

Análisis Y Optimización De Multicapas De Interferencia Óptica

Elena M. Godfrin y Enrique Campitelli*

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
DEPARTAMENTO FUENTES RENOVABLES Y USO RACIONAL DE LA ENERGÍA
AVDA. LIBERTADOR 8250 - 1429 BUENOS AIRES
TEL.: (01) 754-7131 , FAX: (01) 754-7130
E-mail: godfrin@cnea.edu.ar

Resumen

Se desarrolló el programa "FILM" para analizar y diseñar una estructura de multicapas de interferencia óptica con una característica angular o espectral determinada. Además, puede usarse para monitorizar la fabricación de dicha estructura. Se dan ejemplos de aplicación.

Abstract

The program "FILM" was developed in order to analyze and design a structure of optical interference multilayers with a given angular or spectral response. Besides, it can be used to monitor the construction of such structure. Some application examples are shown.

Introducción

Las multicapas de interferencia óptica son usadas para controlar la radiación electromagnética en el intervalo de longitudes de onda desde rayos X blandos hasta infrarrojo lejano. Las magnitudes controlables son: distribución angular y espectral de intensidad, polarización y fase, y la partición de éstas entre dos haces. Se desarrolló el programa "FILM" para analizar y diseñar una estructura de este tipo con una característica angular o espectral determinada. El mismo puede usarse para monitorizar la fabricación de dicha estructura introduciendo variaciones a la prescripción original para compensar errores en las capas ya depositadas. Como ejemplos de aplicación, se trata el filtro escalón (espejo dicróico), el filtro de banda ultra-angosta (filtro de dispersión de fase), el antirreflectante de triple capa para el visible, y se discute la fabricación de antirreflectantes para celdas solares.

Programa "Film"

El programa puede considerarse subdividido en dos secciones, una de análisis y otra de refinación.

Sección análisis

Se utiliza el método matricial de Abelès¹ para el cálculo de la reflexión, transmisión, absorción,

fase de reflexión y fase de transmisión en función de la longitud de onda o ángulo de incidencia en ambas polarizaciones (TE y TM). Los índices de refracción pueden ser complejos y variables respecto de la longitud de onda. En las tablas de prescripciones, una @ indica que no se consulta la tabla de índices y se considera a éste constante. La información sobre las multicapas o sustancias queda almacenada en archivos distintos, para poder analizar la multicapa con índices variables. Los máximos y mínimos de las características, puntos de mayor interés en el diseño, son tabulados para su rápida y precisa ubicación. Para un mejor despliegue de la información gráfica, las cotas y escalas de ambas coordenadas son especificables por el usuario. La salida gráfica de pantalla puede transferirse a una impresora de puntos, en tres colores cuando es necesario.

Sección refinación

Éste es un método que permite alterar la prescripción de una multicapa para que su característica cumpla con ciertas metas. La publicación de Baumeister² es la primera al respecto, donde sólo se alteran los espesores de las capas.

La operación de esta sección comienza una vez analizada una multicapa y definidos la

* Miembro de la Carrera del Personal de Apoyo del CONICET

característica a refinar, los intervalos de las variables en juego que definen un gráfico inicial y los espesores que deben mantenerse fijos (si los hay). Luego, el programa pide valores de la variable independiente y los respectivos valores meta de la dependiente para formar el sistema de ecuaciones de Ref. 2. Para resolverlo se utiliza el método de multiplicadores de Lagrange. Finalmente, se presenta el mismo gráfico con su característica variada. El proceso de refinación consiste en el uso iterado de todas las disponibilidades del análisis, ensambladas con el algoritmo de Lagrange.

