



Introduction aux dispositifs optoélectroniques utilisés en électronique de puissance

Joël Redoutey

Dispositifs optoélectroniques

SOMMAIRE

1 LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.....	3
1.1 LA JONCTION P-N A L'EQUILIBRE.....	3
1.2 LA JONCTION P-N EN POLARISATION INVERSE.....	4
1.3 LA JONCTION P-N EN POLARISATION DIRECTE.....	5
1.4 PRINCIPE DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.....	6
1.5 UTILISATION DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.....	8
2 LES DISPOSITIFS PHOTOSENSIBLES.....	9
2.1 PHOTODIODE.....	9
2.2 PHOTOTRANSISTOR.....	10
2.3 PHOTO-DARLINGTON.....	12
2.4 PHOTO-THYRISTOR.....	12
3 LES PHOTOCOUPLEURS.....	13
3.1 PHOTOCOUPLEURS A TRANSISTOR.....	14
3.2 PHOTOCOUPLEURS A DARLINGTON.....	14
3.3 PHOTOCOUPLEURS SPECIAUX.....	14
4 MODULES INTERRUPTEURS OU REFLECTEURS.....	15
4.1 MODULES INTERRUPTEURS OPTOELECTRONIQUES.....	15
4.2 MODULES REFLECTEURS OPTOELECTRONIQUES.....	15
5 CONCLUSION.....	16

INTRODUCTION AUX DISPOSITIFS OPTO-ELECTRONIQUES

Les progrès réalisés dans les domaines de l'optoélectronique et de la photo-électricité ont abouti à la commercialisation de composants massivement utilisés dans l'industrie, notamment les diodes électroluminescentes (LED) et les coupleurs optoélectroniques.

1 LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.

Depuis 1956, on sait qu'une jonction PN parcourue par un courant direct émet une radiation lumineuse. Cependant, en raison de difficultés technologiques, il a fallu attendre 1964 pour voir apparaître sur le marché des diodes émettant une radiation lumineuse dans le visible.

1.1 LA JONCTION P-N A L'EQUILIBRE.

Considérons une jonction P-N à l'équilibre (fig.1). La zone N renferme une certaine quantité d'électrons libres, alors que la zone P contient des trous.

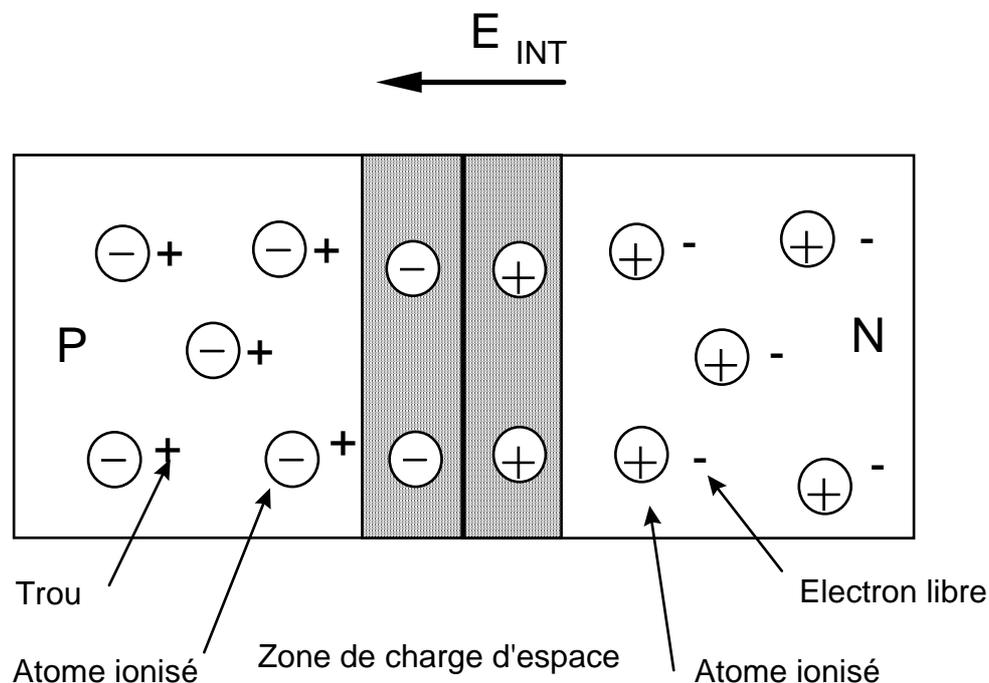


Figure 1. Jonction P-N à l'équilibre.

Au voisinage de la jonction, les électrons libres de la zone N vont diffuser vers la zone P et réciproquement les trous de la zone P vont diffuser vers la zone N.

Il y a recombinaison chaque fois qu'un électron rencontre un trou. Au repos, il existe donc au voisinage de la jonction une zone dans laquelle il n'y a plus de porteurs libres : du côté N il ne reste plus d'électrons libres et il ne subsiste que des atomes ionisés positivement. De même du côté P, il ne subsiste que des atomes ionisés négativement.

Il en résulte la création d'une zone de charge d'espace qui s'étend de part et d'autre de la jonction et par conséquent l'apparition d'un champ électrique interne E_{INT} qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires libres présents dans les régions N et P. Il s'établit ainsi une barrière de potentiel qui repousse les trous vers la zone P et les électrons vers la zone N.

1.2 LA JONCTION P-N EN POLARISATION INVERSE.

Lorsqu'on relie la jonction à une source de tension, pôle positif à la zone N et pôle négatif à la zone P, on crée un champ électrique E_{EXT} orienté dans le même sens que le champ électrique interne E_{INT} .

