

9. Les détecteurs

Parmi les détecteurs les plus utilisés, on retient les photodiodes pn, pin et à avalanche. Dans ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu du fonctionnement de ces trois types de détecteurs.

9.1. La photodiode p-n

9.1.1. Principe

La photodiode pn est, comme son nom l'indique, une jonction p-n, généralement utilisée en polarisation inverse. Dans ce cas, les porteurs majoritaires sont bloqués par le champ électrique dans la zone de charge d'espace, et le courant résulte donc du passage des porteurs minoritaires à travers la jonction. Le courant est dans ce cas limité par le faible taux de génération de porteurs minoritaires dans le voisinage de jonction.

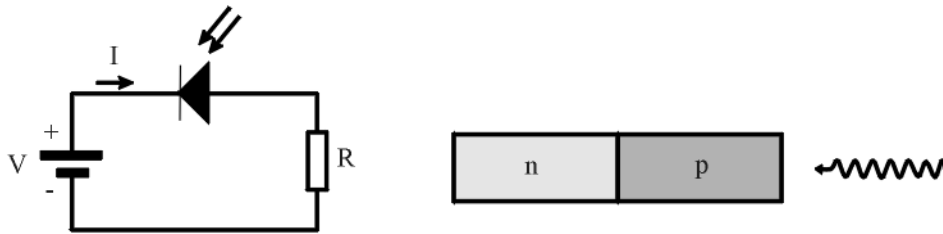


Figure 9-1. Détection de lumière à l'aide d'une diode p-n polarisée dans le sens bloquant.

Sous l'action de la lumière, des paires électron-trou peuvent être générées dans le semiconducteur, si la longueur d'onde de la lumière est inférieure à

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g},$$

ce qui correspond à une énergie de photons supérieure à la largeur de la bande interdite.

Supposons qu'une paire électron-trou est ainsi générée dans la zone de charge d'espace. Sous l'action du champ électrique qui règne dans cette zone, le trou sera accéléré vers la zone p où il s'ajoute aux porteurs majoritaires et l'électron sera accéléré vers la zone n. Il en résulte donc

une séparation de la paire électron-trou et un courant dans le sens de n vers p, c'est-à-dire une augmentation du courant inverse dans la diode.

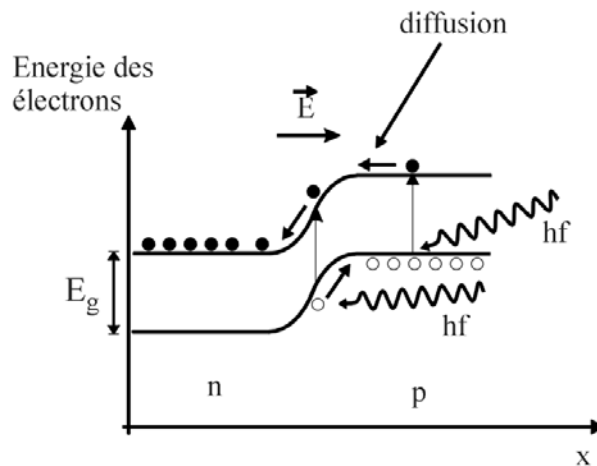


Figure 9-2. Diagramme d'énergie d'une jonction p-n polarisée dans le sens bloquant. Les paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace (déplétion) sont séparées par le champ électrique et donnent un courant dans le sens du champ. Des porteurs minoritaires créés dans les régions neutres contribuent au courant s'ils sont générés suffisamment près de la jonction.

Regardons maintenant ce qui se passe si une paire électron-trou est créée dans le semiconducteur de type p, près de la zone de charge d'espace. La majorité des porteurs ainsi créés diffusent de manière aléatoire sur une certaine distance avant de se recombiner: ils disparaissent donc à nouveau et ne donnent pas de courant net dans la diode. Si la paire a été créée suffisamment près de la zone de charge d'espace et si l'électron diffuse vers la jonction, il pourra éventuellement être accéléré à travers la jonction par le champ électrique qui y règne. De cette manière, il passe du côté n et on obtient une augmentation du courant inverse à travers la jonction. De la même manière, un trou créé du côté n pourra passer vers le côté p, et contribuer également au courant inverse dans la diode.

