

PHOTORECEPTEURS

I LA PHOTODIODE

I.1 Détermination du GAP d'un semi-conducteur

On peut déterminer le gap d'un semi-conducteur CdS (2 à 2,5 eV) à l'aide d'un spectromètre fibré. On enregistre le spectre d'une lampe quartz iode pour avoir une référence, puis on intercale le semi-conducteur. On normalise le spectre obtenu à l'aide de la référence pour avoir la fonction de transmission de l'échantillon en fonction de la longueur d'onde (cf. montage sur les semi-conducteurs pour plus de précision sur la manipulation).

I.2 Mesure du rendement quantique et de la sensibilité spectrale d'une photodiode au silicium

On utilise un monochromateur Jobin Yvon éclairé avec une lampe quartz/iodé. On commence par étalonner la puissance de sortie du monochromateur en fonction de la longueur d'onde λ à l'aide d'un détecteur étalonné (puissance mètre) afin de connaître la puissance lumineuse en Watt à la sortie du monochromateur en fonction de λ .

On place ensuite une photodiode au silicium OSD5T polarisée en inverse au niveau de la fente de sortie du monochromateur et on mesure via la résistance de charge le courant photo-crée en fonction de λ (choisir la résistance de charge pour que la tension max à ses bornes ne dépasse pas la tension d'alimentation du circuit). On peut alors comparer la sensibilité en A/W obtenue à la documentation constructeur et estimer la longueur d'onde de coupure. On peut ensuite déterminer le rendement quantique η à partir de la puissance incidente et du courant mesuré.

Remarque :

Une autre technique de mesure peut consister à prendre des filtres interférentiels à la place du monochromateur. On peut aussi mesurer directement le courant $I(A)$ débité dans un micro-ampèremètre. Dans ce cas on branche directement la diode sur le micro-ampèremètre (prendre un Keithley) et on en déduit directement la sensibilité en A/W .

I.3 Courant de court-circuit

On met la diode en court-circuit et on mesure le courant avec un micro-ampèremètre en fonction de l'éclairement.

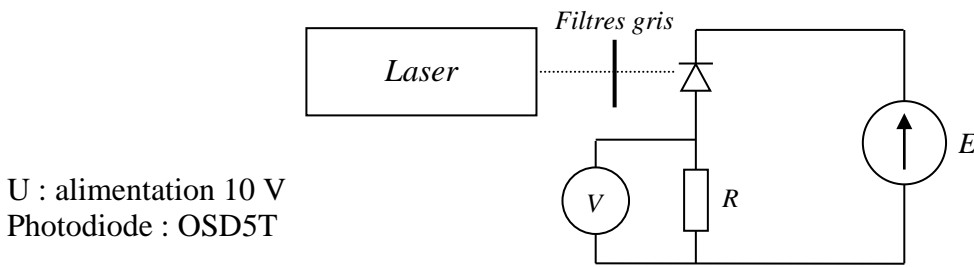
I.4 Linéarité du courant photo induit avec l'éclairement

La lumière crée des porteurs dans la photodiode. Pour qu'ils puissent contribuer à un courant, ils ne doivent pas se recombiner. Ceci n'est possible que dans la zone de déplétion de la jonction. Le courant photo-induit dans la photodiode est donc un courant inverse de même sens que le courant lié aux porteurs minoritaires. Ce courant étant faible, on ne le mesure pas directement. On mesure plutôt la d.d.p. qu'il produit aux bornes d'une résistance. Le mode photovoltaïque ne fournissant pas une réponse linéaire en tension, on utilise un montage en polarisation inverse (le plus répandu) :

Montage :

Prendre une photodiode au silicium sans filtre de correction de sensibilité (cas des diodes BPW21 par exemple) pour avoir un maximum de sensibilité dans l'IR, donc une bonne réponse avec la lumière rouge du laser He Ne. Choisir une valeur de R pour avoir des tensions de

l'ordre du volt et recouvrir l'ensemble d'un drap noir pour éliminer les lumières parasites.



U : alimentation 10 V
Photodiode : OSD5T

Manipulation 1 :

On travaille sans filtre gris (éclairage constant). On mesure V pour différentes valeurs de R . La tension doit être proportionnelle à $R \rightarrow$ le courant mesuré est indépendant des caractéristiques du circuit. On mesure donc bien le photo courant.

Manipulation 2 :

On fait varier l'éclairement en intercalant des filtres gris de densité ND^1 :

$$ND = \log(\Phi_{inc}/\Phi_{trans}) \rightarrow \Phi_{trans} = \Phi_{inc} 10^{-ND}$$

Où Φ_{inc} est le flux incident et Φ_{trans} est le flux transmis par le filtre.

On mesure la tension V et on en déduit le courant I . On trace alors $\log I$ en fonction de ND .

Résultats :

$$\left. \begin{array}{l} 1^{er} \text{ filtre : } \Phi_{trans} = \Phi_{inc} 10^{-ND1} \\ 2^{ème} \text{ filtre : } \Phi_{trans} = \Phi_{inc} 10^{-ND2} \end{array} \right\} \rightarrow \log I = f(ND) = \text{droite si } I \text{ prop } \Phi$$

Remarques :

Quand on place plusieurs filtres, les ND s'ajoutent.

Il faut placer toujours un filtre de petite valeur de ND devant un filtre de grande valeur de ND pour ne pas « brûler » le filtre le plus absorbant.

I.5 Caractéristique courant/ tension

Se reporter en [1], p. 62 pour cette manipulation.

Elle permet une visualisation directe de la caractéristique courant/tension d'une photodiode.

I.6 Temps de réponse

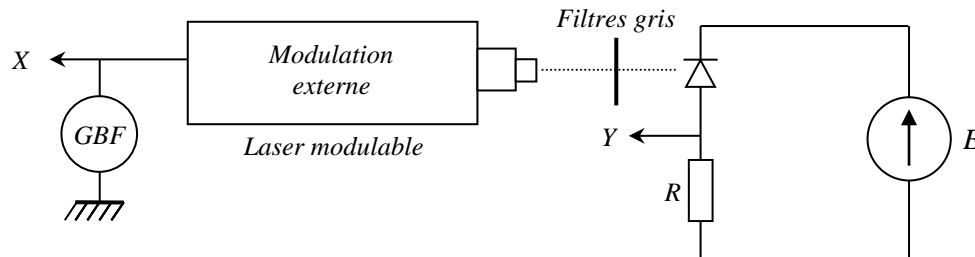
Les photodiodes sont obtenues en déposant une couche de type P sur un substrat de type N. Le processus de diffusion des charges P et N à l'interface entre les deux milieux crée alors une zone dépourvue de charge libre (zone de déplétion) \rightarrow on a donc une structure de type capacitif (deux milieux conducteurs séparés par un isolant) qui limite les performances dynamiques du circuit de mesure via la constante $\tau = RC_{ph}$ du montage. On montre en annexe que la capacité C_{ph} de jonction de la photodiode polarisée en inverse dépend de la tension aux bornes du composant. Il en est donc de même pour la constante de temps τ . On propose de le vérifier avec une photodiode OSD5-5T. Le constructeur annonce une capacité $C_{ph} \approx 35 \text{ pF}$ pour une tension inverse de 12 V sur la diode. C'est une valeur très faible donc délicate à mesurer. Il faut une source lumineuse

¹ ND = Neutral Density.

