

Licence Professionnelle
Instrumentation Optique et Visualisation

Détecteurs Optiques et
Introduction aux systèmes optroniques''''

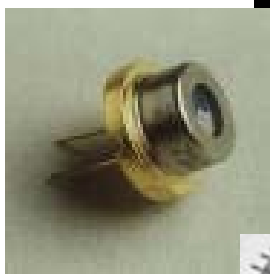
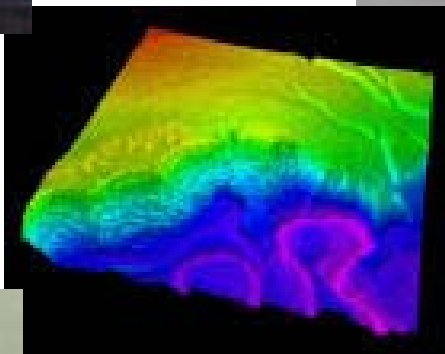


Table des matières

A-La détection: au coeur du système optronique	Page4
B-Les différents types de détecteurs	Page5
1-Détecteurs thermiques	Page5
2-Détecteurs photoniques	Page6
C-Paramètres de signal d'une photodiode	Page10
1- Le dipôle "Photodiode": un réseau de caractéristiques	Page13
2-Courant d'obscurité	Page14
3-Deux modes de fonctionnement	Page14
4-Détection de très faibles flux	Page15
5-L'utilisation en mode photoconducteur	Page16
6-Comportement dynamique: bande passante	Page18
D-Bruits de photodétection	Page19
1-Qu'est-ce que le bruit?	Page19
2-Comment caractériser le bruit?	Page20
3-Les différentes sources de bruit	Page21
4-De la NEP à la détectivité spécifique	Page21
6-NEP détecteur et NEP système	Page23
E-Détecteurs IR: une introduction aux systèmes optroniques	Page23
1-Détecteurs BLIP et Détectivité spécifique	Page23
2-Signal IR et Température équivalente de bruit	Page25
3-La conception d'un système optronique IR: TD-cours	Page25
Annexe: Quelques références bibliographiques et sites internet	Page28

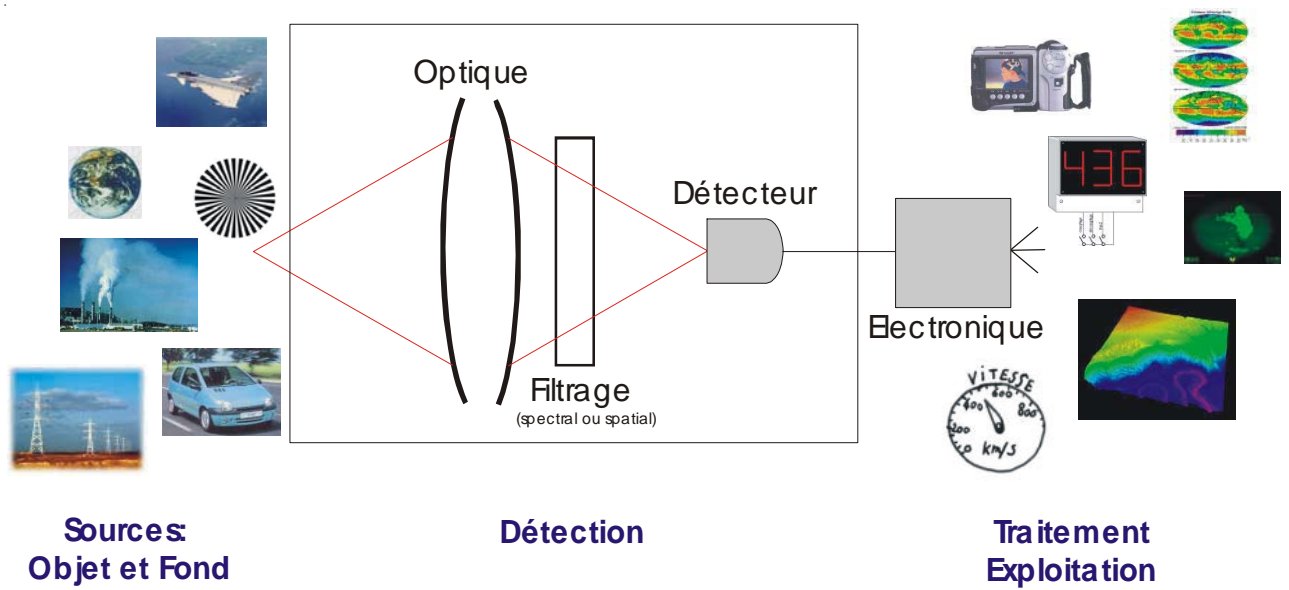


Figure 1- Une chaîne optronique. Le bloc de détection qui englobe optique, filtrage spectral ou spatial, détecteur et électronique de proximité (convertisseur courant-tension, gain...) est au coeur du système et requiert la plus grande attention. Une détection doit être adaptée à la scène observée et à la nature de l'information à extraire.

A-La détection: au coeur du système optronique

Emise par un corps, réfléchi par une surface, rétrodiffusée ou encore modulée à diverses fréquences, la lumière véhicule de l'information. Pour l'exploiter plus facilement, les photons doivent être convertis en signaux électriques: la lumière est ainsi "détectée". La première partie de ce cours est consacrée à l'étude des processus physiques à l'oeuvre dans cette conversion. Différents types de détecteurs optoélectroniques utilisent ces processus: on distinguera les détecteurs thermiques et les détecteurs photoniques.

La détection est au coeur de la conception d'un système (Figure 1). A l'interface Optique-Traitement électronique, c'est elle qui permet d'exploiter de manière optimale le signal optique provenant de la scène observée. Une détection mal pensée ou mal optimisée se traduit par une perte définitive d'information. Aucun traitement -aussi performant soit-il- ne permettra de retrouver de l'information si cette dernière n'a pas été détectée. Par exemple, si l'objectif est de rechercher la présence d'un corps émettant dans l'infrarouge lointain (vision nocturne, détection de tumeurs en imagerie médicale,...), le détecteur doit être adapté à ce domaine de longueur d'onde spécifique. Si l'information est portée par une modulation rapide de la lumière, la bande passante devra être suffisamment large pour ne pas perdre ce signal. La seconde partie de ce polycopié se concentre sur les photodiodes et présente leurs modes de fonctionnement et mise en oeuvre pratique. Cette section doit vous permettre de lire une notice commerciale et d'en extraire les caractéristiques principales d'une photodiode afin de répondre à l'application souhaitée.

Même si les choix précédents ont été convenablement réalisés, un signal peut s'avérer difficile à exploiter en raison du bruit de détection. Ce bruit est une limite au bon fonctionnement du système. Un signal faible "noyé" dans le bruit ne pourra être extrait et l'information sera donc définitivement perdue. Imaginons également un système qui émet une alarme lorsqu'un niveau de signal prédéfini est atteint: le bruit peut provoquer de fausses alertes en s'ajoutant à un signal plus faible que le niveau requis. Il est donc nécessaire de le quantifier et d'en connaître l'origine. Après avoir présenté la notion de densité spectrale de bruit, la troisième partie du cours décrit les sources de bruit et explique comment définir et caractériser les "paramètres de bruit" d'un détecteur afin de pouvoir les comparer entre eux.

Une dernière partie s'intéresse au cas particulier des détecteurs travaillant dans l'infrarouge moyen et lointain (3-30 μ m). En effet, l'environnement à température ambiante émet dans cette gamme de longueur d'onde (émission corps noir) et devient la source principale de bruit. De plus, les systèmes travaillant dans l'infrarouge ont connu un très fort développement dans le domaine de la défense, du spatial, de l'industrie ou encore du médical. Cette partie sera l'occasion de présenter les grandes lignes de la conception d'un système optronique infrarouge en partant d'un cahier des charges. Si le terme "OptoElectronique" désigne des composants tels que détecteurs, fibres, modulateurs ou amplificateurs de lumière, le terme "Optronique" -longtemps réservé aux militaires et qui a diffusé dans le domaine civil à partir des années 90- a plutôt une signification "système". Un système optronique associe optique, optoélectronique, électronique, informatique, visualisation... Derrière ce mot se cache l'idée d'une architecture, d'une chaîne aux multiples composants dépendant les uns des

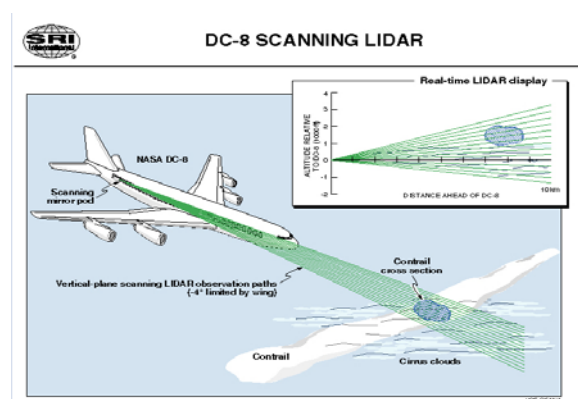


Figure 2- Un LIDAR (Light Detection And Ranging) permet de localiser en temps réel les formations nuageuses et les traînées d'avions situés à plusieurs kilomètres. Un lidar est un système dit actif: un faisceau laser est émis et la rétro-diffusion de ce faisceau est détectée et analysée. Les lidars sont également utilisés pour détecter et analyser les polluants atmosphériques.



Figure 3- Une caméra vidéo est un produit optronique typique, multidisciplinaire.

autres. Des exemples typiques de produits optroniques sont le lidar (radar optique-Figure 2), la caméra vidéo (Figure 3) ou le lecteur CD.

B-Les différents types de détecteurs

Un détecteur convertit un rayonnement optique en signaux électriques plus faciles à exploiter. La conversion photon-électron peut être indirecte: l'absorption de lumière se traduit par une élévation de température d'un matériau absorbant qui est ensuite convertie en signal électrique. Les détecteurs thermiques fonctionnent sur ce principe. Par contre, les détecteurs photoniques (ou quantiques) mettent en jeu une création directe de charges électriques.

1-Détecteurs thermiques

Trois types sont couramment utilisés: thermopiles, bolomètres et détecteurs pyroélectriques. Les deux premiers ont un temps de réponse de quelques ms alors que les pyroélectriques peuvent atteindre quelques centaines de μ s: ils sont donc dans l'ensemble relativement lents. Cependant, une caractéristique avantageuse est que les variations spectrales du facteur de réponse ne dépendent que du facteur d'absorption du revêtement absorbant qui, pour certains, varie peu sur une grande plage de longueur d'onde (la suie d'or a par exemple un facteur d'absorption proche de 1 depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge moyen). Ces détecteurs seront donc utilisés lorsque le temps de réponse n'est pas un paramètre critique et qu'une réponse uniforme sur une grande plage de fréquence est nécessaire. Leur longévité et leur robustesse en font de bons candidats pour des applications spatiales par exemple.

Une **thermopile** est constituée d'une série de thermocouples connectés en série. Un thermocouple est formé de deux conducteurs différents soudés en V (Figure 4). Une couche absorbante déposée sur les jonctions "chaudes" convertit le rayonnement incident en chaleur. Les points de jonctions "chauds" sont isolés thermiquement des points de jonction "froids" (module Peltier par exemple). Une tension proportionnelle au flux est alors générée par effet thermoélectrique (effet Seebeck). Ce détecteur ne nécessite pas de tension de polarisation extérieure.

Les **bolomètres** utilisent la variation de résistivité d'un matériau (Oxydes de Ni, Mn, Co...) induite par la variation de sa température consécutive à l'absorption du rayonnement. Une polarisation extérieure est nécessaire pour mettre en évidence cette variation. De nombreuses applications militaires et astronomiques pour l'IR lointain utilisent des bolomètres cryogéniques (détecteurs en Germanium dopé au Ga et maintenus à 4K) en raison d'une très grande sensibilité et d'une très bonne reproductibilité.