Idéalement, le courant inverse sera proportionnel à l'intensité de la lumière et nul en l'absence de lumière. Dans ce cas, la tension aux bornes de la résistance R sera proportionnelle au courant, et donc proportionnelle à l'intensité de la lumière. En réalité, un faible courant existe même dans le noir (courant d'obscurité).

9.1.2. Temps de réponse d'une photodiode pn

Supposons que l'intensité lumineuse sur la photodiode augmente brusquement de 0 à une certaine valeur P . Les paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace sont immédiatement accélérées et provoquent donc une augmentation quasi-instantanée du courant dans la diode. Comme la zone de charge d'espace est généralement assez mince, une grande partie des photons sont absorbés en dehors de la zone de charge d'espace. Les charges ainsi créées doivent d'abord diffuser jusqu'à la zone de charge d'espace, ce qui prend un certain temps. Il en résulte une augmentation progressive du courant, et le maximum du courant est atteint avec un retard par rapport au maximum de l'intensité lumineuse. Le temps de réponse, défini comme le temps nécessaire pour que le courant augmente de 10 % à 90 % de sa valeur finale, est de l'ordre de la microseconde pour les diodes p-n habituelles. Par conséquent, ces détecteurs ne conviennent pas bien pour les applications à fréquence élevée.

9.2. La photodiode PIN

9.2.1. Principe et temps de réponse

Les diodes PIN sont les détecteurs les plus couramment utilisés avec les fibres optiques. Schématiquement, il s'agit d'un semiconducteur intrinsèque (i.e. non dopé), pris en sandwich entre un semiconducteur de type n et un semiconducteur de type p. La concentration de charges libres dans le semiconducteur intrinsèque est très faible, ce qui lui procure une résistivité élevée. Le champ électrique sera donc grand dans cette région de résistivité élevée, et faible dans les parties n et p, de résistivité plus faible.

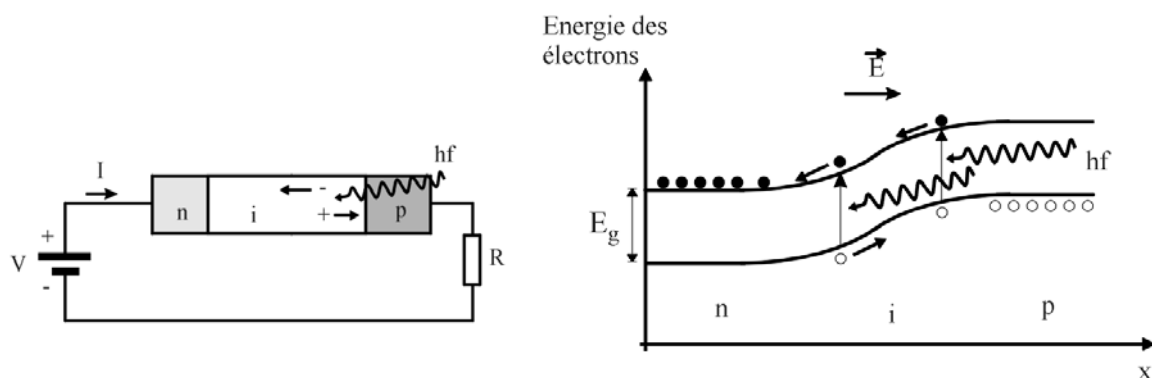


Figure 9-3. Diode PIN comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie correspondant.

Par rapport à la jonction p-n simple, la zone de champ électrique non nul a été élargie par rapport aux zones conductrices, ce qui augmente la probabilité d'absorption et donc de création de paires électron-trou dans cette région. Comme les paires électron-trou sont donc créées principalement dans la zone avec champ électrique, elles ne doivent pas diffuser avant d'être accélérées, et l'augmentation du courant est plus rapide. Le temps de réponse est ici le temps nécessaire pour que les charges libres traversent la zone de déplétion (temps de transit). Il est typiquement de l'ordre de la nanoseconde. Comme la vitesse de dérive des charges est proportionnelle au champ électrique, le temps de réponse dépend de la tension appliquée à la diode. des tensions plus élevées donnent des temps de réponse plus courts. De plus, les charges + et - sont immédiatement séparées, ce qui diminue la probabilité de recombinaison et augmente l'efficacité du détecteur.

