

Chapitre 4.2 - OPTOÉLECTRONIQUE.

4.2.1 INTRODUCTION.

Le terme d'optoélectronique recouvre une partie des concepts et composants décrits sous le terme plus général de 'photonique'. Étant donné la grande variété de phénomènes physique et de technologies mettant en œuvre la lumière, il convient de n'utiliser le terme 'optoélectronique' que pour les applications ou les composants dans lesquels un signal ou un flux d'énergie passe de la forme électronique à la forme photonique ou l'inverse. On peut donc y mettre les sources de rayonnement dans le proche infrarouge jusqu'à l'ultraviolet, les photodétecteurs, les coupleurs optiques, les dispositifs de visualisation, ...

De façon générale, dans les systèmes actuels; l'électronique et la photonique sont associées pour augmenter les performances des systèmes. Pour cette raison, il existe de nombreux composants destinés à passer d'une forme d'énergie (les photons) à l'autre (le flux d'électrons). Nous décrivons ci-après quelques uns de ces composants.

4.2.2 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES PHOTODÉTECTEURS.

4.2.2.1 INTRODUCTION

La nature quantique du rayonnement électromagnétique aux fréquences optiques, se manifeste dans les phénomènes d'émission et d'absorption du rayonnement par un matériau. Le rayonnement est émis ou absorbé par quantité E_p

$$(8.1) \quad E_p = h \nu$$

où h est la constante de Planck ($h = 6,623.10^{-34}$ J.s) et ν est la fréquence du rayonnement. E_p est l'énergie du constituant élémentaire du rayonnement : le photon.

Lorsqu'un matériau est éclairé par un rayonnement, l'absorption de l'énergie du rayonnement peut se manifester de diverses façons :

- augmentation de la température; cet effet n'est mesurable que si la puissance du rayonnement est grande;
- réactions chimiques;

- émission d'électrons, dans laquelle des électrons sont éjectés de la surface du matériau; l'émission photoélectrique est observée aux fréquences visibles à la surface des métaux. L'émission photoélectrique est possible si l'énergie du photon incident est supérieure à l'énergie de liaison ΔE de l'électron. La relation suivante doit être vérifiée : $\nu > \frac{\Delta E}{h}$.

Le rayonnement ne libère les électrons que si l'énergie des photons est supérieure à un seuil donné ou si la longueur d'onde est inférieure à une valeur limite λ_s telle que :

$$(8.2) \quad \lambda_s = \frac{hc}{\Delta E} \quad \text{ou} \quad \lambda_s(\text{ en } \mu\text{m}) = \frac{1,237}{\Delta E(\text{ en } \text{eV})};$$

- modification de la conductivité électrique par création de charges électriques; la photoconduction s'observe avec des matériaux semi-conducteurs.

Le schéma général d'un détecteur de rayonnement est présenté sur la figure 8-1.

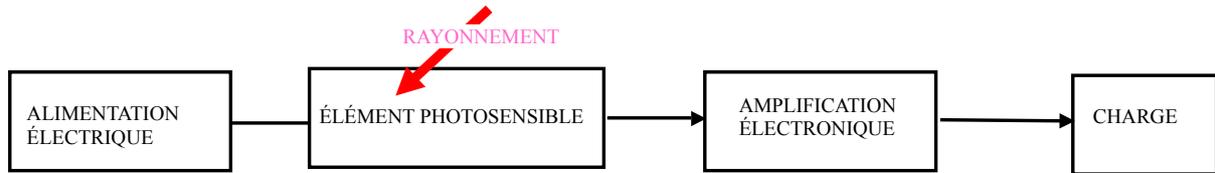


Fig. 8-1 : Photodétecteur et éléments associés. L'alimentation électrique n'est pas toujours nécessaire. La charge peut être suivant le cas un multimètre, un oscilloscope ou une carte d'acquisition connectée à un ordinateur

Deux nombreux critères existent pour le choix d'un détecteur : type de détecteurs, réponse spectrale, résolution, dynamique, sensibilité, Suivant l'application, on choisira :

- un détecteur élémentaire pour caractériser l'énergie du flux photonique et ses variations temporelles; la distribution spatiale de l'énergie est alors ignorée;
- une mosaïque de détecteurs ou une surface photosensible pour obtenir une fonction $f(x, y)$ caractérisant la distribution spatiale de l'énergie du rayonnement à un instant donné;
- une mosaïque de détecteurs suivie d'un système de stockage d'information pour suivre également les variations spatiales.

4.2.2.2 LE PROBLÈME DU BRUIT.

Aux fréquences optiques, les amplificateurs sont affectés d'un bruit important. La limite inférieure du bruit photonique ramenée à l'entrée d'un ampli linéaire de gain G peut être exprimée sous la forme d'une température équivalente de bruit T_B donnée par l'expression suivante :

$$(8.3) \quad T_B = \frac{1}{\text{Log}\left(\frac{2G-1}{G-1}\right)} \frac{h\nu}{k}.$$

A une fréquence voisine de 3×10^{14} Hz, la température de bruit est d'environ 2×10^4 K. A l'inverse des amplificateurs, les détecteurs voient leurs performances croître avec la fréquence. Les détecteurs optiques sont donc en général des détecteurs directs.

La grandeur de sortie des capteurs de rayonnement est en général un courant électrique. Les performances d'un détecteur seront définies par rapport à la valeur de ce courant et à ses fluctuations. En l'absence de tout rayonnement incident, tout détecteur placé dans les conditions normales d'utilisation délivre un courant dit courant d'obscurité. Ce courant d'obscurité ou bruit a une origine interne (excitation thermique) et une origine externe (le rayonnement thermique ambiant). Le bruit est particulièrement important dans le domaine infrarouge où il est parfois nécessaire de refroidir le détecteur.

4.2.2.3 DÉTECTIVITÉ.

La qualité d'un détecteur dépend du bruit d'obscurité. On utilise pour caractériser ce bruit la **puissance équivalente de bruit** PEB définie comme la puissance minimale S du signal d'entrée que l'on peut discerner dans le bruit d'obscurité B du photodétecteur, le seuil étant défini pour $\frac{S}{B} = 1$.

Les différentes composantes du bruit d'un détecteur quantique ont une densité spectrale uniforme à l'exception du **bruit en 1/f** dont il faut tenir compte lorsque le signal est modulé à une fréquence f faible. On distingue les bruits suivants :

- le bruit d'agitation thermique des porteurs de charge ou bruit de Johnson. Ce bruit donne naissance à un courant I_{BJ} tel que : $\langle I_{BJ}^2 \rangle = 4kT\Delta f$

où k est la constante de Boltzmann, T , la température absolue, Δf la largeur de la modulation du signal. $\langle \rangle$ représente la valeur moyenne.

- le bruit de grenaille ou bruit de Schottky I_{BS} : $\langle I_{BS}^2 \rangle = 2eI\Delta f$; e est la charge de l'électron ; I est le courant à travers le détecteur.

- le bruit de recombinaison des porteurs de charge (dans les semi-conducteurs).

L'amplitude des fluctuations de tous les différents bruits varie proportionnellement à $\sqrt{\Delta f}$. Afin de donner à la PEB un caractère d'invariance vis-à-vis de la bande passante, on la rapporte à la bande unité (1 Hz) et on l'exprime en $W \cdot Hz^{-1/2}$. La **défectivité**, notée D , est définie comme l'inverse de la PEB et s'exprime en $W^{-1} \cdot Hz^{1/2}$.

Il est également nécessaire de tenir compte de la dimension du détecteur pour caractériser sa sensibilité ; on introduit pour cela le facteur de mérite D^* ou **défectivité réduite**. Le bruit d'obscurité étant proportionnel à la racine carrée de la surface. D^* s'exprime en $W^{-1} \cdot cm \cdot Hz^{1/2}$.

Le paramètre D^* doit être donné en spécifiant les conditions de mesure.

$D^*(600 \text{ K}, 1 \text{ kHz}, 1)$ signifie que :

- la source utilisée a une température de couleur de 600 K (température du corps noir qui émettrait un rayonnement de spectre identique à celui de la source considérée),
- la fréquence de modulation est de 1 KHz et
- la bande passante de bruit est de 1 Hz.

$D_\lambda^*(1,06 \mu m, 1 \text{ KHz}, 1)$ signifie que la déflectivité est donnée pour une longueur d'onde de 1,06 μm .

