

MP12 – PHOTORÉCEPTEURS

20 avril 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

Commentaires du jury

- Une attention doit être portée aux aspects de métrologie. Les termes de sensibilité, bande passante et temps de réponse doivent être connus.
- Les principes physique des photodétecteurs utilisés et leurs liens avec les caractéristiques métrologiques doivent être connu.
- Si l'on effectue une étude spectrale, il faut tenir compte de celle de tous les éléments du montage y compris polariseur/analyseur.
- Il est important de bien faire la distinction entre capteur photonique et thermique notamment au niveau de leur réponse spectrale.

Bibliographie

➤ *Physique expérimentale*, **Jolidon** Il y a tout et bien plus encore!

Expériences

- ☞ Réseau de caractéristique statique
- ☞ Sensibilité et linéarité
- ☞ Réponse spectrale
- ☞ Temps de réponse

Table des matières

1	Caractérisation de la photodiode	2
2	Sensibilité et linéarité	5
3	Réponse spectrale	6
4	Temps de réponse	8

Introduction

Comme nous le savons bien maintenant, les observations de phénomènes de physique s'effectue à l'aide de capteur. Le plus connu est l'oeil qui permet, à partir d'un faisceau lumineux incident, de fournir des signaux électriques neuronaux à notre cerveau pour lui transmettre l'information physique. L'ensemble des systèmes effectuant cette transformation sont appelés photorécepteur. L'action de ce dernier peut être résumée en 3 étapes formant la chaîne de transduction (avec exemple des objets les réalisant dans le cas d'un appareil photo) :

- La transmission optique en entrée (réalisée par des lentilles et des diaphragmes).
- La conversion du signal optique en signal électrique à proprement parlée (réalisée par une capacité MOS).
- Le traitement électronique (réalisée par la chaîne de lecture du réseau de capteur CCD).

Donc le photorécepteur ne se limite pas à l'étape 2 et les autres doivent être prise en compte pour une étude détaillée. Par exemple les objets réalisant la transmission optique influent la réponse spectrale du photorécepteur. De la même manière, le conditionnement électronique (3^{ème} étape) influe sur le temps de réponse.

La caractérisation d'un photorécepteur, donc du lien entre la grandeur physique ϕ et le signal en sortie S , est quantifiée à l'aide de différentes propriétés :

- sa sensibilité donnée par $\Gamma = \frac{dS}{d\phi}$. Dans le cas où la sensibilité ne dépend pas du flux, la réponse est dite linéaire.
- sa réponse spectrale $S(\lambda)$
- son temps de réponse
- la valeur du bruit associé qui fixe la valeur du flux min détectable et sa résolution ($\Delta\phi$) ainsi que le bruit additionnel dû aux rayonnements parasites.
- sa fidélité, sa justesse sa précision, sa reproductibilité, ect...

Nous pouvons séparer les photorécepteurs en 2 grandes classes en fonction des principes physiques qu'il utilise pour assurer la transduction de l'énergie lumineuse en énergie électrique : les récepteurs thermiques basés sur la conversion de l'énergie absorbée du rayonnement lumineux en énergie thermique (élévation de la température) qui est convertie en tension et ceux photoniques basés sur la création de porteur de charge par effet photoélectrique.

En guise d'exemple nous pouvons citer : les détecteurs thermoélectriques, les détecteurs pyroélectriques et les bolomètres pour les récepteurs thermiques et les photomultiplicateurs, les photorésistances, la photodiode, les phototransistors et les capteurs CCD et CMOS pour les récepteurs photoniques. Nous retrouvons une petite présentation des différents exemples dans le Jolidon p112-116.

Nous nous concentrerons au cours de ce montage à la photodiode et nous comparerons les résultats obtenus à ceux d'autres photorécepteurs.

1 Caractérisation de la photodiode

Nous devons déterminer quelle grandeur varie le mieux avec le flux entrant ϕ dans le photorécepteur. Pour cela, nous mesurons sa caractéristique $I(U)$ pour différentes valeurs de ϕ . Pour cela nous pouvons effectuer 2 montages : celui à résistance de charge et celui à amplificateur linéaire intégré (appelé fut un temps amplificateur opérationnel) dont les schémas sont donnés en figure 1.

