

## RECOBRIMENTS ÒPTICS

Joan Antó i Roca  
Escola Universitària d'Òptica de Terrassa  
Universitat Politècnica de Catalunya  
TERRASSA (Barcelona)

### RESUM

Després d'una ràpida ullada de conjunt als diferents tipus de recobriments òptics, hom concentra l'atenció d'aquest escrit en les capes antireflectores, especialment les aplicades sobre les lents correctores de visió i tot esmentant llurs avantatges.

Hom analitza les corbes de reflectivitat espectral quan hom incrementa el nombre de capes primes dielèctriques en els recobriments òptics, destacant la importància que això té per a la construcció de filtres interferencials, miralls làser, filtres dicroics, miralls freds, separadors de feix i sobretot els recobriments antireflex en els components òptics de precisió.

### ABSTRACT

After a brief survey of the different types of optical coatings, attention is focused on the antireflective coatings, specially those applied on the optical surfaces on spectacle lenses.

The spectral reflectivity curves are compared after increasing the number of dielectric layers. The influence of this increase on the manufacture of interference filters, cold mirrors, beam splitters, laser mirrors and especially the antireflective coatings in precision optical components is discussed.

## INTRODUCCIÓ

L'actual disponibilitat al mercat d'equips d'Alt Buit que permeten de realitzar recobriments uniformes amb diferents materials, el gruix, la transmitància i la reflectància dels quals poden ésser molt exactament controlats, permet d'aconseguir un factor de transmissió superficial en els diferents components òptics pràcticament a la mida de la feina a què estiguin destinats. Gràcies als recobriments òptics, es pot augmentar, atenuar, dividir, la transmissió d'energia radiant pràcticament a voluntat. Es pot dir que no hi ha cap component òptic de precisió que no hagi rebut en les seves superfícies els recobriments corresponents en una campana d'Alt Buit.

A part de millorar les propietats òptiques dels diferents elements òptics (lents, prismes, finestres òptiques, miralls, filtres, etc.) igual que qualsevol altre tipus de revestiment superficial (pintures, dipòsits electrolítics), amb les capes primes dipositades en Alt Buit també es poden millorar les característiques tècniques (mecàniques i químiques) del substrat que les rep. Així augmenta la resistència a l'abració i als agents químics exteriors, la duresa, etc.

És possible de diferenciar tres tipus de recobriments en pel·lícules primes:

### a) Recobriments metàl·lics

Són aplicacions superficials de metalls d'alta adherència (crom, alumini, argent, coure, etc.) que, sols o protegits per altres capes superficials per evitar-ne l'oxidació, acostumen a utilitzar-se per a reflectir al màxim l'energia incident en els miralls o només parcialment en els atenuadors, filtres, separadors de feix lluminós, reticles, etc.

Els miralls òptics (de primera superfície) poden trobar-se en telescopis, objectius fotogràfics catadiòptrics, interferòmetres, fotocopiadores, làsers, etc.

#### b) Recobriments no metàl·lics

Són generalment mono o multicapes de materials dielèctrics (òxids, fluorurs metàl·lics, etc.) que, disposats en una pila alternant d'índexs de refracció alts i baixos, permeten de millorar o quasi suprimir la reflectivitat en els components òptics realitzats sobre vidre, metalls, etc.

Els recobriments dielèctrics antireflectors poden trobar-se a la majoria dels instruments òptics: objectius fotogràfics, de projecció, cine, televisió, prismàtics, visors, binocles, microscopis, òptica per a làsers, etc.

Tanmateix, a vegades cal donar més reflectància superficial als miralls làser i als filtres interferencials, i obtenir la reflectivitat adequada en els miralls dicroics (freds i calents), els separadors de feix lluminós, els polaritzadors, etc.

#### c) Recobriments mixtos

S'alternen les capes primes dielèctriques amb capes primes parcialment reflectores.

Es fan anar principalment en la construcció de filtres interferencials de pas estret (transmeten una banda de longituds d'ona molt estreta) que solen trobar-se en interferòmetres, espectrofotòmetres, detectors selectius de radiació, colorímetres, etc.

## CARACTERÍSTIQUES GENERALS DELS RECOBRIMENTS ÒPTICS

a) Les capes primes han de tenir la major transparència i homogeneïtat possible, per a evitar que llur eficiència decreixi, a causa de l'absorció o difusió de l'energia radiant dins la capa.

b) Els recobriments dielèctrics han de tenir la major durabilitat possible davant les condicions d'ús i d'ambient per tal que amb l'edat no pateixin canvis estructurals que n'afectin les propietats òptiques.

c) Les pel·lícules primes han de tenir un gruix uniforme a l'àrea de treball específica, i això vol dir que aquest ha d'ésser controlat el més exactament possible durant la deposició en Alt Buit.

Són importants, també, sobretot en filtres interferencials de pas estret, les variacions de la finor de la superfície del dipòsit. Això depèn de la seva microestructura, la qual és funció de les condicions de qualitat en l'Alt Buit en el qual es realitzi el recobriment.

