

DISPOSITIFS OPTOELECTRONIQUES

Généralités

La lumière est la source principale de la vie, elle est la source principale de l'énergie de la nature sans elle la vie n'est pas possible. Il existe trois théories pour décrire sa nature:

- La théorie de Newton dit que la lumière se propage de façon rectiligne et à grande vitesse.
- La théorie des ondulations soutient que la lumière consiste à l'énergie propagée dans un milieu sous forme d'onde électromagnétique. C'est ce qui expliquerait le phénomène de réflexion ou de réfraction et d'interférence.
- La théorie corpusculaire dit que la lumière est composée de particule d'énergie appelée photon.

Dans les trois théories une constante apparaît $h=6,62 \times 10^{-34}$; $c=3 \times 10^8$; $E=h\nu$

h : constante de Planck

ν : fréquence de l'onde.

Spectre électromagnétique

L'optoélectronique est la science qui associe l'optique à la technologie de l'électronique. Elle est très récente (1960). La découverte de la technologie des semi-conducteurs et des LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) a permis à l'optoélectronique de passer de la théorie à la pratique.

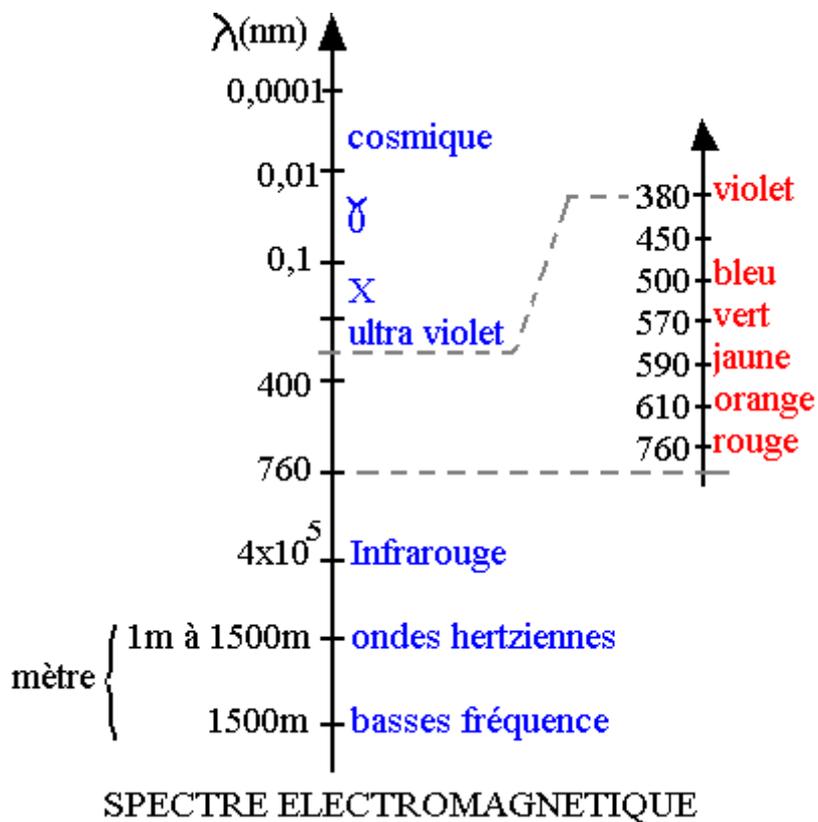
A l'optoélectronique on se soucie à la partie du spectre optique qui se situe de l'ultra violet à l'infrarouge en passant par le spectre visible. Le rayonnement d'une source lumineuse se définit comme une émission de particule comportant plusieurs radiations élémentaires. Si on envoie sur un prisme de vers un rayon lumineux on distingue une décomposition, ce dernier en différentes allant du violet au rouge.

Une lumière est dite monochromatique lorsqu'elle n'est constituée d'une seule radiation.

Une lumière complexe se disperse grâce au phénomène de la dispersion en plusieurs lumières monochromatique.

Le spectre électromagnétique est formé de trois parties:

- Les ondes ultraviolettes
- Les ondes visibles
- Les ondes infrarouges



On utilise l'infrarouge dans beaucoup d'application telles que les alarmes, la communication, la médecine.

Quelques définitions

- Flux lumineux: c'est la quantité de lumière émise par unité de temps, il est exprimé en lumen (lm) ; $\phi = Q_L/t$
- Eclairement lumineux: c'est le rapport entre le flux lumineux émis par une source et l'air de la surface qui reçoit ce flux. Il est exprimé en lux (lx) ; $E = \phi(lm)/S(m^2)$
- Intensité lumineuse: c'est le rapport entre le flux lumineux ϕ d'une source qui illumine une surface dans une direction donnée et l'angle solide de la source avec l'aire de détection, la source étant un point.

Angle solide: angle ayant son sommet au centre d'une sphère et découpant sur sa surface une aire égale à celle d'un carré qui aurait pour côté le rayon de la sphère exprimé en stéradian (str)

Intéraction Lumière matériau

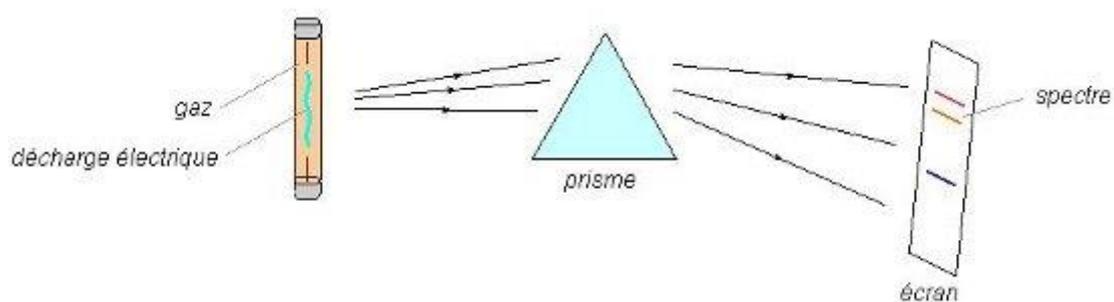
Objectif(s)

Savoir ce que sont des spectres d'émission et d'absorption. Maîtriser la notion de photon. Connaître la quantification des niveaux d'énergie de l'atome. Savoir utiliser les diagrammes d'énergie pour décrire l'émission et l'absorption des photons.