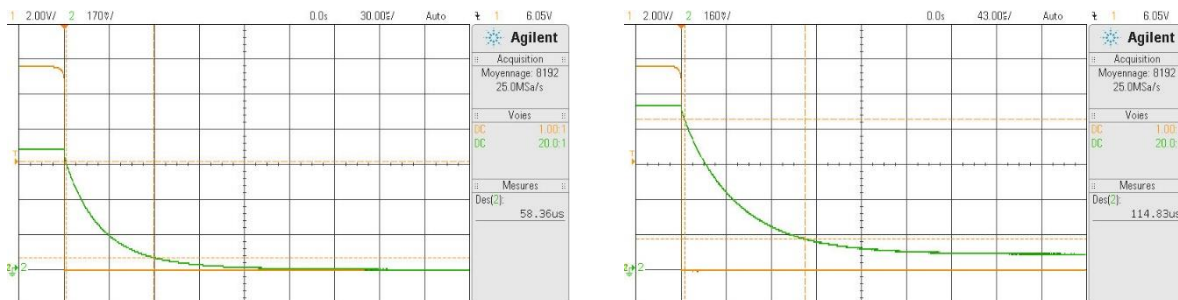
avec un temps de réponse très court car le circuit de détection est potentiellement rapide ($\tau = 3,5 \mu\text{s}$ avec $R = 100 \text{ k}\Omega$ par exemple). On doit aussi minimiser les capacités parasites dans le montage de mesure du flux pour éviter qu'elles augmentent le temps de réponse du circuit².

Montage :

On utilise une diode laser modulée en tout ou rien par un GBF ($f = 1 \text{ kHz}$). On peut aussi prendre une LED rouge alimentée par un GBF via une résistance de $1 \text{ k}\Omega$ (cf. [1], p. 69).



La capacité de la photodiode dépend de la tension à ses bornes → il faut ajuster le flux lumineux qu'elle reçoit avec les filtres gris pour que la tension Y reste faible (on a alors $V_{\text{photodiode}} \approx E \approx \text{cte}$). La tension Y aux bornes de R ne doit pas être observée avec un câble coaxial sinon il rajoute une capacité importante (on peut faire le test ; le câble augmente le temps de réponse en rajoutant $\approx 100 \text{ pF}$ par mètre de câble). Il vaut mieux utiliser une sonde différentielle car elles ont généralement une capacité d'entrée très faible³ (on doit alors tenir compte du facteur d'atténuation quand on évalue Y, ce qui est fait sur les oscillogrammes ci-dessous). Le montage du capteur peut aussi avoir un impact important sur le temps de réponse mesuré :



L'oscillogramme de gauche a été obtenu avec une OSD5-5T enfoncée sur une plaque de PVC (pattes écartées, connecteurs éloignés), celui de droite avec le même modèle de photodiode placée dans un boîtier métallique compact. La différence de temps de réponse est spectaculaire⁴ alors que la résistance de mesure était la même ($700 \text{ k}\Omega$). Le type de résistance (boîte à décades, boîte AOIP, composant sur support, ...) peut aussi affecter le temps de réponse mais dans une moindre mesure.

I.6.1 Evolution de τ en fonction de R.

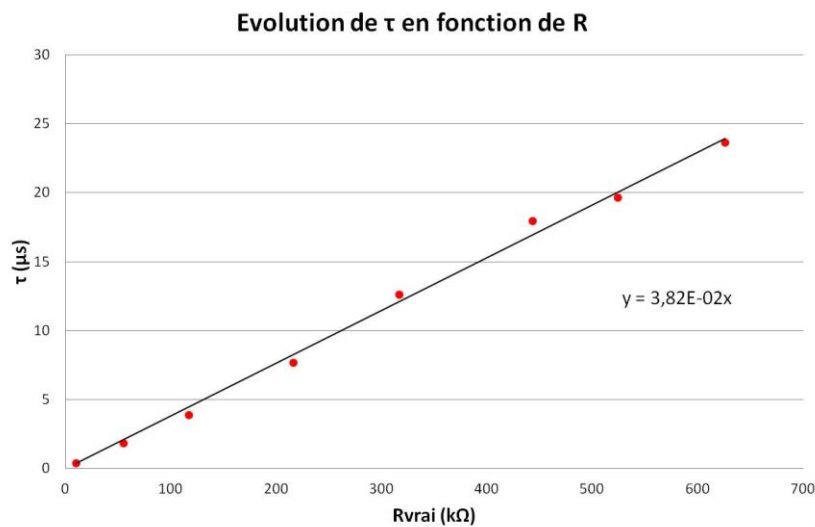
Cette étude permet de voir si le temps de réponse de la source n'est pas un facteur limitant. Celui-ci étant d'autant moins gênant que la constante $\tau = RC$ du circuit de mesure est grande, on privilégie les fortes valeurs de R. On a utilisé une boîte de résistance $\times 100 \text{ k}\Omega$ et calculé la résistance effective du montage de mesure compte tenu de la résistance d'entrée de la sonde ($R_{\text{vrai}} = R$ en parallèle avec R_{sonde}). La constante τ a été

² Un oscilloscope a une capacité d'entrée d'environ 10 pF par exemple.

³ $R_e = 8 \text{ M}\Omega$, $C_e = 1,2 \text{ pF}$ pour la sonde différentielle Ediltest GE 8100 utilisée ici.

⁴ La deuxième mesure conduit à une capacité effective de 80 pF !

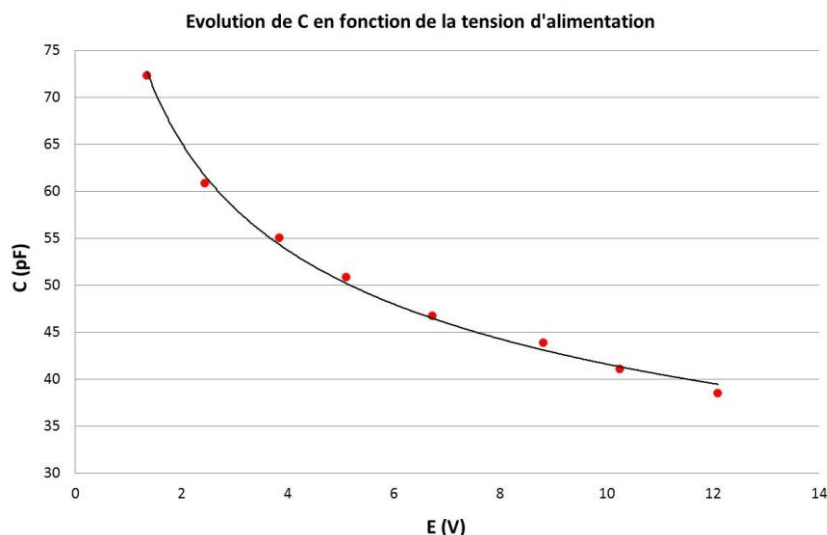
obtenue à partir du temps de descente⁵. Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesures effectuées avec une tension $E = 12\text{ V}$:



La constante τ est proportionnelle à $R \rightarrow$ le temps de réponse du laser n'affecte pas les mesures. La pente de la droite correspond à C . On trouve $C = 38,2\text{ pF}$, une valeur en accord avec la donnée constructeur pour $E = 12\text{ V}$.

I.6.2 Influence de la tension aux bornes de la photodiode

On fixe R et on mesure le temps de descente pour différentes valeurs de la tension de polarisation inverse E en ajustant à chaque fois le flux lumineux avec des filtres gris pour que Y reste faible comparé à E . Voici à titre indicatif une série de mesure effectuées avec une résistance R de $200\text{ k}\Omega$:



On constate que la capacité est d'autant plus faible, donc que le circuit est d'autant plus rapide, que la tension E est forte. On peut tenter de vérifier la dépendance de C en fonction de E indiquée en annexe en modélisant la courbe par une expression du type⁶ :

⁵ Le temps de descente TD est une mesure automatique proposée par les oscilloscopes correspondant au temps nécessaire pour passer de 90 % à 10 % de la valeur initiale. $TD = \tau \ln 9$ pour un circuit du premier ordre.