Cadascuna de les condicions anteriors varia d'importància segons l'aplicació que posteriorment tingui la capa o multicapa que es dipositi. S'analitzen a continuació les característiques i aplicacions dels tres tipus de recobriments abans esmentats.

### A) RECOBRIMENTS METÀL·LICS

Poden ésser emprats com a reflectors o com a filtres. Els millors miralls de gran interval espectral es fan amb recobriments metàl·lics (sigui dipositats en Buit Absolut, sigui electrolíticament) sobre vidre, silici fos, o substrats metàl·lics.

Els millors metalls utilitzats com a recobriments són l'alumini, l'argent, l'or i el rodi.

La reflectància d'un recobriment metàl·lic ben evaporat en Alt Buit excedeix la del metall de substrat.

La figura 1 mostra la reflectància espectral a incidència normal en diversos dels recobriments metàl·lics més comuns.

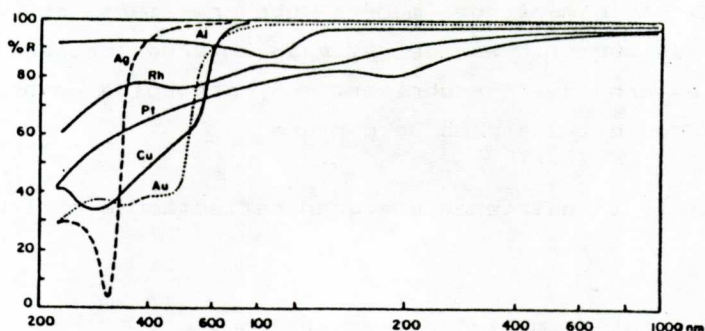


FIGURA 1

És útil de fer esment d'alguns punts:

a) L'or i el coure no són bons per a fer de reflectors en la regió visible.

b) L'or, el coure, l'argent i l'alumini són molt tous.

c) L'alumini adquireix immediatament una capa protectora d'òxid, després de la deposició; aquesta redueix significativament la seva reflectància en l'ultraviolat i contribueix a fer augmentar la difusió en tot l'espectre.

d) L'alumini i l'or com a recobriments se subministren comercialment protegits per una capa prima dielèctrica, que n'incrementa

la resistència a l'abradió sense afectar significativament llur reflectància i protegeix al mateix temps l'alumini de l'oxidació. La capa protectora té normalment un gruix de mitja longitud d'ona (a 550 nm) i el material sol ésser d'òxid de silici o de fluorur de magnesi per als miralls d'alumini utilitzats en el visible.

e) L'argent tot just evaporat té la reflectància més gran d'entre tots els metalls en el visible, i, per això, s'utilitza en miralls interferomètrics i filtres interferencials. Tanmateix, s'enfosqueix ràpidament, de manera que rarament és utilitzat, llevat de les superfícies de reflexió interna. En aquest cas la superfície externa del recobriment és protegida amb una capa d'Inconel o coure i una capa de pintura.

f) El plati i l'indi tenen una gran reflectància en l'ultraviolat.

g) A l'infraroig, el millor reflectant és l'or.

h) El crom, tot i que amb menor reflectància, és un element més resistent, cosa que fa que pugui ésser utilitzat en moltes aplicacions industrials (joguineria, fars d'automòbil, miralls retrovisors, filtres neutres, etc.).

Quan el metall s'utilitza com a atenuador, filtre neutre, separador de feix lluminós cúbic o pla-paral·lel, es pot dipositar una simple capa fins a assolir la relació de transmissió-reflexió desitjada.

Les pel·lícules primes metàl·liques s'utilitzen només en els separadors de feix lluminós (miralls parcialment reflectors) més barats, ja que són molt absorbents. Tal com es veurà més endavant, hom prefereix la utilització de superfícies recobertes amb dielèctrics.

Com a filtres neutres s'utilitzen bàsicament metalls, a

causa de la uniformitat de la llum transmesa.

## B) RECOBRIMENTS ANTIREFLECTORS

### Història

Lord Rayleigh (1887) fou el primer d'adonar-se que les superfícies de vidre atacades químicament reflectien molt menys la llum. Detectà aquest fenomen a les peces òptiques procedents d'instruments òptics vells.

Això fou confirmat el 1896 per R. Taylor quan observà, a les lents velles de les cambres fotogràfiques, que en les zones de corrosió es produïa paradoxalment una major transmitància de llum que a les zones inalterades, i que, alhora, s'hi reflectia menys llum. Considerant això, Taylor desenvolupà una tècnica d'atac químic per crear aquestes capes antireflectores.

Els primers investigadors en aquest camp atribuïen el fenomen a la formació d'una pel·lícula d'índex de refracció baix, sobre la superfície del vidre, sense adonar-se que l'efecte observat era degut a les interferències entre ones reflectides a la primera i a la segona superfície (interior) de la pel·lícula.