Exemple.

Soit une diode PIN au silicium, avec une zone intrinsèque d'une épaisseur de 15 μm . Calculer le temps de réponse dû au temps de transit des charges à travers la zone intrinsèque si la tension appliquée est de -10 V. On donne la mobilité des charges dans le Ge: $\mu_p = 350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.

Comme la mobilité des trous est inférieure à celle des électrons, c'est elle qui limitera le temps de réponse. La vitesse de dérive des trous est donnée par

$$v_d = \mu_p E = \mu_p \frac{V}{d} = 350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \frac{10 \text{ V}}{15 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 2,3 \times 10^6 \text{ cm/s}$$

Le temps de réponse vaut alors

$$\tau = \frac{d}{v_d} = \frac{15 \times 10^{-4} \text{ cm}}{2,3 \times 10^6 \text{ cm/s}} = 0,6 \text{ ns}$$

Le temps de transit n'est pas le seul facteur qui limite la bande passante. En effet, l'analyse de la jonction p-n a montré la présence de charges + et - se faisant autour de la jonction (chapitre 7). Ces charges peuvent être assimilées aux charges sur les armatures d'un condensateur plan. La diode possède donc une petite capacité parasite C_d , de l'ordre du

picofarad. Du point de vue électrique, cette capacité est placée en parallèle avec la diode et constitue donc une déviation possible pour le courant généré dans la diode. Supposons que le courant dans la diode varie de manière périodique, avec une fréquence f . La déviation par la capacité devient importante si la fréquence f est élevée, puisque l'impédance de C_d diminue comme $1/f$. Comparons l'amplitude de la tension qu'on aurait aux bornes de R en l'absence de la capacité parasite, avec la valeur réellement mesurée aux bornes de R . L'amplitude réelle est inférieure, puisqu'une partie I' du courant passe dans C_d . Le rapport des amplitudes vaut 0,707 quand $X_{C_d} = R$, soit

$$\frac{1}{2\pi f C_d} = R.$$

On en déduit la bande passante à -3dB , en cas de limitation par la capacité parasite:

$$f_{-3\text{dB}} = \frac{1}{2\pi R C_d}.$$

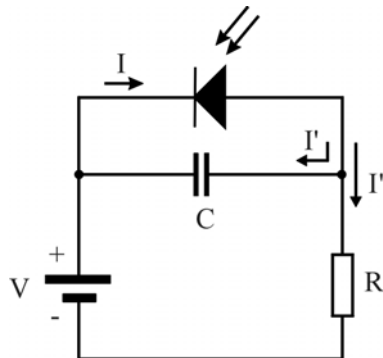


Figure 9-4. Influence de la capacité parasite de la photodiode sur le courant dans le circuit de détection.

9.2.2. Choix des matériaux

Le choix du semiconducteur détermine la gamme de longueur d'onde où le détecteur peut fonctionner. La sensibilité du détecteur est un paramètre important pour l'utilisateur. Elle est définie par

$$S_d = \frac{I_s}{P_o} (A/W),$$

où I_s est le courant électrique fourni par le détecteur et P_o la puissance optique arrivant sur le détecteur (énergie du rayonnement par seconde).

La sensibilité dépend de la longueur d'onde. En effet, la sensibilité augmente généralement quand la longueur d'onde augmente. Cela est dû au fait qu'on a plus de photons par watt aux grandes longueurs d'onde qu'aux petites, ce qui donne davantage de créations de paires électron-trou aux grandes longueurs d'onde. De plus, aux petites longueurs d'onde, l'absorption est plus forte dans les zones neutres, avant même que le photon n'atteigne la région intrinsèque. Toutefois, le rayonnement de longueur d'onde supérieure à $\lambda_c = \frac{hc}{E_g}$ ne peut pas créer de paires électron-trou. La sensibilité passe donc par un maximum pour une longueur d'onde légèrement inférieure à λ_c , qui dépend de la nature du semiconducteur. La figure 9-5 montre la sensibilité pour le silicium et l'InGaAs.