Un **détecteur pyroélectrique** est constitué d'un cristal isolant dont la maille ne présente pas de centre de symétrie. De tels cristaux (LiNbO_3 , cristaux ferroélectriques) possèdent la propriété de se

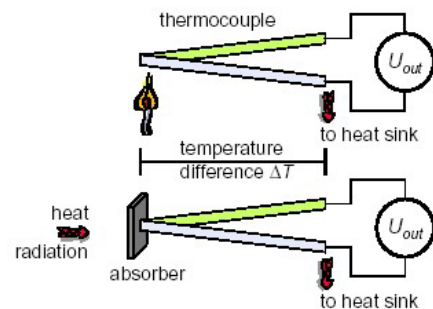


Figure 4 - Principe de l'effet thermoélectrique. 2 conducteurs différents sont soudés. Une différence de température (flamme ou par l'intermédiaire d'un matériau absorbant pour détecter un faisceau) engendre une ddp mesurable. (Doc Perkin-Elmer)



Figure 5- Les détecteurs pyroélectriques sont utilisés par exemple dans les systèmes infrarouges passifs de détection d'intrusion.

polariser spontanément. Deux électrodes permettent de mesurer cette différence de potentiel. Cependant, à température constante, la distribution de charge interne est neutralisée par les électrons libres et les potentiels de surface de telle sorte qu'aucune ddp ne peut être mesurée. Par contre un changement de température se traduit par une tension transitoire qui elle peut être détectée. Leur emploi nécessite donc une modulation de la lumière. Ces détecteurs peuvent être utilisés pour mesurer par exemple l'énergie d'une impulsion lumineuse de quelques μs à quelques centaines de μs maximum ou encore détecter une intrusion (Figure 5).

2-Détecteurs photoniques

Les détecteurs quantiques convertissent directement les photons incidents en électrons. Ces électrons peuvent alors être soit éjectés (effet photoémissif) soit libérés au sein du matériau photosensible (matériaux semiconducteurs).

Effet photoémissif: le photomultiplicateur

Le photomultiplicateur (PM) est basé sur deux phénomènes physiques mis en oeuvre successivement: l'effet photoémissif et la génération d'électrons secondaires par bombardement électronique. Un PM est constitué d'un tube à vide contenant une photocathode, une succession de dynodes et enfin une anode. Un photon incident sur la photocathode engendre -si son énergie est supérieure à une valeur seuil dépendant du matériau- l'éjection d'un électron. Cet électron pourrait être collecté directement: c'est le principe des diodes photoémissives mais le signal de détection est faible. Le principe du PM permet d'accroître le nombre d'électrons récupérés par photon incident (Figure 6). Une haute tension (~ 100 à 200V) imposée entre la photocathode et la première dynode dirige et accélère l'électron primaire vers cette seconde surface. L'énergie de l'électron est suffisante pour engendrer usuellement jusqu'à une dizaine d'électrons secondaires. A nouveau accélérés, ces électrons secondaires frappent une seconde dynode. Le phénomène se répète en cascade jusqu'à la dernière dynode et les électrons sont finalement collectés sur l'anode. Une dizaine de dynodes permet d'atteindre des gains de l'ordre du million: la sensibilité d'un PM est

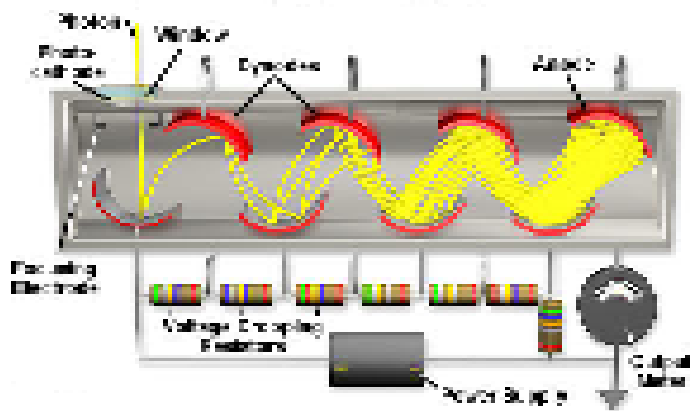


Figure 6- Principe d'un photomultiplicateur



Figure 7- PM commercial

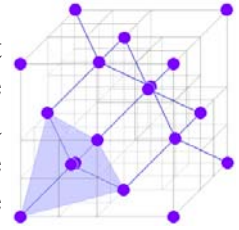
exceptionnellement élevée. Un PM est irréversiblement endommagé par des flux lumineux aussi faibles que ceux obtenus lors de l'éclairement de la photocathode par la lumière d'un ciel nocturne étoilé sans lune.

Le photon incident doit avoir une énergie supérieure à un seuil fixé par la nature de la cathode ou de la substance déposée sur cette dernière. L'existence d'une valeur minimale pour l'énergie signifie qu'il existe une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle les photons ne sont plus détectés. Les cathodes photoémissives couramment sur le marché (Figure 7) sont sensibles dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge proche.

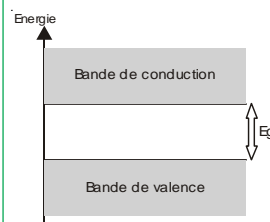
Détecteurs à semi-conducteurs

Semi-Conducteurs

Un semi-conducteur intrinsèque (Silicium, Germanium) est un solide cristallisé à liaisons de covalence, de structure ordonnée et périodique. Très faible à basse température, la conductivité augmente avec elle. C'est une différence essentielle avec les métaux qui eux sont conducteurs dès le zéro absolu.

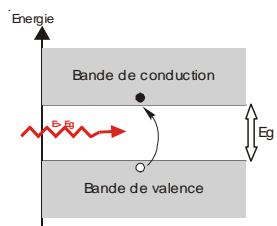


Pour améliorer cette conductivité, des impuretés peuvent être introduites dans le réseau cristallin. Cette opération est appelée "dopage" et donne des semi-conducteurs dits extrinsèques. Un dopage de type N (impuretés donnatrices) augmente la densité de charges négatives alors qu'un dopage de type P (impuretés acceptrices) augmente la densité de charges positives.



La structure cristalline d'un semi-conducteur implique que les niveaux d'énergie que peuvent occuper les électrons se répartissent en bandes. Une bande interdite de largeur E_g (énergie de gap) sépare ainsi deux bandes dites de conduction et de valence. La valeur de E_g dépend de la nature du matériau.

Un photon permet à un électron de la bande de valence de passer dans la bande de conduction (laissant une place vacante appelée trou). Cette transition ne se produit que si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de gap, donc si sa longueur d'onde est inférieure à une valeur de coupure (l'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde).



Photorésistances

Les photorésistances (ou LDR: Light Dependant Resistor) sont constituées d'un matériau semi-conducteur généralement déposé en serpentins sur une plaquette de céramique (Figure 8). Ce sont des résistances qui ont la propriété de varier en fonction de l'intensité lumineuse reçue. En l'absence de lumière incidente, la conductivité du matériau est très faible: la "résistance d'obscurité" peut atteindre plusieurs M Ω . Sous l'effet d'un éclairage, des électrons sont libérés dans le semi-conducteur augmentant ainsi la densité de charge libre et donc la conduction (cf encadré). La résistance diminue lorsque le flux augmente. Il est important de noter que cette variation n'est pas linéaire avec le flux.

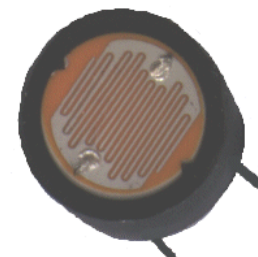


Figure 8- Photorésistance. Le semi-conducteur est déposé en serpentins.

L'énergie des photons incidents doit être supérieure à l'énergie de gap du semi-conducteur (cf encadré précédent): la longueur d'onde incidente doit donc être inférieure à une valeur limite. Cette valeur est imposée par la nature du matériau. Le sulfure de cadmium CdS couvre la plage visible avec un maximum à 600nm. Sa réponse est très proche de celle de l'oeil humain. Avec le sélénure de cadmium CdSe, le maximum est déplacé vers 750nm. Le PbS permet de travailler dans le proche infrarouge et certains semi-conducteurs permettent d'accéder aux longueurs d'onde supérieures à 5 μ m. La bande passante est

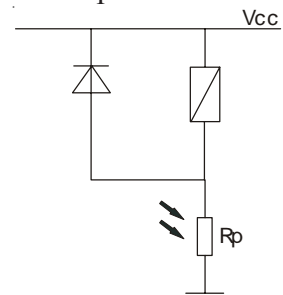
généralement modeste, au mieux de quelques centaines de kHz. Les photorésistances sont souvent employées dans des montages permettant de détecter des seuils d'éclairement: allumage de l'éclairage public (encadré ci-dessous), flash automatique des appareils photos, surveillance de flamme dans les installations de chauffage, détection d'intrusion...

Commande automatique d'un éclairage



On souhaite contrôler automatiquement un éclairage public. L'éclairage doit s'allumer le soir lorsque la lumière ambiante devient faible et s'éteindre le matin lorsque le jour s'est levé. Le problème consiste donc à détecter des seuils d'éclairement. Une photorésistance est bien adaptée à ce type de cahier des charges. L'obscurité correspond à une résistance

grande alors qu'un éclairage plus important s'accompagne d'une diminution de la résistance. Une solution peut être de commander directement un relais à l'aide d'une photorésistance. Un relais est constitué d'une bobine qui lorsqu'elle est sous tension attire une armature ferromagnétique qui déplace des contacts permettant ainsi de fermer un circuit adjacent. On peut par exemple utiliser un relais ayant un courant d'enclenchement I_e : au dessus de cette valeur, le circuit adjacent se ferme et l'éclairage s'allume. Sachant que la bobine a pour résistance R_b , il est possible de calculer la valeur de la photorésistance enclenchant le relais. Une résistance variable en série avec la photorésistance permet d'ajuster le seuil d'allumage. La diode placée en parallèle de la bobine est une précaution permettant de s'affranchir du courant de rupture de la bobine.



L'intensité dans la bobine est :
$$i = \frac{V_{cc}}{R_b + R_p}$$

La valeur de la photorésistance enclenchant le relais est donc :
$$R = \frac{V_{cc}}{I_e} - R_b$$

Photodiodes

Une photodiode est une diode à jonction qui produit un courant fonction de l'éclairement reçu. Elle est constituée d'un semiconducteur dopé P d'un côté et N de l'autre (jonction dit PN). La figure 10 donne le diagramme d'énergie des électrons dans une telle configuration. Les photons incidents d'énergie supérieure à l'énergie de gap sont absorbés et induisent le passage d'un électron dans la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. Dans la zone N ou la zone P, zones où l'énergie est constante, les électrons produits restent "quasi-immobiles" (en réalité, ils diffusent créant un courant dit de diffusion). Par contre, comme un champ électrique élevé règne dans la zone intermédiaire, les électrons produits dans cette zone migrent vers la zone N. Il apparaît alors un photocourant mesurable. La zone P est généralement mince pour permettre au plus grand nombre de photons d'atteindre la zone active. Ce schéma est parfois amélioré par l'ajout entre les deux zones d'une couche non-dopée (Intrinsèque): on parle de photodiodes PIN. Ces photodiodes sont plus rapides et moins bruyantes.



