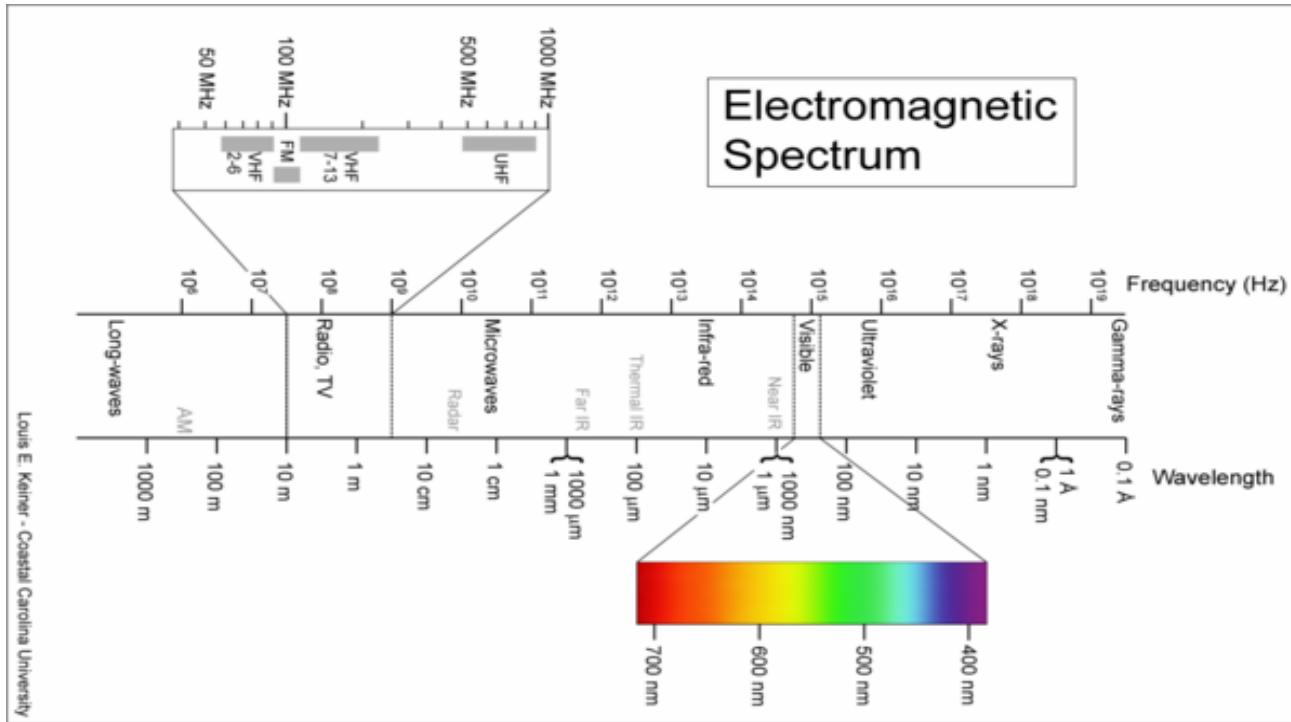


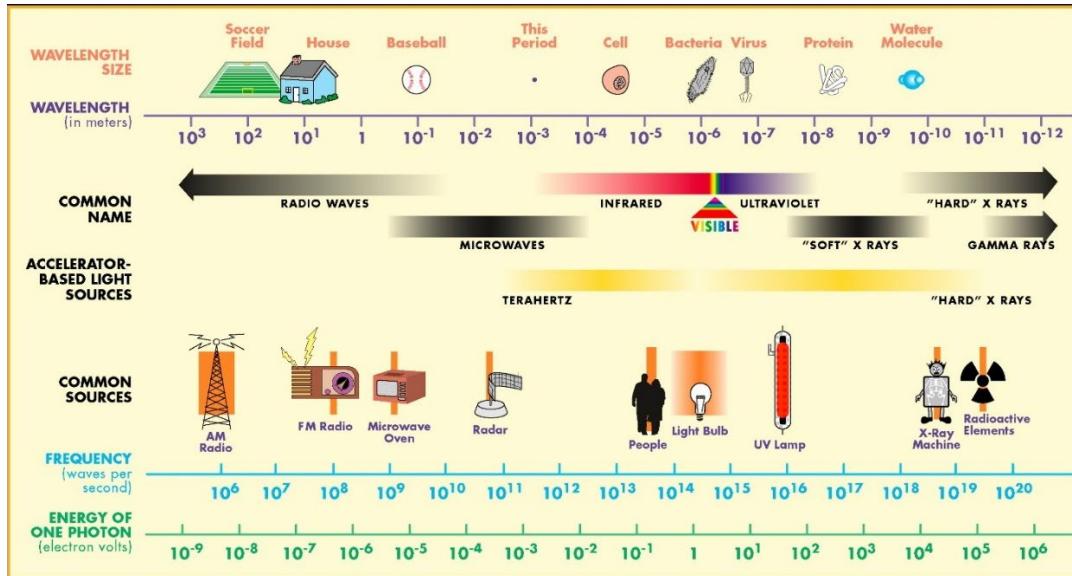
CHAPITRE 5

CAPTEURS OPTIQUES

Introduction

Spectre de la radiation électromagnétique:





Energie d'un photon :

$$E_{ph} = h\nu \quad h : \text{constante de Planck } (h = 6.626 \dots \times 10^{-34} \text{ Js})$$

ν : fréquence [Hz]

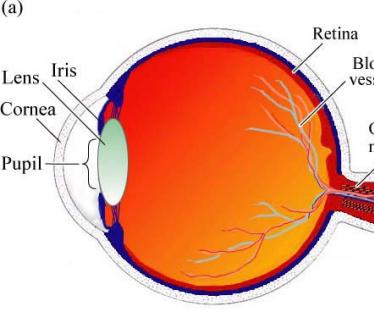
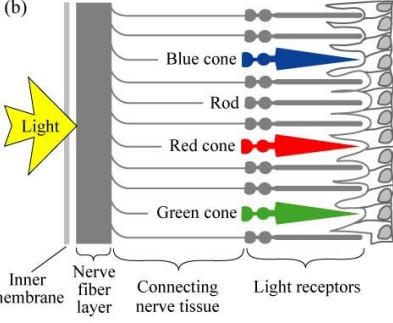
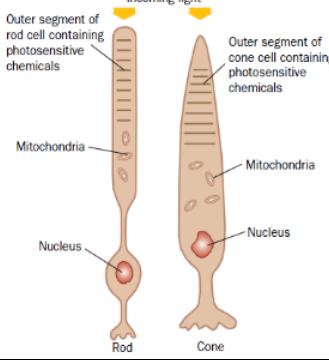
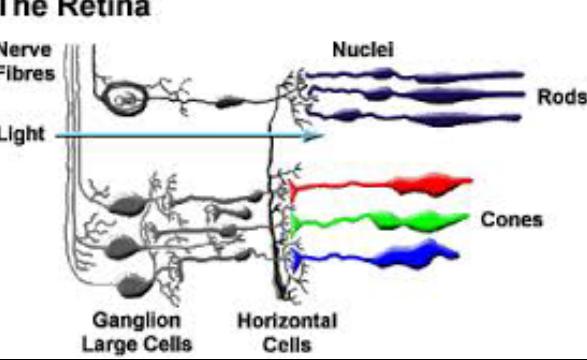
$$\lambda = \frac{c^*}{\nu} = \frac{hc^*}{E_{ph}} \quad c^* : \text{vitesse de la lumière dans le milieu [m/s]}$$

dans le vide : $c^* = c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ (exact!!)

Lumière visible : $\nu \approx 10^{15} \text{ Hz}$,

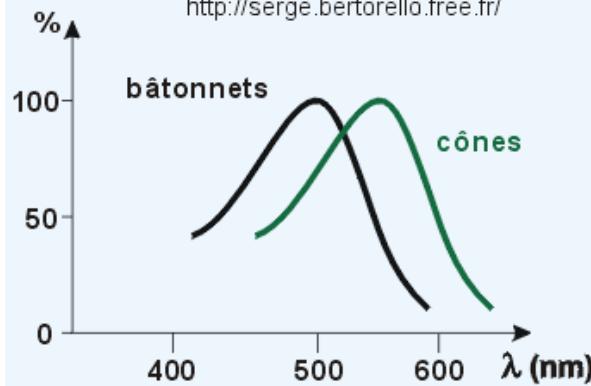
$$E_{ph} \approx 10^{-19} \text{ J} \approx 1 \text{ eV}, \quad \lambda \approx 1 \mu\text{m}$$

Le capteur optique humain (la rétine):

|  |  |
|--|---|
|  |  |
| <p>Bâtonnets (rods) : 100 millions, «intensité», vision nocturne Cônes : 6 million, «couleurs», vision diurne</p> | <p>La rétine est couverte de cellules photosensibles (les cônes et les bâtonnets), responsables de la conversion de la lumière en signal électrique, à travers des réactions chimiques induites par la lumière.</p> |

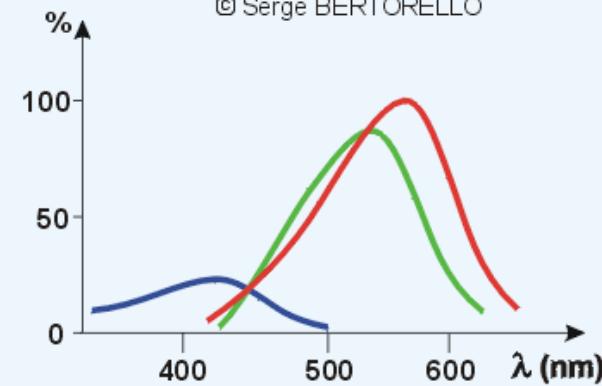
Sensibilité spectrale des photorécepteurs de la rétine humaine

<http://serge.bertorello.free.fr/>



Sensibilité spectrale des cônes et des bâtonnets.

© Serge BERTORELLO



Sensibilités comparées des différents cônes.

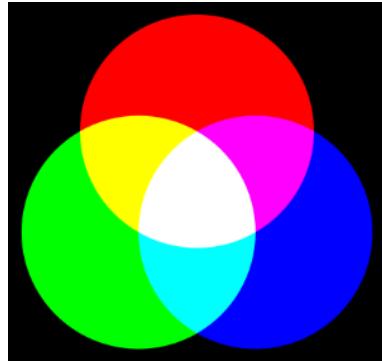
| couleur | longueur d'onde (nm) | fréquence (THz) |
|-------------|----------------------|-----------------|
| Infrarouge | > 740 | < 405 |
| rouge | ~ 625-740 | ~ 480-405 |
| orange | ~ 590-625 | ~ 510-480 |
| jaune | ~ 565-590 | ~ 530-510 |
| vert | ~ 520-565 | ~ 580-530 |
| bleu | ~ 446-520 | ~ 690-580 |
| violet | ~ 380-446 | ~ 790-690 |
| ultraviolet | < 380 | > 790 |

Couleurs primaires

Une couleur primaire est une couleur dont le «mélange» ou la «superposition» avec ses homologues permet de reproduire l'ensemble des couleurs visibles.

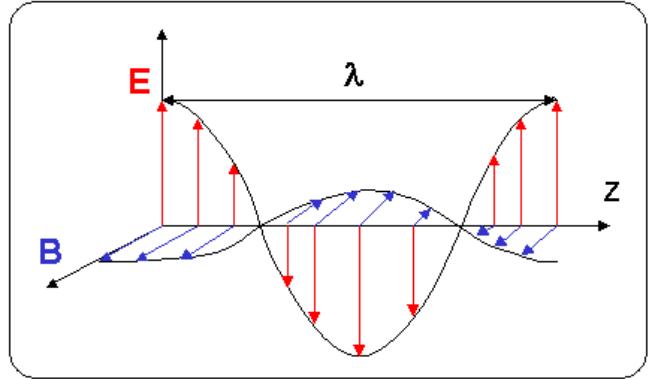


Synthèse soustractive
(Cyan, Magenta, Yellow):
Des pigments sont mélangés
(la lumière est absorbée)



Synthèse additive
(Red, Green, Blue):
Des rayons de lumière sont superposé.

Onde électromagnétique et polarisation :

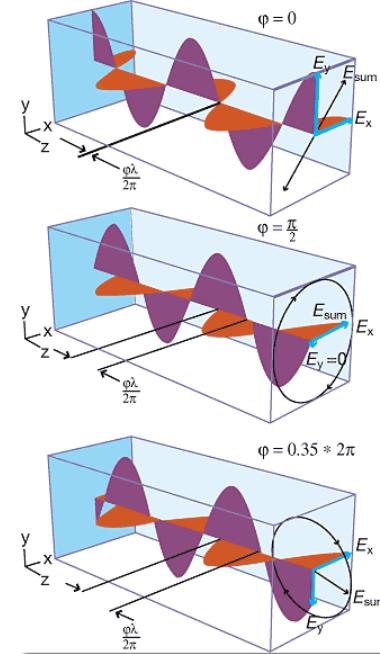


Onde électromagnétique :

z : direction de propagation,

λ : longueur d'onde.

B: champ magnétique, **E**: champ électrique



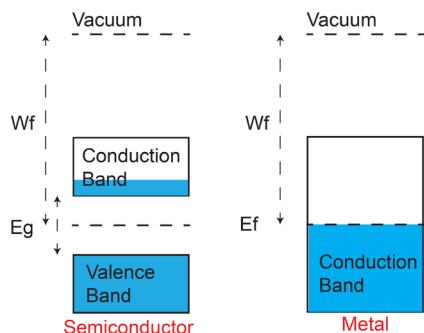
Polarisation de l'onde électromagnétique.

Seulement le champ électrique **E** est représenté.
Polarisation linéaire, circulaire et elliptique.

Interaction photon-matière :

L'impact d'un photon sur un matériau peut :

1. Générer une paire électron-trou (*photoconduction*) (si $E_{ph} >$ bandgap E_g)
2. Extraire un électron du matériaux (*photoémission*) (si $E_{ph} >$ work function W_f)
3. Chauffer les matériaux (l'énergie du photon est convertie en énergie d'agitation thermique des atomes) (si E_{ph} approprié pour exciter vibrations et/ou rotations des atomes ou molécules)
4. Le photon peut être aussi «réfléchi», «réfracté», «diffusé» (concepts de physique classiques liés à l'interaction d'une onde électromagnétique avec la matière).



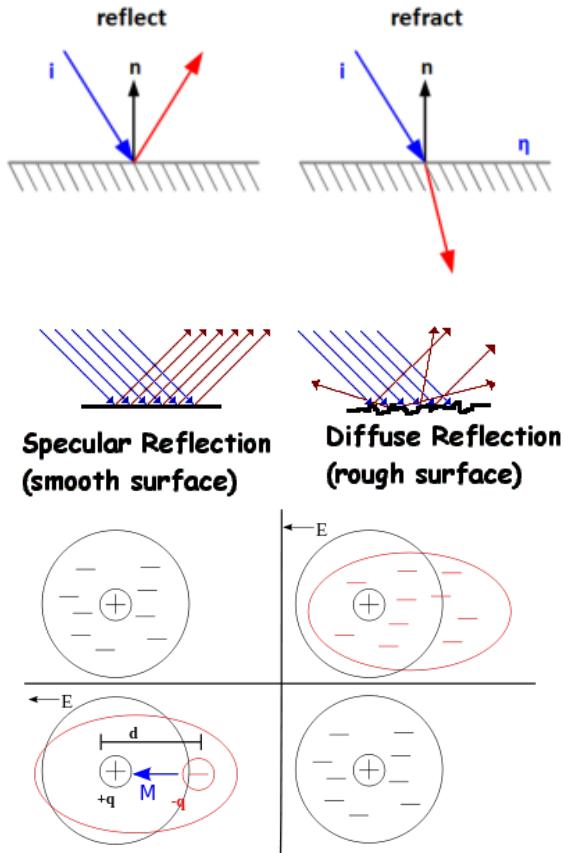
E_{ph} : Photon energy (Energie du photon)

E_f : Fermi energy or level (niveau de Fermi)

W_f : Work function (travail de sortie)

E_g : Energy gap or band gap (gap d'énergie)

Réflexion et réfraction (interprétation semi-classique)



Les ondes lumineuses incidentes sur un matériau induisent des oscillations de la polarisation électrique dans les atomes individuels dans les matériaux diélectriques ou une oscillation des électrons libres dans les métaux, ce qui fait que chaque particule rayonne une onde secondaire dans toutes les directions. Toutes ces ondes s'additionnent pour donner la réflexion et la réfraction.

Dans les **métaux** (comme le cuivre), les électrons libres oscillent à cause du champ électromagnétique de la lumière incidente. La différence de phase entre leur champ de rayonnement et le champ incident est de 180° , de sorte que le rayonnement vers l'avant annule la lumière incidente et le rayonnement vers l'arrière est la lumière réfléchie.

Dans les **diélectriques** (comme le verre), le champ électromagnétique de la lumière agit sur les électrons liés dans le matériau. Les électrons en mouvement génèrent des champs et deviennent donc de nouveaux radiateurs. La lumière réfractée dans les diélectriques est la combinaison du rayonnement des électrons et de la lumière incidente. La lumière réfléchie est la combinaison du rayonnement arrière de tous les électrons.

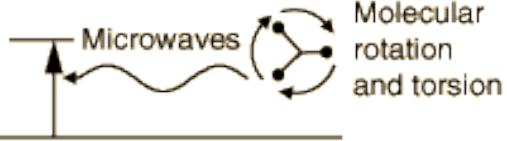
Interaction photon-matière en fonction de la longueur d'onde:

Small number of available states, almost transparent.



Microwaves

Microwaves rotate molecules

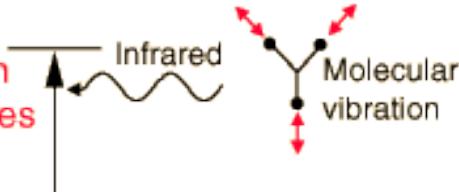


Higher density of energy levels than in the microwave range, more strongly absorbed.



Infrared (IR)

Infrared radiation vibrates molecules



Large number of available energy states, strongly absorbed.

Ionization energy



Visible light

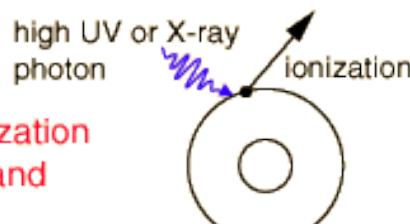
Visible



Electron level changes.
Visible light causes electron transitions

UV and soft-X-ray

UV photons above the ionization energy can disrupt atoms and molecules.



Photoionization

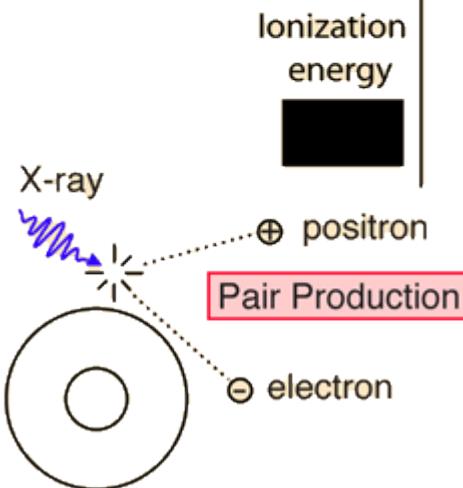
Large number of available energy states, strongly absorbed.



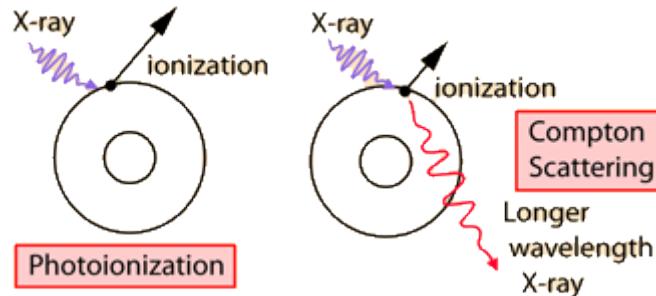
UV photons below the ionization energy are strongly absorbed in producing electron transitions.

X-ray interactions

X-ray photon energies are far above the ionization energies of atoms.



Hard X-ray

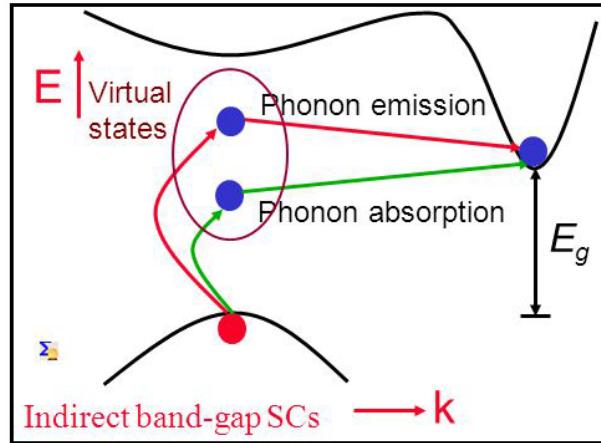
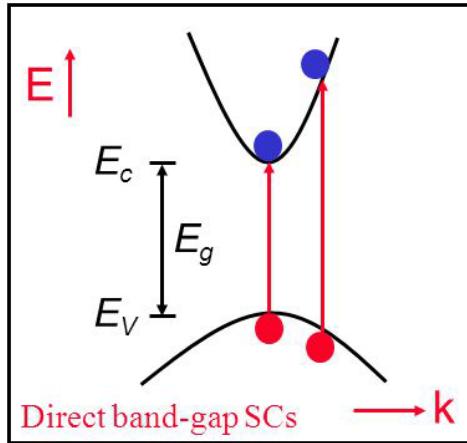


Pour la plupart des atomes, l'énergie des photons X est trop élevée pour être absorbée par des transitions entre les états électroniques de l'atome. Pour cette raison, ils interagissent avec la matière différemment des photons de plus basse énergie.

