

傾斜屈折率多層膜フィルタの光学特性

表面物性(馬場)研究室 前田 真
M003508 Maeda Shin

目的

波長分割多重化光通信において、通信容量を大幅に増強させた DWDM(dense wavelength division multiplexing)の研究が進んでいて、高い選択性を持つ光学フィルタ素子の開発が要請されている。最近では、スパッタ技術の進歩により、複数の光学材料を混ぜ合わせることで、任意の屈折率を持つ透明薄膜が作製できるようになってきて、例えば、TiO₂-SiO₂ の混合体から 1.47 から 2.42 の範囲の屈折率を持つ薄膜を形成できる。本研究では、光学厚さ 1/4 波長で高低の屈折率を繰り返し持つ構造の多層膜反射フィルタ(図1)を設計してみた。全 31 層を傾斜屈折部分、収束屈折部分、反射帯屈折部分に分けて、各部分の最適化を図った。

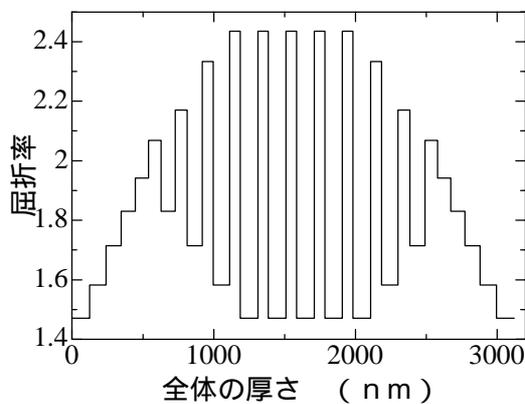


図1 31層多層膜

理論

多層膜は異なる屈折率の材料で構成され、層の境界で反射が生じるため、複雑な多重反射が生じる。多層膜全体の強度透過率 T および強度反射率 R は、各層の境界で電界と磁界の境界条件を満たすように伝達行列の積をとることにより次式で表わせる(マトリックス法)。

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} E_2 \\ H_2 \end{pmatrix} = M_2 M_3 \begin{pmatrix} E_3 \\ H_3 \end{pmatrix} = M_2 M_3 \cdots M_m \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = M_2 M_3 \cdots M_m \quad (2)$$

$$M_\ell = \begin{pmatrix} \cos \delta_\ell & i \frac{\sin \delta_\ell}{P_{s\ell}} \\ iP_{s\ell} \sin \delta_\ell & \cos \delta_\ell \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$P_{s\ell} = \frac{n_\ell}{c\mu_0} \quad \delta_\ell = \frac{2\pi n_\ell d_\ell}{\lambda} \quad (4)$$

$$T = (n_1 / n_{m+1}) |t|^2 \quad (5)$$

$$t = \frac{2P_{s1}}{(m_{22}P_{s,m+1} - im_{21}) + P_{s1}(m_{11} - im_{12}P_{s,m+1})} \quad (6)$$

評価関数

光学多層膜の屈折率を最適化するためには、適切な評価関数を選ぶ必要がある。信号チャンネルを分離するための反射フィルタは、その信号波長帯域(SUM2)では光を完全に反射させ(透過率=0)、それ以外の波長域(SUM1)では信号を透過させる(透過率=1)ような、透過スペクトル特性をもつのが理想である。

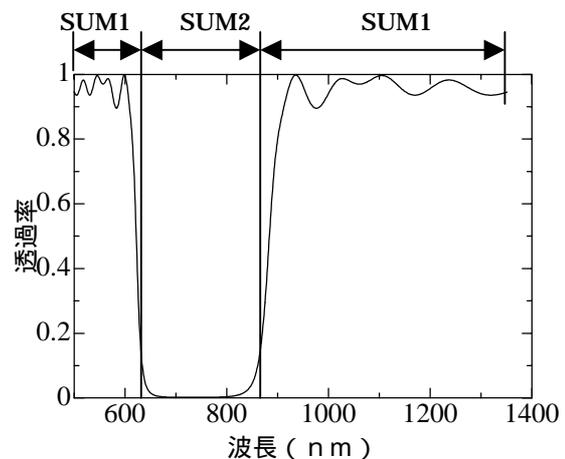


図2 SUM1・SUM2部分の決定

HL フィルタの反射帯幅は次式で与えられるので、この範囲を SUM2 とした。

$$\Delta\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right) = \frac{2}{\pi} \sin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right) \quad (7)$$

