

1次元フォトニック結晶を用いた角度選択フィルター

Angle-selective filters using one-dimensional photonic crystals

豊田中研¹, 名大² ○竹田 康彦¹, 飯塚 英男¹, 伊藤 忠¹, 山田 登¹, 伊藤 博², 元廣 友美²

Toyota Central R&D Labs.¹, Nagoya Univ.²

○Y. Takeda¹, H. Iizuka¹, T. Ito¹, N. Yamada¹, H. Ito², and T. Motohiro²

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

誘電体多層膜からなる波長選択フィルターが広く用いられている。これは通常垂直入射で用いられる。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 (Angle-selective filter, ASF) として用いることができる[1]。ただし、ASF のための最適化が必要である。

透過/反射の閾値 ϕ_0 が小さい場合には、バンドパスフィルター (BPF) が用いられる。通常の BPF は、光学厚さ $\lambda/4$ の高屈折率/低屈折率材料の多層膜からなるブラッグ反射鏡により光学厚さ $\lambda/2$ 層を挟んだファブリーペロ共振器であり、透過帯域を拡げるためには 2 重共振器 (double cavity, 2C-) BPF が用いられる。ただしこれを ASF として用いると、図 1 に示されるように、反射領域にある入射角 $\phi > 60^\circ$ の範囲で光が透過してしまう、即ち「漏れ」が生じる。共振器層を薄く、ブラッグ反射鏡層を厚くすれば、「漏れ」が低減される。

2C-BPF の特性を 1 次元フォトニック結晶の観点から考察する。光子エネルギー (ε) – 平行方向の波数 (k_x) の分散を垂直方向に射影したものが図 2 である。ブラッグ反射鏡層に起因するフォトニックギャップ中に、共振器層によるギャップ内準位が生じ、これが波長・角度選択機能の発現要因である。垂直入射、BPF として用いる場合には、 $k_x = 0$ 上を ε 軸方向に走査する。一方、今の目的である特定波長、ASF の場合には、 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 上 (ε_0 は入射光のエネルギー) を k_x 軸方向に変化する際の伝搬モードの有無を利用する。通常用いられる各層の厚さが $\lambda/4$, $\lambda/2$ の場合は、 p 偏光、 $\phi \geq 48^\circ$ はフォトニックバンド内、即ち伝搬モードにあるため、「漏れ」が生じる。ブラッグ反射鏡層を厚くするとフォトニックバンドは低エネルギー側にシフトする。このシフトを共振器層を薄くして補償することによって、通常の場合と同様に (ε, k_x) = ($\varepsilon_0, 0$) 近傍にギャップ内準位が位置する。このとき、 p 偏光、 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 上の点がフォトニックバンド内となるのが $\phi \geq 64^\circ$ にまで大きくなるので、「漏れ」が抑制される。

ϕ_0 が大きい場合には、ショートパスフィルター (SPF) が用いられる[2]。光学厚さ $\lambda/4$ の高屈折率/低屈折率材料の多層膜であるブラッグ反射鏡からなる通常の SPF を用いると、 ϕ_0 が偏光に依存する。 p 偏光の方が ϕ_0 が大きいので、図 3 に示される透過率の ϕ 依存性には肩が生じるので、これを解消することが必要である。高屈折率層を薄く、低屈折率層を厚くすると、透過/反射のコントラストが若干低下するものの、 p, s 偏光がほぼ同じ ϕ_0 で透過から反射に転じる。この設計に基づき $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 40 層の試料を作製し、波長 1064 nm 光に対して偏光に殆ど依存しない ASF 特性が得られることを実証した。

特定波長に対する ASF は、太陽光励起レーザーなどの単色光照射用光電変換素子の変換効率向上や[3]、指向性センサーのノイズ低減、感度向上、発光素子の指向性向上[4]に利用することができる。

本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業－先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の助成を受けた。

[1] Y. Takeda, et al., JAP **116**, 014501 (2014). [2] Y. Takeda, et al., Appl. Opt. **56**, 5761 (2017). [3] T. Motohiro, et al., JJAP **56**, 08MA07 (2017). [4] Y. Takeda, et al., JAP **116**, 124506 (2014).

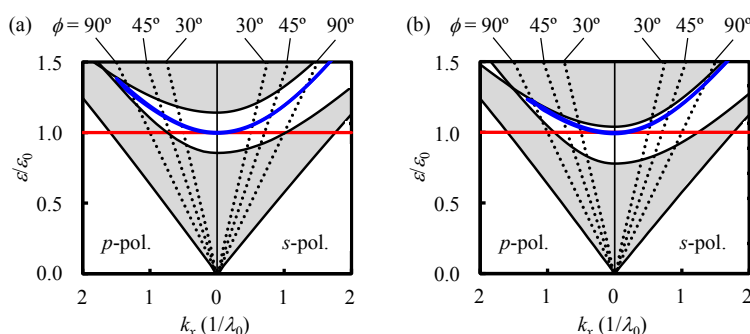


Fig. 2 Photonic bands of the 40-layered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 2C-BPFs designed for $\phi_0 = 10^\circ$. (a) Conventional. (b) Optimized.

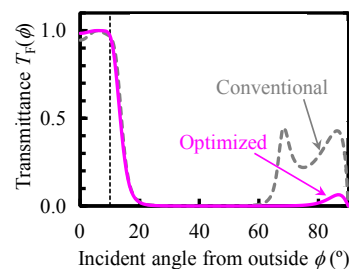


Fig. 1 Transmittance of the 34-layered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 2-C BPFs designed for $\phi_0 = 10^\circ$.

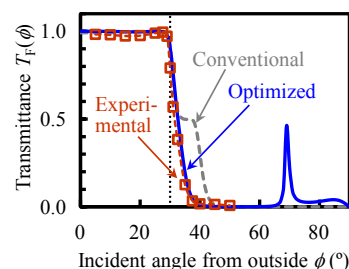


Fig. 3 Transmittance of the 40-layered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ SPFs designed for $\phi_0 = 30^\circ$.