1. Approche expérimentale : les spectres de raies

a. Spectre d'émission

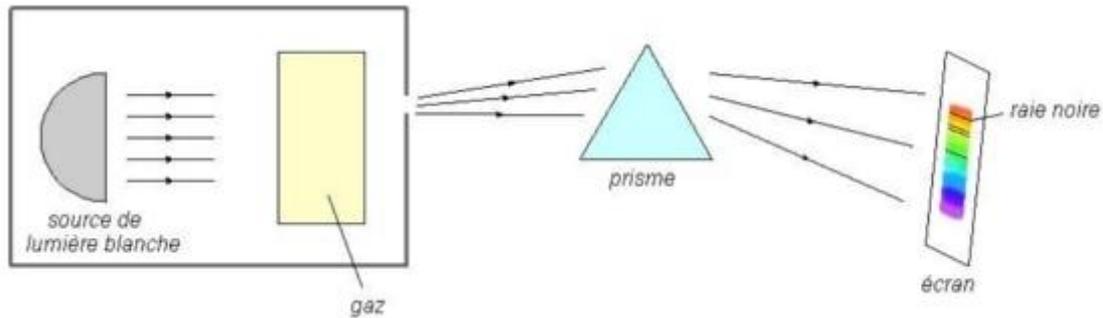
Un gaz confiné dans une **enceinte hermétique** est soumis à des **décharges électriques**. Le gaz produit alors un rayonnement, qui est envoyé sur un prisme pour le décomposer et obtenir son spectre. Celui-ci est composé de **raies brillantes**.



Le spectre obtenu est nommé **spectre d'émission** du gaz étudié. Il est différent d'un gaz à l'autre.

b. Spectre d'absorption

Un gaz contenu dans une enceinte est éclairé par une **lumière blanche** puissante. La lumière transmise par le gaz est envoyée sur un prisme pour obtenir son spectre. Celui-ci se présente comme le spectre de la lumière blanche (bandes continues), mis à part la présence de raies sombres, nommées **raies noires**, ou **raies d'absorption**.



Le spectre obtenu est le **spectre d'absorption** du gaz. Comme pour le spectre d'émission, il change d'un gaz à l'autre.

2. La théorie

Avant de pouvoir interpréter les spectres d'émission et d'absorption, il convient de voir certains aspects théoriques.

a. Le photon

Deux modèles distincts existent pour décrire la lumière :

- le modèle ondulatoire (la lumière est une onde)
- le modèle corpusculaire (la lumière est un faisceau de particules).

En fait, la lumière est à la fois une onde et un faisceau de particules.

Dans le **modèle corpusculaire**, les **particules de lumière sont nommées photons**. Chaque photon a une énergie qui est donnée par la **relation de Planck** :

$$E = h \cdot \nu$$

L'énergie E du photon est en Joule. Le terme h est la constante de Planck avec $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

ν est la fréquence de la radiation considérée, et par extension la fréquence du photon. Elle s'exprime en Hertz. En introduisant la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{\nu}$, où c est la célérité de la lumière, on établit la formule :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

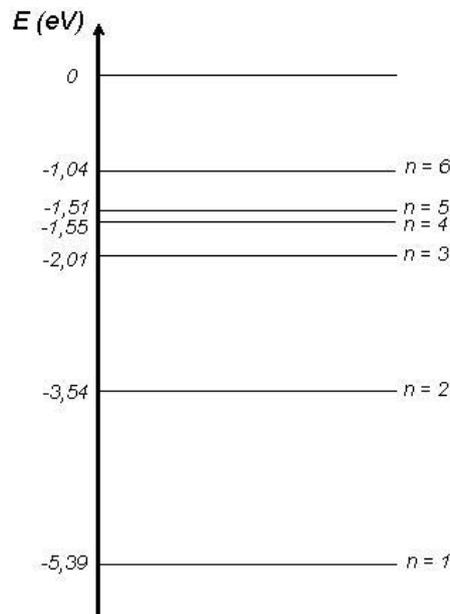
Dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

b. Diagramme d'énergie des atomes

Si en mécanique classique l'énergie d'un système physique peut plus ou moins être quelconque, ce comportement ne se vérifie pas à l'échelle de l'atome. En effet, l'ensemble formé par le noyau de l'atome et ses électrons forme un système ne pouvant être que dans

certains états d'énergie. C'est la **quantification des niveaux d'énergie**, décrite par la **mécanique quantique**.

Afin de représenter les niveaux d'énergie d'un atome, on fait appel à des **diagrammes d'énergies**. Ci-après le diagramme simplifié d'un **atome de lithium** :



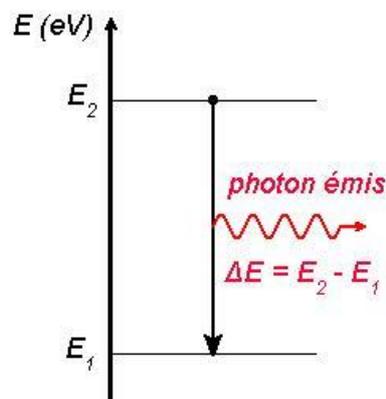
L'état le plus bas est appelé **état fondamental** ; les autres sont des **états excités**. Les états d'énergie sont conventionnellement d'**énergies négatives**, et repérés par des **numéros** : $n=1$, etc. Les diagrammes ne sont pas les mêmes pour deux atomes (éléments chimiques) différents. Le diagramme d'énergie d'un atome est ainsi sa « carte d'identité ».