En particulier, les photons X peuvent :

1. Ioniser les atomes. Cela se produit en donnant toute l'énergie à un électron (photo-ionisation) ou en donnant une partie de l'énergie à un électron et le reste à un photon de plus basse énergie (diffusion Compton).
2. À des énergies suffisamment élevées, le photon X peut également créer une paire électron-positron (production de paires).
3. Les photons X peuvent aussi être diffractés. Dans ce cas, les atomes ne sont pas ionisés.

Propriétés optiques des matériaux semiconducteur



Momentum and energy conservation:

$$p_f = p_i$$

$$E_f = E_i + E_{ph}$$

final initial photon

$$p_f = p_i \mp p_s$$

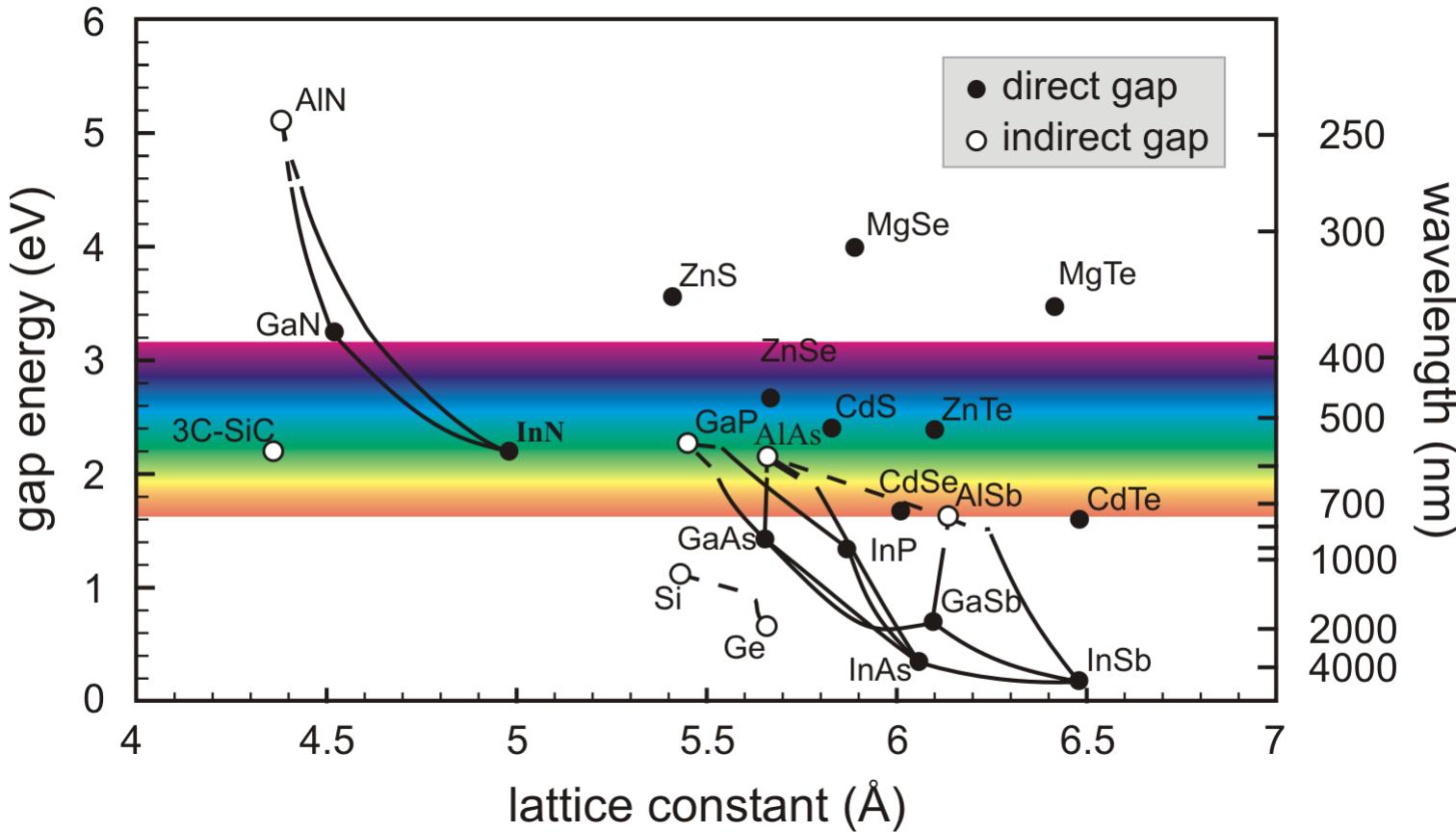
$$E_f = E_i \mp E_s + E_{ph}$$

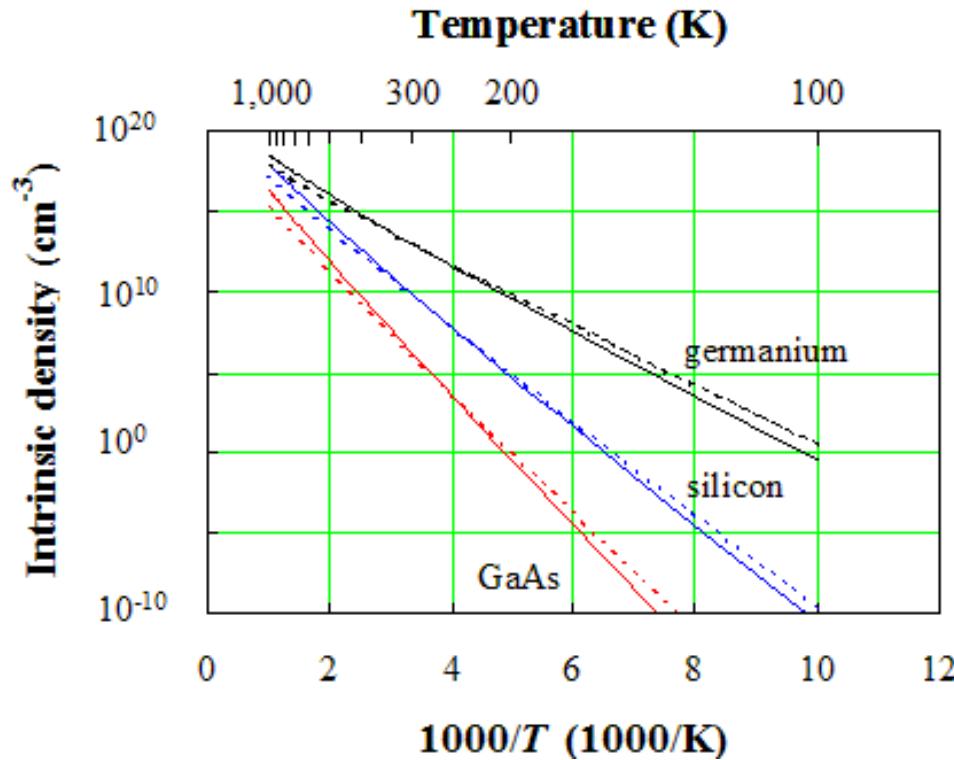
final initial phonon photon

Phonon : «vibration du cristal».

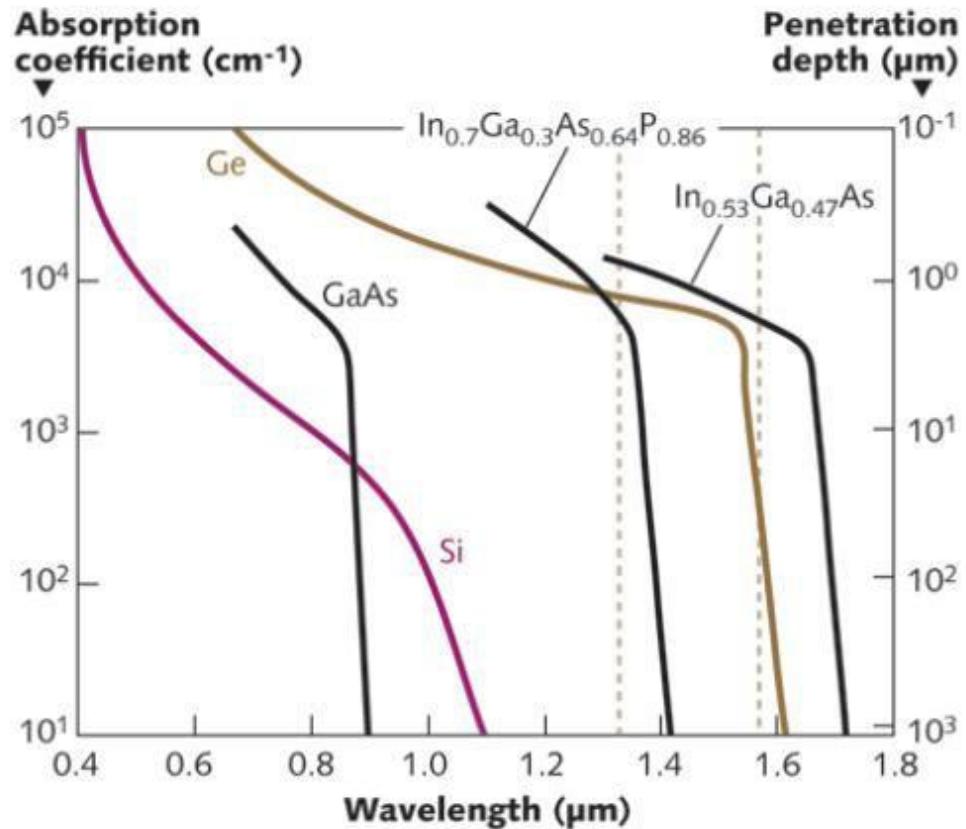
| Element | Bandgap Eg (eV) | Type of Bandgap | Cut-off wavelength (μm) |
|---------|-----------------------|--------------------|----------------------------|
| Si | 1.12 | Indirect | 1.1 |
| Ge | 0.66 | Indirect | 1.88 |
| GaP | 2.24 | Direct | 0.55 |
| GaAs | 1.42 | Direct | 0.87 |
| InP | 1.35 | Indirect | 0.92 |
| InAs | 0.36 | Direct | 3.44 |
| InSb | 0.17 | Direct | 7.3 |
| CdS | 2.42 | Direct | 0.52 |
| CdSe | 1.70 | Direct | 0.73 |
| CdTe | 1.56 | Direct | 0.83 |
| PbS | 0.41 | Indirect | 3.0 |

Le silicium (Si) à un band-gap de 1.1 eV. Les photons avec une énergie $E_{ph} < 1.1 \text{ eV}$ (i.e., avec longueur d'onde $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$) ne peuvent pas générer des paires électron-trou. Le germanium (Ge) à un band-gap de 0.66 eV, donc peut détecter des photons avec une énergie plus basse et longueur d'onde plus grande (jusqu'à $1.9 \mu\text{m}$).

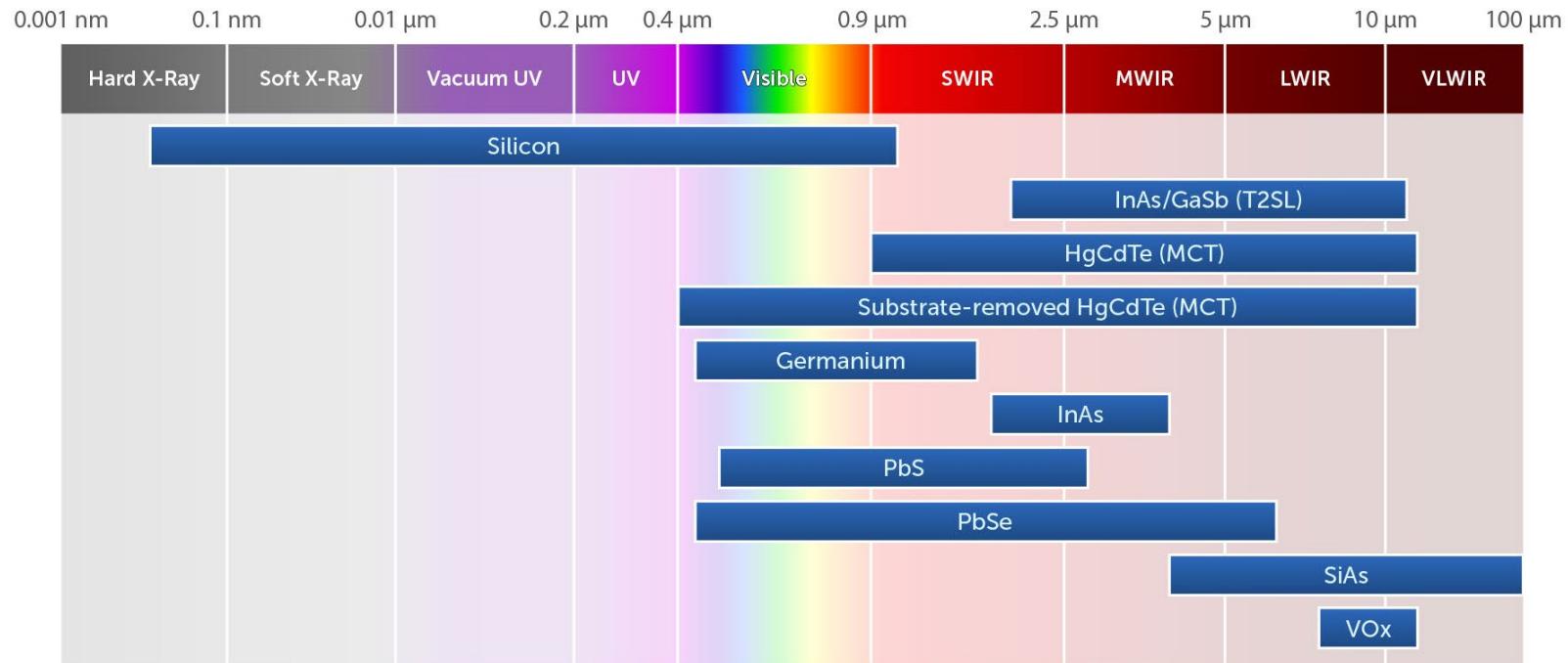




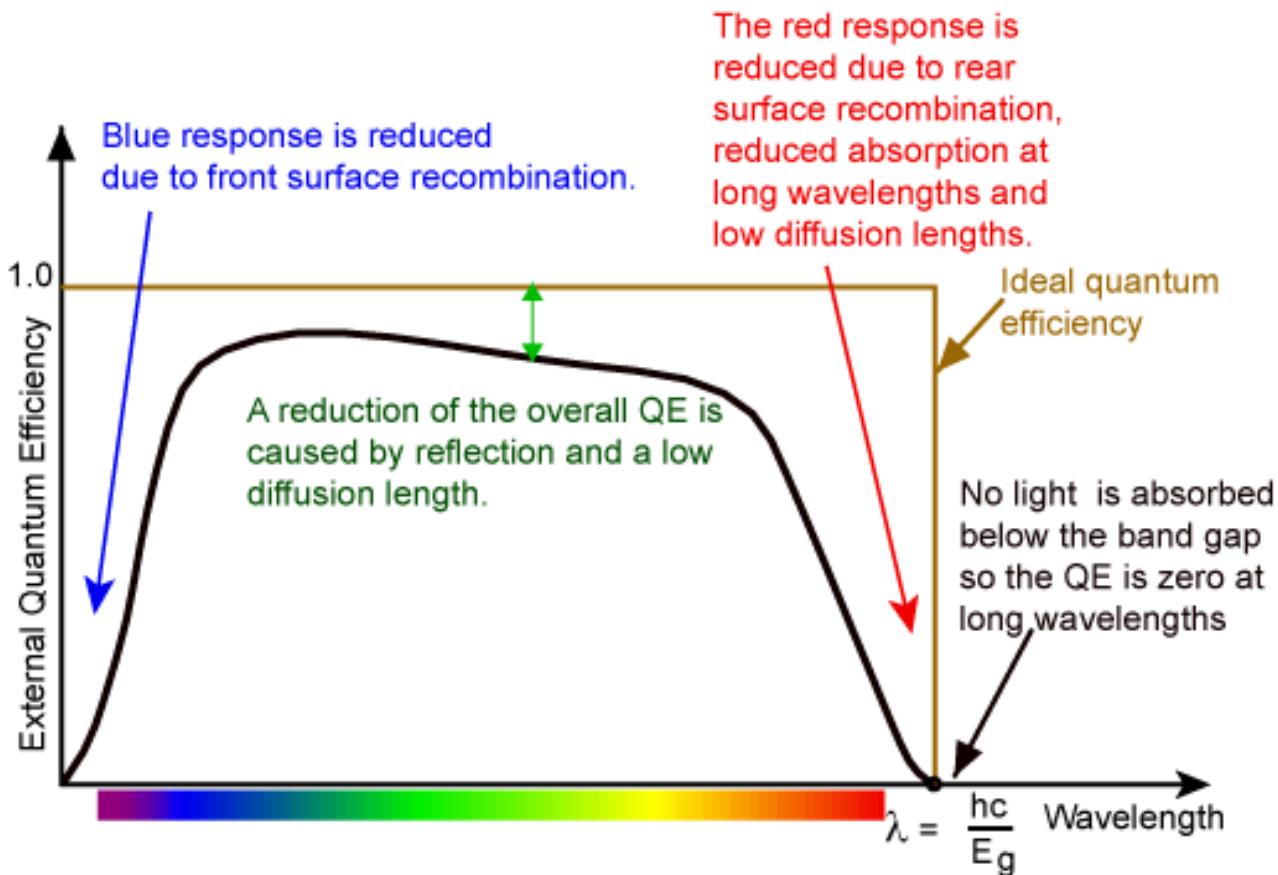
Nombre de porteurs chargés. Si la bande interdite (bandgap) est plus grande et la température plus basse, il y a moins de porteurs dans la bande de conduction car la probabilité d'un saut de la bande de valence à la bande de conduction dépend de la bande interdite et de l'agitation thermique.

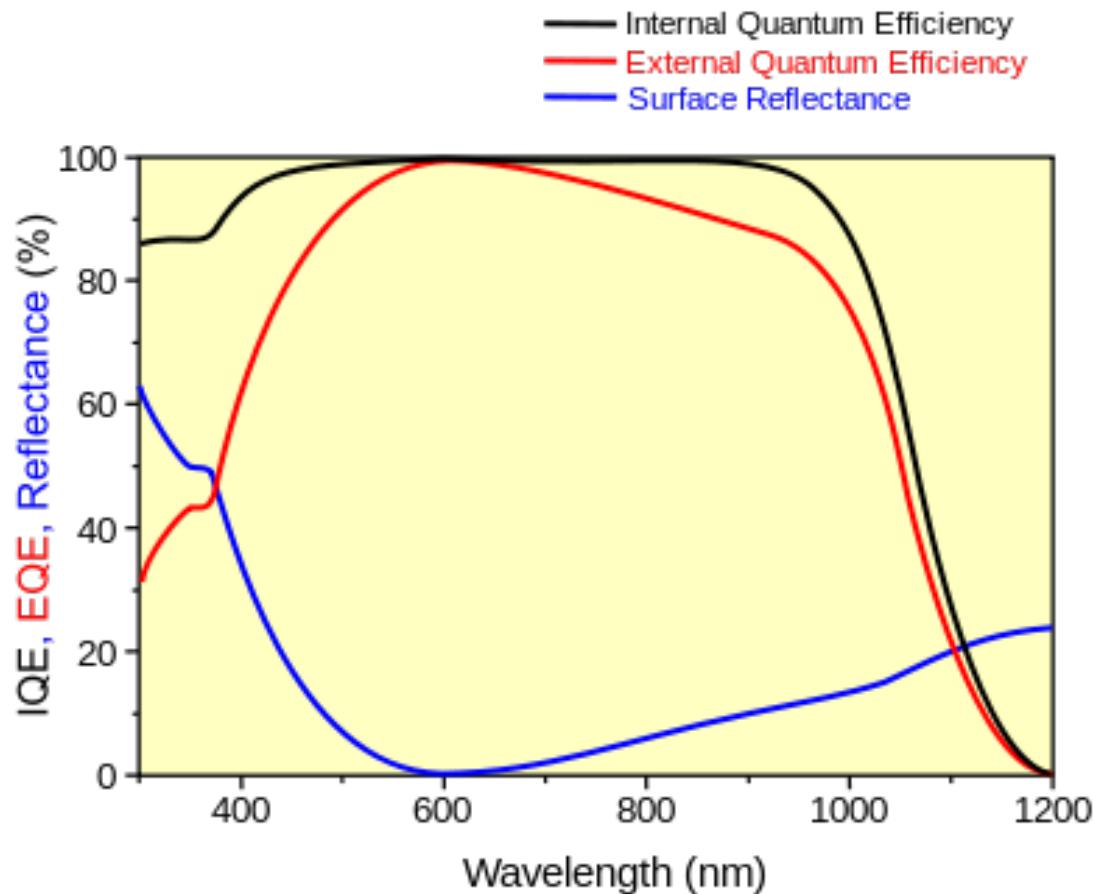


Absorption des matériaux utilisés pour les détecteurs optiques.

