

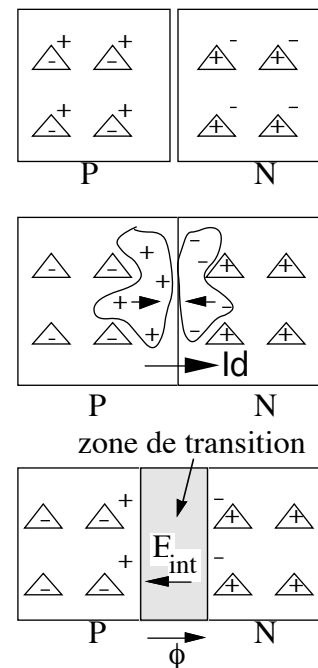
## TP : photodiode

### 1/ Porteurs majoritaires

Une photodiode est une jonction PN formée par un cristal semi-conducteur (Si, Ge) qui est transparent à la lumière. Exposée à un éclairement la photodiode émet par effet photoélectrique un courant qui est en général proportionnel à l'éclairement incident. On dispose alors d'un détecteur de lumière. Le but de la manipulation consiste à étudier le principe de fonctionnement d'une photodiode au silicium.

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 c'est-à-dire que les électrons en excès de la région N migrent vers la région P et que les trous de la région P migrent vers la région N. Cette double migration correspond à un courant de diffusion  $I_d$ .



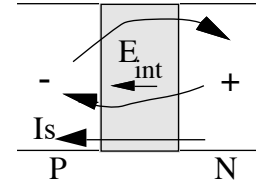
La forte diffusion des porteurs de part et d'autre de la zone de contact s'accompagne d'une recombinaison entre ces charges. *En conséquence la neutralité de chacune des régions P et N est supprimée localement.* Appauvrie en trous, la partie de la région P située juste à gauche de la jonction se charge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

Ce phénomène de diffusion entraîne l'apparition d'une zone dépeuplée en porteurs (ou zone de transition) et d'un champ interne  $E_{int}$  créé par le défaut de neutralité de chacune des régions P et N. 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 du micron et une différence de potentiel statique  $\phi$  apparaît qui agit comme un frein à la diffusion des porteurs mobiles. Celle ci est spécifique du semi-conducteur considéré (600 mV environ pour le silicium).

## 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 photo-détection.

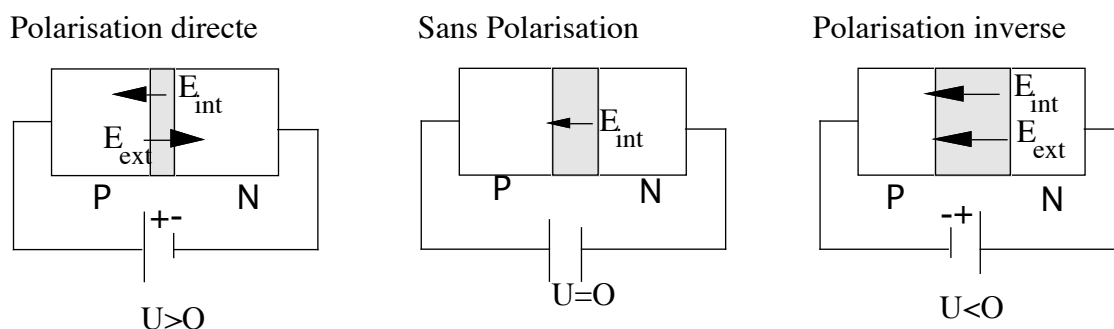
L'apparition du champ interne induit par les porteurs majoritaires agit sur les porteurs de charges minoritaires. En effet un porteur minoritaire qui se trouve au voisinage de la zone de transition est attiré dans la région opposée sous l'action du champ interne.



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  $I_d = |I_s|$ .

## 3/ Action d'un champ extérieur

Si on applique une tension extérieure  $U$  à la diode on la polarise soit en direct  $U > 0$  (pôle + appliqué du côté P) soit en inverse  $U < 0$ . Dans le cas de la polarisation directe 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. Si on polarise la diode en inverse ce courant diminue.



