

MP12 Photorécepteurs.

Correcteurs : Antoine Bérut¹ et Étienne Thibierge²

Montage présenté le vendredi 28 novembre

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation du montage en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que ses auteurs. Rappelons que c'est vous qui présenterez les montages en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

Extrait des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule du rapport de l'épreuve de montage s'attache à présenter en détails les attentes et exigences du jury. Vous êtes plus qu'encouragés à le lire.

2014 : 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.

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.

2007, 2008 : Il existe d'autres photorécepteurs que la photodiode. Un éclairnement d'intensité variable peut s'obtenir en utilisant deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

2005 : Le temps de réponse d'un photorécepteur peut dépendre du circuit dans lequel ce composant est inséré.

Jusqu'en 2000, le titre était *Photorécepteurs. Caractéristiques métrologiques (sensibilité spectrale, linéarité, résolution...)*. Applications.

2000 : Les termes de résolution (plus petite variation délectable de la grandeur d'entrée) et de sensibilité (rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation de la grandeur d'entrée qui l'a provoquée) ne sont pas de vagues concepts substituables : ils ont une définition et un sens précis. De même, lorsque la résolution spectrale est étudiée, elle est rarement définie convenablement. L'une des difficultés pour l'étude des photorécepteurs est que les mesures absolues sont difficiles, car elles nécessitent l'emploi de thermopiles ou d'autres détecteurs à sensibilité spectrale relative constante sur une large étendue spectrale. On peut contourner cette difficulté en faisant des hypothèses sur le spectre d'émission de telle ou telle source, mais il faut alors le préciser sans ambiguïté.

Commentaires généraux

Le montage présenté a le mérite d'être bien ciblé, et de permettre une présentation satisfaisante du sujet. Le plan adopté, par caractéristique plutôt que par récepteur, nous semble le meilleur car il permet une discussion plus naturelle en évitant des redondances. En revanche, il est trop ambitieux : il semble impossible de traiter de façon suffisamment approfondie la réponse spectrale, la réponse dynamique et les récepteurs d'images. Des choix sont à faire entre ces trois parties, a priori en fonction de vos goûts : je ne crois pas qu'il y en ait de meilleurs que d'autres.

En conséquence malencontreuse, la fin du montage a été mal gérée. Plutôt que de raconter plusieurs expériences sans vraiment les faire, il aurait mieux valu passer du temps sur une seule expérience, mais la faire et l'exploiter en intégralité.

De façon générale, il faut beaucoup plus expliquer les expériences que vous présentez, et mieux justifier les dispositifs expérimentaux. C'est d'autant plus important dans ce montage puisqu'il s'agit d'expliquer pourquoi le circuit électrique construit autour du capteur est le mieux adapté à la mesure du flux lumineux.

Le traitement des incertitudes est très important dans les montages orientés « capteurs » comme celui-ci. Ainsi, toutes les valeurs numériques devraient être accompagnées d'une barre d'erreur raisonnable (trois chiffres significatifs sur la valeur d'une incertitude n'est *pas* raisonnable). En revanche, il ne nous semble pas judicieux de faire rentrer de force un calcul de propagation des erreurs si les expériences ne s'y prêtent pas.

1. antoine.berut@ens-lyon.fr et <http://perso.ens-lyon.fr/antoine.berut>

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr et <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

Le discours était émaillé de très, très nombreux lapsus (« conductimétrie » au lieu de conductance, « spectral » au lieu de spatial, etc.) à un tel point que cela en devenait gênant pour suivre la présentation. Attention ! En revanche, le tableau était remarquable de clarté et n'avait pas le défaut qu'on voit souvent d'être trop chargé.

Nous avons dû intervenir trois fois pour des raisons de sécurité, de l'étudiante ou du matériel. Ce sont trois fois de trop. Le jury ne serait probablement pas intervenu comme nous l'avons fait (griller un fusible n'est pas bien grave), mais aurait sans aucun doute pénalisé sévèrement de telles erreurs.

Retour sur le montage présenté

Introduction

C'est très bien de distinguer dès l'introduction les photorécepteurs thermiques et photoniques. Il aurait aussi pu être intéressant de problématiser le montage en orientant la discussion sous la forme « comment choisir le détecteur pour une mesure donnée ? ».

Caractéristique statique

Il n'est pas très utile d'écrire au tableau des expressions théoriques qui ne sont pas vérifiées expérimentalement, et ça l'est encore moins quand elles ne sont même pas commentées (ici l'équation des caractéristiques et la définition du rendement quantique).

