

多層膜を用いた吸収型角度選択フィルター

Absorptive angular-selective filters using multilayers

豊田中研¹, デンソーウェーブ², デンソー³ ○竹田 康彦¹, 丸谷 太一², 田中 秀幸³,

Toyota Central R&D Labs.¹, Denso Wave², DENSO CORP.³

○Yasuhiko Takeda, Taichi Maruya², Hideyuki Tanaka³

E-mail: takeda@mosk.tytlabs.co.jp

低屈折率/高屈折率誘電体多層膜からなるバンドパスフィルター (BPF)、ショートパスフィルター (SPF)、ロングパスフィルター (LPF) などは、微細加工技術を要しないという、回折格子や 2, 3 次元フォトニック結晶を用いた素子と比べての実用上の大きな利点をもつため、様々な用途に用いられる。これらは通常垂直入射にて用いられるが、位相差の観点からは、斜入射は長波長と等価であるので、所定の波長に対する角度選択フィルター (Angular-selective filter, ASF) として用いることができる。我々は、これを、レーザーを受光する無線給電用光電変換素子の光閉じ込めに利用し、ASF としての設計指針を示した [1-3]。しかし、光検出器の信号/雑音比 (SNR) の向上に用いる場合、透明誘電体多層膜からなる ASF は阻止域の入射光を反射するので、その一部は迷光となって SNR を低下させる。この影響は、多数の素子が小型の筐体を実装される場合に特に顕著となる。従って、阻止域の入射光を反射ではなく吸収する ASF を実現することができれば、SNR が向上する。そこで、上記の反射型 ASF に薄い吸収層を組み合わせて、吸収型 ASF を設計した。

多層膜 ASF 中では、光の電場強度 2 乗 ($|E|^2$) に干渉パターンが生じる。そこで、透過域の入射光に対しては $|E|^2$ が小さく、阻止域に対しては $|E|^2$ が大きいような位置に吸収材料の層を挿入すれば、阻止域の入射光が選択的に吸収される。ただし、誘電体層あるいは干渉パターンの 1/2 周期よりも十分に薄いことが必要であり、かつ、その薄い層によって阻止域の光が十分に吸収されること、更に、誘電体層/吸収層界面の反射率が小さいことが求められる。従って、吸収材料の複素屈折率 $n + ik$ が $n = k$ を満たすことが必要条件である。Cr などの遷移金属の多くはこの条件に合致する。一方、PbS などの誘電体吸収材料は $n \gg k$ であるため光吸収が不十分であり、また、Au などの貴金属は $n \ll k$ であるため界面反射率が大きいので不適である。

波長 905 nm、入射角 $\theta = 0-10^\circ$ の入射光を透過、 $10-30^\circ$ を吸収する ASF を設計する。信号光強度 I_{signal} 、雑音光強度 I_{noise} を、透過率 $T(\theta)$ 、吸収率 $A(\theta)$ を用いて次のように定義し、 $I_{\text{signal}} \geq 0.65$ を保ちつつ I_{noise} が最小となるような構成を求め、各層の厚さを最適化した。

$$I_{\text{signal}} = \int_0^{10} d\theta \sin \theta \cos \theta T(\theta) / \int_0^{10} d\theta \sin \theta \cos \theta, \quad I_{\text{noise}} = \int_{10}^{30} d\theta \sin \theta \cos \theta (1 - A(\theta)) / \int_{10}^{30} d\theta \sin \theta \cos \theta$$

結果を図 1 に示す。32 層 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ からなる 2 重共振器 BPF の最表面の $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 層の直下に Cr 層を挿入した構成である。このとき $I_{\text{noise}} = 0.16$ であり、上記定義による SNR の相対値は、反射型 ASF の場合に比べて 4.1 倍にまで向上する。透過域がより広い特性 (透過/阻止: $0-30^\circ/30-60^\circ$)、更には、垂直に近い入射光を吸収する特性 (透過/阻止: $10-60^\circ/0-10^\circ$) も、BPF に替えてそれぞれ SPF, LPF を基にした構成を用いることにより得ることができる。

[1] Y. Takeda, et al., Appl. Opt. **56**, 5761 (2017).

[2] Y. Takeda, et al., JJAP **57**, 08RF05 (2018).

[3] N. Yamada, et al., JJAP **57**, 08RF07 (2018).

(a) $1.29\text{SiO}_2/1.13\text{TiO}_2/\text{Cr}(9.8 \text{ nm})/(0.82\text{SiO}_2/1.13\text{TiO}_2)^3$
 $1.98\text{SiO}_2/(1.13\text{TiO}_2/0.82\text{SiO}_2)^7 1.13\text{TiO}_2/1.98\text{SiO}_2/$
 $(1.13\text{TiO}_2/0.72\text{SiO}_2)^3 1.01\text{TiO}_2/\text{substrate}$

(b) $\theta = 5^\circ$

(c) $\theta = 20^\circ$

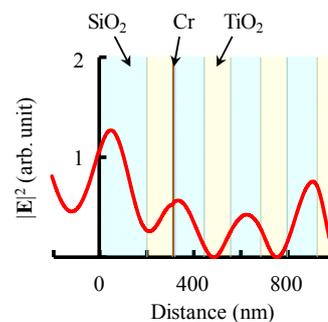
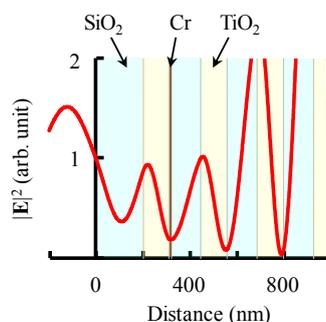
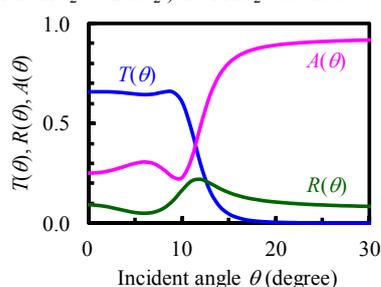


図 1 (a) Configuration of the absorptive ASF, and transmissivity $T(\theta)$, reflectivity $R(\theta)$ and absorptivity $A(\theta)$. The optical thicknesses of the $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ layers are shown in units of $\lambda_0/4$ ($\lambda_0 = 905 \text{ nm}$). (b), (c) Electric field (E) at around the surface of the ASF.