Pour le premier montage, la photodiode est montée en série avec une résistance. Nous obtenons alors facilement la caractéristique avec les tensions aux bornes des deux composants. Le second est un montage à amplificateur linéaire intégré, reposant sur un convertisseur courant-tension. Comme les courants de polarisation de l'amplificateur opérationnel (quelques pA) sont négligeables devant le photocourant (μA), le convertisseur courant – tension a une impédance d'entrée nulle (caractéristique des ALI (AO pour les conservateurs) dans le cas idéal). Ce montage permet donc de s'affranchir de l'impédance d'entrée de l'appareil mesurant U_R . Nous réaliserons pour notre part le premier montage car sa compréhension est plus simple que l'AO composé de huit transistors (autant dire que c'est une boîte noire et ça, ça pue!).

Tracer la caractéristique d'un montage revient à déplacer le point de fonctionnement le long de cette dernière. Pour rappel, le point de fonctionnement est défini comme l'intersection de la caractéristique avec la droite de charge

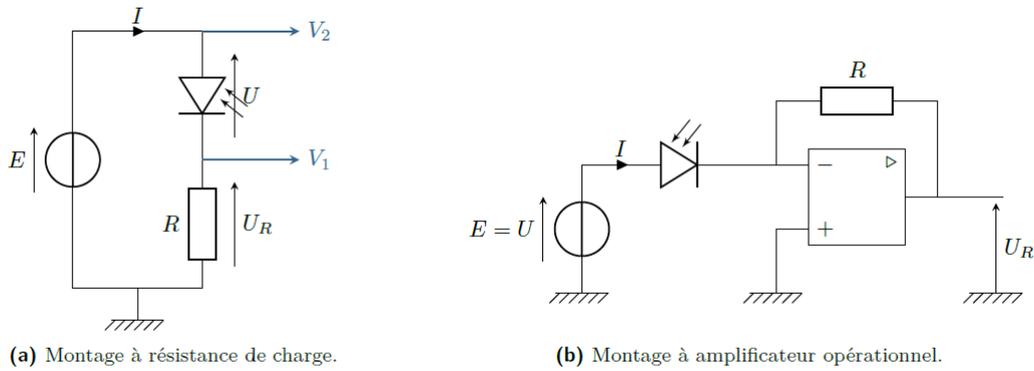


FIGURE 1 – a) montage à résistance de charge et b) montage à amplificateur linéaire intégré permettant la mesure d’un réseau de caractéristiques. Cette figure a été prise dans le poly de Gérémy Ferrand.

d’équation $I = \frac{E-U}{R}$ (qui se déduit de la loi d’ohm $U_R = Ri$ exprimer en variable U et I). Par conséquent nous effectuons cette translation en variant la tension de polarisation E à ϕ fixé. La droite est déplacé parallèlement à elle même puisque l’ordonnée à l’origine $\frac{E}{R}$ varie et le coefficient directeur $\frac{-1}{R}$ reste constant.

Pour obtenir le réseau de caractéristique, nous devons pouvoir faire varier facilement le flux lumineux incident qui proviendra d’une lampe QI (comme une lampe à incandescence classique, elle porte à incandescence un filament de tungstène, mais des gaz halogénés (iode et brome) à basse pression ont été introduits dans une ampoule en verre de quartz supportant les hautes températures et permettant la régénération du filament, au moins partiellement, ce qui augmente la durée de vie de l’ampoule.). Pour cela, nous utilisons deux polariseurs. Ainsi le flux peut être contrôlé finement en fonction de leur inclinaison relative donné par l’angle θ d’après la loi de Malus :

$$\phi = \phi_0 \cos^2(\theta) \tag{1}$$

Le système est représenté en figure 2.

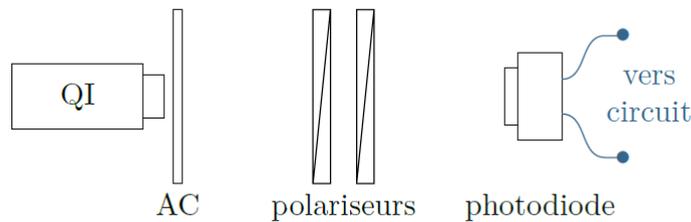


FIGURE 2 – Montage optique pour la mesure d’une caractéristique. Ce schéma est pris du poly de Jérémy Ferrand.

Réseau de caractéristique statique

⌚ 3 min

Nous construisons le montage 1 b) avec une résistance $R = 5k\Omega$ et éclairons la photodiode par le système d’éclairage précédemment évoqué sans oublier de mettre un filtre anti-calorique. Nous balayons la caractéristique en appliquant une tension E variable de quelques Hz. Le tracé peut être effectuer pour une valeur de flux en direct et les autres peuvent être fait en amont lors de la préparation. Un exemple de la courbe à obtenir est donnée en figure 3.