Figure 9- Photodiode

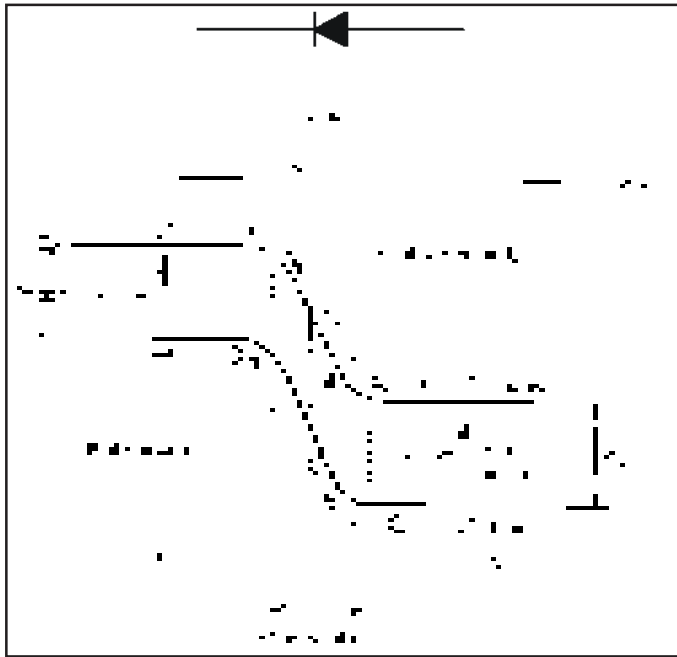


Figure 10- Jonction PN polarisée. Le graphe donne le diagramme d'énergie des électrons dans cette jonction. Un photon incident dans la zone intermédiaire engendre une paire électron-trou à l'origine du photocourant (courant inverse). (Graphe P. Mayé-Dunod)

Matériau et réponse spectrale

Nous avons déjà vu à plusieurs reprises que dans le cas des matériaux semiconducteurs l'énergie de gap -et donc la nature du matériau- impose une valeur limite aux longueurs d'onde pouvant être détectées. Cette valeur limite se calcule facilement à partir de l'énergie de gap:

$$E > E_g \Rightarrow \lambda(\mu m) < \frac{1,24}{E_g (eV)}$$

Chaque photon incident de longueur d'onde plus faible donne naissance à un électron avec une probabilité η . Cette probabilité appelée efficacité quantique est plus petite que 1 car des photons sont parfois absorbés sans donner d'électrons. Considérons un flux énergétique F_e parvenant sur la surface du détecteur. Le flux de photons F_p est alors le rapport du flux énergétique par l'énergie d'un photon. Cette dernière est reliée à la longueur d'onde du photon: $E = h\nu$. Le flux F_p s'exprime donc:

$$F_p = \frac{F_e}{h\nu} = \frac{\lambda}{hc} F_e$$

Chaque photon donne naissance à un électron au rendement quantique près. Un flux énergétique F_e crée donc en sortie du détecteur un photocourant:

$$i = \eta \frac{\lambda}{hc} F_e = R(\lambda) F_e$$

$R(\lambda)$ est appelé facteur de réponse spectral en courant ou "sensibilité" de la photodiode. Il se mesure en A/W. Cette grandeur augmente linéairement avec λ jusqu'à la longueur d'onde de coupure du matériau (Figure 11). Notons que cette réponse est fondamentalement différente de celle d'un détecteur thermique pour lequel le facteur de réponse était constant sur une large plage de longueur d'onde.

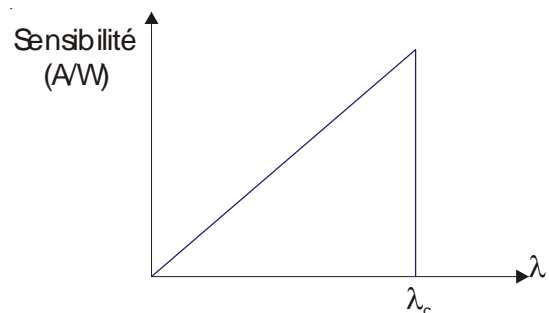


Figure 11- Allure théorique de la sensibilité d'une photodiode. λ_c est la longueur d'onde de coupure.

La réponse réelle diffère de l'allure théorique car le rendement quantique n'est pas constant sur toute la plage de longueur d'onde et la coupure est moins franche. Le graphe suivant présente le facteur de réponse spectral réel de différents semiconducteurs couramment employés.

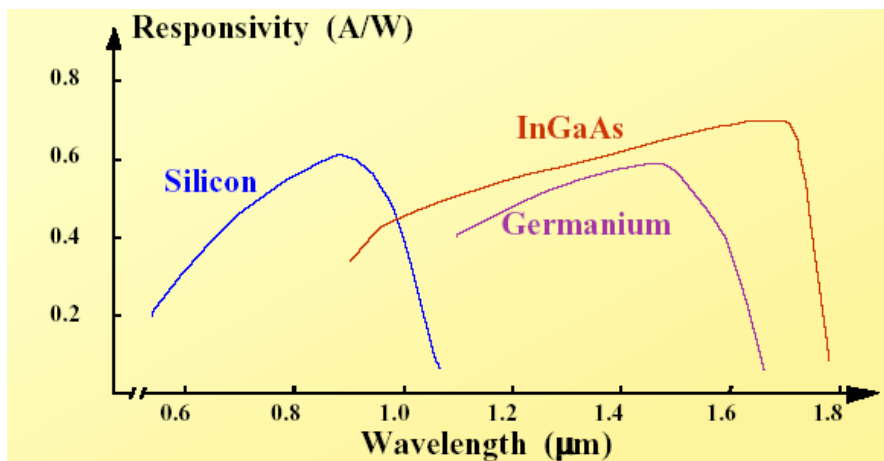


Figure 12 - Réponse spectrale de divers matériaux

Conditionnement d'une photodiode

La surface sensible est déposée sur un "plot" qui sert de cathode et conditionnée dans un boîtier hermétique standardisé (TO-5, TO-8, TO-18, céramique...) Trois connexions sortent du boîtier (Figures 13-14). L'une correspond à la masse (connectée au boîtier), les deux autres à la cathode et à l'anode. L'anode est visible sur le dessus du boîtier: une jonction

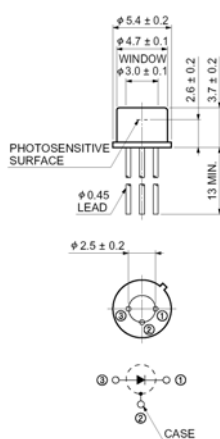


Figure 13- Schéma constructeur du "package" et du câblage

est apparente entre la partie supérieure de la surface sensible et un plot adjacent (Figure 14). La surface sensible est protégée par une fenêtre traitée anti-reflet à la longueur d'onde de travail afin d'éviter les réflexions de Fresnel sur l'interface air-verre qui engendreraient des pertes non négligeables. Dans certaines rares applications où l'on cherche à réduire le plus possible les pertes de détection (en recherche principalement), il peut être utile de retirer cette protection ("décapsulation"). La photodiode devient très fragile et sa durée de vie est réduite. Cette solution est vivement déconseillée pour toutes applications courantes.

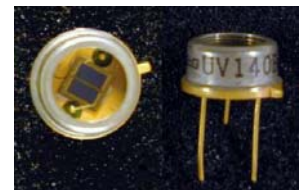


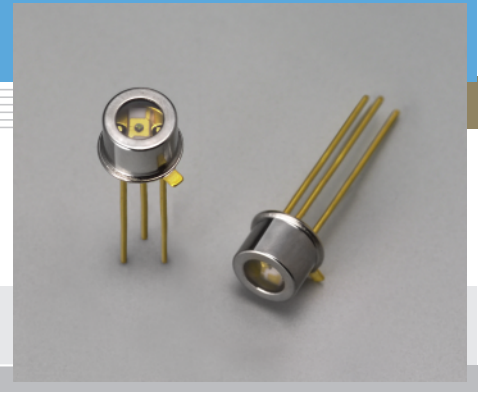
Figure 14- Photodiode à deux quadrants

C-Paramètres de signal d'une photodiode

Cette partie présente les différents modes de fonctionnement et mise en oeuvre pratique d'une photodiode. La notice ("data-sheet") qui sert d'exemple est celle d'une série de photodiodes PIN en InGaAs (domaine proche infrarouge-4 modèles) du fabricant Hamamatsu. Vous n'aurez probablement jamais l'occasion d'utiliser exactement cette série! Cependant, la plupart des documentations commerciales se ressemblent et présentent de manière similaire les mêmes données aux valeurs numériques près. L'objectif est de mettre en évidence les caractéristiques clés, de comprendre leurs évolutions qualitatives selon les différents paramètres physiques intervenant et leurs conséquences pratiques sur les montages de détection. Pour chaque paramètre évoqué, l'information est extraite du data-sheet et présentée.

InGaAs PIN photodiode G8376 series

Standard type



InGaAs PIN photodiodes are NIR (near infrared) detectors that feature high-speed response and low noise. Various active area sizes are provided to meet wide applications.

Features

- Low noise, low dark current
- Low terminal capacitance
- 3-pin TO-18 package

Applications

- NIR (near infrared) photometry
- Optical communication

■ Specifications / Absolute maximum ratings

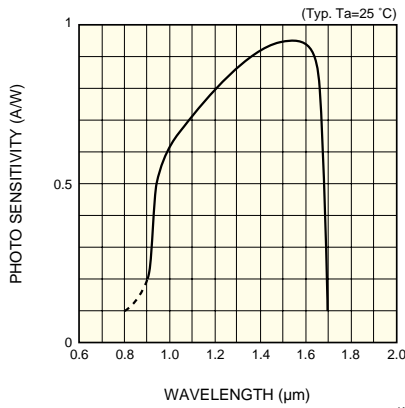
Type No.	Window material	Package	Active area (mm)	Absolute maximum ratings		
				Reverse voltage VR (V)	Operating temperature Topr (°C)	Storage temperature Tstg (°C)
G8376-01	Borosilicate glass with anti-reflective coating (optimized for 1.55 μm peak)	TO-18	φ0.04	20	-40 to +85	-55 to +125
G8376-02			φ0.08			
G8376-03			φ0.3			
G8376-05			φ0.5			

■ Electrical and optical characteristics (Typ. Ta=25 °C, unless otherwise noted)

Type No.	Spectral response range (μm)	Peak sensitivity wavelength λp (μm)	Photo sensitivity S		Dark current ID VR=5 V		Cut-off frequency fc VR=2 V RL=50 Ω -3 dB (MHz)	Terminal capacitance Ct VR=5 V f=1 MHz (pF)	Shunt resistance Rsh VR=10 mV (MΩ)	D* λ=λp (cm·Hz ^{1/2} /W)	NEP λ=λp (W/Hz ^{1/2})
			1.3 μm (A/W)	λ=λp (A/W)	Typ. (nA)	Max. (nA)					
G8376-01	0.9 to 1.7	1.55	0.9	0.95	0.06	0.3	3000	0.5	10000	5 × 10 ¹²	2 × 10 ⁻¹⁵
G8376-02					0.08	0.4	2000	1	8000		2 × 10 ⁻¹⁵
G8376-03					0.3	1.5	400 *	5	1000		4 × 10 ⁻¹⁵
G8376-05					0.5	2.5	200 *	12	300		8 × 10 ⁻¹⁵