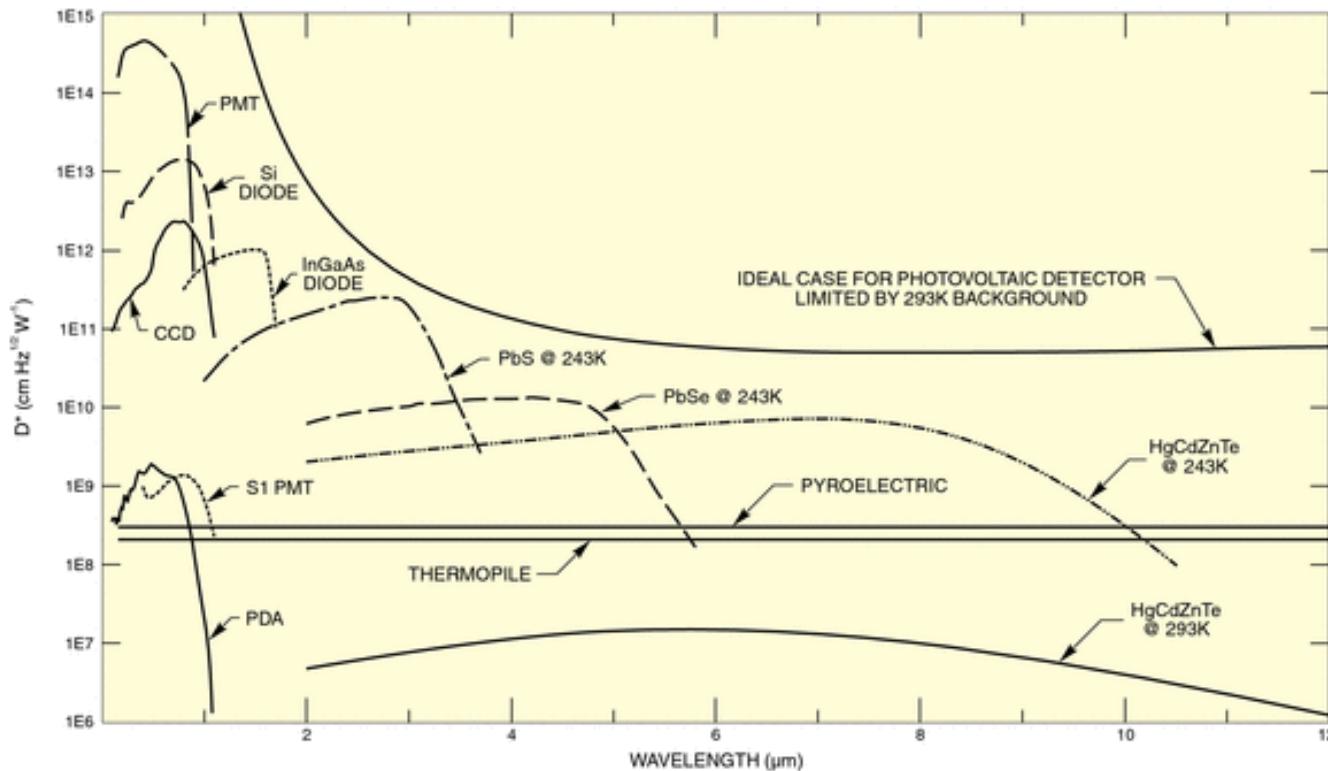


Selon la longueur d'onde de la lumière à mesurer, différent matériaux sont utilisé pour la réalisation du capteur optique.





Classification des détecteurs optiques (visible et infrarouge)



a) DéTECTEURS PHOTONIQUES:

- 1) Photoconducteurs.
- 2) Photodiodes et photodiodes avalanche.
- 3) Photomultiplicateurs (PMT).

Les détecteurs *photoniques* convertissent les photons en porteurs de charges (paires électron/trou). La sensibilité du détecteur dépend de la longueur d'onde. Pour $\lambda > \lambda_g \approx hc/E_g$, un semiconducteur n'absorbe pas la lumière ($E_{ph} < E_g$). Comme un photon bleu a plus d'énergie ($E_{ph} = hc/\lambda$) qu'un photon rouge, un mW en lumière bleue est porté par moins de photons qu'un mW en lumière rouge, il va donc donner moins de porteurs et moins de courant. Donc la sensibilité baisse en diminuant la longueur d'onde. Le maximum de sensibilité et de détectivité est en général proche de λ_g . En refroidissant le détecteur on diminue le nombre des porteurs générés thermiquement et donc le bruit.

b) DéTECTEURS THERMIQUES (voir chapitre capteurs thermiques):

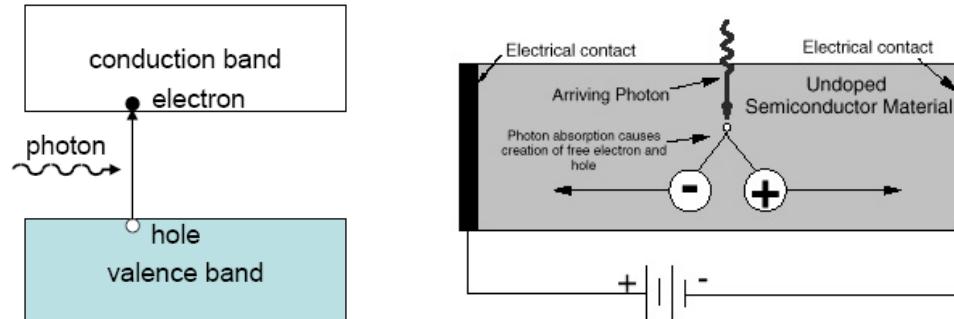
- 1) Bolomètres, thermistors (variation de résistance électrique).
- 2) Thermocouples et thermopiles (variation de tension électrique).
- 3) Cellules de Golay (variation de pression)).
- 4) Pyro détecteurs (variation de électrique).

Les détecteurs *thermiques* mesurent la puissance optique absorbée dans le volume actif. Le phénomène primaire est la conversion de l'énergie lumineuse en énergie d'agitation thermique du réseau et donc en augmentation de température du détecteur. Leur sensibilité et détectivité sont constantes en longueur d'onde. Idéalement, un mW en lumière bleue donne le même signal qu'un mW en lumière rouge. Leur détectivité est généralement plus faible que la détectivité des détecteurs photoniques. La variation de température ΔT est mesuré par différents effets physiques (variation de résistance électrique, de charge, de tension, ...). En infrarouge, les détecteurs thermiques n'ont pas besoin d'être refroidis pour fonctionner. C'est pour cela qu'ils sont fréquemment utilisés dans cette région.

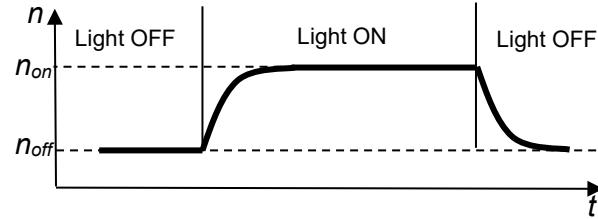
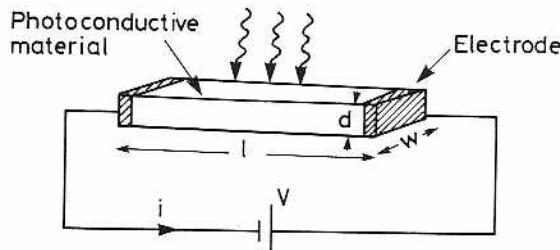
Photoconducteurs (photorésistances, light dependent resistor (LDR)) (photons → paires électron/trou → ΔR)

Principe: Si l'énergie du photon est suffisamment grande (i.e., $E_{ph} > E_g$), le photon provoque la formation d'une paire électron-trou (effet photoélectrique interne) → augmentation de la densité des porteurs de charge libre n → augmentation de la conductivité électrique → diminution de la résistance électrique.

Construction: Matériau semi-conducteur homogène (i.e., sans jonctions pn) avec deux contacts électriques. On applique une tension V et on mesure le courant I . La variation de courant (due à la variation de la résistance) est proportionnelle à la variation de l'intensité lumineuse incidente.



Le photon induit une transition électronique entre la bande de valence et la bande de conduction (formation d'une paire électron-trou). La bande de conduction est totalement vide seulement à $T=0$ dans l'obscurité.



n_{off} : densité des porteurs de charge dans l'obscurité (les porteurs sont générée thermiquement) (Light OFF)

n_{on} : densité des porteurs de charge en présence de la lumière (la lumière augmente la densité des porteurs) (Light ON).

Théorie simple :

$$\Delta n = n_{on} - n_{off} = g \tau_n$$

τ_n : temps de vie des porteurs (temps de recombinaison)

$$g = \frac{1}{lwd} \frac{\eta(1-r)\Phi}{h\nu}$$

g : taux de génération (nombre de paires électron-trou générées optiquement par second et par unité de volume).

Φ : flux de la lumière sur l'élément photoconducteur (en W)

η : rendement quantique (nombre moyen des paires électron-trou générées par photon absorbé).

r : coefficient de réflexion.

l, w, d : longueur, largeur, épaisseur du photoconducteur

La résistance de la plaque photoconductrice est :

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{wd} = \frac{1}{e\mu n} \frac{l}{wd}$$

σ : conductivité, n : densité de porteurs, μ : mobilité des porteurs

Soumise à une tension V la plaque est traversée par un courant I :

$$I = \frac{V}{R} = e\mu n \frac{wd}{l} V$$

Sachant que :

$$E = \frac{V}{l}, \quad v = \mu E, \quad \tau_{tr} = \frac{l}{v}$$

E : champ électrique dans la plaque

v : vitesse de drift des porteurs

τ_{tr} : temps nécessaire pour passer d'un côté à l'autre du dispositif.

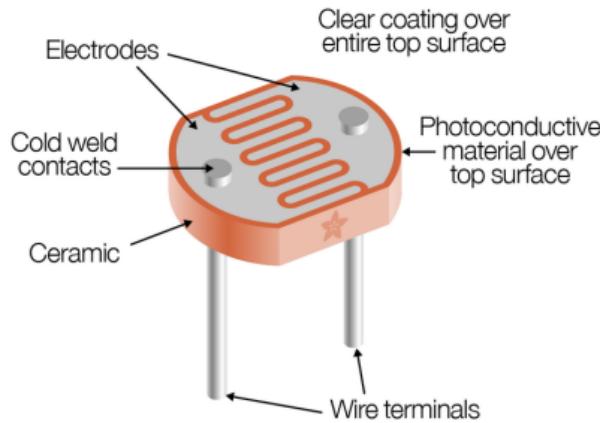
$$\Rightarrow I = en \frac{wdl}{\tau_{tr}}$$

et donc la variation du courant en présence de la lumière est :

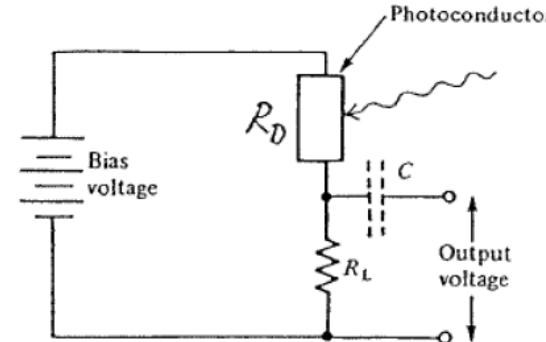
$$\Delta I = e\Delta n \frac{wdl}{\tau_{tr}} = eg \frac{\tau_n}{\tau_{tr}} wdl = e \frac{\tau_n}{\tau_{tr}} \frac{\eta(1-r)\Phi}{h\nu}$$

Note: La variation du courant ΔI qui traverse le matériau photoconducteur est (τ_n/τ_{tr}) supérieur à la charge électrique libérée chaque seconde dans le photoconducteur ($gwdl$).

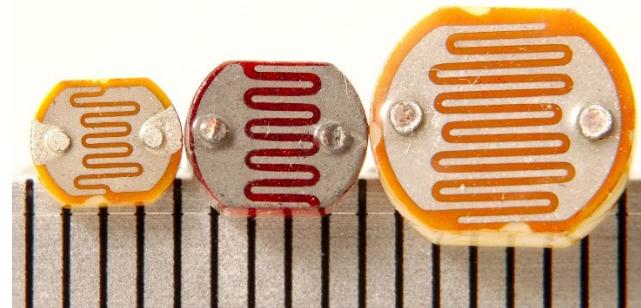
Optimisation de la géométrie: Pour maximiser ΔI , une forme en «peigne» est souvent donnée à la surface photoconductrice. Elle permet une distance entre les électrodes faible (pour minimiser τ_{tr}) et une surface soumise au rayonnement qui reste relativement importante (pour maximiser Φ).



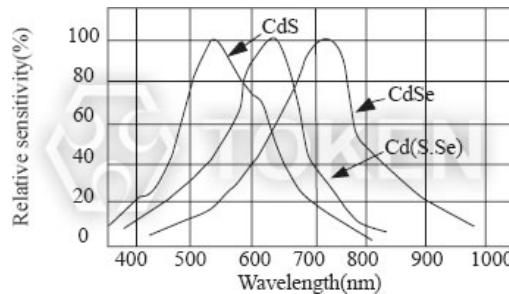
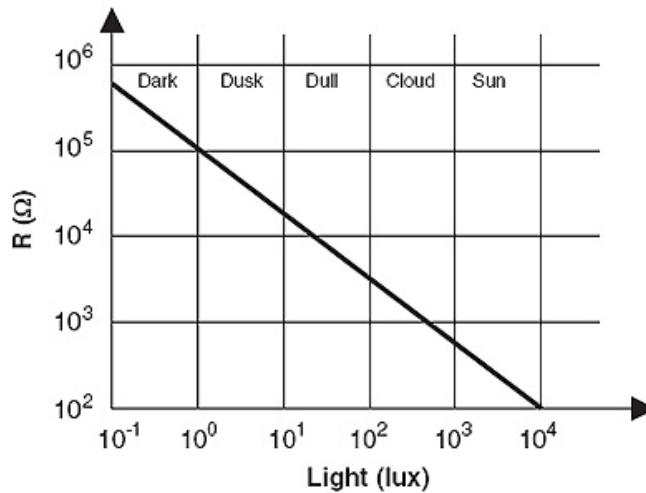
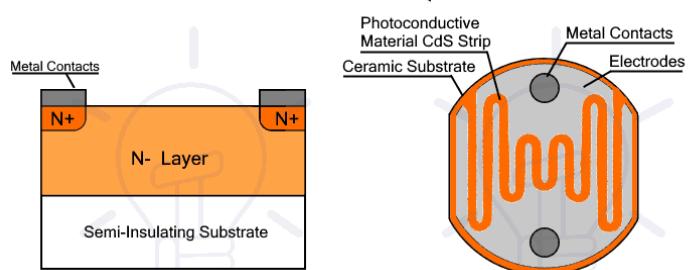
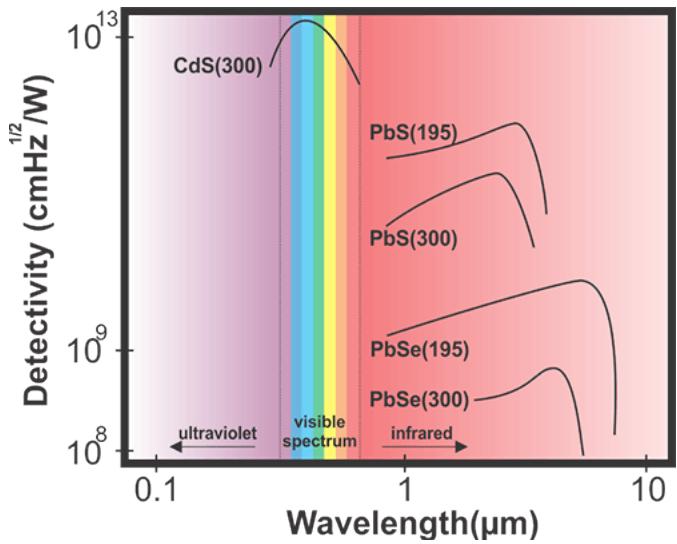
La surface du photoconducteur est partiellement recouverte d'électrodes avec une perte de flux lumineux d'un facteur de l'ordre de 2-5, mais la distance entre les électrodes est réduite d'un facteur de l'ordre de 10. Le gain réel de sensibilité est donc d'un facteur 2-5.



Circuit de mesure des photoconducteurs



Forme en « peigne » (échelle en mm).



Caractéristiques des photoconducteurs:

Matériaux:

Semiconducteurs homogènes polycristallins, la plupart en CdS (sulfure de cadmium, $E_g=2.4$ eV).

Sensibilité:

$$S = \frac{\Delta I}{\Phi} = e \frac{\tau_n}{\tau_{tr}} \frac{\eta(1-r)}{h\nu}$$

Bandé passante :

$$f_c = \frac{1}{\tau_n}$$

Un long temps de vie des porteurs τ_n est nécessaire pour avoir une ΔI élevée, mais un temps de vie court est requis pour obtenir un temps de réponse rapide.

Un compromis entre sensibilité et vitesse est inhérent au fonctionnement des photoconducteurs.

Valeurs typiques de τ_n : 0.1 μ s pour InSb, InAs, CdHgTe,
0.1 ms à 100 ms pour PbS, CdS, CdSe.

Résistance d'obscurité:

10 Ω à 10³ Ω à $T=25$ °C pour InSb, InAs, CdHgTe

10⁴ Ω à 10⁹ Ω à $T=25$ °C pour PbS, CdS, CdSe

Défauts et avantages :

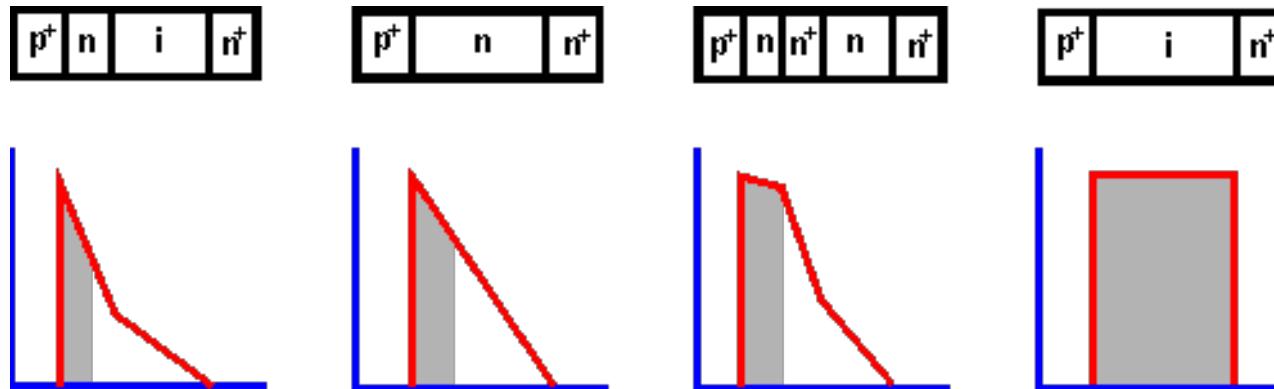
- Défauts : relativement lent, non-linéaire (la théorie simple montre un comportement linéaire), faible stabilité long terme, dérive thermique
- Avantages : simple et bon marché.