La tension U est obtenue par soustraction des deux tensions mesurées V_1 et V_2 et le courant est obtenu via la mesure de tension aux bornes de la résistance R . Ces différentes tensions peuvent être acquis grâce à Latis Pro.

Nota Bene : La période imposée par le générateur doit être très grande devant le temps de réponse du montage (incluant tous les effets capacitifs du circuit) afin d’acquérir une caractéristique quasi-statique. La mesure du temps de réponse permettra de le justifier à la fin du montage qu’une fréquence de quelques Hertz convient ici.

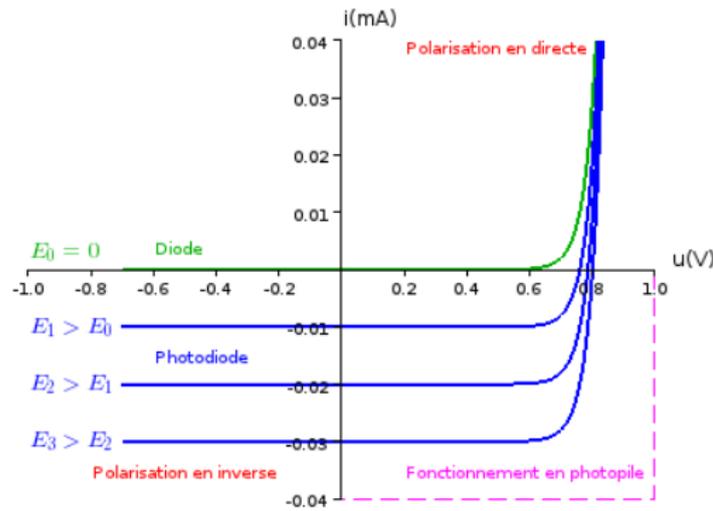


FIGURE 3 – Réseau de caractéristique d’une photodiode. Ce graphique est pris du site consultable [ici](#).

Nota Bene : Nous avons ici eu recours à une manipulation subtil que nous allons expliquer. Le photocourant est directement relié au flux incident et nous devons donc le mesurer précisément. Cependant, si nous mesurons directement la tension au borne de la photodiode une partie du courant passera dans l’appareil de mesure et nous ne mesurons donc pas le courant total. La technique est ici d’effectuer la soustraction des deux tensions mesurées V_1 et V_2 ; ce qui donne le courant que nous recherchons si la résistance est grande devant l’impédance de la photodiode. Cette astuce est illustrer en figure 4.

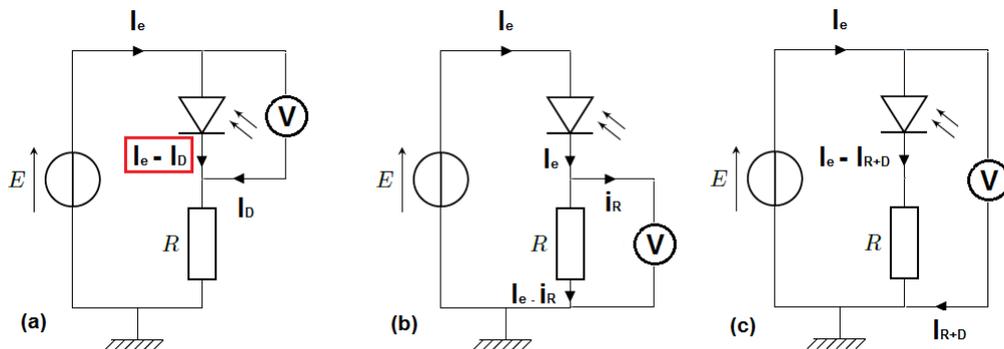


FIGURE 4 – (a) la tension mesurée correspond à un courant $I_e - I_D$ traversant la photodiode et non I_e . Nous pouvons alors mesurer la tension associée à $I_e - I_R$ (b) et celle associée à $I_e - I_{D+R}$ (c) dont la différence est environ égale à celle associé à I_e par loi des mailles si $I_{D+R} \approx I_R$.

Attardons-nous sur le résultat obtenu en figure 3. Nous le décomposons en 3 quadrants :

- $U < 0$ et $I < 0$: fonctionnement récepteur (puissance reçu positive) et polarisation en inverse (car $U < 0$).
- $U > 0$ et $I > 0$: fonctionnement récepteur et polarisation en direct. L’évolution avec ϕ est difficilement exploitable.
- $U > 0$ et $I < 0$: fonctionnement générateur.