⁶ Le signe dans la parenthèse est inversé par rapport à la formule indiquée en annexe car on est en polarisation inverse donc $V = -E$. On rajoute aussi C_p pour tenir compte des capacités parasites.

$$C = C_p + \frac{C_0}{\left(1 + \frac{E}{V_b}\right)^m}$$

On peut faire le calcul avec $m = 1/2$ et $m = 1/3$ pour essayer d'identifier le profil de la jonction. Les résultats qu'on obtient pour C_p et C_0 semblent plutôt militer pour une jonction graduelle mais les écarts entre les deux modèles sont trop faibles pour l'affirmer avec certitude.

Remarque :

Il faut noter l'incompatibilité entre rapidité et sensibilité. Si on veut un détecteur rapide, il faut polariser fortement la photodiode en inverse pour diminuer C et prendre une résistance de mesure R minimum mais la tension à détecter est alors très faible. Si on veut des signaux plus forts, il faut augmenter R mais on perd en vitesse.

I.6.3 Variante : mesure de la bande passante

A partir du même montage, on peut étudier la réponse en fréquence. On fait varier la fréquence f , on mesure la tension crête à crête V aux bornes de R en fonction de f et on trace la courbe V en fonction de f . La réponse en fréquence d'une capacité C et d'une résistance R en parallèle est du premier ordre, d'où :

$$\frac{V}{V_{max}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$

Avec f_c la fréquence de coupure. On mesure f_c et on en déduit le temps de réponse τ_r (on a $f_c = 0,35/\tau_r$).

II LE PHOTOMULTIPLICATEUR

[1], p. 73 et suivantes.

La caractéristique majeure d'un PM est sa grande sensibilité entre cathode et anode qui lui confère une grande sensibilité permettant de mesurer des flux lumineux très faibles. Un montage intéressant sur le PMT est donc la mesure de son gain G . On utilise en général un PMT avec une tension de cathode de l'ordre de -1000 V . Comme le PMT est très sensible, il est impératif de travailler dans le noir quand il est alimenté. D'autre part, Il est essentiel de contrôler le flux lumineux incident pour ne pas dépasser le courant d'anode maximum. Si on considère que la valeur limite de la tension d'anode est de 5% du max et qu'on utilise un laser HeNe de 1 mW , alors compte tenu de la sensibilité cathodique il faut atténuer le flux incident par 1 million. On utilise un filtre gris de densité $ND = 6$ qui est déjà en place devant la cathode et sa valeur exacte est écrite sur le PMT. D'autre part, l'anode est en l'air et doit être branchée sur une résistance de charge R quand la haute tension est présente. Il faut choisir R pour que la tension max à ses bornes ne dépasse pas 1% de la tension inter dynode qui est environ de 100 V .

Manipulation :

Brancher l'anode sur la résistance de charge R . Eclairer le PMT avec le laser He-Ne (élargir le faisceau). Mesurer la tension aux bornes de R en fonction de V_{HT} . En déduire le courant d'anode I_A . Estimer le courant de cathode I_K à partir de la sensibilité cathodique à 633 nm . En déduire le gain G du PMT en fonction de V_{HT} . Tracer G en fonction de V_{HT} en log-log et estimer le nombre de dynodes n .

Rappels :

$I_A = G I_K$ avec G le gain du PMT

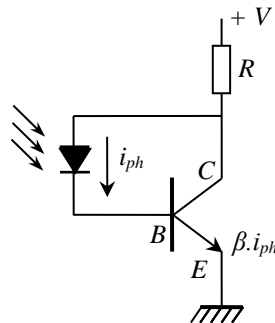
$G = \delta^n$ (δ = coefficient d'émission secondaire ; n = nombre de dynodes)

$\delta = a(V_{inter})^b$ (V_{inter} = tension inter dynode ; a = constante ; b = coefficient dépendant du matériau $\approx 0,7 - 0,8$).

$$\delta = a \left(\frac{V_{HT}}{n+1} \right)^b \rightarrow G = a^n \left(\frac{V_{HT}}{n+1} \right)^{bn} = \frac{a^n (V_{HT})^{bn}}{(n+1)^{bn}}$$

III LE PHOTOTRANSISTOR

Il se comporte comme un transistor bipolaire classique. C'est un générateur de courant commandé par un courant mais son courant de base est photo induit par la lumière. On peut donc le représenter par le schéma suivant pour un phototransistor NPN :

**III.1 Sensibilité**

On peut mesurer la tension aux bornes de la résistance R pour en déduire courant $I_C = (\beta + 1)I_{ph}$. La mesure de la puissance lumineuse envoyée sur le capteur à l'aide d'un puissance-mètre optique permet alors d'obtenir la sensibilité en A/W du phototransistor utilisé (BPX43, BPW14...). On peut comparer le résultat obtenu à la donnée constructeur et à la sensibilité de la photodiode au silicium. Mesurer à l'aide des filtres gris la plage de linéarité. Conclure.

III.2 Linéarité

On peut étudier à l'aide de filtres gris la plage de linéarité du phototransistor (même protocole que pour la photodiode).

IV THERMOPILE

Une thermopile est un détecteur thermique peu sensible mais à réponse spectrale plate en comparaison d'une diode au Silicium (détecteur quantique). Avec la thermopile CA2, on peut difficilement mesurer sa sensibilité mais on peut mesurer facilement le temps de réponse en mesurant à l'oscilloscope le temps de décroissance de 90% à 10% de la valeur initiale en bloquant le faisceau quand le capteur est éclairée avec une QI. Comparer à la documentation constructeur. Comparer avec une diode au silicium.

Bibliographie :

[1] : Sextant : Optique Expérimentale

ANNEXE : PHOTORECEPTEURS

I CARACTERISTIQUES COMMUNES A TOUS LES PHOTORECEPTEURS

La sensibilité $S(A/W)$ est la grandeur la plus importante d'un photorécepteur. Il traduit sa capacité à transformer le signal lumineux en signal électrique. Il s'exprime par le rapport du signal électrique de sortie (courant en A) au flux énergétique incident (en W). La réponse spectrale $R(\lambda)$ exprime les variations de la sensibilité du photorécepteur en fonction de la longueur d'onde. Le temps de réponse est un temps caractéristique de l'évolution du signal électrique détecté lorsque le flux lumineux incident varie brusquement.

II TYPE DE PHOTORECEPTEUR

Il existe deux grandes familles de photorécepteurs.

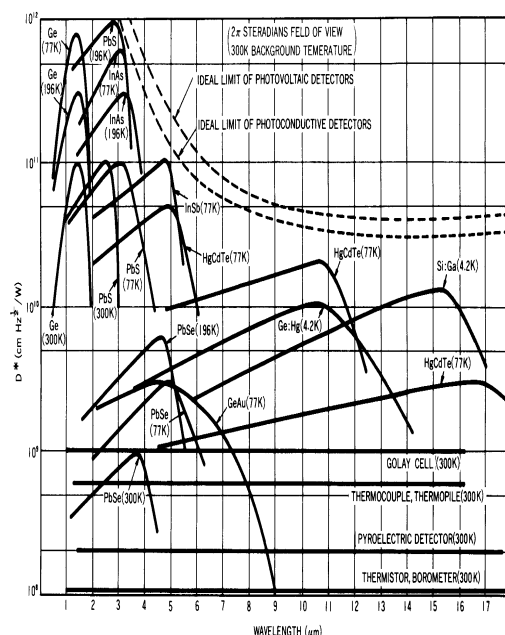
Détecteurs quantiques :

Il y a interaction directe entre un photon et le milieu photosensible par effet photoélectrique. On trouve dans cette famille la photodiode, le phototransistor et la photorésistance (semi-conducteurs très répandus et peu chers). On trouve aussi les tubes photoémissoirs (photomultiplicateur) qui ont un temps de réponse bref, une réponse spectrale sélective et une détectivité (ou sensibilité) élevée.

Détecteurs thermiques :

Il y a conversion de l'énergie lumineuse en chaleur puis en courant ou tension électrique. La réponse spectrale est étendue, le temps de réponse est élevé, mais la sensibilité reste faible. Nécessité de modulation du flux lumineux pour assurer un échange thermique. On trouve dans cette famille le Bolomètre, le calorimètre et le pyromètre.