Photodiodes

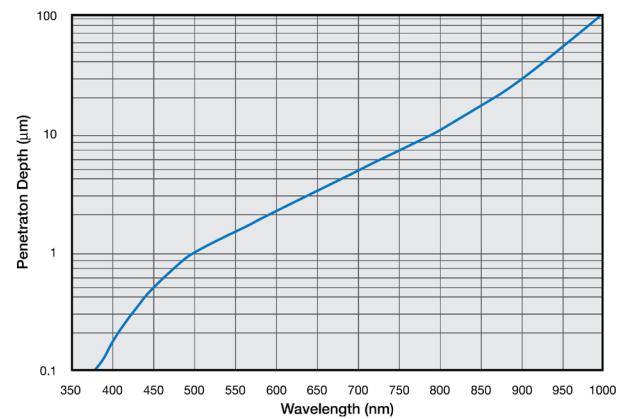
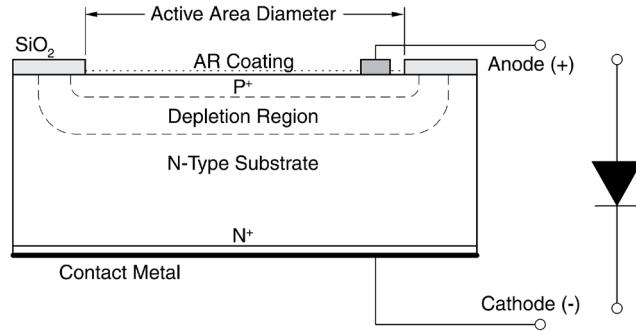
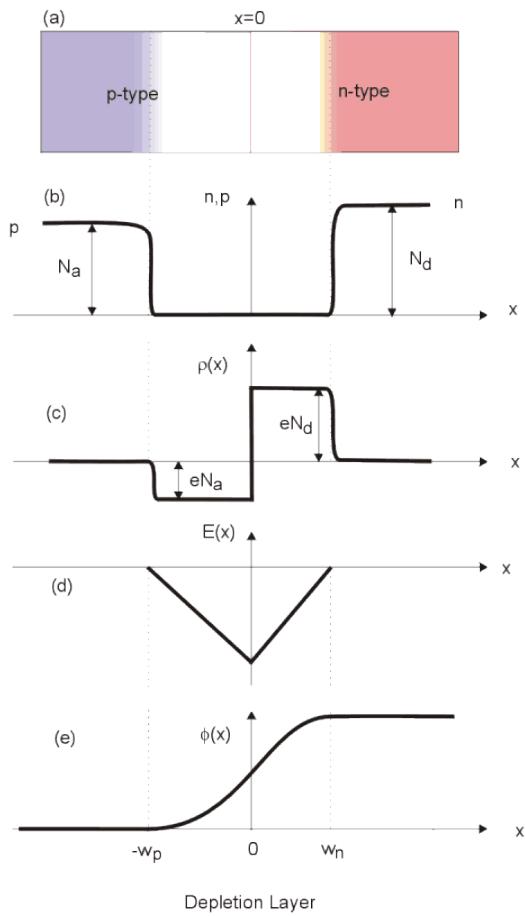
(photons → paires électron/trou → ΔI)

Principe: Si l'énergie du photon est suffisamment grande (i.e., $E_{ph} > E_g$), le photon provoque la formation d'une paire électron-trou. Pour que ces porteurs puissent contribuer au courant, il faut éviter qu'ils se recombinent et pour cela ils doivent être séparés par l'action d'un champ électrique. Ceci est possible dans la zone de déplétion ou le champ électrique est fort. Les paires électron-trou produites loin de la zone de déplétion ont moins de chances de contribuer au courant.

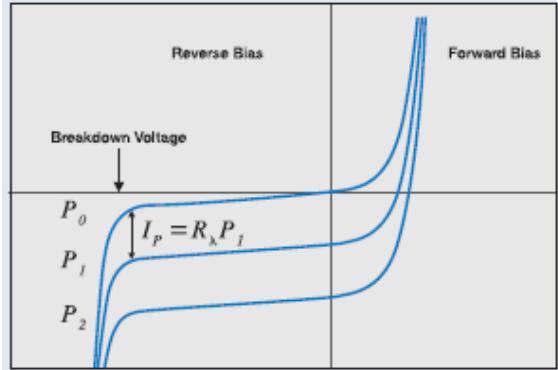
Technologies : Jonctions PN ou PIN, barrières Schottky, hétérojonctions.



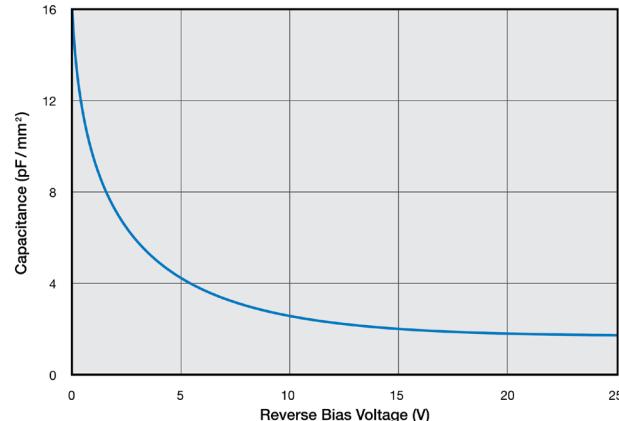
Champ électrique en fonction de la position dans les différentes structures des photodiodes. En gris la région avec champ électrique plus fort.



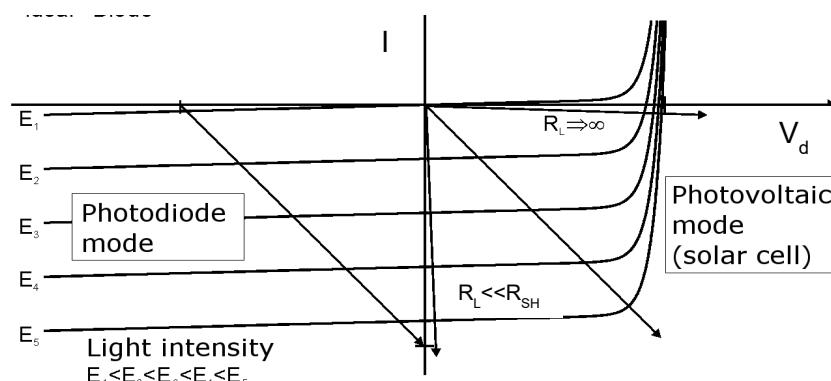
Caractéristique IV et capacité de la jonction:



Caractéristique IV de la photodiode.
 P_0 : sans lumière, P_2 et P_1 : avec lumière ($P_2 > P_1$).

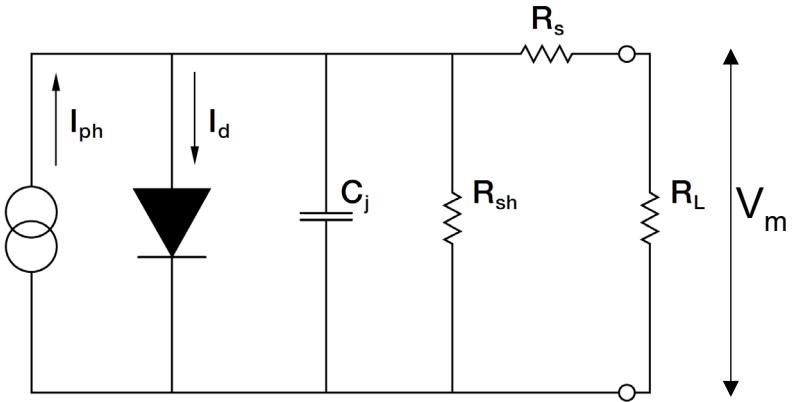


Capacité de la jonction en fonction de la tension inverse appliquée.



La résistance R_L est la «load resistance». R_{SH} est «shunt resistance».

Modèle :



Modèle électrique équivalent d'une photodiode et du circuit de mesure.

R_{SH} : «shunt resistance», pente de la caractéristique IV à $V_d=0$ (typ. 0.01 à 10 G Ω à T=300 K).

R_S : «series resistance», résistance ohmique des éléments semi-conducteurs entre les bornes d'accès de la diode et la zone de déplétion (typ. 10 à 1000 Ω à T=300 K)

C_J : capacité de la jonction (10 à 100 pF pour une petite diode à $V_{bias}=0$). Pour $V_d < 0$:

$$C_J \propto A / \sqrt{|V_d + V_{bi}|}, \quad A: \text{surface de la jonction}, V_d: \text{tension appliquée}, V_{bi}: \text{built-in potential}$$

R_L : «load resistance», résistance d'entrée du système de mesure (avec, éventuellement, en parallèle la capacité d'entrée du système de mesure et les capacités parasites).

I_{ph} : courant produit par la lumière (photocurrent).

I_d : courant dans la diode sans lumière (dark current).

Caractéristiques des photodiodes

Courant totale et photocourant :

$$I = I_d - I_{ph}$$

$$I_{ph} = e\eta(1-r) \frac{\lambda\Phi(x)}{hc} = e\eta(1-r) \frac{\Phi(x)}{hv}$$

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV_d}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

V_d : tension appliquée à la diode (en inverse: $V_d < 0$)

I_{ph} : courant produit par la lumière (photocourant)

I_d : courant dans la diode sans lumière.

I_0 : courant de porteurs minoritaires (courant pour $V_d < 0$ sans illumination)

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x)$$

$\Phi(x)$: flux effectif dans la région de déplétion [W]

Φ_0 : flux sur la surface de la diode [W]

x : distance surface-région de depletion

α : facteur d'atténuation,

r : coefficient de réflexion

η : rendement quantique (nombre moyen des paires électron-trou libérés par photon absorbé).

λ : longueur d'onde de la radiation [m],

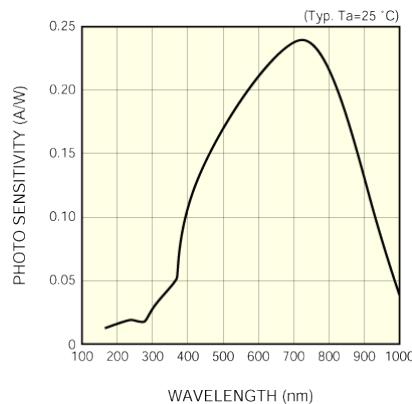
ν : fréquence de la radiation [Hz]

Sensibilité :

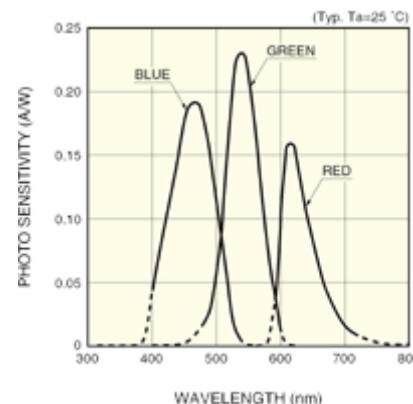
$$S = \frac{I_{ph}}{\Phi_0} = \frac{e\eta(1-r)\frac{\lambda\Phi_0 \exp(-\alpha x)}{hc}}{\Phi_0} = e\eta(1-r)\frac{\lambda \exp(-\alpha x)}{hc} \quad [\text{A/W}]$$

$S(\lambda)$ est déterminée par l'influence de λ sur: le rendement quantique η , le coefficient de réflexion r , et le coefficient d'absorption α .

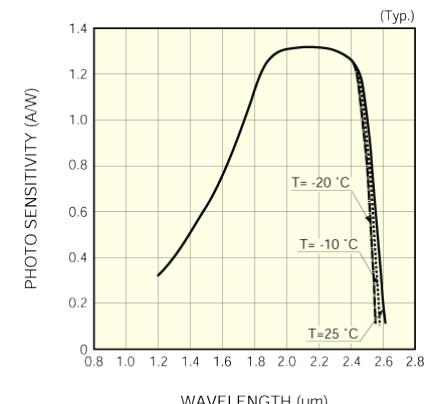
- Cas idéal : $\eta = 1, r=0, \alpha=0 \rightarrow S=0.8 \text{ A/W}$ ($\lambda = 1 \mu\text{m}$), $S=0.08 \text{ A/W}$ ($\lambda = 100 \text{ nm}$)
- Pour des photodiodes réelles en Si: $S \sim 0.2 \text{ A/W}$ (entre 500 et 800 nm). Pour $\lambda > 950 \text{ nm}$, S diminue car faible absorption $E_{\text{ph}} < E_{\text{gap}}$. Pour $\lambda < 600 \text{ nm}$, S diminue car un photon visible ne peut créer qu'une paire électron-trou (un photon X-ray peut produire plus qu'une paire électron-trou). Pour $\lambda < 450 \text{ nm}$, S diminue fortement car il y a absorption en surface.



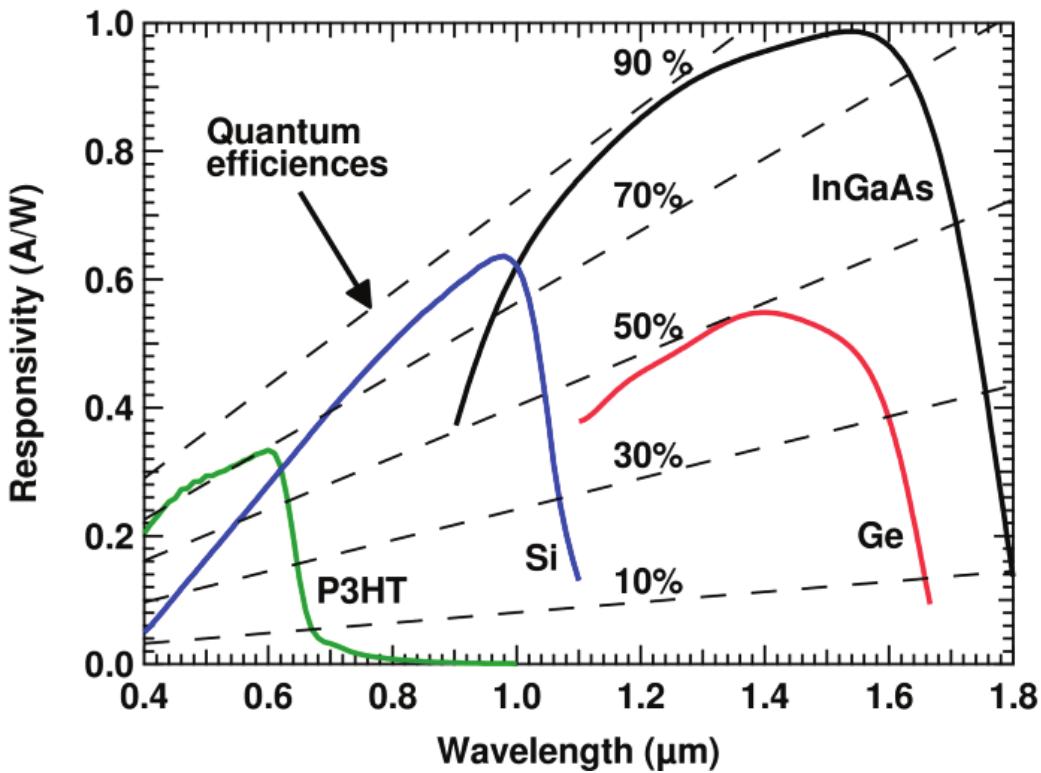
Hamamatsu S10043, Si photodiode.



Hamamatsu S10043, Si photodiode.



Hamamatsu 842305, InGaAs photodiode.



Sensibilité S (responsivity) et rendement quantique η (quantum efficiency) pour différents matériaux.
P3HT (poly(3-hexylthiophene)) est un polymère photoconducteur.

Réponse en fréquence (pour $I_{ph} \gg I_d$) :

$$\left| \frac{V_m}{I_{ph}} \right| = \frac{R_{SH} R_L}{R_{SH} + R_L + R_s} \left(1 + \left(\omega \frac{R_{SH} (R_L + R_s)}{R_{SH} + R_L + R_s} C_J \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (\text{sans capacité parasite } C_p)$$

Temps de réponse et fréquence de coupure :

$$\tau = \frac{R_{SH} (R_L + R_s)}{R_{SH} + R_s + R_L} C_J, \quad f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{R_{SH} + R_s + R_L}{(R_L + R_s) R_{SH} C_J} \quad (\text{sans capacité parasite } C_p)$$

Le courant photoélectrique suit rapidement l'éclairement: le temps de retard est de l'ordre de 10^{-12} s (limitée par le temps nécessaire à parcourir la diode). Cependant la rapidité de croissance du courant mesurée est déterminée par le schéma équivalent de la diode (R_{SH} , C_J) et du circuit de mesure associé (R_L et éventuelle capacité parasite C_p). R_s est généralement négligeable. Une bande passante > 1 GHz est possible avec une polarisation inverse et/ou avec une diode de très petites dimensions (faible C_J).

Bruit et détectivité:

- bruit de grenaille (shot-noise):

$$I_{m(n,rms)} = \sqrt{2eI_m \Delta f}$$

I_m : courant moyen dans la résistance R_L produit par la photodiode

$$(\text{pour } E_{ph} \gg 10 \text{ eV: } I_{m(n,rms)} = \sqrt{2eI_m (E_{ph}/E_0) \Delta f}, \text{ avec } E_0 = 3.6 \text{ eV pour Si})$$

- bruit thermique (pour $f \ll f_c$):

$$V_{m(n,rms)} = \sqrt{4kT R_{equiv} \Delta f}$$

$$I_{m(n,rms)} = V_{m(n,rms)} / R_L = \sqrt{4kT R_{equiv} \Delta f} / R_L$$

$$\text{avec } R_{equiv} = \frac{(R_{SH} + R_s) R_L}{R_{SH} + R_s + R_L}$$

- bruit 1/f et bruit de création-recombinaison: dépendant de la structure du capteur et limitée en fréquence. Bruits négligeables lorsque le capteur est utilisé en lumière modulée (modulation et détection synchrone à fréquence supérieur à la fréquence « de coupure » de ces bruits).

- Bruit total :

Bruit rms :

$$I_{m(n,rms)} = \sqrt{\sum_i (I_{m(n,rms)})_i^2} \quad [A]$$

Densité spectrale (pour bruit blanc):

$$I_{m(n)} = \frac{I_{m(n,rms)}}{\sqrt{\Delta f}} \quad [A/\text{Hz}^{1/2}]$$

- Noise Equivalent Power:

$$NEP = \frac{I_{m(n)}}{S} \quad [\text{W}/\text{Hz}^{1/2}]$$

- DéTECTIVITÉ:

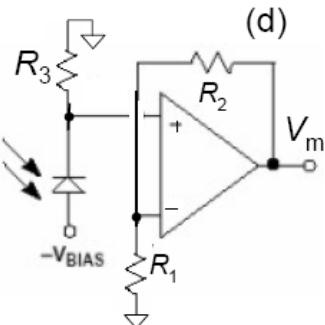
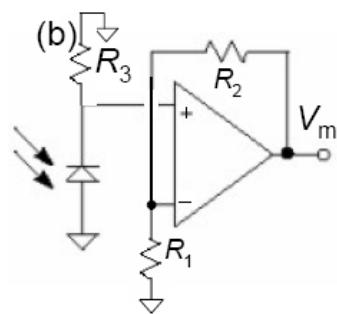
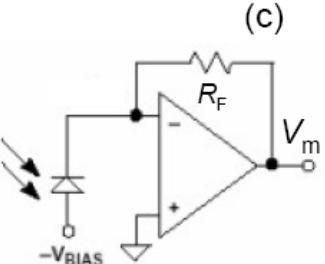
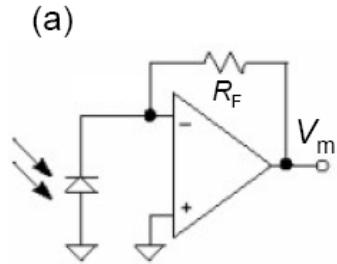
$$D = \frac{1}{NEP} \quad [\text{W}^{-1}\text{Hz}^{1/2}]$$

- DéTECTIVITÉ spéCIFIQUE:

$$D^* = \frac{\sqrt{A}}{NEP} \quad [\text{mW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}]$$

(A : surface de l'élément photosensible. La déTECTIVITÉ spéCIFIQUE permet de définir chaque type de capteur indépendamment de sa surface photosensible A). NEP , D et D^* sont déPENDANTS de la longueur d'onde, de la température,

Méthodes de mesure:



(a) et (b) Mode photovoltaïque
(pas de tension appliquée)

- Pas de courant d'obscurité (donc faible shot noise avec faible illumination)
- La capacité de la jonction (C_J) est relativement grande, donc la photodiode est relativement lente.

- (a) Mesure de courant
(b) Mesure de tension

(c) et (d) Mode photoconducteur
(tension inverse appliquée)

- Courant non nul même dans l'obscurité, donc shot noise présent même sans illumination.
- La capacité de la jonction (C_J) est réduite par la tension inverse de bias, donc la photodiode est plus rapide.

- (c) Mesure de courant
(d) Mesure de tension

Mode photoconducteur :

(c) Courant :

Pour une tension inverse V_d grand :

$$I \cong I_0 + I_{ph}$$

Tension de sortie :

$$V_m = R_F I$$

Résistance d'entrée :

$$R_L = R_F / A \quad (A : \text{open-loop gain de l'ampli oper.})$$

Fréquence de coupure :

$$f_c \cong \frac{1}{C_J} \frac{R_{SH} + (R_F / A)}{R_{SH}(R_F / A)}$$

(note : $A(f) = \frac{A_0}{1 + (f/f_p)}$ ou $A_0 \approx 10^5$ à 10^6 , $f_p \approx 10^2$ à 10^3 Hz)

(d) Tension :

Pour une tension inverse V_d grand :

$$I \cong I_0 + I_{ph}$$

Tension de sortie :

$$V_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) R_3 I$$

Résistance d'entrée :

$$R_m \cong R_3$$

Fréquence de coupure :

$$f_c \cong \frac{1}{C_J} \frac{R_{SH} + R_3}{R_{SH} R_3} \cong \frac{1}{C_J} \frac{1}{R_3} \quad (\text{pour } R_3 \ll R_{SH})$$

Mode photovoltaïque

(a) Courant de court circuit I_{cc} :

$$V_d \approx 0$$

$$\rightarrow I \approx I_{ph} \quad (\rightarrow \text{pas de courant dans l'obscurité})$$

Tension de sortie :

$$V_m = R_F I \quad \text{Résistance d'entrée : } R_m = R_F / A$$

Fréquence de coupure :

$$f_c \equiv \frac{1}{C_J} \frac{R_{SH} + (R_F / A)}{R_{SH}(R_F / A)} \quad (A : \text{open-loop gain de l'ampli oper.})$$

(b) Tension en circuit ouvert V_{co} :

$$R_3 \text{ très élevée } \rightarrow I \approx 0 \quad \rightarrow$$

$$V_{co} = V_d = \frac{kT}{e} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (\text{fonction linéaire du flux})$$

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{fonction logarithmique du flux})$$

$$V_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{co}$$

$$R_m \approx R_3 \quad (\text{pour } R_3 \ll R_{in,ampliOP})$$

Tension de sortie :

$$f_c \equiv \frac{1}{C_J} \frac{R_{SH} + R_3}{R_{SH} R_3}$$

Résistance d'entrée :

Fréquence de coupure :

Photodiode avalanche

Principe: Si l'énergie du photon est suffisamment grande (i.e., $E_{\text{ph}} > E_g$), le photon provoque la formation d'une paire électron-trou. En appliquant à la diode une tension inverse proche de sa tension de claquage V_{BD} (break-down voltage), les électrons (et les trous) sont accélérés par le fort champ électrique (force de Lorentz) associé à la forte tension d'inversion appliquée. L'électron et le trou peuvent acquérir une énergie cinétique suffisamment grande pour qu'ils puissent ioniser par choc des atomes et créer une nouvelle paire électron-trou qui à son tour pourra reproduire le même processus. Il y alors multiplication des porteurs (effet avalanche).