Pour les détecteurs infrarouges, on précise en général la température du capteur et l'angle de vision. En effet, le bruit thermique est particulièrement important dans l'IR et c'est le rayonnement ambiant qui limite les performances du détecteur en imposant une déflectivité maximale. En refroidissant et en limitant l'angle d'admission du rayonnement sur le détecteur, on améliore sa déflectivité.

4.2.2.4 SENSIBILITÉ.

Sous l'action d'un flux énergétique rayonnant F_e , un détecteur délivre un courant I qui est la somme d'un courant I_s due aux photons absorbés et constituant le signal et d'un courant d'obscurité I_B dû au bruit, soit $I = I_s + I_B$.

Le signal I_s dépend de la nature du détecteur et de la composition spectrale du rayonnement reçu. Si les conditions d'utilisation sont stables, le courant d'obscurité est constant et les variations ΔI_s du signal électrique sont proportionnelles aux variations ΔF_e du signal photonique. On définit la

sensibilité S (en $A \cdot W^{-1}$) du détecteur par le quotient suivant : $S = \frac{\Delta I}{\Delta F_e} \approx \frac{\Delta I_s}{\Delta F_e}$.

La sensibilité d'un photodétecteur est une fonction de la longueur d'onde. Chaque détecteur est caractérisé par une courbe de **réponse spectrale** où apparaît la variation de la sensibilité en fonction de λ . Il faut distinguer la sensibilité définie pour une longueur d'onde donnée et la sensibilité totale définie pour un rayonnement de spectre étendu.

4.2.3 DÉTECTEURS QUANTIQUES

4.2.3.1 CELLULE PHOTOCONDUCTRICE

Photoconduction. Une cellule photoconductrice est une résistance dont la valeur dépend du flux de rayonnement incident. Les photons absorbés par le matériau libèrent des porteurs de charges qui peuvent être déplacés par un champ électrique externe. La mesure du courant électrique qui passe à travers l'élément sous l'action d'une tension appliquée (Fig. 8.4) permet de caractériser le flux photonique incident. La cellule photoconductrice est très sensible, mais présente une réponse non linéaire. Les cellules sensibles dans l'IR nécessitent un refroidissement.

Le temps de réponse varie entre 10^{-7} et 10^{-1} s suivant le matériau utilisé. La détectivité réduite est comprise entre 10^8 et 10^{11} $W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$.

Les cellules photoconductrices, à cause de leurs réponses non linéaires, ne sont en général pas utilisées pour mesurer un flux de rayonnement mais plutôt pour détecter le passage d'un seuil d'intensité et commander un relais ou un thyristor.

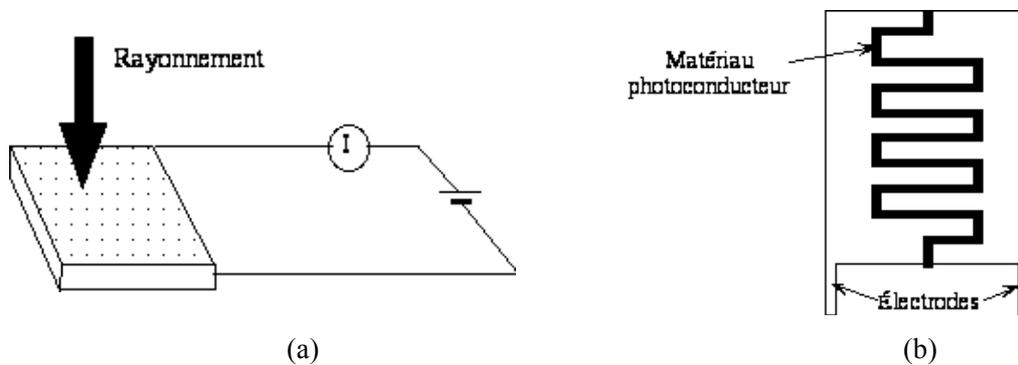


Fig. 8-2 : Cellule photoconductrice. (a) Principe; (b) Exemple de réalisation.

Les matériaux couramment utilisés sont :

- monocristallins: Germanium et silicium purs

Germanium et silicium dopés par or, cuivre, zinc;

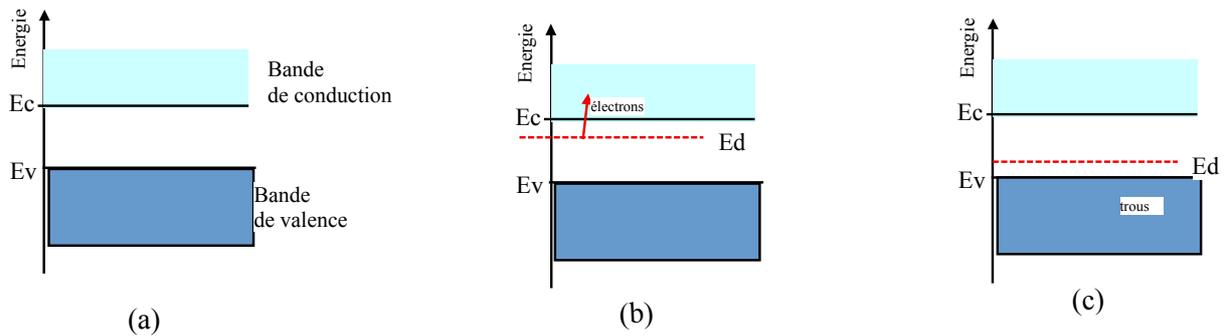
Autres : SbIn, HgCdTe

- polycristallins: CdS, CdSe, CdTe, PbS, PbSe, PbTe.

4.2.3.2 PHOTODÉTECTEURS À JONCTION

4.2.3.2.1 Photodiode

Une jonction entre deux matériaux conducteurs de types différents est le meilleur moyen pour obtenir des effets photoniques intéressants (pour l'émission et pour la détection de lumière). La jonction p-n est obtenue par dopage du cristal avec des impuretés fournissant des électrons du côté n et des trous du côté p.



(a) Semiconducteur intrinsèque.

Le matériau est caractérisé par une bande de valence et une bande de conduction séparées par une bande interdite. A température ambiante, seuls les niveaux de la bande de conduction sont peu occupés; le matériau présente alors une grande résistivité. L'absorption de photons d'énergie E_p telle que $E_p > E_c - E_v$ provoque des transitions. Des électrons libres apparaissent et la conductivité du matériau augmente. Cet effet de photoconduction est utilisé pour détecter un rayonnement.

(b) Semi-conducteur de type n

Il s'agit d'un matériau semi-conducteur dans lequel on a introduit des atomes d'un autre élément qui possède un niveau d'énergie électronique dans la bande interdite, près de la bande de conduction. Ce niveau, d'énergie E_d est appelé niveau donneur, car ces atomes peuvent « donner » facilement leurs électrons; il suffit en effet d'une quantité d'énergie $\Delta E = E_c - E_d$, inférieure à la largeur de la bande interdite, pour libérer des électrons portés par les atomes donneurs.

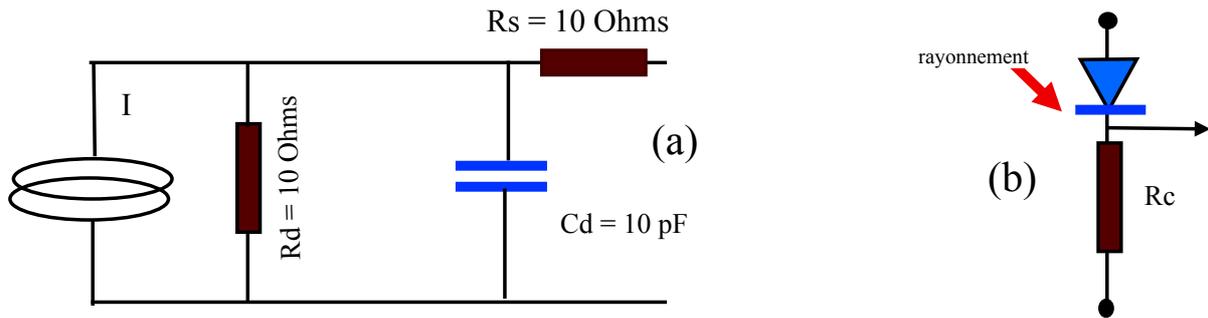
(c) Semi-conducteur de type p

Un matériau semi-conducteur de type p est un semi-conducteur dans lequel on a introduit des atomes d'un autre élément présentant un niveau d'énergie électronique dans la bande interdite, près de la bande de conduction. Les atomes de ce dopant sont dits accepteurs car ils peuvent piéger des électrons venus d'atomes de la bande de valence en créant une charge positive ou « trou » qui peut se déplacer sous l'action d'un champ électrique. Le courant électrique dans un matériau de type p correspond donc à un déplacement de charges positives.

