

Interferencias en Multicapas: Espejos de Bragg y Cavidades Resonantes

Berredo, L. Tresguerres, J., Vázquez, M., Villar, O.

Universidad de Oviedo

Abstract

English. In this poster, the authors discuss how to calculate interference on multilayer materials via mathematical formulation (transfer matrix method) and numerical computation (numerical methods and programming). Applications are studied, via Bragg's mirror and Fabry-Pérot resonant cavities. Finally, physical conclusions are derived and further works are mentioned.

Español. En este póster, se discute cómo calcular interferencia en materiales multicapa mediante una formulación matemática (método matrices de transferencia) y cálculo numérico (métodos numéricos y programación). Se estudian aplicaciones mediante el espejo de Bragg y las cavidades resonantes de tipo Fabry-Pérot. Finalmente, se extraen conclusiones físicas y se mencionan avenidas futuras.

Introducción

Espejos de Bragg.

Un espejo de Bragg es un sistema multicapa diseñado para maximizar la reflectancia en un intervalo de longitudes de onda centrado en λ_0 . Consta de m pares de capas de índices $n_H > n_L$, con espesores $d_H = \frac{\lambda_0}{4n_H}$ y $d_L = \frac{\lambda_0}{4n_L}$. A nivel teórico, para incidencia normal se tiene:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{4}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \text{ y } R_{\max} = \left(\frac{n_i - n_r}{n_i + n_r} \right)^2, \text{ donde } n_r = n_{\text{sub}} \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2m} \quad (1)$$

Para $m \geq 10$, $R_{\max} \approx 1$. Algunos valores típicos de índices de refracción son: $n_H = 2,3$ (TiO_2), $n_L = 1,45$ (SiO_2) en el visible y $n_H = 3,5$ (GaAs), $n_L = 2,9$ (AlAs) en el infrarrojo. Las aplicaciones van desde el diseño de cables de fibra óptica hasta espejos de alta reflectividad en interferómetros y sensores ópticos.

Cavidades resonantes de Fabry-Pérot.

Dos espejos de Bragg idénticos enfrentados entre sí forman una cavidad resonante tipo Fabry-Pérot. La luz dentro de la cavidad en resonancia se refuerza por interferencia constructiva dando lugar a bandas de longitudes estrechas. La condición de resonancia a incidencia normal es:

$$\lambda_q = \frac{2n_{\text{cav}}L}{q}, \quad q \in \mathbb{N} \quad (2)$$

Aplicado a análisis de espectros con gran precisión o fabricación de láseres de emisión controlada.

Metodología

Método de las matrices de transferencia.

Suponiendo polarización TE, se toman dos superficies j y $j+1$ superpuestas. Al igualar los frentes E y H en dichas intercaras, y usando las ecuaciones de Maxwell ($E_j = \frac{\mu_0 c}{n_j} H_j$) se obtiene:

$$\begin{pmatrix} E_j^- \\ E_j^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{t_{j,j+1}} \begin{pmatrix} e^{i(k_{j+1,z}-k_{j,z})d_j} & r_{j,j+1} e^{-i(k_{j+1,z}+k_{j,z})d_j} \\ r_{j,j+1} e^{i(k_{j+1,z}+k_{j,z})d_j} & e^{-i(k_{j+1,z}-k_{j,z})d_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{j+1}^- \\ E_{j+1}^+ \end{pmatrix} \quad (3)$$

Denotando $M_{j,j+1}$ a la *matriz de transferencia* de la j -ésima capa se sigue que

$$\begin{pmatrix} E_1^- \\ E_1^+ \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{N+1}^- \\ E_{N+1}^+ \end{pmatrix}, \text{ donde } M = \prod_{i=1}^n M_{i,i+1} \quad (4)$$

De esta expresión, imponiendo ausencia de onda incidente desde el medio $N+1$, se obtiene:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

de donde se calculan los coeficientes de transmisión y reflexión. La reflectancia R y transmitancia T son el módulo cuadrado de estos valores y son los que se observan experimentalmente.