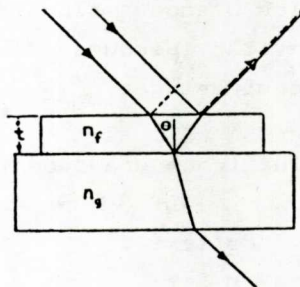


FIGURA 2

Bauer (l'any 1933), mentre estudiava les propietats d'absorció de l'ultraviolat en els halurs alcalins amb pel·lícules de KBr i NaBr evaporades en buit sobre quars, deduí que les interferències eren la causa del decreixement de la reflectància del quars. El seu article publicat sobre la qüestió conté un desenvolupament complet dels aspectes teòrics i pràctics dels recobriments antireflectors. En un treball, Strong, l'any 1936, evaporava sobre vidre pel·lícules de  $\text{CaF}_2$  que eren més durables que les de Bauer. Aconseguí desenvolupar una tècnica que és la base del que avui dia fa la indústria òptica respecte als recobriments antireflectors.

És interessant de saber que durant algun temps s'havien evaporat fluorurs a la indústria de les bombetes de llum, fet probablement desconegut pels primers investigadors de les capes antireflectors. Per exemple, el  $\text{CaF}_2$  i la criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), juntament amb un absorbent de gasos, eren vaporitzats a les bombetes de vidre de tungstè per a convertir el metall evaporat del filament en un halur més transparent, la qual cosa augmentava l'eficiència lluminosa de la bombeta. Aquests fets i altres de similars són aplicats avui dia expressament en una campanya d'Alt Buit.

#### NECESSITAT DELS RECOBRIMENTS ÒPTICS ANTIREFLECTORS

Els recobriments òptics d'aquest tipus són necessaris sempre que sigui important d'evitar pèrdues d'energia radiant i/o d'aconseguir imatges ben contrastades.

Cada vegada que la llum troba una superfície no recoberta de separació entre l'aire ( $n_0=1$ ) i un vidre crown ( $n_v=1.5$ ), se'n perd com a mínim un 4 % per reflexió.



$$\text{En efecte, } R = \left( \frac{n_v - n_o}{n_v + n_o} \right)^2 = \left( \frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2 = 0,04 = 4 \%$$

Això vol dir que en una lent o en un prisma que tenen dues cares, sense tenir en compte l'absorció interna, la transparència màxima possible és només d'un 92 %.

Així, per a sistemes òptics que incloguin uns quants components òptics, la pèrdua de lluminositat s'accentua ràpidament. Un exemple espectacular era el dels periscopis dels submarins, abans que llurs lents i prismes poguessin rebre els tractaments antireflectors. Les pèrdues de llum eren de l'ordre del 80 % o més, i això els feia inoperants del crepuscle fins que clarejava (figura 3).

Encara son més importants les pèrdues de contrast degudes a la superposició en el camp imatge de les imatges feblement reflectides a cada superfície òptica, les quals encara que acostumen a estar enfocades més enllà de llur possible reconeixement, influeixen en la nitidesa de la imatge, més que cap altra cosa.

Tanmateix, en el cas dels usuaris d'ulleres, aquestes imatges paràsites de reflexió de les zones lluminoses de l'entorn sí que són nocives, ja que se superposen en el camp de visió. Això és especialment perillós en la conducció de nit o a les zones d'ombra.