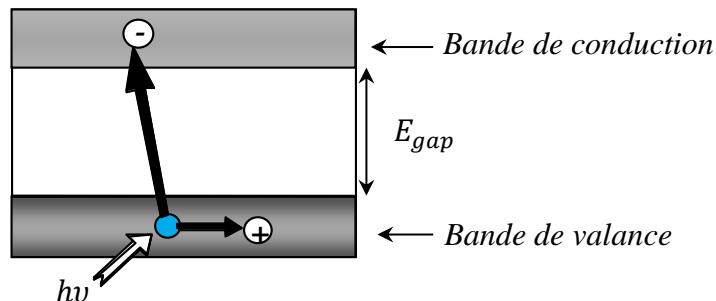
III DETECTEUR QUANTIQUE/THERMIQUE : REPONSE SPECTRALE



IV LA PHOTODIODE

IV.1 Effet photoélectrique

C'est le principe de base de la photodiode. L'effet consiste en l'interaction directe d'un photon avec le réseau cristallin du semi-conducteur. Un photoélectron est généré si l'énergie du photon $E(J) = h\nu = hc/\lambda$, soit $E(eV) = 1,24/\lambda(\mu m)$, est supérieure à l'énergie du gap E_{gap} du semi-conducteur ($h\nu > E_{gap}$) :



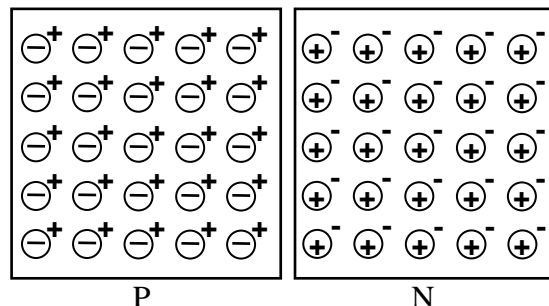
Cet effet seul est insuffisant car les porteurs photo-crés finissent spontanément par se recombiner.

IV.2 Jonction PN

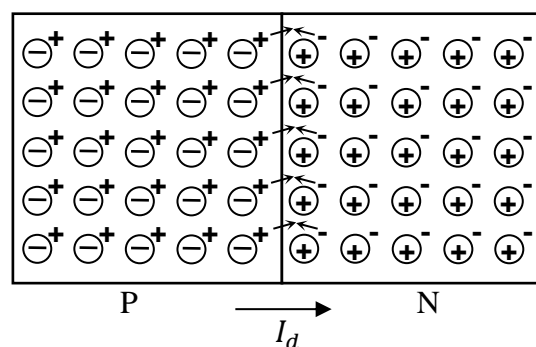
Une photodiode est une jonction PN formée par un cristal semi-conducteur transparent à la lumière (Si, Ge). On expose dans ce qui suit le principe de fonctionnement d'une photodiode au silicium.

IV.2.1 Porteurs majoritaires

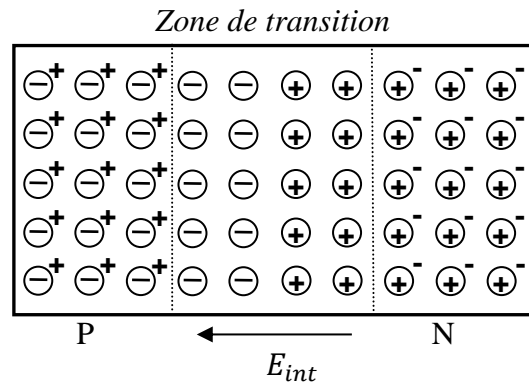
Chaque région P et N du semi-conducteur possède une concentration importante de porteurs mobiles de charges opposées appelés porteurs majoritaires. On a un excès d'électrons dans la région dopée N et inversement un excès de trous dans la région P :



Quand les deux régions sont réunies les charges mobiles migrent par diffusion : des électrons en excès de la région N migrent vers la région P et des trous de la région P migrent vers la région N. Cette double migration correspond à un courant de diffusion I_d :



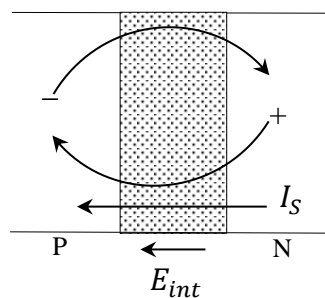
La forte diffusion des porteurs de part et d'autre de la zone de contact s'accompagne d'une recombinaison entre ces charges. *En conséquence la neutralité de chacune des régions P et N est supprimée localement.* Appauvrie en trous, la partie de la région P située juste à gauche de la jonction se charge négativement tandis que la région N se charge positivement :



Ce phénomène de diffusion entraîne l'apparition d'une zone dépeuplée en porteurs libres (zone de transition) et d'un champ interne E_{int} créé par le défaut de neutralité de chacune des régions P et N due aux ions fixes. Ce champ interne induit une force électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs mobiles et freine le phénomène de diffusion. A l'équilibre, la zone de transition a une épaisseur de l'ordre du micron et une différence de potentiel électrostatique de diffusion V_b apparaît. Cette ddp est spécifique du semi-conducteur considéré (600 mV environ pour le silicium).

IV.2.2 Porteurs minoritaires

Un porteur minoritaire est un électron libre de la région P ou un trou de la région N. Le nombre des porteurs minoritaires est bien plus faible que celui des porteurs majoritaires mais leur action est fondamentale dans le mécanisme de photodétection. L'apparition du champ interne induit par les porteurs majoritaires agit sur les porteurs de charges minoritaires. En effet un porteur minoritaire qui se trouve au voisinage de la zone de transition est attiré dans la région opposée sous l'action du champ interne :

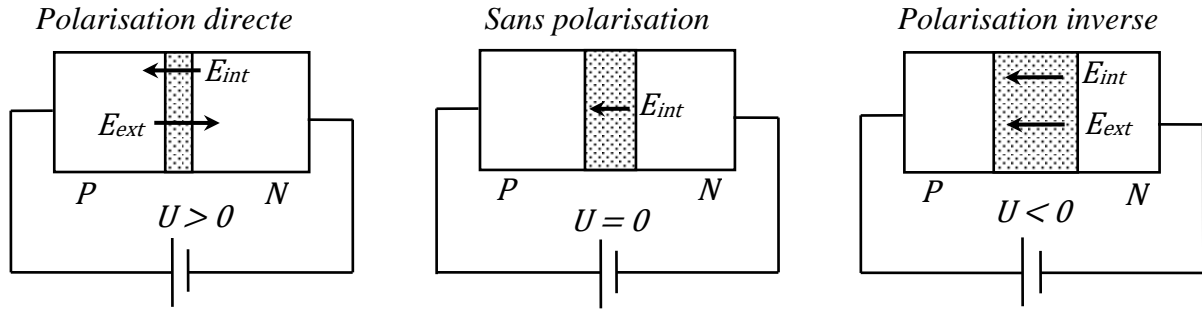


Un des rares électrons de la région P est attiré vers la région N et le trou de la région N est lui attiré vers la région opposée. Le courant associé aux porteurs minoritaires I_s est de sens opposé à celui lié au déplacement des porteurs majoritaires I_d . L'équilibre de la jonction est instauré entre le mouvement de diffusion des porteurs majoritaires, très nombreux mais gênés par E_{int} , et donc rares à traverser la zone de transition, et celui des porteurs minoritaires, rares en quantité mais passant à coup sûr. Dans le noir, les deux courants sont égaux $I_d = |I_s|$.