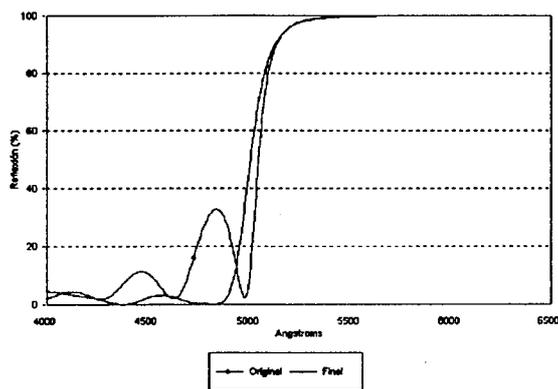


Figura 1: Multicapas original y final de Baumeister - 17 capas. En la original, las oscilaciones están amortiguadas por la inclusión de una capa L/2 en un extremo. La final se obtiene luego de 9 iteraciones.

TABLA 1: PRESCRIPCIÓN DE LAS MULTICAPAS ORIGINAL Y FINAL DE BAUMEISTER

Sustancia	n	k	d original (Å)	d final (Å)
@BK7	1.52	0		
@MgF ₂	1.38	0	1085	1116
@ZnS	2.30	0	651	730
@MgF ₂	1.38	0	1085	1170
@ZnS	2.30	0	651	653
@MgF ₂	1.38	0	1085	1060
@ZnS	2.30	0	651	641
@MgF ₂	1.38	0	1085	1080
@ZnS	2.30	0	651	640
@MgF ₂	1.38	0	1085	1045
@ZnS	2.30	0	651	623
@MgF ₂	1.38	0	1085	1054
@ZnS	2.30	0	651	649
@MgF ₂	1.38	0	1085	1098
@ZnS	2.30	0	651	663
@MgF ₂	1.38	0	1085	1123
@ZnS	2.30	0	651	695
@MgF ₂	1.38	0	543	554
@Vacío	1.00	0		

Aplicaciones

1. Filtro escalón

Se trata de producir un filtro que separe nítidamente bandas de transmisión y de reflexión, eliminando las oscilaciones que se presentan usualmente en la banda de transmisión. En la figura 1 se reproducen algunos resultados de Baumeister y en la figura 2 se comparan con los de este programa para el mismo problema.

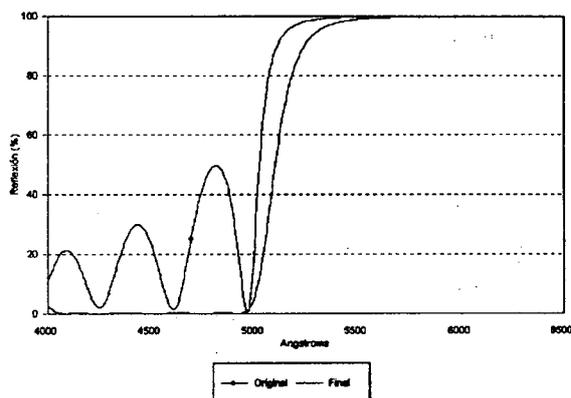


Figura 2: Multicapa original y final estudiada en este trabajo - 17 capas. La original es periódica pura. La final se obtiene luego de 9 iteraciones.

TABLA 2: PRESCRIPCIÓN DE LAS MULTICAPAS ORIGINAL Y FINAL ESTUDIADA EN ESTE TRABAJO.

Sustancia	n	k	d original (Å)	d final (Å)
@BK7	1.52	0		
@MgF ₂	1.38	0	1085	1215
@ZnS	2.30	0	651	818
@MgF ₂	1.38	0	1085	1093
@ZnS	2.30	0	651	651
@MgF ₂	1.38	0	1085	1178
@ZnS	2.30	0	651	630
@MgF ₂	1.38	0	1085	1077
@ZnS	2.30	0	651	632
@MgF ₂	1.38	0	1085	1153
@ZnS	2.30	0	651	628
@MgF ₂	1.38	0	1085	1080
@ZnS	2.30	0	651	643
@MgF ₂	1.38	0	1085	1169
@ZnS	2.30	0	651	679
@MgF ₂	1.38	0	1085	1174
@ZnS	2.30	0	651	951
@MgF ₂	1.38	0	1085	1005
@Vacío	1.00	0		

2. Filtro de dispersión de fase

Este filtro se obtiene superponiendo dos espejos de banda ancha³. Su banda de transmisión es muy estrecha y depende de la variación de la fase de reflexión, más que del espesor del espaciador.

