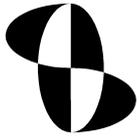


*DISPENSE DI*

PROGETTAZIONE OTTICA  
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.10 – COATING E FILTRAGGI

Ing. Fabrizio Liberati



## Cap. 10 COATING E FILTRAGGI

### 10.1 Riflessione di Fresnel

Ogni volta che la luce passa da un mezzo ad un altro ad indice di rifrazione diverso, una parte dell'energia luminosa è trasmessa e una parte è riflessa dalla superficie di separazione. La percentuale di luce riflessa è governata dalle *leggi di Fresnel* e dipende dai due indici di rifrazione, dall'angolo di incidenza e, per incidenze non ortogonali, dallo stato di polarizzazione della radiazione. In un sistema diottrico le perdite per singola rifrazione possono rappresentare una piccola percentuale della quantità di luce proveniente dall'oggetto, ma vanno eliminate in quanto si possono accumulare rapidamente e possono dar luogo per riflessioni multiple a perdite di contrasto e a immagini fantasma.

I *trattamenti a film sottile* (o *coating*) sono delle deposizioni superficiali che hanno lo scopo di ridurre la percentuale di luce riflessa dalla superficie di separazione (*anti-reflection coating*), o, se richiesto, di ottenere i comportamenti delle superfici più diversi come riflessione e trasmissione in termini di divisione percentuale, spettrale o per polarizzazione. I tipi di rivestimento più diffusi sono gli antiriflesso (a singola lunghezza d'onda o "*V*" *coating*, a doppia lunghezza d'onda o "*W*" *coating*, a larga banda), gli specchi metallici (deposizioni di alluminio, argento, oro, cromo o altro), specchi dielettrici ed ibridi, i trattamenti semiriflettenti (*beamsplitter*), o a riflettività variabile in funzione della lunghezza d'onda (*dicroici*) o della polarizzazione.

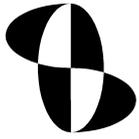
Per raggiungere i risultati richiesti si sono sviluppate una particolare disciplina ed una tecnologia: riuscire ad ottimizzare trattamenti in diverse condizioni di lavoro implica il dover ricorrere a deposizioni costituite in alcuni casi da parecchie decine di strati di materiali dielettrici.

Il progettista di coating ha a disposizione programmi di calcolo che, in modo analogo a quanto avviene per la progettazione dei sistemi ottici, consentono di ottenere la sequenza strati da depositare, in termini di spessori di materiali diversi. Sebbene la tecnologia sia consolidata, tanto che sono disponibili rivestimenti con materiali stabili e resistenti quasi a ogni tipo di attacco chimico e meccanico, questa disciplina è in continua evoluzione e miglioramento per aspetti quali l'uniformità di comportamento, l'assenza di impurità, la resistenza agli stress meccanici o termici o ad elevate densità di potenza laser. Per migliorare queste prestazioni di tipo non ottico, si dovrebbero utilizzare strati sottili, materiali resilienti e poco assorbenti. In principio, la superficie di qualsiasi elemento ottico può essere rivestita con materiali metallici o dielettrici.

### 10.2 Leggi di Fresnel

Le leggi di Fresnel forniscono le relazioni di ampiezza e di fase tra la luce incidente e riflessa dalla superficie di separazione tra due mezzi. Considerando separatamente le due componenti di polarizzazione, cioè la componente "p" parallela al piano di incidenza e la "s" ortogonale, le due riflettività si possono scrivere in questa forma:

$$r_s = \left[ \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \right]^2$$



(10.1)

$$r_p = \left[ \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)} \right]^2$$

ove  $i$  ed  $r$  sono gli angoli di incidenza e di rifrazione, legati tramite gli indici di rifrazione dalla seconda legge di Snell. Le riflettività sono intensità, pari perciò al quadrato dell'ampiezza.

Il valore limite per l'angolo di incidenza  $i$  tendente a zero naturalmente è comune alle due riflessioni e vale:

(10.2)

$$r = a^2 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Dalla formula precedente si vede come la percentuale di luce riflessa all'interfaccia tra aria e un vetro privo di deposizioni cresca con l'indice di rifrazione e vale il 4% della radiazione incidente per  $n = 1.5$ . Questo valore resta pressoché costante fino ad angoli di incidenza di  $25 \div 30^\circ$ , poi  $r_s$  cresce monotonamente sino al 100%, mentre  $r_p$  prima decresce sino a 0, poi cresce anche esso sino al 100%. In un sistema ottico costituito da 5 elementi (10 superfici) con indice di rifrazione 1.5 privi di trattamenti antiriflesso, le perdite per riflessione sono un terzo dell'energia iniziale, mentre sono pari alla metà per  $n = 1.7$ .

Dalla seconda delle 10.1 si vede che esiste una condizione per cui  $(i+r) = 90^\circ$  che annulla  $r_p$ , cioè per la quale la radiazione riflessa è polarizzata linearmente con piano di polarizzazione ortogonale al piano di incidenza.

Se la luce viaggia dal mezzo ad indice di rifrazione minore a quello con indice maggiore, (*riflessione esterna*), l'angolo per cui si verifica questa condizione vale:

$$i_B = \arctan(n_2/n_1) \quad (10.3)$$

$i_B$  è detto *angolo di Brewster* e vale  $56^\circ 18'$  per  $n_2 = 1.5$  ed  $n_1 = 1$ , dato che  $\tan(56^\circ 18') = 1.5$ , mentre  $r_p$  vale il 14.8%. Se la luce viaggia dal mezzo ad indice di rifrazione maggiore a quello con indice minore (*riflessione interna*),  $r_B$  è il complementare di  $i_B$  e vale  $33^\circ 42'$ . Questo fenomeno si sfrutta spesso per ottenere un polarizzatore privo di assorbimenti e a basso costo, come indicato in figura 10.1: la luce riflessa sarà polarizzata "s" e sarà priva della componente "p".

La figura 10.2 riporta in funzione dell'angolo di incidenza l'andamento della riflessione delle due componenti di polarizzazione per  $n = 1.52$ . Si vede come per angoli di incidenza di poche decine di gradi non vi sia differenza tra le due componenti di polarizzazione, mentre per angoli superiori il comportamento differisca notevolmente.

