

Couches antireflet

Miroirs diélectriques

Les interférences des lames minces à faces parallèles ont des applications dans la vie courante. Nous allons en voir deux : les traitements "anti-reflet" des verres de lunettes ou d'objectif photo et les miroirs diélectriques multicouches.

1 Couche antireflet

La lumière réfléchi sur les dioptrés air-verre présents dans les instruments d'optique est gênante : elle entraîne une perte de lumière, crée des images parasites et un fond de lumière diffuse qui dégrade la qualité des images.

On diminue fortement cette lumière réfléchi en déposant une couche mince d'un matériau transparent sur les surfaces de verre, l'indice de ce matériau étant inférieur à celui du verre.

1.1 Description

On considère une surface de verre d'indice N sur laquelle une couche d'épaisseur e , d'une substance d'indice n a été déposée. La surface est éclairée par une onde plane monochromatique en incidence normale. Il émerge de cet ensemble une infinité d'ondes transmises et une infinité d'ondes réfléchies, comme avec un Fabry-Pérot. Les coefficients de réflexion sur

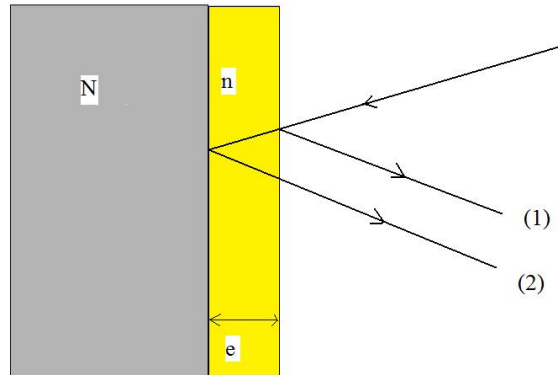


Figure 1: Une couche mince de matériau transparent est déposée sur une surface de verre. Une onde plane arrive en incidence normale (pour la lisibilité du dessin, on a représenté une incidence oblique), elle est réfléchi partiellement sur les deux dioptrés séparant l'air de la couche déposée, et celle-ci du verre. Les deux ondes réfléchies sont en situation d'interférence destructive pour des valeurs appropriées de n et e .

les deux dioptrés sont donnés par

$$r_1 = \frac{1 - n}{1 + n}$$
$$r_2 = \frac{n - N}{n + N}$$

Pour les matériaux courants, ces coefficients de réflexion sont petits. On peut donc déterminer le coefficient de réflexion en intensité de l'ensemble avec une précision convenable sans tenir compte des réflexions multiples à l'intérieur de la lame mince, en calculant simplement les interférences de l'onde réfléchi sur le dioptré air / lame mince et de l'onde réfléchi sur le dioptré lame mince / verre (voir figure ??).

1.2 Intensité réfléchie

Les coefficients de transmission des dioptries air / lame mince et lame mince / air étant proches de 1, les amplitudes des deux ondes réfléchies sont $r_1 a_0$ et $r_2 a_0$. L'intensité réfléchie est donnée en fonction de l'intensité incidente $I_0 = a_0^2$ et de la différence de marche $\delta = 2ne$:

$$I = I_0[r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\pi\delta/\lambda)]$$

On suppose maintenant que l'indice n de la couche mince est inférieur à celui du verre (dans ces conditions, l'hypothèse sur les coefficients de transmission proches de 1 est bonne). Les coefficients r_1 et r_2 sont alors de même signe et les interférences sont destructives si $\delta = \lambda/2 + p\lambda$ avec p entier. On choisit en général l'épaisseur correspondante la plus fine : $2ne = \lambda/2$, soit

$$e = \frac{\lambda}{4n}$$

L'intensité de la lumière réfléchie est alors

$$I = I_0(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2) = I_0(r_1 - r_2)^2$$

Elle est minimale si $r_1 = r_2$, c'est à dire si

$$\frac{1-n}{1+n} = \frac{n-N}{n+N}$$

ou encore $n = \sqrt{N}$. Pour un verre d'indice $N = 1,5$, cela correspond à $N = 1,22$. Aucun matériau facile à manipuler ne possède un indice aussi faible. On utilise alors de la cryolithe ($n = 1,35$) ou du fluorure de magnésium ($n = 1,38$), ce dernier étant plus robuste.

On obtient alors une intensité réfléchie égale à

$$I = I_0 \left(\frac{1-n}{1+n} - \frac{n-N}{n+N} \right)^2 \simeq I_0/100$$

alors que sans traitement, on trouve une intensité réfléchie quatre fois plus importante.

2 Miroirs diélectriques

2.1 Miroirs monocouches

Le dépôt d'une couche mince sur une surface de verre peut permettre d'en augmenter le pouvoir réflecteur par interférences constructives. Cela peut être réalisé en déposant un matériau d'indice $n > N$, généralement du sulfure de zinc ($n = 2,35$) ou de l'oxyde de titane ($n = 2,4$).