Il en résulte une élévation de la barrière de potentiel et une extension de la zone de charge d'espace. La jonction, qui est dite bloquée, ne laisse passer qu'un courant inverse très faible. (de l'ordre du micro-ampère).

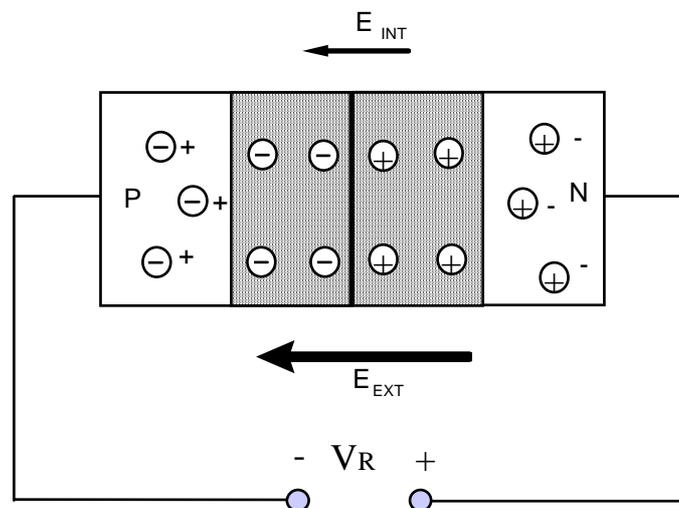


Figure 2. Jonction P-N polarisé en inverse.

Lorsqu'on augmente la valeur de la tension V_R appliquée à la jonction, on augmente le champ électrique E_{EXT} et donc le champ résultant (qui est maximal à la jonction).

Selon les niveaux de dopage des zones N et P, les épaisseurs respectives de ces zones et la géométrie de la jonction, deux cas sont à considérer :

- **Le claquage par effet ZENER.**

Lorsque le champ électrique à la jonction atteint une certaine valeur, il se produit un phénomène d'arrachement des électrons appelé effet Zener.

Le claquage par effet Zener n'intervient que pour des tensions $V_R = V_Z$ appliquées à la diode inférieures à 6 volts (cas du Silicium).

Le coefficient de température de la tension Zener V_Z est négatif.

- **Le claquage par effet d'AVALANCHE.**

Les charges électriques qui traversent la jonction (courant de fuite) reçoivent une énergie proportionnelle à la tension appliquée. Lorsque cette énergie atteint une valeur critique, il se produit une ionisation par chocs qui peut devenir cumulative ; c'est le phénomène d'avalanche.

L'avalanche se produit pour une tension appliquée $V_R = V_A$ dont le coefficient de température est positif.

1.3 LA JONCTION P-N EN POLARISATION DIRECTE.

Si maintenant on connecte le pôle positif de la source de tension extérieure à la zone P et le pôle négatif à la zone N, il s'établit un champ électrique E_{EXT} de sens opposé au champ interne E_{INT} (figure 3).

Pour une certaine valeur de la tension appliquée, le champ électrique E_{EXT} compense le champ interne E_{INT} . Il s'établit alors un courant I_F à travers la jonction qui est dite "passante".

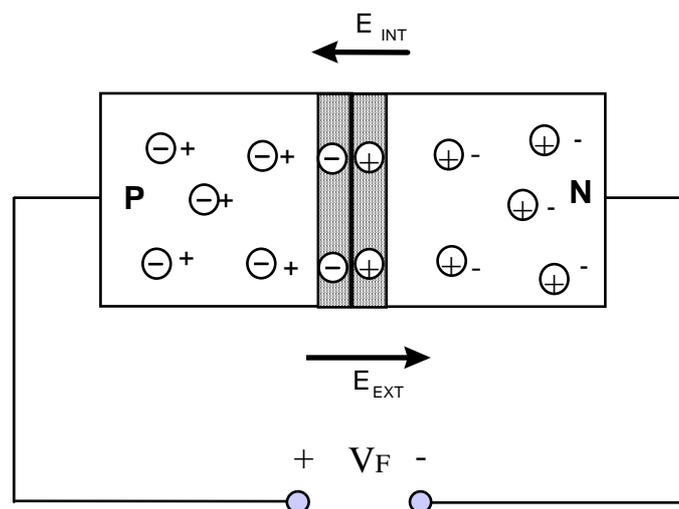


Figure 3. Jonction P-N polarisée en direct.

1.4 PRINCIPE DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES

Considérons une jonction PN polarisée dans le sens direct et parcourue par un courant I_F (figure 4).

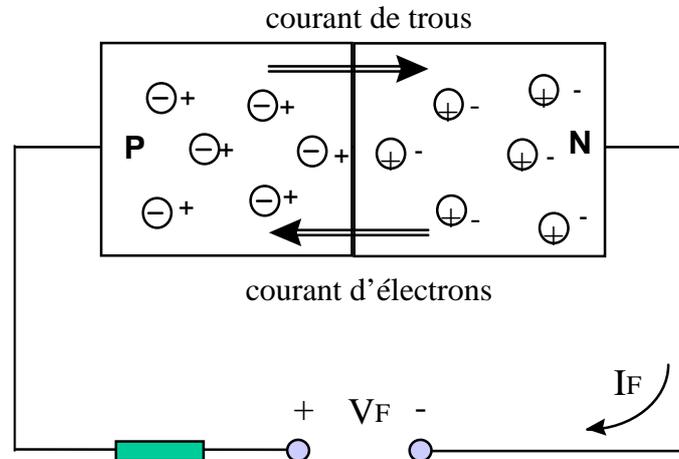


Figure 4. : Injection des porteurs minoritaires dans une jonction PN.