Dans la pratique, les énergies des différents niveaux sont exprimées en **électron-Volt**, qui est une unité plus adaptée que le Joule à l'échelle de l'atome. Le passage d'une unité à l'autre s'obtient par la relation : $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

3. Interprétation des spectres d'émission et d'absorption

a. L'émission d'un photon

Dans le cas du spectre d'émission, les décharges électriques ont pour effet de mettre les atomes dans des **états excités**. Peu de temps après, ils vont revenir sur le niveau le plus bas. En faisant cela, ils **perdent de l'énergie**, qui se matérialise sous la forme de **photons émis**.

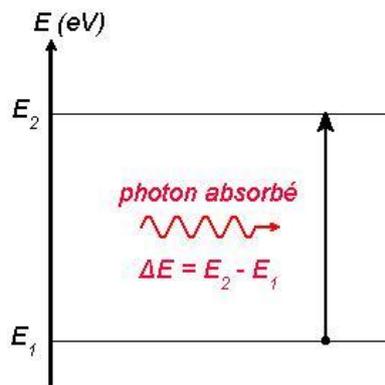


Dans l'exemple du schéma, le photon résultant de la transition $E_2 \rightarrow E_1$ a une énergie $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_2 - E_1$. Si l'atome permet plusieurs transitions différentes, ce qui est le cas dans la réalité, il y aura ainsi quelques longueurs d'onde différentes émises, ce qui constituera le **spectre de raies brillantes**.

b. Absorption d'un photon

Un atome peut absorber un photon si celui-ci possède exactement l'énergie requise pour passer à un état d'énergie supérieure.

Dans le croquis ci-dessous, le photon est absorbé parce qu'il a exactement l'énergie requise $E_2 - E_1$.



Pour le spectre d'absorption, l'exposition du gaz à de la lumière blanche fait que les photons incidents vont présenter toutes les longueurs d'onde du visible. Seuls ceux qui pourront provoquer une transition vers un état plus élevé seront absorbés. Ils seront certes réémis par **désexcitation**, mais dans des directions aléatoires autres que la direction incidente. Ceci explique le spectre d'absorption trouvé, constitué de **raies noires**.

L'essentiel

Dans le modèle corpusculaire, la lumière est assimilée à un faisceau de particules, les photons. L'énergie E d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Avec $c \approx 3,00 \cdot 10^8$ m/s, $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J · s. Aussi, ν est la fréquence et λ la longueur d'onde de la radiation considérée.

A l'échelle de l'atome, l'électron-volt est une unité d'énergie plus adaptée que le Joule.

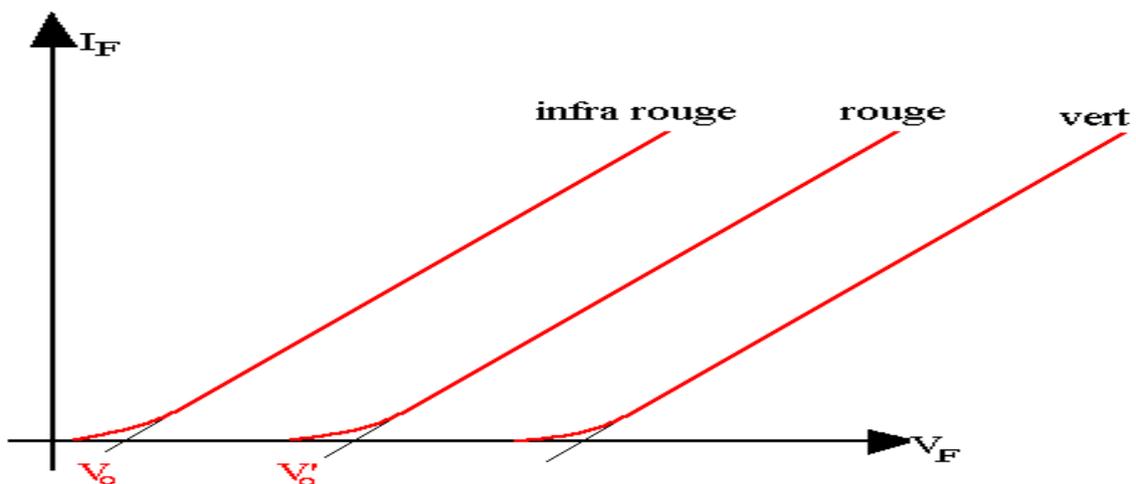
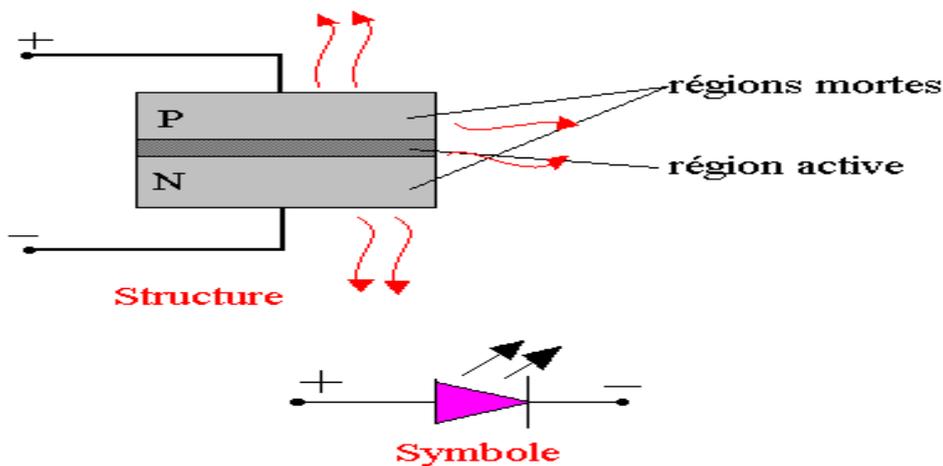
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Les atomes ne peuvent occuper que certains niveaux d'énergie. Cette propriété fait qu'un atome dans un état d'énergie E_2 peut passer à un état d'énergie E_1 plus faible en émettant un photon d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1$. De la même manière, un atome peut passer d'un état d'énergie E_1 à un niveau d'énergie E_2 plus forte s'il absorbe un photon d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1$.