Notre étude va donc se concentrer sur le premier cadrant. En effet, ce plateau représente la seul portion de la caractéristique sur laquelle le courant entrant I_e est assimilable, en bonne approximation, au photocourant. Sur cette plage, nous disons que la photodiode fonctionne en mode photoconducteur.

Comment choisir maintenant E et I ?

* Pour que le point de fonctionnement soit positionné dans ce cadrant, il faut que la tension de polarisation E choix choisit tel que la tension U aux bornes de la photodiode soit négative : $U < 0 \rightarrow E - RI < 0$ ce qui impose $E < RI < 0$ (car $I < 0$). Par conséquent la tension de polarisation doit être négative et grande en valeur

absolue. Cependant, pour de grandes valeurs de tension, le courant de fuite est non négligeable et le palier est incliner. Nous devons donc nous limiter à quelques volts pour E . Pour plus de détails, consulter l'annexe intitulée *Caractéristique d'une photodiode*.

- * Pour le choix de R il s'agit d'un compromis entre la sensibilité et la conservation de la linéarité (qui assure que le courant mesurer est bien proportionnel au courant incident donc c'est un critère sur la fidélité). En effet comme nous l'avons vu, la valeur de R donne la pente de la droite de charge qui est en $\frac{-1}{R}$. Pour une valeur trop grande de R (à E fixée), la pente est trop faible et nous quittons le palier. Pour une valeur trop faible, nous sommes loin de la fin du palier et la courbe est presque horizontale et la sensibilité n'est pas bonne (grande variation de I qui est linéaire avec le flux conduit à de petite variation de U qui est la quantité mesurée).

Détermination du point de fonctionnement idéal



⊖ 3 min

Nous imposons une tension de polarisation E de signe < 0 et d'amplitude de l'ordre de 5V par une alimentation continue. Pour différentes valeurs de la résistance de charges, nous mesurons la tension à ces bornes. Nous choisirons la valeur la plus grande possible de R sans sortir de la linéarité.

Nota Bene : Pour la détermination du point de fonctionnement idéal, nous éclairons la photodiode sous éclairage max que nous pouvons fournir notre système source. On s'assure ainsi que notre point ne quittera pas la zone de linéarité durant l'expérience. En effet, il ne peut se déplacer que vers la droite car nous avons vu que la caractéristique se shift vers le haut lorsque le flux diminuait.

Pour finir sur les caractéristiques et le fonctionnement de la photodiode, nous devons tenir compte du courant d'obscurité (lumière parasite).

Prise en compte des lumières parasites



⊖ 30 s

Nous bloquons le faisceau arrivant sur la photodiode à l'aide d'un petit carton et nous mesurons la tension aux bornes de la photodiode (toujours par différence de tensions pour mesurer la tension associée au bon courant).

Nota Bene : Il ne faut pas éteindre la lampe source mais bien couper le faisceau. Des réflexions sur d'autres éléments de montage peuvent avoir lieu et font partie de ce courant d'obscurité que nous cherchons à soustraire du flux incident.

Maintenant que nous avons correctement étudié les caractéristiques de cette photodiode et déterminé la gamme sur laquelle nous pouvons travailler au mieux avec, nous pouvons nous intéresser à la relation entre les variations du photocourant avec le flux incident qui est la grandeurs physique d'intérêt. Nous avons, en effet, énoncé que les deux étaient intimement liés sans apporter de justification. Il s'agit de l'objet de notre prochaine partie.

2 Sensibilité et linéarité

Nous avons vu que la sensibilité était donnée par $\Gamma = \frac{dS}{d\phi}$ avec $S(\phi)$ grandeurs physique photosensible. Dans le cas d'une réponse linéaire nous pouvons écrire :

$$S(\phi) = \Gamma \phi + S_0 \quad \text{où} \quad S_0 \text{ est la valeur d'obscurité.} \quad (2)$$

Notre source est ici (et c'est le cas général rencontré en TP) une source polychromatique. Dans ce cas le flux incident est donné par :

$$\phi = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

avec $\varphi(\lambda)$ le flux spectral dont la forme normalisée s'écrit $\varphi_N(\lambda)$ et vérifie par définition :

$$\int_0^{\infty} \varphi_N(\lambda) d\lambda = 1 \quad (4)$$

Ainsi nous pouvons réécrire $S(\phi)$ sous sa forme générale :

$$S(\phi) = \int_0^{\infty} \varphi_N(\lambda) d\lambda \phi + S_0 \quad (5)$$

Par conséquent la sensibilité globale γ dépend de la distribution spectrale (sauf si elle est plate). Ainsi, il faut pouvoir changer le flux incident ϕ sans en changer la distribution en longueur d'onde. Ceci explique le choix que nous avons effectué pour la source présentée en figure 2. Nous ne pouvions par exemple pas prendre simplement une lampe à filament dont l'intensité dépend de la température (modèle de Planck du corps noir) et donc du contenu spectral.