A l'intérieur du matériau, il y a injection de trous dans la zone N et d'électrons dans la zone P : c'est le phénomène d'injection des porteurs minoritaires.

Statistiquement, un certain nombre de porteurs minoritaires se recombinent en libérant de l'énergie. En effet, lorsqu'un électron libre rencontre un trou (c'est-à-dire une absence d'électron dans un atome, qui de ce fait est chargé positivement) il le comble.

L'énergie de cet électron passe donc de la bande de conduction à la bande de valence du matériau P, libérant par conséquent une énergie égale à la différence entre ces deux bandes (largeur de bande interdite ou band gap).

Une partie de cette énergie est libérée sous forme de lumière (photon) et le reste sous forme de chaleur (fig. 5).

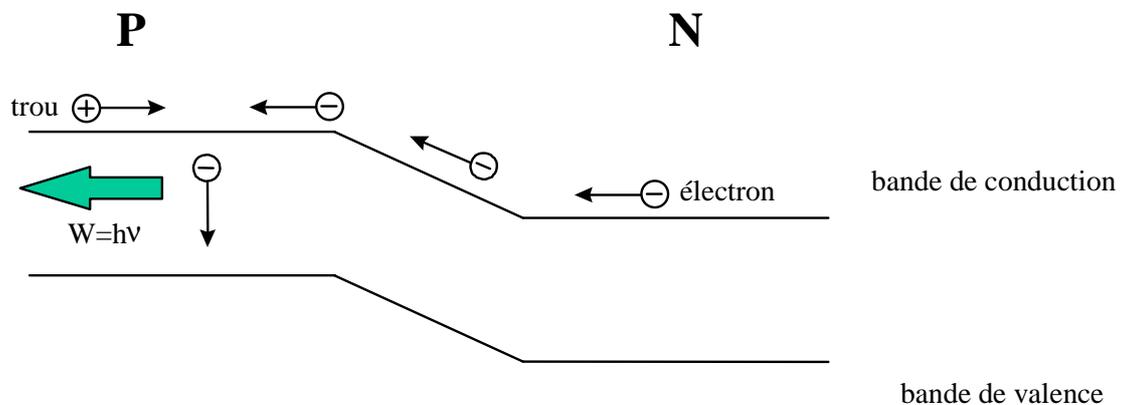


Figure 5. Emission d'un photon lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou

On voit donc que la fréquence de la radiation émise est directement liée à la largeur de la bande interdite (band gap).

L'énergie d'un photon s'écrit :

$$W = h\nu$$

h : constante de Planck ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Js)

ν : fréquence de la radiation émise (en Hz).

La longueur d'onde émise est donnée par la relation : $\lambda(A) \approx \frac{12370}{E_g}$

λ : longueur d'onde de la radiation émise (en Angström)

E_g : largeur de la bande interdite (en eV).

La tension de seuil d'une diode étant elle aussi fonction de la largeur de bande interdite, il existe une relation directe entre la tension de seuil de la diode et la fréquence de la radiation émise (figure 6).

Plus une jonction possède une tension de seuil élevée, plus elle émet haut dans le spectre.

De ce fait, les diodes germanium et silicium qui possèdent des tensions de seuil relativement faibles (environ 0,3V pour Ge et 0,7V pour Si) émettent dans l'infrarouge lointain.

La mise au point de diodes émettant dans le visible n'a donc pu s'effectuer qu'à partir d'un autre semi-conducteur : le gallium Ga dont le "Gap" vaut 1,4 eV (1,09 eV pour le silicium ; 0,66 eV pour le Germanium).

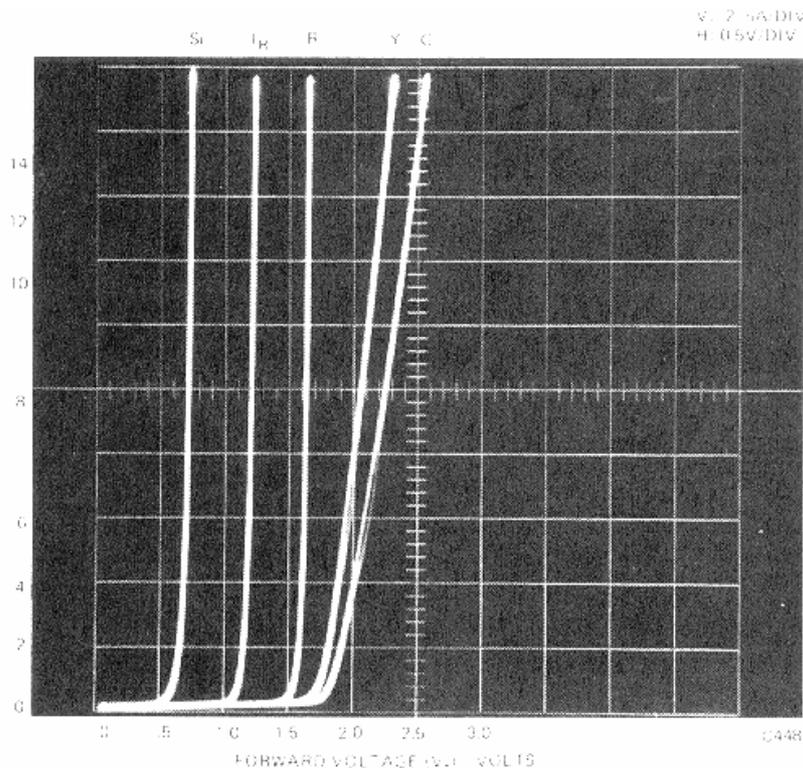


Figure 6. Caractéristiques I_f - V_f de diodes Si, GaAs (IR), GAAsP (rouge, jaune, vert)

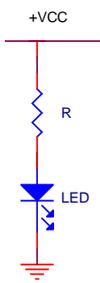
A partir de différents composés à base d'AsGa ou de GaP, on sait aujourd'hui fabriquer des diodes électroluminescentes émettant dans l'infrarouge, le rouge, le jaune, le vert et le bleu.