Se tomó una de las bandas del ejemplo citado en Ref. 3 y se sometió la multicapa a refinación con el propósito de estrecharla al máximo. Los resultados original y final están ilustrados en la figura 3.

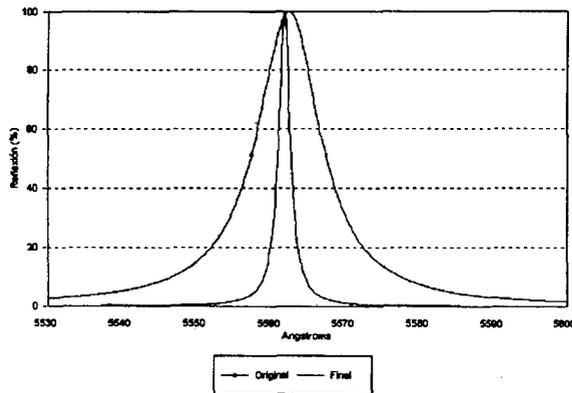


Figura 3: Filtro de dispersión de fase tipo AB^3 - 31 capas. De la multicapa original se tomó una de las bandas pasantes. La final se obtiene por refinación. Anchos de banda: 10.5 Å para la original y 1.7 Å para la final.

3. Antirreflectante de triple capa para el visible

Este film es usado comúnmente en los sistemas ópticos modernos⁴. La reflectividad tiene una pequeña loma en el centro de la banda (región de máxima sensibilidad del ojo), lo que da un tinte verde al film. Es importante entonces suprimirla, manteniéndola baja en el esto de la banda.

Para fijar datos se tomó la prescripción de Ref. 3 (con un factor de escala en los espesores) y se intentó una refinación: ante la menor insinuación de bajar el valor, los resultados obtenidos fueron inconsistentes. Sin embargo, con una ligera variación del índice en una capa, se mejoró la característica (figura 4, tabla 4). Esta variación es posible, por ahora, en forma manual.

TABLA 3: PRESCRIPCIÓN DE LAS MULTICAPAS ORIGINAL Y FINAL DEL FILTRO DE DISPERSIÓN DE FASE. Nótese que la refinación no alteró la simetría, pudiendo hacerlo.

Sustancia	n	k	d original (Å)	d final (Å)
@BK7	1.52	0		
@ZnS	2.30	0	751	626
@Criolita	1.35	0	1279	1169
@ZnS	2.30	0	751	604
@Criolita	1.35	0	1235	1170
@ZnS	2.30	0	626	594
@Criolita	1.35	0	1299	1209
@ZnS	2.30	0	681	629
@Criolita	1.35	0	957	1097
@ZnS	2.30	0	566	659
@Criolita	1.35	0	859	1059
@ZnS	2.30	0	504	680
@Criolita	1.35	0	805	860
@ZnS	2.30	0	450	486
@Criolita	1.35	0	767	591
@ZnS	2.30	0	450	457
@Criolita	1.35	0	3111	3028
@ZnS	2.30	0	450	457
@Criolita	1.35	0	767	591
@ZnS	2.30	0	450	486
@Criolita	1.35	0	805	860
@ZnS	2.30	0	504	680
@Criolita	1.35	0	859	1059
@ZnS	2.30	0	566	659
@Criolita	1.35	0	957	1097
@ZnS	2.30	0	681	629
@Criolita	1.35	0	1299	1209
@ZnS	2.30	0	626	594
@Criolita	1.35	0	1235	1170
@ZnS	2.30	0	751	604
@Criolita	1.35	0	1279	1169
@ZnS	2.30	0	751	626
@BK7	1.52	0		

