

任意屈折率膜を用いたオプティカルフィルターの設計と 遮蔽マスク機構を用いたスパッタリングによる作製

豊原 延好・和田 順雄・菊池 慶・川俣 健

オリンパス(株) 〒192-8512 八王子市久保山町 2-3

Design of Optical Filters Using Arbitrary Index Film and Fabrication of the Optical Filter with Two Materials Mixed Layers by Sputtering Using the Shielding Plate

Nobuyoshi TOYOHARA, Yorio WADA, Kei KIKUCHI and Ken KAWAMATA

Olympus Co., Ltd., 2-3 Kuboyama-cho, Hachioji 192-8512

Newly designed minus filters using arbitrary refractive index films are presented. The filters show no ripples in the transmittance and have sharp rejection-band edges. Also, we fabricated one of these minus filters with TiO_2 , SiO_2 , and mixed layers by sputtering. Mixed layers were fabricated by using the shielding plate to adjust each open space between target and substrate.

Key words: optical filters, design, fabrication, no ripples, mixed layers

1. はじめに

従来のオプティカルフィルターは、屈折率が高い層と低い層が交互に積み重なって構成されている。これに対し、ルゲートフィルターは、屈折率が膜厚方向に連続して周期的に変化するよう構成された膜で、阻止帯域以外で分光特性に不要な振動（リップル）が発生せず、従来のオプティカルフィルターでは不可能であった光学特性を実現することができる。

ルゲートフィルターの理論や設計手法は、1970年代から研究されている¹⁻³⁾。机上検討が先行したが、屈折率を連続的かつ周期的に変化させたフィルターを大量生産することは、技術的難易度がきわめて高い。そこで筆者らは、ルゲートフィルターと同等の分光特性を有し、製造容易な設計手法について検討した。

ルゲートフィルターの製造については、CVD法やスパッタリング法による検討例が、近年報告されている⁴⁻⁸⁾。スパッタリング法においては、2種類の材料を混合することでその中間の屈折率層を作製することが試みられてきた。例えば、同時放電している2種類のスパッタリングターゲットへの投入パワーを変更し混合比を変えることで、

2種類の材料間の屈折率層を作製することが可能である^{5,7)}。また、金属ターゲットから形成した膜を酸素プラズマにより完全酸化膜とすることで、生産性にすぐれた成膜手法も発表されている⁶⁾。しかしながら、これらの手法では、混合比が大きく異なる中間屈折率層を作製する場合には、混合比が小さく低パワーとなる材料側の放電や膜厚分布を安定に維持することが難しい。そこで筆者らは、各ターゲットに投入するパワーなどの成膜条件を一定に保持したまま、各ターゲットと基板との間に設けた遮蔽マスクの開口幅を変えて混合比を制御するシンプルな手法を検討した。この手法は、単層～数層のみならず、屈折率の安定性を必要とする数十層以上のオプティカルフィルターに適用できる、安定した混合膜の成膜技術としての完成を目指している。

2. オプティカルフィルターの設計

Fig. 1 (a) に、3つの屈折率材料を用いて設計したマイナスフィルター屈折率プロファイルを示す。横軸は光学膜厚（単位：波長 λ ）で縦軸は屈折率を表す。なお、Fig. 1～Fig. 6では、フィルターの両側を基板で挟んだものとして、