IV.2.3 Action d'un champ extérieur

Supposons qu'on applique une tension extérieure U aux bornes de la diode. Si U est positif (pôle + appliqué du côté P), le champ externe E_{ext} associé à la tension U appliquée s'oppose au champ interne et réduit la largeur de la zone de transition → Le courant de diffusion des porteurs majoritaires augmente : la diode est polarisée en

direct. Si U est négatif, le champ externe E_{ext} associé à U s'ajoute au champ interne et augmente la largeur de la zone de transition → Le courant de diffusion des porteurs majoritaires diminue : la diode est polarisée en inverse.



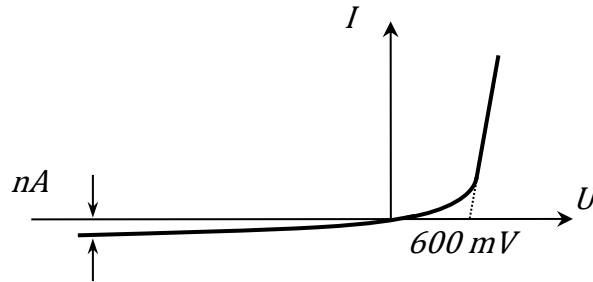
Le courant des porteurs majoritaires I_d dépend de la tension appliquée U (V_{Diode} ici). On admet qu'il est donné par l'expression suivante :

$$I_d(U) = I_d(U = 0)e^{\frac{qV_D}{kT}} = I_d(U = 0)e^{\frac{qU}{kT}}$$

On admet également que le courant des porteurs minoritaires I_S n'est pas affecté par la présence du champ externe et que, pour une jonction donnée, il ne dépend que de la température. On a $|I_S| = I_d(U = 0)$. Le courant total $I(U)$ circulant dans la diode sous l'action d'une tension externe est la somme des courants des porteurs minoritaires et majoritaires. Il est donné par la relation :

$$I(U) = I_d(U) - |I_S| = I_d(U = 0)e^{\frac{qV_D}{kT}} - |I_S| = |I_S| \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

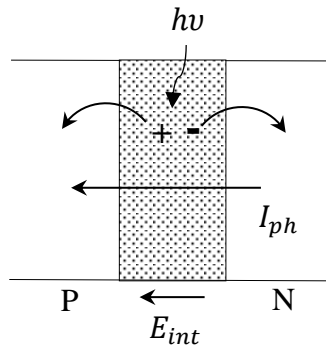
Et a l'allure suivante en l'absence d'éclairement :



Quand la tension appliquée est négative, la hauteur de la barrière est forte et le courant I (de l'ordre du nA) est lié aux porteurs minoritaires. La diode est alors bloquée. Quand la tension est positive, la barrière s'abaisse et le courant est dominé par la diffusion des porteurs majoritaires (le terme exponentiel devient prépondérant). La diode est passante.

IV.2.4 Effet photoélectrique

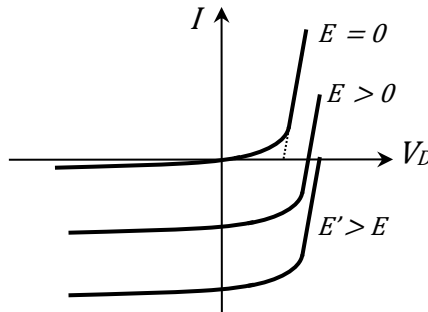
Un photon d'énergie $h\nu$ supérieure à l'énergie du gap E_{gap} peut donner naissance par effet photoélectrique à des photo-porteurs dans chaque région de la diode. Pour que ces porteurs puissent contribuer à un courant, il faut éviter qu'ils se recombinent. Ceci n'est possible que dans la zone de transition car un électron et un trou créés dans cette zone sont aussitôt accélérés par le champ interne et passent dans les régions N et P respectivement, ce qui se traduit par l'apparition d'un courant photo-induit I_{ph} .



Ce courant photo-induit a le même sens que le courant inverse lié aux porteurs minoritaires. Son intensité augmente avec le nombre de photons incidents sur la barrière et le courant dans la diode en présence d'un éclairement E vaut :

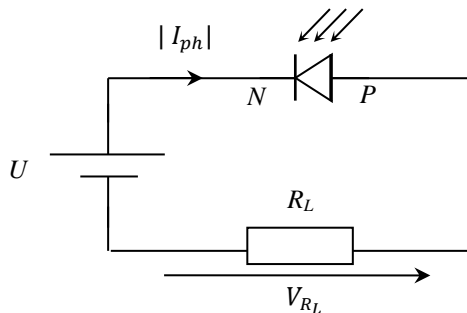
$$I = I_{ph}(E) - |I_S| \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

L'éclairement de la zone de transition a donc pour effet de traduire la caractéristique de la diode vers le bas :



IV.3 Principe de la détection d'un flux lumineux

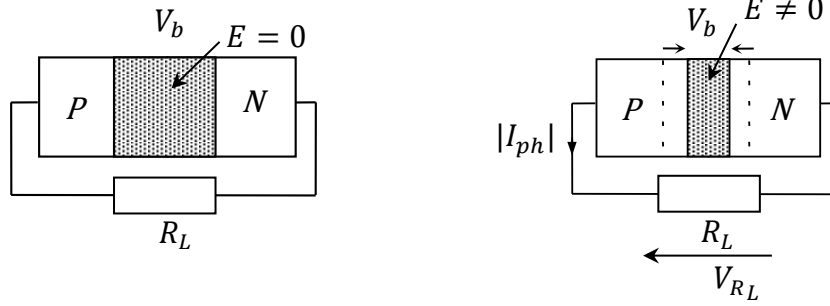
En général, on ne mesure pas directement le courant photo-induit mais la tension s'établissant aux bornes d'une résistance de charge R_L . La tension V_{R_L} est normalement proportionnelle au nombre de photons incidents et le schéma de principe de détection est le suivant :



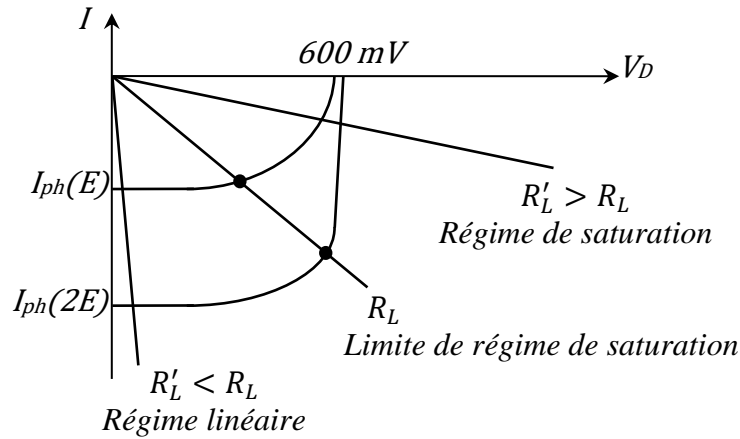
Le courant photo-induit étant négatif par rapport à la convention récepteur adoptée pour les diodes, on le représente ici en valeur absolue pour indiquer son sens réel (noter aussi que le générateur U est inversé par rapport au § IV.2.3). On distingue alors trois modes de fonctionnement.

IV.3.1 Mode photovoltaïque ($U = 0$)

Dans ce cas, aucune tension n'est appliquée à la diode et la tension mesurée V représente directement la chute de potentiel de la zone de transition. Celle-ci ne peut donc pas dépasser la hauteur initiale V_b de la barrière ($\approx 600 \text{ mV}$ pour le silicium).



