

Recubrimientos antirreflectivos

P. Cobelli

Fecha de última actualización: 22 de Noviembre de 2015

Índice

1	Antes de comenzar	1
2	El principio de funcionamiento	1
3	Cómo elegir el material que compone el recubrimiento	3
4	Fluoruro de magnesio como recubrimiento	5
5	Preguntas (interesantes para hacerse)	5

1 Antes de comenzar

Asumamos por un momento que las lentes de las que están compuestos nuestros anteojos forman, con el aire, dos interfaces que pueden considerarse planas y paralelas entre sí.

Una de estas dos interfaces es la que denominaremos *frontal o anterior*, corresponde a la interfaz aire-vidrio por la que los rayos de luz que se dirigen hacia nuestros ojos ingresan en el material del que están hechas las lentes. La segunda interfaz, vidrio-aire, es la llamada *posterior*, y corresponde a aquella que es más cercana a nuestros ojos.

Bajo la hipótesis de que estas dos interfaces son planas y paralelas, un lector desprevenido podría pensar que los rayos por ellas reflejados (o transmitidos) serían capaces de dar lugar a interferencia. Sin embargo sabemos que esto no es posible dado que el espesor de dicha lámina supera ampliamente la longitud de coherencia necesaria para observar interferencia.

2 El principio de funcionamiento

La idea detrás de los recubrimientos antirreflectivos es que es posible crear una lámina *delgada* de caras paralelas por delante de la superficie frontal de nuestras lentes, de forma tal de que para cada rayo incidente haya dos rayos reflejados susceptibles de interferir entre sí.

En particular, si somos capaces de hacer que estos dos rayos reflejados se encuentren en contrafase, su interferencia podría dar lugar a una cancelación parcial o total¹ de la intensidad luminosa reflejada.

Consideremos entonces el sistema físico que se muestra en la Fig. 1. En el mismo se representa, en forma esquemática, la película delgada de recubrimiento dispuesta delante de la lente. Asumiremos que el espesor de la capa de recubrimiento es d y su índice de refracción viene dado

¹Volveremos sobre este punto en la Sección 3.

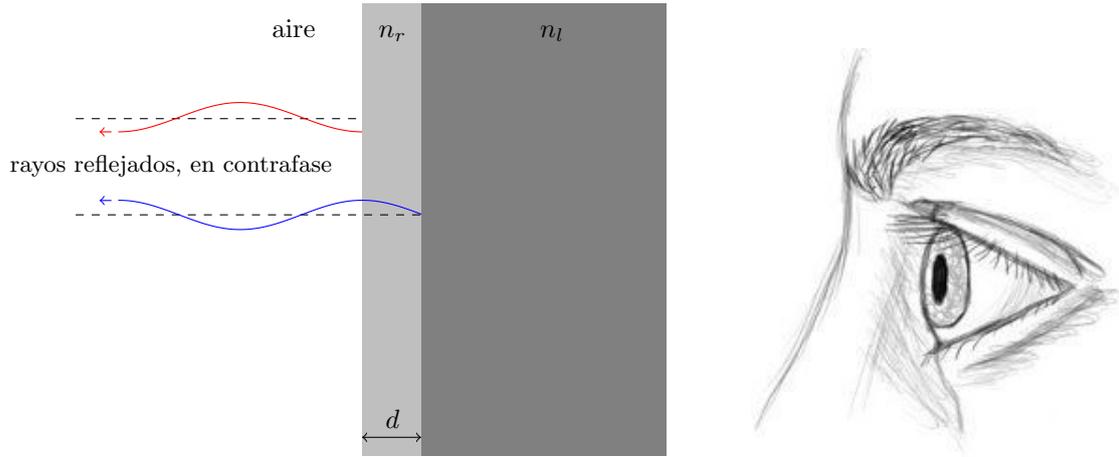


Figura 1: Esquema para el análisis del funcionamiento de los recubrimientos antirreflejantes. El esquema muestra un modelo idealizado de recubrimiento de índice n_r en la forma de una película delgada de espesor d , dispuesto delante de la lente de índice de refracción n_l . Los rayos de luz llegan a nuestros ojos provenientes de la izquierda. Se observan también dos rayos reflejados, uno por la interfaz aire-recubrimiento (en rojo) y otro por la interfaz recubrimiento-lente (en azul). Cuando ambos emergen en contrafase (como se muestra en la figura) se produce interferencia destructiva (parcial o total, según el caso).

por n_r . Asimismo, consideraremos que el índice de refracción de la lente del antejo es n_l , y que el material del que están compuestas es el más denso ópticamente, es decir: $1 < n_r < n_l$.