1.5 UTILISATION DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.

Les LED sont utilisées comme source lumineuse

- soit dans un but de visualisation (voyants ...)
- soit pour transmettre un signal (coupleurs optoélectroniques, capteurs ...).

Contrairement aux lampes à incandescence, une LED ne se pilote pas en tension mais en courant. Dans le cas général, une LED doit être connectée à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de limitation de courant (figure 7).



On utilise une LED rouge standard de diamètre 5mm qui est spécifiée :

$$V_F = 2V \text{ typ. } I_F = 20 \text{ mA}$$

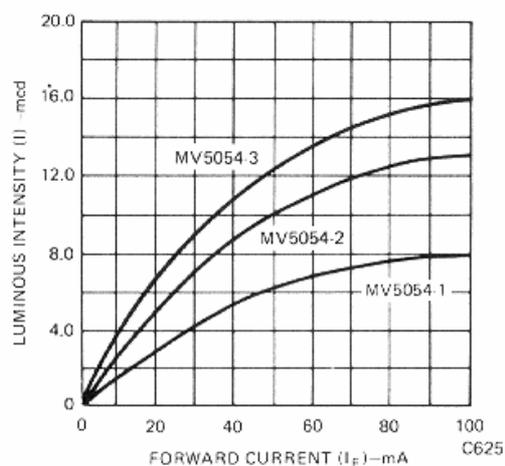
on en déduit la valeur de R.

$$R = \frac{5 - 2}{0,02} = 150\Omega$$

Tension d'alimentation $V_{cc} = 5V$

Figure 7 : Exemple de branchement d'une LED sur une source de tension.

L'intensité lumineuse émise par une LED dépend directement du courant qui la traverse comme le montre la figure 8.



Luminous Intensity vs. Forward Current

Figure 8. Intensité lumineuse en fonction du courant dans la diode électroluminescente.

Cependant, à fort niveau de courant, la puissance émise augmente plus vite que la puissance électrique fournie. On peut donc avoir intérêt dans certains cas à fonctionner en régime pulsé de fort courant mais avec un rapport cyclique réduit de manière à ne pas dépasser les limites thermiques de la diode.

A courant moyen égal, le régime pulsé conduit généralement à un meilleur rendement lumineux.

Le fonctionnement pulsé est fréquemment utilisé dans les circuits afficheurs multiplexés ou lorsqu'on désire régler la luminosité d'un afficheur (light dimmer).

2 LES DISPOSITIFS PHOTOSENSIBLES

Le fonctionnement des différents éléments photosensibles à semi-conducteur est basé sur le même principe physique. Lorsqu'un cristal semi-conducteur absorbe un photon d'énergie $W = h\nu$ supérieure à la largeur de sa bande interdite, il y a création d'une paire électron-trou ; un électron passant de la bande de valence à la bande de conduction laissant à sa place un trou.

2.1 PHOTODIODE

Considérons une jonction P-N polarisée en inverse (figure 9). Lorsque cette jonction est dans l'obscurité, elle est le siège d'un courant de fuite que l'on appelle courant d'obscurité.

Si l'on illumine cette jonction avec une radiation de longueur d'onde λ suffisamment faible, il y a création de paires électron-trou au sein du cristal.

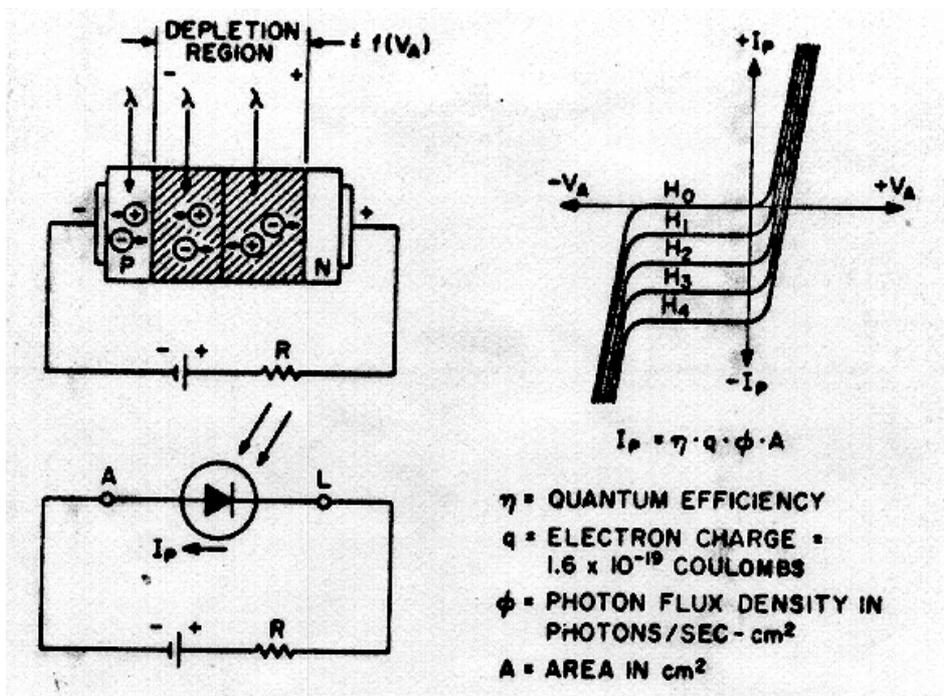


Figure 9 Photodiode à jonction PN.