Le courant d'origine photoélectrique est multiplié par un facteur M (gain) contrôlable par la tension inverse V_r : $M = K / (1 - (V_r / V_{\text{BD}}))$ K étant une constante qui dépend de la réalisation de la diode.

M maximale est de l'ordre de 10^3 (valeurs plus hautes ne sont pas possibles à cause du claquage, provoqué par l'échauffement de la diode).

$$\begin{aligned} I_M &= I_L M \\ I_{\text{noise},M} &= \sqrt{2eI_M MFB} = M \sqrt{2eI_L FB} \quad \Rightarrow \quad SNR_M = \frac{I_M}{I_{\text{noise},M}} = \frac{\sqrt{I_L}}{\sqrt{2eFB}} \\ I_{\text{noise},L} &= \sqrt{2eI_L B} \end{aligned} \quad SNR_L = \frac{I_L}{I_{\text{noise},L}} = \frac{\sqrt{I_L}}{\sqrt{2eB}} \quad \Rightarrow \quad \frac{SNR_L}{SNR_M} = \sqrt{F}$$

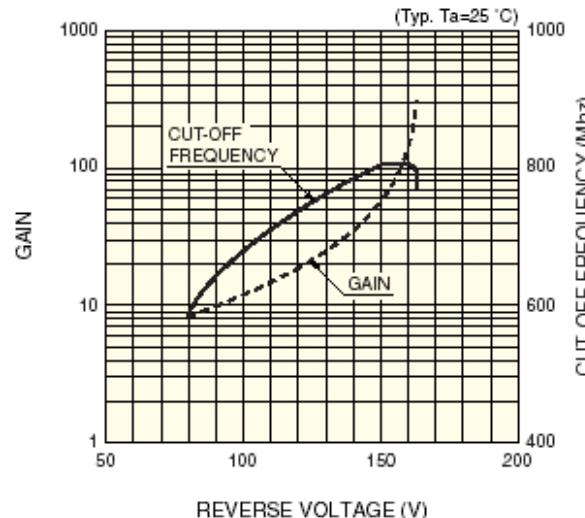
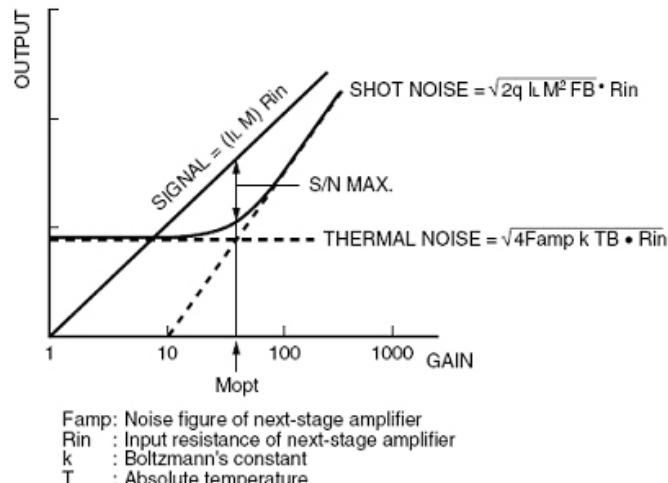
I_L : courant pour $M=1$ F : "Excess" noise factor, α : rapport entre le taux d'ionisation des trous et celui des électrons,
 B : frequency bandwidth

$$F \cong \alpha M + (1 - \alpha)(2 - (1/M)). \quad \text{Pour } M \gg 1 \text{ et } \alpha \ll 1 \rightarrow F \cong \alpha M + 2$$

Pour Si avalanche photodiodes: $\alpha \approx 0.1$. Pour $M \cong 100 \Rightarrow F \cong 12 \Rightarrow SNR$ réduit d'un facteur 3.5.

(Note: $I_{\text{noise},M} \neq \sqrt{2eI_M B}$, le shot noise dépend du processus «microscopique» qui génère le courant I_M).

Si l'on considère uniquement le bruit de grenaille (shot noise), la mesure en mode avalanche (c'est-à-dire pour $M > 1$) détériore le rapport signal sur bruit (SNR) par rapport à la mesure en mode normal (c'est-à-dire $M = 1$). Cependant, en présence de bruit thermique, fonctionner en mode avalanche peut améliorer le SNR, en particulier si l'on choisit un gain optimal M_{opt} .

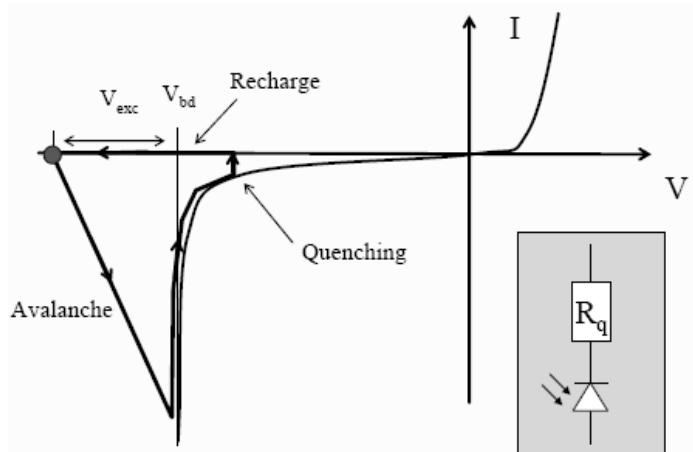


L'amplitude du signal est une fonction linéaire du gain M . Le bruit de grenaille (shot noise) est fonction du gain M et de $F(M, \alpha)$. Dans la plupart des cas le bruit de grenaille croît plus rapidement que le signal, i.e., en M^β avec $\beta > 1$. Le bruit thermique de l'électronique est indépendant de M . Il existe donc une valeur optimale pour le gain M_{opt} (et donc pour la tension inverse), en fonction du bruit thermique de l'électronique. Une tension inverse plus grande, en plus d'augmenter le gain M , augmente également la bande passante de la photodiode, permettant ainsi des applications où l'intensité de l'éclairage varie plus rapidement.

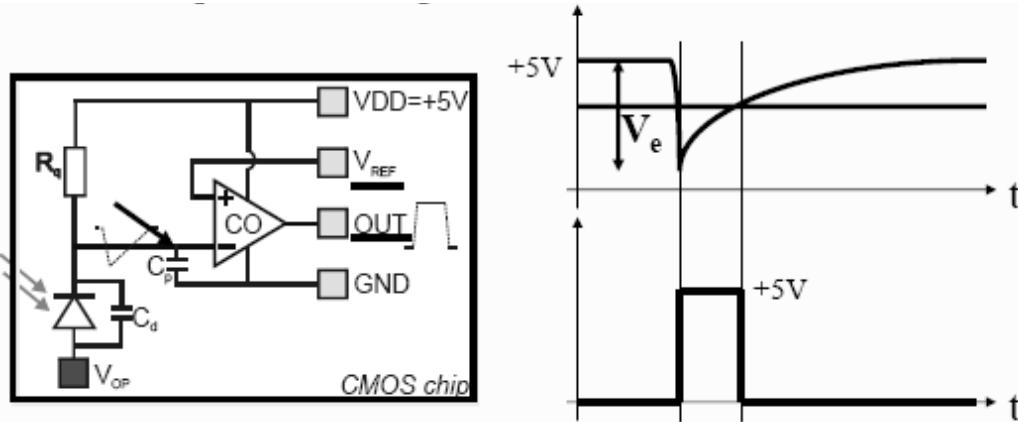
- Plus grande sensibilité (multiplié par M) par rapport à une photodiode en fonctionnement normale.
- Plus grand bruit (plus de courant donc plus de shot-noise mais aussi de «excess» noise).

Single photon avalanche photodiode (SPAD) (ou Geiger mode photodiode)

Principe: Photodiode avalanche polarisé avec tension inverse $V_r > V_{BD}$ avec circuit de «*quenching*» pour éviter la destruction de la diode.



Les photodiodes avalanche opérées dans le mode Geiger ont la capacité de détecter les photons un par un. Cette sensibilité au photon unique est obtenue en polarisant la photodiode avec une tension inverse **au-dessus** de la tension de claquage V_{BD} (break-down voltage). La photodiode restera dans un état métastable jusqu'à ce qu'un photon arrive. Si l'énergie du photon est suffisamment grande (i.e., $E_{ph} > E_g$), le photon provoque la formation d'une paire électron-trou. En appliquant à la diode une tension au-dessus de la tension de claquage, les électrons (et les trous) sont accélérés par le fort champ électrique (force de Lorentz). Les électrons et le trou peuvent acquérir une énergie cinétique suffisamment grande pour qu'ils puissent ioniser par choc des atomes et créer une nouvelle paire électron-trou qui à son tour pourra reproduire le même processus. Il y alors multiplication des porteurs (effet avalanche). Donc l'arrivée d'un seul photon va déclencher l'avalanche et donc un courant I important. Cette avalanche ne s'arrête pas d'elle-même. Un mécanisme de « quenching » (par exemple une résistance R_q en série avec la diode) permet de faire chuter la tension sur la diode sous la tension de claquage V_{BD} (la tension aux bornes la résistance est R_qI). L'avalanche se termine, le courant retourne à zéro, et la tension sur la diode remonte au-dessus du claquage V_{BD} . Le cycle peut recommencer dès l'arrivée du photon suivant. Nous obtenons donc un détecteur de photon singulier.



Circuit de mesure: Ce circuit est capable de produire une impulsion de tension de 5 V pour chaque photon détecté par la photodiode à avalanche (APD).

Sensibilité: La quantum efficiency n'est pas 100% (pas tous les photons produisant une avalanche dans la photodiode).

Bruit: Le bruit principal dans un compteur de photons SPAD est dû au nombre d'impulsions parasites provoquées par les paires électron-trou générées thermiquement (donc pas dues à l'arrivée d'un photon externe). Le taux de génération thermique des paires électron-trou dépend de l'écart d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction (bandgap) et de la température.

Intensité de lumière maximale: Le nombre maximum des photons par seconde mesurable est limité par le temps nécessaire à la recharge de la capacité de la photodiode et des capacités parasites (durée de l'impulsion de sortie). Si, par exemple, la durée de l'impulsion associée à l'arrivée de chaque photon individuel est de 10 ns, le flux maximal de photons doit être inférieur à 10^8 /s.

Position sensitive detectors (PSD) et photodiodes à quadrants

Principe: mesurer le déplacement relatif d'un faisceau de lumière avec une (ou plusieurs) photodiodes par comparaison des courants. Deux approches:

1. Photodiode à anodes séparées (« position sensitive detector », PSD).
2. Photodiodes adjacentes (« photodiode à quadrants »).

Position sensitive detector (PSD):

1D: 2 électrodes sur la même photodiode, 2D: 4 électrodes sur la même photodiode

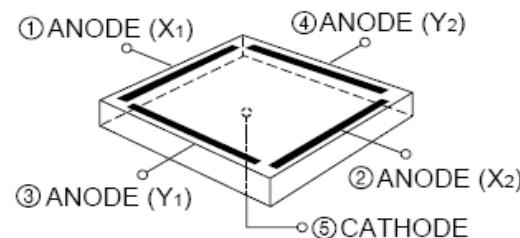
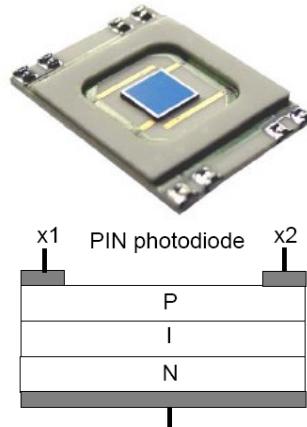


Schéma de principe d'une PSD 2D

$$X = K_x \frac{(Ix_1 - Ix_2)}{Ix_1 + Ix_2}$$

$$Y = K_y \frac{(Iy_1 - Iy_2)}{Iy_1 + Iy_2}$$

- Linéaire (linéarité 0.1 %)
- Résolution : < 1 μ

- Applications: centrage de faisceau optique

Photodiode à quadrants:

1D: 2 photodiodes adjacentes, 2D: 4 photodiodes adjacentes

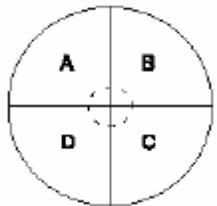
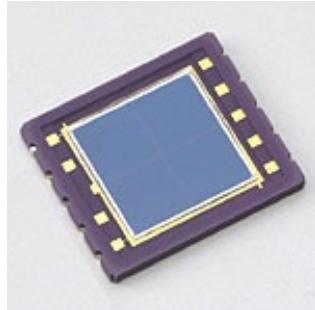
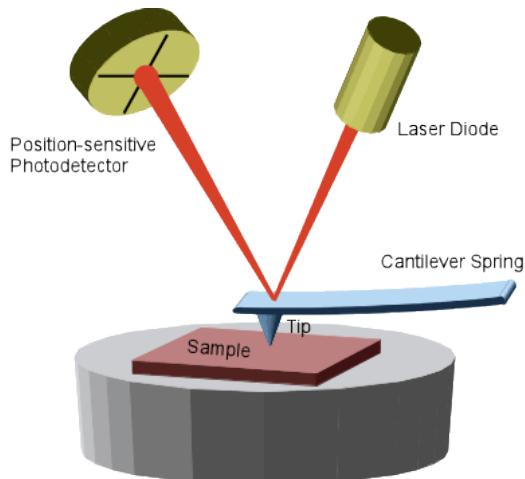


Schéma de principe d'une photodiode à 4 quadrants. La position du faisceau (X, Y) est déterminée par les courants I_A, I_B, I_C et I_D sur le 4 photodiodes. La division par $(I_A + I_B + I_C + I_D)$ compense l'instabilité de l'intensité du laser.



$$X = K \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D}$$

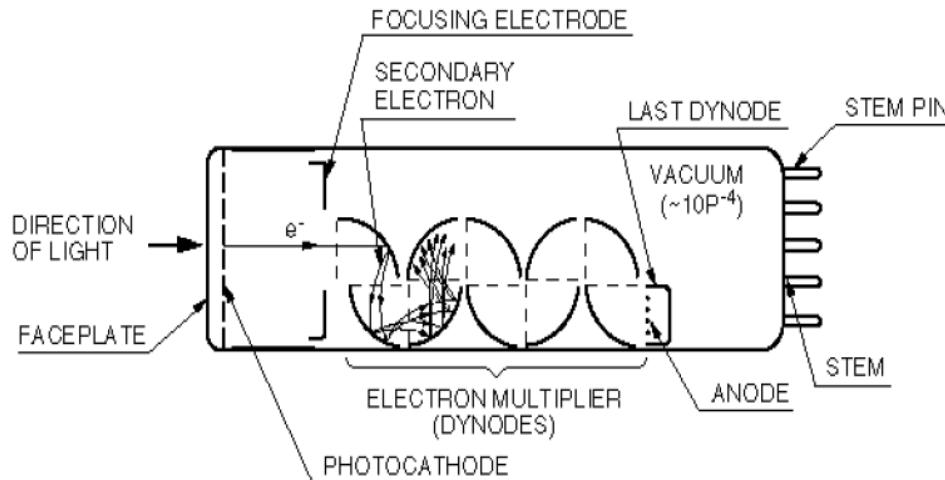
$$Y = K \frac{(I_A + I_B) - (I_D + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D}$$

- Non-linéaire
- Résolution: $< 0.1 \mu\text{m}$

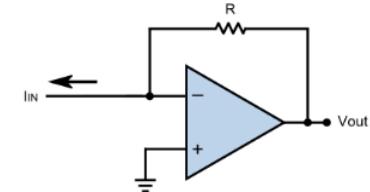
Application: Atomic force microscopes (AFM)

Photomultiplicateur (PMT)

Principe: Effet photoélectrique (photoémission). Emission d'électrons sous illumination d'une photocathode par des photons avec énergie $E_{ph} > W_f$ (avec W_f work function, énergie nécessaire pour arracher l'électron). Les électrons sont multipliés par impacts successifs sur les « dynodes ». Le courant total est récolté par l'anode.



Amplificateur à trans-impédance
(même circuit utilisé pour les photodiodes).



Photomultiplicateur. La photocathode est recouverte par un composé à bas W_f (Sb-Cs,...). Le vide est nécessaire pour éviter les collision électron-atomes. Le courant sur l'anode est converti en tension avec un amplificateur à transimpédance. Résolution : jusqu'à 1 photon.

Photomultiplier Tube Output in Single Photoelectron State

The output signal from a photomultiplier tube in the photon counting mode can be calculated as follows:

In the photon counting mode, a single photoelectron e^- (electron charge 1.6×10^{-19} coulombs) is emitted from the photocathode. If the photomultiplier tube gain μ is 5×10^6 , then the anode output charge is given by

$$\begin{aligned} e \times \mu &= 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6 \text{ (coulombs:C)} \\ &= 8 \times 10^{-13} \quad (\text{C}) \end{aligned}$$

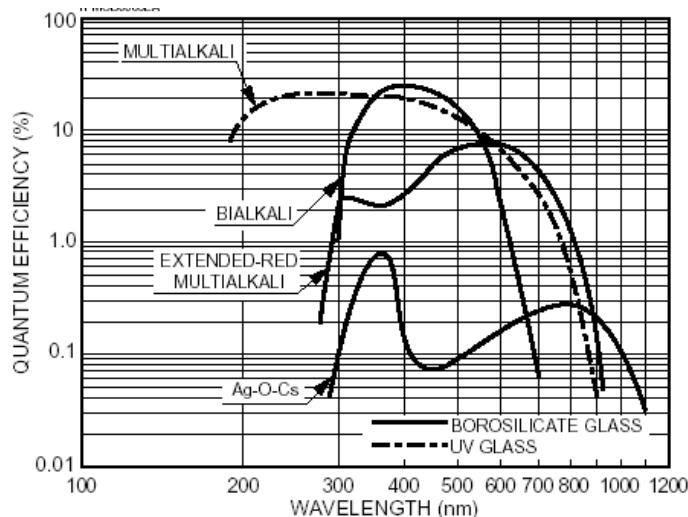
Here, if the pulse width t (FWHM) of the anode output signal is 10ns, then the output pulse peak current I_p is

$$\begin{aligned} I_p &= e \times \mu \times 1/t \quad (\text{A}) \\ &= (8 \times 10^{-13}) / (10 \times 10^{-9}) \\ &= 8 \times 10^{-5} \quad (\text{A}) \end{aligned}$$

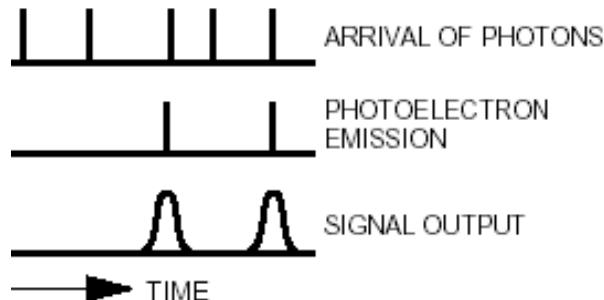
This means that the anode output pulse width is narrower, we can obtain much higher output peak current. If the load resistance (input impedance of the succeeding amplifier) is 50 ohms, the output pulse peak voltage V_{out} becomes

$$\begin{aligned} V_{out} &= I_p \times 50 \quad (\text{V}) \\ &= 4 \quad (\text{mV}) \end{aligned}$$

The photomultiplier tube output in the photon counting mode is extremely small. This requires a photomultiplier tube having a high gain and an amplifier with sufficiently low noise relative to the photomultiplier tube output noise. As a general guide, photomultiplier tubes should have a gain of approximately 1×10^6 or more.