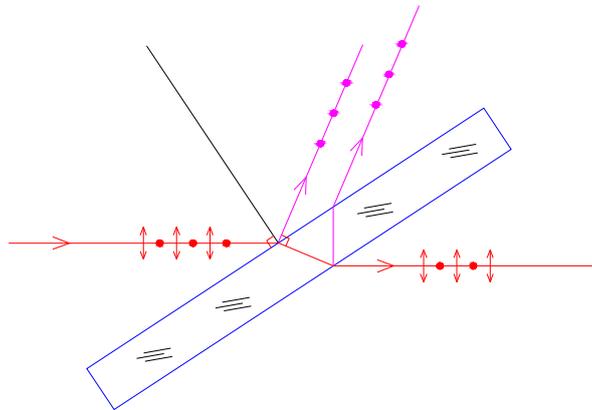


figura 10.1

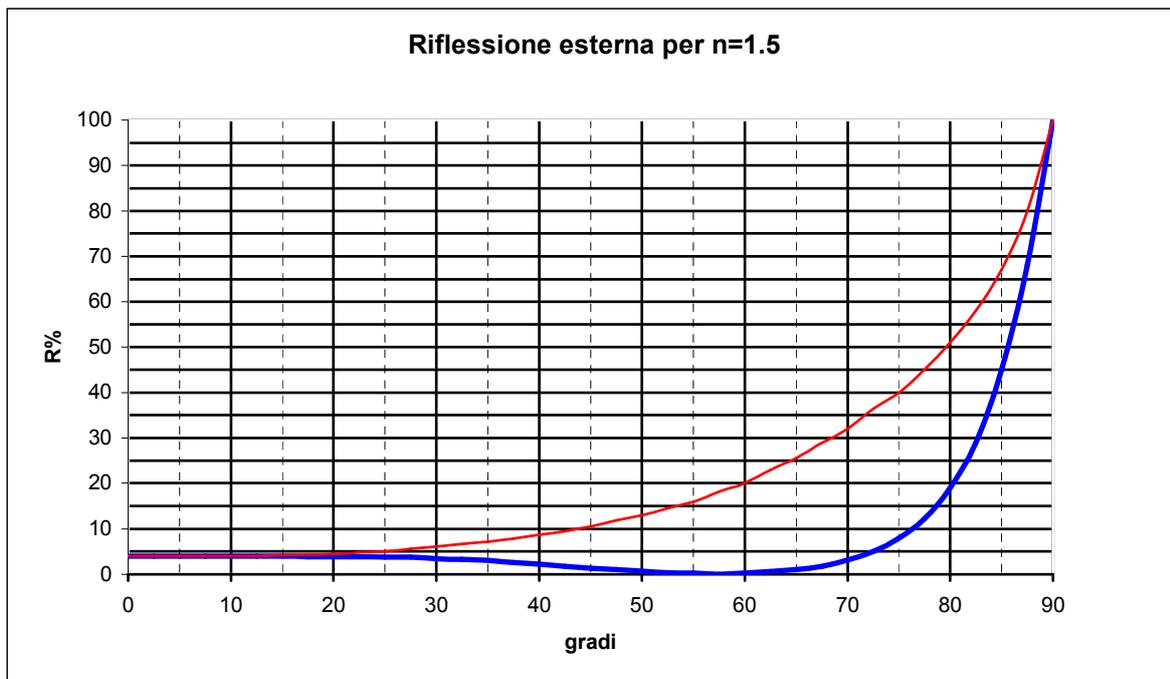
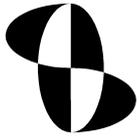


figura 10.2

Nelle riflessioni esterne le radiazioni subiscono uno sfasamento di  $180^\circ$  che non avviene nella riflessione interna, ad eccezione della *riflessione interna totale*. Questa si verifica quando l'angolo di incidenza supera il valore per cui la rifrazione sarebbe radente (*angolo critico*) ed in queste condizioni la superficie di interfaccia si comporta come uno specchio perfetto.



### 10.3 Interferenza e film sottili

I trattamenti a film sottile si basano sul fenomeno dell'interferenza delle onde elettromagnetiche. Come noto, radiazioni monocromatiche che si propagano in fase tra loro danno luogo ad interferenza costruttiva e sommano le loro ampiezze, mentre radiazioni in opposizione di fase le sottraggono. Per fasi generiche occorre considerare il vettore risultante. Se la radiazione emessa da un'unica sorgente è divisa in due fronti d'onda di pari intensità e poi ricombinata, l'effetto finale sarà un'interferenza distruttiva se la differenza di cammino ottico è un numero intero di mezze lunghezze d'onda. Questa è la condizione che si cerca di riprodurre nei trattamenti anti riflesso. Quando un raggio di luce è incidente su un film sottile a singolo strato (*monostrato*), parte della luce sarà riflessa alla superficie anteriore, parte dalla posteriore e, trascurando le riflessioni multiple e gli assorbimenti, parte sarà trasmessa. I due fronti d'onda riflessi possono interferire tra loro in funzione del *cammino ottico* nel materiale costituente il film sottile, della lunghezza d'onda e degli indici di rifrazione. Il cammino ottico  $D$  è definito come la distanza equivalente nel vuoto che la luce può percorrere nello stesso intervallo di tempo, cioè, se  $d$  è lo spessore fisico, per incidenza normale è  $D = d \cdot n$ . Il fronte d'onda riflesso dalla superficie posteriore percorre due volte il film sottile, pertanto la differenza di cammino ottico tra i due riflessi sarà pari a  $2D$ .

Se le due riflessioni sono di ampiezza uguale e  $2D$  è un numero intero di mezze lunghezze d'onda, i due riflessi si elidono e, per il principio di conservazione dell'energia, in assenza di assorbimento tutta la radiazione sarà trasmessa.

Per quanto detto, il trattamento monostrato sembra funzionare bene, ma in pratica si usa solo per i trattamenti antiriflettenti meno esigenti. Il primo motivo è che per ottenere due fronti d'onda riflessi della stessa intensità in un'interfaccia vetro aria occorre un materiale il cui indice di rifrazione  $n_{\text{coating}}$  si dimostra dover essere pari a:

$$n_{\text{coating}} = (n_{\text{vetro}})^{0.5} \quad (10.4)$$

Materiali con indici di rifrazione così bassi ( $n_{\text{coating}} = 1.225$  per  $n_{\text{vetro}} = 1.5$ ) e caratteristiche tali da poter essere utilizzati non sono disponibili. Il secondo motivo è che la larga spettrale non può essere molto larga. Perché si realizzi la condizione di interferenza distruttiva occorre che differenza di cammino ottico  $2D$  sia pari a  $\lambda/2$ , cioè  $d \cdot n = \lambda/4$ , ma a parità di spessore fisico della deposizione questo non può verificarsi per sistemi a larga banda spettrale: teniamo presente che gli strumenti funzionanti nel visibile utilizzano quasi un'ottava di spettro e pertanto un certo cammino ottico potrebbe dare interferenza distruttiva ad una certa lunghezza d'onda e costruttiva ad un'altra. Occorre ricordare che anche i materiali depositati hanno una loro dispersione, e cioè l'indice di rifrazione varia con la lunghezza d'onda. La differenza di cammino ottico tra le due riflessioni si riduce al crescere dell'angolo di incidenza, e con essa si riduce la differenza di fase. Pertanto l'andamento spettrale del coating al crescere dell'angolo si sposta verso lunghezze d'onda più brevi e, tanto più è alto il numero di strati, modifica il suo profilo.

Generalmente per il monostrato si usa il fluoruro di magnesio ( $\text{MgF}_2$ ), che ha un indice di rifrazione pari circa a 1.38 e risulta molto stabile ed affidabile. Se si applica ad un

vetro di indice 1.5 uno strato ottimale per la banda visibile, si ottiene una riflessione di poco superiore all'1% a 550nm e di circa il 2% a 400 e 700nm. L'andamento spettrale per incidenza normale è mostrato in figura 10.3. Il trattamento antiriflettente monostrato è più efficiente per vetri ad alto indice di rifrazione in quanto il valore dell'indice di rifrazione del fluoruro di magnesio si avvicina a quello richiesto dalla teoria. Il vantaggio di questo trattamento è che, a differenza di coating più complessi, la riflettività non varia molto con l'angolo di incidenza; inoltre lo spessore, e quindi il processo, è poco critico e, a dispetto del guadagno relativamente modesto in termini energetici, lo strato di deposizione risulta utile anche ad evitare ossidazioni, attacchi da agenti acidi o alcalini in vetri particolarmente sensibili.