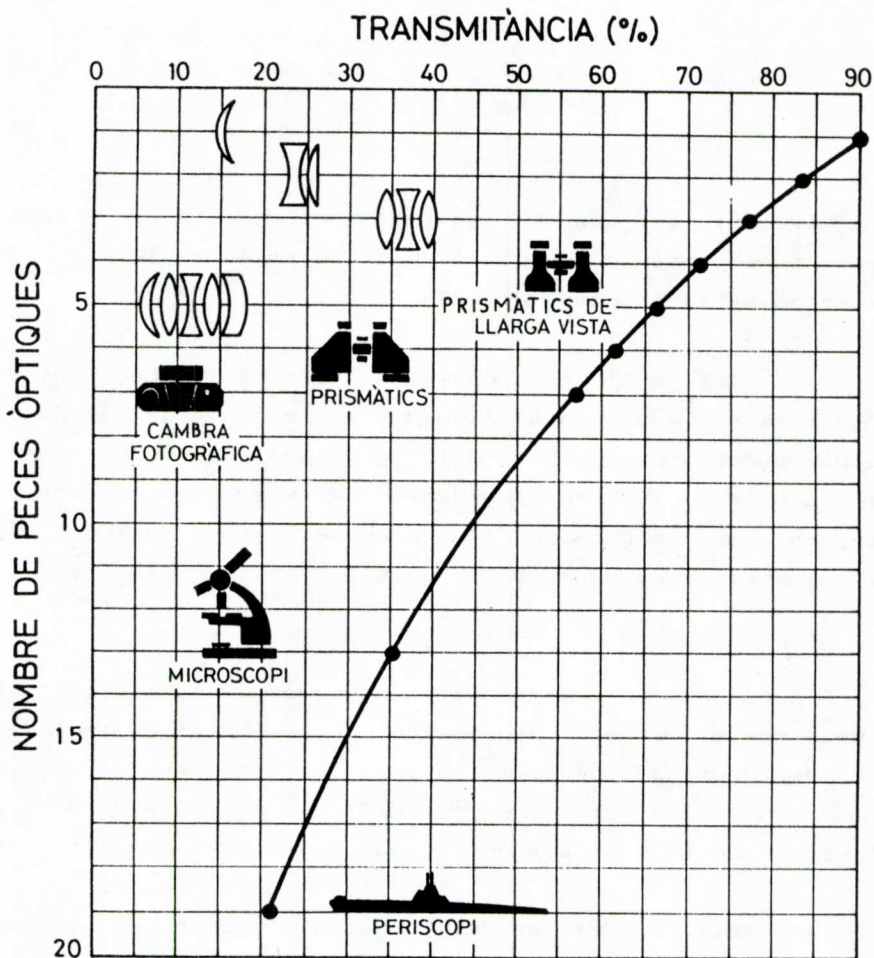


FIGURA 3

Aquests defectes es poden fer desaparèixer en gran mesura amb els recobriments antireflectors. És difícil, avui dia, trobar cap instrument òptic de qualitat en el qual els components òptics no hagin rebut el recobriments antireflectors que correspongui.

La indústria òptica ja sol disposar dels equips de deposició en Alt Buit més adients, automatitzats per a una producció en massa, incorporant controls fotomètrics molt sensibles que garanteixen la reproductibilitat de la reflectància/transmitància que cal per a cada component òptic.

#### MONOCAPES ANTIREFLECTORES

Com ja hem vist abans, la reflectància en la superfície d'un vidre òptic, per exemple, depèn de la diferència d'índexs de refracció entre aquest vidre i l'aire. Per a la llum aquesta diferència per a un vidre crown normal és de 0.5.

Mitjançant la selecció d'un material amb un índex de refracció intermedi (al voltant de la mitjana geomètrica  $n = (n_o \cdot n_s)^{1/2}$  i per l'aplicació d'un recobriments d'un quart de longitud d'ona de gruix òptic, és possible reduir significativament la reflectància de la superfície òptica anterior.

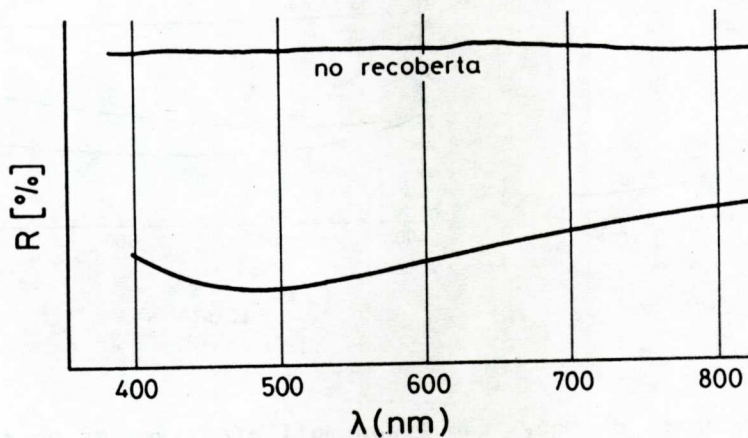


FIGURA 4

Després del  $\text{CaF}_2$  els materials més utilitzats a la deposició de monocapes antireflectores han estat el  $\text{NaF}$ , el  $\text{LiF}$ , la criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) a Alemanya, especialment durant la segona guerra mundial, i sobretot el fluorur de magnesi ( $\text{MgF}_2$ ), el qual, dipositat sobre vidre a una temperatura de  $300^\circ\text{C}$ , aconseguix de reduir considerablement i d'una manera durable la reflectància superficial (figura 4).

Aquests recobriments de  $\text{MgF}_2$  treballen bé sobre un interval molt ampli de longituds d'ona, malgrat el fet que la reflectància zero no s'obté per a cap longitud d'ona (figura 4), ja que per als vidres normals en òptica el  $\text{MgF}_2$  té un índex de refracció massa alt ( $n=1,38$  a  $\lambda=550\text{nm}$ ), molt més gran que el que es requereix per  $\sqrt{n_o \cdot n_v} = \sqrt{1 \times 1.5} = 1.27$ . Aquesta dependència respecte a l'índex de refracció del substrat és representada a la figura 5.

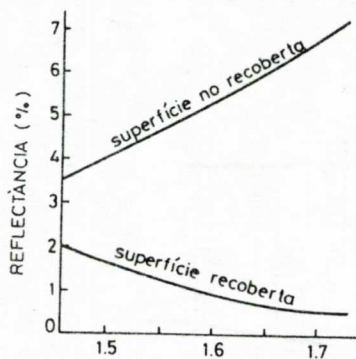


FIGURA 5

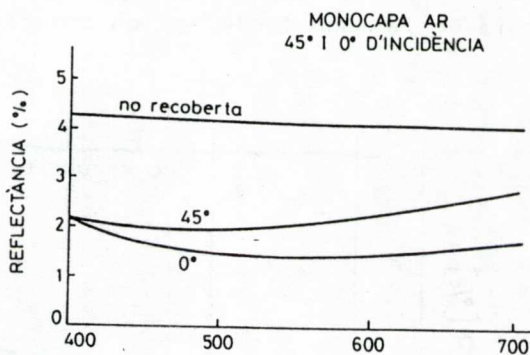


FIGURA 6

Les monocapes de  $\text{MgF}_2$  també són molt efectives en un ampli interval d'angles d'incidència (figura 6). Un exemple concret pot ésser el d'un raig que arriba a una superfície esfèrica ( $n=1.523$ ) amb un angle d'incidència de  $58^\circ$ . Si la superfície no és recobert-