Le courant des porteurs majoritaires  $I_d$  dépend de la tension appliquée  $U$  et on admettra qu'il

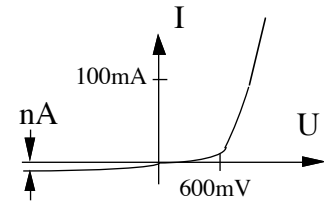
est donné par l'expression suivante:  $I_d(U) = I_d(U = 0) e^{\frac{qU}{kT}}$

On admettra 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 minoritaire et majoritaire et est donné par:

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

et la caractéristique de la jonction à l'allure suivante en l'absence d'éclairement.

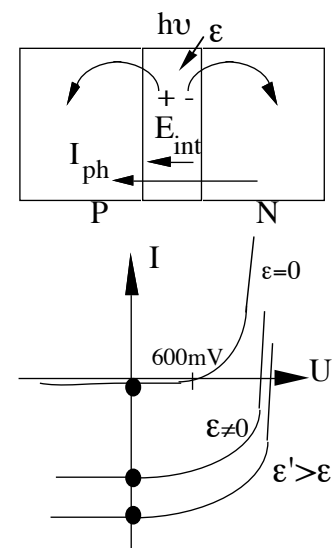


Quand la tension appliquée est négative la hauteur de la barrière est forte et est telle que le courant  $I(U)$  est un courant lié aux porteurs minoritaires (qui est de l'ordre du nA), la diode est alors bloquée.

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 dans l'équation donnant la valeur du courant circulant dans la diode). On dit que la diode est passante.

#### 4/ Effet photoélectrique

Un photon d'énergie  $h\nu$  supérieure à l'énergie du gap  $E_g$  est susceptible de donner naissance par effet photoélectrique à des photo-porteurs dans chacune des régions de la diode. Pour que ces porteurs puissent contribuer à un courant il faut éviter qu'ils ne se recombinent et pour cela ils doivent être séparés par l'action d'un champ. Ceci n'est possible que dans la zone de transition. 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  $I_{ph}$ .



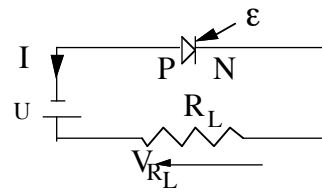
Ce courant photo-induit est un courant inverse de même sens que le courant lié aux porteurs minoritaires et dont l'intensité augmente avec le nombre de photons incidents sur la barrière. L'éclairement de la zone de transition a pour effet de translater la caractéristique de la diode vers le bas. Quand aucune tension extérieure n'est appliquée à la diode, on obtient les points correspondants à  $U=0$ .

Le courant  $I$  qui circule dans la diode en présence d'un éclairement  $\epsilon$  est donné par:

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

## II PRINCIPE DE LA DÉTECTION D'UN FLUX LUMINEUX

En général on ne mesure pas le courant photo induit directement mais la tension qui s'établit aux bornes d'une résistance de charge  $R_L$ . On mesure alors une tension  $V_{RL}$  qui normalement est proportionnelle au nombre de photons incidents. Le schéma de principe de la détection est le suivant:



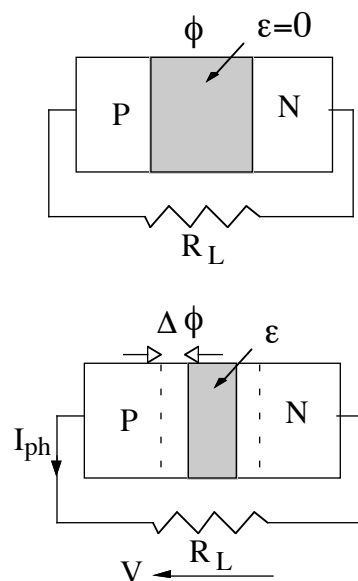
On distingue en général trois modes de fonctionnement. Le mode photoconducteur pour lequel  $U < 0$  et le mode photovoltaïque pour lequel  $U = 0$ . Le montage en transimpédance pour lequel un ampli opérationnel est utilisé.

### 1/ Montage (1) en mode photovoltaïque ( $U=0$ )

Dans ce cas aucune tension n'est appliquée à la diode. Le montage est représenté ci dessous.

