, y compris celle des éventuels polariseurs et analyseurs.

2014, 2015, 2016 : Dans ce montage, les questions classiques de métrologie peuvent être abordées : sensibilité, bande passante et temps de réponse. Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale. Plus généralement, il faut connaître les principes physiques des photodétecteurs utilisés et pouvoir justifier les liens entre ces principes et les caractéristiques métrologiques. Il faut également, lorsqu'on cherche à effectuer une étude spectrale, faire attention à la réponse spectrale de tous les éléments du montage, y compris celle des éventuels polariseurs et analyseurs. Remarquons pour finir que la notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode.

2013 : Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale. La notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode.

2012 : Ce montage se prête à l'utilisation à la fois des composants fondamentaux et de matériel grand public (photodiode, cellule solaire, capteur CCD, bolomètre...). Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et les détecteurs thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale et du temps de réponse. Trop de candidats utilisent une photodiode sans en connaître suffisamment les propriétés. La notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode. Ne pas confondre une photodiode nue avec un bloc formé d'une photodiode et d'un circuit de polarisation.

Bibliographie



Expériences



Table des matières

1	Photodiode	2
1.1	Tracé des caractéristiques	3
1.2	Conditionnement de la diode	4
1.3	Linéarité de la photodiode	4
1.4	Temps de réponse de la photodiode	5
2	Temps de réponse d'une photorésistance	6
3	CCD	6

Introduction

"Un photorécepteur peut être défini comme étant un transducteur convertissant l'énergie lumineuse en un signal électrique exploitable par une chaîne de mesure ou de traitement de signal. On appelle grandeur photosensible s la grandeur électrique (courant ou tension le plus souvent) dont la mesure donne accès au flux lumineux."

On trouve deux types de photorécepteurs : **thermiques** (absorbent le rayonnement thermique, conduisant à une élévation de la température du capteur, ce qui modifie ses propriétés, par exemple la thermopile ou le bolomètre) et **photoniques** (reposent sur le processus d'absorption d'un photon par un semi-conducteur, ce qui crée une paire électron/trou dans le matériau, par exemple les photorécepteurs étudiés dans ce montage).

Un photorécepteur possède 3 caractéristiques intéressantes :

- la sensibilité $\Gamma = \frac{\partial s}{\partial \Phi}$, que l'on veut indépendante du flux lumineux Φ
- le temps de réponse
- la réponse spectrale $S = \int s(\lambda) d\lambda$

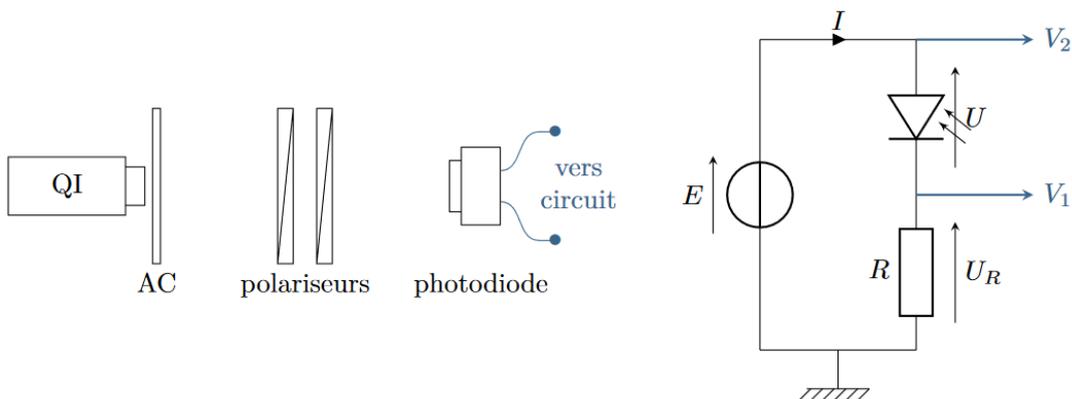
Dans ce montage, on va étudier les caractéristiques de 3 photorécepteurs différents.