Fig. 8-3 : Différents types de semi-conducteurs

Fonctionnement en mode photoconducteur:

Une tension externe est appliquée pour polariser la diode en inverse. On mesure la tension aux bornes d'une résistance de charge. La réponse est linéaire dans une très large plage de flux. Le temps de réponse est voisin de la nanoseconde. La détectivité réduite est comprise entre 10^{10} et $10^{13} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$.


Fig. 8-4 : Photodiode.

(a) Schéma électrique équivalent. (b) Circuit électrique en polarisation inverse.

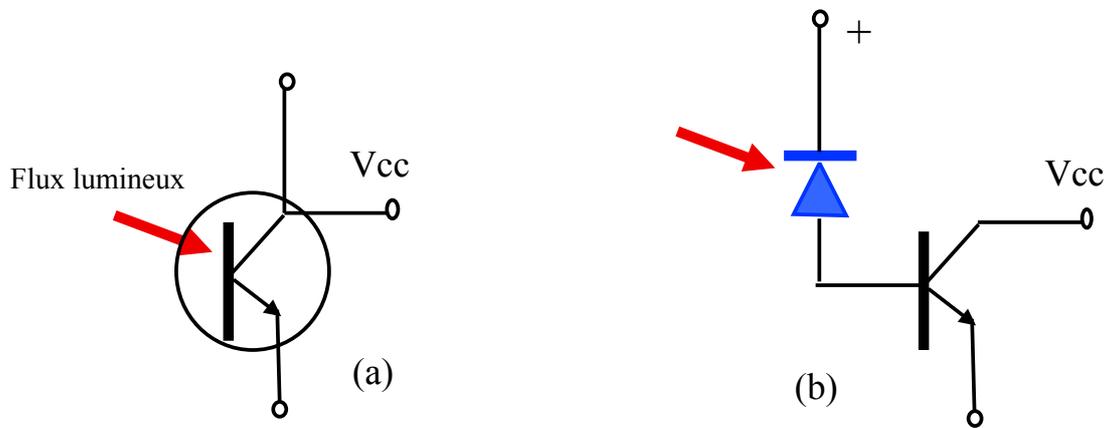
Mode photovoltaïque. Il est également possible d'utiliser une photodiode en mode photovoltaïque. Dans ce cas il n'y a pas de source de polarisation et on mesure la tension en circuit ouvert qui apparaît en présence d'un rayonnement incident.

4.2.3.2 Photodiode à avalanche

Il est possible d'obtenir un effet d'amplification en utilisant le phénomène d'avalanche des porteurs de charges dans la jonction en présence d'une tension de polarisation élevée (100 à 200 V). Le gain offert par une photodiode à avalanche est d'environ 1000.

4.2.3.3 Phototransistor

Il s'agit d'un transistor dont la base est constituée par une photodiode. La présence du transistor permet l'amplification du photocourant généré dans la jonction base-émetteur. Le phototransistor est utilisé aussi bien en régime linéaire qu'en commutation.


Fig. 8-5 : Phototransistor (a) et schéma équivalent (b)

4.2.3.3 DÉTECTEURS SPÉCIAUX

Certains détecteurs fournissent des signaux qui dépendent de la position du flux de rayonnement sur leur surface. Les signaux détectés peuvent être traduits en coordonnées dans un plan. L'association de plusieurs détecteurs permet d'obtenir des mesures dans l'espace. Ces détecteurs sont utilisés essentiellement dans la détermination de position d'objets et sont plus simples à utiliser que les détecteurs à transfert de charge comme ceux mis en œuvre dans les barrettes CCD.

Parmi les photodétecteurs sensibles à la distribution spatiale du rayonnement, on distingue :

- les cellules à quadrants,
- les cellules centroïdes à effet latéral.

Une cellule à quadrant est constituée de 2 à 4 éléments photosensibles en silicium séparés par une distance de quelques dizaines de microns. Lorsque le flux lumineux n'éclaire pas de façon uniforme les 4 éléments, le courant délivré par chaque élément permet de déterminer la position relative du centre du flux rayonnant incident par rapport au centre de la cellule. Avec une cellule à quatre quadrants notés A, B, C et D pour lesquels le flux incident donne naissance à quatre courants I_A , I_B , I_C et I_D , la position du flux lumineux incident est définie par les relations :

$$(8.4) \quad X = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad \text{et} \quad Y = \frac{(I_A + I_B) - (I_D + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} .$$

Une photodiode à effet latéral est constituée d'un seul élément sensible. La cellule peut être linéaire ou biaxe. La structure de la cellule est présentée sur la figure 8-2. Trois couches de matériaux semi-conducteur sont disposées sur un substrat en silicium. Deux ou quatre électrodes sont disposées aux extrémités de la face supérieure. Sous l'action d'un flux photonique, des charges électriques sont libérées dans la couche P de surface et drainées vers les électrodes. Le courant généré se répartit sur les différentes électrodes suivant la loi d'Ohm. Pour un détecteur à quatre électrodes, la position du centre de gravité de la surface éclairée est obtenue à partir des courants relevés sur les différentes électrodes par les relations :

$$(8.5) \quad X = \frac{I_A - I_C}{I_A + I_C} \quad \text{et} \quad Y = \frac{I_B - I_D}{I_B + I_D} .$$

Une photodiode à effet latéral présente une résolution spatiale d'environ 1 micron.

Les cellules centroïdes à quadrant ou à effet latéral sont utiles pour les applications suivantes :

- positionnement d'un objet par rapport à un point de référence,
- alignement,
- mesure de faibles déplacements,
- mesure de vibrations de faible amplitude.

L'association de plusieurs cellules centroïdes permet de mesurer la trajectoire d'un objet dans l'espace.

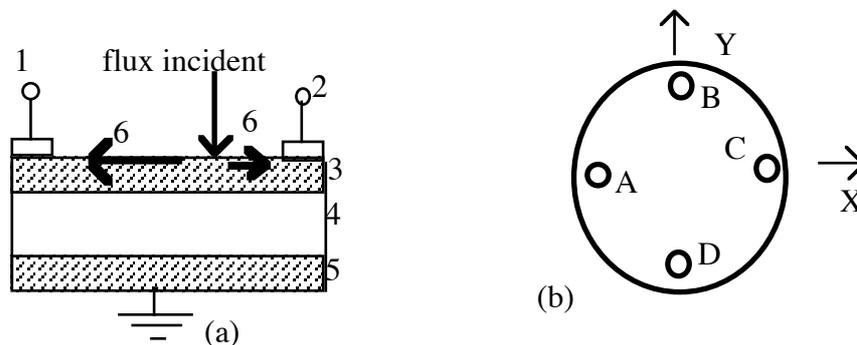


Fig. 8-6 : Fig. 8.2 - Photodétecteur à effet latéral.

- (a) Vue en coupe. 1, 2: Électrodes, 3: couche de semi-conducteur de type P, 4: matériau intrinsèque, 5: semi- conducteur de type N, 6: photocourant. (b): vue de dessus. A, B, C, D: électrodes.

4.2.3.4 PHOTODÉTECTEURS À ÉMISSION ÉLECTRONIQUE

Il existe différents types de photodétecteurs à émission électronique :

- 1 - Cellule à vide
- 2 - Cellule à gaz
- 3 - Tube photomultiplicateur
- 4 - Intensificateur d'images à galettes de microcanaux
- 5 - Photomultiplicateur à balayage de fente

Les photodétecteurs ont une réponse temporelle limitée à une centaine de picosecondes. Pour détecter des signaux plus rapides (d'environ une picoseconde) on dispose de caméra à balayage de fente dont le schéma apparaît ci-après.