Nota Bene : En considérant la réponse spectrale de notre système indépendant du flux, nous effectuons 2 hypothèses :

- les polariseurs ne modifie pas la répartition spectrale. Cette hypothèse est très bien vérifiée pour les longueur d'onde dans le visible.
- la grandeur photosensible S ne dépend pas de la polarisation ce qui est le cas pour le photocourant.



Mise en évidence de la linéarité et calcul de la sensibilité de la photodiode



⊖ 3 min

Nous reprenons le même montage que précédemment (il ne faut surtout rien changer car il a été caractérisé pour des valeurs spécifiques de composés et d'alimentation !). Nous plaçons le polariseur et l'analyseur de telle manière que l'angle de l'analyseur indique -90° lorsque les 2 sont croisées (intensité minimale).

Puis nous faisons varier l'analyseur entre -90° et 90° et mesurons la tension aux bornes de la résistance de charge qui nous permet de trouver le photocourant.

- * Nous traçons \bar{I} en fonction de $\cos^2(\theta)$ défini par :

$$\bar{I} = \frac{I(\theta) - I(-\theta)}{2} \quad (6)$$

- * La pente de la droite obtenue nous donne la sensibilité de la photodiode Γ (pour cette expérience).
- * L'ordonnée à l'origine nous donne le courant d'obscurité (pour cette expérience).

Le photocourant varie linéairement avec le flux !

Nota Bene : Nous avons choisit de mesurer \bar{I} et non pas $I(\theta)$ afin de s'affranchir d'une erreur systématique. Si nous considérons que nous avons obtenu le photocourant correspondant à $\theta + \delta\theta$ pensant mesurer celui correspondant à θ nous effectuons une erreur qu'il est possible de quantifier à travers un développement limité du \cos^2 . Le terme d'ordre 1 varie en fonction de l'angle et est donc par conséquent non-linéaire. Or ce terme est impair en θ ; ce qui explique que nous sommes les valeurs obtenues pour θ et $-\theta$ afin de s'en affranchir.

Maintenant que nous sommes arrivés à établir proprement le liens entre la grandeur physique que nous souhaitons mesurer (la variation du flux incident) et la grandeur mesurable en sortie (le courant), pouvons-nous obtenir des informations sur la dépendance en longueur d'onde de la photodiode ? La réponse à cette question fait l'objet de la prochaine partie.

3 Réponse spectrale

Pour répondre à cette problématique, nous devons être capable d'isoler cette dépendance en longueur d'onde des autres paramètre variables du système en les fixant notamment le flux l'intensité du flux. Est-ce une chose facile ? Pas vraiment. Il paraît en effet compliqué de trouver une source dont le flux est équitablement partagé entre les longueurs d'onde. Heureusement pour nous, si le photorécepteur est linéaire, il est possible d'avoir recours à une astuce :

- Nous commençons par créer une onde (quasi) monochromatique à l'aide de filtres interférentiels.

- Puis nous normalisons les résultats obtenu à l'aide d'un autre photorécepteur dont la dépendance en longueur d'onde est négligeable (ex thermopile).

La mise en équation va nous permettre de mieux comprendre en quoi cette astuce nous permet d'avoir une source équivalente à celle recherchée.

1^{ère} étape ● : Le flux spectral d'une onde monochromatique de longueur d'onde λ_i s'écrit :

$$\varphi_{\lambda_i}(\lambda) = \phi_{\lambda_i} \delta(\lambda - \lambda_i) \tag{7}$$

Par conséquent, la réponse du capteur linéaire émettant cette onde prend la forme :

$$S_{\lambda_i} = \int_0^\infty \gamma(\lambda) \phi_{\lambda_i} \delta(\lambda - \lambda_i) d\lambda = \gamma(\lambda_i) \phi_{\lambda_i} \tag{8}$$

Si nous remarquons attentivement la formule obtenue, nous constatons qu'il nous est possible de connaître la réponse spectrale (ensemble des $\gamma(\lambda_i)$) à partir de la grandeur photosensible S_{λ_i} si nous nous affranchissons du flux ϕ_{λ_i} . La première étape est alors réalisée.