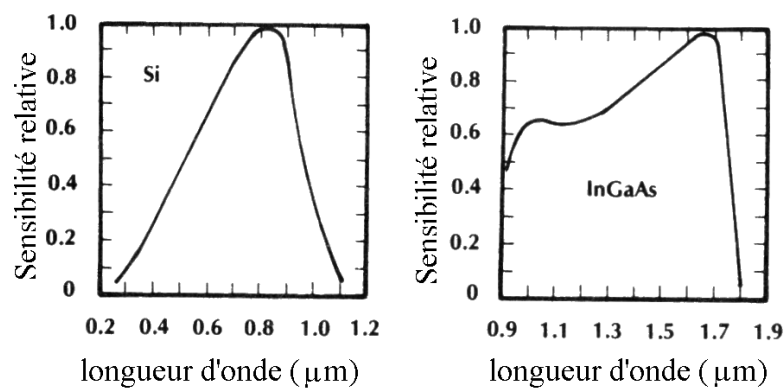


Figure 9-5. Sensibilité d'une photodiode en silicium et en InGaAs, en fonction de la longueur d'onde. Les courbes ont été normalisées par rapport à la sensibilité maximale. On constate que le silicium convient surtout pour les longueurs d'onde de 0,5 à 1 μm, alors que l'InGaAs peut être utilisé entre 0,9 et 1,7 μm.

Les détecteurs pour l'infrarouge à plus grande longueur d'onde nécessitent des semiconducteurs à bande interdite étroite. Malheureusement, une bande interdite étroite implique une augmentation de la génération thermique de paires électron-trou, proportionnellement à $\exp(-E_g/kT)$, et donc un courant d'obscurité plus élevé qui peut rendre difficile la détection de faibles puissances optiques. Une solution efficace mais coûteuse et difficile à mettre en oeuvre consiste à refroidir le détecteur pour réduire le courant d'obscurité.

9.3. La photodiode à avalanche

Si on reprend la diode PIN mais qu'on lui applique une tension inverse élevée, on obtient un champ électrique intense dans la région intrinsèque, aussi appelée région semi-isolante. Si le champ est suffisamment intense, de l'ordre de quelques 10^5 V/cm, les charges générées dans la zone semi-isolante peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser un atome neutre. De cette manière, une nouvelle paire électron-trou est créée, et le processus peut continuer. Pour chaque paire créée par l'absorption d'un photon, on obtient ainsi M paires au total: on dit qu'il y a multiplication des paires électron-trou par avalanche. Par rapport à une diode PIN sans multiplication par avalanche, on obtient donc un gain en courant égal à M .

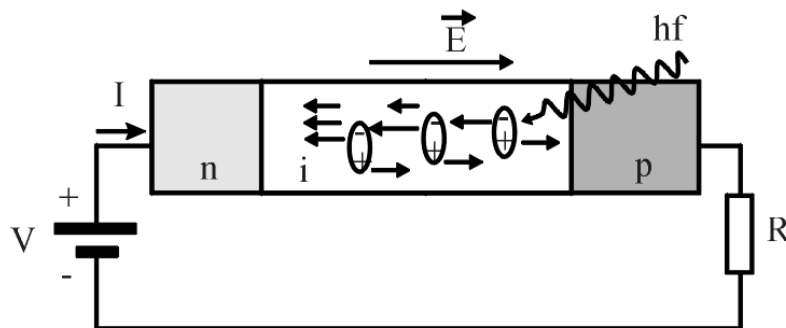


Figure 9-5. Multiplication par avalanche des paires électron-trou dans la région intrinsèque dans une diode PIN polarisée dans le sens bloquant.