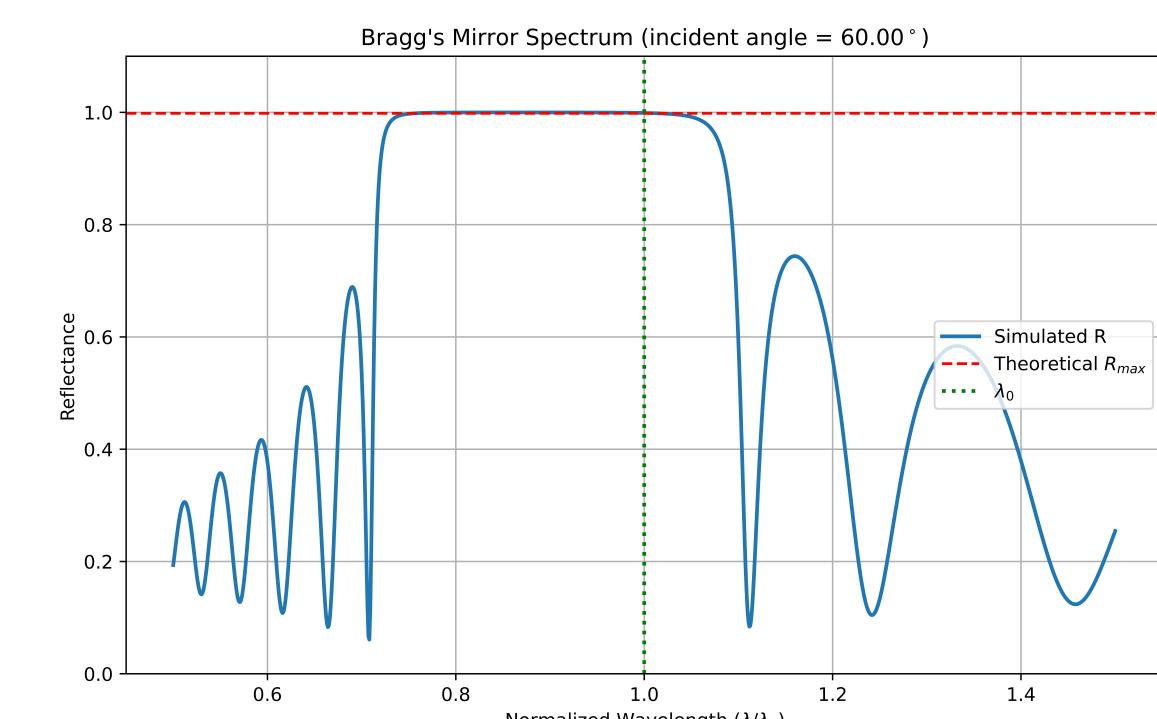
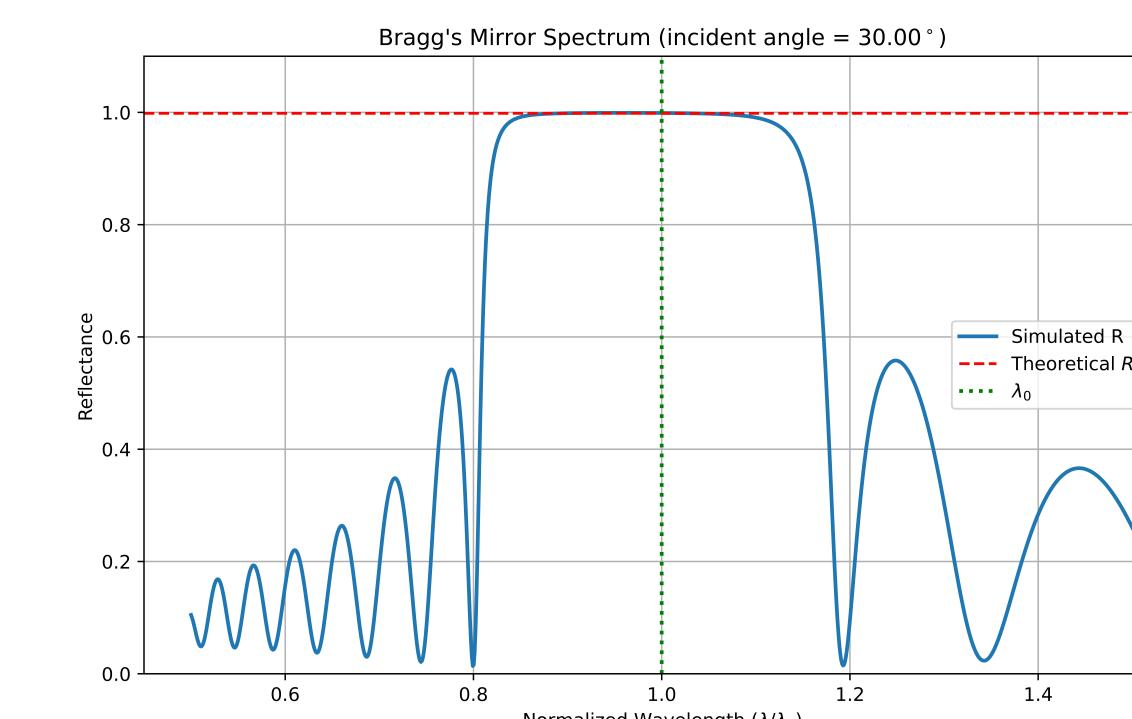