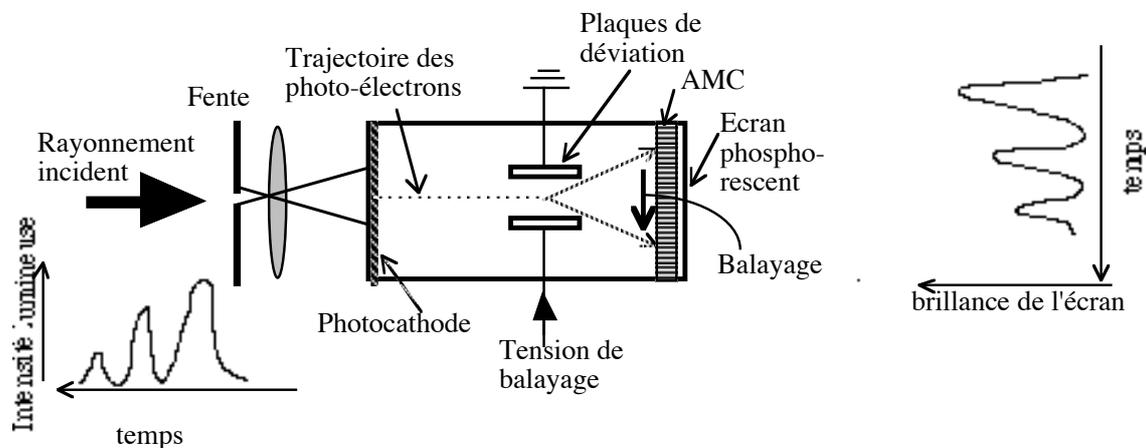


Fig. 8-7 : Caméra à balayage de fente.

La caméra à balayage de fente permet de convertir une variation temporelle en variation spatiale. Le signal lumineux incident est focalisé sur la photocathode à l'entrée de la caméra; il en résulte un flux de photoélectrons d'intensité proportionnel à l'intensité du flux photonique. Ces électrons passent entre deux plaques soumises à une tension en dent de scie, et balayent ainsi la surface amplificatrice à micro-canaux placée un peu plus loin. Le profil temporel des impulsions d'entrée apparaît sous la forme d'une variation d'intensité sur l'écran phosphorescent se trouvant en sortie de la plaque à micro-canaux. On obtient suivant ce principe une résolution temporelle voisine de la picoseconde.

4.2.4 DÉTECTEURS THERMIQUES

4.2.4.1 INTRODUCTION

L'absorption de rayonnement de grande intensité par un matériau se traduit par une élévation de sa température. Cet effet peut être mesuré directement pour déterminer la puissance d'un faisceau laser. Dans certains cas, l'élévation de température s'accompagne d'une modification mesurable des propriétés électriques. Les effets suivants peuvent se manifester :

- variation de la résistance électrique de l'élément;
- variation de la f.e.m. au contact de deux matériaux différents ;
- polarisation électrique. Il est possible de détecter un rayonnement et de mesurer son intensité en mesurant l'un des trois effets indiqués ci-dessus. La sensibilité dépend alors très peu de la longueur d'onde, d'autant plus qu'il est possible de placer en surface un matériau qui présente un bon

coefficient d'absorption sur une large plage spectrale. Les détecteurs thermiques sont utilisés essentiellement dans l'infrarouge où les détecteurs quantiques n'existent pas ou sont peu performants.

4.2.4.2 THERMISTANCE. BOLOMÈTRE.

Une thermistance est une résistance à base d'oxyde métallique ou de semi-conducteur sensible à la température. La variation de résistance liée à l'absorption d'un rayonnement peut être mesurée à l'aide d'un pont de Wheatstone. Un **bolomètre** est un appareil incluant une thermistance et servant à mesurer l'intensité d'un rayonnement. Les bolomètres ont un temps de réponse voisin de 0,01 s. La détectivité à la température ambiante est de l'ordre de $10^8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$.

4.2.4.3 THERMOCOUPLE. THERMOPILE.

Au contact de deux métaux de températures différentes on observe une f.e.m. dite de Seebeck. Dans le cas où la différence de température est due à l'absorption d'un rayonnement, la mesure de la variation de la f.e.m. permet de déterminer la quantité d'énergie rayonnante absorbée.

Thermopile: C'est un photodétecteur constitué par une rangée ou une mosaïque de thermocouples. Les thermopiles sont bien adaptées pour la mesure de rayonnement continu ou de basse fréquence.

4.2.4.4 DÉTECTEUR À EFFET PNEUMATIQUE OU CELLULE DE GOLAY.

Une cellule de Golay est constituée d'une enceinte d'un volume de quelques millimètres cubiques contenant un gaz à basse pression. L'une des parois laisse passer le rayonnement jusqu'à un film d'un matériau absorbant. L'élévation de température liée à l'échauffement du gaz induit une déformation de la paroi de l'enceinte. Cette déformation peut être mesurée soit par voie optique, soit par voie électrique. Dans le premier cas un faisceau lumineux est dévié par la paroi mobile; dans le deuxième cas, une armature fixe est placée devant la paroi afin d'obtenir un condensateur dont la capacité varie avec l'intensité du rayonnement incident.

Le temps de réponse d'un détecteur de rayonnement à effet pneumatique est voisin de 0,1 s. La détectivité est de l'ordre de $10^9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$.

4.2.4.5 DÉTECTEURS PYROÉLECTRIQUES.

Un matériau pyroélectrique est caractérisé par une polarisation électrique spontanée qui dépend de la température. L'effet pyroélectrique se manifeste dans les matériaux cristallins dépourvus de centre de symétrie (CdSe, ZnS), ainsi que dans les matériaux ferroélectriques dont la polarisation des divers domaines a été alignée par un traitement thermique ; dans ce dernier cas on observe l'effet pyroélectrique jusqu'à une température limite appelée température de Curie. Pour la céramique PZT (trisulfate de glicocolle), matériau couramment utilisé, la température de Curie est de 350°.

En disposant un matériau pyroélectrique entre deux électrodes, on obtient un détecteur de rayonnement impulsionnel, la réponse étant proportionnelle à dT/dt . Ce détecteur peut être assimilé à une source de courant placée en parallèle avec la capacité et la résistance du cristal pyroélectrique; l'intensité du courant fourni est proportionnelle à l'énergie rayonnante incidente. La bande passante se situe entre 1 kHz et 100 MHz.

Un **mesureur de puissance pyroélectrique** est constitué d'un capteur pyroélectrique recouvert d'une couche de matériau absorbant à spectre large (de 0,2 μm à 10 μm ou plus). Cet appareil permet de mesurer la puissance moyenne d'un rayonnement impulsionnel sur une plage de 0,1 mW à quelques dizaines de watts.

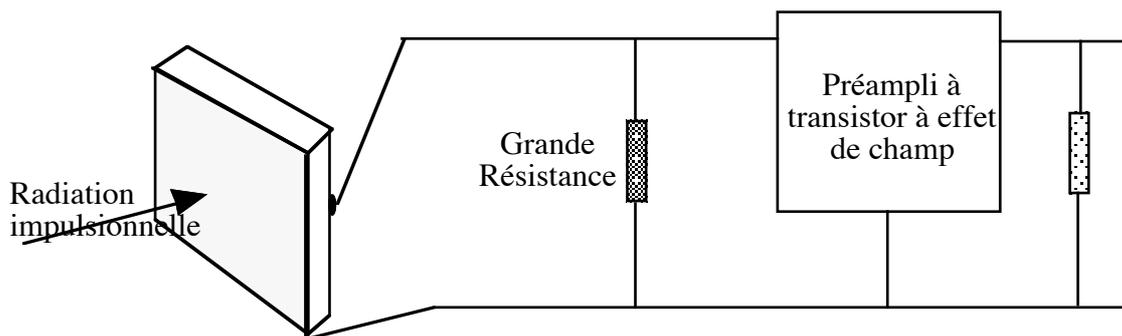


Fig. 8-8 : Photodétecteur pyroélectrique. Circuit électrique [Desvignes.87].

4.2.5 MOSAIQUES DE DÉTECTEURS. CAPTEURS D'IMAGES.

4.2.5.1 INTRODUCTION

Dans les paragraphes précédents nous avons décrit les détecteurs élémentaires permettant d'obtenir un signal électrique à partir d'un rayonnement dont l'intensité varie dans le temps. La distribution spatiale de l'intensité permet le transport d'une quantité beaucoup plus grande d'informations sous la forme par exemple de l'image d'un objet formée par un objectif. La détection de cette information est faite à l'aide d'une mosaïque de détecteurs élémentaires ou d'une surface photosensible.