ta, la pèrdua per reflexió és d'un 8.3 %. Amb l'addició d'una sola capa antireflectora de  $MgF_2$ , calculada per a incidència normal, la pèrdua energètica per reflexió es redueix a un 3,6 %. Només per a angles superiors a  $60^\circ$  en aquesta superfície recoberta es produeixen pèrdues de més d'un 4 %.

La reflectància pot minimitzar-se per a qualsevol angle d'incidència a qualsevol longitud d'ona ajustant adequadament el gruix del recobriment.

S'aconsegueix també un efecte antireflector per a majors gruixos òptics,  $L/4$ ,  $3L/4$ ,  $5L/4$ ,  $7L/4$ , etc. El que passa és que l'interval de longituds d'ona en què es produeix antireflexió és cada vegada més restringit. La figura 7 ens mostra aquest fet.

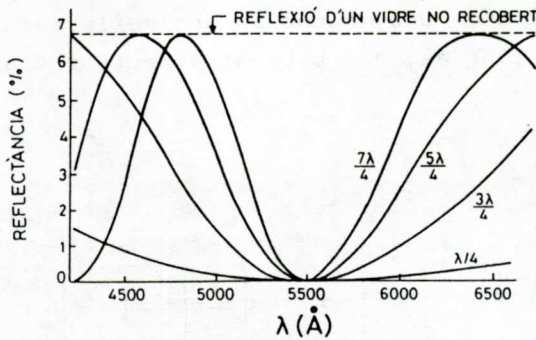


FIGURA 7

A més, la monocapa de fluorur de magnesi serveix per a protegir la superfície dels vidres òptics (especialment els crown densos de bari) de l'atac químic exterior, tal com el degut a les empremtes digitals i a les condicions usuales de neteja. El tractament monocapa en molts casos no és prou satisfactori, ja que la reflectància creix massa a ambdós costats del mínim (figures 4 i 7), i això és el que fa l'aspecte violat dels elements

òptics així tractats, a causa de la gran part de llum roja i blava reflectides. Cal doncs incrementar llavors el nombre de capes en el recobriment antireflector.

#### DOBLE CAPA D'ANTIREFLECTOR

Amb una segona capa s'aconsegueix una major reducció de la reflectància per a un interval més gran de longitud d'ona. Per exemple, una d'aquestes disposicions de reflectància nul·la per a un substrat de vidre ( $n=1.5$ ) i  $L=550\text{nm}$  és la de realitzar una primera capa de  $\text{TiO}_2$  (24nm) i una segona capa de  $\text{MgF}_2$  (180 nm).

El que s'ha fet per tal d'aconseguir-ho és jugar amb altres materials i amb altres gruixos fins a obtenir  $R=0$ , almenys per a una longitud d'ona. Tanmateix, tal com ho mostra la figura 8, l'efecte conjunt a tot l'espectre visible no difereix molt del que s'aconsegueix amb una monocapa antireflectora de  $\text{MgF}_2$ . En vidre mineral el millor és, doncs, anar directament a tres o més capes.

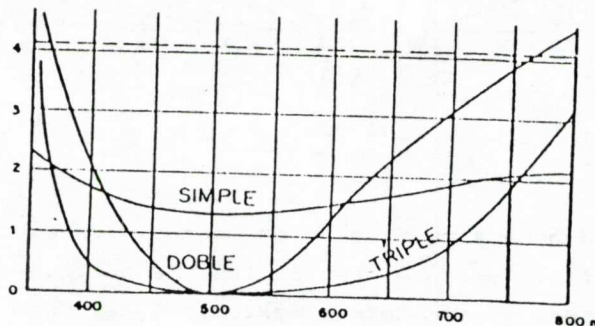


FIGURA 8

D'altra banda, la doble capa és especialment efectiva sobre vidre orgànic, CR39 ( $n=1.48$ ), combinant, per exemple, una capa L/4 de fluorur de ceri ( $n=1.7$ ) amb un altra L/4 del  $MgF_2$  ( $n=1.38$ ). La figura 9 en mostra el resultat.

Els revestiments de dues capes són molt utilitzats en aplicacions làser, ja que, en aquest cas, la radiació és quasi-monocromàtica. Pot assolir-se el 0.25 % de reflectància o menys per a una longitud d'ona específica.

#### MULTICAPES ANTIREFLECTORES

Amb elles l'interval de longituds d'ona en el qual es produeix baixa reflectivitat es podrà estendre pràcticament a tot el visible, en el cas de vidres òptics. En aquest cas, i en el de tres capes, la disposició més adient de gruixos òptics és L/4, L/2, L/4.