1 Photodiode

Principe

Une photodiode est une jonction PN de semi-conducteurs dopés. Lorsqu'un photon arrive dans la zone de déplétion, une paire d'électron-trou est créée. Ces deux particules sont séparées sous l'effet du champ électrique présent dans la zone de déplétion et donc on observe l'apparition d'un photocourant. La caractéristique courant-tension de la diode est alors shiftée vers le bas, la diode présente donc un courant négatif même en régime bloqué ($U < 0$).

On monte la photodiode dans un circuit à résistance de charge. On lit les valeurs de V_1 et V_2 sur des voltmètres pour connaître la polarisation de la diode.

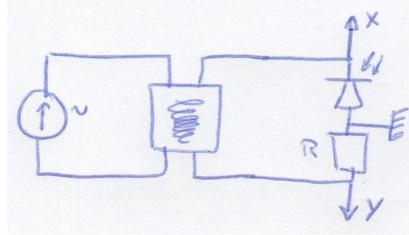


Remarque

On peut également conjuguer un trou devant la QI avec une lentille.

1.1 Tracé des caractéristiques

Cependant, on peut d'abord tracer le réseaux de caractéristiques de la photodiode à l'oscilloscope en réalisant un autre montage électrique qui nécessite un transformateur d'isolement (ou garde le montage optique) :



On se place en mode XY sur l'oscilloscope pour tracer la caractéristique de la photodiode à un flux Φ donné (on peut vérifier qu'on translate verticalement la courbe en changeant Φ). Le point de fonctionnement du circuit sera l'intersection entre cette caractéristique et la droite $I = \frac{E-U}{R}$, on a alors

$$I_{\text{diode}}(u, \Phi) = I = \frac{E - U}{R}$$

Tracé du réseaux de caractéristiques

FLTCD p132

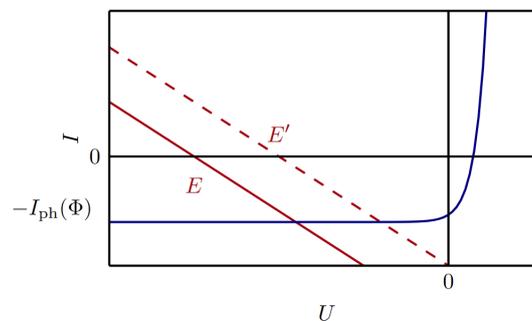


Matériel :

- GBF (sinusoïde 50 Hz pour pas trop voir les 50 Hz des néons. Tension de sorte que $E = 10 \text{ V}$)
- Transformateur d'isolement
- Photodiode
- Boite à décade (10 k Ω)
- Oscilloscope
- Lampe QI
- Diaphragme + lentille si on fait pour l'image du trou sur la photodiode
- 2 polariseurs

Réaliser le montage avec transformateur d'isolement en prenant E sinusoïdal (pour parcourir la caractéristique, on pourrait le faire aussi point par point avec une alimentation continue).

Il faut que la période de variation de E soit grande devant le temps de réponse du montage pour avoir une caractéristique quasi-statique. Une fréquence de quelques hertz convient (à justifier dans la partie sur le temps de réponse).



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 comprend ainsi que le point de fonctionnement doit se situer dans la zone ($I < 0; U < 0$) afin que le courant corresponde au photocourant uniquement.

1.2 Conditionnement de la diode

On doit choisir R en respectant le compromis suivant :

- d'un côté, on veut R grand pour que la mesure de $U_R = RI$ soit la plus significative possible
- de l'autre côté, si il faut que R soit assez petit pour rester dans la zone $U < 0$ car la résistance fait varier la pente de la droite et on fait rester sur la zone plate de la caractéristique afin de maximiser la sensibilité.



Détermination du point de fonctionnement



On fixe $E = 10 \text{ V}$. On choisit une résistance de charge de l'ordre de $10 \text{ k}\Omega$.

Pour s'assurer d'être dans le bon quadrant de la caractéristique, faire varier rapidement la valeur R de la résistance de charge. Sa valeur convient tant que U_R demeure proportionnelle à R (*i.e.* tant qu'on est sur le plateau).

Choisir la résistance de charge la plus élevée possible parmi les valeurs permises, ce qui assure la meilleure sensibilité.

Une fois R fixée, on la mesure à l'ohmmètre et on n'y touche plus!!