Si la diode est en court-circuit ou si R_L est faible, la tension $V_{R_L} = V_D$ est faible et le courant qui circule est le courant photo-induit I_{ph} proportionnel au flux lumineux incident d'après l'expression de I . Par contre, si la résistance de charge est quelconque, une tension induite V_{R_L} non négligeable apparaît à ses bornes et s'applique sur la jonction. Le champ associé à cette tension ayant un sens opposé au champ interne, il réduit la barrière de potentiel, ce qui favorise le passage des porteurs majoritaires. Le courant des porteurs majoritaires vient réduire le courant photo-induit et la réponse n'est plus linéaire :



Pour ce type de fonctionnement, il est donc nécessaire d'ajuster parfaitement la résistance de charge utilisée au signal lumineux à mesurer : une trop forte valeur entraîne un défaut de linéarité de la diode et une valeur trop petite conduit à des signaux mesurés très faibles, donc non significatifs.

IV.3.2 Mode photoconducteur ($U > 0$) : Diode bloquée

La diode est alors

bloquée et courant I circulant dans la photodiode est donné par :

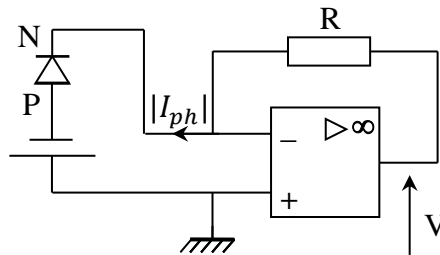
$$I = I_{ph}(E) - |I_S| \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad \text{avec} \quad I_{ph} = \frac{nq\lambda}{hc} P$$

Où P est la puissance lumineuse incidente en W .

Pour une tension de polarisation en inverse de quelques volts, on a $I \approx I_{ph} + |I_S| = I_{ph}$. Le courant photo-induit est compris en général entre $1 \mu A$ et $1 mA$, ce qui est grand devant I_S donc le courant mesuré est encore proportionnel à l'éclairement E . Dans ce cas, le champ extérieur appliqué est dans le même sens que le champ interne et s'ajoute à celui-ci ce qui a pour effet de renforcer la barrière de potentiel. Celle-ci est maintenue plus longtemps que dans le régime précédent donc l'intérêt de polariser la diode en inverse est de pouvoir obtenir un comportement qui reste linéaire pour des éclaircissements plus intenses.

IV.3.3 Montage en transimpédance

Le schéma de principe qui comprend un amplificateur opérationnel est le suivant :



Montage sans tension de polarisation ($U = 0$) :

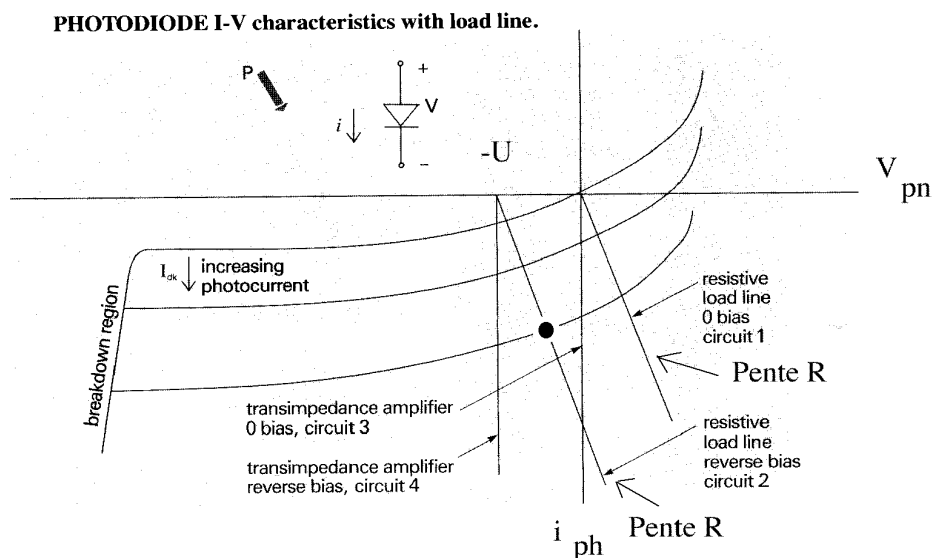
Dans ce cas, les deux bornes P et N de la jonction sont fixées à un potentiel égal à zéro car l'AO est en régime linéaire (rétroaction négative). La photodiode est donc court-circuitée et le courant photo-induit traverse la résistance de charge R .

Montage avec tension de polarisation ($U > 0$) :

La diode est alors maintenue à un potentiel négatif ce qui a pour effet de diminuer la capacité de la jonction et de réduire son temps de réponse.

IV.3.4 Résumé des différents principes de détection

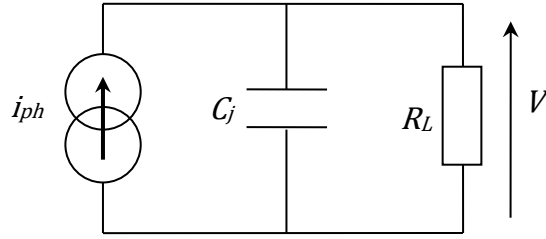
La caractéristique $I(V)$ pour chaque type de montage est représentée ci-dessous :



L'intérêt d'utiliser une tension inverse est sa plage de linéarité et la diminution du temps de réponse de la diode. Le montage en transimpédance permet de court-circuiter quasiment la diode ce qui la maintient à un potentiel constant qui ne dépend pas de la mesure et en particulier du choix de la résistance de charge. Le meilleur montage est celui en transimpédance avec tension de polarisation.

IV.4 Temps de réponse

Une photodiode est équivalente en régime dynamique à un générateur de courant en parallèle avec une capacité de jonction C_j . Quand la diode est reliée à une résistance de charge R_L , on a le montage suivant :



$$\frac{V}{i_{ph}} = \frac{R_L}{1 + jR_L C_j \omega} \rightarrow \left| \frac{V}{i_{ph}} \right| = \frac{R_L}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2}} \quad \text{avec} \quad \omega_c = \frac{1}{R_L C_L}$$

La largeur L de la zone dépeuplée d'une jonction dépend de la tension V à ses bornes en suivant une loi du type :

$$L = L_0 \left(1 - \frac{V}{V_b} \right)^m$$

Le paramètre m est compris entre 1/3 pour une jonction progressive linéaire, et 1/2 pour une jonction abrupte. La capacité de la jonction C_j se déduit de l'expression du condensateur plan :

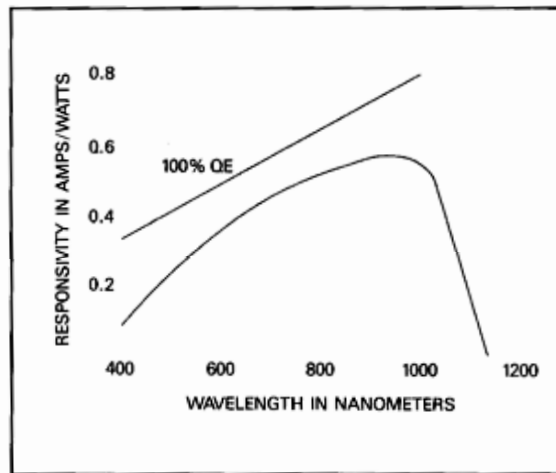
$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{L} = \frac{C_0}{\left(1 - \frac{V}{V_b} \right)^m}$$

Avec C_0 la capacité de la jonction à tension nulle, V la tension de polarisation de la photodiode.

IV.5 Sensibilité

Si l'énergie d'un photon est $h\nu$, alors la puissance optique associée pendant Δt est $P = h\nu/\Delta t$. La probabilité η de générer un photoélectron (le rendement quantique) a une valeur comprise entre 0 et 1. Le courant photo-induit dans le semi-conducteur pendant Δt est $i = \eta q/\Delta t$. La sensibilité s'exprime par :

$$S(A/W) = \frac{\eta q \Delta t}{\Delta t h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$$



TYPICAL RESPONSIVITY of a silicon photodiode.