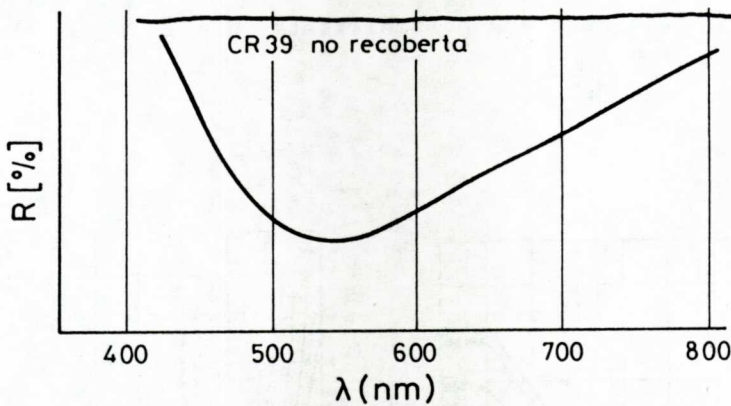


FIGURA 9

Per exemple, per a un substrat de vidre ( $n_s=1.51$ ) l'última capa ha d'ésser d'un material de menor índex de refracció. Si s'escull per exemple el  $MgF_2$  amb  $n_v=1.38$ , per a complir la condició teòrica de mínima reflectivitat ( $n_s^2 \cdot n_v = n_i^2 \cdot n_o$ ), la

primera capa d'índex  $n_1$  ha d'ésser igual a 1.7. Per tant, el fluorur de ceri és el més adequat per a això. L'índex de refracció de la capa intermèdia és el grau de llibertat de què hom disposa per a fer més o menys ampli l'interval espectral de baixa reflectivitat. Un material adient per a això podria ésser el  $\text{SiO}_2$ , d'índex de refracció alt ( $n_e = 2.1$ ). Un resultat possible el dona la figura 8.

Les figures 10, 11 i 12 ens mostren els canvis que es produeixen en la reflectivitat espectral quan es varia succesivament l'índex de cada capa.

Si a més a més es variesin els gruixos, el nombre de configuracions possibles es multiplicaria.

Només amb l'ajut de la informàtica, sobretot quan el nombre de capes augmenta (pot arribar fins a 100 o més), i a la vista dels materials de què hom disposa, és possible de dissenyar un recobriment multicapa amb possibilitats d'èxit industrial i comercial.

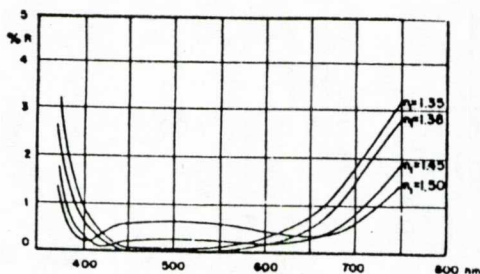


FIGURA 10

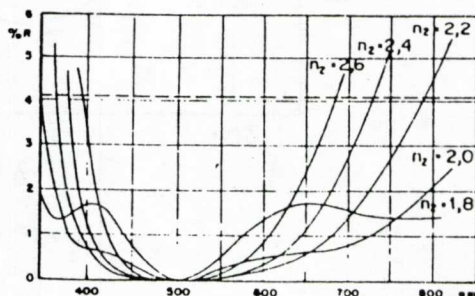


FIGURA 11



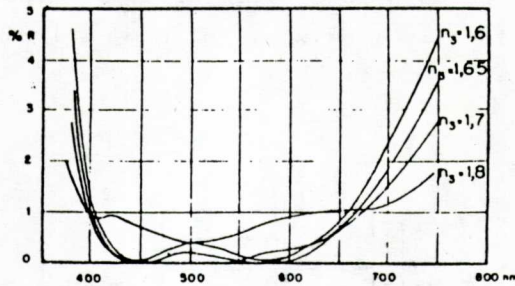


FIGURA 12

Cada indústria òptica té la seva pròpia disposició de capes i materials, i en general, uns recobriments dels altres es diferencien més en les característiques mecàniques i químiques (dureza, adherència, resistència a l'ús, etc.) que en les pròpiament òptiques. És pràctica comuna, tanmateix, que les multicapes siguin un apilament alternant de capes primes ( $L/4$ , i/o  $L/2$ ) d'alt i baix índex de refracció, que acostumen a designar-se de la forma:

$$\underline{v}LHL \dots \dots HLa$$

H és el material amb l'índex de refracció alt, L el que el té més baix, v el substrat si aquest és vidre i a l'aire. Com a materials H s'acostumen a utilitzar, a més del  $\text{SiO}_2$  ( $n=2.1$ ), l'òxid de titani ( $n=2.4$ ), el sulfur de zinc ( $n=2.32$ ), l'òxid de zirconi, l'òxid de praseodimi, etc.

Com a materials L, els esmentats  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LaF}$ , etc.

#### RECOBRIMENTS DIELÈCTRICS D'ALTA REFLECTIVITAT

Més enllà de l'aconseguit pels recobriments metàl·lics, poden assolir-se recobriments de molt alta reflectància (fins a 99.99 %), com els que hi ha a les finestres dels làsers, i als filtres interferencials, a base de dispositius no absorbents, amb

les capes primes de materials dielèctrics transparents alternant índexs de refracció alts i baixos, tal com s'indica a la figura 13.