1.3 Linéarité de la photodiode

on veut vérifier

$$I = \Gamma\Phi + I_0 \quad (1)$$

On ne connaît pas Φ directement mais on le connaît via la loi de Malus $\Phi \propto \cos^2 \theta$ avec θ l'angle entre le polariseur et l'analyseur. On a donc

$$I = \Gamma' \cos^2 \theta + I_0 \quad (2)$$



Linéarité de la photodiode

FLTCD p 145

10 min

Matériel : Même matos qu'avant, juste penser à un ohmmètre pour mesurer R et on peut remplacer l'oscilloscope par un voltmètre pour mesurer U_R . Dans l'univers des possibles, on peut aussi utiliser LatisPro.

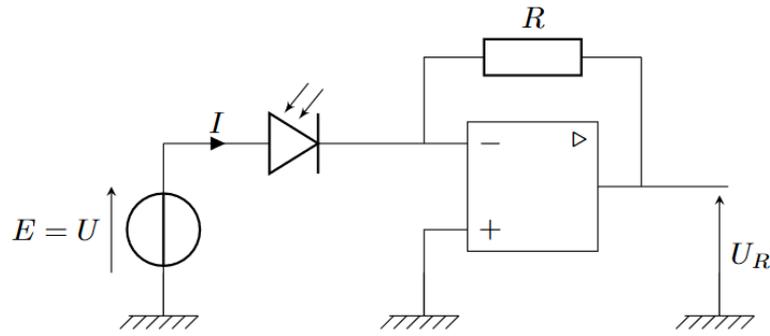
Mesurer R à l'ohmmètre pour la connaître précisément. On a alors accès à $I = \frac{U_R}{R}$. Relever U_R pour chaque angle θ ET $-\theta$ afin d'éviter une erreur systématique sur la détermination de l'origine des angles. On obtient alors

$$\tilde{U}_R = \frac{U_R(\theta) + U_R(-\theta)}{2}$$

Faire alors la régression linéaire $I = \frac{\tilde{U}_R}{R} = f(\cos^2 \theta)$ pour valider la linéarité de la photodiode.

Remarques

- on fait un fit affine et non pas linéaire car il ne fait jamais totalement noir et la photodiode a un courant de fuite (faible) vers l'oscilloscope
- on ne peut pas *a priori* remonter directement à la sensibilité Γ , on n'a que Γ'
- On utilise plutôt un montage à résistance de charge plutôt qu'un montage à amplificateur opérationnel (cf. schéma) car il est plus simple d'exploiter le réseau de caractéristique avec le premier... Cependant l'avantage du deuxième repose dans le fait que comme les courants de polarisation de l'amplificateur opérationnel sont négligeables devant le photocourant, le convertisseur courant-tension a une impédance d'entrée nulle, et ce montage permet de s'affranchir de l'impédance d'entrée de l'appareil mesurant U_R (ici le Voltmètre). Disons que le montage à ampli-op est plus facile à réaliser mais est moins pédagogique et son utilisation nuit à la compréhension du propos.



1.4 Temps de réponse de la photodiode

On s'intéresse enfin à la réponse dynamique de la photodiode, *i.e.* sa capacité à suivre des variations rapides d'éclairement reçu. Pour cela, on mesure le temps de réponse.

On va étudier ça en soumettant la photodiode à des sauts brusques d'éclairement et en mesurant le temps que met sa grandeur photosensible, l'intensité, pour atteindre une fraction définie de sa valeur asymptotique. Par convention, on prend cette fraction égale à 90%. Pour générer ces sauts d'éclairements, on va utiliser une diode laser commandée en signal TTL venant d'un GBF. On ne connaît pas le temps de réponse de cette diode mais on sait qu'il est dans les nanosecondes, ce qui est bien meilleur que le temps de réponse de la photodiode, comme on va le vérifier.

Remarque

On pourrait aussi choisir un hacheur optique qui module le flux lumineux d'un laser ou bien un stroboscope.



Temps de réponse de la photodiode

FLTCD p172



Matériel :

- Module Hameg tension continue
- GBF (signal TTL)
- Oscilloscope
- Diode laser
- Photodiode
- Boite à décade

Bien régler la fréquence de la tension de commande TTL pour une bonne visibilité du signal sur l'oscillo : une fréquence de 10 kHz convient.