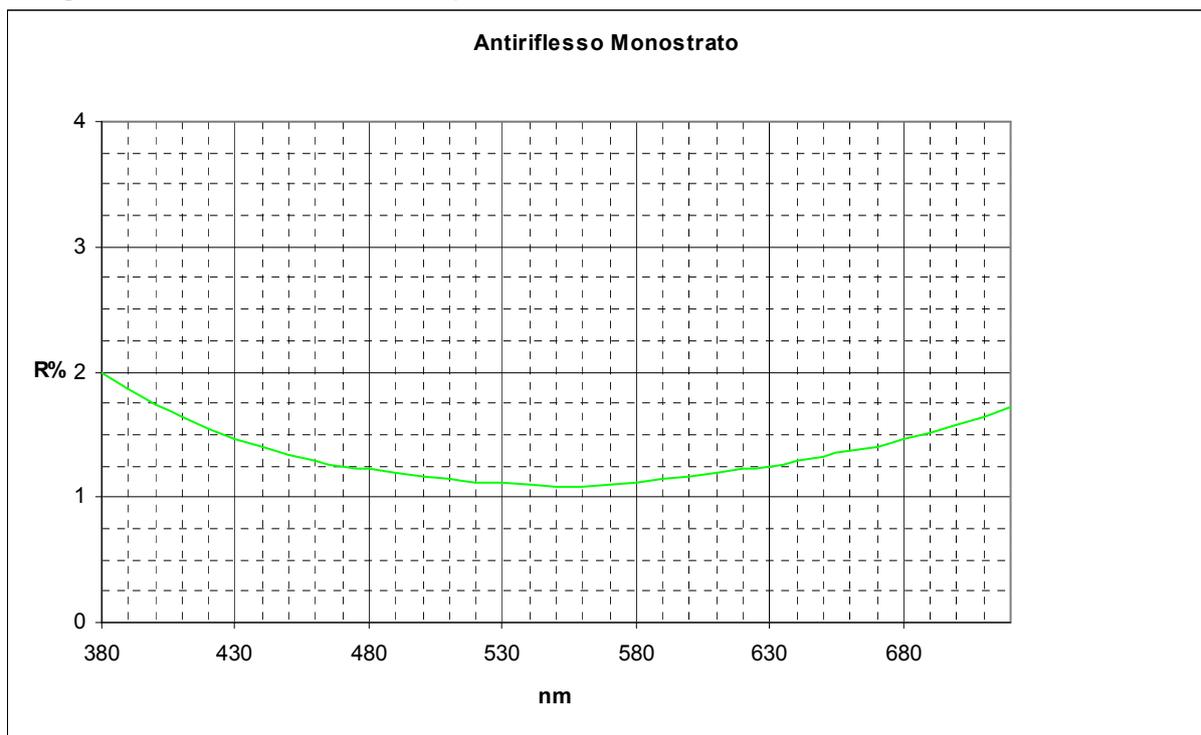
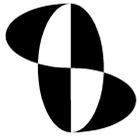


figura 10.3

La deposizione degli strati viene fatta sotto vuoto per evitare che l'aria, i vapori e quanto presente nell'ambiente modificare in modo imprevedibile la purezza del materiale depositato e con essa il suo l'indice di rifrazione.

Piuttosto che cercare l'indice di rifrazione che consente di ottenere il comportamento voluto, il lavoro del progettista di coating consiste nel trovare, a partire da un certo numero di materiali disponibili, gli spessori e la sequenza di deposizione che consentano prestazioni migliori. Per ridurre la riflettività residua ad una certa lunghezza d'onda, si utilizza tipicamente il "V" coating, consistente in due strati di indice di rifrazione 1.38 e 1.70 (ossido di berillio o di magnesio) il cui spessore ottico è di  $\lambda/4$ . Questa sequenza (mostrata schematicamente in figura 10.4, in cui il raggio incidente è stato inclinato di un piccolo angolo per comodità di lettura), dà luogo a tre riflessioni di cui solo le prime due, in quanto esterne, avvengono con uno spostamento di fase di  $\pi/2$ , mentre la terza è in fase con la seconda. Se il vetro ha



**OPTO SERVICE srl**

indice di rifrazione 1.52, le tre ampiezze valgono rispettivamente 0.1597, 0.1039 e 0.0559, dando luogo, teoricamente, ad una riflettività residua praticamente nulla. Questo genere di coating si usa spesso per componenti funzionanti ad una unica lunghezza d'onda, come i sistemi laser. Da questo esempio si vede la potenzialità dei trattamenti dielettrici. Il "V" coating si usa spesso per componenti funzionanti ad una unica lunghezza d'onda, come quelli per radiazione laser. In questo caso, specialmente se il laser è di elevata potenza, i materiali utilizzati devono essere assolutamente trasparenti alla lunghezza d'onda di funzionamento e occorre una cura particolare nella pulizia dei componenti prima del trattamento.

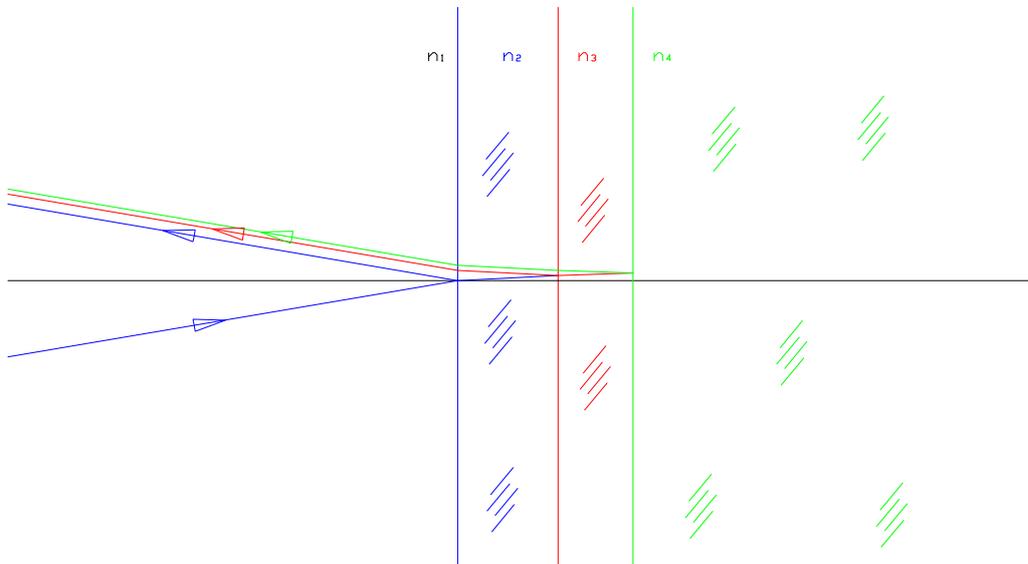


figura 10.4

Il trattamento *larga banda visibile* consiste nella deposizione di tre strati, ed è quindi quello subito seguente in ordine di difficoltà. Consente di ottenere valori di riflettanza residua media inferiore allo 0.4% nella banda 400÷700nm ed inferiori al 0.25% nella banda 450÷650nm, ove maggiore è la sensibilità dell'occhio. E' sicuramente il coating più diffuso, in quanto viene utilizzato in pratica su tutti i componenti dei sistemi ottici funzionanti in banda visibile. Fornisce prestazioni molto buone in termini di resistenza a sollecitazioni termiche e meccaniche ed una discreta stabilità in funzione dell'angolo di incidenza. In figura 10.5 ne è mostrato l'andamento spettrale per incidenza ortogonale alla superficie su cui è depositato (curva blu) e per un angolo di 30° (curva magenta).