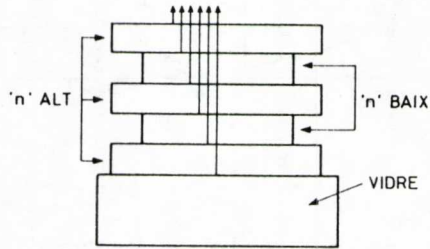


FIGURA 13

Tot això dipositat sobre vidre, metall o semiconductor.

Un sistema d'alta reflectància s'obté amb un apilament de gruixos òptics idèntics ( $L/4$ ).

La figura 14 il.lustra la forma general, a certa regió espectral, de la reflectància d'un dispositiu multicapa.

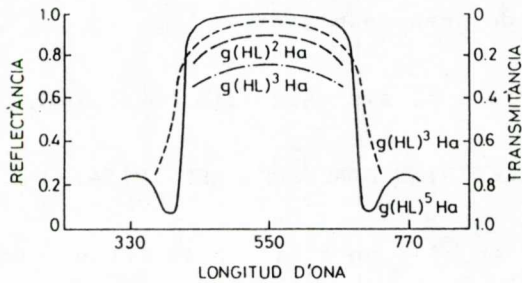


FIGURA 14

L'amplada de la zona central d'alta reflectància augmenta amb un increment dels valors-índexs en la proporció  $n_H/n_L$  mentre la seva alçària augmenta amb el nombre de capes. La taula següent mostra l'increment de la reflectància amb el nombre de capes:

<u>NOMBRE DE CAPES</u>	<u>REFLECTÀNCIA</u>
3	70 %
5	89 %
7	96 %
9	98.8 %
11	99.6 %

(L'alumini té una reflectància màxima inferior al 90 %)

#### MIRALLS DICROICS

Els miralls o separadors de feix dicroics divideixen el feix lluminós espectralment de manera que transmeten certes longituds d'ona i en reflecteixen d'altres. Els exemples més característics són els miralls que reflecteixen la radiació visible i transmeten l'infraroig (miralls freds) i a l'inrevés, els que transmeten la radiació visible i reflecteixen la infraroja (miralls calents).

Els separadors de feix dicroics són essencialment apilaments de capes amb gruixos de  $L/4$  amb una capa inicial i final  $L/8$ .

A la figura 14, per a suprimir els màxims a la banda de les longituds d'ona curtes, la sèrie de capes ha de tenir la forma:

Vidre (0.5L)HLH .....H(0.5L) aire

Per a suprimir els màxims de les longituds d'ona llargues, l'estructura del dipòsit té la forma:

Vidre (0.5H)LH .....H(0.5H) aire

Poden així construir-se filtres interferencials de pas baix i alt (figures 15 i 16).

Per a incidència no normal, fins a  $30^\circ$ , existeix sovint poca degradació en la resposta dels recobriments múltiples de capes primes. En general, l'efecte d'augmentar l'angle d'incidència equival a un desplaçament lleuger fins a les longituds d'ona curtes de tota la corba de reflectància. Aquest tipus de comportament ja es palesa en diverses estructures periòdiques que es troben a la natura, per exemple les plomes dels lloros i dels colibrís, les ales de papallones, així com el llom d'algunes varietats d'escarabats.

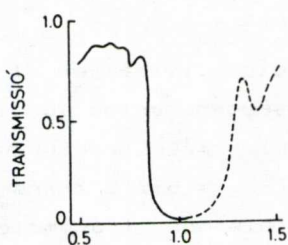


FIGURA 15

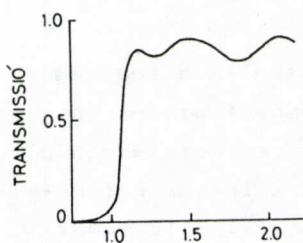


FIGURA 16

Una propietat molt valuosa dels recobriments multicapa és llur versatilitat espectral. Un cop aconseguida una disposició de pel·lícules primes per a obtenir una certa característica de reflexió-transmissió, l'interval espectral de treball pot desplaçar-se a una altra regió de l'espectre si hom fa variar, simplement i proporcionalment, el gruix de totes les capes, i això és limitat solament per les característiques d'absorció dels substrats i dels materials que constitueixen les pel·lícules primes.

La figura 17 és un diafragma segmentat que il·lustra l'ús d'un mirall fred en combinació amb un reflector calent per a canalitzar radiació infraroja a la part posterior d'un projec-

tor de pel·lícules. La radiació infraroja (IR) tan intensa i indesitjable, emesa per la font, és eliminada del feix per a evitar problemes d'escalfament sobre la pel·lícula fotogràfica. La meitat superior de la figura 16 és un mirall ordinari argentat en la part posterior i que es mostra com a comparació.

Les cèl·lules solars, que són una de les principals fonts d'energia dels vehicles espacials i àdhuc dels cascs i dels visors dels astronautes, estan blindades amb cobertes semblants de control de calor.