On classe les capteurs d'images en deux catégories:

- les intensificateurs ou convertisseurs d'images dans lesquels le niveau d'intensité d'un point de l'image est transformé localement; le signal de sortie est une image plus lumineuse que l'image incidente.
- les analyseurs d'images dans lesquels l'information spatiale est lue séquentiellement et transformée en une fonction du temps.

4.2.5.2 CARACTÉRISTIQUES D'UN DÉTECTEUR D'IMAGES.

Caractéristiques géométriques: champ; format d'image.

Caractéristiques électriques: tensions, courants.

Caractéristiques électro-optiques: facteur de conversion. Le 'gamma' est la pente de la caractéristique log (signal en sortie) en fonction de log (éclairage). Un intensificateur est caractérisé par le rapport (luminance en sortie) / (éclairage d'entrée).

Autres caractéristiques:

- Réponse spectrale;
- Pouvoir de résolution spatiale;
- Pouvoir de résolution radiométrique.
- Fonction de transfert de modulation spatiale: modulation du signal de sortie en fonction de la fréquence spatiale dans le signal d'entrée pour une modulation sinusoïdale ou rectangulaire à 100%. La fréquence spatiale (mm⁻¹) correspond au nombre d'éléments alternativement noir et blanc par unité de longueur.
- Fonction de transfert de modulation temporelle: Inertie d'établissement et d'extinction du signal.
- Aberrations: aberrations géométriques, non-linéarité des FTM.

- Paramètres d'exploitation: durée de vie, résistance à l'environnement;
- Fiabilité.

4.2.5.3 PARAMÈTRES D'UNE IMAGE.

- Nature du flux photonique: rayons gamma, rayons X, rayonnement UV, visible ou IR.
- Dimensions: Largeur et Hauteur.
- Résolution: Nombre d'éléments (pixels) discernables par ligne ou par unité de longueur. Unité: paire de lignes par millimètre. En TV, on donne le nombre de lignes par hauteur d'image.
- Distribution de densité d'énergie: éclairage pour un récepteur, luminance pour un émetteur.
- Dynamique: Rapport entre la luminance maximale et la luminance minimale.
- Contraste entre deux zones de l'image caractérisées respectivement par les luminances L_1 et L_2 :

$$C = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2}$$

4.2.5.4 CONVERTISSEUR ET INTENSIFICATEUR D'IMAGES

Il existe des tubes à photoémission dont la fonction est d'augmenter la luminosité d'une image. Le principe de fonctionnement est le suivant (Fig. 8.11). L'image est formée à l'aide d'un objectif sur une photocathode. Une lentille électrostatique forme une image électronique de la photocathode sur un écran métallique très mince, recouvert d'un matériau luminescent. L'image peut être vue à travers un deuxième objectif placé en sortie du dispositif.

Le facteur d'amplification ainsi obtenu étant faible, on utilise en sortie de ces tubes un amplificateur à micro-canaux formé d'un empilement de canaux microscopiques percés dans un matériau isolant. Le coefficient d'amplification est alors supérieur à 1000.

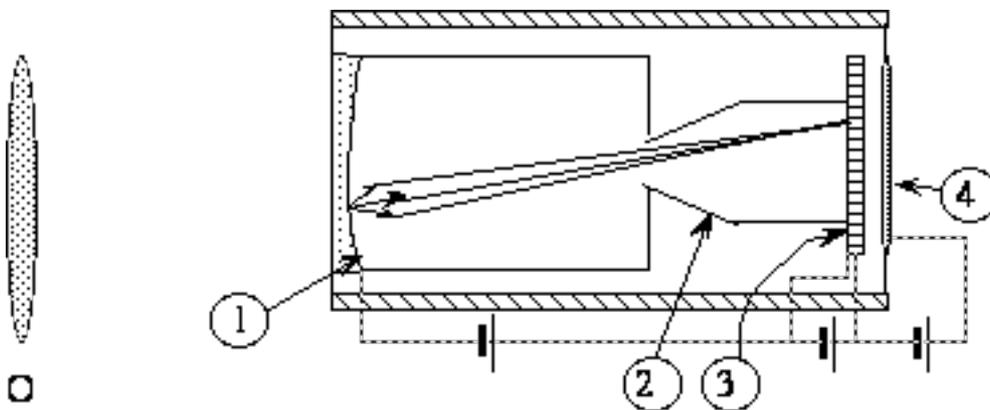


Fig. 8-9 : Amplificateur d'images à micro-canaux.

O: Objectif, 1: Photocathode, 2: Lentille de focalisation électrostatique, 3: Galette de micro-canaux, 4: Écran luminescent

4.2.5.5 ANALYSEUR D'IMAGES À TUBE ÉLECTRONIQUE

1 - Analyse des images.

L'analyse d'une image consiste à introduire une structure dans la distribution d'intensité afin de transformer la fonction d'espace en fonction du temps et de rendre possible la transformation de l'information par une liaison électrique simple.

2 - Systèmes d'analyse sans stockage.

L'acquisition d'une image peut se faire avec ou sans stockage du signal détecté. Les systèmes sans stockage ne sont utilisés que pour certains asservissements en position et pour la détection de rayonnement IR en thermométrie.

3 - Systèmes d'analyse avec stockage.

Tube Orthicon.

Dans un tube Orthicon l'image est formée à l'aide d'un objectif sur une photocathode. Les électrons libérés par la photocathode sont accélérés vers une cible en verre chargée positivement par rapport à la photocathode.

Tube Vidicon.

Le signal électronique est obtenu par balayage. La figure 8.11 montre un exemple de capteur d'image dans lequel la surface sensible est constituée d'une couche de matériau photoconducteur [Broussaud.74]. Un faisceau d'électrons vient balayer la surface qui reçoit les photons. En l'absence de rayonnement incident, la différence de potentiel appliquée à la couche est constant. Lorsqu'un flux de photons arrive, il y a décharge locale. Le courant nécessaire à la recharge de la couche est proportionnel à l'énergie photonique et sert donc à la mesure. Les matériaux couramment utilisés sont les suivants: sélénium tellure, sélénium, sulfure de cadmium, oxyde de zinc.

Les tubes à balayage sont de plus en plus remplacés par des caméscopes, caméras de prise de vue dans lesquels le capteur d'image est constitué d'une mosaïque de détecteurs à transfert de charges dont le principe est décrit ci-après.

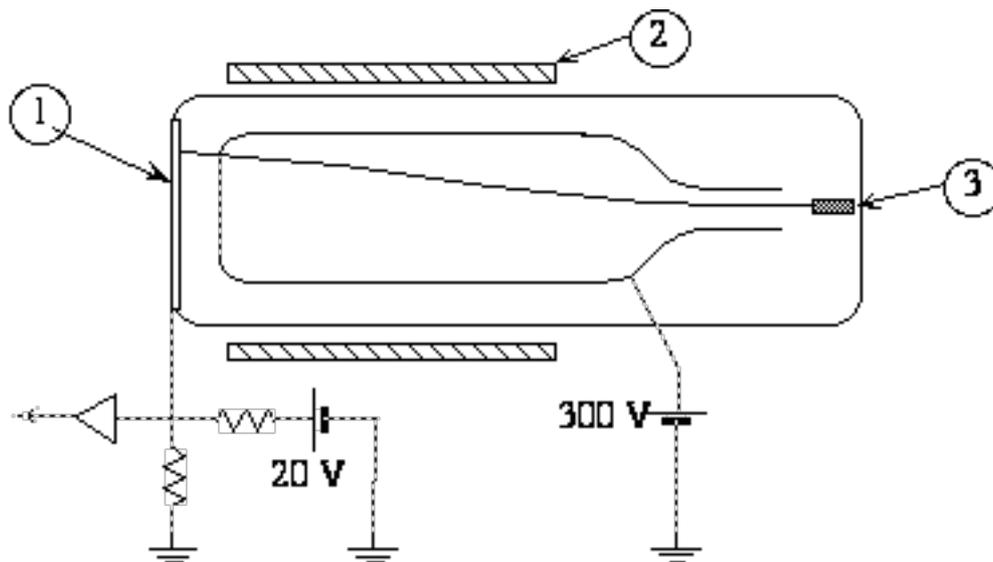


Fig. 8-10 : Schéma de principe d'un capteur d'images du type vidicon.