(Single Photoelectron State)



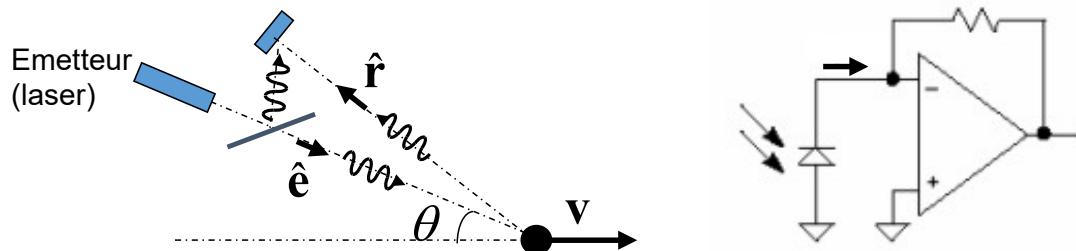
La quantum efficiency n'est pas 100% (pas tous les photons sont détectée).

Vélocimétrie par effet Doppler (Laser Doppler Velocimetry)

$$v \rightarrow \Delta f$$

Principe:

Mesure de la vitesse de la cible par la mesure du décalage de fréquence Doppler entre la lumière émise par un laser et la lumière réfléchie par la cible en mouvement.



$$\text{Décalage Doppler :} \quad f_D = f_r - f_e = -\frac{f_e}{c} \mathbf{v} \cdot (\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{e}})$$

f_r : fréquence du signal réfléchi mesuré par le récepteur (typ. une photodiode pour un vélocimètre optique)
 f_e : fréquence du signal émis par l'émetteur (un laser pour un vélocimètre optique)

Pour $\hat{\mathbf{r}} \cong -\hat{\mathbf{e}}$ (direction d'émission antiparallèle à la direction d'observation):

$$f_D \cong -f_e \frac{2v}{c} \cos \theta$$

θ : angle entre la direction d'émission-réception et la vitesse de l'objet.

La lumière produite par l'émetteur est aussi envoyée vers le récepteur avec un miroir semi-transparent.

Cela permet d'utiliser une simple photodiode comme récepteur (donc un spectromètre pour la mesure de f_r n'est pas nécessaire).

Cela est possible car le courant produit par la photodiode I_d est proportionnelle à l'intensité du champ électromagnétique :

$$I_d \propto S \propto E^2$$

(S : Poynting vector, i.e., densité de puissance de l'onde).

Champ électrique de l'onde total sur la photodiode: $E = A_e \cos(2\pi f_e t + \varphi_e) + A_r \cos(2\pi f_r t + \varphi_r)$

Courant de sortie de la photodiode:

$$\begin{aligned} I_d &\propto I_d \propto S \propto E^2 = A_e^2 \cos^2(2\pi f_e t + \varphi_e) + A_r^2 \cos^2(2\pi f_r t + \varphi_r) + 2A_e A_r \cos(2\pi f_e t + \varphi_e) \cos(2\pi f_r t + \varphi_r) = \\ &= (1/2) A_e^2 (1 + \cos(2\pi 2f_e t + 2\varphi_e)) + (1/2) A_r^2 (1 + \cos(2\pi 2f_r t + 2\varphi_r)) + \\ &\quad + A_e A_r \cos(2\pi(f_e + f_r)t + (\varphi_e + \varphi_r)) + A_e A_r \cos(2\pi(f_e - f_r)t + (\varphi_e - \varphi_r)) \end{aligned}$$

donc la sortie du détecteur contient :

- un signal DC : $(1/2)A_e^2 + (1/2)A_r^2$
- un signal à fréquence $f_D = f_e - f_r$: $A_e A_r \cos(2\pi(f_e - f_r)t + (\varphi_e - \varphi_r))$. La fréquence f_D permet d'obtenir la vitesse de l'objet ($v \approx c f_D / 2 \cos \theta f_e$).
- les signaux à fréquences optiques ($f_e + f_r, 2f_e, 2f_r$) sont, dans les faits, coupés par la «bande passante» du détecteur.

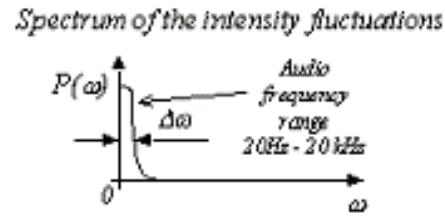
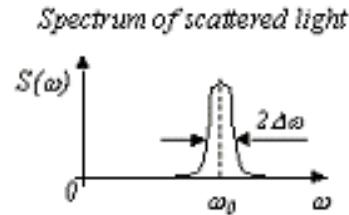
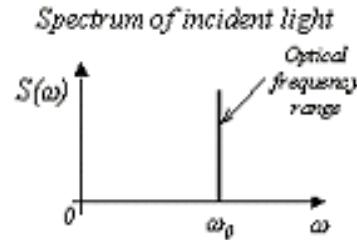
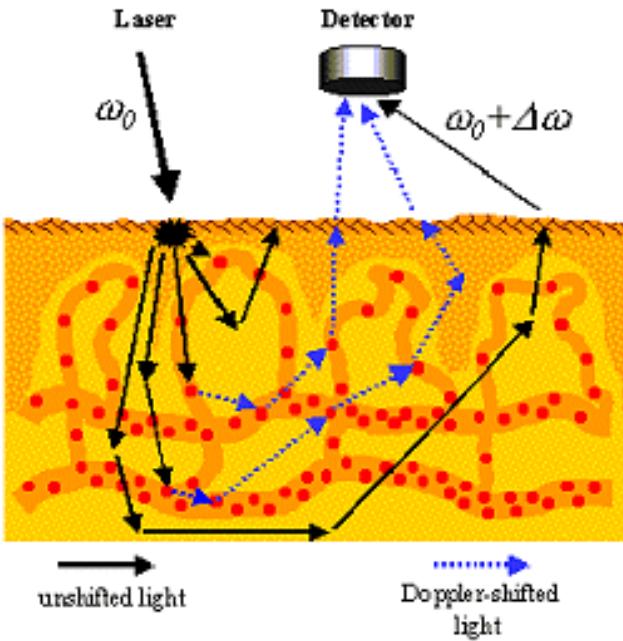
Example: $f_e \approx 10^{15} \text{ Hz}$, $v=100 \text{ km/h} (=28 \text{ m/s})$, $\theta=0 \rightarrow f_D=186 \text{ MHz}$. Donc $f_D \ll f_e$ est mesurable avec une simple photodiode.

Note: Les systèmes de mesure de la vitesse des véhicules routiers sont basée sur:

- l'effet Doppler (ultrasons, RF, micro-ondes et, rarement, visible)
- mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi (laser IR, visible, UV)

Applications:

Mesure de la distribution des vitesses des particules.



Capteur de courant optique (basé sur l'effet Faraday) $\Delta I \rightarrow \Delta B \rightarrow \Delta \beta$

Principe: rotation de la polarisation de la lumière induite par le champ magnétique (produit par le courant): effet Faraday.

Rotation de la polarisation:

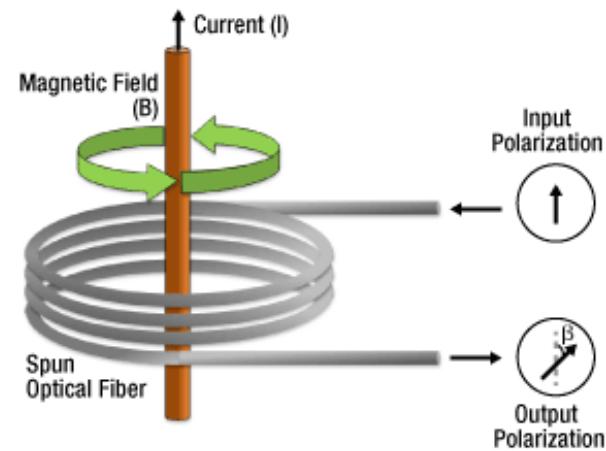
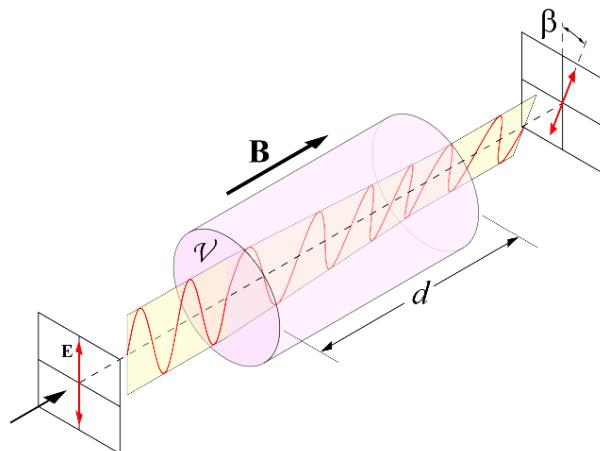
$$\beta = C_{ver} Bd$$

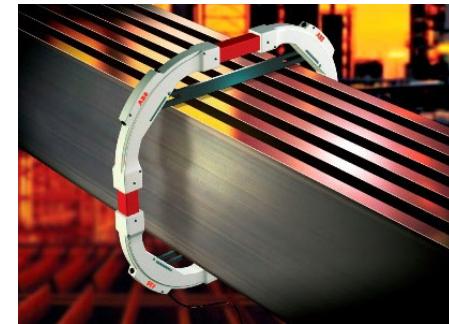
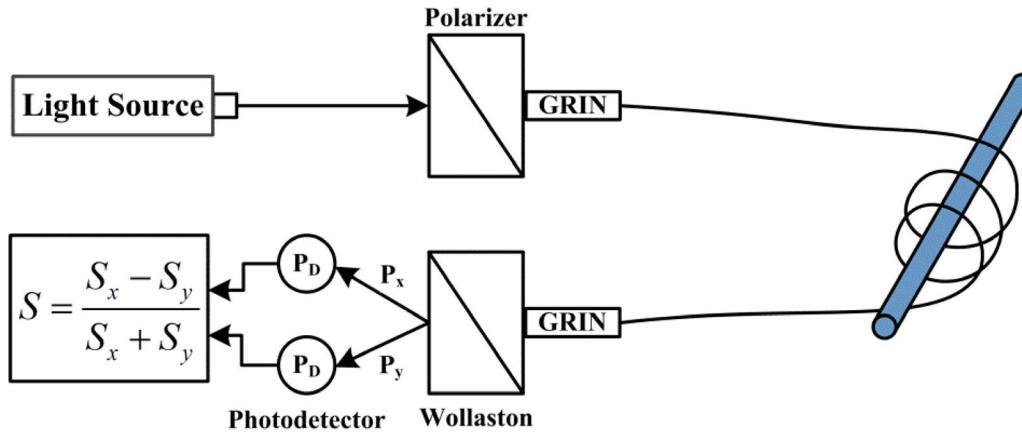
C_{ver} : cst de Verdet de la fibre (dépend de λ et du matériau)

B : champ magnétique produit par le courant I

d : longueur de la fibre

Mesure de β : mesure d'intensité de la lumière après le filtre analyseur (analyzer). L'intensité de la lumière après le filtre analyseur est $\propto \cos(\beta)$ et mesurable avec une photodiode.





Capteur de courant à fibre optique. La lumière en sortie est divisée en deux polarisations orthogonales par un prisme de Wollaston. Ces deux signaux sont détectés par deux photodétecteurs indépendants et traités par un circuit analogique qui calcule le signal de sortie S . Notations : GRIN (GRadient Index, c'est une lentille optique utilisée pour coupler la fibre avec le prisme de Wollaston) ; P_i ($i = x, y$) puissance optique dans les deux états de polarisation.

- Mesure de très grands courants (1 kA à 500 kA)
- Matériaux:
 - Terbium gallium garnet $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TGG) bulk crystals ($C_{ver} = 134$ rad/Tm @ 632 nm)
 - Silica standard optical fibers ($C_{ver} = 3.5$ rad/Tm @ 632 nm)
 - Terbium doper fibers ($C_{ver} = 32$ rad/Tm @ 632 nm)
- Fabricants : ABB, ...

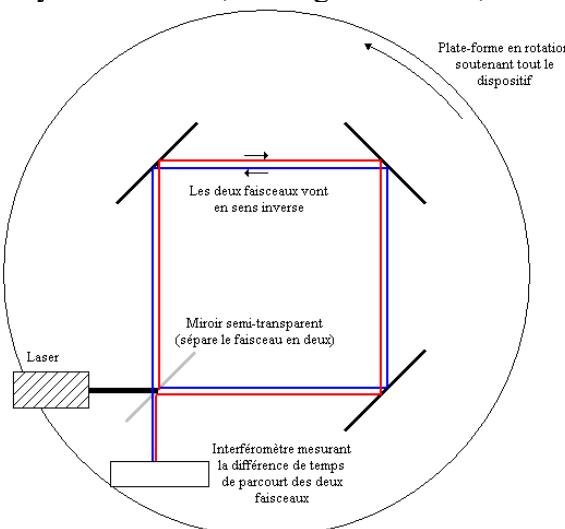
Gyromètre optique (basé sur l'effet Sagnac)

$$\Delta\Omega \rightarrow \Delta\phi$$

Principe: La lumière émise par une diode laser est divisée en deux. Le temps de traversée de la lumière est le même dans les deux sens lorsque le gyromètre est immobile, mais lorsque le gyromètre est en rotation, il existe une différence entre les deux temps de parcours (et donc une différence de phase). La différence de phase est observée par interférométrie.

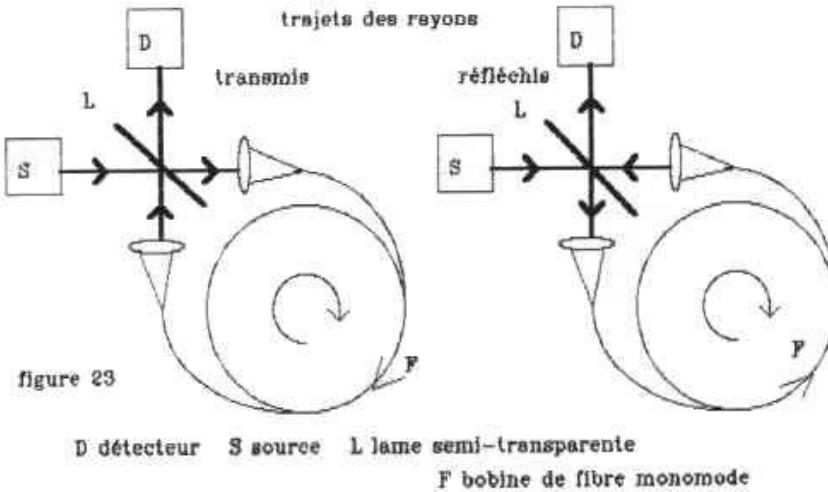
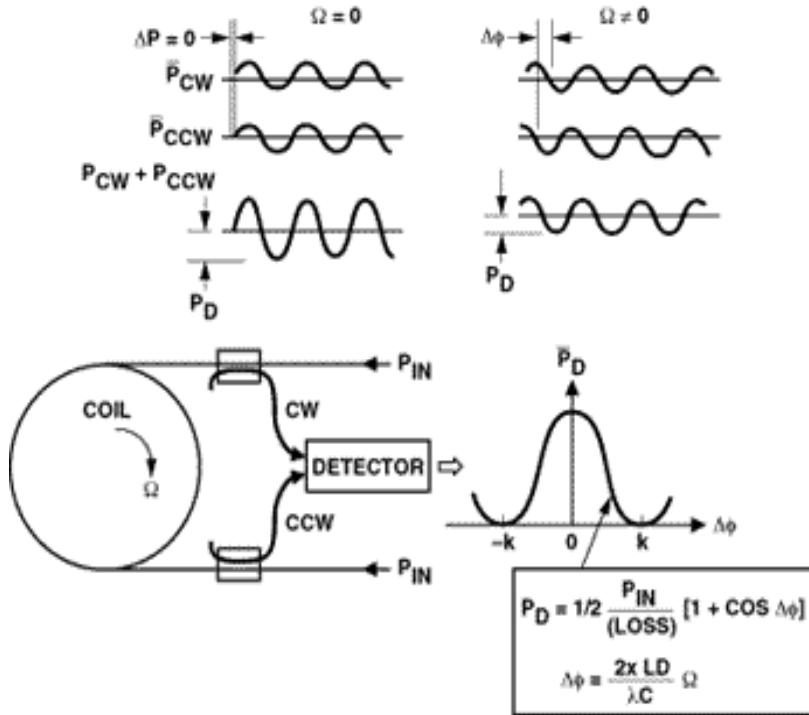
Effet Sagnac : $\Delta t \approx \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega$ et $\Delta\Phi \approx \frac{8\pi^2 R^2}{c\lambda} \Omega$ (pour $v = \omega R \ll c$)

R: rayon de la fibre, λ : longueur d onde, $\Delta\Phi$: déphasage, Ω : vitesse de rotation



Gyromètre Sagnac dans l'espace libre. Tout l'ensemble (source laser, miroirs, détecteur) tourne à vitesse Ω . Le détecteur est une photodiode qui convertit l'intensité lumineuse en un courant électrique.

L'intensité de la lumière et, par conséquent, le courant à la sortie de la photodiode, est proportionnelle à $\cos(\Delta\Phi)$ (comme dans le cas du laser de la vélocimétrie Doppler).



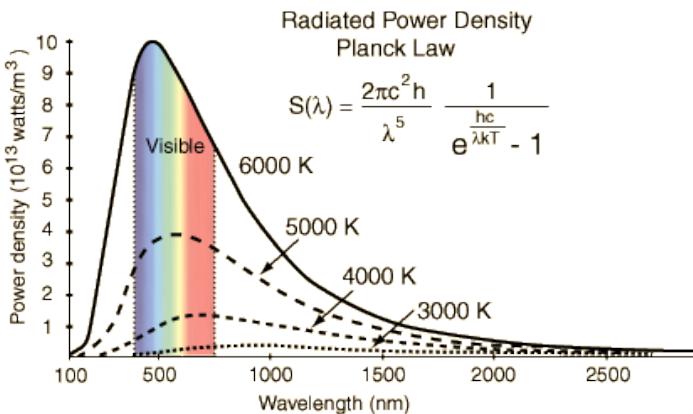
Gyromètre Sagnac en fibre optique. Les deux faisceaux laser en sens opposées dans la fibre sont obtenus au moyen d'un miroir semi-transparent.

Applications : Systèmes GPS, systèmes de guidage inertiel, ...
Fabricants: Northrop-Grumman, KVH Industries Inc.

Pyromètre optique

$$\Delta T \rightarrow \Delta V_m$$

Pyrométrie: Mesure sans contact de la température par mesure du rayonnement électromagnétique. Capteurs: œil (disparition du filament), capteurs *photoniques* (photodiodes, photodetectors,...), capteurs *thermiques* (bolomètre, thermopile, ..).



Un objet à 5000-6000 K émet principalement dans le visible.
(Note: les courbes à différentes températures ne se chevauchent pas).

Loi de Planck:

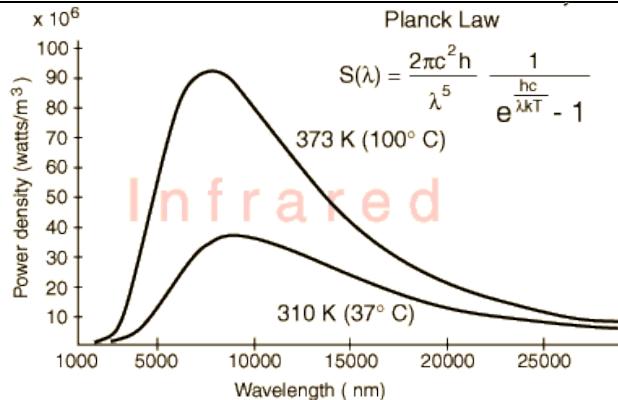
$$S(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

λ : longueur d'onde (m),

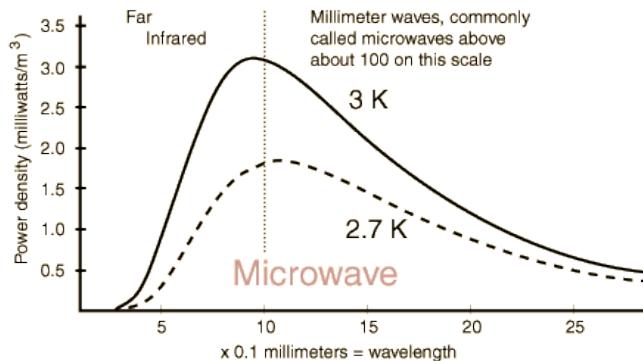
T : température (K)

$\varepsilon(\lambda, T)$: émissivité ($\varepsilon(\lambda, T) = 1$ pour corps noir, $0 < \varepsilon(\lambda, T) \leq 1$ pour les autres matériaux).

$S(\lambda, T)$: puissance de la radiation corps noir par unité de surface et de longueur d'onde (W/m 3).



Un objet à 300 K émet principalement de l'infrarouge.