Composants de l'optoélectronique

Les photoémetteurs (Diode Electroluminescente: DEL ou LED)

Les DEL émettent une radiation électromagnétique lorsqu'elles sont polarisées en direct pour favoriser la recombinaison. Leur longueur d'onde d'émission dépend du matériau. Leur usage est très répandu et leurs principaux avantages sont basse température de fonctionnement, haute stabilité mécanique, insensibilité aux vibrations et au choc, faible consommation, compatibilité TTL. Matériau de fabrication des DEL est l'arséniure de gallium.



Application:

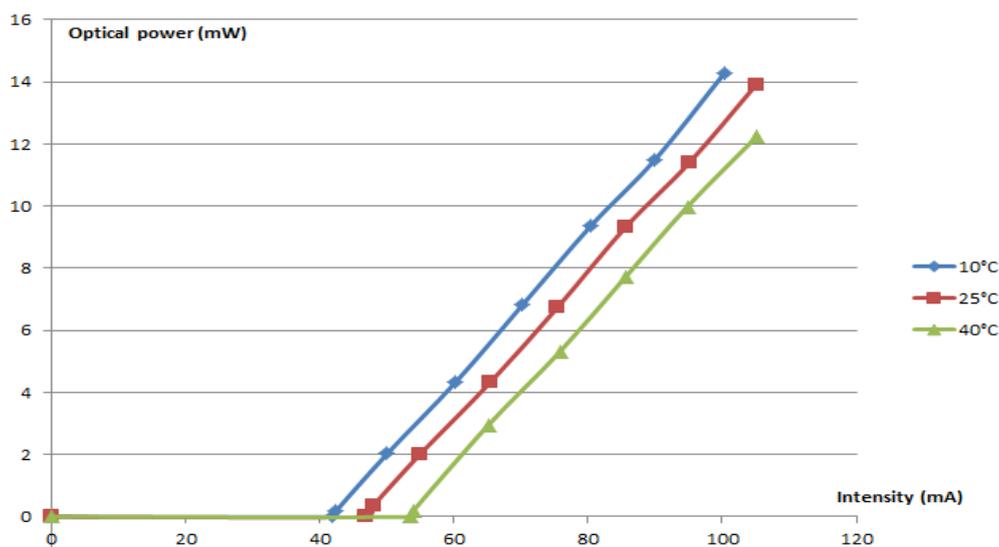
Pour les DEL infrarouges, elle veut être photo émetteur pour les barrières mobiles, les photo coupleurs.

Pour les LED éléments d'affichage numérique.

Diodes Lasers

Principe de fonctionnement

L'émission lumineuse est basée sur le phénomène de l'électroluminescence qui comprend l'émission d'un photon par recombinaison d'une paire électron-trou et le peuplement de la bande de conduction par injection d'un courant. La longueur d'onde d'émission ² est donnée par l'application du principe de conservation de l'énergie : celle du photon sera approximativement égale à la largeur de la bande interdite du matériau. Un autre principe incontournable de la physique est la conservation du moment lors d'une recombinaison ou d'une absorption ; cela entraîne la nécessité d'utiliser des matériaux dits « à gap direct » : le minimum de la bande de conduction est à la verticale du maximum de la bande de valence dans l'espace des moments. L'arséniure de gallium (GaAs) possède cette propriété et fut le premier utilisé avec succès. On l'appelle un composé binaire III-V car Ga appartient à la colonne III du tableau périodique des éléments et As à la colonne V. Avec une largeur de bande interdite de 1,424 eV, il génère une longueur d'onde de 870 nm



Applications

Les diodes constituent le type de laser le plus vendus : environ 733 millions d'unités en 2004⁴, beaucoup plus que les 131 000⁵ d'autres types de lasers.

Ces diodes laser sont largement utilisées dans les télécommunications car elles sont facilement modulées et deviennent des sources lumineuses couplées pour des fibres optiques de communication. Elles sont utilisées dans divers instruments de mesure, comme les télémètres ou encore pour des lecteurs de code-barres. Les diodes laser visibles, généralement de couleur rouge, mais aussi verte, sont fréquentes, comme les pointeurs laser. Les diodes laser de basses ainsi que de hautes puissances sont largement utilisés dans l'industrie de l'imprimerie en tant que sources de lumière pour la numérisation d'images (entrée) ainsi que pour la fabrication de plaque d'impression de très haute vitesse et haute résolution (sortie). Des diodes laser infrarouge et rouge sont courantes dans les lecteurs de CD, CD-ROM et la technologie DVD. Des diodes laser de couleur violette sont utilisés pour les technologies HD-DVD et Blu-ray. Des diodes laser de haute puissance sont utilisées dans des applications industrielles telles que le traitement thermique, le plaquage, le soudage et pour le pompage d'autres lasers.