1: couche photoconductrice. 2: bobine de déflexion. 3: canon à électrons. Le faisceau d'électrons crée un dépôt de charges sur la couche photoconductrice. En présence de rayonnement, les charges s'écoulent par photoconduction. La recharge de la couche par le faisceau électronique donne naissance au signal vidéo

4.2.5.6 CAPTEURS D'IMAGES À ÉLÉMENTS CCD.

4.2.5.6.1 Photodétection et transfert de charges.

L'élément de détection [Mathieu.87]

L'élément de base d'un capteur d'image 'solide' ou CCD est un condensateur du type MOS polarisé en inverse. Si on injecte artificiellement des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion,

ceux-ci s'accumulent au voisinage de l'interface entre le semiconducteur et l'isolant. Dans le cas d'une zone de déplétion créée dans un substrat de type p, des électrons sont créés par absorption de rayonnement (Fig. 8-12-a). Le nombre de charges électriques ainsi obtenues est proportionnel au nombre de photons incident à cet endroit. En présence d'un rayonnement trop intense ou d'une exposition prolongée, l'accumulation de charges atteint un niveau de saturation. La récupération des charges électriques présentes dans le condensateur au terme de l'exposition au rayonnement permet d'obtenir un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement absorbé. Pour cela il faut faire glisser les charges de l'élément de détection vers un condensateur MOS voisin, intégré sur le même substrat (Fig. 8-12.b). Ce transfert des charges est obtenu par l'application d'une succession judicieuse de tensions sur les électrodes. Le transfert sur une distance importante peut être obtenu en regroupant les éléments MOS comme indiqué sur la figure 8-12. La cellule de base est constituée de trois éléments. Les tensions appliquées successivement à trois condensateurs voisins forcent les charges à migrer toujours dans le même sens. Le dernier élément de la ligne est relié au circuit extérieur par l'intermédiaire de la résistance d'entrée d'un étage d'amplification.

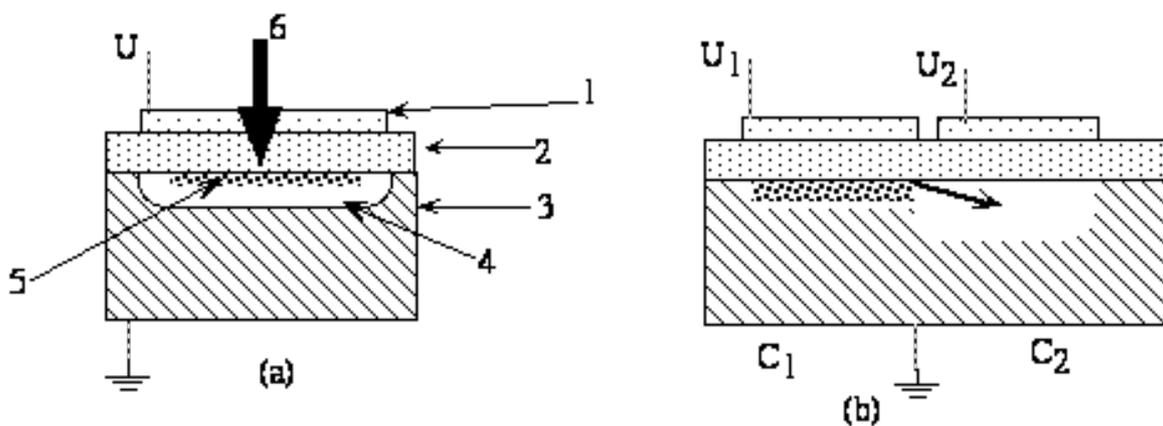


Fig. 8-11 : Élément CCD.

(a) - Condensateur MOS utilisé en photodétection. L'absorption de rayonnement dans la zone de déplétion se traduit par la création de charges électriques. 1: Électrode (Métal); 2: Isolant (SiO₂); 3: semi-conducteur de type P; 4: zone désertée par les porteurs majoritaires, ici les trous du silicium de type P; 5: Charges électriques créées par l'absorption de rayonnement; 6: rayonnement incident.

(b): Le transfert des charges vers le condensateur (indiqué par la flèche) C2 créées par absorption de rayonnement sous l'électrode 1 est assuré en appliquant à l'électrode 2 une tension supérieure à celle appliquée à l'électrode 1. Les charges électriques migrent vers la région de potentiel le plus élevé.

Un capteur d'images à CCD est obtenu en intégrant sur un même substrat un réseau de condensateurs MOS remplissant les fonctions suivantes :

- création d'un paquet de charges électriques proportionnel à l'intensité du rayonnement incident,
- stockage des charges dans un condensateur MOS,
- transfert des charges vers le condensateur voisin et de proche en proche vers l'étage d'entrée d'un amplificateur. La disposition des éléments sur le substrat dépend de l'application envisagée. Les configurations les plus courantes sont les mosaïques linéaires et les mosaïques bidimensionnelles.

4.2.5.6.2 Mosaïque linéaire.

Une structure possible pour une mosaïque linéaire est présentée sur la figure 8-13 [Desvignes.87]. Les photodétecteurs sont alignés au centre du composant de forme rectangulaire. Une série

d'électrodes placées parallèlement aux photodétecteurs permet l'extraction des charges accumulées pendant la phase de détection vers les éléments MOS de transfert. Un transfert élémentaire se fait en un temps inférieur à la microseconde. L'extraction du signal recueilli par une barrette d'un millier d'éléments peut se faire en moins d'une milliseconde.

Les nombres standard d'éléments des barrettes linéaires sont : 512, 1024 ou 2048.

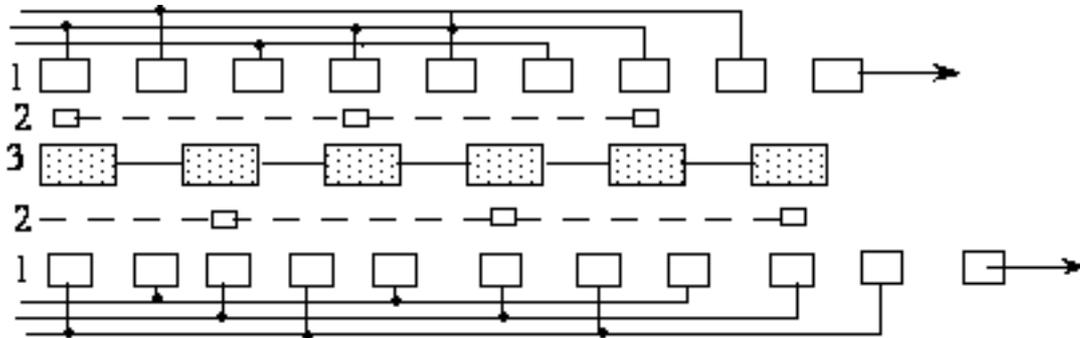


Fig. 8-12 : Capteur CCD: mosaïque linéaire.

1: éléments de transfert; 2: éléments d'extraction des charges enregistrées; 3: éléments photosensibles.

4.2.5.6.3 Mosaïque bidimensionnelle.

Les deux structures suivantes sont utilisées pour la réalisation des capteurs d'image 'solide': transfert de trames et transfert de lignes.

Transfert de trames: (Fig. 8-14.a) Tous les photodétecteurs sont disposés sur la même partie du substrat; les éléments de stockage rassemblés sur l'autre moitié. A chaque colonne d'éléments photosensible est associée à une zone de stockage. Après la détection d'une image, les charges sont transférées en bloc de la zone de détection à la zone de stockage. L'image est détectée pendant une période d'une vingtaine de millisecondes. Le transfert et stockage dure environ une demi milliseconde. La période de détection suivante est mise à profit pour transférer l'image stockée, ligne par ligne dans le circuit extérieur sous la forme d'un signal vidéo.

La structure à transfert de trames permet une utilisation parfaite de la surface de détection; l'image est détectée entièrement. On obtient ainsi une bonne résolution et une grande sensibilité.