Sobre este arreglo, vamos a considerar la incidencia *normal* (adecuada para las situaciones en las que utilizamos nuestros anteojos) de luz monocromática de longitud de onda λ_0 .

Buscamos entonces una condición que nos permita asegurar que la onda reflejada por la interfaz aire-recubrimiento (en rojo en la Fig. 1) interfiera destructivamente con aquella reflejada por la interfaz recubrimiento-lente (en azul en la misma figura). Estas dos ondas son las reflejadas en las caras anterior y posterior de una lámina delgada de caras paralelas de material con índice n_r entre aire y el vidrio del que están hechas las lentes.

Calculemos entonces la diferencia de fase entre ambos rayos. Por un lado, la diferencia de camino geométrico entre ambos se debe exclusivamente a que la onda transmitida (en azul en el esquema) atraviesa dos veces el espesor de la lámina, luego el camino geométrico extra que el rayo *azul* recorre respecto del *rojo* es $2d$. Dado que el medio en el que tiene lugar este camino tiene índice n_r , la diferencia de camino óptico entre los rayos *rojo* y *azul* es $2n_r d$. Finalmente, la diferencia de fase entre ambos resulta

$$\delta' = k \cdot 2n_r d = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_r d.$$

Esta diferencia de fase δ' está asociada *exclusivamente* a las diferencias de camino entre ambos rayos interfirientes. Es decir que para determinar la diferencia de fase total δ es necesario considerar los posibles saltos de fase en las interfaces.

En la interfaz aire-recubrimiento, la luz pasa de un medio de índice dado a otro de índice mayor, por lo que el rayo reflejado (en rojo) experimenta un salto de fase de π radianes. Lo mismo sucede en la interfaz recubrimiento-lente, dado que estamos trabajando bajo la hipótesis de que $n_r < n_l$. Por lo tanto, la diferencia de fase proveniente de saltos de fase por reflexión es de 2π radianes.

Luego la diferencia de fase entre ambos rayos en incidencia normal viene dada por

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_r d + 2\pi. \quad (1)$$

Si ambos rayos presentan la misma intensidad luminosa, la condición de interferencia destructiva resulta

$$\cos^2 \delta/2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \delta = (2m + 1)\pi, \quad m \in \mathbb{Z}_0.$$

A partir de esta condición resulta sencillo encontrar los espesores de capa de recubrimiento d_m posibles en términos de los parámetros relevantes del sistema:

$$d_m = \frac{2m + 1}{4} \frac{\lambda_0}{n_r}. \quad (2)$$

Esta condición nos asegura que no habrá luz reflejada a partir de la capa de recubrimiento depositada sobre nuestras lentes. Los espesores posibles resultan entonces:

$$d_m = \{1/4(\lambda_0/n_r), 3/4(\lambda_0/n_r), 5/4(\lambda_0/n_r), \dots\}$$

No obstante, sabemos que si el espesor resulta muy grande las ondas interfirientes podrían perder coherencia y nuestro sistema dejaría de funcionar como un filtro antirreflejos. Asimismo, un recubrimiento de mayor d implica anteojos con vidrios más gruesos y más pesados. Por ende, resulta usual considerar el mínimo espesor de recubrimiento capaz de asegurar la propiedad de ser antirreflexivo. El mínimo espesor posible que cumple con esta condición, simbolizado por d_{\min} , viene dado por la expresión:

$$d_{\min} = \frac{\lambda_0}{4 n_r}. \quad (3)$$

3 Cómo elegir el material que compone el recubrimiento

Notemos que, hasta ahora, venimos considerando que la intensidad de ambos rayos reflejados es la misma. Sin embargo, vimos en las clases teóricas que este no es el caso. Esto se debe a que, cuando un rayo de intensidad I_0 incide *normalmente* sobre una interfaz entre dos medios de índices n_1 y n_2 , las intensidades de los haces reflejado y transmitido vienen dadas por

$$I_{\text{reflej}} = I_0 \mathcal{R}_{12} = I_0 \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \quad (4)$$

y

$$I_{\text{transm}} = I_0 \mathcal{T}_{12} = I_0 (1 - \mathcal{R}_{12}), \quad (5)$$

siendo \mathcal{R}_{12} la reflectividad de la interfaz 1-2, y \mathcal{T}_{12} la transmitividad de esa misma interfaz. Observemos que $\mathcal{R}_{12} + \mathcal{T}_{12} = 1$, de forma tal de que la intensidad asociada al rayo luminoso original se conserva al dividirse en reflejado y transmitido. Las últimas expresiones nos muestran que dependiendo del valor de los índices las intensidades reflejada y transmitida serán, en general, distintas entre sí.