Les photorécepteurs

Il est nécessaire de donner des paramètres afin de comprendre la compréhension de la suite:

Courant d'obscurité (Dark current): C'est le courant qui circule à travers la photo réceptrice dans l'obscurité, on le note I_D

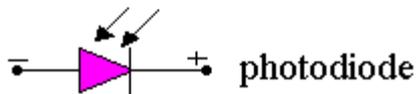
Courant lumineux (light current: I_L): courant qui circule à travers le photo détecteur exposé à l'énergie rayonnante.

Photo courant: Courant dû à l'effet photo électrique, soit la différence entre le courant lumineux et courant d'obscurité $I_P = I_L - I_D$

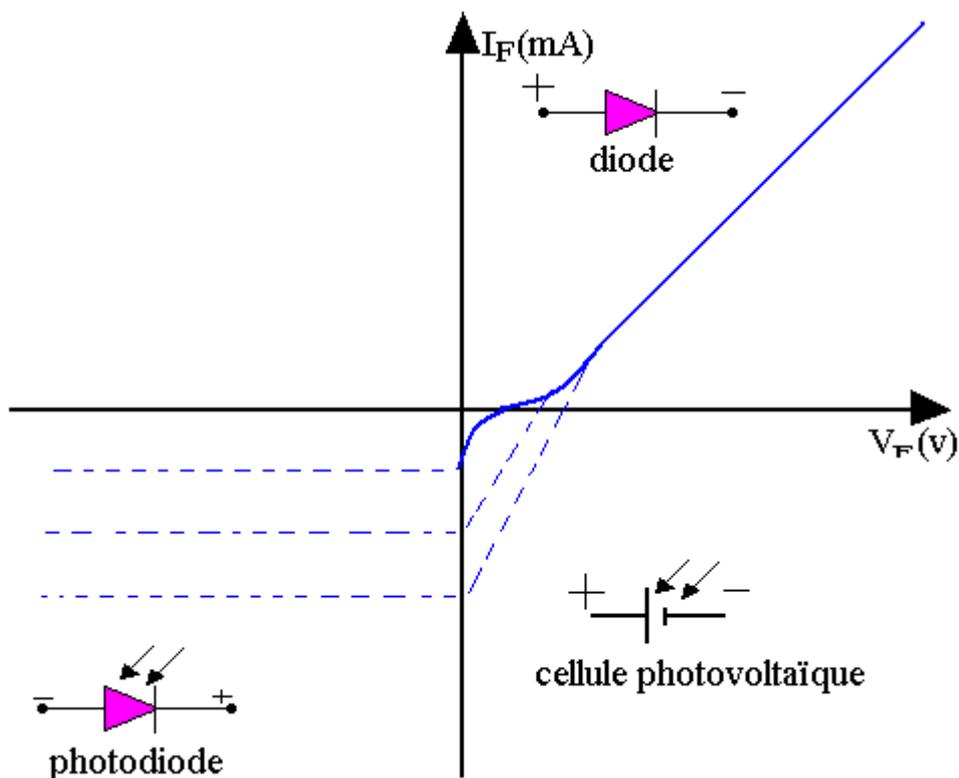
Tension direct (forward voltage) C'est la tension aux bornes de la diode semi conductrice lorsque la diode P est à un potentiel positif par rapport à N

Photodiode

Certains matériaux semi-conducteurs sont appelés des éléments photo résistifs (le silicium, le germanium). Ils sont fabriqués selon des méthodes identiques à celle utilisées pour les semi-conducteurs en particulier le type à jonction. Si cette jonction est de type PN et si N est polarisée en inverse, on aboutit à une application particulière de ce matériau:



La photo diode fournit un courant qui est fonction de l'éclairement incident. Ce courant n'est pas linéaire et le temps de réponse est rapide



Applications de la photo diode

Lecteur de carte perforée, détecteur d'infrarouge, récepteur optique.

Phototransistor

Les phototransistors sont les transistors silicium avec une jonction base-collecteur agrandie et accessible à la lumière. Le mode de fonctionnement correspond à celui d'une photo diode suivie d'un transistor monté entre le collecteur et la base. Les phototransistors sont plus sensibles, deux facteurs égaux gain en courant que les photodiodes les moins rapides et moins linéaires.

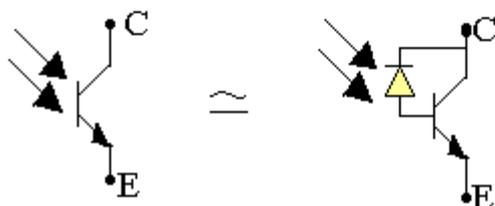
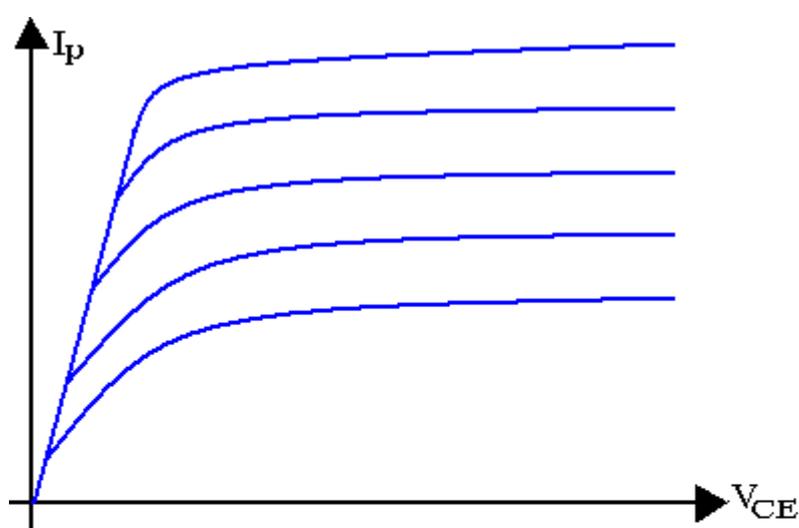
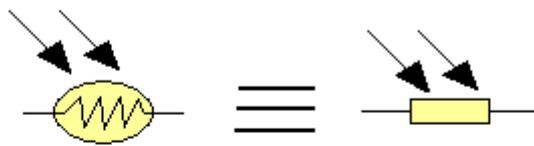