Brancher la photodiode dans un montage à résistance de charge avec R compris entre 5 à 40 k Ω .

Prendre $E_0 = -10$ V pour polariser la diode en inverse et regarder la tension U à l'oscillo (regarder U et I c'est pareil pour le temps de réponse car R c'est une impédance réelle). On trouve des temps de l'ordre de la dizaine de μ s donc largement grand devant la nanoseconde du LASER

Tracer τ_m et τ_d les temps de montée et de descente en fonction de R et modéliser pour obtenir une droite de pente α_i homogène à une capacité (la somme des capacités de la photodiode $\simeq 100$ pF, du coax $\simeq 110$ pF et de l'oscillo = 12 pF), le temps de réponse est donc un temps de réponse global du système. Le Jolidon trouve $\alpha_m = 443$ pF et $\alpha_d = 462$ pF.

Diminuer R améliore donc la rapidité du récepteur mais il faut pas que ça soit au détriment d'autres caractéristiques... (cf la partie sur le conditionnement).

remarque : le montage a AO aurait été moins bien ici à cause de son Slew rate (pente maximale de la sortie).

On peut également comparer ces temps de réponse à la période d'oscillation (entre 0.1 et 1 s) de E quand on a tracé le réseau de caractéristiques et qui devait être bien plus grande.

2 Temps de réponse d'une photorésistance

☞ Jolidon p.176

Tout ce qu'on a fait avec la photodiode, on peut le faire avec la photorésistance. On ne va comparer que les temps de réponse.

On s'attend à ce que la dynamique lors d'un passage obscurité/lumière ou lumière/obscurité soit différente pour une photorésistance. Pour faire simple, lors d'un passage obscurité/lumière le temps de réponse est principalement dicté par le processus de conversion d'un photon en paire électron/trou ; alors que lors du passage lumière/obscurité principalement dicté par le processus de recombinaison. C'est ce que l'on va montrer.

Mesure du temps de réponse de la photorésistance

☞ Jolidon p 176

⊖ 3mn

Matériel : Diode TTL, hacheur rotatif, photorésistance, le montage précédent en fait.

On trace les temps de montée et de descente de la photorésistance, en mesurant simplement i en fonction du temps à U fixé. On les compare à ceux de la photodiode, et on voit qu'ils sont nettement plus grand. C'est lent une photorésistance.

À quoi ça sert ?

Le montage est facile, on s'en sert pour faire des détecteurs d'intrusion. C'est pas spécialement moins cher qu'une photodiode, c'est juste deux techniques équivalentes dans les conditions considérées.

↓ *Un autre photorécepteur qui est en fait fondamentalement un agencement de photodiodes est le capteur CCD.*

3 CCD

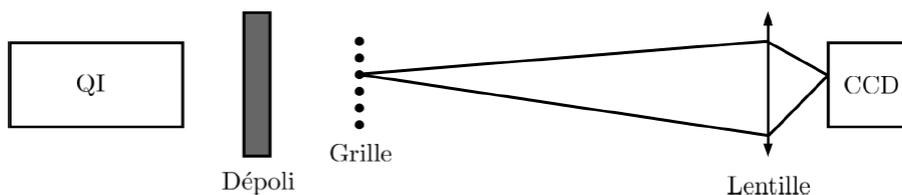
Un capteur CCD est une matrice de photodiodes, qui sert à récliser des prises d'image. C'est aujourd'hui le remplacement des pellicules photos des appareils argentiques.

Cependant les appareils photos argentiques avaient un paramètre qui est le grain de la pellicule. Il s'agit de la résolution chimique d'une pellicule. Le capteur CCD a aussi une résolution, qui est donnée par la taille de sa matrice, et la taille d'un pixel.

Le but de cette manip est de caractériser la taille d'un pixel de capteur CCD.

Fonctionnement du CCD

Les CCD (Coupled charge device = dispositif à transfert de charges) ont été inventés en 1970 par Boyle et Smith. Lorsque la zone photosensible d'un pixel est éclairée, il crée une paire électron/trou. Le trou migre vers la zone dopée p (une fois de plus !) et l'électron est piégé sous un isolant grâce à un puits de potentiel appliqué par un électron de l'autre côté de l'isolant. Les électrons s'accumulent pendant toute la durée d'acquisition. Pour la lecture, les électrons sont transférés de proche en proche (méthode des 3 phases) et sont lus à l'extrémité de la barrette vers une diode qui fait la conversion charge/tension.