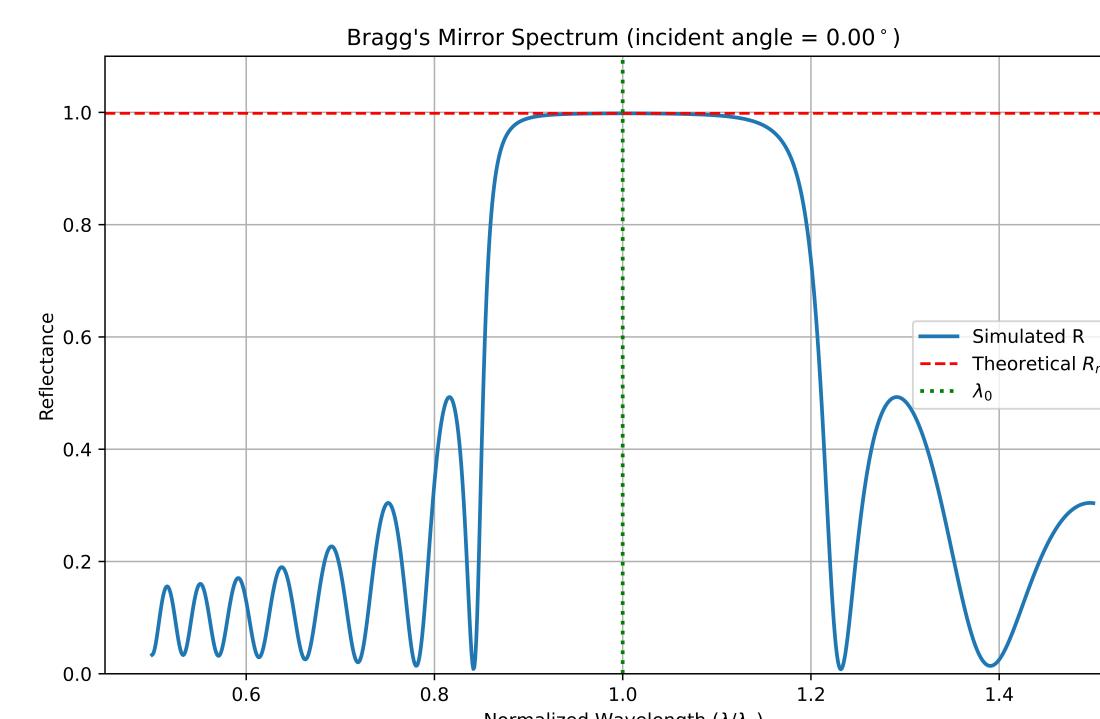
Resultados