Les porteurs ainsi générés sont balayés par le champ électrique présent dans la zone de déplétion. Il en résulte un courant électrique proportionnel à la densité du flux de photons incident. En fait, le circuit se comporte comme un générateur de courant commandé par la lumière.

Le coefficient de température est faible et le temps de réponse très court (inférieur à la microseconde).

L'absorption de la lumière dans le silicium décroît lorsque la longueur d'onde λ augmente. Cependant, lorsque la longueur d'onde de la radiation incidente décroît, une plus grande quantité de paires électron-trou est générée près de la surface ($W = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$)

De ces deux phénomènes contradictoires, il résulte une sensibilité maximale de la photodiode pour une certaine longueur d'onde (figure 10).

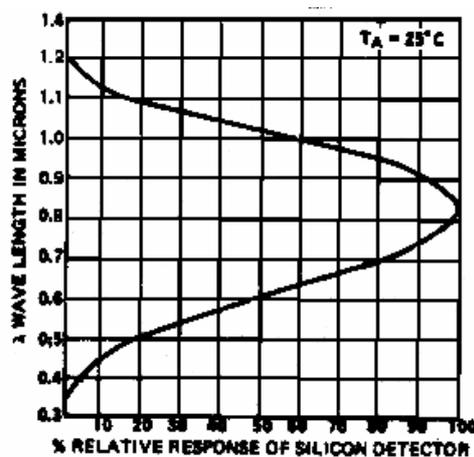


Figure 10 : réponse spectrale d'une photo diode.

Dans la pratique les photodiodes ne sont jamais utilisées seules du fait de la faiblesse du courant qu'elles peuvent délivrer. Elles sont donc généralement associées à un amplificateur qui est souvent intégré à la même puce. Les caractéristiques du composant ainsi formé deviennent alors celles de l'ensemble photodiode + amplificateur.

2.2 PHOTOTRANSISTOR.

Le phototransistor est la combinaison la plus simple d'une photodiode et de son amplificateur.

En dirigeant la lumière sur la jonction collecteur-base (qui est polarisée en inverse) on génère un courant base d'origine photonique qui est amplifié par le gain en courant β du transistor (figure 11).

Si la base est accessible de l'extérieur une polarisation du transistor est possible, on a :

$$I_E = (I_p + I_B) (\beta + 1)$$

I_p : courant base d'origine photonique

β : gain en courant du transistor.

I_B : courant base extérieur

I_E : courant émetteur

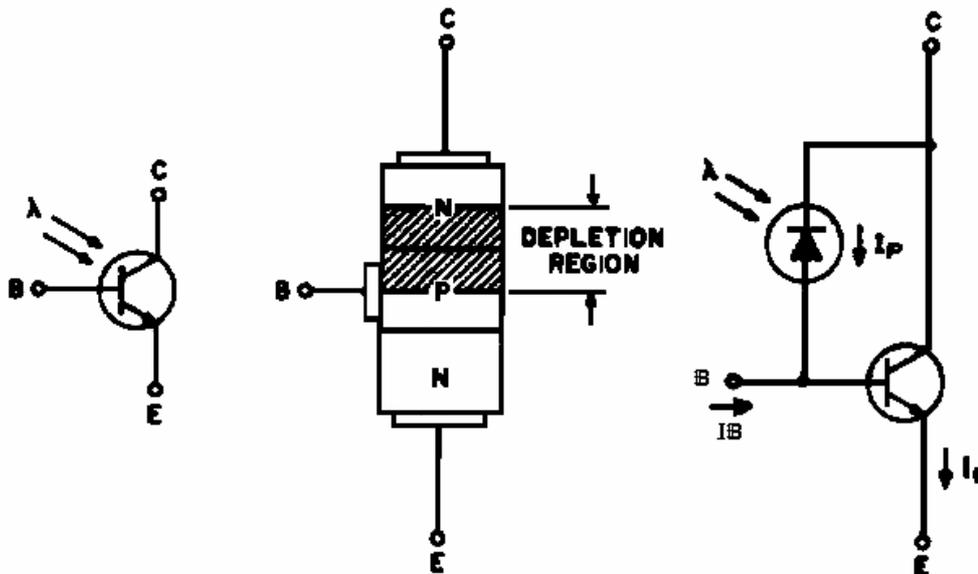


Figure 11. Fonctionnement d'un phototransistor

On remarque que la sensibilité et la réponse du phototransistor varient avec le gain du transistor, c'est-à-dire avec le niveau de courant, la polarisation éventuelle et la température. La vitesse de réponse du phototransistor est très inférieure à celle d'un transistor équivalent. Ceci est dû à la capacité de la photodiode d'une part associée à l'impédance d'entrée élevée du transistor d'autre part (figure 12).