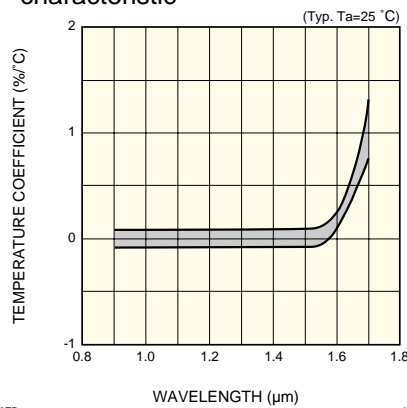
* VR=5 V

Spectral response



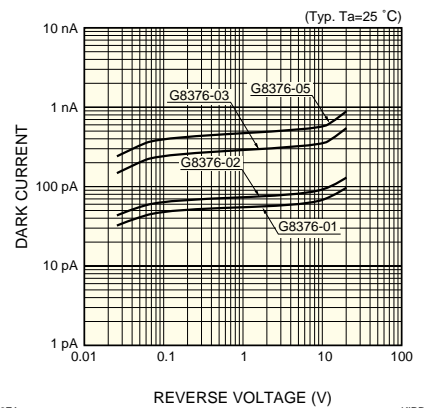
KIRDB0002EB

Photo sensitivity temperature characteristic



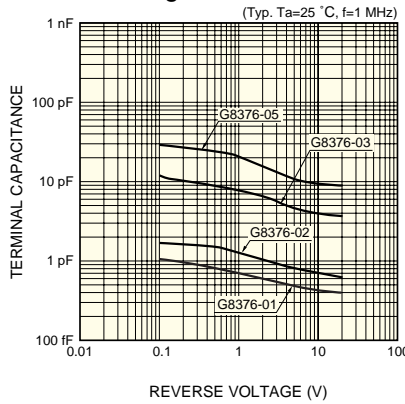
KIRDB0042EA

Dark current vs. reverse voltage



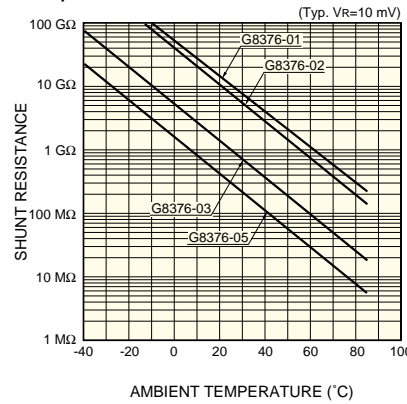
KIRDB0249EA

Terminal capacitance vs. reverse voltage



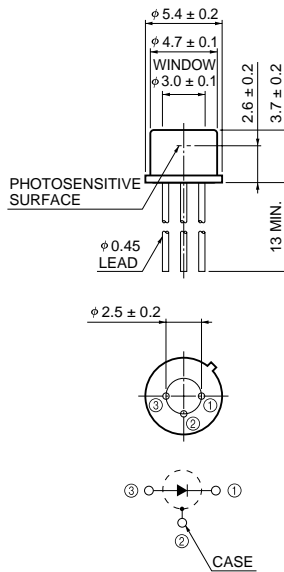
KIRDB0250EA

Shunt resistance vs. ambient temperature



KIRDB0251EA

Dimensional outline (unit: mm)



KIRDA0150EB

HAMAMATSU

Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. ©2002 Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division

1126-1 Ichino-cho, Hamamatsu City, 435-8558 Japan, Telephone: (81) 053-434-3311, Fax: (81) 053-434-5184, <http://www.hamamatsu.com>

U.S.A.: Hamamatsu Corporation, 360 Foothill Road, P.O.Box 6910, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-231-0960, Fax: (1) 908-231-1218

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49) 08152-3750, Fax: (49) 08152-2658

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 8, Rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: 33-(1) 69 53 71 00, Fax: 33-(1) 69 53 71 10

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, United Kingdom, Telephone: (44) 1707-294888, Fax: (44) 1707-325777

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Smidsvågen 12, SE-171 41 Solna, Sweden, Telephone: (46) 8-509-031-00, Fax: (46) 8-509-031-01

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L.: Strada della Moia, 1/E, 20020 Arese, (Milano), Italy, Telephone: (39) 02-935-81-733, Fax: (39) 02-935-81-741

Cat. No. KIRD1051E03
Feb. 2002 DN

1- Le dipôle "Photodiode": un réseau de caractéristiques

Un dipôle électrique (résistance, diode,...) se caractérise par une courbe donnant l'intensité I qui le traverse en fonction de la tension V à ses bornes. La particularité d'une photodiode est que sa caractéristique courant/tension dépend du flux lumineux qu'elle reçoit (Figure 15). Notez les conventions de signe choisies.

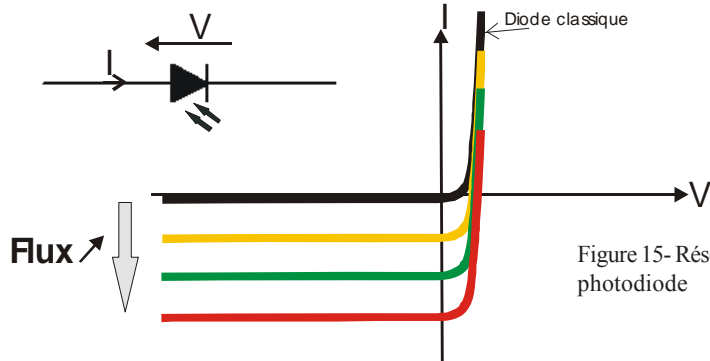


Figure 15- Réseau de caractéristiques d'une photodiode

En l'absence d'éclairement, la caractéristique est celle d'une diode à jonction classique (tracé noir). Lorsque le flux augmente, la caractéristique conserve la même forme mais se translate verticalement, vers les intensités négatives. Le flux incident est donc à l'origine d'un courant inverse (négatif-cf figure 10) prenant des valeurs d'autant plus grandes que le flux augmente et qui s'ajoute au courant d'une diode classique. Il est ainsi possible dans un premier temps de modéliser la photodiode à partir d'une diode classique en ajoutant en parallèle une source de courant. Cette dernière produit un courant I_{ph} augmentant linéairement avec le flux ϕ et qui a pour effet de traduire verticalement la caractéristique: c'est le photocourant noté I_{ph} et vérifiant $I_{ph} = R\phi$ où R est la sensibilité de la photodiode en A/W (cf partie précédente). On a donc: $I = I_d - I_{ph}$ où I_d est le courant d'une diode classique.

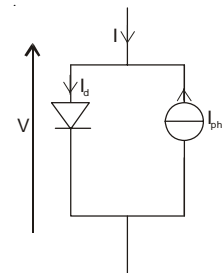
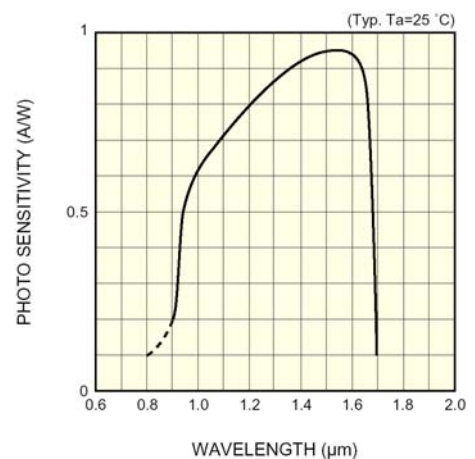


Figure 16-Schéma équivalent

La sensibilité R est évoquée à plusieurs reprises dans la notice. La colonne "Spectral response range" donne la plage de longueur d'onde où la photodiode peut détecter un flux incident. Mais attention! La sensibilité n'est pas homogène sur toute cette plage. La colonne "Photosensitivity" en donne deux valeurs à des longueurs d'onde spécifiques dont, en particulier, celle qui correspond à la valeur maximale (obtenue à λ_p : "Peak sensitivity wavelength"). Le graphe "Spectral response" est plus général et donne la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde.

■ Spectral response

Type No.	Spectral response range (μm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (μm)	Photo sensitivity S	
			1.3 μm (A/W)	$\lambda = \lambda_p$ (A/W)
G8376-01	0.9 to 1.7	1.55	0.9	0.95
G8376-02				
G8376-03				
G8376-05				



KIRC

2-Courant d'obscurité

En l'absence de lumière, la caractéristique est celle d'une diode à jonction classique. Cela signifie donc que même sans flux incident il existe un courant inverse I_o . Ce courant est appelé "courant d'obscurité".

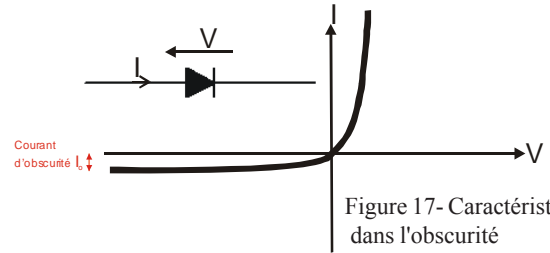
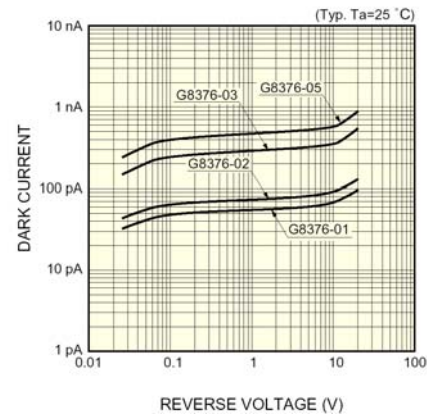


Figure 17- Caractéristique dans l'obscurité

Ce courant est d'autant plus grand que la tension inverse ("Reverse Voltage") appliquée est élevée. Il s'annule pour une tension nulle. Le graphe "Dark current vs. reverse voltage" donne la valeur de ce courant en fonction de la tension inverse. Les deux valeurs (typique et maxi) données dans la colonne "Dark current" correspondent donc à une valeur du courant d'obscurité pour une tension de polarisation donnée ($V_R = 5V$ dans cette notice).

■ Dark current vs. reverse voltage

Dark current I_D $V_R = 5V$	
Typ. (nA)	Max. (nA)
0.06	0.3
0.08	0.4
0.3	1.5
0.5	2.5



Il est également très important de noter que le constructeur a pris soin d'indiquer que les caractéristiques données en colonne ou dans certains graphes (le précédent par exemple) correspondent à une température typique de 25°C. La plupart des paramètres sont en effet très sensibles à la température. Le courant d'obscurité peut doubler tous les 10°C.

3-Deux modes de fonctionnement

D'après les conventions choisies pour l'orientation de I et V (convention récepteur), si le produit $I \cdot V$ est positif, le dipôle reçoit de l'énergie et fonctionne donc en récepteur. Si le produit est négatif alors le dipôle fournit de l'énergie: il se comporte comme un générateur.

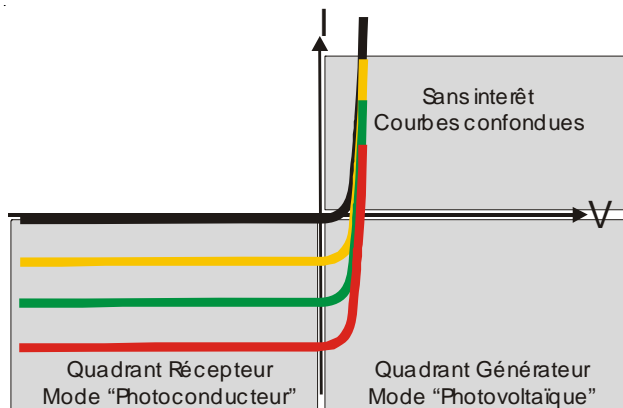


Figure 18- Les différents quadrants de fonctionnement d'une photodiode. Le quadrant "récepteur" est le domaine des opticiens.

Le quadrant générateur est appelé domaine photovoltaïque. Ce mode de fonctionnement est exploité pour réaliser des "photopiles" aux applications diverses. La plus connue est bien sûr l'installation de panneaux solaires sur une maison pour fournir une partie de l'énergie domestique. Les satellites sont également équipés de grands bras télescopiques recouverts de cellules photovoltaïques afin de leur assurer leur autonomie énergétique. Une autre application concerne la protection des structures en métal contre la corrosion. Une petite tension appliquée sur une structure en métal l'empêche de s'oxyder ou de se rouiller. Des photopiles permettent de fournir cette tension et de protéger ainsi dans des lieux éloignés lignes ferroviaires, réservoirs ou canalisations... Un travail important est mené pour améliorer le rendement des photopiles et en faire peut être demain une source d'énergie renouvelable largement employée.