Por esta razón, el espesor mínimo que calculamos en la sección anterior sólo asegura una interferencia destructiva *parcial* de la luz reflejada, dado que ambos rayos no tienen la misma intensidad al emerger del recubrimiento.

Para poder obtener una cancelación total resulta necesario entonces elegir correctamente el material que compondrá el recubrimiento. Veamos cómo se calcula exactamente el índice de refracción de ese material de forma tal de asegurar interferencia destructiva completa de las ondas reflejadas.

Para esto, vamos a ayudarnos con el diagrama de la Figura 2. A pesar de que en el mismo se muestra una incidencia oblicua de rayos, nosotros emplearemos el diagrama pensándolo para el caso de incidencia normal, y utilizaremos el trazado en incidencia oblicua sólo para poder visualizar fácilmente los diferentes rayos de interés, que sería difícil distinguir si hiciésemos el diagrama en incidencia normal. Hecha esta salvedad, la Fig. 2 muestra un rayo incidente sobre la interfaz aire-recubrimiento caracterizado por una intensidad I_0 (en negro). Ese rayo se dividirá en uno

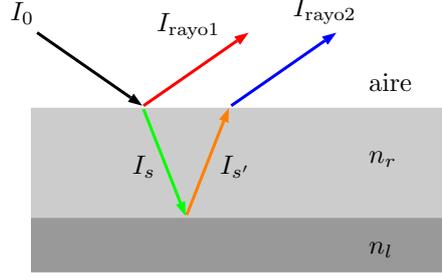


Figura 2: Esquema de rayos reflejados en las interfaces aire-recubrimiento y recubrimiento-lente. En este diagrama, el conjunto recubrimiento-lente ha sido rotado a la derecha respecto de la Fig. 1. Las magnitudes I_0 , I_{rayo1} , I_{rayo2} , I_s e $I_{s'}$ corresponden a las intensidades de cada uno de los rayos intervinientes. No se muestra el rayo transmitido a la lente producto de la refracción del rayo identificado con color verde.

reflejado hacia el aire (en rojo) y otro transmitido hacia el interior de la película de recubrimiento (en verde). De acuerdo a las definiciones anteriores, el reflejado tendrá una intensidad dada por:

$$I_{\text{rayo1}} = I_0 \mathcal{R}_{ar}, \quad (6)$$

donde \mathcal{R}_{ar} representa la reflectividad de la interfaz aire-recubrimiento, y viene dada por

$$\mathcal{R}_{ar} = \left(\frac{n_r - n_a}{n_r + n_a} \right)^2 = \left(\frac{n_r - 1}{n_r + 1} \right)^2. \quad (7)$$

El rayo transmitido (en verde) tendrá entonces una intensidad

$$I_s = I_0 \mathcal{T}_{ar} = I_0 (1 - \mathcal{R}_{ar}). \quad (8)$$

A continuación este último rayo se reflejará en la interfaz recubrimiento-lente, dando lugar a un rayo reflejado que se propaga en el recubrimiento hacia su interfaz con el aire (rayo naranja en la figura). La intensidad de este rayo será entonces

$$I_{s'} = I_s \mathcal{R}_{rl}, \quad (9)$$

siendo \mathcal{R}_{rl} la reflectividad de la interfaz recubrimiento-lente:

$$\mathcal{R}_{rl} = \left(\frac{n_l - n_r}{n_l + n_r} \right)^2. \quad (10)$$

Finalmente ese rayo se transmitirá a través de la interfaz aire-recubrimiento, dando lugar al rayo esquematizado en azul en la Figura. Ese rayo tendrá entonces una intensidad dada por

$$I_{\text{rayo2}} = I_{s'} \mathcal{T}_{ar} = I_{s'} (1 - \mathcal{R}_{ar}). \quad (11)$$