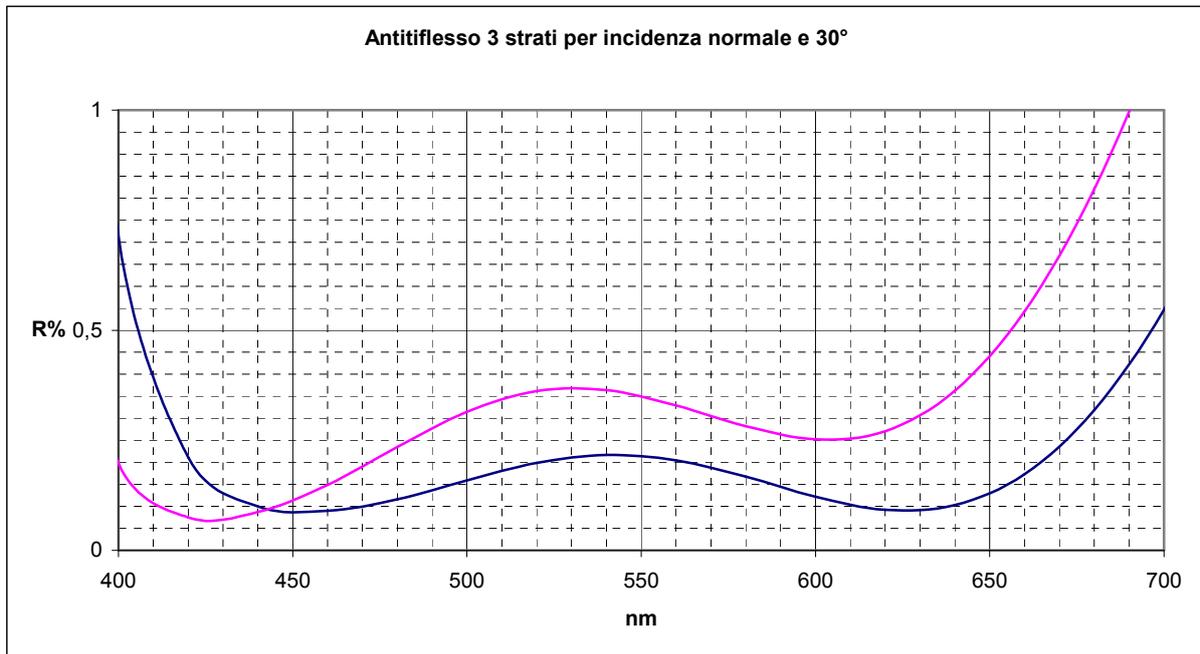
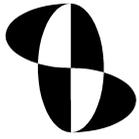


figura 10.5

Aumentando il numero degli strati di cammino ottico  $\lambda/4$  ed eventualmente  $\lambda/2$  ed alternando materiali ad alto (H high) e basso (L low) indice di rifrazione, si riescono ad ottenere andamenti spettrali che soddisfano le esigenze più particolari: In figura 10.6 è mostrato un *filtro dicroico*, ottenuto con alcune decine di strati alternati. I trattamenti dicroici forniscono trasmissione e riflessione diverse in funzione della lunghezza d'onda: quello mostrato trasmette la radiazione visibile e riflette il vicino infrarosso. La parte visibile dello spettro è trasmesso per il 90% circa, cioè con le stesse perdite che si avrebbero per un componente privo di coating, mentre la radiazione infrarossa trasmessa è ridotta a poche unità percento di quella incidente. Altri tipi di trattamenti realizzabili sono i "*W*" *coating*, in cui la riflettività è minimizzata per due lunghezze d'onda (come nel caso di componenti per due righe spettrali di emissione laser) o per una lunghezza d'onda ed una banda (come nel caso di componenti utilizzati nel visibile e per un laser nell'infrarosso), gli *specchi dielettrici* o filtri spettrali particolari quali i *passabanda* o altri. Gli specchi dielettrici, in particolare, ottenuti cercando di mettere in fase le riflessioni dalle interfacce dei singoli strati, possono mostrare rispetto ai metallici una migliore riflettanza nella banda spettrale per cui sono progettati. Inoltre presentano migliori caratteristiche meccaniche quali resistenza all'abrasione e all'adesione e, a differenza dei metalli, non assorbono la radiazione incidente: per questo motivo sono gli unici utilizzati nei laser di potenza.

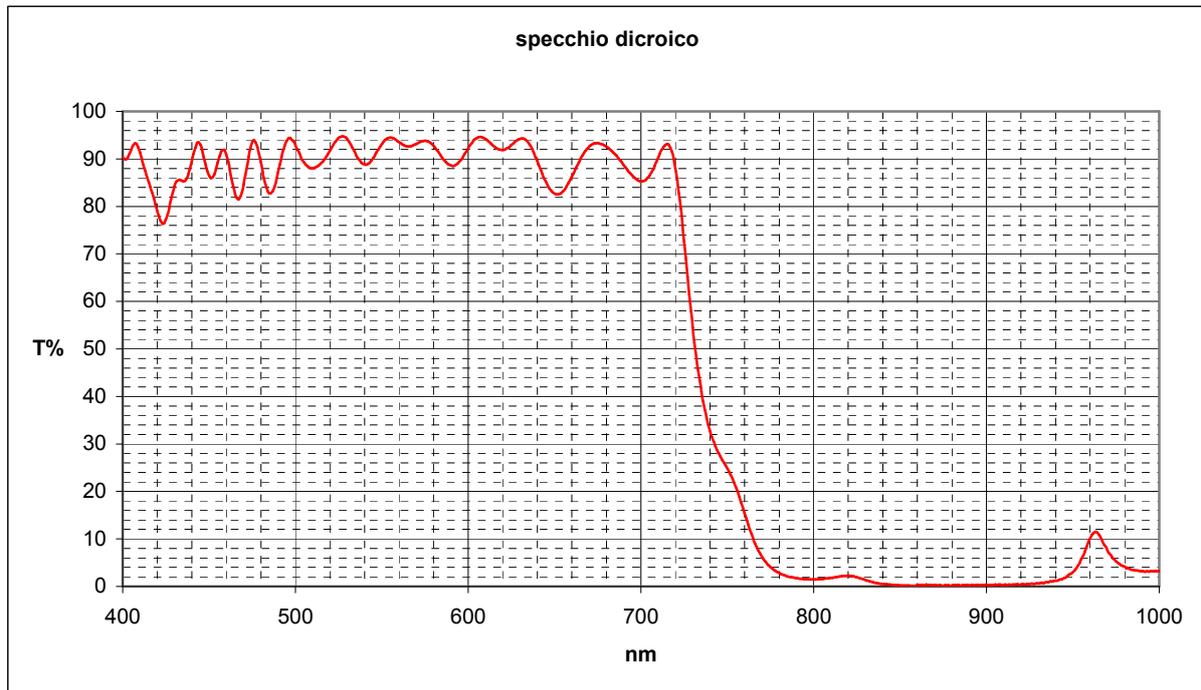


figura 10.6

In maniera analoga si possono ottenere trattamenti che entro una banda spettrale relativamente stretta e per un intervallo angolare definito trasmettono una polarizzazione (generalmente la p) e riflettono l'altra.