Le mode photoconducteur est celui des "opticiens". Dans ce quadrant, les caractéristiques sont très bien séparées les unes des autres et permettent des mesures quantitatives de flux. Ce mode de fonctionnement est étudié dans la suite du cours.

4-Détection de très faibles flux

L'utilisation d'une photodiode dans le mode photoconducteur nécessite d'appliquer une tension inverse ("polarisation"). Comme nous l'avons vu précédemment, une telle polarisation se traduit par un courant d'obscurité qui augmente avec elle. Ce courant est bien sûr néfaste à la mesure précise d'un très faible flux puisqu'il s'ajoute au photocourant. De plus, il fluctue beaucoup avec la température et il est donc très difficile à contrôler. La solution est alors d'utiliser la photodiode en court-circuit: la tension à ses bornes est toujours nulle et il n'y a donc pas de courant d'obscurité. Ce fonctionnement est à la limite du mode photovoltaïque et du mode photoconducteur. Même pour des valeurs très faibles du flux incident, le courant lui est proportionnel. La figure 19 permet de visualiser les différents points de fonctionnement en fonction du flux.

Comment exploiter ce courant de court-circuit? Un simple montage convertisseur Courant-Tension à AO (figure 20) permet de visualiser une tension image de ce courant. La photodiode est bien en court-circuit car l'entrée - de l'AO est une masse virtuelle.

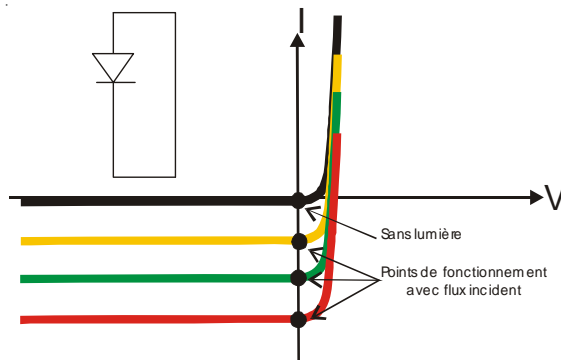


Figure 19- Fonctionnement en court-circuit pour les très faibles flux. V est toujours nul.

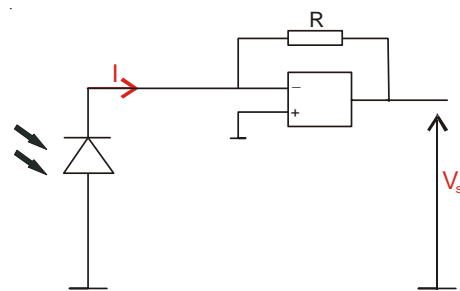
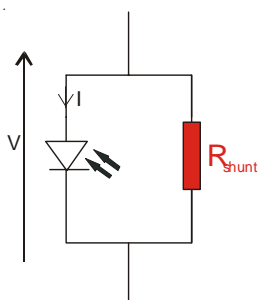


Figure 20- Convertisseur courant-tension. La photodiode est en court-circuit.

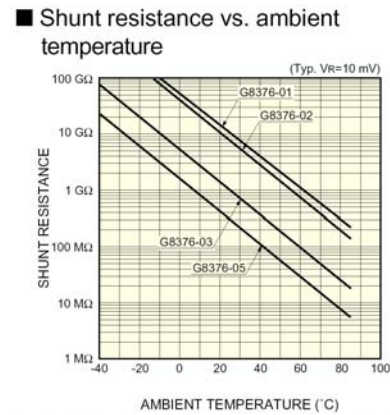


Pour aller plus avant dans la description de ce mode, il faut ajouter au schéma équivalent d'une photodiode une résistance parallèle de court-circuit dite "Shunt Résistance Rsh" généralement de grande valeur et qui dépend de la fabrication de la diode. Cette résistance serait infinie pour une photodiode idéale. Plus cette résistance est grande, plus la photodiode sera sensible aux faibles signaux. C'est donc le paramètre important lors du choix d'une photodiode pour travailler dans ce régime.

Figure 21- Une photodiode présente en parallèle une résistance de grande valeur dite shunt resistance

Cette résistance dépend très fortement de la température. Le data-sheet donne donc en colonne cette résistance pour une température typique de 25°C et présente ensuite un graphe donnant sa dépendance avec la température. Il n'est pas utile de connaître la résistance pour diverses tensions de polarisations car c'est un paramètre important uniquement dans ce mode de fonctionnement (court-circuit).

Shunt resistance Rsh VR=10 mV
(MΩ)
10000
8000
1000
300



Pourquoi une résistance élevée est-elle le meilleur choix? Esquissons une explication, les paramètres de bruit étant traités plus longuement dans la partie suivante. Le courant d'obscurité est nul et ne génère donc pas de bruit. De plus, le flux étant faible, le bruit qu'il induit l'est également. Dans ce régime de faible flux, le bruit de détection est donc principalement dû au bruit thermique dans la résistance de court-circuit. Ce bruit étant inversement proportionnel à la résistance, plus la résistance est grande moins le bruit est important.

Pour des flux plus importants, le fonctionnement en court-circuit n'est pas adapté. La saturation de la photodiode se produit rapidement et le courant n'est donc plus linéaire avec le flux. De plus, ce montage est lent. Cette dernière caractéristique sera expliquée par la suite.

5-L'utilisation en mode photoconducteur

Comportement statique

L'utilisation d'une photodiode dans le mode photoconducteur nécessite d'appliquer une polarisation, une tension inverse. Un montage typique est de placer en série de la photodiode polarisée une résistance (dite résistance de charge) qui convertit le courant en tension.

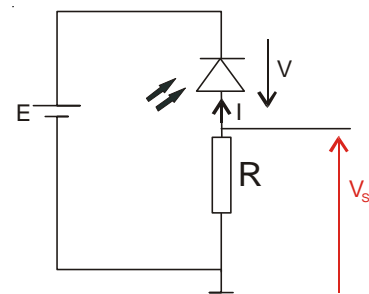


Figure 22- Montage typique avec polarisation et résistance de charge.

La tension $V_s (= -RI)$ est directement proportionnelle au photocourant généré par la photodiode. Pour trouver les points de fonctionnement (I, V) du montage, il faut superposer au réseau de caractéristique de la photodiode la "droite de charge". Cette dernière est obtenue en écrivant la loi des mailles:

$$E = V_s - V = -RI - V \Rightarrow I = -\frac{V + E}{R}$$

Les points de fonctionnement sont donnés par les intersections de la droite de charge avec les caractéristiques de la photodiode. On constate sur le schéma suivant (Figure 23) que, tant que le flux n'est pas trop grand, les points de fonctionnement sont bien distincts pour des flux différents. Le courant varie linéairement avec le flux: une mesure quantitative est donc possible. Par contre, pour des flux plus importants,

les points de fonctionnement se rapprochent jusqu'à se confondre. Ce phénomène est appelé "saturation". Le courant n'est plus linéaire avec le flux et tend vers une valeur limite. Une mesure dans ce régime conduirait à des valeurs totalement erronées.

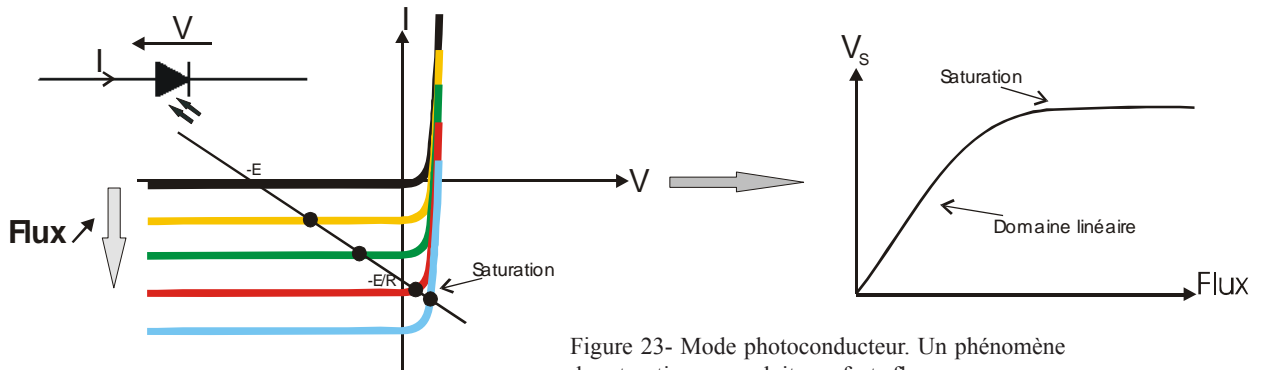


Figure 23- Mode photoconducteur. Un phénomène de saturation se produit aux forts flux

Les deux paramètres libres que sont la résistance de charge et la tension de polarisation ont des effets très importants sur ce comportement et ne doivent donc pas être choisis au hasard.

~~ Augmenter la **résistance** peut être intéressant puisque pour un photocourant donné la tension de sortie sera d'autant plus grande que la résistance de charge sera grande (cela revient à augmenter le gain). Un flux faible sera ainsi plus facile à détecter. Cependant, augmenter R accélère le phénomène de saturation: la plage où le courant est linéaire avec le flux est réduite. Le schéma ci-contre illustre l'influence de la valeur de la résistance sur la saturation. R impose la pente de la droite de charge: plus R est grand, plus la pente est petite. Les points de fonctionnement se confondent ainsi d'autant plus vite que R est grand.

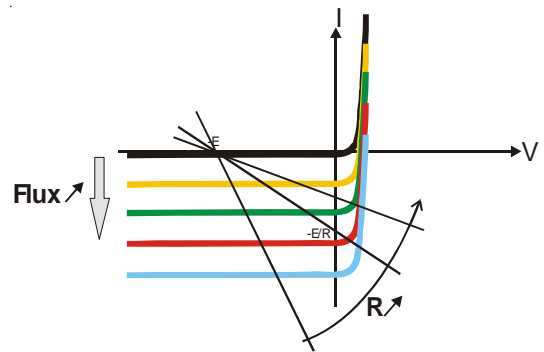


Figure 24- Augmenter R accélère la saturation.

~~ De la même manière, la **tension de polarisation** de la photodiode influe sur le phénomène de saturation. Plus la polarisation est grande, plus la saturation est retardée. Le schéma ci-dessous illustre cette dépendance. Les droites de charge sont parallèles (même valeur de R, donc même pente) mais l'abscisse à l'origine est différente. Attention! La tension de polarisation ne peut pas être indéfiniment augmentée. Le data-sheet précise la valeur maximale à appliquer (20V dans l'exemple choisi)

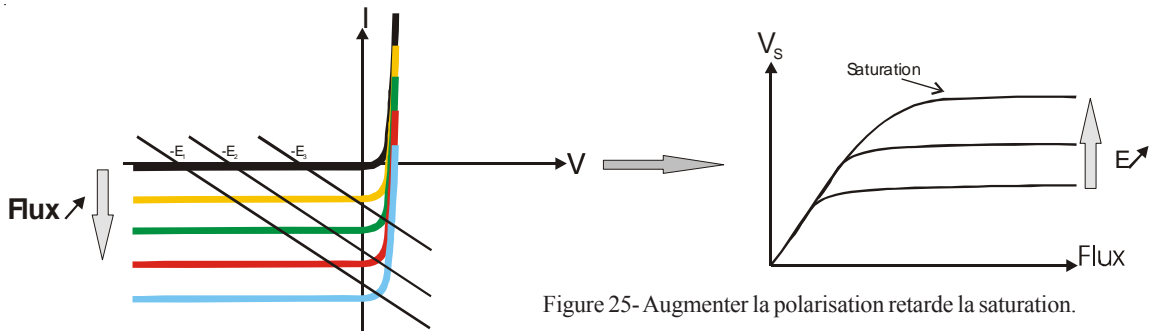


Figure 25- Augmenter la polarisation retarde la saturation.