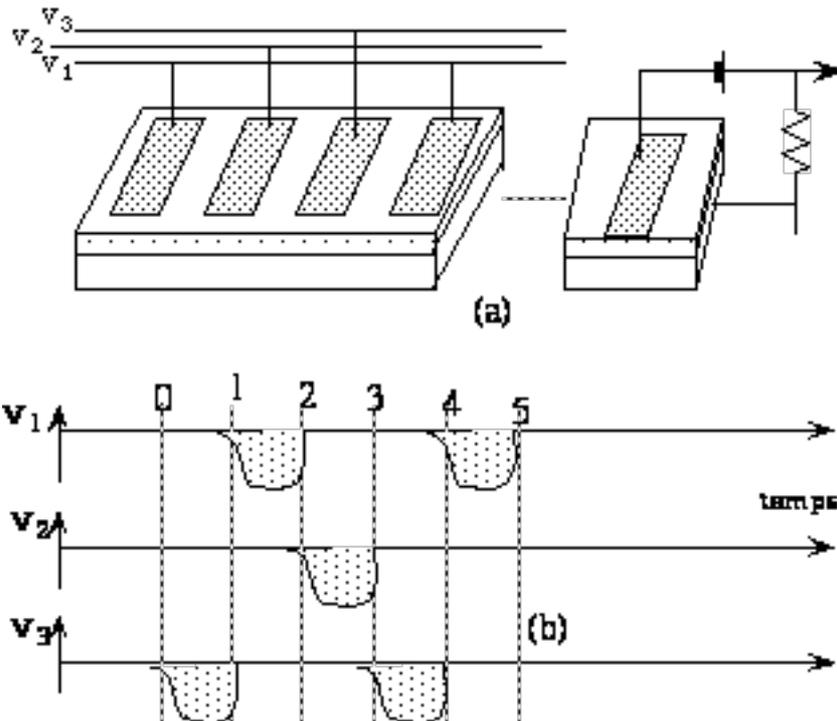


Fig. 8-13 : Transfert des charges le long d'une série de condensateurs MOS intégrés sur le même substrat.

- (a) - La ligne de transfert est constituée d'une série dont l'élément de base comprend 3 condensateurs MOS. Le dernier élément permet d'injecter les charges dans l'étage d'entrée d'un amplificateur.
- (b) - Tensions appliquées à 3 éléments voisins. Le signal présenté ici permet un glissement des charges vers la droite.

Transfert de lignes

Les éléments de détection et les éléments de stockage sont intégrés sur la même zone du substrat. Les charges sont transférées colonne par colonne dans les éléments MOS de stockage. Pendant le temps d'enregistrement d'une nouvelle image, l'image stockée est décalée ligne par ligne jusqu'aux registres de sortie avant d'être transférée vers l'extérieur sous la forme d'un signal vidéo.

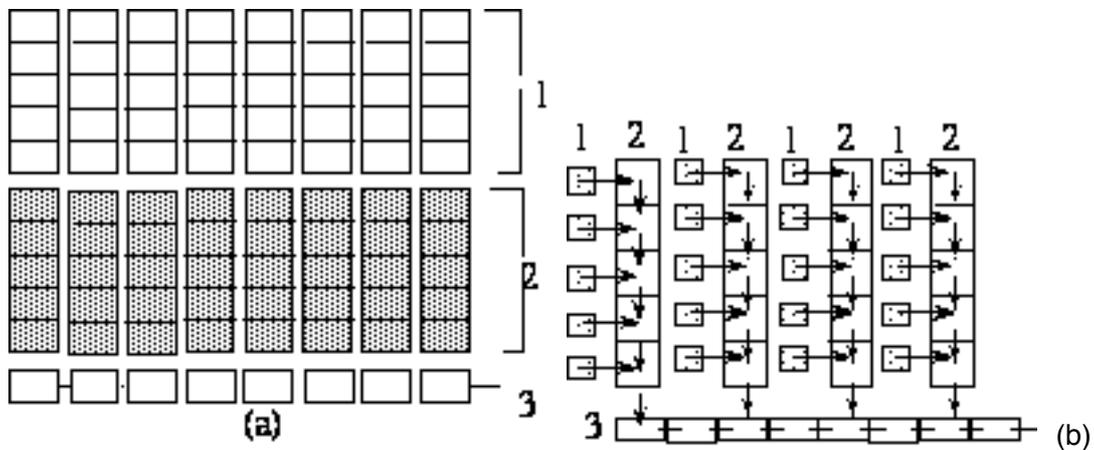


Fig. 8-14 : Capteur d'images à CCD. (a) Transfert de trame (b) Transfert de lignes

1 : éléments photosensibles; 2 : éléments de stockage et de transfert; 3 : registres de sortie

4.2.5.6.4 Caméra 'solide' ou camescope.

Une caméra 'solide' présente les avantages par rapport aux caméras à tubes : moins fragile, taille et poids réduits, pas de distorsion géométrique, insensibilité aux champs magnétiques intenses. La technologie CCD est de plus en plus utilisée en prise de vue où une grande sensibilité est souvent nécessaire. La vision robotique est un autre domaine d'utilisation de ces caméras.

Les caméras CCD présentent les avantages suivants par rapport à leurs homologues à tube :

- durée de vie supérieure,
- faibles poids et encombrement,
- faible rémanence,
- niveau de saturation plus élevé,
- meilleur coefficient Gamma,
- faible distorsion,
- pas de temps de préchauffage,
- faible consommation,
- peu sensible aux parasites électromagnétique,
- grande sensibilité.

4.2.5.7 CAPTEURS D'IMAGES À TECHNOLOGIE CMOS

La technologie CCD, relativement complexe, peut être remplacée par une technologie dite CMOS pour les applications ne nécessitant pas une très bonne qualité d'image.

Comme pour les CCD les détecteurs CMOS sont à base de silicium, et sont donc sensibles dans le visible et le proche IR. Le processus de photoconversion est identique dans les deux cas, et la couleur est obtenue de la même façon, à l'aide de trois masques vert, bleu et rouge. Les matrices CMOS ne disposent pas, comme les CCD, d'éléments de transfert de charges; les charges passent directement dans un étage d'amplification. L'ensemble fonctionne comme une mémoire à accès aléatoire (RAM). L'avantage par rapport aux CCD est l'absence d'un grand nombre de signaux d'horloge et de tensions d'alimentation.

4.2.6 OPTOCOUPLEURS

Un optocoupleur sert à transmettre des informations logiques ou analogiques arrivant sous la forme d'un signal électrique, par le biais d'une voie optique. Deux fonctions peuvent être ainsi assurées par ce composant : l'isolation électrique entre l'entrée et la sortie, la protection des utilisateurs Le photocoupleur est encore appelé opto-isolateur [RTC.83].

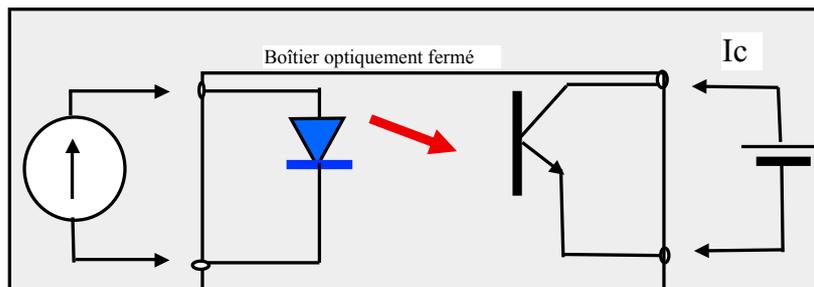


Fig. 8-15 : Schéma de principe d'un photocoupleur

Le circuit d'entrée est constitué par une DEL. La sortie est un photo transistor séparée de la diode d'entrée par un matériau transparent pour le rayonnement émis et isolant électriquement.

Les paramètres d'un photocoupleur sont :

- le courant d'entrée I_E (courant direct de la DEL),
- le courant de sortie I_S sous une tension donnée,
- le taux de transfert en % (égal au rapport I_S/I_E) à une tension V_S donnée,
- la tension d'isolement ou tension de claquage (c'est la valeur maximale de tension non destructrice entre la sortie court-circuité et l'entrée court-circuitée,
- la résistance d'isolement entre l'entrée et la sortie (supérieure à $10^{10} \Omega$),
- la rapidité de réponse.

Dans le cas d'une transmission analogique, la linéarité entre l'entrée et la sortie est également un paramètre essentiel.