La figura 10.7 mostra sullo stesso diagramma il comportamento spettrale di tre filtraggi diversi, atti ad esempio a dividere la luce bianca secondo le sue componenti tricromatiche ovvero a formare un'immagine a colori sovrapponendo tre colori primari.

Un discorso a parte va fatto per i *filtri interferenziali*. Questi consistono in filtri passa banda la cui larghezza (normalmente si considera la larghezza a metà altezza o FWHM *full width half maximum*) può arrivare al di sotto di un nanometro. Vengono utilizzati quando si vuole trasmettere una piccola banda spettrale, come nel caso della rilevazione di luce laser, assorbendo o riflettendo il resto dello spettro cui è sensibile il sistema di rilevazione. Sono costituiti da un numero più o meno elevato di cavità, ciascuna delle quali è un interferometro Fabry-Perot, e da vetri colorati filtri con funzioni di assorbimento per eliminare la periodicità che altrimenti il filtro avrebbe. All'aumentare del numero di cavità si riducono la larghezza del filtro e la trasparenza mentre aumenta la criticità con l'angolo di incidenza: perciò la FWHM va scelta a livello di sistema.

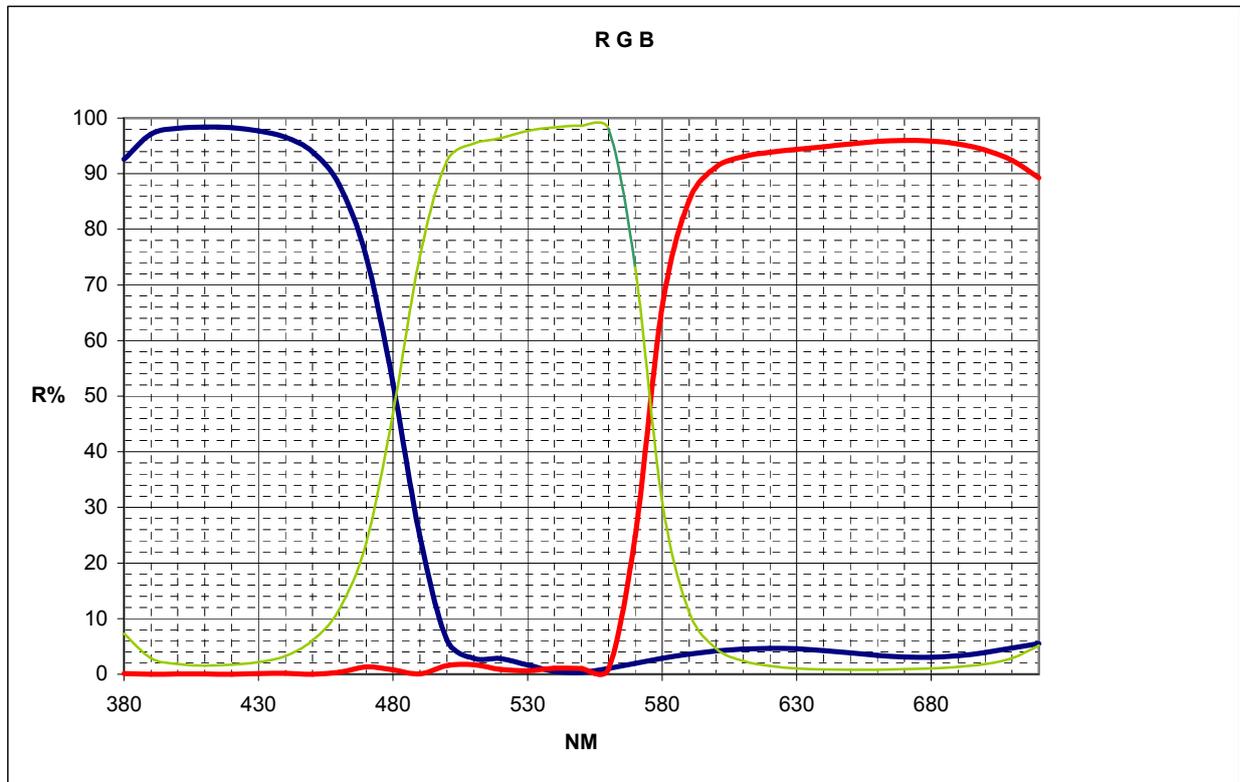
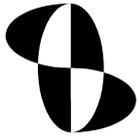


figura 10.7

#### 10.4 Metallizzazioni

I rivestimenti metallici (alluminature, argentature, dorature e altre) sono usati come specchi e non si basano sull'interferenza, ma piuttosto sulle proprietà ottiche del materiale. Spesso il metallo depositato è rivestito a sua volta da film dielettrici per aumentare la riflettività in una banda ristretta o per particolari angoli di incidenza (trattamento *enhanced*). Se invece si vuole proteggere o aumentare la durezza, la metallizzazione viene ricoperta da un singolo strato dielettrico di spessore ottico  $\lambda/2$ , di solito  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Si}_2\text{O}_3$  o altri, che non ha influenza da un punto di vista ottico. In figura 10.8 è mostrata la curva di riflettività a  $45^\circ$  per alcune metallizzazioni protette.