Influencia del ángulo de incidencia.

Gráficas del Espejo de Bragg para $\theta_i = 0^\circ$, 30° y 60° .

Parámetros:

$n_{\text{inc}} = 1$, $n_H = 2,3$, $n_L = 1,45$; $n_{\text{sub}} = 1,45$ y $m = 8$.

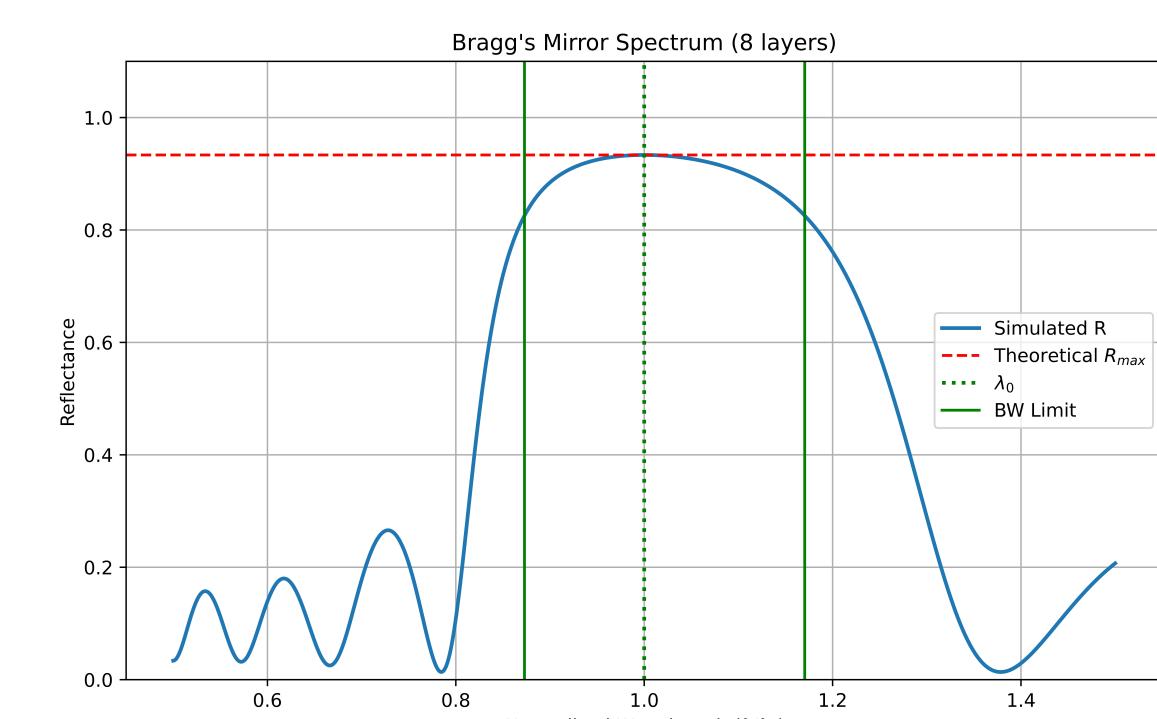
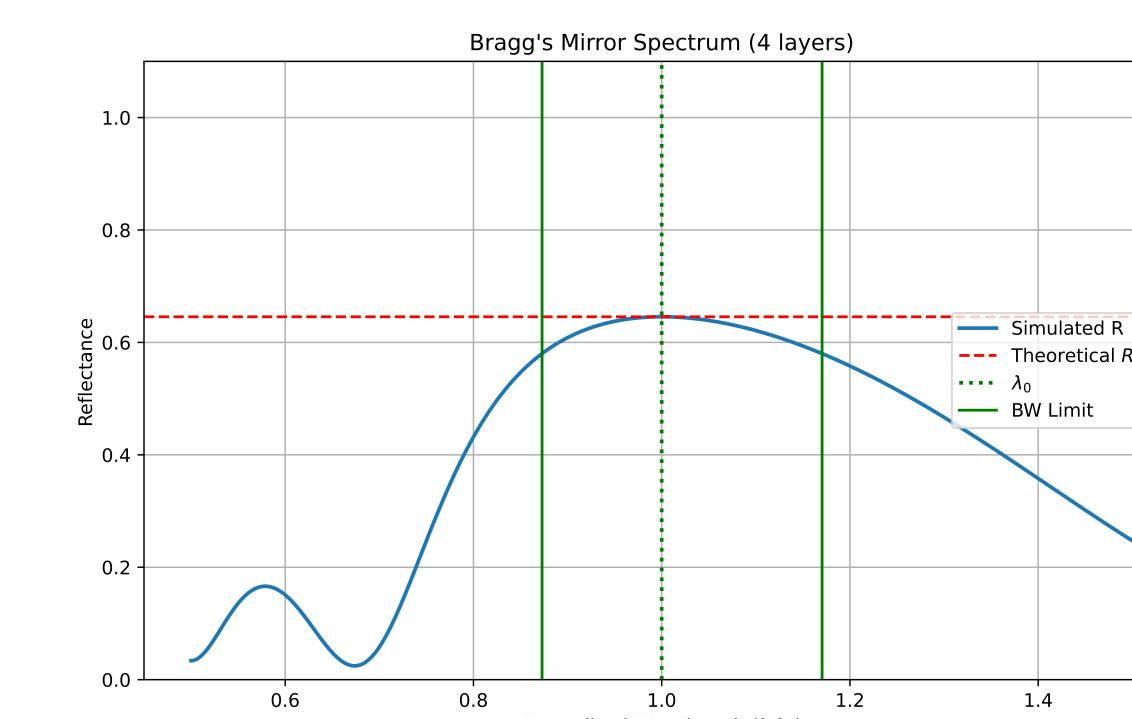
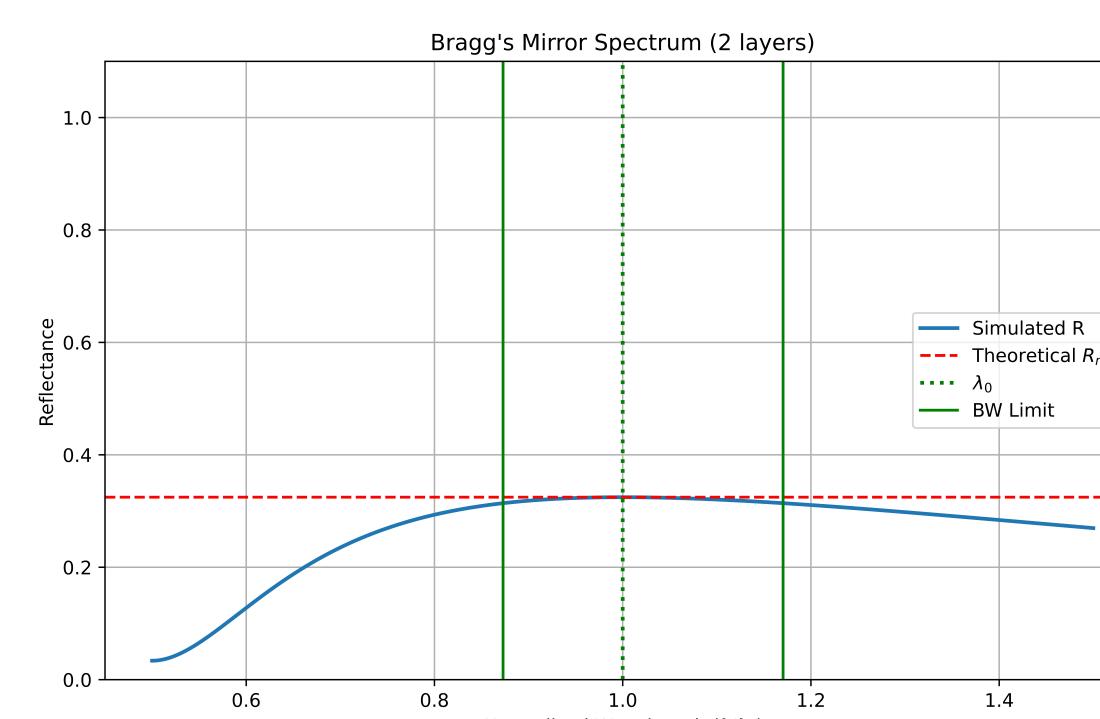