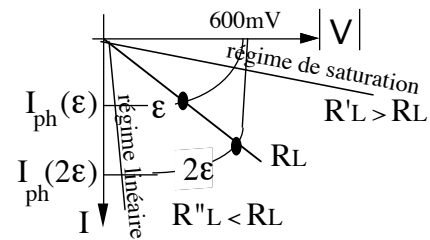
Si la diode est en court circuit  $R_L=0$  où si la résistance de charge est faible alors le courant  $I$  qui circule est le courant photo-induit  $I_{ph}$  proportionnel au flux lumineux incident  $\epsilon$ .

Par contre si la résistance de charge est quelconque une tension *induite*  $V$  non négligeable va apparaître aux bornes de celle-ci et va aussitôt s'appliquer aux bornes de la barrière. Le champ associé à cette tension  $V$  a un sens opposé au champ interne et donc réduit la barrière de potentiel (ce qui favorise le passage des porteurs majoritaires et réduit le courant photo induit). Dans ce type de fonctionnement la tension mesurée  $V$  représente directement la chute de potentiel  $\Delta\phi$  de la zone de transition. Celle-ci ne peut donc pas dépasser la hauteur initiale  $\phi$  de la barrière (600 mV pour le silicium).



Si la tension mesurée est faible devant  $\phi$  alors  $I = I_{ph}$  et le courant mesuré est proportionnel à  $\epsilon$  comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, mais si la chute de tension de la barrière est importante (en utilisant une trop forte résistance de charge par exemple) alors le courant des porteurs majoritaires vient réduire le courant photo-induit et la réponse n'est plus linéaire.

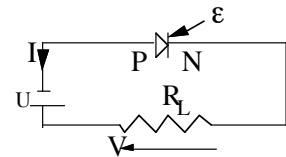
Dans la mesure d'un signal lumineux et pour ce type de fonctionnement, il est nécessaire d'ajuster parfaitement la résistance de charge utilisée. En effet une trop forte valeur entraîne un défaut de linéarité de la diode et une valeur trop petite conduit à des valeurs mesurées qui peuvent être très faibles et donc non significatives.



## 2/ Montage (2) en photoconducteur ( $U < 0$ )

Le courant  $I$  qui circule est donné par:  $I = I_{ph} - |I_s| \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$  et pour

une tension inverse de quelques volts on a l'approximation suivante  $I \approx I_{ph} + |I_s| \approx I_{ph}$ .



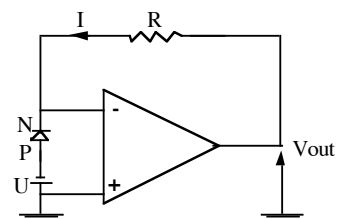
Le courant mesuré est encore proportionnel à l'éclairement  $\epsilon$  (en général  $I_{ph}$  est compris entre  $1\mu A$  et  $1 mA$ , ce qui est grand devant  $I_s$ ). Dans ce cas le champ extérieur que l'on applique est dans le même sens que le champ interne et s'ajoute à celui-ci ce qui a pour effet de renforcer la barrière de potentiel. Celle-ci va être maintenue plus longtemps que dans le régime précédent. L'intérêt de polariser la diode en inverse est donc de pouvoir obtenir un comportement qui reste linéaire pour des éclaircissements plus intenses.

## 3/ Montage en transimpédance

Le schéma de principe qui comprend un ampli opérationnel est représenté ci dessous.

### a/ montage (3) sans tension de polarisation ( $U=0$ )

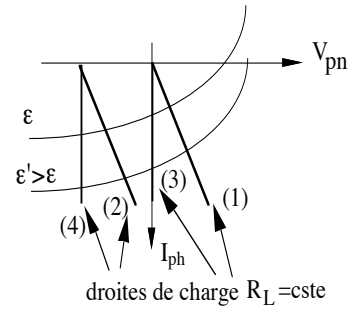
Dans ce cas, compte tenu de la présence de l'ampli opérationnel, les deux bornes P et N de la jonction sont fixées à un potentiel égal à zéro. La photodiode est donc court circuitée et le courant photo-induit traverse la résistance de charge  $R$ .




b/ montage (4) avec tension de polarisation ( $U \neq 0$ )

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

La caractéristique courant tension pour chaque type de montage est représentée ci-contre.