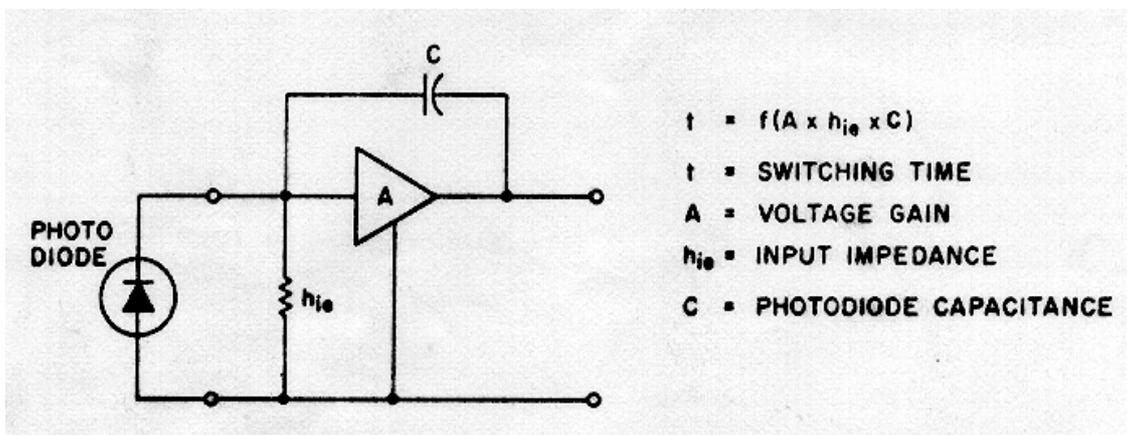


Figure 12. Rapidité d'un phototransistor.

De ce fait, le temps de réponse du dispositif est essentiellement gouverné par la constante de temps d'entrée de l'amplificateur. Ceci est général pour la plupart des photo détecteurs et l'on peut dire :

"plus le gain est élevé, plus la réponse est lente".

2.3 PHOTO-DARLINGTON.

Il s'agit d'un composant très voisin du phototransistor à l'exception du gain beaucoup plus élevé du fait de la structure à deux étages (fig.13).

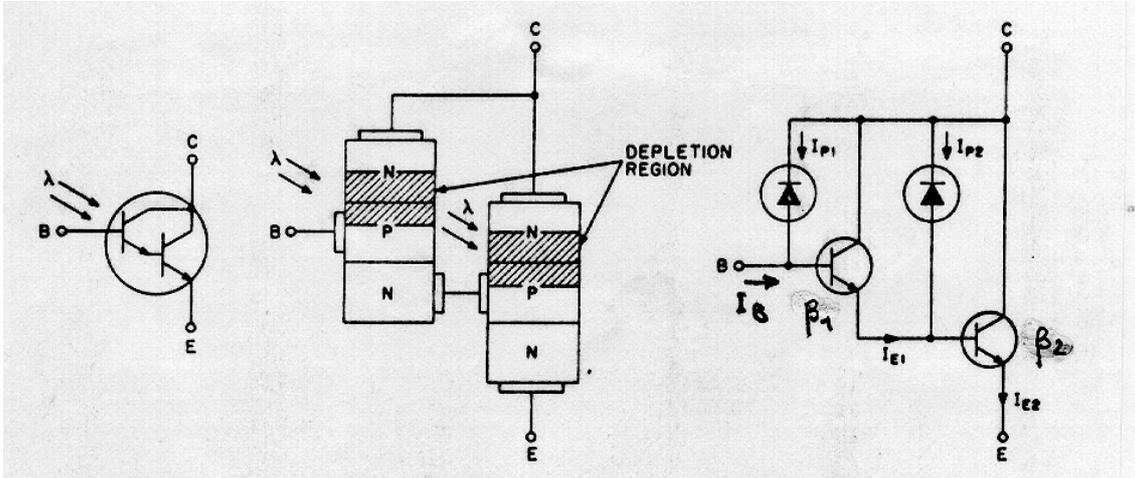


Figure 13. Photo Darlington

On peut écrire : $I_E = (I_{P1} + I_B) \beta_1 \beta_2$

Le produit $\beta_1 \beta_2$ pouvant aller de 10^3 à 10^5 , le photo-darlington se révèle un détecteur extrêmement sensible.

Par contre, son temps de réponse est beaucoup plus long que celui du phototransistor.

De même, le courant d'obscurité du photo-darlington est très supérieur à celui du phototransistor.