Idée : Le CCD envoie un signal qui est en fait un ballayage de la ligne de pixel. À $t_i = i\delta_p t$ la ccd envoie le signal du pixel $i \bmod N$ où N est le nombre total de pixels et $\delta_p t$ le temps passé sur chaque pixel.

- On éclaire la ccd par une fente ou un demi-plan. On trace à l'oscilloscope le signal de la CCD, et on y repère le temps sur lequel on a périodicité du signal. Ce temps correspond à $N\delta_p t$. On connaît N grâce au manuel d'utilisateur (ou grâce à la lecture des propriétés du capteur via Caliens, ici c'est 2048 normalement). On mesure alors $\delta_p t$
- On fait maintenant l'image d'une grille sur la ccd, avec une lentille de focale bien connu (déterminé par Bessel).

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (3)$$

Incertitude (borne sup approximative) : $\Delta f' = f' \sqrt{5} \frac{\Delta D}{\sqrt{D^2 - d^2}}$.

Incertitude exacte : $\Delta f' = f' \sqrt{\left(2 \frac{D \Delta D + d \Delta d}{D^2 - d^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2}$

$$A'B' = AB \frac{f'}{OA - f'}$$

- On note le temps de parcours d'une période de l'image du réseau $\delta_r t$, et on nomme n le nombre de pixels dans une période de l'image. On nomme aussi $\delta_r x$ la taille d'une période du réseau (c'est AB dans la formule au dessus), $\delta_r x'$ la taille d'une période dans l'image du réseau, et $\delta_p x$ la taille d'un pixel.

$$n = \frac{\delta_r t}{\delta_p t} = \frac{\delta_r x'}{\delta_p x} \quad (4)$$

Ainsi on a la formule magique suivante :

$$\delta_p x = \frac{\delta_p t}{\delta_r t} \times \delta_r x \frac{f'}{OA - f'} \quad (5)$$

Incertitude :

$$\frac{\Delta \delta_p x}{\delta_p x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \delta_r x}{\delta_r x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f'}{f'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta OA + \Delta f'}{OA - f'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta_p t}{\delta_p t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta_r t}{\delta_r t}\right)^2} \quad (6)$$

En gris, on y a pas accès. En noir, elles sont négligeables devant les rouges.

Il est bon de noter que $\Delta \delta_p t = \Delta t / N$ ou Δt est l'incertitude absolue de la mesure de période de l'oscilo ; et que $\Delta \delta_r t = \Delta t / M$ où M est le nombre de période que l'on mesure sur l'écran.



Mesure de la résolution de la CCD



⊗ 10mm

Matériel : - QI à INTENSITÉ VARIABLE - Support diapo + diapo de réseau de trait (11 traits / cm c'est bien) - Diaphragme - Lentille 10 cm - Caliens (sur un support maniable, placée à 1 m de la diapo environ) - Oscilloscope.

Faire l'image de l'objet sur la barrette CCD du capteur grâce à la lentille. Suivant la taille de l'objet, ajustez les distances grille - lentille - capteur pour avoir un grandissement plus ou moins grand (le but étant que l'image rentre sur le capteur, mais prenne un maximum de place pour minimiser les incertitudes).

Mesurer successivement $\delta_p t$, f' et $\delta_r t$, puis en déduire $\delta_p x$.

Remarque : Si on peut compter visuellement le nombre de pixels dans une période, c'est bien aussi !

Pourquoi une grille plutôt qu'une fente ? Parce que les bords sont mieux définis.

Il faut élargir au maximum le faisceau de manière à éclairer le plus homogènement le dépoli, pour ne pas former l'image du dépoli éclairé. Le but est de diffuser au maximum pour perdre en luminosité.

Il ne faut pas que le capteur sature d'où la QI à intensité variable.

On doit pouvoir voir environ 7 traits. Compter le nombre de pixel et le nombre de traits.

Valeurs tabulées : $14\mu\text{m}$ d'après la notice, et une fréquence de ballayage de 1MHz pour 2048 pixels.

VOIR CCD.ods