2nd étape ○ : il s'agit de l'affranchissement du flux ϕ_{λ_i} . Pour cela, nous utilisons un récepteur dont la réponse est plate (ici une thermopile) qui ne différenciera pas un flux de même valeur de source monochromatique à des longueurs d'onde différente. Pour plus de détails sur les récepteurs thermique, nous pouvons lire l'annexe intitulée *Fonctionnement d'un récepteur photonique et d'un récepteur thermique*.



Mesure de la réponse spectrale de la photodiode



⊖ 3 min

- * Nous alignons une lampe QI, un filtre anti-calorique, une roue de filtre interférentiel et la thermopile juste derrière. Un schéma du montage est donné en figure 5. Pour différents filtres, nous relevons la tension aux bornes de la thermopile $U_{thermopile}$ à l'aide d'un micro- ou nano-voltmètre qui est proportionnel au flux lumineux incident. La constante ne nous intéresse peu ici car elle sera la même pour les λ .
- * Nous remplaçons la thermopile par la photodiode et son circuit associé au même emplacement. Pour différents filtres, nous relevons la grandeur d'intérêt ici le photocourant $I(\lambda)$ (toujours obtenu par mesure de la tension aux bornes de la résistance de charge).
- * Nous finissons par tracer $\frac{I(\lambda)}{U_{thermopile}}$ en fonction de λ nous donnant la réponse spectrale (à une constante multiplicative près).

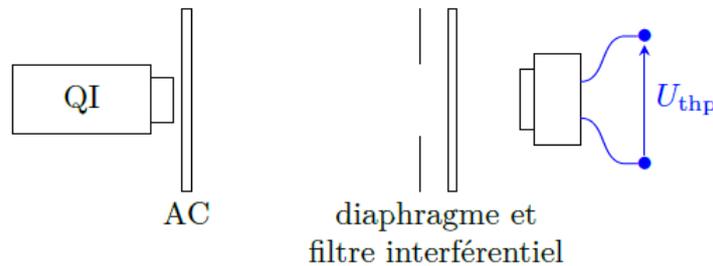


FIGURE 5 – Montage permettant l'étalonnage de la source. Cette figure est prise du poly de Jérémy Ferrand

Nota Bene : Afin d'obtenir des résultats correct, il peut être intéressant d'effectuer plusieurs fois la mesure de la tension $U_{thermopile}$ et de réduire l'incertitude dû à la fluctuation de la lecture lu sur le voltmètre de précision (incertitude de type A).

Nota Bene : pour voir comment définir les incertitudes pour cette manip nous pouvons lire le choix effectuer par les auteur du Jolidon p162.

Les résultats obtenues semblent en accord avec le modèle décrit en annexe. En effet nous observons que la réponse spectrale est linéaire dans le visible. Notons ici que la réponse spectrale est pilotée par le processus physique et conversion optique \rightarrow électrique (effet photoélectrique).

Nous avons, à ce stade bien caractérisé le lien entre le faisceau incident et la réponse fournie par la photodiode. Cependant, nous n'avons pas encore fini notre étude. En effet, si nous regardons bien, nous nous sommes intéressé uniquement au cas statique où le flux incident ne varie. Cependant le photodiode sera souvent utilisé pour caractériser un signal lumineux variant dans le temps. Il nous faut donc nous intéresser à l'aspect dynamique de notre photorécepteur ; ce qui fera l'objet de notre dernière partie.

4 Temps de réponse

Pourquoi étudier la dynamique de notre système ? la réponse est très simple, cela revient à ce demander si nous voulons un capteur au temps de réponse long devant la variation d'intensité de la source. Dans ce cas le signal obtenu est complètement déformé et ne ressemble plus à celui que nous souhaitons étudier.

Pour étudier cette dynamique nous pouvons soumettre la photodiode à une variation très rapide de flux (un saut) et voir combien de temps met le capteur pour que le photocourant atteigne la nouvelle valeur (pour passer d'une valeur S_0 à une valeur S_1). Nous définissons le temps de réponse τ comme le temps nécessaire pour que la grandeur photosensible est variée de 80% de la valeur totale de la variation associée au saut. τ est donc défini tel que :

$$S(t) = S_0 + \frac{1}{10} \Delta S \quad \text{à} \quad S(t + \tau) = S_0 + \frac{9}{10} \Delta S \quad (9)$$

Il est important de noter que le temps de réponse en montée peut être différent de celui en descente. Cette différence peut être dû à des mécanisme physique différents dans les 2 cas ou à des effets de saturation dynamique.