Photo résistance

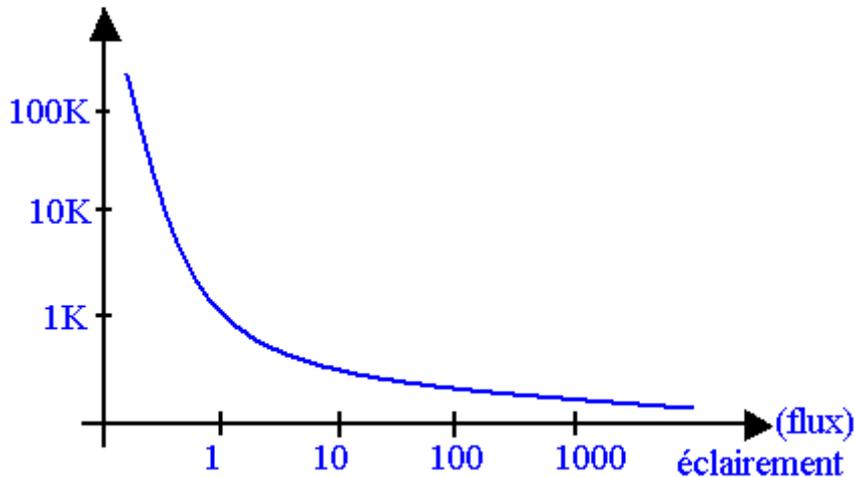
Une photo résistance est constituée par un semi-conducteur donc la résistance diminue proportionnellement au nombre de photon reçu. Sa résistance d'obscurité est très élevée. Les photos résistances sont populaires grâce à la diversité des matériaux utilisés.

Applications

Contrôle de lumière de rue, détecteur de flamme, détecteur d'éclairement dans les appareils électriques.



Symboles



Remarque

Plus l'éclairement incident est élevé plus la résistance de la cellule baisse.

Tout matériau semi-conducteur possède cette propriété photo résistive.

La longueur d'onde appropriée agite les paires électrons trou du matériau impliquant une possibilité de changement de conducteur.

Les photos-coupleurs

Un photo coupleur est un composant optoélectrique qui transmet des informations logiques ou analogiques sous forme de signal électrique via une zone optique qui isole électriquement l'entrée de la sortie.

Il constitue un relais ou un transformateur statique ou dynamique en isolant l'entrée et la sortie du point de vue composant continue.

En attaquant l'entrée par injection de courant, la source lumineuse émet des photons, ils sont canalisés par une voie optique qui constitue le couplage avec l'élément de sortie. Il fournit un courant I_S proportionnellement à l'éclairement E_V de l'émetteur qui est lié au courant injecté à l'entrée.

Le tau de transfert est le rapport entre l'intensité de sortie I_s , l'intensité d'entrée I_e

$$\tau = \frac{I_s}{I_e} \text{ en \%}$$

La capacité en l'entrée et la sortie est de l'ordre de PF à 1MF

La résistance d'isolement entre l'entrée et la sortie est comprise entre 10^{10} et 20^{13}

La tension de claquage se situe entre 2KV et 10KV

Photo-coupleur diode-diode

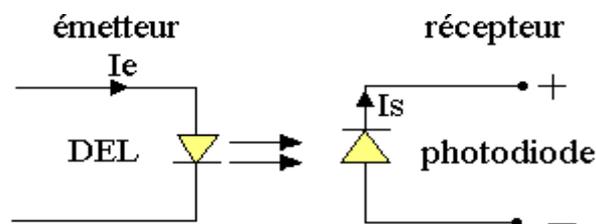
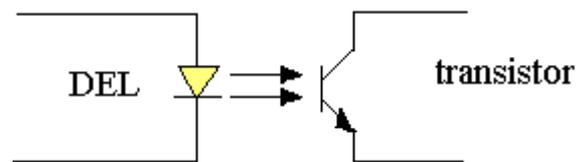
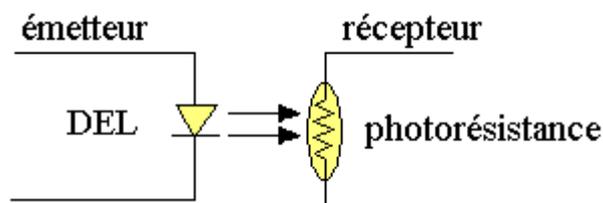


Photo-coupleur diode-transistor



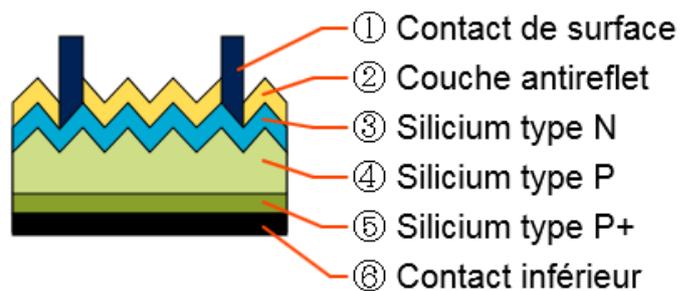
C'est le type le plus répandu, il ne présente 80% à 85% de production. La DEL est au silicium et émet en infrarouge avec une grande efficacité. En sortie un transistor à gain élevé permet d'obtenir un rapport de transfert de 50 et 300% avec un bruit acceptable.