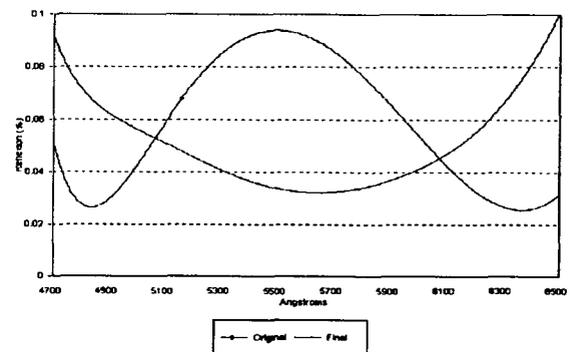


Figura 4: Antirreflectante de triple capa para el visible. La multicapa final se obtiene de la original variando manualmente los índices; es mejor porque disminuye la reflexión donde el ojo es más sensible. En los límites de abscisas, la sensibilidad del ojo cae al 10% del máximo

TABLA 4: PRESCRIPCIÓN DE LAS MULTICAPAS ORIGINAL Y FINAL DEL ANTIRREFLECTANTE DE TRIPLE CAPA.

	Sustancia	n	k	d (Å)
Original	@Vacío	1.00	0	
	@MgF ₂	1.38	0	997
	@ZrO ₂	2.10	0	1310
	@CeF ₃	1.65	0	834
	@BK7	1.52	0	
Final	@Vacío	1.00	0	
	@MgF ₂	1.38	0	988
	@ZrO ₂	2.10	0	1298
	@X	1.67	0	826
	@BK7	1.52	0	

4. Antirreflectante para celdas solares

Tanto este programa como un sistema de vacío y depósito de films que está en operación tienen el propósito primario de mejorar la eficiencia de las celdas en sus aspectos ópticos.

Este ejemplo trata el problema de disminuir la reflectividad de una superficie de silicio. La eficiencia de una multicapa para ese fin aumenta con el número de capas, pero por razones prácticas la limitaremos a dos. La figura 5 ilustra el caso. Aquí se usó solamente la sección análisis.

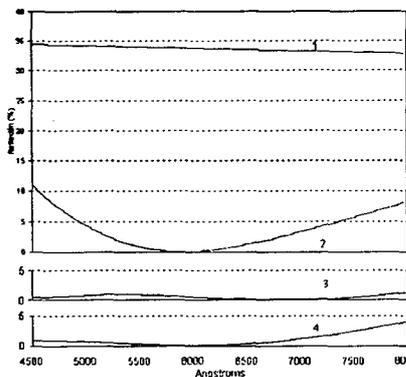


Figura 5: 1. Reflectividad del silicio. 2. Antirreflectante monocapa de SiO. 3,4. Antirreflectantes bicapa de TiO₂+MgF₂.

Puede verse que el sistema de dos capas es mejor, pero su depósito presenta algunos problemas de monitorizado. No es posible hacerlo a simple vista como el de una capa. Tampoco es posible, en nuestro equipo, monitorizar la reflexión, debido a problemas mecánicos (el sustrato debe girar durante la operación). Es necesario entonces colocar las

celdas alrededor de un testigo de vidrio y monitorizar sobre él por transmisión. La operación se vuelve imprecisa cuando las indicaciones del fotómetro tienen una variación relativa pequeña entre los momentos en que hay que suspender la evaporación de una sustancia y pasar a la otra. Para caracterizar este factor puede definirse un "contraste" como:

$$c = |(T - T_1)/(T + T_1)|$$

donde T es la indicación al finalizar una capa y T₁, al finalizar la que le sigue.

TABLA 5: PRESCRIPCIÓN DE MULTICAPAS ANTIRREFLECTANTES PARA CELDAS SOLARES

	Sustancia	n	k	d(Å)
2	@Vacío	1.00	0	
	SiO	variables		750
	Si	variables		
3	@Vacío	1.00	0	
	@MgF ₂	1.38	0	951
	TiO ₂	variables		559
	Si	variables		
4	@Vacío	1.00	0	
	@MgF ₂	1.38	0	833
	TiO ₂	variables		490
	Si	variables		

El monitorizado es más preciso cuanto mayor es el contraste.