Variación del número de capas m .

Comparación para $m = 3, 5$ y 8 .

Parámetros:

$n_{\text{inc}} = 1$, $n_H = 2,3$, $n_L = 1,45$ = n_{sub} y $\theta_i = 0^\circ$.

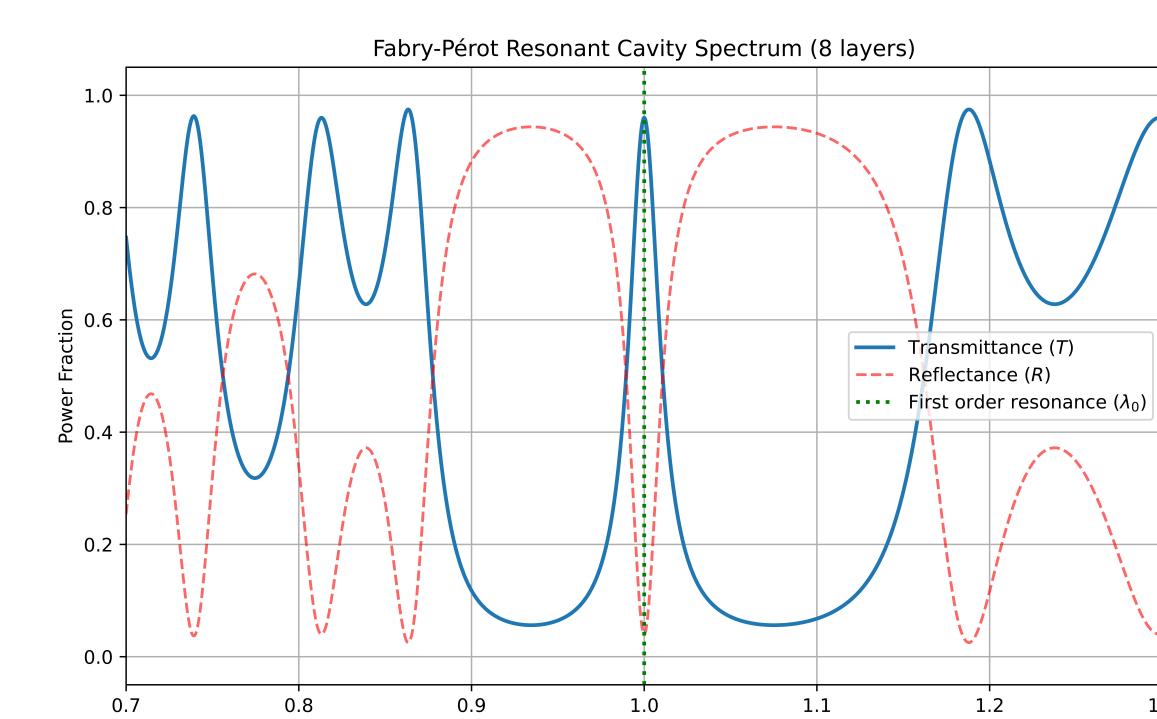
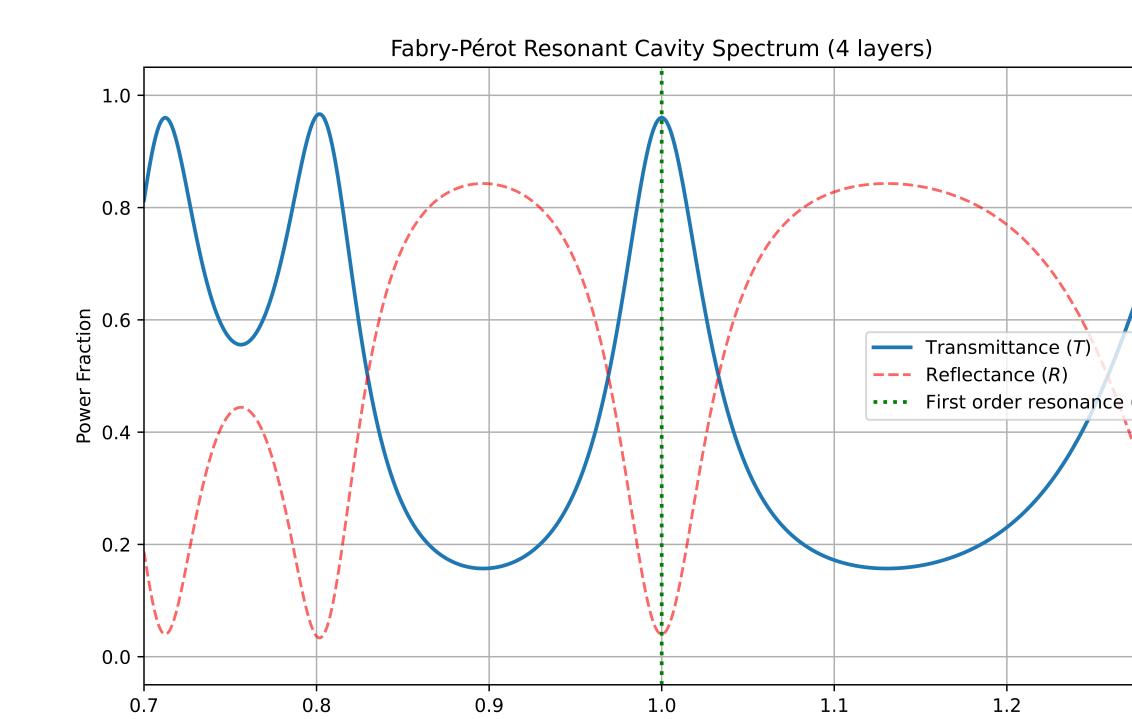
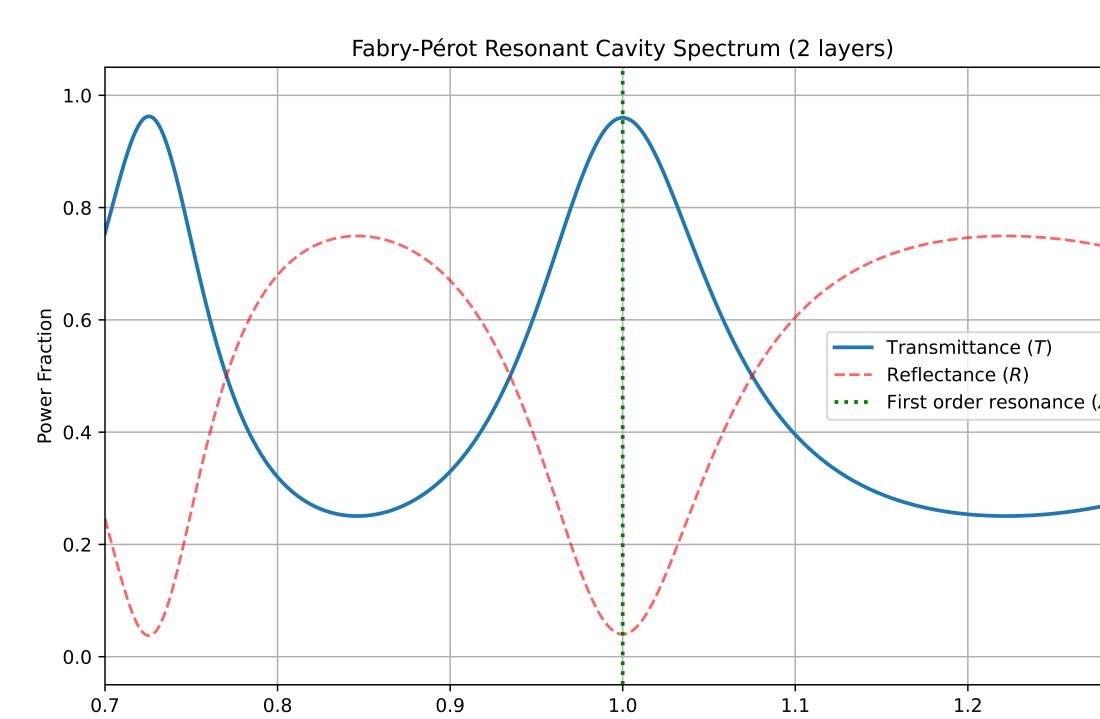