Photo-coupleur diode photorésistance



Cellule photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombinaison, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombinaison en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N.



Structure d'une cellule photovoltaïque

La couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative. La couche inférieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé P^c. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

Fibre optique

PRESENTION :

Introduction.

Les supports de transmission dans le domaine des télécommunications, par exemple, fréquemment utilisés sont le fil de cuivre ou le câble coaxial.

Ces supports transportent des fréquences qui sont codées. Le codage utilisé est appelé modulation. Nous connaissons quelques types :

- modulation de fréquence,
- modulation d'amplitude,
- modulation de phase.

Le nombre de communications utilisées par les uns et par les autres fait que les supports traditionnels sont saturés.

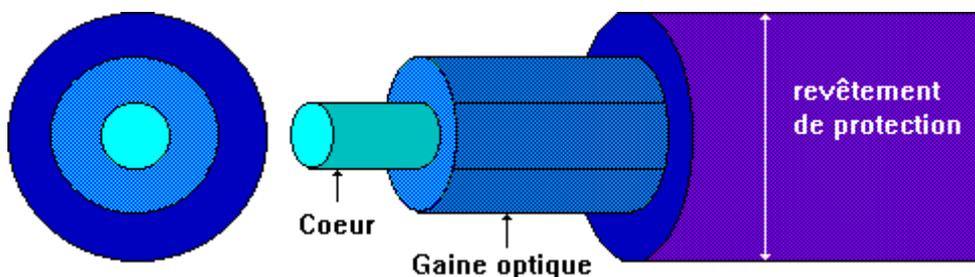
De plus, ils sont limités en fréquence pour des raisons technologiques. Il a donc été nécessaire de développer un autre support de transmission : c'est la naissance de la fibre optique.

Descriptif.

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire schématisé sur la figure 1. Cette onde optique codée a été préalablement converti à partir d'un signal électrique.

Toutes les fibres se composent d'un cœur et d'une gaine, toutes deux des matériaux transparents en verre ou en plastique. Un revêtement protecteur, en plastique souple, entoure la gaine.

._Schéma général d'une fibre optique.



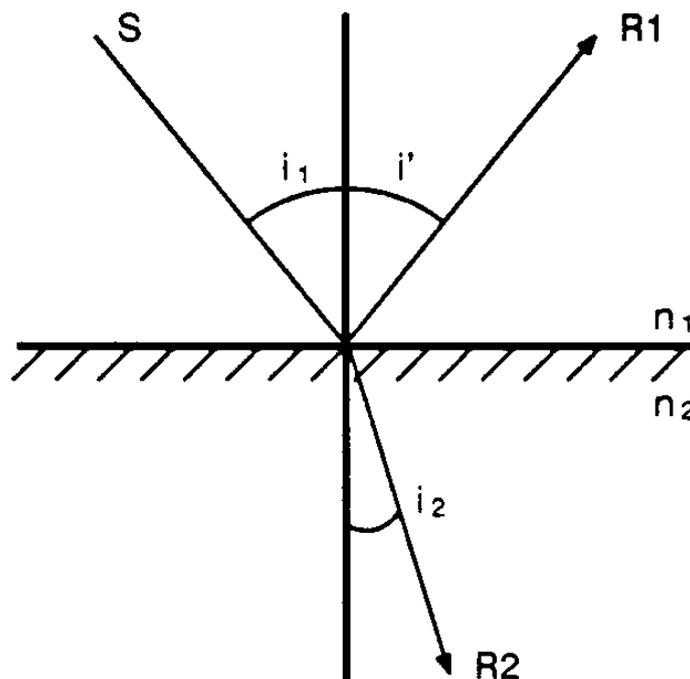
Le diamètre du cœur et de la gaine varient selon le type d'utilisation. La lumière se déplace au cœur de la fibre.

Le cœur et la gaine sont des matériaux transparents, il est important que l'indice de réfraction du cœur, n_1 , soit supérieur à l'indice de réfraction de la gaine optique, n_2 . Cette information sera plus amplement développée dans la suite de ce dossier.

PRINCIPES PHYSIQUES :

Le principe physique majeur qui a inspiré la technologie des fibres optiques est ce qu'on appelle « la réflexion totale interne ». Ceci découle de la loi de la réfraction ainsi que celle de la réflexion.

La loi correspondant à ce principe est : la loi de Descartes..



La lumière est une onde progressive qui se propage dans les milieux transparents.

Lorsqu'un faisceau lumineux S arrive sur une surface de séparation de deux milieux transparents d'indice de réfraction n_1 et n_2 , il y a simultanément un faisceau réfléchi R_1 et un faisceau réfracté R_2 .

Rappel : L'indice de réfraction : Chaque matériau transparent a son indice de réfraction, cette valeur permet d'évaluer la propagation de la lumière dans le matériau considéré.

$$\underline{n} = C/V$$

C : célérité (300 000 km/s).

V : Vitesse de la lumière dans un milieu

considéré. Sachant que \underline{n} sera toujours

supérieur ou égal à 1

Loi de la réfraction :

Comme le représente la figure 2 il y a le faisceau R2 qui est réfracté. La relation qui prend en fonction l'angle de faisceau réfracté $\underline{i2}$ et l'angle d'incidence $\underline{i1}$ est :

$$n1 \sin i1 = n2 \sin i2$$

Loi de la réflexion :

Lorsque un faisceau est réfléchi son angle $\underline{i'}$ est de même valeur que l'angle d'incidence $\underline{i1}$.

Voici donc les deux grandes lois générales dont est soumise la lumière lorsque celle-ci parcourt des milieux transparents.