L'étude de la photodiode a porté jusqu'à présent sur son comportement statique, c'est-à-dire à flux constant. Comment réagit-elle à une modulation de la lumière?

6-Comportement dynamique: bande passante

L'information à détecter peut être portée par une modulation de la lumière. Les réseaux Télécom reposent par exemple sur des modulations très rapides (plusieurs GHz). Quels paramètres influent sur le temps de réponse (ou bande passante si l'on se place dans le domaine fréquentiel) d'une photodiode?

Pour répondre à cette question, il faut ajouter au schéma équivalent d'une photodiode une capacité parasite C_t entre ses bornes. Le schéma équivalent avec une résistance de charge est alors le suivant:

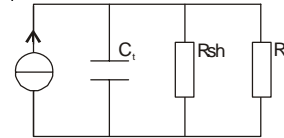


Figure 26- Schéma équivalent avec résistance de charge, résistance parallèle et capacité parasite

La résistance de court-circuit, généralement très grande devant la résistance de charge, peut être négligée. Le circuit est donc équivalent à un filtre passe-bas du premier ordre de fréquence de coupure:

$$F_c = \frac{2\pi}{RC_t}$$

Pour une photodiode donnée, la résistance de charge impose la bande passante. Les constructeurs indiquent généralement les valeurs de bande passante pour une résistance de charge de 50Ω. Une grande résistance (grand gain) va à l'encontre de la rapidité de la photodiode.

Deux paramètres interviennent sur la valeur de la capacité parasite.

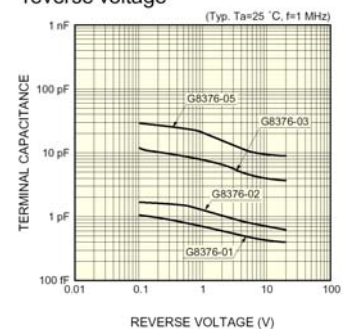
~~ **La dimension de la surface active:** plus la surface est petite, plus la capacité est petite et donc la photodiode rapide. Une grande surface active est donc contradictoire avec une grande bande passante. Le data-sheet donne la valeur de la capacité ("Terminal Capacitance") et la valeur de la fréquence de coupure ("Cut-off frequency"). Vous pouvez constater la dépendance avec la taille de la surface active.

Active area (mm)
φ0.04
φ0.08
φ0.3
φ0.5

Cut-off frequency f_c $V_R=2\text{ V}$ $R_L=50\ \Omega$ -3 dB (MHz)	Terminal capacitance C_t $V_R=5\text{ V}$ $f=1\text{ MHz}$ (pF)
3000	0.5
2000	1
400 *	5
200 *	12

~~ **La tension de polarisation:** augmenter la tension de polarisation a pour effet de diminuer la capacité parasite. Cette dernière est donc maximale en absence de polarisation. C'est pour cela qu'il a été dit plus haut que le montage de la photodiode en court circuit a pour défaut d'être lent. Le graphe "Terminal capacitance vs. reverse voltage" donne la capacité parasite en fonction de la polarisation appliquée à la photodiode.

■ Terminal capacitance vs. reverse voltage



Malheureusement, la bande passante du montage de détection n'est pas uniquement limitée par cette capacité parasite. D'autres capacités parasites s'ajoutent (en parallèle): BNC, câblages divers, pattes de dipôles... S'il est relativement simple de réaliser des montages permettant de travailler à quelques centaines de MHz, le domaine du GHz est beaucoup plus difficile à atteindre (et il n'est pas question d'utiliser des AO dont la bande passante est généralement faible si le gain est important). A ces fréquences, les circuits doivent être extrêmement compacts: par exemple, deux pattes de résistance forment une capacité parasite qui peut empêcher d'atteindre le GHz. Il est donc nécessaire d'employer d'autres techniques de câblages: câblage compact, résistance CMS (pas de pattes), pattes de la photodiode raccourcies le plus possible,.... Malgré toutes ces précautions, il est difficile d'atteindre expérimentalement le GHz. Ces difficultés sont bien sûr liées à la manière de réaliser le câblage. Les techniques "à la main" dont on dispose au quotidien conduisent à ces limitations. Des techniques plus modernes de micro-électronique permettent de travailler à plusieurs GHz.

D-Bruits de photodétection

1-Qu'est ce que le bruit?

Envoyons sur un détecteur un faisceau lumineux dont la valeur moyenne reste constante au cours du temps. La tension image mesurée par exemple aux bornes d'une résistance est visualisée à l'oscilloscope. C'est une droite horizontale. Cependant, une observation plus attentive révèle de légères fluctuations autour de cette valeur moyenne: en augmentant le calibre de l'oscilloscope, ces fluctuations deviennent très visibles.

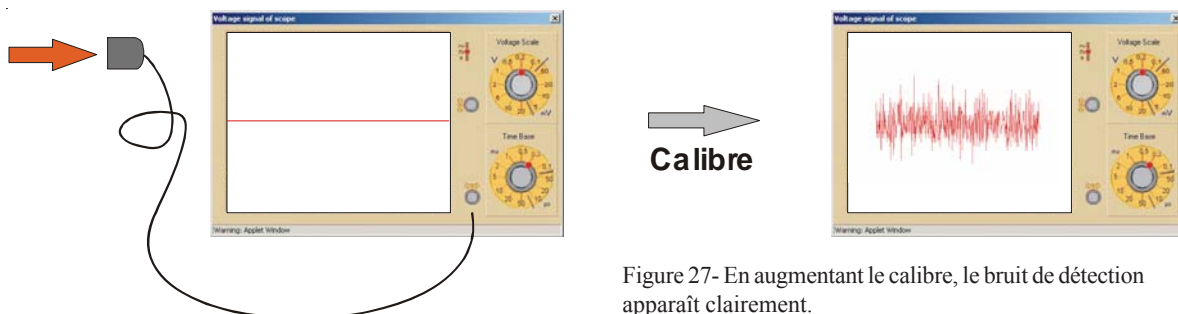


Figure 27- En augmentant le calibre, le bruit de détection apparaît clairement.

Le bruit peut ainsi se définir comme une fluctuation imprévisible se superposant au signal utile. L'information à extraire sera d'autant plus difficile à déchiffrer que ces variations aléatoires ne seront pas négligeables devant le signal utile. Sans outil de traitement, ce bruit rend impossible la détection d'un signal plus petit que les fluctuations. L'image que l'on peut en donner est celle d'une conversation dans un environnement bruyant. Le message peut ne plus être compris si le bruit ambiant l'emporte.

2-Comment caractériser le bruit?

La valeur moyenne du bruit n'est pas un bon critère pour le caractériser: le bruit étant une fluctuation aléatoire, sa valeur moyenne est nulle. Il faut donc trouver un autre critère. Reprenons l'exemple précédent: un flux constant sur un détecteur. Du fait du bruit sur la tension, la mesure de cette dernière à deux instants distincts donne deux valeurs légèrement différentes. Un critère pertinent serait donc une grandeur qui permettrait d'estimer l'amplitude de l'erreur commise lors de la mesure d'un signal. On donnerait alors le résultat sous la forme d'une valeur moyenne plus ou moins une certaine erreur. Cette grandeur est appelée Ecart-Type. Mathématiquement, l'écart-type d'un bruit est la racine carrée de sa variance, c'est-à-dire de la moyenne de son carré. En traitement du signal, cette grandeur sera souvent dénommée "valeur efficace de bruit". La variance d'une tension de bruit (ou "puissance de bruit") s'écrit: $\sigma_v^2 = \langle V^2 \rangle$

Le graphe ci-dessous est la simulation informatique du bruit de détection d'un faisceau laser. La distribution de bruit est gaussienne: la probabilité de trouver une valeur proche de la valeur moyenne est plus grande que de trouver une valeur très éloignée et la décroissance de cette probabilité est gaussienne. L'écart type correspond à la largeur à mi-hauteur de cette gaussienne. Pour une telle distribution, la probabilité lors d'une mesure de se trouver à plus de 3 écarts-types de la valeur moyenne est inférieure à 3/1000. L'écart-type est donc bien un critère pertinent pour quantifier l'erreur commise.

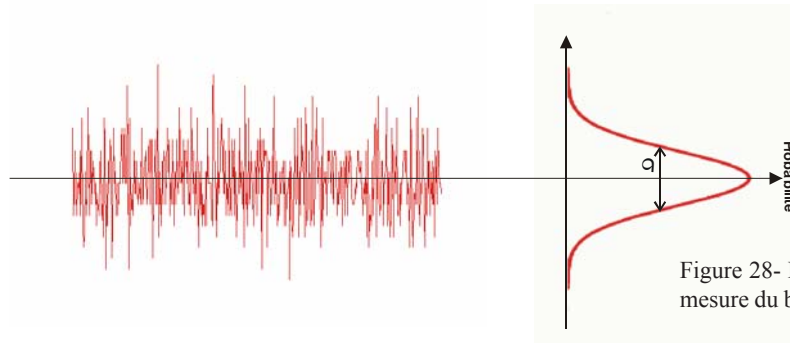


Figure 28- Bruit gaussien. L'écart-type fournit une mesure du bruit appelée valeur efficace du bruit.

Quel est l'effet d'un filtre passe-bas sur le signal précédent? Un filtre passe-bas a pour effet de couper les hautes fréquences. Une partie du bruit est ainsi éliminé et l'écart-type est alors plus faible: l'erreur commise lors d'une mesure sera moins importante. Les bruits de détection sont généralement des bruits "blancs": chaque fréquence apporte une contribution équivalente (ce qui justifie l'appellation "blanc" par analogie avec la lumière blanche). Le spectre d'un bruit blanc est "plat". Selon la bande passante de l'électronique placée à la suite du détecteur, le bruit mesuré ne sera donc pas le même. Cette notion est fondamentale: **parler de bruit de détecteur sans parler de bande passante d'analyse n'a pas de sens**. C'est pour cela que dans les documentations techniques le bruit d'un détecteur est donné non pas par un écart-type mais par sa "densité spectrale" ou encore plus généralement par la racine carrée de sa densité spectrale. Cette dernière s'exprime en unité toujours surprenante au premier abord: le $V/\sqrt{\text{Hz}}$ ou $A/\sqrt{\text{Hz}}$. La valeur efficace de bruit peut s'en déduire en multipliant ce paramètre par la racine carrée de la bande passante (à un facteur multiplicatif près selon l'ordre du filtre). Pour un même détecteur, une bande passante d'analyse 100 fois plus grande se traduit par un écart-type 10 fois plus grand.

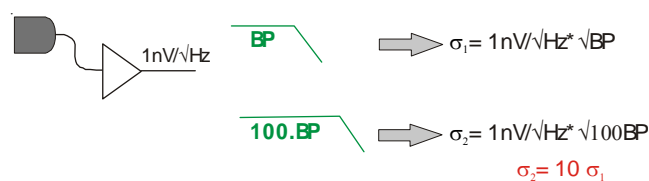


Figure 29- "Parler de bruit sans parler de bande passante d'analyse n'a pas de sens."

3-Les différentes sources de bruit

Trois sources de bruit peuvent être principalement distinguées.

~~ **Bruit de scintillation** (ou Flicker noise): Ce bruit est lié aux fluctuations lentes des porteurs de charges dans une photodiode. Ce bruit d'origine technologique se manifeste principalement aux basses fréquences et décroît rapidement (pas du tout un bruit blanc!!). C'est pour cela qu'il est souvent appelé bruit en $1/f$. Ce bruit ne sera pas pris en compte dans la suite de l'exposé car il est souvent négligeable au-delà de quelques kHz.