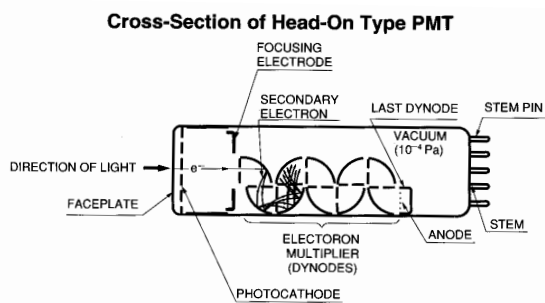
Réponse d'une photodiode en fonction de la longueur d'onde : rendement quantique (QE) et sensibilité en A/W

V LE PHOTOMULTIPLICATEUR

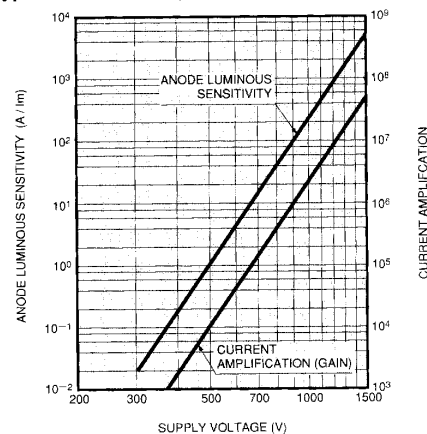
C'est un détecteur photoémissif, photosensible, avec une grande rapidité, un faible bruit et un large domaine d'utilisation : spectroscopie UV, visible et infrarouge, fluorescence, spectrophotométrie Raman, diffractométrie X, ...

V.1 Principe

Quand la lumière pénètre dans le tube et frappe la photocathode, des photoélectrons sont arrachés et émis dans l'enceinte sous vide du tube. Ces électrons sont attirés vers des électrodes secondaires (dynodes) portées à un potentiel supérieur. Des électrons secondaires sont émis sur chacune de ces dynodes par choc mécanique. On obtient alors une amplification du signal d'entrée. Le signal amplifié apparaît en sortie sur l'anode.



Typical Current Amplification vs. Supply Voltage



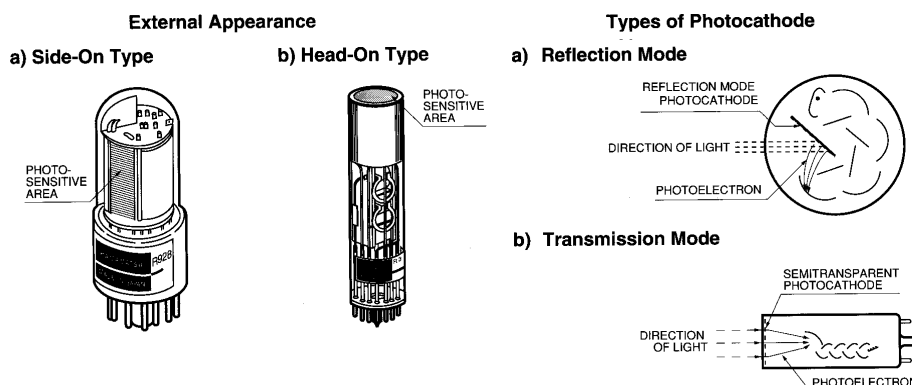
Si le courant de cathode est i_k , le courant d'anode i_a est donné par $i_a = G \cdot i_k$ où G est le gain du PMT. Si δ est le coefficient d'émission secondaire sur chaque dynode et si n est le nombre de dynodes, le gain s'écrit $G = \delta^n$. δ varie de 1 à 2 et n est de l'ordre de 10 donc G varie de 10^4 à 10^9 .

Relation entre le niveau d'éclairement et le nombre de dynodes

Niveau de lumière	Photocourant	Gain requis	Nombre de dynodes
Faible	< 10 pA	> 10 ⁶	14 - 12
Intermédiaire	10 pA - 1 nA	10 ⁶ - 10 ⁴	11 - 9
Elevé	> 1 nA	< 10 ⁴	8 - 6

V.2 Type de cathodes

Il existe deux types de cathodes "side-one" ou "head-one".



Dans le premier cas, les photoélectrons sont émis en réflexion et dans le deuxième cas, ils sont émis en transmission.

V.3 Réponse spectrale

La photocathode convertit l'énergie lumineuse en photoélectrons. L'efficacité de conversion (efficacité quantique η) varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette caractéristique est imposée à faible longueur d'onde par la fenêtre d'entrée et par le type de cathode à forte longueur d'onde. Ce paramètre est relié à la sensibilité de la photocathode S exprimée en A/W . L'efficacité quantique est la probabilité pour qu'un photon génère un électron et sa valeur est comprise entre 0 et 1 (la longueur λ est exprimée en nanomètre dans la formule suivante) :

$$\eta = \frac{S \times 1240}{\lambda} \times 100 \%$$

V.4 Pont diviseur

En régime continu, les résistances du pont diviseur sont en général égales.

Condition de linéarité :

Le courant de pont (circulant dans les dynodes) doit être 100 fois supérieur au courant d'anode. La tension aux bornes de la résistance de charge doit être inférieure à la tension entre les dynodes. En fonctionnement impulsif des capacités sont ajoutées pour permettre un plus fort courant d'anode ce qui permet de maintenir un potentiel entre les dynodes constant. La valeur de la capacité est au moins cent fois supérieure à la charge de sortie par impulsion lumineuse :

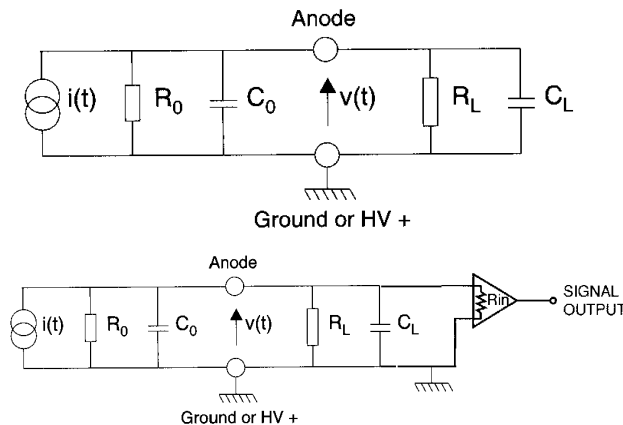
$$C > 100I \cdot \frac{t}{V}$$

Où I est le pic de courant de sortie en Ampère, t est la durée du pulse en seconde et V est la tension aux bornes de la capacité en volts.

V.5 Schéma équivalent de l'anode

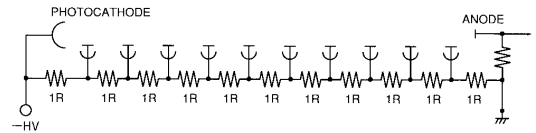
Le circuit équivalent est une source de courant en parallèle avec une résistance $R_0 > 10^{12} \Omega$ et une capacité $C_0 < 10 \text{ pF}$). Le temps de réponse du circuit est $\tau = RC$ avec $C = C_0 + C_L$ et :