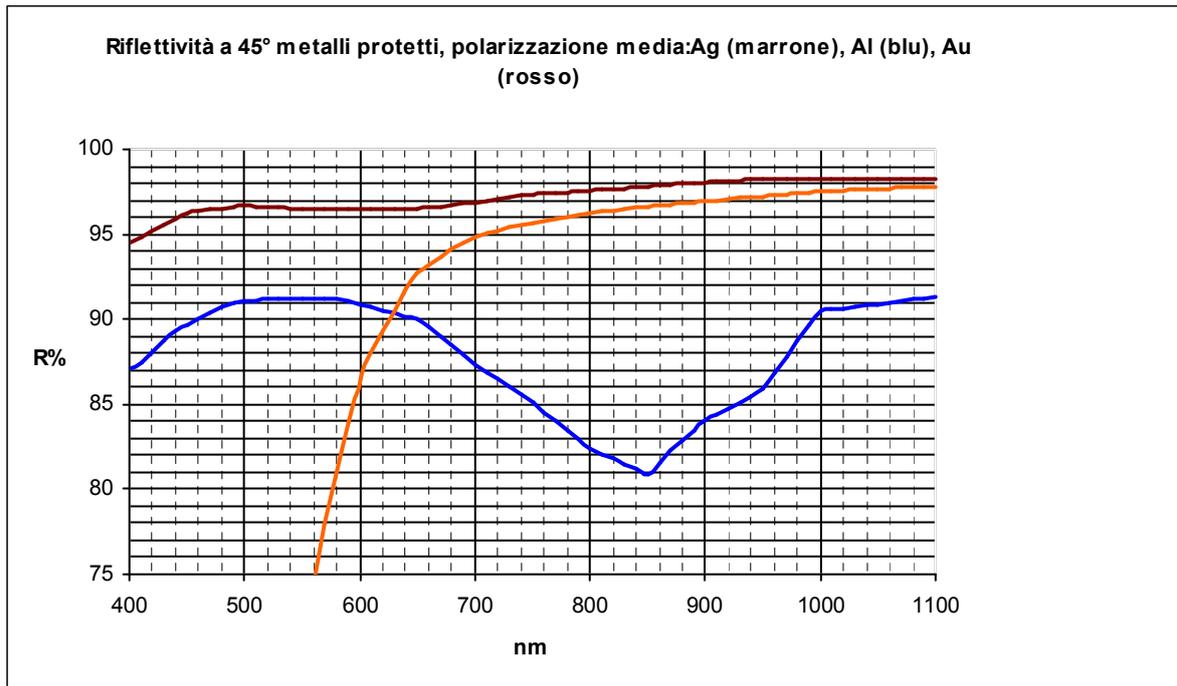
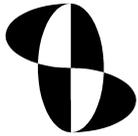


Figura 10.8

### 10.5 Tecnologie di deposizione

Per evitare contaminazione ed assicurare qualità e ripetibilità, i componenti puliti sono inseriti in un recipiente in cui si effettua il vuoto.

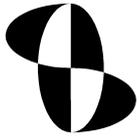
#### *Evaporazione termica*

L'evaporazione è il sistema di deposizione più utilizzato, particolarmente adatto ai materiali da depositare più volatili, e dà risultati di qualità eccellente specialmente se il substrato è a temperatura elevata.

Il materiale da depositare viene posto in un crogiolo metallico che viene attraversato da una corrente di decine di ampere, in modo tale da scaldare il materiale sino a provocarne la fusione e la evaporazione o la sublimazione. Quando il materiale giunge sul substrato condensa per formare il sottile film. I primi trattamenti effettuati con questa tecnologia erano abbastanza teneri in quanto utilizzavano materiali a bassa temperatura di fusione ( $1800 \div 2000^{\circ}\text{C}$ ) e tendevano a deteriorare rapidamente per strofinio o anche durante la pulizia.

#### *Bombardamento elettronico*

Questo metodo consente di vaporizzare materiali con temperatura di fusione molto alta, in grado quindi di formare film resistenti e duraturi. Un flusso di elettroni molto energetico è inviato, eventualmente focalizzato, sul materiale da evaporare provocando un intenso innalzamento localizzato della temperatura. In questo modo l'aumento temperatura del crogiolo è minore anche perché esso è costituito di rame raffreddato tramite un circuito chiuso utilizzando acqua come refrigerante.



**OPTO SERVICE srl**

### *Ion assisted*

Investendo il substrato con un bombardamento ionico da una sorgente secondaria si ottengono deposizioni meno porose, più compatte, meccanicamente più resistenti e ad indice di rifrazione più elevato.

### *Ion plating*

Risultati ancora migliori, specialmente per quanto riguarda la riduzione di scattering, si ottengono per deposizioni in cui nella camera da vuoto si introduce argo ed altri gas che vengono ionizzati insieme al materiale da evaporare. In questo caso il materiale deve essere conduttivo, ad esempio un metallo.

### *Sputtering*

La tecnologia sputtering consente coating in cui il controllo dello spessore è molto accurato e uniforme su superfici molto estese, ma il processo è lento e costoso. Il coating risulta molto resistente e duraturo. Anche di questo esiste, tra le diverse varianti, la versione *ion beam sputtering*, in cui un fascio di ioni di gas inerte viene sparato sul materiale da depositare. Al momento è la tecnologia di deposizione che fornisce i migliori risultati.

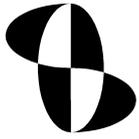
## **10.6 Filtraggi spettrali**

E' possibile modificare uno spettro di radiazione mediante l'interposizione di filtri aventi trasparenza diversa in funzione della lunghezza d'onda. In questo modo si possono ottenere colori diversi a partire dalla stessa sorgente purché abbia una banda spettrale larga. Questo fenomeno è sfruttato in fotografia, nel cinema ed in altri campi. Una recente applicazione del filtraggio spettrale è quella della compatibilità NVG.

### *Compatibilità NVG*

La scena notturna ha un livello di illuminazione che può essere fino a un milione di volte più basso della stessa scena in condizioni diurne. Poiché i velivoli hanno spesso per varie motivazioni (soccorso, ricerca, sorveglianza, missioni militari e di polizia, etc..) la necessità di volare di notte, è nata l'esigenza di consentire al pilota la visione esterna con chiarezza e definizione tali da permettere la navigazione.

Attualmente esistono due tecniche per risolvere il problema: la visualizzazione di un'immagine termica mediante FLIR (Forward-Looking InfraRed) e l'amplificazione della luce notturna mediante particolari dispositivi detti *intensificatori di immagine*" (N.V.G., Night Vision Goggles). Nei sistemi FLIR, che vengono trattati in un'altra sezione del corso, un opportuno sensore rivela la radiazione emessa nell'infrarosso termico dagli oggetti. L'ampiezza di questa radiazione dipende dalla temperatura assoluta e dalla emissività. L'immagine ottenuta è visualizzata attraverso un display di solito montato sull'elmetto del pilota. Tale dispositivo, che ha un costo elevato, necessita di un raffreddamento a temperatura molto bassa e di un'installazione esterna al velivolo, provvista di un brandeggio veloce (velocità dell'ordine di 120°/s e



accelerazioni dell'ordine di  $1000^\circ/s^2$ ) per consentire al pilota una visione della scena sincrona con i movimenti della sua testa.

I sistemi di intensificazione della luce notturna (NVG) rivelano attraverso un fotocatodo la luce riflessa dagli oggetti illuminati dalla luna e dalle stelle. Il segnale elettrico prodotto viene amplificato e trasformato in un'immagine presentata al pilota attraverso uno schermo a fosfori verdi miniaturizzato. Questo dispositivo non necessita di un brandeggio poiché è direttamente montato sull'elmetto, è più economico di un FLIR, ma necessita di un particolare adattamento delle luci interne del velivolo, come verrà descritto in seguito.

Gli NVG amplificano maggiormente proprio la banda dello spettro in cui è contenuta la maggior parte della luce notturna (600÷930 nm). Questa amplificazione però comporta che se le luci interne all'abitacolo del velivolo emettono radiazione nella stessa banda provocano un abbagliamento del pilota in quanto sono molto più intense. Da qui la necessità di filtrare tutte le luci interne al velivolo per eliminare il più possibile la componente del rosso e vicino infrarosso, rendendole quindi come si dice *NVG compatibili*.