~~ **Bruit thermique** (ou Johnson): L'agitation thermique des porteurs de charge dans une résistance R génère un courant de bruit de densité spectrale uniforme (bruit blanc)

$S_i = \frac{4kT}{R}$ (A²/Hz) où k est la constante de Boltzmann et T la température d'utilisation (en Kelvins). Dans un circuit de bande passante Δf, l'écart-type du courant de bruit résultant s'écrit

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}}$$

A 300K, une résistance de 1MΩ dans un circuit d'1MHz de bande passante engendre une tension de bruit d'écart-type égal à 130μV. La résistance de charge ainsi que la résistance de shunt seront donc sources de bruit thermique. Dans le visible ou le proche infrarouge, le bruit thermique l'emporte sur les autres sources

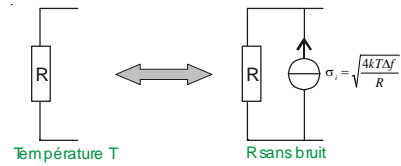


Figure 30- Une résistance à la température T est équivalente à une résistance sans bruit à laquelle on ajoute une source de courant de valeur efficace σ.

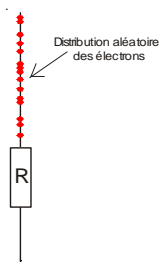


Figure 31- Distribution aléatoire des électrons

~~ **Bruit de grenaille** (ou Shot noise): Ce bruit a pour origine le caractère discret des porteurs de charges dans un circuit. Une image simple en terme de corpuscules permet de comprendre l'origine de ces fluctuations. On peut se représenter le courant formé non d'électrons régulièrement répartis mais plutôt d'électrons aléatoirement répartis, se propageant de manière indépendante. Les variations aléatoires de courant que l'on observe sont donc dues à la dispersion temporelle des électrons. Le bruit de grenaille est le bruit que ferait un jet de grain de sable frappant aléatoirement une paroi. Tout courant électrique de valeur moyenne I s'accompagne ainsi de fluctuations

dont la densité spectrale est uniforme (bruit blanc) et s'écrit $S_i = 2eI$. Tous les courants mis en jeu dans un système de détection seront sources de bruit: courant d'obscurité, courant de signal (celui que l'on veut détecter) ou courant de fond (sujet de la dernière partie pour les détecteurs IR lointains et que l'on ne prend pas en compte ici).

4-De la NEP à la détectivité spécifique

Imaginons que nous ayons construit une électronique de détection et que nous souhaitions comparer deux photodiodes entre elles afin de déterminer laquelle permet de détecter au mieux des signaux faibles. On recherche donc la photodiode qui présente le moins de bruit propre, indépendamment du circuit électronique ou du flux incident. Que sont ces bruits de fond engendrés par le détecteur? On peut citer principalement le bruit thermique dans la résistance de shunt et le bruit de grenaille du courant d'obscurité. D'autres bruits plus faibles liés à la technologie du détecteur s'y ajoutent. En l'absence de flux incident, la photodiode est donc à l'origine d'un courant de bruit qui lui est propre et de densité spectrale S_b (en A²/Hz).

Cette grandeur est peu parlante. Imaginons maintenant qu'un flux faible soit envoyé sur la photodiode. Quel est le flux minimal détectable, c'est-à-dire quel flux engendre un courant de signal qui serait du même ordre de grandeur que les fluctuations engendrées en propre par la photodiode? Ce flux minimal est appelé NEP: "Noise Equivalent Power" (ou FEB pour flux équivalent au bruit). Il est défini comme étant le flux donnant un signal juste égal à la valeur efficace de bruit (égal au produit de la racine de S_b par la racine de la bande passante). Il dépend de la longueur d'onde puisque la sensibilité de la photodiode en dépend.

Le courant du signal ainsi défini s'écrit:

$$I = R(\lambda) * NEP(\lambda) \text{ où } R(\lambda) \text{ est la sensibilité en A/W.}$$

La NEP (en W) sera donc définie par:

$$I(\lambda) = \sqrt{S_b} \sqrt{\Delta f} \Rightarrow NEP(\lambda) = \frac{\sqrt{S_b} \sqrt{\Delta f}}{R(\lambda)}$$

Cette grandeur dépend de la bande passante du montage. Pour obtenir une caractéristique propre à la photodiode et donc indépendante du circuit électronique que vous choisirez, les constructeurs fournissent généralement une NEP ramenée à l'unité de racine de bande passante (comme pour les bruits). Elle s'exprime donc en W/√Hz et s'écrit:

$$\frac{\sqrt{S_b}}{R(\lambda)}$$

Le data-sheet donné en exemple fournit la NEP pour la longueur d'onde "pic". Il faut noter que cette caractéristique est estimée à une température typique de 25°C. Les fluctuations étant principalement dues au bruit thermique, cette information est bien sûr capitale. Prenons un exemple. Si la photodiode n°1 est associée à un circuit de bande passante 1MHz, le flux équivalent au bruit propre de la photodiode s'écrit: $2 * 10^{-15} * \sqrt{10^6} \approx 2 pW$. Cette valeur est très faible.

NEP λ=λp
(W/Hz ^{1/2})
2 × 10 ⁻¹⁵
2 × 10 ⁻¹⁵
4 × 10 ⁻¹⁵
8 × 10 ⁻¹⁵

Défectivité spécifique D*

Les constructeurs ont introduit une grandeur plus commerciale pour caractériser leurs détecteurs. La déflectivité est définie comme l'inverse de la NEP: ce paramètre est donc d'autant plus grand que la NEP est petite. Cependant, la déflectivité dépend généralement de la racine carrée de la surface du détecteur (en particulier pour les détecteurs dans l'IR lointain qui seront traités dans la dernière partie). Par souci de normalisation et de comparaison équitable, une dernière grandeur est généralement utilisée: la déflectivité spécifique D*. Elle s'exprime en cm.√Hz/W (ou Jones). D* est donc la déflectivité pour une surface de 1 cm² dans un circuit de bande passante 1Hz.

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{A} \sqrt{\Delta f}}{NEP(\lambda)}$$

où A est l'aire de la surface en cm² et Δf la bande passante.

La connaissance de la déflectivité spécifique, de la surface de la photodiode et de la bande passante du montage permettent donc de remonter facilement à la NEP:

$$NEP(\lambda) = \frac{\sqrt{A} \sqrt{\Delta f}}{D^*(\lambda)}$$

6-NEP détecteur et NEP système

Les paramètres évoqués dans les paragraphes précédents ont permis de choisir une photodiode indépendamment d'un circuit. Vous pouvez consulter ainsi plusieurs data-sheets et comparer les performances de diverses photodiodes entre elles. Cependant, une fois le détecteur choisi et mis en place, votre système

de détection présente un bruit dans l'obscurité qui n'est pas uniquement celui de la photodiode. Les bruits dans les circuits électroniques associés sont souvent prépondérants. Par exemple, une résistance de charge induit un bruit thermique d'autant plus important que cette résistance est petite. Un amplificateur opérationnel apporte lui aussi une contribution importante. Réaliser un montage complet très bas bruit est un exercice très difficile.

Etant donné que ce sont les performances finales du système qui importent, on introduit une NEP système de manière équivalente à la NEP détecteur. La NEP système est définie comme le flux minimal qui engendre en sortie du système un signal égal à la valeur efficace du bruit dans l'obscurité. La NEP système est nécessairement moins bonne que la NEP détecteur. La NEP système donne la résolution ultime du montage, la plus petite variation de flux que vous serez en mesure de déceler.

Il est facile expérimentalement d'avoir une idée de la NEP du système réalisé. C'est grosso-modo le flux pour lequel vous pouvez commencer à distinguer à l'oscilloscope une différence entre la tension délivrée par le système dans l'obscurité et celle fournie par le système éclairé.

E-Détecteurs IR: une introduction aux systèmes optroniques

Le domaine de l'infrarouge moyen et lointain (3-30 μ m) présente de nombreuses spécificités. En particulier, à ces longueurs d'onde, le signal utile peut souvent se résumer à un contraste de température et le rayonnement thermique ambiant devient la source principale de bruit. Cette partie revient dans un premier temps sur la notion de détectivité appliquée au cas des détecteurs idéaux dits "BLIP". Une dernière notion similaire mais spécifique au domaine IR est introduite: la température équivalente de bruit.

Les systèmes IR ont connu depuis les années 90 un très fort développement et sont sans nul doute appelés dans les années à venir à connaître une diversification et une diffusion toujours plus importantes. La fin de ce cours présente les grandes lignes de la conception d'un système optronique à travers un TD-cours. L'objectif n'est pas de réaliser une étude très détaillée d'un système mais plutôt de comprendre qu'un système fiable repose sur une architecture multidisciplinaire.

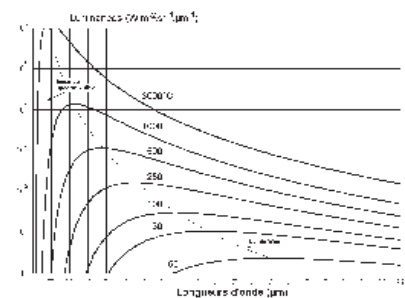


Figure 32- Luminance spectrique d'un corps noir

1-Détecteurs BLIP et Détectivité spécifique

Parmi les sources de bruit présentées dans la partie précédente, l'une d'entre elle n'a pas été prise en compte: le courant de fond. Dans le visible ou le proche infrarouge la contribution de ce courant est très faible à température ambiante. Par contre, dans l'infrarouge compris entre 3 et 30 μ m, l'émission corps noir du fond environnant est très importante et devient la source principale de bruit. A 300K, le rayonnement thermique est centré autour de 10 μ m (Figure 32). Il n'y a pas d'obscurité pour les détecteurs fonctionnant dans cette gamme de longueur d'onde! La monture elle-même est source de parasites (elle est donc généralement refroidie)!

Les détecteurs pour lesquelles la source principale de bruit est le bruit d'environnement sont dénommés BLIP: "Background Limited Infrared Photodetector". Si l'on note I_F le courant de fond, la densité spectrale de bruit s'écrit:

$$S = 2eI_F$$

La NEP prend alors la forme suivante:

$$NEP(\lambda) = \frac{\sqrt{2eI_F} \sqrt{\Delta f}}{R(\lambda)}$$

Comment calculer le courant I_F ? Ce calcul se mène en deux étapes (cf cours de photométrie):

~ Si l'on note E_p l'éclairement photonique (nombre de photons par élément de surface) du détecteur du à l'environnement et prenant en compte tous les photons jusqu'à la longueur d'onde de coupure du détecteur, le courant s'écrit:

$$I_F = \eta e E_p A$$

où A est la surface du détecteur et η le rendement quantique.

~ Pour un système observant une scène de luminance photonique L_p sous un cône de demi-angle au sommet α , l'éclairement photonique est donné par:

$$E_p = \pi L_p \sin(\alpha)^2$$

La détectivité, inverse de la NEP, peut donc finalement s'écrire sous la forme:

$$D(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} \frac{1}{\sin(\alpha)} \left(\frac{\eta}{2\pi L_p} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{A} \sqrt{\Delta f}}$$

La dépendance de la détectivité avec la racine carrée de la surface sensible apparait désormais explicitement. Ceci justifie la notion de détectivité spécifique D^* introduite rapidement dans la partie précédente. Le détecteur BLIP est un cas idéal de détecteur puisque le bruit d'environnement est le bruit minimal auquel tout détecteur est nécessairement soumis, de manière plus ou moins importante selon la longueur d'onde de travail (que l'on néglige dans le visible ou dans l'IR proche). La détectivité spécifique BLIP donne donc une valeur maximale de la détectivité spécifique que peut atteindre un détecteur. Toute détectivité sera nécessairement inférieure à la valeur BLIP. La figure ci-contre donne D^* pour différents matériaux usuels. En pointillé figure le cas idéal BLIP calculé à la longueur d'onde pic. Deux informations indispensables sont précisées sur ce graphe: "2π steradians field of view-295K background temperature". L'ouverture du cône de réception et la température de fond sont bien sûr deux paramètres clés. Un cône plus petit permet d'augmenter la détectivité (diminuer le bruit) puisque la surface sensible voit alors moins de fond (ce paramètre sera un paramètre de conception très important). Quant à la température, elle fixe la valeur de la luminance photonique. Il est intéressant de noter que les détecteurs pyroélectriques, les thermopiles ou les bolomètres ont une détectivité spécifique généralement beaucoup plus faible que les photodiodes usuelles.