### III MESURES À EFFECTUER

- On utilise :
- une diode laser (670nm) de puissance 1 mW.
  - une photodiode Centronic BPW21 (  tension inverse max=10V.
  - un ampli OP AD744 (à alimenter en +12V et -12V)
  - une résistance de charge variable
  - un oscilloscope et un multimètre numérique
  - un jeu de filtres à densité ND variable pour atténuer l'intensité du faisceau laser.
- La transmission T du filtre est  $T = 10^{-ND}$ .
- un générateur basse fréquence
  - une alimentation servant à polariser la diode

#### A/ Mesures en statique

1/ Fixer l'éclairement à 1 mW. Pour chacun des trois montages *photovoltaïque*, *photoconducteur* (polariser la diode en inverse et ne pas dépasser 10V) et *transimpédance* (montage 3 sans polariser la photodiode), faire varier la résistance de charge de 1 kΩ à 500 kΩ et mesurer le courant I débité dans la résistance de charge ainsi que la tension Vpn aux bornes de la photodiode. Tracer I en fonction de Vpn.

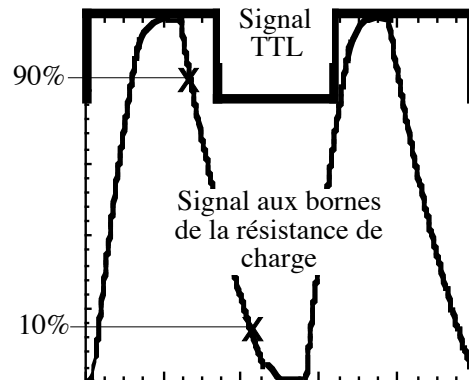
2/ Prendre  $R_L = 50 \text{ k}\Omega$  et faire varier l'éclairement  $\epsilon$  en utilisant les filtres de ND =0 à ND =3.

Tracer  $I = f(ND)$  pour les trois montages précédents (utiliser une échelle log pour l'intensité).

#### B/ Mesures en dynamique

1/ Mesure du temps de réponse

Faire le montage en photoconducteur (2). Fixer la résistance de charge à 10 k $\Omega$ . Fixer l'éclairement de telle façon à ne pas saturer la photodiode. Alimenter la diode laser à l'aide de la sortie **TTL** du générateur de fonctions et régler la fréquence à 10 kHz. La tension qui est mesurée aux bornes de la résistance de charge a la périodicité du signal d'entrée et a l'allure suivante sur l'écran de l'oscilloscope.



Le temps de réponse est essentiellement déterminé par le temps de charge ou décharge de la capacité équivalente de la diode dans la résistance de charge. On va mesurer le temps de décroissance qui est défini entre 10% et 90% du temps de décroissance total. Sur la figure, ce temps est compris entre les deux croix. Pour obtenir une mesure précise il est conseillé de dilater cette portion de courbe sur la totalité de l'écran. On utilisera également le signal TTL pour déclencher en externe le signal à mesurer. Le signal à mesurer ne doit pas dépasser 100 à 200 mV à fin de ne pas saturer la diode. Mesurer le temps correspondant à une variation du signal comprise entre 10% et 90% en fonction de la tension de polarisation  $V$ . En déduire la capacité  $C$ . Tracer  $C^{-2}$  en fonction de la tension de polarisation  $V$  (polariser la diode en inverse et ne pas dépasser 10V).

## 2/ Bande passante

Faire le montage (2) en mode photovoltaïque. Fixer la résistance de charge à 10 k $\Omega$ . Fixer l'éclairement de telle façon à ne pas saturer la photodiode. Alimenter la diode laser à l'aide de la sortie **TTL** du générateur de fonctions. Visualiser la tension aux bornes de la résistance de charge à l'oscilloscope ou mesurer cette tension à l'aide du multimètre (dans ce cas attention à sa bande passante). Faire varier la fréquence, mesurer la tension. Tracer le gain en dB

$$G (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{V}{V_{\max}} \right) \text{ en fonction de la fréquence en kHz (utiliser une échelle log pour la}$$

fréquence). En déduire la fréquence de coupure. En déduire le temps de réponse correspondant  $t_c$  ( $f_c = 0.35/t_c$ ) et comparer à la valeur précédente.