L'intérêt de mesurer une caractéristique électrique doit être mieux justifiée : il s'agit de prendre le capteur isolé, sans circuit autour, et d'identifier laquelle de ses grandeurs caractéristiques varie « le mieux » avec le flux. Le circuit qui sera construit après aura pour but de conduire à une mesure de cette grandeur caractéristique.

Il faut expliquer **clairement** quelles sont les grandeurs mesurées, et comment elles sont reliées aux grandeurs d'intérêt, ici la tension aux bornes de la photodiode et le courant la traversant. Pour s'éviter une discussion pénible, il est possible de faire l'acquisition via LatisPro et de lui faire calculer les soustractions, ce qui donne un accès direct à la caractéristique.

Le choix de la résistance de charge et de la tension de polarisation doit être beaucoup mieux discuté. Contrairement à ce qui a été dit, le fait que le point de fonctionnement se trouve dans le quadrant ($u < 0, i < 0$) n'a en tant que tel aucune importance. Ce qui en a est que pour tous les flux mesurés lors d'une expérience, le point de fonctionnement reste sur le plateau de la caractéristique associée, puisque c'est seulement sur cette partie de la caractéristique que le courant parcourant le circuit est égal au photocourant, proportionnel au flux. Or il se trouve que ce plateau est dans le quadrant ($u < 0, i < 0$), mais ce n'est pas ça qui compte. Remarque au passage, le choix de R et E dépend (en principe) de l'expérience.

3. Il faut que l'angle d'incidence soit inférieur à l'angle d'acceptance, qui vaut une dizaine de degrés pour les polariseurs d'enseignement.
4. Les deux modes à tension imposée ou courant imposé existent, mais le mode à courant imposé est limité à des mesures de résistances de quelques k Ω .

Linéarité et mesure de sensibilité

Attention à être précis : comme la réponse spectrale d'une photodiode n'est pas plate, une valeur numérique de sensibilité n'a de sens que pour la composition spectrale du rayonnement qui a servi à la mesurer. Par conséquent, c'est une valeur qui n'a pas tant d'intérêt, d'autant plus qu'il est difficile de la comparer à une valeur tabulée. Par conséquent, la conclusion importante de l'expérience n'est pas la valeur de sensibilité mais la linéarité du comportement de la photodiode. On peut d'ailleurs noter qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un comportement linéaire pour définir une sensibilité (contrairement à ce qui a été suggéré à l'oral).

Méfiez-vous de l'utilisation des filtres à densité pour mesurer la linéarité, car leur étalonnage est peu fiable. Sextant propose une méthode un peu plus élaborée pour contourner la difficulté. En pratique, je pense qu'il vaut mieux utiliser la loi de Malus. Dans ce cas attention : pour être suffisamment³ proche de leur régime de fonctionnement nominal (incidence normale), les polariseurs doivent être placés à une bonne cinquantaine de cm de la lampe QI, sans quoi le taux de transmission de la polarisation bloquée peut devenir trop important.

Si vous utilisez un puissance-mètre commercial, il faut connaître son principe de fonctionnement. En général, il s'agit d'une photodiode étalonnée. Il est nécessaire d'indiquer la longueur d'onde de travail pour tenir compte de sa réponse spectrale. En corollaire, utiliser une photodiode étalonnée pour étalonner une photodiode n'est pas forcément le plus fructueux pédagogiquement : si vous faites ce choix, soyez-en conscient, et réfléchissez bien à ses conséquences.

Le traitement des données dans l'expérience de type loi de Malus était bien mené et bien compris. Par contre, il faut penser à expliquer *au cours du montage* l'intérêt de moyenner $V(+\theta)$ et $V(-\theta)$, et ne pas attendre les questions pour ça.

Un ohmmètre ne doit jamais s'utiliser dans un circuit alimenté, les mesures se font à vide. Cela est lié au fonctionnement de l'appareil, qui impose⁴ une faible tension et mesure un courant, qui doit rester faible. S'il est trop grand, il y a destruction du fusible de protection (sans doute accompagnée de BIP BIP de protestation).

Réponse spectrale

Cette partie est pertinente, mais a été traitée un peu vite pour être vraiment percutante.

Il faut donner une définition qualitative de la réponse spectrale $\gamma(\lambda)$: elle compare la réponse du détecteur à deux rayonnements de même flux mais de longueur d'onde différente.

Le point soulevé plus haut sur l'utilisation de puissance-mètre commercial est particulièrement critique ici. Pour contourner le problème, nous conseillons d'utiliser une thermopile, ce qui permet en plus d'utiliser au moins

un récepteur thermique dans le montage. Certes, les mesures sont très pénibles. Certes, les résultats sont parfois « étonnants ». Cependant, on arrive presque toujours à une courbe qui a une allure raisonnable, et qui permet d'expliquer qualitativement les phénomènes physiques.