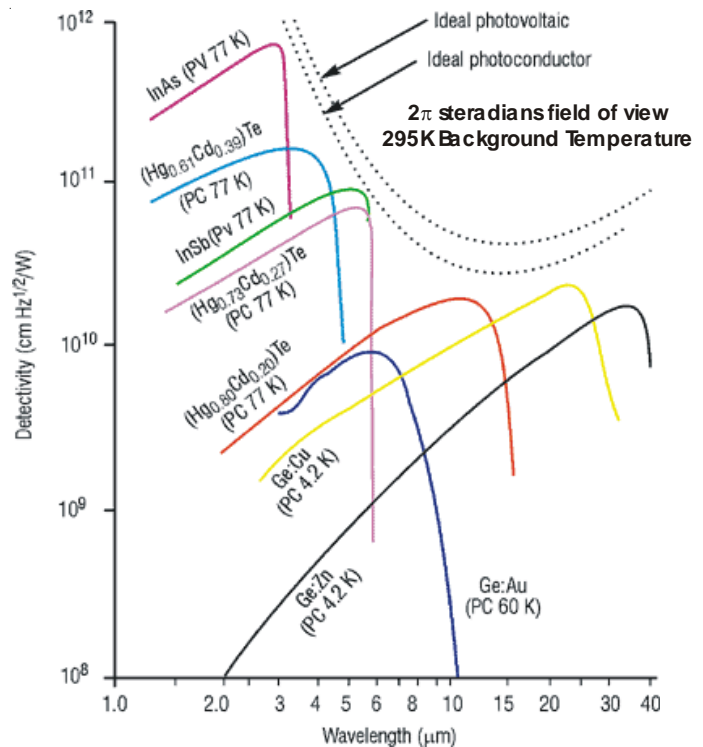


Figure 33- Détectivité spectrale spécifique de détecteurs IR. Les indications "field of view" et "background temperature" sont indispensables.

2-Signal IR et Température équivalente de bruit

Un système IR a souvent pour fonction de détecter sur un fond à température uniforme (la mer par exemple) la présence d'un objet ou de détecter des variations de température d'un objet lui-même (contrôle de process industriel, imagerie thermique...). Le signal utile peut se résumer à un contraste ou à une variation de température. Cette notion est fondamentale pour comprendre le fonctionnement des systèmes IR: à ces longueurs d'onde, une différence de flux est équivalente à une différence de température.

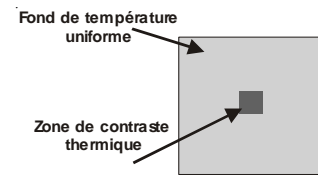


Figure 34- Le signal utile résulte d'un contraste thermique

Il est donc intéressant de pouvoir quantifier la plus petite différence de température que le système est capable de détecter. Cette grandeur est appelée Température Equivalente de Bruit (ou NETD pour "Noise Equivalent Temperature Difference"). La NEP système quantifie le plus petit FLUX détectable. A partir de la NEP, on peut remonter à la NETD à partir des caractéristiques de réception et de la pente de la luminance. Un exemple de calcul est poussé plus avant dans le TD.

3-La conception d'un système optronique IR:TD-cours

L'exemple choisi est la réalisation d'un équipement infrarouge pour la détection de naufragé en mer à partir d'un hélicoptère. Comment se conçoit un projet, de cette idée succincte jusqu'aux premiers essais grandeur nature? Même si chaque projet a bien sûr ses spécificités, le cheminement est quant à lui semblable. Après avoir défini (ou que le client ait fourni) un cahier des charges aussi précis que possible, une architecture est proposée. Il faut ensuite modéliser les performances potentielles avant de procéder aux premiers essais. Ce TD reprend ces principales étapes (à l'exception de la dernière!) et investit quelques notions importantes étudiées tout au long de ce polycopié et du cours de photométrie. La conférence de Laurent Mazuray (Systèmes Optroniques Spatiaux - Astrium - Toulouse) viendra compléter ce TD en détaillant la démarche industrielle de conception d'un système et la coordination des différents partenaires mis en jeu.

Cahier des Charges

Il sert à définir les missions et les contraintes du système. Il est important qu'il soit le plus détaillé et le plus précis possible. Dans le cas de notre projet, de nombreuses questions sont à se poser: la détection se fait elle de jour ou de nuit, questions sur l'hélicoptère, etc...?

Détailler les différentes informations nécessaires à la réalisation d'un cahier des charges précis dans le cadre de ce projet.

Architecture et Bloc-Diagramme

Une fois le cahier des charges proprement défini, une ou plusieurs architectures peuvent être proposées. Cette étape permet de choisir un principe de fonctionnement susceptible de répondre au cahier des charges (système actif ou passif, bande spectrale de détection,...) et d'en faire ressortir les caractéristiques essentielles. En particulier, l'accent sera mis sur les sous-systèmes et les paramètres extérieurs influant leur fonctionnement. Un bloc-diagramme mettant en évidence les différents composants (électronique, optique, mécanique, environnementale,...) et relations entre eux traduit de manière synthétique l'ensemble de ces données.

La mission du système est de détecter un homme à la mer. Sur quel principe physique peut s'appuyer cet équipement? Quelle bande spectrale est la mieux adaptée à ce système? Choisissez-vous un système actif ou passif? Donner un nom à ce système qui résume l'ensemble de ces choix (mission, principe physique, bande spectrale, actif ou passif).

De la scène observée jusqu'au traitement final (qui peut être réalisé par un opérateur), la chaîne est constituée de nombreux éléments. Quels sont dans le cadre de notre projet ces différents éléments?

Une question est restée en suspens. Comment observer efficacement la scène? Pouvez vous proposer une technique opto-mécanique efficace? Cette technique est un bloc supplémentaire à ajouter à la question précédente.

Dessiner le bloc-diagramme.

Une fois les blocs identifiés, il est possible de préciser pour chacun d'entre eux les spécifications techniques qui seront importantes de définir ultérieurement (bande passante, distance focale, ouverture, conditions de travail...). Ajouter au diagramme précédent les spécifications techniques à prendre en compte.

A cette étape, un énoncé plus technique du TD vous sera fourni.

Définition Technique et Etudes des Performances Potentielles

L'architecture étant désormais clairement définie, l'étape suivante consiste à optimiser les spécifications techniques et à évaluer (ou simuler) les performances potentielles du système. Quelle focale choisir pour la partie optique, cette focale devant être adaptée à la scène observée et au détecteur choisi? Comment adapter la bande passante de l'électronique?

Partie Optique: Choix d'une focale adaptée afin de maximiser le signal

La taille de la surface sensible est fixée (seul détecteur disponible sur le marché par exemple). Quelle focale choisir pour le système optique? Quels paramètres guident ce choix? On pourra considérer que la surface typique occupée par le naufragé est de 1x1m.

Partie Electronique: Choix d'une BP adaptée pour limiter le bruit

Quelle est la vitesse de balayage angulaire de la bande de mer analysée à chaque ligne? Quelle est la forme temporelle du signal? Combien de temps le système "voit"-t-il le naufragé? En déduire la bande passante électronique adaptée au signal.

Performances potentielles: de la NEP à la NETD

Rappeler la signification physique du flux équivalent au bruit. Quel est le flux équivalent au bruit (FEB ou NEP) du système (on ne prend en compte que le bruit de détection)?

Quelle relation photométrique relie un flux et une étendue géométrique dans le cas d'une luminance uniforme? Calculer l'étendue géométrique définie par le détecteur et l'optique du système. Sachant que la dérivée partielle de la luminance dans cette bande spectrale est $\partial L/\partial T=0,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{K}^{-1}$, déduire de la NEP la valeur de la NETD.

Vers une étude plus approfondie du système

D'autres sous-ensembles du système seraient à étudier en détail. L'élaboration de la partie automatisée de détection nécessiterait par exemple un travail important de traitement du signal et d'informatique. Des questions fondamentales n'ont pas encore été soulevées. La réflexion de la tuyère de l'hélicoptère (source chaude) sur la mer pourrait être une source rédhibitoire de fausses alarmes. Il faudrait alors abandonner l'architecture précédente et choisir un système actif: un laser éclaire la scène et la détection peut se faire dans une bande spectrale très étroite, ce qui permet de rejeter cette source de fausses alarmes.

Ce TD-cours avait pour objectif de vous convaincre de la multidisciplinarité qu'exige la conception d'un système optronique (mécanique, opto-mécanique, électronique, opto-électronique, informatique, optique physiologique...) tout en soulignant l'importance du bloc de détection et de son optimisation. Ce bloc est à une position charnière du système et nécessite une attention toute particulière qui décidera des performances ultimes du système.

Quelques références bibliographiques

"Bases de radiométrie optique" (J.L. Meyzonnette, T. Lépine, Cépadués Edition): un ouvrage issu du cours de radiométrie qui est enseigné à l'Ecole Supérieure d'Optique.

"Rayonnements optiques" (F. Desvignes, Masson): décrit les phénomènes liés à la propagation des signaux optiques et aux propriétés radiométriques des matériaux, des milieux, des sources et des récepteurs.

"Optoélectronique industrielle: conception et applications" (P. Mayé, Dunod): fait le point des connaissances nécessaires pour aborder l'optoélectronique. Détecteurs divers, convertisseurs, photo-coupleurs, fibres, cristaux liquides, CCD... De nombreux montages pratiques. Le montage "Commande automatique d'un éclairage" présenté dans ce polycopié est extrait de cet ouvrage.

"Acquisition et Visualisation des images" (A. Marion, Eyrolles): traite des notions théoriques et des aspects fondamentaux du traitement d'image. Formation des images, capteurs d'image, colorimétrie, aspects neurophysiologiques de la vision...

Quelques sites internet de distributeurs opto-électroniques

usa.hamamatsu.com/hcpdf/catsandguides/Compound_semiconductor.pdf: une notice très complète sur les composants semiconducteurs.

usa.hamamatsu.com/detectors.htm :Photodiodes , CCDs , MOS Linear Image Sensors, Photo ICs...

www.sel.sony.com/semi/pdctguid.html: CCD Area Sensor ICs, CCD Linear Sensor ICs...

www.mellesgriot.com

www.optonlaser.com

www.newfocus.com

Quelques sites présentant des systèmes optroniques

www.riegl.co.at/lasertape/f_fg21lr.htm : Télémètre laser à longue portée

lmdx.lmd.polytechnique.fr/~Lidar/LVT/lvt.html: Lidar atmosphérique du laboratoire de météorologie dynamique de l'X

<http://www.ineris.fr/connaître/domaines/chroniques/lidar/lidar1.htm>: Lidar d'analyse de qualité de l'air

<http://www.rc.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/instrum.htm>: L'instrumentation de la station de télémétrie Laser-Lune

<http://perso.wanadoo.fr/csom/rla500.htm>: Contrôleur de linéarité pour système robotisé

http://www.sso.asso.fr/symposiums/1996/applications_militaires.htm: Les applications militaires des lasers

http://www.onera.fr/cahierdelabo/lexique/fr/camera_infrarouge.htm: Contrôle non destructif par thermographie (ONERA)