Haciendo una simulación del proceso se evalúa el contraste obtenible. Una manera de aumentarlo es introduciendo un testigo precubierto. Sobre el testigo se deposita una multicapa periódica y el último período se deposita también sobre el silicio. El contraste crece con el número de períodos previos y se obtiene determinando los extremos de los perfiles espectrales de transmisión para cada capa agregada (Tabla 6).

TABLA 6: VARIACIÓN DEL CONTRASTE SEGÚN EL NÚMERO DE CAPAS DEPOSITADAS.

Período	Capa agregada	Sustancia	Contraste %
1	0 a 1	TiO ₂	19
	1 a 2	MgF ₂	15
2	2 a 3	TiO ₂	52
	3 a 4	MgF ₂	25
3	4 a 5	TiO ₂	65
	5 a 6	MgF ₂	29
4	6 a 7	TiO ₂	70
	7 a 8	MgF ₂	30

En la figura 6 se aprecian los perfiles espectrales de transmisión para un pre-cubrimiento de un período.

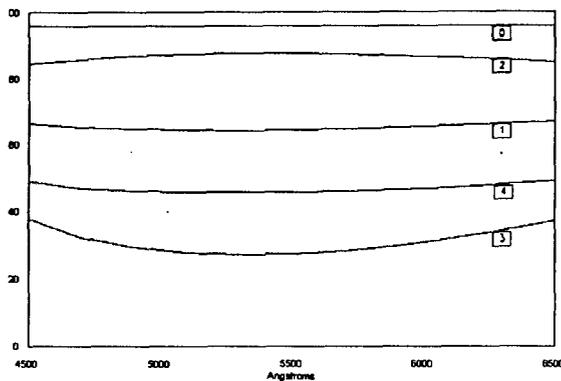


Figura 6: Monitorizado con testigo de vidrio pre-cubierto con un período. La etiqueta en cada curva corresponde al número de capas depositadas sobre el vidrio. Las capas 3 y 4 se depositan sobre el silicio.

Conclusiones

El método de refinación funciona muy bien si las derivadas, respecto de los espesores, de la característica a modificar no tienden a anularse.

Este algoritmo presenta muchas facetas a explorar, debido a la no linealidad de las ecuaciones. En el segundo caso, por ejemplo, mientras la banda se estrecha en sucesivas iteraciones, el máximo cae en longitudes de onda cercanos, pero impredecibles. Al final del proceso hay que reposicionarlo mediante un factor de escala en los espesores. En el tercer caso, se hace evidente la conveniencia de extender el método de refinación a la variación de índices complejos.

En general, se observa que si se piden simultáneamente todos los valores finales de las metas el programa reacciona mal y tiene problemas de convergencia. Se probaron:

- pedir valores finales de algunas metas,
- pedir valores intermedios de todas las metas,
- considerar como meta la no variación de un dado valor de la característica, al tiempo que se pide la variación de otro (política conservadora),
- combinación de todas las anteriores.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Mariano Gómez Berisso por su colaboración al presente trabajo con el programa de vuelco de pantalla gráfica a impresora.

Referencias

- 1 - Principles of Optics, Born and Wolf, Pergamon Press 6th De., pp. 36-70 y 611-634, (1980).
- 2 - Design of multilayer filters by successive approximations, P. Baumeister, J. Opt. Soc. Am., V48 N12, pp. 955-958 (1958).
- 3 - Characteristics of the phase dispersion interference filter, Baumeister, Jenkins and Jeppesen, J. Opt. Soc. Am., V49 N12, pp. 1188-1190 (1959).
- 4 - Triple layer antireflection coatings for the visible and near infrared, Cox, Hass and Thelen, J. Opt. Soc. Am., V52 N9, pp. 965-969 (1962).