Pour effectuer ces mesures, nous devons trouver un dispositif permettant de faire varier rapidement le faisceau incident devant le temps de réponse du capteur ; chose qui n'est pas toujours aisé. Par exemple, pour la photodiode, un hacheurs optique typique d'un labo d'enseignement n'est pas assez rapide. Nous allons opter pour l'utilisation d'une diode laser commandée par un signal TTL (Transistor-Transistor Logic). Le temps caractéristique pour ce système est de quelques ns. Un schéma du montage est donné en figure 6.



FIGURE 6 – Montage permettant l'étude de la réponse dynamique de la photodiode. Cette figure est prise du poly de Jérémy Ferrand.



Mesure des temps de réponse de la photodiode (pour un circuit en aval donné)



⊖ 3 min

- * Nous éclairons notre diode laser (avec son circuit qui va bien) par une diode laser commandé par un signal TTL provenant d'un générateur basse fréquence. Il s'agit d'un créneau dont la tension basse est nulle et la tension haute de 5V. La fréquence de la tension de commande doit être ajusté pour que les plateaux de saturation soient bien visibles. Nous nous attendons à une valeur autour de 10kHz. Nous acquérons la tension au niveau de la résistance de charge à l'aide d'un oscilloscope (sa bande passante est plus grande que celle d'une carte d'acquisition. Pour cette expérience, une bande passante de quelques mégahertz est nécessaire.)
- * Nous mesurons le temps de réponse en montée et en descente.
- * Nous pouvons également vérifier que les deux temps varient linéairement avec la résistance de charge. Cette

expérience permet de montrer de le circuit électrique intervient dans le temps de réponse ici.

Nous remarquons que, plus la résistance de charge augmente, plus les temps de réponses sont long. Il faut donc trouver un compromis entre une grosse résistance pour une grosse sensibilité et petite résistance pour une grande rapidité. Résultat : un capteur sensible ne peut pas être rapide.

Par ailleurs la pente de la droite fitant $\tau(R)$ à la dimension d'une capacité. Par conséquent les temps de réponse sont d'origine capacitive. Le temps de transport des charges à la jonction est un exemple de phénomène non capacitif qui peut justifier un fit affine plutôt que linéaire. Ce dernier est également possible en montrant que l'ordonnée à l'origine a une valeur inférieur aux incertitudes. Comment interpréter cette capacité? Nous pouvons la modéliser comme la mise en parallèle d'une capacité et d'une résistance modélisant l'oscilloscope, une autre capacité en parallèle modélisant le fil coaxial et une capacité en parallèle d'une source de courant pour la photodiode en première approximation.

Par l'étude de ce circuit, nous obtenons l'expression du temps caractéristique du circuit τ_c ven fonction de ces différentes grandeurs :

$$\tau_c = R(C_{oscillo} + C_{cablecoaxial} + C_{photodiode}) \quad (10)$$

τ_c est un temps de relaxation d'un circuit RC et est égale aux temps de réponses à un préfacteur numérique près ($\approx 2,2$). Nous nous attendons à trouver des valeurs pour les capacités de jonction de l'ordre de 150pF.

Conclusion

Nous avons ici fait le choix de nous concentrer sur un seul photo récepteur. Ceci à permis, compte tenu du temps impartis, d'effectuer une étude assez poussé de la photodiode. Cette étude montre en particulier que la mesure d'une grandeurs physique n'est pas simple et des compromis doivent être fait suivant l'utilisation du photorécepteurs. nous donnons ci-dessous un tableau bilan des caractéristiques déterminées pour la photodiode et leur comparaison avec celles d'une photorésistance et une thermorésistance :

photorécepteurs caractéristiques	photorésistance	photodiode	thermorésistance
linéarité	moyen	bonne	à tester
temps de réponse	de l'ordre de la ms	de l'ordre de la μ s	> à 5s
réponse spectrale	visible et infrarouge	visible et infrarouge	plate
encombrement	faible	faible	+ important
prix	le – cher	abordable	cher
utilisation	optique de pointe et photovoltaïque	automatisme	mesure de puissance d'un rayonnement