$$R = \frac{R_0 R_L}{R_0 + R_L}$$

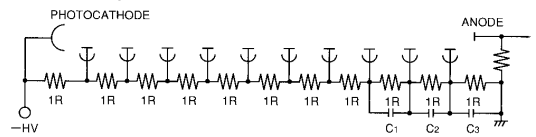


Schematic Diagrams of Voltage-Divider Circuits

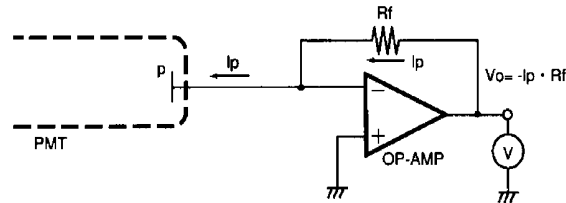
(a) Basic arrangement for DC operation



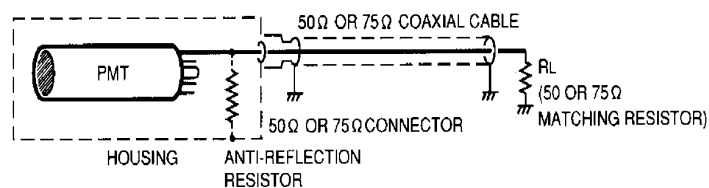
(b) For pulse operation



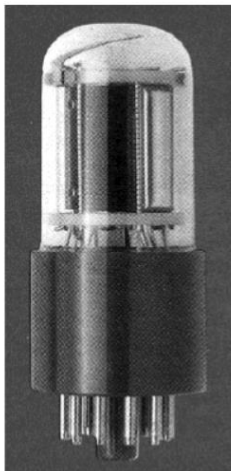
Il convient de convertir cette source de courant en une source de tension sans détériorer la bande passante du système. La fréquence de coupure est donnée par $f_c = 1/(2\pi RC)$. La présence d'un ampli op permet d'augmenter la résistance R vue par l'anode (R_{in} doit être choisit la plus grande possible). Le montage à réaliser est donc le suivant. Dans le cas où la résistance interne de l'ampli op est très grande, alors tout le photo-courant passe dans la résistance de contre réaction.



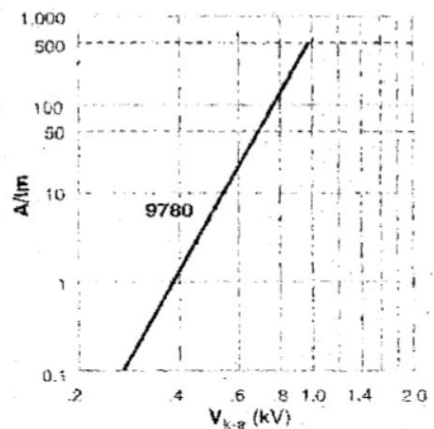
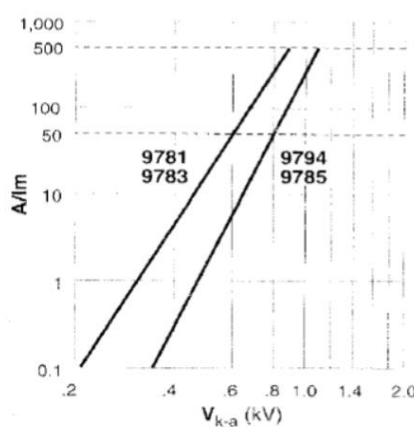
Dans le cas où la réponse en fréquence est importante alors la résistance de charge doit être la plus petite possible. Dans le cas où la tension de sortie doit être la plus linéaire possible alors la résistance de charge doit être telle que la tension de sortie ne dépasse pas quelques volts. Pour la détection d'impulsions lasers ultra courtes le schéma suivant doit être utilisé :



V.6 Datasheet du PM de Rennes



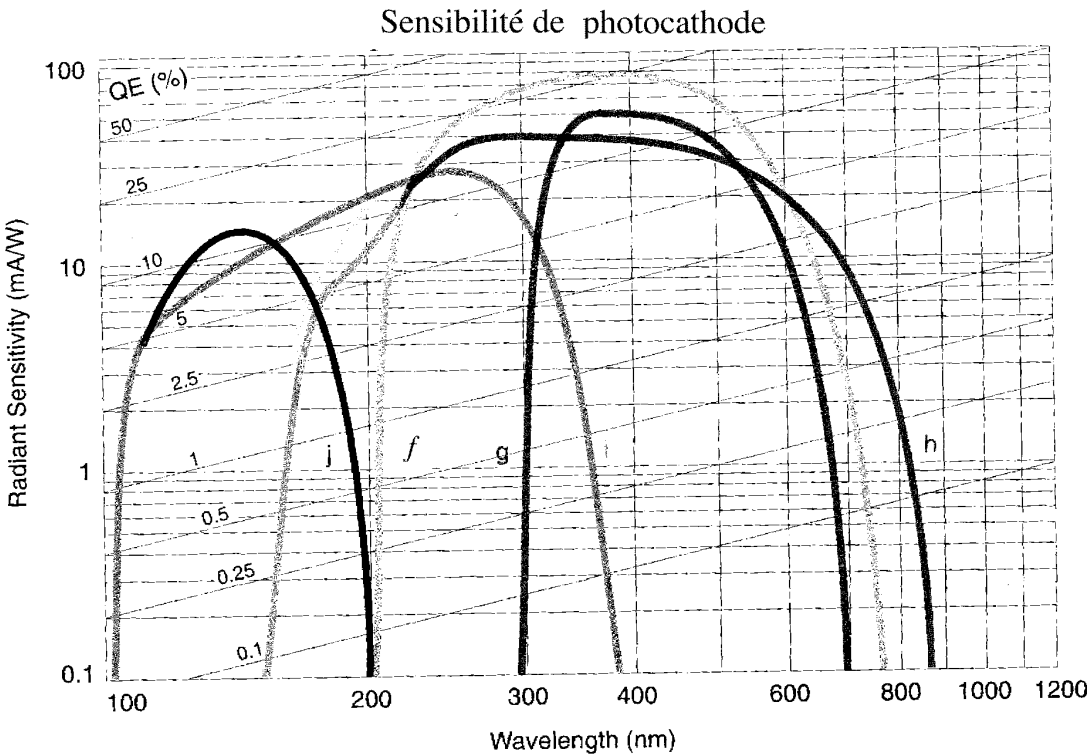
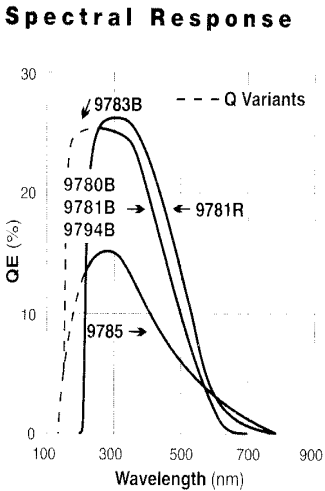
Gain Curves



Electrical Characteristics and Ratings

Type	PHYSICAL CHARACTERISTICS				CATHODE SENSITIVITY				ANODE SENSITIVITY				DARK EMISSION AT NOMINAL A/lm			
	Spectral response	Dynodes	Effective cathode size mm	$\mu A/lm$		Corning blue		Infra red	QE% peak	A/lm	V_{k-a}	V_{k-a}	Gain $\times 10^6$	I_d (dark) nA		
				min	typ	min	typ							typ	max	typ
9794B	Blalk	8CF CsSb	8x24	75	5	7	5		25	50	800	1000	0.7	0.5	5	
9781B	Blalk	9CF CsSb	8x24	75	5	7	5		25	50	600	800	0.7	0.2	5	
9781R	Blalk	9CF CsSb	8x24	85	5	7	6	8	26	50	600	800	0.6	0.8	5	
9783B	Blalk	9CF CsSb	8x24	75	5	7	5		25	50	600	800	0.7	0.5	5	
9780B	Blalk	9CF CsSb	8x24	75	5	7	5		25	50	700	900	0.7	5	20	
9785B	Trialk	9CF CsSb	8x24	80	120	6	40	4	15	50	800	950	0.4	1	5	

Type	SER	TIME RESPONSE ns					RATINGS - subject to not exceeding maximum rated A/lm					
	p/v	Rise time	Pulse width (fwhm)	Transit time	Jitter (fwhm)		A/lm	V_{k-d1}	V_{d-d}	V_{k-a}	T_k nA	T_a μ A
	typ	typ	typ	typ	typ		max	max	max	max	max	max
9794B		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100
9781B		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100
9781R		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100
9783B		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100
9780B		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100
9785B		2	4	20			500	150	150	1250	5000	100



Sensibilité du PMT 9780 = courbe *f*