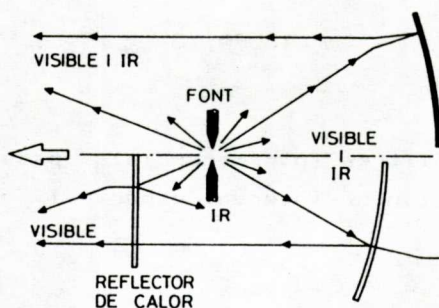


FIGURA 17

De forma similar hom pot obtenir un separador de feix polaritzat. La diferència respecte als dispositius multicapes anteriors és que, al principi i al final de l'apilament de capes, es troba el mirall. Per tant, l'estructura d'un d'aquests recobriments multicapa és:

Vidre (0,5H)LH.....(0,5H) vidre.

En ells H i L són pel·lícules  $L/4$  i hom ha de treballar amb un angle d'incidència de  $45^\circ$  (figura 18).

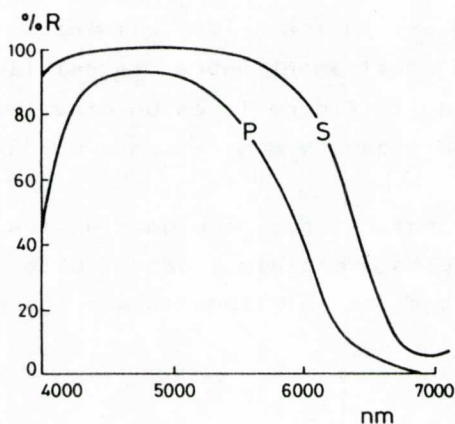


FIGURA 18

RECOBRIMENTS MIXTOS

Poden fer-se filtres interferencials passa-banda, amples o estrets, que transmeten un interval espectral específic (figures 19 i 20).

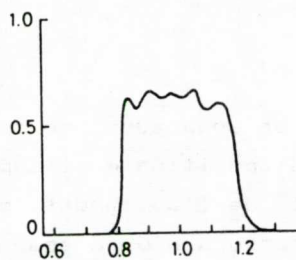


FIGURA 19

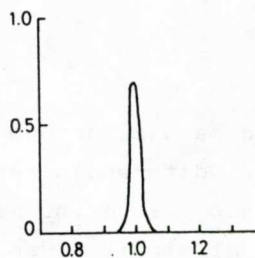


FIGURA 20

En el visible, per exemple, tenen un paper important en la divisió de la imatge a les cambres de televisió en colors, mentre que a l'infraroig s'utilitzen per a sistemes de guies de projectils, làsers de CO<sub>2</sub> i sensors d'horitzó en els satèl·lits.

Aquests dispositius poden fabricar-se dipositant pel·lícules metàl·liques semitransparents (generalment d'argent) alternant

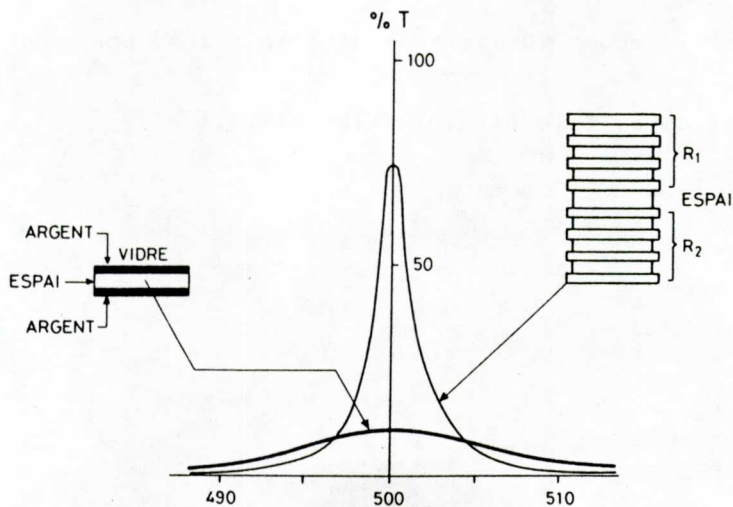


FIGURA 21

amb capes primes dielèctriques de  $MgF_2$  o  $SZn$  de gruix òptic  $L/2$  a la longitud d'ona per a la qual es vol optimitzar el filtre. És com un interferòmetre Fabry-Perot múltiple (figura 21).

Poden aconseguir-se així filtres interferencials de banda estreta amb una banda de transmissió d'amplària inferior a 5 nm.

Amb l'argent ( $R = 94\%$ ) la transmissió acostuma a ésser molt reduïda. Aquesta limitació pot salvar-se emprant, en comptes d'argent, capes dielèctriques d'alt poder reflector. D'aquesta manera es poden obtenir pics de transmissió del 50 % o més.

BIBLIOGRAFIA.

HEAVENS O.S.: "Optical properties of thin solid films". Butterworths, Scientifics publications. 1955.

HOLLAND L.: "Vacuum Deposition of thin films" Chapman & Hall. 1963.

KNITTL: "Optics of thin films". Wiley. 1976.