計算結果

まず、図 3 に、高屈折率層(H)および低屈折率層(L)を単純に 31 層重ねたフィルタ(点線)と、図 1 から傾斜屈折部分を取り去った 19 層(実線)、収束屈折部分を取り去った 22 層(鎖線)の透過スペクトルのそれぞれを計算した。

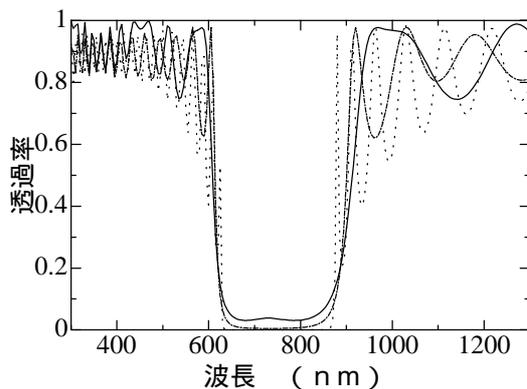


図3 各多層膜の透過スペクトル

HLH 層のみの反射膜は層数が増えるほど反射帯域の遮断性がシャープになったが、透過領域のリップルも増える。収束屈折部分、傾斜屈折部分を設けると、それぞれ反射バンドから近くと遠くのリップルを軽減することがわかった。

最適化結果

滑降シンプレックス法により、図1の 31 層多層膜を最適化した結果、図 4 のスペクトルが得られた。

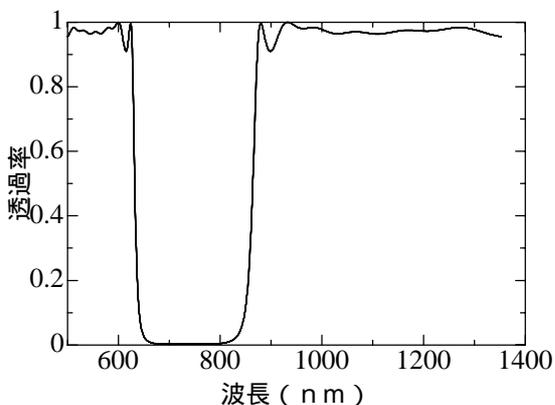


図4 最適化後の透過率

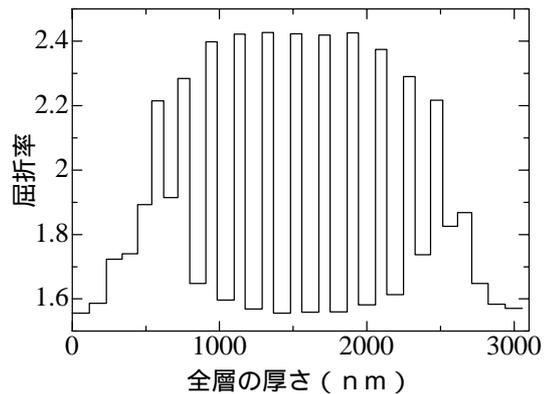


図5 最適化後の屈折率

図 4、5 は、SUM1+ SUM2 における理想フィルタ特性との差の 2 乗和が最小になるように最適化された結果である。実際、見た目(図 2、図 3 比較)にも数値的にも良いフィルタである。

最適化前(図 2)SUM1+ SUM2=19.469

最適化後(図 4)SUM1+ SUM2=1.457

今後の課題

・各吸収層による複素屈折率の置き換え

本研究では暗黙裏に多層膜を構成する各層における光の吸収は無いものとして、計算したが実際、各層いずれかに吸収があれば屈折率は複素屈折率で置き換える必要がある。

・最適化屈折率のデジタル化

多層膜を成膜する現場ではその構造通りの屈折率を成膜することは、屈折率種類が増えれば増えるほど困難になる。そこで最適化層の屈折率を離散的にしぼって最適化する課題が考えられる。

参考文献

- [1] NUMERICAL RECIPES
in FORTRAN, Second Edition
CAMBRIDGE, Willam H, Press 著
- [2] 薄膜・光デバイス 東京大学出版会
吉田貞史 矢嶋弘義 著 1994,9,20
- [3] 光学入門 宮本健郎 著 岩波書店
1995,4,7