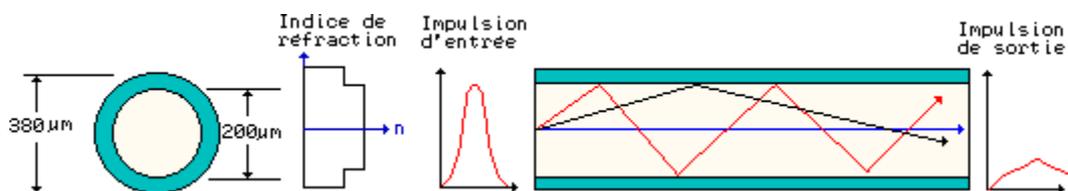
Examinons maintenant comment s'applique ces lois dans la fibre optique et comment fait-on pour que la réflexion totale interne soit respecté. Car le but de la fibre optique est que l'intensité de lumière émise à l'entrée de celle-ci soit, dans son intégralité, autant que possible retrouvée à la sortie.

LES DIFFERENTES SORTES DE FIBRES OPTIQUES.

Les fibres optiques multimodes.

Seuls certains angles conduisent à des modes. Il est évident que la vitesse d'un mode dépend de l'angle. Le terme « multimode » signifie que plusieurs modes peuvent être guidés. Un nombre typique pour une fibre à saut d'indice est de 1000 modes (un mode correspond à un faisceau).

a) A saut d'indice.



Sur la figure on peut trouver les renseignements suivant :

- Les cotations du diamètre de la gaine ainsi que du cœur.
- L'indice de réfraction.
- Un schéma représentant le trajet des faisceau lumineux dans la cœur de la fibre, ainsi que les impulsion d'entrée et de sortie.

C'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles.

Dans cette fibre, le cœur est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique d'indice n_2 inférieur à n_1 . Ces indices sont peut différent et doivent être de l'ordre de 1,5.

Quant à la gaine optique, elle joue un rôle actif dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec le revêtement de protection déposés sur la fibre. Le rayon est guidé par la réflexion totale au niveau de l'interface coeur-gaine, sinon il est réfracté dans la gaine.

Examinons comment est appliquée la loi de Descartes dans ce type de fibres.

Pour le cas du premier faisceau lumineux(le noir), son faisceau réfracté sera dans le prolongement de la gaine et de la fibre. Donc ce dernier ne sera pas perdu puisqu'il est dans le prolongement du coeur.

Le faisceau réfléchi, lui, se propagera dans le coeur.

Pour le second, le rouge, du fait que son angle de départ est différent de celui du premier, son faisceau réfracté ne sera plus dans le prolongement de la fibre, par conséquent il va entrer dans la gaine, c'est ici quelle intervient, elle va permettre pour certain faisceau de

« récupérer » leurs faisceaux réfractés.

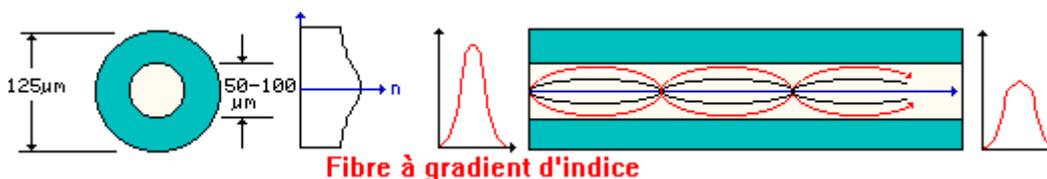
La capacité de transmission de ce type de fibre est d'environ 100 Mbits/s. Cette valeur correspond également à la bande passante. On peut également exprimer la bande passante en Mhz*km. Ici pour la fibre à saut d'indice elle est de 22 Mhz*km.

Cette capacité est assez faible car chaque rayon doit parcourir une distance différentes.

Par conséquent il faut à l'extrémité « attendre » que tous les faisceaux soient arrivés

b) A gradient

d'indice



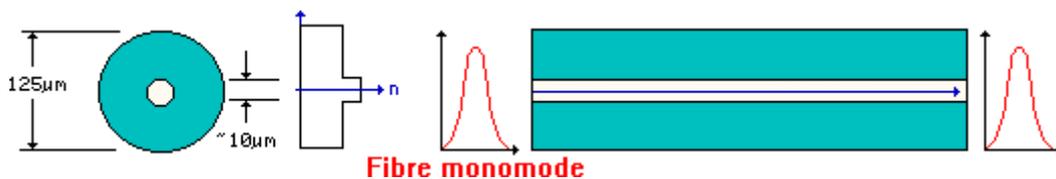
Leur coeur, contrairement aux fibre à saut d'indice, n'est pas homogène. Leur coeur est en fait constitué de plusieurs couches de verres dont l'indice de réfraction est différent à chaque couche et l'indice de réfraction diminue de l'axe jusqu'à la gaine.

Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

L'avantage avec ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons

La bande passante de ce mode de fonctionnement est de 500 Mbits/s ou de 1 Ghz*km. Cette capacité est plus élevée que celle du saut d'indice car la distance à parcourir des rayons est plus faible, donc ils est possible d'augmenter en fréquence.

Les fibres nomodes.



Le but recherché dans cette fibre est que le chemin que doit parcourir le faisceau soit le plus direct possible. Pour cela on réduit fortement le diamètre du coeur qui est dans la plupart des cas inférieur à $10\mu\text{m}$.(Figure 6)

La dispersion modale est quasi nulle. Comme on ne casse pas le faisceau lumineux la bande passante est donc augmentée, environ 100 Ghz*km ou de 1000 Mbits/s.

La fibre monomode classique est à saut d'indice. Son diamètre permet la propagation d'un seul mode, le fondamental ; comme un seul mode se propage il n'y a pas de différence de vitesse contrairement aux fibres multimodes.

Du fait de ce précieux avantages, elle a pris une ampleur considérable dans les transmissions sur de grandes distances.