Pour atteindre les champs intenses nécessaires à la multiplication par avalanche dans une diode PIN dont la région intrinsèque a en général une épaisseur de l'ordre de $20 - 40 \mu\text{m}$, il est nécessaire d'appliquer une tension de l'ordre de 500 V . Ceci est difficile à mettre en oeuvre dans des circuits miniaturisés de faible consommation. Une solution serait de réduire l'épaisseur de la zone intrinsèque, mais celle-ci doit rester de l'ordre de $1/\alpha$ (α = coefficient d'absorption de la lumière) pour obtenir une génération de paires électron-trou suffisante.

La diode $p^+\pi p$ est une variante de la diode PIN qui combine une couche d'absorption suffisamment épaisse avec une zone de multiplication étroite. Les régions p^+ et p sont les zones déjà connues de la diode PIN. Elles sont fortement dopées pour avoir une résistivité faible. Les zones π sont très légèrement dopées, "presque intrinsèques". La chute de potentiel est localisée principalement entre les régions p et p^+ , à travers la région π étroite. En effet, on

n'obtient presque pas de chute de potentiel entre une zone p et une zone p^+ . Par conséquent, le champ électrique est intense dans la zone π étroite.

L'absorption a lieu principalement dans la zone π épaisse. Les trous générés se déplacent vers la zone p^+ où ils sont collectés et contribuent au courant inverse. Les électrons se déplacent dans le sens contraire au champ électrique. Quand ils atteignent la zone p entre les deux zones π , ils sont accélérés vers la zone π étroite où le champ est intense. La multiplication par avalanche se produit alors dans cette zone étroite, et les charges sont séparées sous l'action du champ électrique. Comme la région de multiplication est étroite, une tension faible suffit pour produire le champ nécessaire à la multiplication.

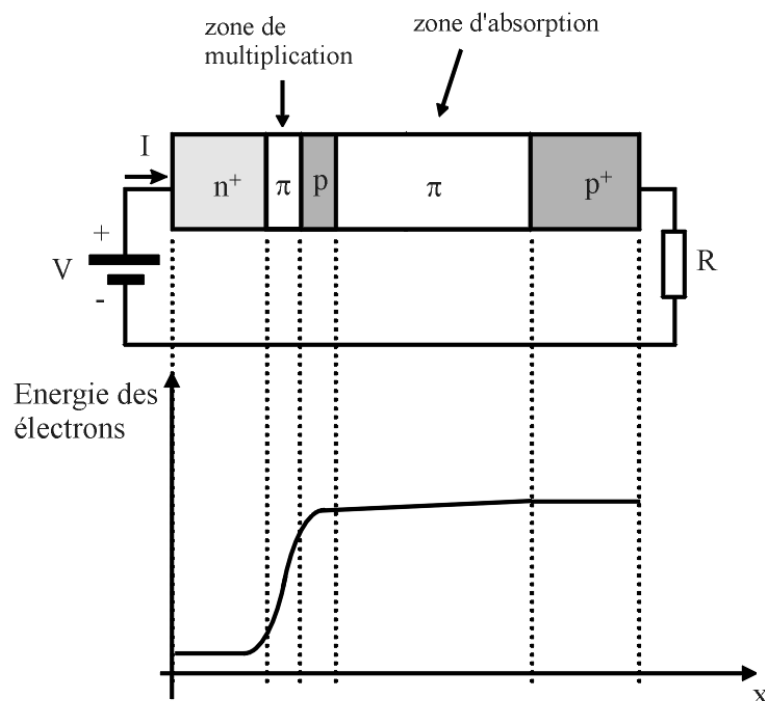


Figure 9-3. Photodiode à avalanche $p^+\pi p\pi^+$ comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie des électrons correspondant.

Les photodiodes à avalanche offrent une très bonne sensibilité, de l'ordre de quelques dizaines d'A/W, soit 20 à 100 fois plus qu'une diode PIN. Elles sont linéaires pour des puissances optiques entre une fraction de nanowatt et quelques μW . Pour des puissances supérieures, une diode à avalanche n'est pas nécessaire: une simple diode PIN ou pn suffit. Leur bande passante est élevée, avec un temps de montée de l'ordre de quelques 100 ps.