Il existe plusieurs types de photocoupleurs :

- Photocoupleur diode-diode; la sortie est alors constituée d'une simple diode PIN au silicium. Le temps de réponse est d'environ une nanoseconde.
- Photocoupleur Diode-Transistor. C'est le plus répandu; la rapidité est d'environ une microseconde; le rapport de transfert se situe entre 50% et 300%.
- Photocoupleur Diode-Darlington. L'emploi d'un circuit Darlington en sortie permet d'obtenir un gain en courant élevé (rapport de transfert supérieur à 500%).
- Photocoupleur Diode-Thyristor. La sortie est constituée d'un thyristor dont la gâchette a été remplacée par une zone photosensible.

Pour obtenir un gain élevé (supérieur à 30%) et une réponse rapide (200 ns) on a développé des photocoupleurs diode-Diode/Transistor.

4.2.7 DISPOSITIFS DE VISUALISATION.

Le tube cathodique a régné en maître depuis l'invention de la télévision et reste aujourd'hui très utilisé. Dans le cas d'un moniteur couleur, trois signaux vidéo modulés (correspondant aux 3 couleurs fondamentales : rouge, vert et bleu) servent à moduler trois faisceaux d'électrons qui viennent frapper simultanément un écran recouvert d'un matériau luminescent.

La technologie a cependant évolué et des progrès ont été réalisés dans le domaine des écrans plats. C'est ainsi qu'on a vu apparaître des panneaux à diodes électroluminescentes, des panneaux à couches électroluminescentes, des écrans à plasma. Il existe également des écrans passifs à base de cristaux liquides.

Panneaux à plasma - La couche électrooptique est un mélange de gaz rare parfois complété par des vapeurs métalliques. Le gaz est excité par une ddp de quelques dizaines de volts, continue ou alternative. La décharge à travers le gaz s'accompagne d'une émission lumineuse de quelques dixièmes de lumens par watt, c'est-à-dire environ 100 fois moins que les écrans cathodiques. L'adressabilité matricielle et l'effet de mémoire est obtenu grâce au maintien de la décharge à une tension plus basse que le seuil de claquage. Les écrans à plasma sont limités au niveau de l'adressage (40 caractères par ligne) et restent lents. Des écrans de 1024x1024 points sont cependant fabriqués mais les prix restent prohibitifs.

Écrans électroluminescents - Les points image de ces écrans sont constitués de diodes électroluminescentes, réalisées sur un substrat commun. L'efficacité lumineuse est limitée à quelques dixièmes de lumens par watt. L'électroluminescence de certains matériaux solides est également mise

à profit dans certains écrans plats de réalisation récente; le rendement lumineux est alors 10 fois plus grande que celui des panneaux à plasma. La luminescence est alors activée par des transistors intégrés dans le substrat. Ces matrices actives sont à la base des téléviseurs à écran plat du futur.

Écrans plats passifs à cristaux liquides - Les cristaux liquides sont des assemblages de molécules organiques transparentes, allongées et qui tendent à former des réseaux réguliers mais déformables. Ce matériau présente une anisotropie optique qui a été mise à profit dans des dispositifs de visualisation.

La couche de cristal liquide nématique (les molécules tendent à se ranger parallèlement) est contenue entre deux plaques de verre séparées d'une dizaine de microns (Figure 8.17). Des électrodes transparentes sont fixées sur les faces externes. Les faces internes des lames sont recouvertes d'un traitement qui favorise la disposition des molécules en hélice. Cet ensemble est placé entre deux polariseurs croisés. L'hélice formée par les molécules a pour effet de tourner le plan de polarisation de la lumière qui traverse la cellule. L'hélice peut être détruite par application d'une tension de quelques volts. La lumière est alors arrêtée à cet endroit. Il existe cependant un effet d'inertie qui tend à limiter la vitesse de balayage à 30 par seconde, ce qui est suffisant pour la restitution d'un signal vidéo.

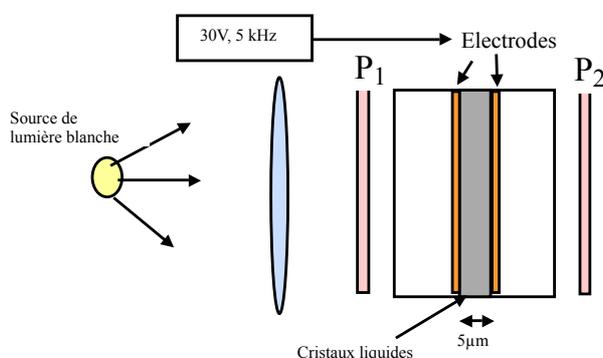


Fig. 8-16 : Visualisation par contrôle de la biréfringence de cristaux liquides nématiques.

La couche de cristaux liquides est placée entre 2 électrodes transparentes soumises à la tension de contrôle. L'ensemble est placé entre les polariseurs (P₁) et (P₂).

4.2.8 OPTIQUE INTÉGRÉE

La technologie photonique suit une évolution similaire à celle de l'électronique. Après la réalisation de composants discrets, on assiste au développement de l'intégration de composants de plus en plus miniaturisés, sur un substrat de matériau semi-conducteur. Il est possible d'obtenir par intégration des composants passifs comme les guides d'onde, les polariseurs ou les lentilles, ainsi que des composants actifs comme les modulateurs de phase ou d'amplitude, commutateurs optiques. Le couplage à l'entrée et en sortie du circuit est en général assuré par des fibres optiques monomodes à maintien de polarisation.

Il existe des limites à l'intégration des composants photoniques car le confinement de la lumière ne peut pas être inférieur à la longueur d'onde. D'une part, il faut une longueur d'interaction suffisante pour obtenir les effets désirés (modulation ou interruption) avec une tension raisonnable ; d'autre part, il existe des pertes par diffusion et absorption au cours de la propagation.

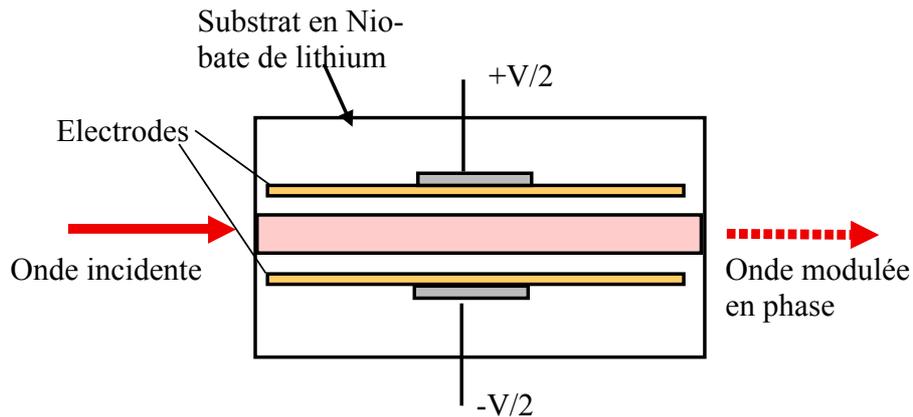


Fig. 8-17 : Schéma d'un modulateur intégré sur un substrat de niobate de lithium. Ce type de modulateur peut atteindre une fréquence de 40 GHz.

Le niobate de lithium (LiNbO_3) est le matériau qui donne le meilleur résultat pour l'intégration de composants photoniques. Un exemple de modulateur réalisé dans ce matériau est montré sur la figure 8.10. D'autres matériaux ont donné de bons résultats, comme le GaAlAs/GaAs. L'utilisation du silicium permettrait de rassembler sur un même substrat des composants électroniques et des composants photoniques. Cependant, le silicium a un gap d'énergie du silicium et ne présente pas d'effet électro-optique non linéaire ; des résultats prometteurs ont néanmoins été obtenus dans la bande $1,3 \mu\text{m}$ à $1,6 \mu\text{m}$ où le Si est relativement transparent.

4.2.9 BIBLIOGRAPHIE.

- "Détection et détecteurs de rayonnements optiques" ; F. Desvignes, Masson, (1987)
- "Bases de radiométrie optique"; Jean-Louis Meyzonnette, Thierry Lépine , 252 p, ISBN 2854285530, Ed. Cepadues, 2001

[Broussaud.74] 'Optoélectronique'; G. Broussaud, Masson, (1974)

[Mathieu.87] « Physique des semi conducteurs et des composants électroniques », H. Mathieu, Masson, 1987

Cours en ligne :

Radiométrie et détection optique (J.L Meysonette) :

http://www.bibsciences.org/bibsup/opt-coll/pub/3/pdf/11t3p15_ibis.pdf.