2.4 PHOTO-THYRISTOR

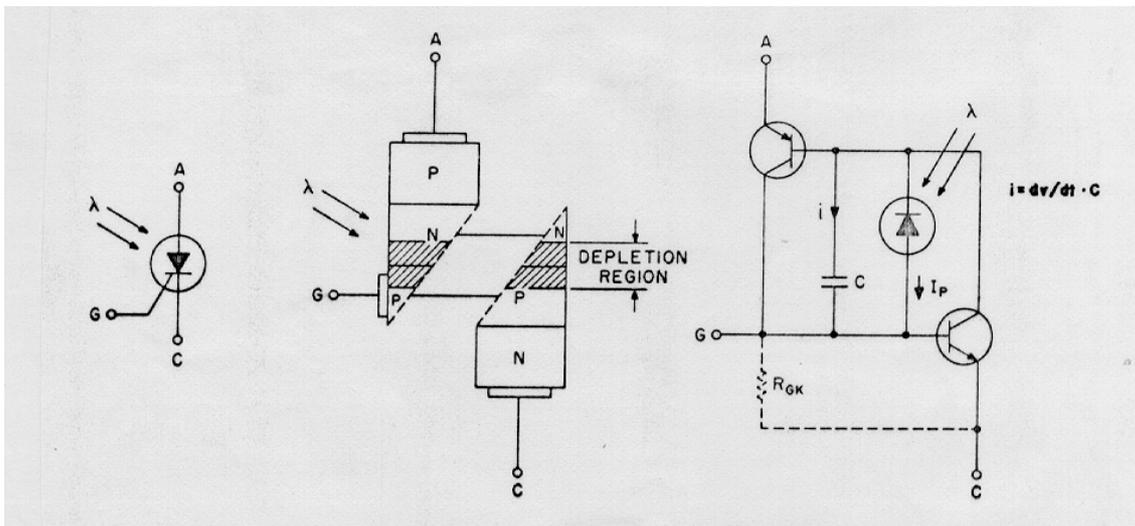


Figure 14. Photo thyristor et son schéma équivalent

La figure 14 illustre le fonctionnement de ce dispositif. Le schéma équivalent du thyristor à l'aide de deux transistors NPN et PNP permet de mieux saisir le mécanisme d'amorçage (fig.14).

Le courant d'origine photonique généré dans la jonction collecteur-base du transistor NPN provoque la conduction de celui-ci entraînant l'amorçage du thyristor de manière identique à un courant injecté dans la gâchette.

3 LES PHOTOCOUPLEURS

Les photo coupleurs ou coupleurs optoélectroniques sont des composants intégrant dans le même boîtier une diode émettrice infrarouge et un photo détecteur (phototransistor par exemple). Ces deux éléments sont couplés optiquement mais sont électriquement isolés (figure 15).

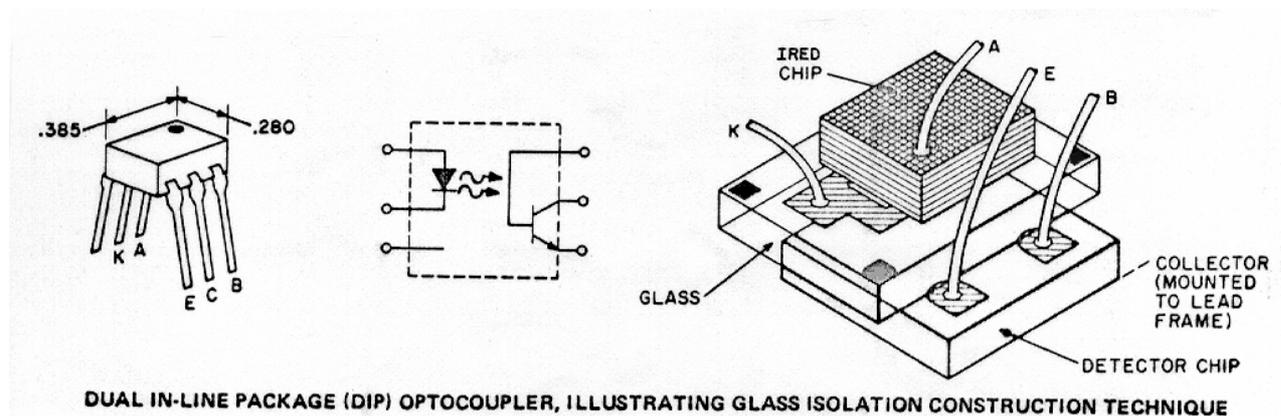


Figure 15 : Construction d'un opto-coupleur

L'utilisation d'un opto-coupleur permet donc la transmission unilatérale d'un signal entre deux circuits qui n'ont aucun point commun électrique (on dit que ces deux circuits sont galvaniquement isolés). Le degré d'isolement entre les deux circuits dépend de la qualité et de l'épaisseur du diélectrique séparant la diode émettrice du photo détecteur.

La construction du photo coupleur résulte donc d'un compromis entre l'isolement et "l'efficacité" du dispositif que l'on quantifie par le CTR (current transfert ratio) défini ainsi :

$$CTR(\%) = 100 \frac{I_{\text{photodétecteur}}}{I_{\text{diodeémettrice}}}$$

Dans le cas d'un photo coupleur utilisant un transistor comme détecteur, le CTR est le rapport du courant collecteur au courant dans la diode.

On distingue plusieurs types de coupleurs selon la nature du photo détecteur utilisé.

3.1 PHOTO COUPLEURS A TRANSISTOR.

C'est le type le plus répandu, Il se compose d'une diode infrarouge et d'un photo transistor (fig. 15).

Ces dispositifs présentent un CTR relativement faible (de 10 à 100% selon les modèles), une tension d'isolement élevée (de 2,5 kV à 10 kV), une faible capacité parasite (de l'ordre de 1 à 2 pF) et une rapidité relativement grande (temps de commutation de l'ordre de quelques microsecondes. Bande passante d'environ 300 kHz).

Certains modèles très rapides présentent des temps de commutation inférieurs à la microseconde.

3.2 PHOTOCOUPLEURS A DARLINGTON.

Dans ce type de coupleur, le détecteur est un photo Darlington (fig.16), ce qui procure un CTR beaucoup plus élevé (de 100 à 1000 % selon les modèles).

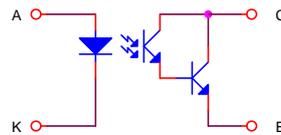


Figure 16 : Photo coupleur à Darlington.

La tension d'isolement et la capacité parasite sont les mêmes que dans le cas du coupleur à transistor. Par contre, la rapidité est très inférieure (temps de commutation de l'ordre de plusieurs dizaines de microsecondes et fréquence de coupure dépassant rarement 30 kHz).

Du fait du gain très important du Darlington, ces coupleurs sont assez sensibles au dV/dt .