Comme pour la couche antireflet, les seules interférences à prendre en compte sont celles entre les deux premiers rayons réfléchis, d'amplitude $a_1 = a_0 r_1$ et $a_2 = a_0 t_1 r_2 t'_1 e^{i\varphi}$ où t_1 et t'_1 sont les coefficients de transmission en amplitude des dioptries air / lame et lame / air, et $\varphi = 2\pi(2ne)/\lambda$.

L'intensité réfléchie est

$$I = I_0[r_1^2 + (t_1 r_2 t'_1)^2 + 2r_1 t_1 r_2 t'_1 \cos(2\pi(2ne)\lambda)]$$

Comme r_1 et r_2 sont de signes opposés, l'interférence est constructive si le cosinus vaut -1, ou encore si

$$e = \frac{\lambda}{4n}$$

L'intensité réfléchie est alors

$$I = I_0(r_1 - t_1 r_2 t'_1)^2 = 0,35I_0$$

au lieu de $0,04I_0$ sans traitement pour un verre d'indice 1,5 et une couche de ZnS. On a donc multiplié le pouvoir de réflexion par 8,5.

Cependant, le coefficient de réflexion reste modeste avec une seule couche. Un miroir de salle de bain réfléchit avec un coefficient 0,85.

2.2 Miroirs multicouches

Il est possible d'obtenir des coefficients de réflexion très élevés en déposant un empilement de couches minces. On dépose en alternance des couches de deux sortes : bas indice n (inférieur à celui du verre à traiter) et haut indice n' (supérieur à celui du verre). En général, on dépose d'abord une couche de haut indice, puis une couche de bas indice etc... et on finit par une couche de haut indice. Chaque couche a pour épaisseur $\lambda/(4n)$ ou $\lambda/(4n')$. On utilise de la cryolithe ou du fluorure de magnésium pour le bas indice, et du sulfure de zinc ou de l'oxyde de titane pour le haut indice.

Les ondes résultant de la réflexion de l'onde incidente sur les plans séparant les différentes couches sont toutes en phase et interfèrent constructivement. Montrons que ces ondes sont

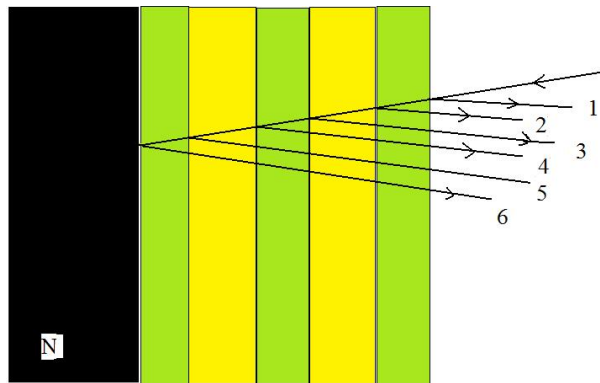


Figure 2: Le miroir est constitué d'un empilement de couches minces alternées haut indice, bas indice déposées sur le support en verre. Ces couches ont toutes la même épaisseur optique $\lambda/4$. Les ondes provenant directement de la réflexion de l'onde incidente sont toutes en phase, et interfèrent constructivement, augmentant ainsi le coefficient de réflexion. Le calcul de celui-ci requiert cependant la prise en compte des réflexions multiples.

bien en phase. Tout d'abord, montrons que les ondes 1, 3, 5, etc... sont en phase : elles subissent toutes un déphasage de π lors de la réflexion (dioptré entre un milieu d'indice faible et un milieu d'indice élevé), et il y a une différence de marche de $4 \times \lambda/4 = \lambda$ entre deux successives de ces ondes. Elles sont donc en phase.

Les ondes 2, 4, 6, etc... sont aussi en phase : pas de déphasage à la réflexion et une différence de marche de λ entre deux telles ondes successives.

Les ondes 1 et 2 sont en phase, car la première subit un déphasage de π à la réflexion, et il y a une différence de marche de $\lambda/2$ pour la deuxième.

Finalement, toutes les ondes sont donc en phase. On conçoit que le coefficient de réflexion de l'ensemble puisse être très élevé.

Quelques informations numériques :

- Avec un empilement de 5 couches de sulfure de zinc et de fluorure de magnésium, on obtient $R \simeq 0,9$.
- On sait fabriquer couramment des miroirs avec $R \geq 0,999$.
- En comparaison, un miroir métallique obtenu en déposant de l'aluminium sur du verre atteint au maximum $R = 0,92$. De plus un tel miroir a un faible coefficient de transmission et absorbe une part importante de l'énergie lumineuse. C'est un inconvénient de taille si le miroir doit servir à fabriquer un Fabry-Pérot.