Un objet à 3 K émet principalement des micro-ondes
($\lambda = c / v$; $\lambda = 1 \text{ mm} \Rightarrow v = 300 \text{ GHz}$)

Loi de Stefan-Boltzmann :

$$\int_0^\infty S(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \sigma \approx 5.7 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Position du maximum de $S(\lambda, T)$:

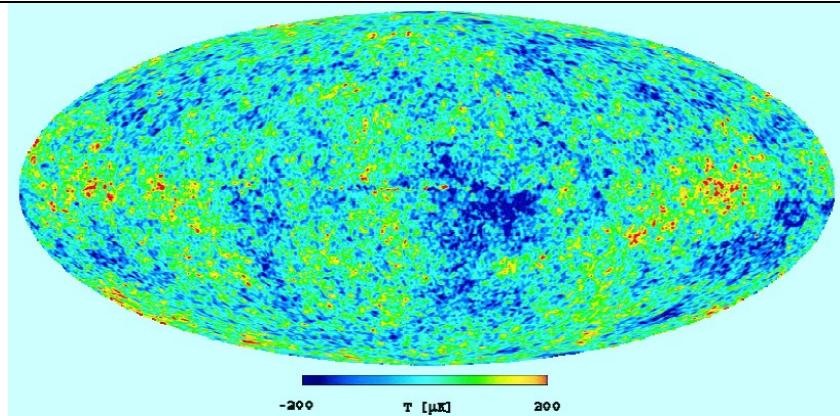
$$\lambda_{\max} T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

Approximation de Wien:

Pour ($h\nu \gg kT$):

$$S(\lambda, T) \approx \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-C_2/\lambda T}$$

$$C_1 = 2\pi c^2 h \quad C_2 = hc / k$$



Le rayonnement cosmique de fond correspond très précisément à la radiation d'un corps noir à 2.725 K (avec une anisotropie très faible $\Delta T/T = 10^{-5}$).

Pyromètre monochromatique

Principe: Les courbes à différentes températures ne se chevauchent pas. Pour mesurer la température, il n'est donc pas nécessaire de mesurer ni la position du maximum, ni la puissance totale émise. Il suffit de mesurer la puissance émise dans une petite région du spectre à l'aide d'un filtre.

Avec filtre autour de λ_0 :

$$V_m(T) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} \varepsilon(\lambda, T) S(\lambda, T) S_c(\lambda) d\lambda$$

$V_m(T)$: sortie du capteur

$S_c(\lambda)$: sensibilité du capteur

Pour ($h\nu \gg kT$) :

$$V_m(T) = \varepsilon(\lambda_1, T) C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/\lambda_1 T} S_c(\lambda_1) 2\Delta\lambda$$

Problème: Le signal à la sortie du capteur dépend de l'émissivité (pour déterminer T , il faut connaître $\varepsilon(\lambda_0, T)$, donc il faut connaître le matériau émetteur).

Pyromètre à «deux couleurs» (deux filtres, un autour de λ_1 et un autour de λ_2 , λ_1 et λ_2 proches)

$$V_1(T) = k \varepsilon(\lambda_1, T) C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/\lambda_1 T} S_c(\lambda_1) 2\Delta\lambda$$

$$V_2(T) = k \varepsilon(\lambda_2, T) C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/\lambda_2 T} S_c(\lambda_2) 2\Delta\lambda$$

Pour deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 proches:

$$\varepsilon(\lambda_2, T) \approx \varepsilon(\lambda_1, T) \text{ et } S_c(\lambda_2) \approx S_c(\lambda_1)$$

$$\frac{V_1}{V_2}(T) = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \text{ ne dépend pas de l'émissivité.}$$

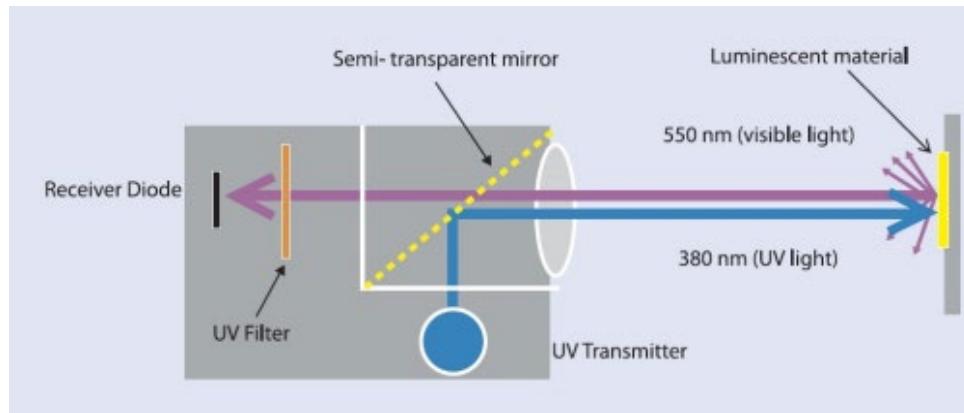
| Surface Material | Emissivity Coefficient - ε - | Surface Material | Emissivity Coefficient - ε - |
|---------------------------|---|----------------------|---|
| Aluminum Commercial sheet | 0.09 | Ice | 0.97 |
| Aluminum Heavily Oxidized | 0.2 - 0.31 | Mercury liquid | 0.1 |
| Aluminum Highly Polished | 0.039 - 0.057 | Paper | 0.93 |
| Aluminum Anodized | 0.77 | Sand | 0.76 |
| Asphalt | 0.93 | Steel Oxidized | 0.79 |
| Black Body Matt | 1.00 | Steel Polished | 0.07 |
| Concrete | 0.85 | Stainless Steel, 301 | 0.54 - 0.63 |
| Copper Polished | 0.023 - 0.052 | Steel Galvanized Old | 0.88 |
| Glass, pyrex | 0.85 - 0.95 | Water | 0.95 - 0.963 |



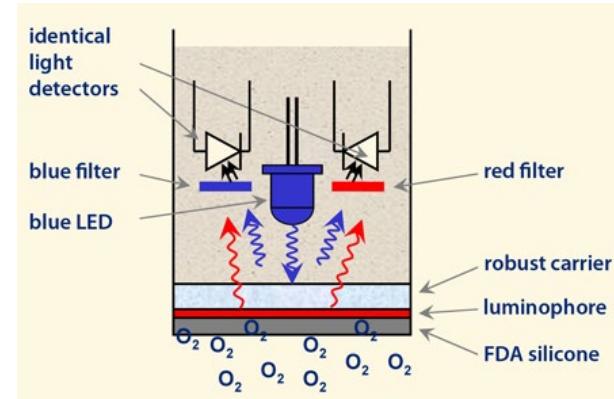
Table d'émissivités: <http://www.monarchserver.com/TableofEmissivity.pdf>. Le laser est utilisé uniquement pour indiquer la surface de mesure.

Capteurs basés sur la photoluminescence

Principe: élément photoluminescent utiliser pour mesurer une quantité, e.g., la concentration d'oxygène, qui influence l'intensité (efficacité avec laquelle la lumière d'excitation est transformée en lumière d'émission) et le temps de vie (retard avec lequel la lumière est émise).



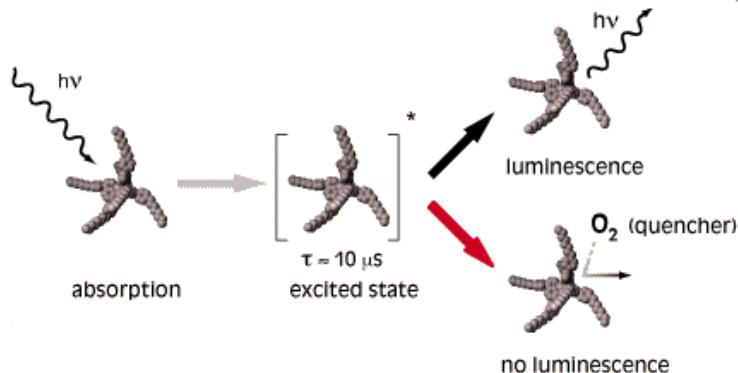
Excitation UV, détection par une photodiode.



Excitation bleue, détection par deux photodiodes.

Le décalage temporel entre les impulsions de lumière bleue et rouge fournit une indication précise de la concentration en oxygène. Les électrons excités du luminophore restent dans cet état pendant un certain temps. En présence d'oxygène, ils retournent plus rapidement à leur état fondamental. Entre l'excitation pulsée du luminophore par la lumière bleue et l'émission de lumière rouge, il existe un décalage temporel dépendant de la concentration en oxygène, qui peut être mesuré.

Les sondes pour détecter l'oxygène basées sur la luminescence utilisent comme matériel un colorant dont temps de vie et intensité d'émission sont réduites en présence de l'oxygène. (exemples : Tris(2,2'-bipyridine)ruthenium(II), Pt-porphyrin, Pd-porphyrins,).



Intensité d'émission (avec excitation constante) :

$$I_0/I = \tau_0/\tau = 1 + K_{SV} [O_2]$$

K_{SV} : constant de Stern-Volmer,

I_0 : intensité sans oxygène

$[O_2]$: concentration d' oxygène

τ_0 : temps de vie sans oxygène, τ : temps de vie avec oxygène

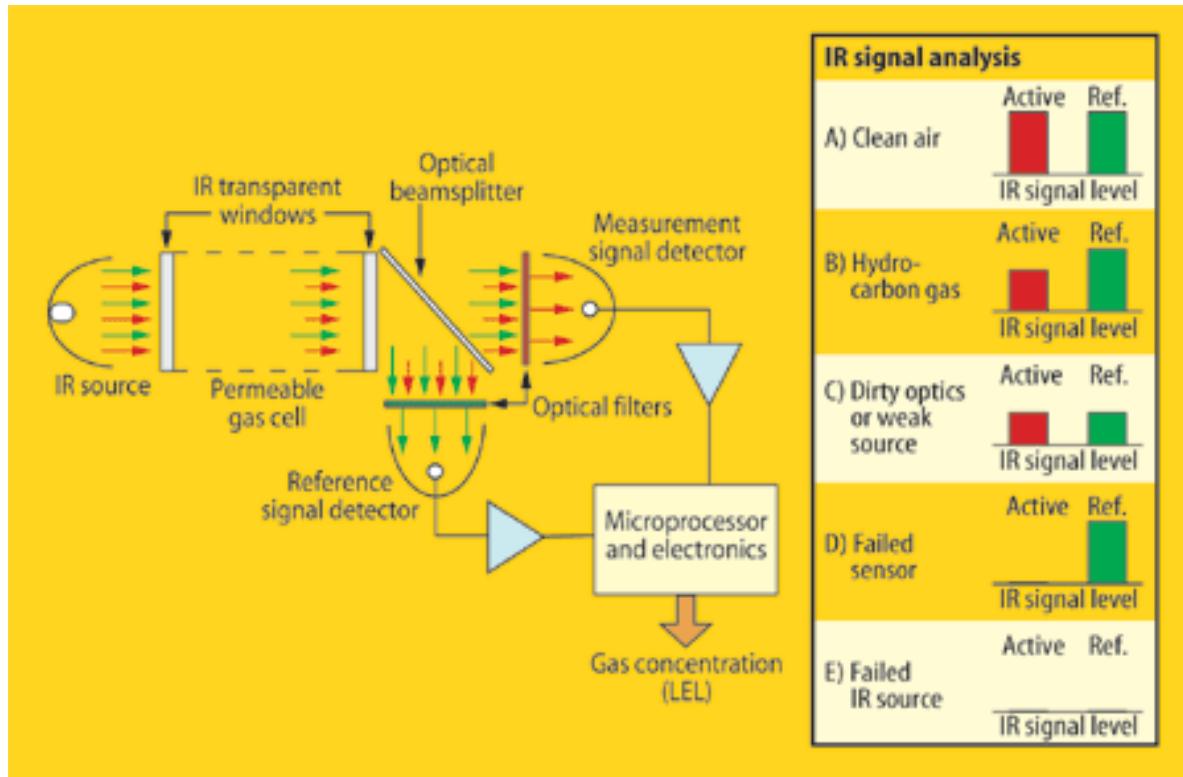
Déphasage (ou retard) entre excitation et émission (excitation sinusoïdale ou pulsée à fréquence f) :

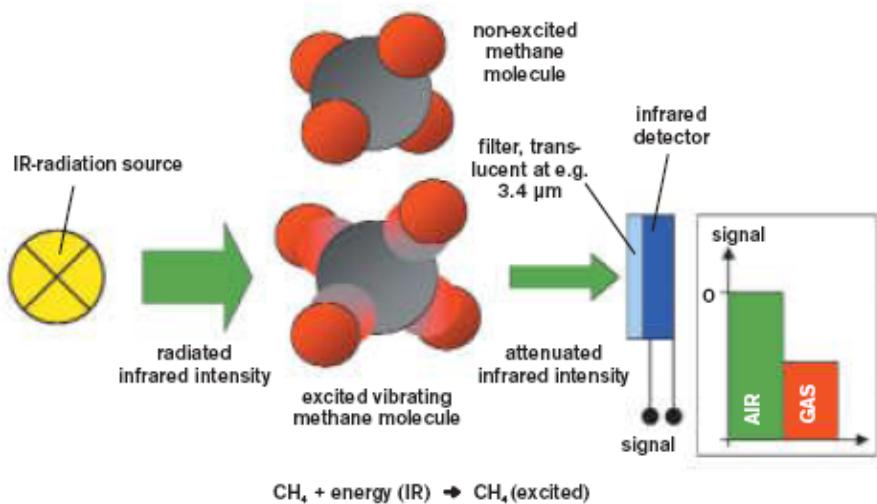
$$\tan(\phi) = 2\pi f t$$

D'autres molécules luminescentes sont sensibles à la variation de pH, CO₂, glucose, NH₃,...

Note: La photoluminescence (comme la fluorescence et la phosphorescence) est un processus par lequel une substance absorbe des photons puis ré-émet des photons. Le terme fluorescence est souvent associé à une excitation ultraviolet. La fluorescence se distingue de la phosphorescence en ce que la production de lumière se termine peu après l'excitation.

Capteurs de gaz IR

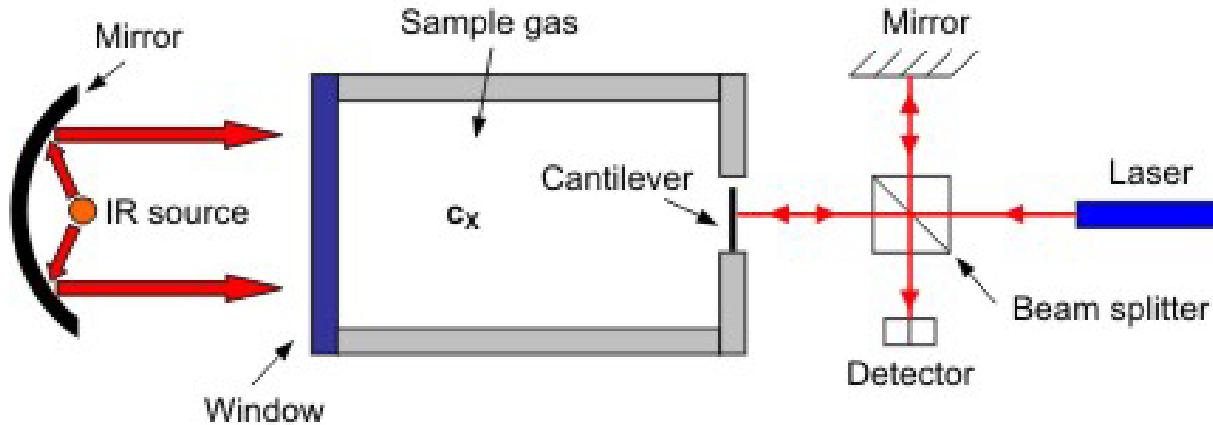




| Type | Application | Centre Wave Length (μm) |
|------|---------------|--------------------------------------|
| G1 | CO | 4,64 ($\pm 1,0\%$) |
| G2 | CO_2 | 4,26 ($\pm 1,0\%$) |
| G2.2 | CO_2 | 4,43 ($\pm 1,0\%$) |
| G4 | NO | 5,30 ($\pm 1,0\%$) |
| G5 | HC | 3,40 ($\pm 2,0\%$) |
| G5.1 | HC | 3,46 ($\pm 1,5\%$) |
| G7 | Freon | 10,90 ($\pm 0,5\%$) |

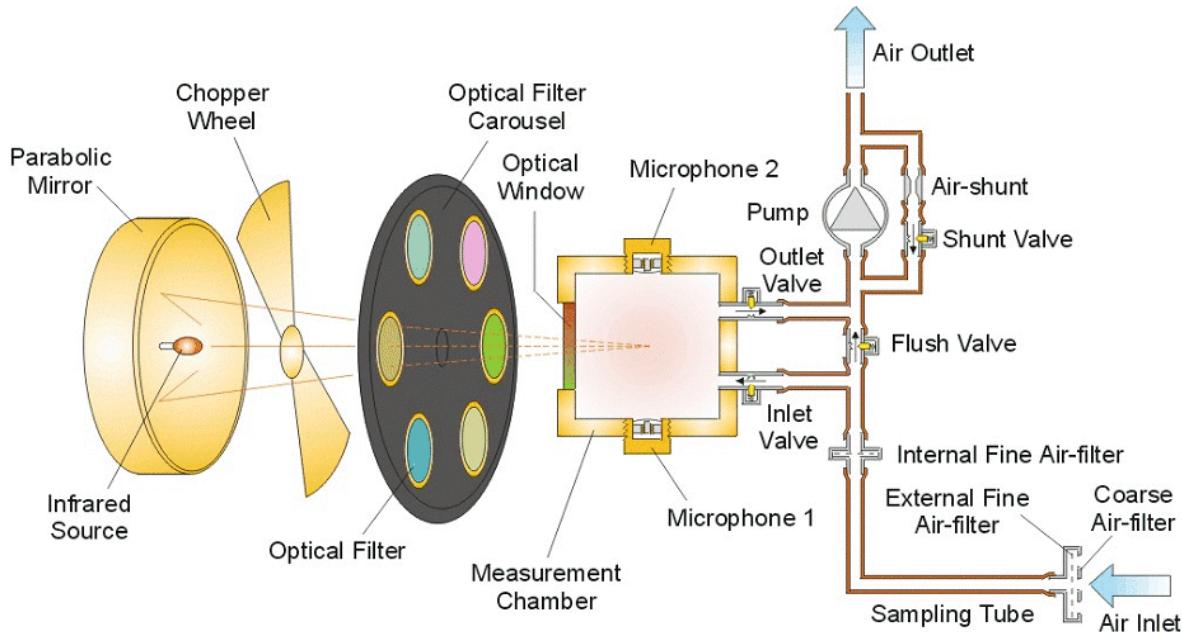
Capteurs de gaz IR photoacoustiques

Principe. absorption d'un faisceau IR modulé dans une cavité qui contient le gaz à analyser -> modulation de température du gaz -> modulation de pression détectée par un «microphone».



In the traditional photoacoustic cell the microphone movements are determined capacitively. With silicon cantilevers and interferometer measurements, the sensitivity of the method can be increased significantly, down to ppt level (part-per-trillion) concentrations of methane.

- CO₂, NH₃,
- modulation 10 à 50 Hz, mode résonant possible (kHz)
- Gas selectivity is achieved through the use of optical filters. Detection limit is gas-dependent (typically in the ppb region). (www.lumasense.dk)



1. An air sample is drawn into the measurement chamber and the chamber is sealed by the valves.
2. Radiation from the IR-source passes through a chopper and optical filter into the chamber, where it is absorbed, generating heat and pressure variations.
3. The pressure variations correspond to the chopper frequency, creating a pressure wave which can be detected by the microphones.
4. The microphone signal, proportional to the gas concentration, is post processed and the measurement result is calculated.

Capteur de fréquence cardiaque optique (optical hearth rate monitor)

The diagram illustrates the principle of an optical heart rate monitor. On the left, a grey stick figure with a red heart is labeled "Heart beats". To its right are two cross-sectional diagrams of skin. The top diagram shows a contracted blood vessel with "Hemoglobin" and "Incident light" (labeled "High quantity") being emitted by an "LED" and measured by a "Photodetector". The bottom diagram shows an expanded blood vessel with "Hemoglobin" and "Incident light" (labeled "Low quantity") being emitted by an "LED" and measured by a "Photodetector".

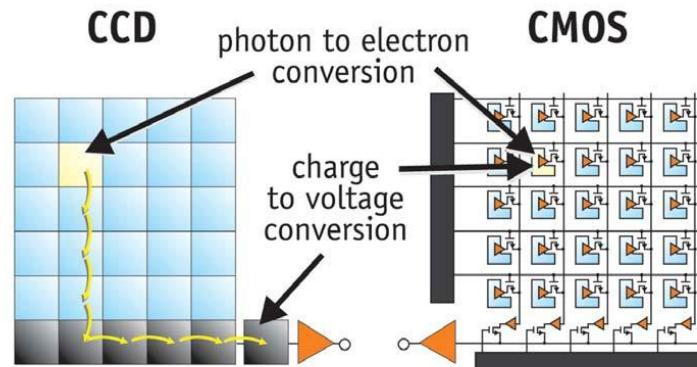
Il mesure la variation de la «lumière réfléchie» en raison de la variation du volume sanguin dans la peau causée par l'impulsion de pression du cycle cardiaque.

BUILT-IN SENSOR
MEASURES HEART RATE
AT THE WRIST.