Il est indispensable d'expliquer davantage les résultats obtenus en discutant rapidement des mécanismes physiques. Pour une photodiode, les questions importantes sont de savoir pourquoi $\gamma(\lambda) \propto \lambda$ dans le visible ? Pourquoi y a-t-il une brusque chute vers $\lambda \simeq 1,2 \mu\text{m}$? Pourquoi y a-t-il une autre chute dans l'UV ? (à mettre en relation avec l'effet de peau). Ces points sont bien expliqués par Sextant.

Il faut savoir discuter la difficulté de mesurer la réponse spectrale d'une photorésistance (nécessité de la linéarité), et comment il serait éventuellement possible de contourner le problème avec des sources, par exemples des diodes lasers, qui seraient de couleur différente mais émettraient la même puissance.

Temps de réponse

Là encore, cette partie a toute sa place dans le montage ... mais il faut faire les expériences, et pas se contenter de dire « j'aurais pu faire ça ».

Un point essentiel est que le temps de réponse du signal électrique image du flux est conditionné au moins autant par le circuit électrique que par le capteur lui-même. N'allez pas en conclure que la notion perd son sens, ou que le temps de réponse devient non mesurable. Au contraire, c'est un aspect très intéressant à illustrer et discuter.

De même, la discussion sur le thème « on ne sait pas si on caractérise le récepteur ou la source » me semble avoir été mal comprise. En fait, il est presque impossible d'être sûr à 100% d'isoler la réponse du détecteur : le signal obtenu fait intervenir une convolution des deux réponses dans tous les cas. Pour s'assurer que le temps de réponse observé est bien imputable à la partie détecteur, deux possibilités :

- ▷ prendre la même source, un autre détecteur et mesurer un temps de réponse nettement plus faible ;
- ▷ modifier des paramètres du circuit de détection et vérifier qu'ils changent le temps de réponse.

Passer du duo laser piloté par TTL + photodiode à la paire photorésistance + stroboscope ne permet de lever le doute de façon certaine dans aucun des cas, puisque la source change à chaque fois. En pratique, il n'y a cependant pas trop le choix, il faut changer de source : le stroboscope sature la photodiode, et on ne peut rien conclure du tout (apparition de plateaux artificiels dus à la saturation) et les fréquences TTL permises sont trop grandes pour que la photorésistance suive. En revanche, modifier

la résistance de charge du circuit à photodiode permet de montrer qu'on caractérise la réponse du circuit de détection et d'en interpréter l'origine capacitive.

Application au détecteur d'obscurité

L'application est sympathique et très démonstrative. Pour qu'elle apporte quelque chose au montage, il faut soigner la présentation du circuit. En revanche, n'espérez pas en faire plus qu'une illustration anecdotique. Ainsi, elle a bien sa place en conclusion du montage, à présenter si vous avez le temps et à sauter si vous ne l'avez pas.

Détecteur d'image

La détection d'image entre à plein dans le thème du montage, et lui consacrer une dizaine de minutes serait tout à fait justifié. En revanche, présenter une courbe sur un oscilloscope pour montrer qu'il apparaît des pixels est très insuffisant, et ne sera pas du tout valorisé par le jury. Pour bien faire, il faudrait expliquer le mécanisme de lecture de l'image et quantifier la résolution spatiale de la barrette.

Questions

Les questions suite à un montage portent quasi-exclusivement sur les protocoles expérimentaux et les mesures que vous avez réalisées. Des questions sur le fonctionnement microscopique des capteurs pourraient vous être posées. Ceux-ci sont plus ou moins bien expliqués par Sextant. Au vu du montage, j'ai du mal à imaginer d'autres questions plus ouvertes.

Conclusion

Ce montage est un des plus redoutés car les expériences à présenter ne sont pas simples à faire tourner (mais il y a pire) ni à interpréter (mais là aussi il y a pire) et, surtout, ce sont des questions que vous ne vous êtes jamais posées avant fin octobre. De nombreuses erreurs notées lors de la correction ou présentes dans le poly trouvent ici leur origine. En contrepartie, si vous présentez ce montage et que vous le faites bien, une très bonne note sera plus facilement accessible que sur des montages plus classiques.

Les expériences proposées constituent une base largement suffisante pour préparer votre propre montage. Cependant, un travail important est à faire pour bien les comprendre et arriver à les expliquer efficacement dans des conditions d'oral. N'hésitez pas à nous solliciter si vous avez besoin d'aide ou de plus de conseils.