Gli intensificatori di immagine di *II generazione* (GEN II) utilizzavano un fotocatodo trialcalino, mentre gli intensificatori di *III generazione* (GEN III), attualmente più diffusi, sono provvisti di un fotocatodo di arseniuro di gallio.

In figura 10.9 sono mostrate simultaneamente le risposte degli intensificatori di II e III generazione (questi ultimi con incluso il filtro rosso *minus blue*, di cui si parlerà meglio in seguito), la curva di sensibilità dell'occhio umano (curva fotopica) e lo spettro della radiazione emessa dal cielo di notte.

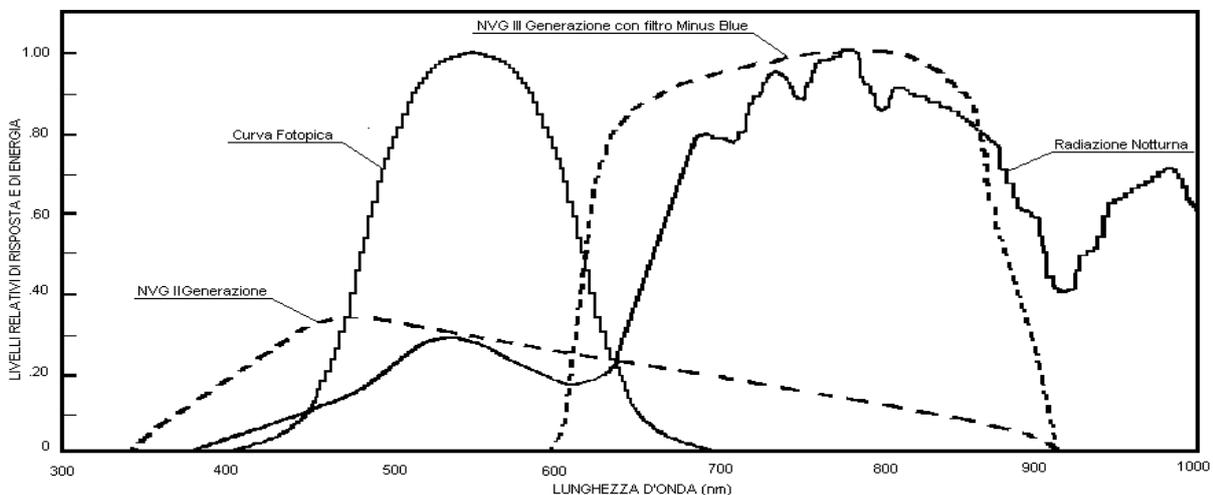
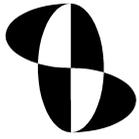


figura 10.9

Come si può vedere, gli intensificatori GEN II hanno un guadagno minore di quelli GEN III nella parte infrarossa dello spettro e quindi una minore efficienza nella visione notturna; inoltre, avendo la massima sensibilità nel visibile, sono incompatibili con le luci dell'abitacolo di un velivolo. Gli intensificatori GEN III per uso avionico sono dotati di un filtro rosso passabanda detto *minus blue*, che consente nell'abitacolo la presenza di luci.



**OPTO SERVICE srl**

La norma MIL-L-85762A codifica gli intensificatori GEN III per classe e tipo, stabilisce il modo per calcolare la radianza pesata (*Radianza NVIS*, Night Vision Imaging System) di cui fissa i limiti in base allo specifico impiego.

Il *tipo* di intensificatore definisce la sua configurazione ottica mentre la *classe* si riferisce al filtro minus blue utilizzato.

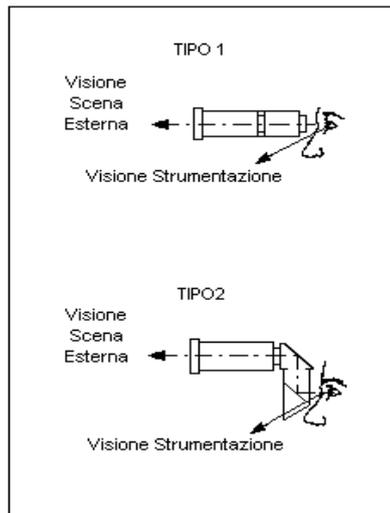


figura 10.10 Tipi di intensificatori

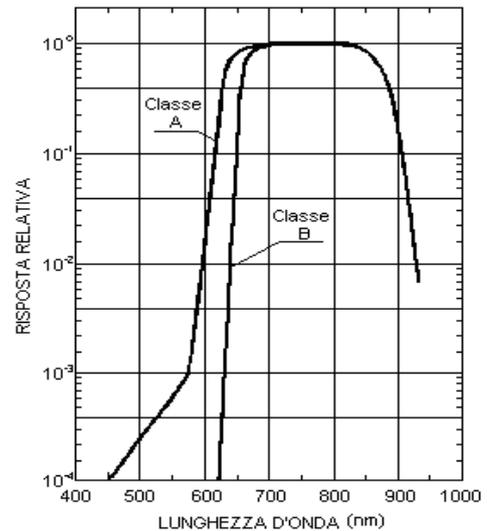


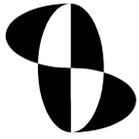
figura 10.11 Classi di intensificatori

Come mostrato in figura 10.10, gli intensificatori di tipo 1 prevedono che il pilota guardi attraverso il fotocatodo per osservare la scena esterna e al di sotto per osservare la strumentazione di bordo. Gli intensificatori di tipo 2, invece, sono provvisti di un sistema ottico attraverso il quale il pilota osserva sia la scena esterna sia la strumentazione di bordo.

Infine la classe può essere A o B a seconda che il filtro rosso abbia la trasparenza del 50% alla lunghezza d'onda di 625 o di 665 nm. Quindi, poiché gli intensificatori di classe A non tagliano l'arancione, hanno una maggiore sensibilità nel rosso, caratteristica che consente di vedere adeguatamente gli oggetti che riflettono nel vicino infrarosso, come alberi o vegetazione in genere. Per contro necessitano di un filtraggio a banda più larga, e perciò più gravoso, delle luci presenti a bordo.

Per individuare il requisito di compatibilità NVG occorre distinguere tra le segnalazioni non critiche e quelle di allarme. Per le prime si prescrive che la radianza NVIS sia tale da renderle visibili con un livello di intensità pari a quello dei tronchi degli alberi. Questi ultimi infatti, avendo una bassa riflettività nella banda di interesse, sono gli oggetti più scuri che un osservatore può riconoscere nella visione attraverso gli intensificatori. Essendo invece necessaria una rapida detezione delle segnalazioni di allarme da parte del pilota concentrato alla guida, per queste è prescritto un livello di radianza NVIS da 300 a 880 volte maggiore delle prime.

La radianza NVIS ( $Rad_{NVIS}$ ) è l'integrale della radianza spettrale della sorgente luminosa pesato con la curva di risposta degli intensificatori applicabili e opportunamente scalata alla luminanza richiesta dal requisito. La misura della



radianza spettrale può essere effettuata al valore di luminanza necessario alla sensibilità dello spettroradiometro.