Annexe

Réponse spectrale non triviale de la photodiode

Vous savons que pour faire circuler un courant, il était possible d'appliquer une tension aux bornes de la photodiode. Ici la polarisation se fait via l'éclairément par effet photo-électrique. Lorsque l'énergie du photon absorbée est supérieure à l'énergie du gap du semi-conducteur, elle permet à un électron de passer de la bande de valence à la bande de conduction. Ceci donne une condition sur l'énergie minimal du photon incident. Par ailleurs, une onde électromagnétique arrivant sur un semi-conducteur se propage en son seins sous forme d'onde évanescence sur une échelle caractéristique l appelée longueur de peau. Elle dernière est d'autant plus petite que que la fréquence du photon incident (donc son énergie) est élevée. Par conséquent si son énergie est trop élevée, il sera absorber proche de la surface et ne créera pas de paire électron-trou dans la bande de conduction donc pas de courant passant d'une zone à l'autre. En conséquence générale, la photodiode à une réponse spectrale non-triviale.

Caractéristique d'une photodiode

La caractéristique d'une photodiode est proche de celle d'une simple diode. Elle est modélisée, en première approximation par une diode en parallèle avec une source de courant symbolisant le flux incident. Puisque le courant est orienté de la cathode à l'anode (les trous vont en direction de la zone dopé P (anode) et les électrons en direction de la zone dopé N (catode)), il est de sens opposé à celui d'une diode passante (une diode est passante lorsque le champs extérieur s'oppose au champ interne. Ce dernier est dirigé de la zone N à la zone P donc le champ ext est orienté de la zone P vers la zone N et induit un courant dans ce sens.) En conséquence la caractéristique de la diode est shifter vers le bas.

Afin d'obtenir un modèle plus réaliste, nous pouvons ajouter en parallèle une capacité représentant celle de la jonction dépendant de la surface transverse de la fonction. Cette effet capacitif joue sur le temps de réponse de la photodiode (en statique un condensateur est un circuit ouvert et en dynamique il laisse passer le courant).

Par ailleurs, nous savons que le transport d'électron dans la zone de déplétion se fait par conduction de la zone P à la zone N leur permettant de réduire leur énergie. Cependant il peuvent, en réalité, se déplacer dans l'autre sens par diffusion grâce à leur énergie thermique. Ce phénomène est modéliser par ajout d'une résistance toujours en parallèle de grosse valeur (il s'agit d'un courant additionnel s'opposant à celui de base et qui par conséquent diminue sa valeur contrairement à une résistance en série qui diminuerait la tension et non le courant). Cet effet produit une légère inclinaison sur le plateau de la caractéristique.

Un autre phénomène à tenir compte est la chute ohmique liée au transport du courant en aval. Elle est modélisé par une résistance en série en sortie. Ce phénomène joue sur la partie exponentiel de la caractéristique.

Enfin nous pouvons tenir compte du courant d'obscurité (présent même dans le noir) par l'ajout d'un dernier générateur de courant en parallèle du reste du circuit. Ce phénomène agit également comme un shift mais qui devient très vite négligeable.

Fonctionnement d'un récepteur photonique et d'un récepteur thermique

* Récepteur photonique :

Comme nous l'avons vu, un récepteur photonique fonctionne sur l'effet photoélectrique interne (puisque l'électron arraché reste dans la photodiode). Donc tant que l'énergie du photon incident est suffisamment élevée pour permettre à l'électron de passer de la bande de valence à la bande de conduction, le comptage du nombre de photon incident par unité de temps (intensité du faisceau) est indépendante de la longueur d'onde. Par conséquent le flux enregistré est un flux de particule ϕ_{photon} , relié au flux d'énergie ϕ_E par :

$$\phi_{\text{photon}} = \frac{\phi_E}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (11)$$

Par ailleurs, nous avons vu que la grandeur photosensible était le photocourant. Il est donnée par la relation :

$$I_{\text{photon}} = \eta e \phi_E = \eta e \frac{\phi_E}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (12)$$

Si nous supposons le rendement (ou efficacité) quantique η indépendant de la longueur d'onde en première approximation, la réponse spectrale donnée par $\frac{I_{\text{photon}}}{\phi_E}$ est proportionnelle à λ (et nulle pour des λ trop grand).

* Récepteur thermique :

Un récepteur thermique fonctionne différemment. Il absorbe le rayonnement, augmentant ainsi sa température qu'il convertis en signal électrique par effet Seebeck. Si le matériaux absorbe de façon (quasi) identique le rayonnement sur la gamme de fréquence à laquelle nous nous intéressons, alors sa grandeur photosensible ne dépend que du flux incident. Nous parlons de réponse spectrale plate. Nous pouvons citer comme exemple la thermopile.