En esta forma, las intensidades de los rayos 1 y 2 (rojo y azul en la figura) que interfieren vienen dadas por

$$I_{\text{rayo1}} = I_0 \mathcal{R}_{ar}, \quad (12)$$

y

$$\begin{aligned} I_{\text{rayo2}} &= I_{s'} \mathcal{T}_{ar} = \\ &= I_{s'} (1 - \mathcal{R}_{ar}) = \\ &= I_s \mathcal{R}_{rl} (1 - \mathcal{R}_{ar}) = \\ &= I_0 (1 - \mathcal{R}_{ar}) \mathcal{R}_{rl} (1 - \mathcal{R}_{ar}), \end{aligned}$$

es decir que

$$I_{\text{rayo2}} = I_0 \mathcal{R}_{rl} (1 - \mathcal{R}_{ar})^2. \quad (13)$$

Luego, para que estos dos rayos que interfieren tengan la misma intensidad, deberá suceder que

$$I_{\text{rayo1}} = I_{\text{rayo2}}, \quad (14)$$

o, lo que es equivalente,

$$I_0 \mathcal{R}_{ar} = I_0 \mathcal{R}_{rl} (1 - \mathcal{R}_{ar})^2,$$

condición que puede reescribirse como

$$\mathcal{R}_{ar} = (1 - 2 \mathcal{R}_{ar} + \mathcal{R}_{ar}^2) \mathcal{R}_{rl}. \quad (15)$$

En esta ecuación, \mathcal{R}_{ra} depende de n_r (ecuación 7), y \mathcal{R}_{rl} depende de n_r y n_l (ecuación 10). Por tanto, esta es una ecuación algebraica de la que en principio es posible obtener el valor del índice de refracción del recubrimiento, n_r , si se conoce n_l .

Ahora bien, según vimos en clases teóricas, el coeficiente de reflectividad² aire-vidrio es en general bajo, del orden de 0.02 para un vidrio de índice de refracción $n = 1.33$. Esto nos permite entonces despreciar el segundo y tercer término dentro de los paréntesis en la última ecuación *frente al primer sumando* (que es igual a 1), con lo cual la condición aproximada para que ambos rayos presenten la misma intensidad resulta

$$\mathcal{R}_{ar} = \mathcal{R}_{rl},$$

es decir,

$$\frac{n_r - 1}{n_r + 1} = \frac{n_l - n_r}{n_l + n_r}. \quad (16)$$

Observemos que esta condición (en cualquiera de sus dos formas anteriores) tiene una interpretación sencilla: para que los rayos interfirientes tengan *aproximadamente* la misma intensidad resulta necesario que las reflectividades en cada una de las interfaces del recubrimiento coincidan.

Finalmente, resolviendo la última ecuación se obtiene el valor del índice de refracción del material que compone el recubrimiento:

$$n_r = \sqrt{n_l}. \quad (17)$$

4 Fluoruro de magnesio como recubrimiento

Para algunos vidrios flint de los que están hechas las lentes de anteojos, el índice de refracción es $n_l = 1.7$, con lo cual $\sqrt{n_l} \simeq 1.305$. El fluoruro de magnesio (MgF_2) tiene un índice de $n_r = 1.38$, que es razonablemente cercano al valor deseado para ese tipo de vidrios. Durante muchos años el fluoruro de magnesio fue usado como recubrimiento antirreflejos para lentes de todo índice debido a su facilidad de aplicación.

Si empleamos entonces una monocapa de MgF_2 sobre un vidrio flint de índice $n_l = 1.7$ para evitar los reflejos de luz de longitud de onda $\lambda_0 = 500$ nm, obtenemos que el espesor de la capa a depositar es de $d = 500 \text{ nm}/(4 \times 1.38) \approx 90$ nm.

²En incidencia normal.

5 Preguntas (interesantes para hacerse)

En esta sección les dejo cuatro preguntas interesantes para hacerse en función de lo que les conté en este apunte. Ellas son:

1. El recubrimiento monocapa cuya teoría vimos nos asegura, para un espesor dado, que no habrá intensidad reflejada para un rayo monocromático de longitud de onda λ_0 . Sin embargo la luz que llega a nuestros lentes es policromática. ¿Cómo podemos hacer para que nuestros lentes sean antireflectivos para más de una longitud de onda del espectro visible?
2. Si el recubrimiento monocapa logra que no haya intensidad reflejada (para una dada longitud de onda), ¿qué significa esto en términos de la luz que es transmitida por las lentes hacia nuestros ojos?
3. En virtud de la respuesta a la última pregunta, ¿por qué son útiles estos recubrimientos en celdas solares?
4. Para nuestra derivación hemos supuesto que $1 < n_r < n_l$. ¿Qué sucede si suponemos $1 < n_l < n_r$? ¿Cómo se modifican los resultados de nuestro análisis?