Capteurs d'image

(Capteurs traités en détails dans le cours «Méthodes de détection optique»).

| Foveon X3 Capture | | |
|--|--|--|
| | | |
| A Foveon X3 image sensor features three separate layers of photodetectors embedded in silicon. | Since silicon absorbs different wavelengths of light at different depths, each layer records a different color. | As a result, only Foveon X3 image sensors capture red, green and blue light at every pixel location. |
| Mosaic Capture | | |
| | | |
| In conventional systems, color filters are applied to a single layer of photodetectors in a tilted mosaic pattern. | The filters let only one wavelength of light—red, green or blue—pass through to any given pixel, allowing it to record only one color. | As a result, typical mosaic sensors capture 50% of the green and only 25% of the red and blue light. |

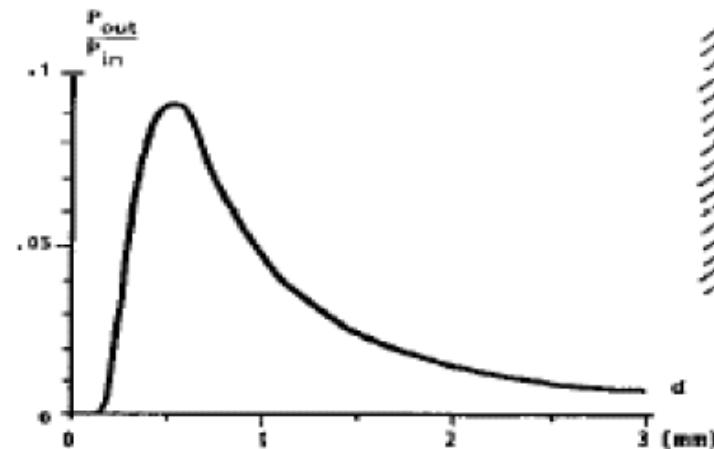
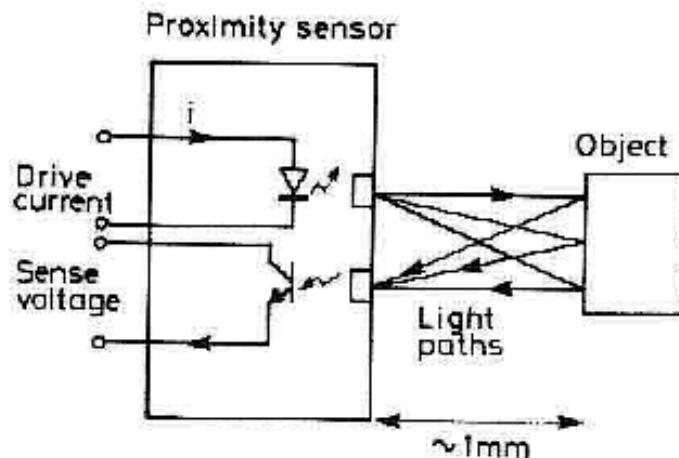


Eléments pixels : capacité MOS ou diode PN

Capteur de proximité (lumière diffuse)

Principe: mesure de la lumière rétrodiffusée pour estimer la proximité d'un objet.

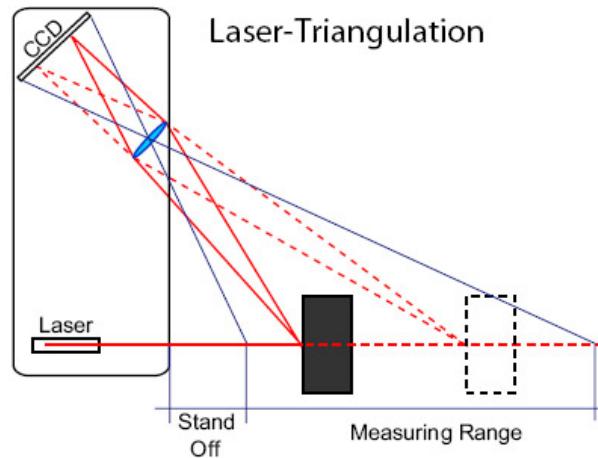
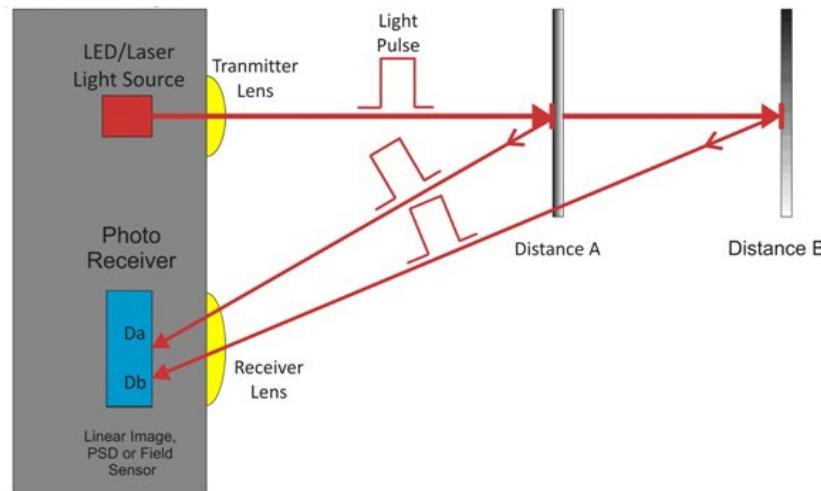
- Simple, dépend de la cible.
- Petit d : très sensible, assez linéaire.
- Grand d : moins sensible et moins linéaire.



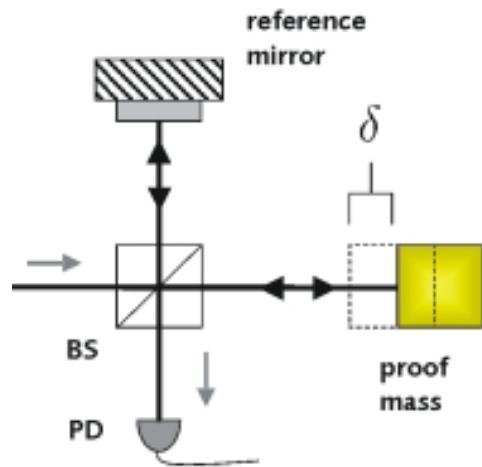
Capteur de distance (triangulation)

Principe: Faisceau collimaté. Image du point à travers une lentille sur un PSD (ou CCD linéaire).

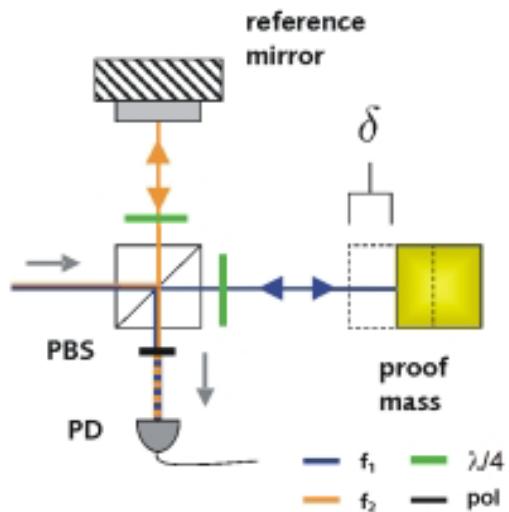
- simple et bon marché
- distances de 5 à 50 cm
- Lumière continue ou pulsée.
- Applications: automation, robotique
- Fabricants: Keyence, Sharp, ...



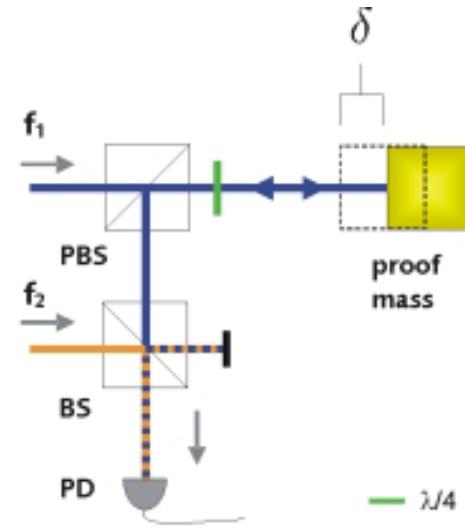
Capteur de distance (phase)



$$I \sim \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}\delta\right)$$

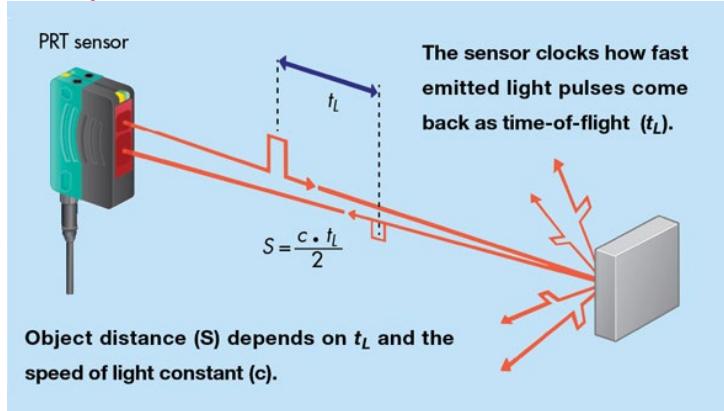


$$I \sim \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_1}\delta - \Delta\omega t + \phi_{fix}\right)$$

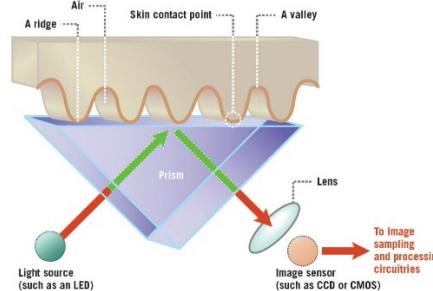
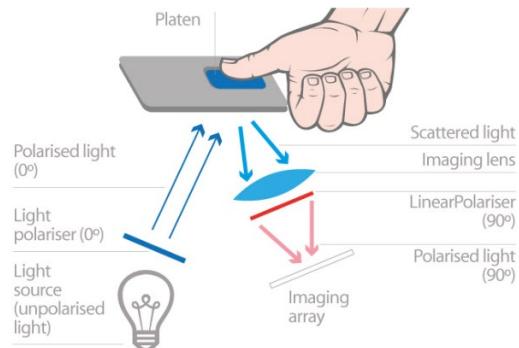


$$I \sim \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_1}\delta - \Delta\omega t + \phi_{fix}\right)$$

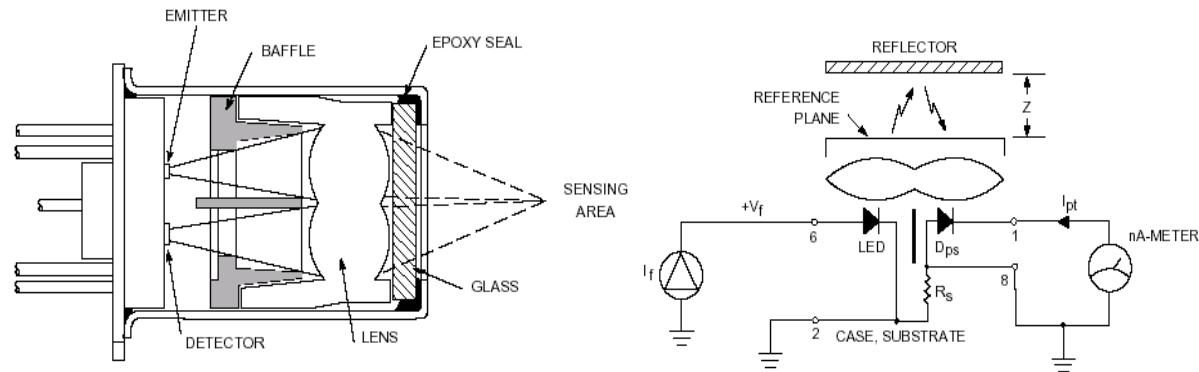
Capteur de distance (temps de vol)



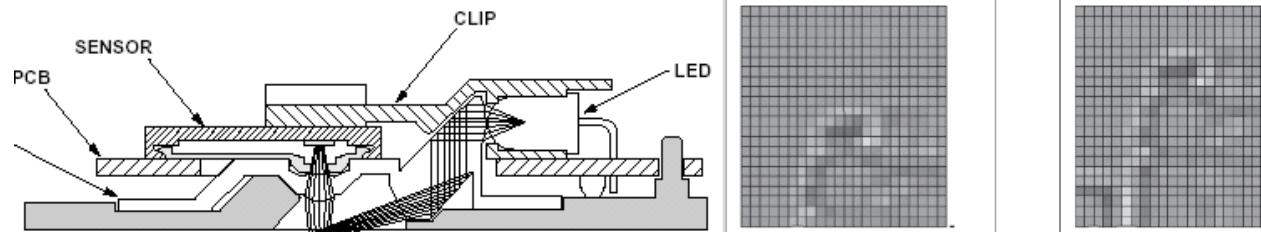
Optical finger print sensor



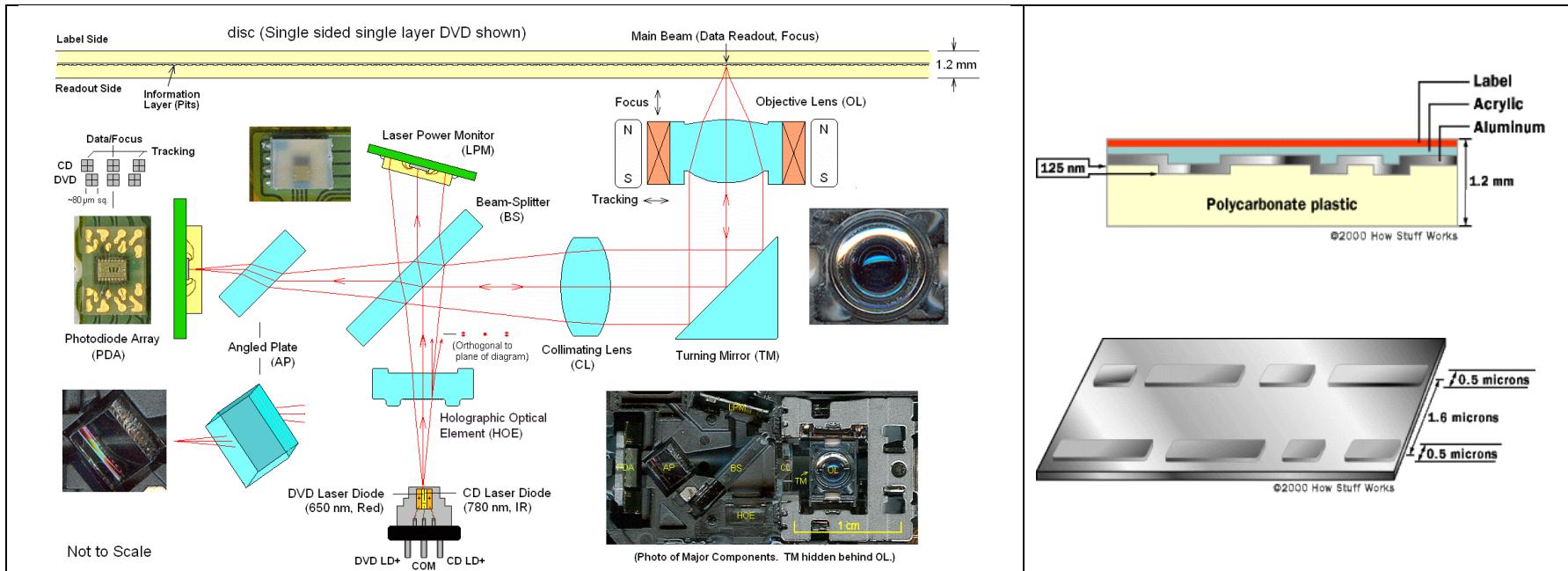
Barcode pen sensor



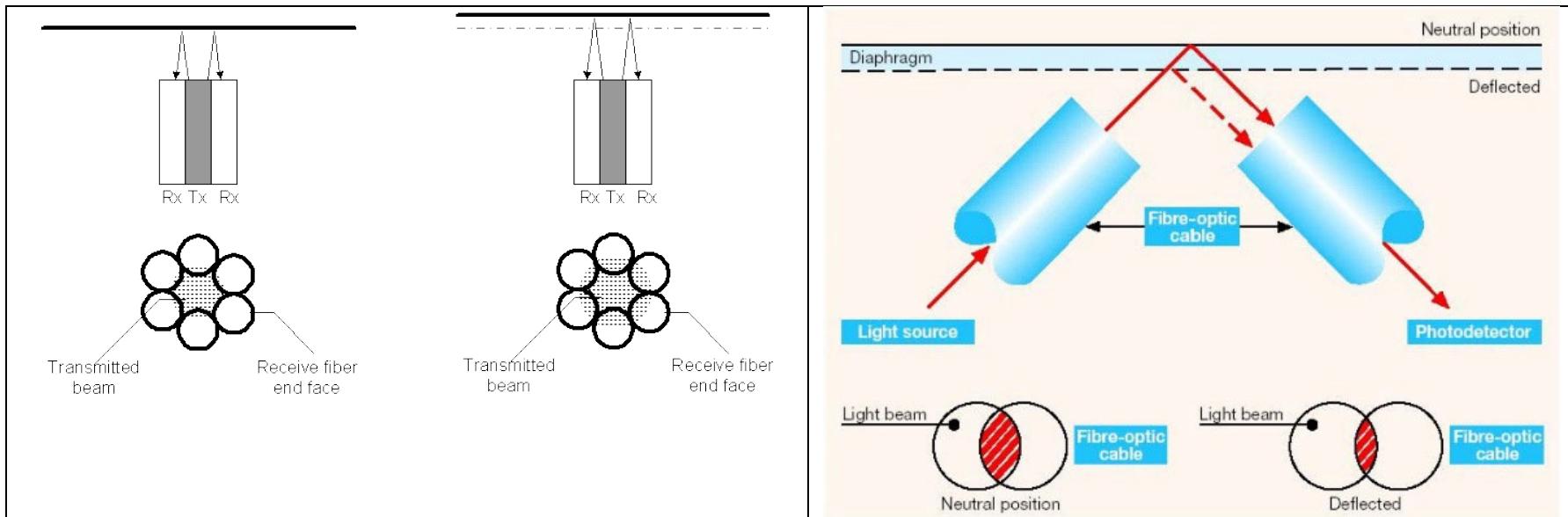
Souris optique



Capteur pour CD/DVD disk

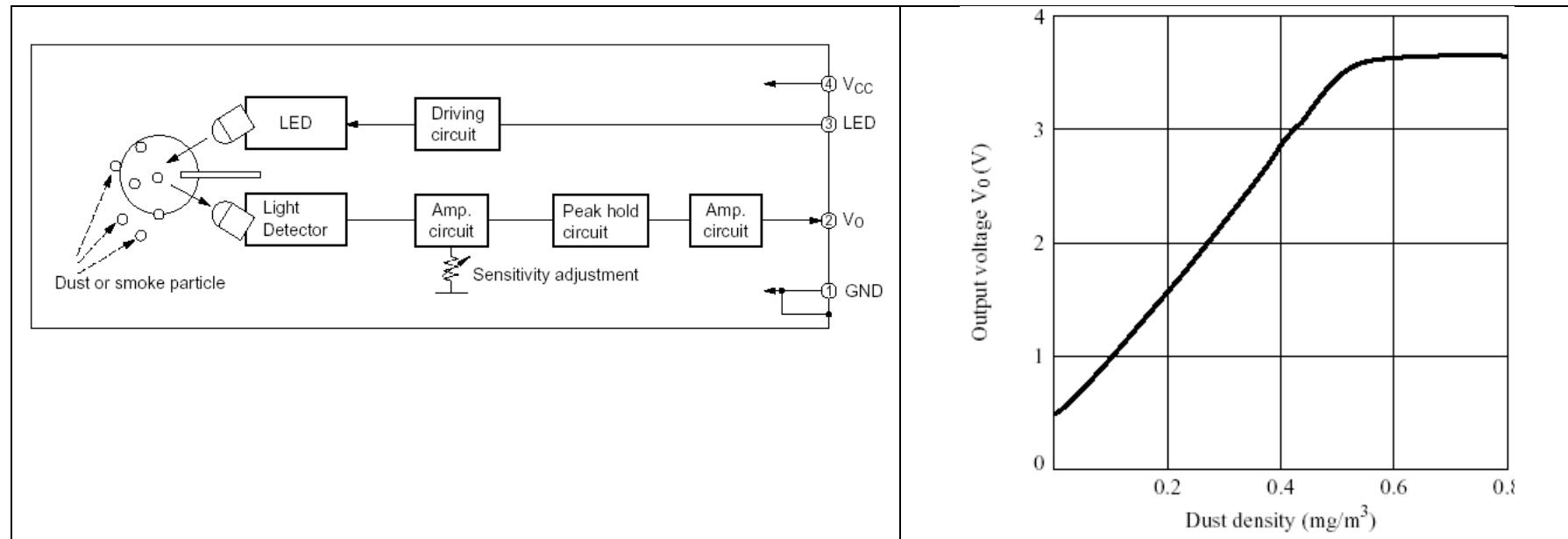


Microphone optique (coaxial et non-coaxial)



Détecteur de fumée

Principe: mesure de la lumière diffuse.



Application: sécurité (fumées), salles blanches

Interféromètre Mach-Zehnder

Principe: Variation des propriétés de l'échantillon → Variation d'intensité, variation de phase → Variation du signal de sortie du photodétecteur.