Resonancias Fabry-Pérot.

Modos resonantes para $m = 3$, 5 y 8.

Parámetros:

$n_{\text{inc}} = 1$, $n_H = 3,5$ = n_{cav} , $n_L = 2,9$, $n_{\text{sub}} = 1,5$, $\theta_i = 0^\circ$ y $L = \frac{\lambda_0}{2n_{\text{cav}}}$.



Discusión

Espejos de Bragg

- Al aumentar θ_i disminuye la componente normal de k_z , reduciendo la fase acumulada en cada periodo. Para satisfacer la condición de interferencia constructiva el sistema requiere una λ menor, produciéndose un desplazamiento al azul.
- Al incrementar el número de pares m , la reflectancia máxima R aumenta rápidamente y el ancho espectral de la banda $\Delta\lambda$ se amplía. Adopta una forma rectangular en torno al máximo.

Cavidades de Fabry-Pérot

- Incluso con pocos pares de capas se obtiene un notable estrechamiento espectral alrededor de las longitudes de resonancia.
- Las resonancias de orden superior se concentran hacia menores λ según (2); ajustando L puede imponerse $\lambda_0 = \lambda_1$. El aumento del número de capas introduce resonancias secundarias, ya que cada par puede comportarse como una cavidad débilmente acoplada.

Conclusiones

- Al crecer θ_i , la banda se desplaza a menores λ (corrimiento al azul).
- El aumento del número de pares m incrementa la reflectividad máxima y ensancha la banda prohibida.
- La posición espectral puede diseñarse ajustando índices y espesores, mostrando el alto control que permiten estas estructuras.
- El método de matrices de transferencia es una muy útil para modelizar sistemas multicapa y diseñar dispositivos fotónicos.
- Experimentalmente se observarían pérdidas por absorción y un comportamiento menos idealizado.

Referencias

- E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson, 2017, capítulo 9 (Applications of Single and Multilayer Films).
- J. Als-Nielsen and D. McMorrow, *Elements of Modern X-ray Physics*, 2nd ed. Wiley, 2011, capítulo 3 (Refraction and Reflection).
- P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, 2nd ed., Wiley-Interscience, (2005), capítulo 6 (Optics of Periodic Layered Media) sección 3 (Bragg Reflectors) y capítulo 7 (Some Applications of Isotropic Layered Media) sección 1 (Fabry-Perot Interferometers).
- A. Yariv and P. Yeh, *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*, 6th ed., Oxford University Press, (2006), capítulo 4 (Optical Resonators).

Código abierto

Disponible en el QR

- Disponible bajo licencia EUPL
- Versiones en Python y MATLAB