*Esempio di calcolo del Filtraggio NVG di una sorgente luminosa*

Per affrontare il problema del filtraggio NVG di una sorgente luminosa bisogna innanzitutto misurare la sua radianza e analizzarne lo spettro.

La lunghezza d'onda di 600nm può essere considerata come un valore limite tra la parte dello spettro che va trasmessa e quella che va eliminata. Infatti, come si vede dalla figura 10.8, la banda superiore a 600nm interferisce con la visione attraverso gli intensificatori e contribuisce scarsamente alla luminosità della sorgente.

A causa di questa necessità alcune case produttrici di componenti ottici (Schott, Wamco, Kopp, etc...) hanno messo a catalogo una gamma di materiali che filtrano in maniera più o meno severa la radiazione infrarossa.

A titolo di esempio si vogliono qui mostrare i risultati di un filtraggio NVG della luce emessa dal Tubo a Raggi Catodici (CRT) di un Head Up Display (HUD). L'HUD, che sarà trattato in dettaglio più avanti all'interno di questo corso, è un sistema elettroottico di proiezione in cui si sovrappongono alla scena esterna al velivolo una serie di informazioni relative alla strumentazione di bordo visualizzate su un CRT. Il lavoro che si intende descrivere consiste nel filtraggio dell'emissione del CRT per renderla compatibile con gli intensificatori di tipo II classe B, per i quali è prevista una  $Rad_{NVIS} < 1.6E-9$  alla luminanza di 5 fL.

La figura 10.12 mostra l'emissione spettrale della sorgente luminosa (CRT a fosfori P53). La  $Rad_{NVIS}$  calcolata è di  $1,6E-7$ , pertanto 100 volte superiore al massimo consentito. Tra i vari picchi di emissione del CRT, quelli a 490, 550 e 590 nm contribuiscono maggiormente alla luminosità, mentre quelli a 620 e soprattutto a 680 nm, danno uno scarso contributo luminoso ma interferiscono pesantemente con la visione attraverso gli intensificatori richiesti.

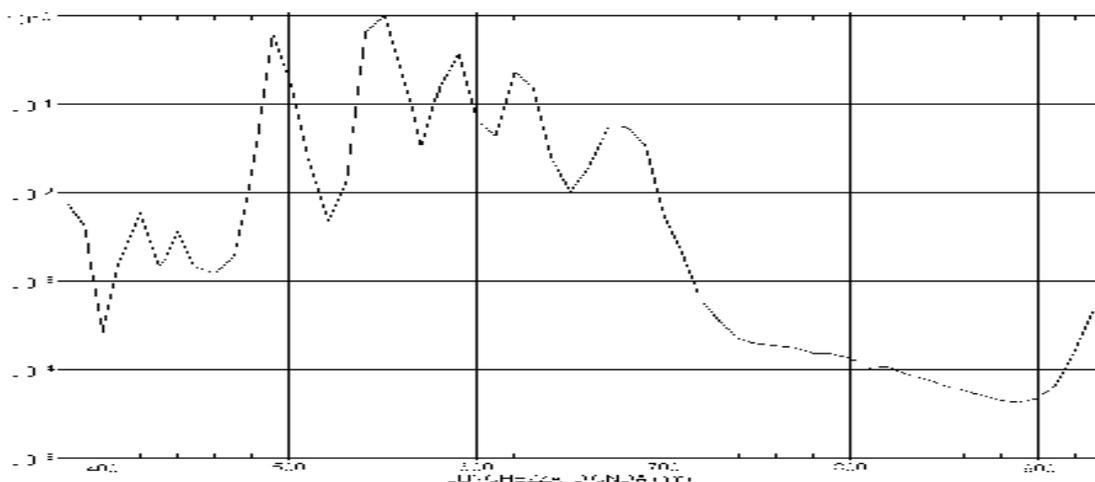
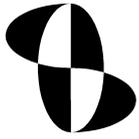


figura 10.12



Si è effettuata una ricerca tra i possibili materiali utilizzabili per il filtraggio e dopo un'accurata analisi delle varie possibilità, si è scelto il vetro Schott BG40 con uno spessore di 1,5 mm. Questo presenta una trasparenza elevata (>95%) a 490 e 550 nm e accettabile (>70%) a 590 nm. La radianza NVIS che risulta dal CRT con il filtraggio descritto non è però ancora soddisfacente. Per soddisfare i requisiti di compatibilità NVG, non potendo aumentare ulteriormente lo spessore del filtro per ovvii motivi di luminosità, si può depositare sul filtro un trattamento dielettrico a riflettività variabile, del tipo "specchio caldo", con taglio a 620 nm. In questo trattamento consente per incidenza normale, un'alta trasparenza fino a 590 nm e un'alta riflettività per lunghezze d'onda superiori a 630 nm. Si ottiene così un filtro la cui risposta spettrale risultante è riportata in figura 10.13. Nel progetto del trattamento si è tenuto conto dello spostamento della risposta spettrale con l'angolo di incidenza che, nell'installazione prevista per l'HUD, varia da 0° a 30°.

Simulando con l'ausilio di un opportuno software la radianza spettrale emessa dal CRT filtrato nella maniera descritta, si ottiene il risultato riportato in figura 10.14, in cui è visibile il confronto tra l'emissione della sorgente prima e dopo il filtraggio.

La  $Rad_{NVIS}$  tipo II classe B calcolata varia, a seconda dell'angolo di incidenza, da  $2E-10$  a  $5,3E-10$ , valori ben al di sotto di quelli massimi accettabili dal requisito di compatibilità NVG, mentre la luminanza della sorgente risulta diminuita di circa il 20%.

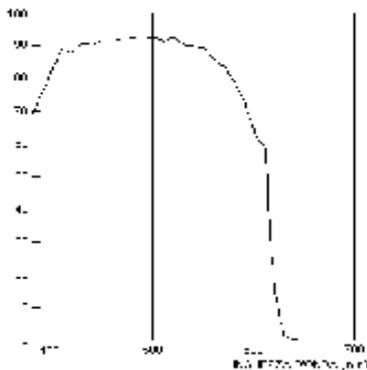


figura 10.13

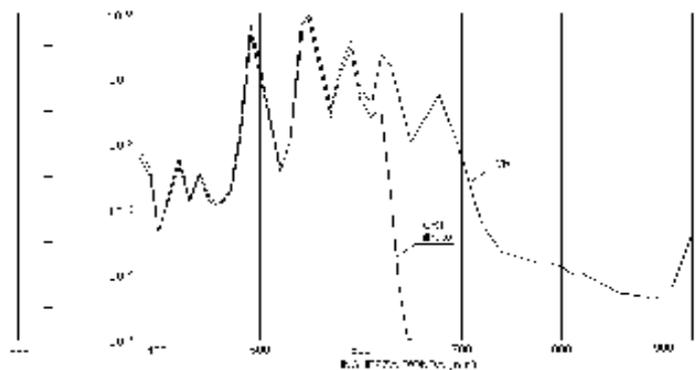


figura 10.14