N.B. Le CTR d'un opto coupleur est un paramètre relativement instable dans le temps. On veillera donc à n'utiliser les opto coupleurs en linéaire qu'à l'intérieur d'une boucle de régulation.

3.3 PHOTOCOUPLEURS SPECIAUX.

En dehors des deux types précédents, on rencontre d'autres modèles de coupleurs, par exemple :

- coupleurs à photo thyristor
- photo déclencheurs de triac
- photo déclencheurs de triac au zéro secteur
- coupleurs à sortie compatible TTL, etc...

4 MODULES INTERRUPTEURS OU REFLECTEURS.

Contrairement aux coupleurs optoélectroniques, les modules se composent d'une diode infrarouge et d'un photo détecteur dont le couplage optique s'effectue à l'extérieur du composant. De ce fait, la transmission lumineuse peut être interrompue par la présence d'un corps opaque.

4.1 MODULES INTERRUPTEURS OPTOELECTRONIQUES.

Ces produits sont composés d'une diode infrarouge placée face à un phototransistor, tous deux insérés dans un boîtier plastique. Une fente ménagée dans le boîtier entre la diode émettrice et le phototransistor permet d'interrompre le signal lumineux par l'introduction d'un élément opaque (figure 17).

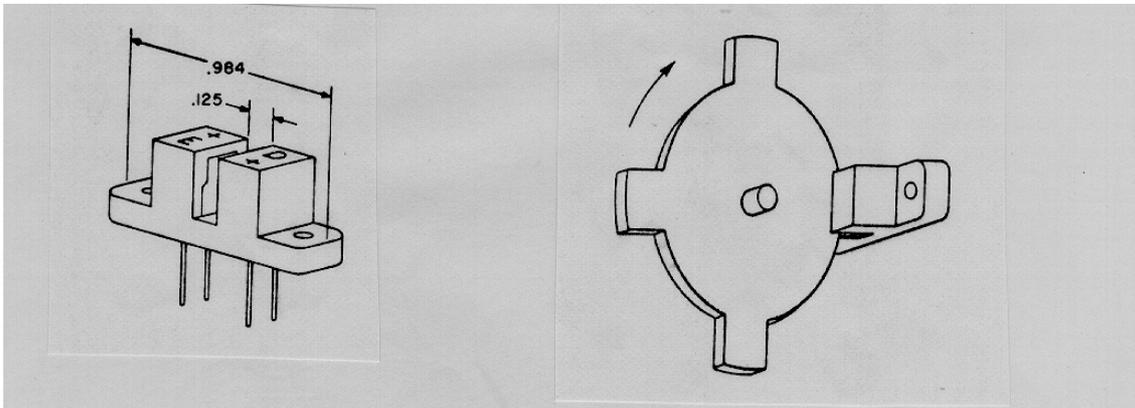


Figure 17 : Module interrupteur et exemple d'utilisation.

4.2 MODULES REFLECTEURS OPTOELECTRONIQUES.

Dans ce type de module, l'émetteur et le détecteur ne sont plus placés face à face, mais sont inclinés comme l'indique la figure 18.

De ce fait, la transmission lumineuse ne peut s'effectuer qu'en présence d'un corps réfléchissant.

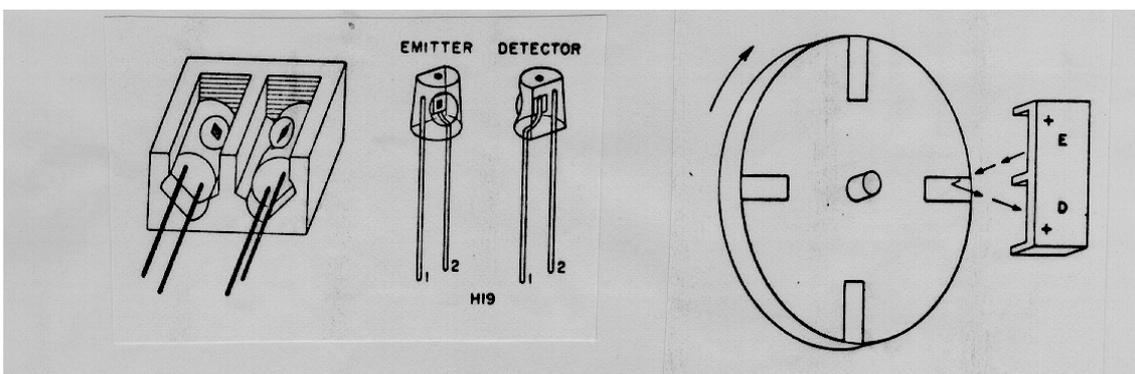


Figure 18 : Constitution et application des modules réflecteurs optoélectroniques.

5 CONCLUSION.

Les dispositifs optoélectroniques sont présents dans tous les domaines de l'électronique.

La diode électroluminescente a remplacé le voyant à incandescence, la barrette lumineuse (bar graph) a supplanté le galvanomètre à aiguille dans les applications "grand public" et l'afficheur sept segments a détrôné le tube Nixie. Mais cet essor de l'optoélectronique a surtout permis la réalisation de composants tels que les photo coupleurs, massivement utilisés dans l'industrie pour assurer l'isolement galvanique des circuits, les modules interrupteurs ou réflecteurs utilisés comme capteurs ou les composants de transmission par fibre optique.

Parallèlement, d'autres branches de l'optoélectronique connaissent un développement important. Citons par exemple :

- Les afficheurs à cristaux liquides (LCD)
- Les afficheurs à plasma
- Les dispositifs à transfert de charges (CCD)
- Les diodes Laser
- Les cellules photovoltaïques
- etc ...