E-mail: n.toyohara@ot.olympus.co.jp

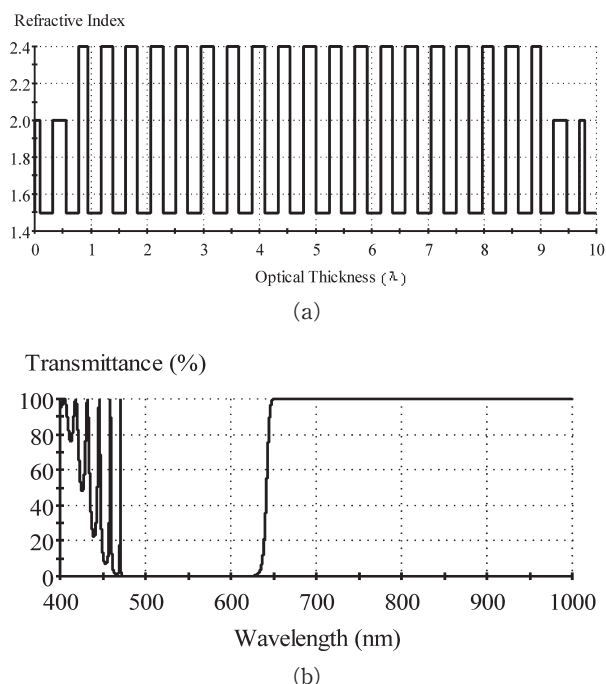


Fig. 1 (a) Refractive index profile of conventional optical filter using three materials. Design wavelength $\lambda = 550$ nm. (b) Transmittance spectrum of the conventional optical filter.

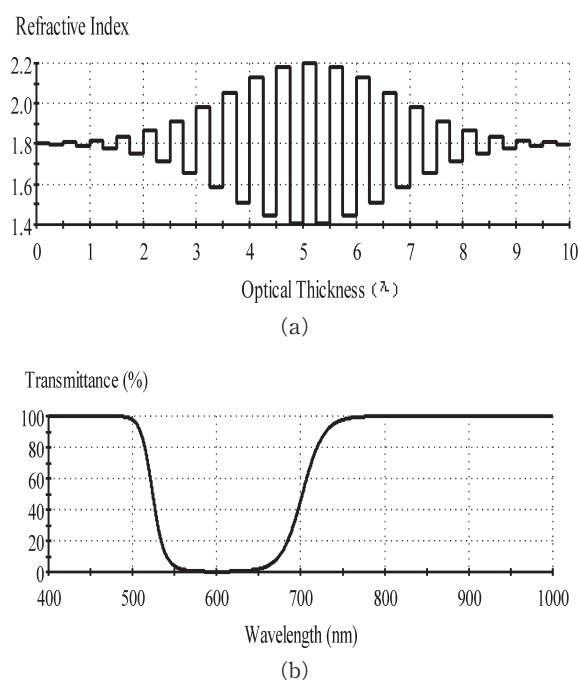


Fig. 3 (a) Refractive index profile of step-like index layers. Optical thickness of each layer is 0.25λ . Design wavelength $\lambda = 600$ nm. (b) Transmittance spectrum of step-like index layers.

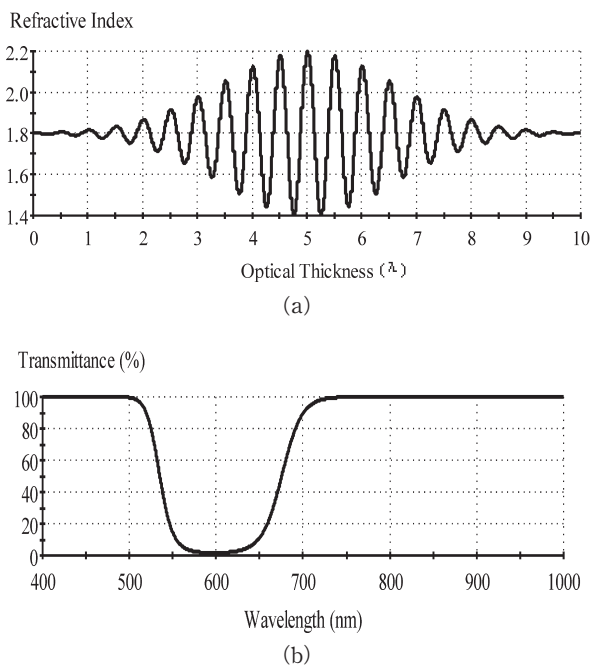


Fig. 2 (a) Refractive index profile of rugate filter. (b) Transmittance spectrum of rugate filter.

設計検討を行った。フィルターの両側を基板で挟んだ場合の概念図を Fig. 7 (a) に示す。

Fig. 1 (b) には、分光透過特性を示す。阻止帯域より短波長側の透過帯域にリップルが生じてしまっている。片側

のみのリップルを抑えることは比較的容易だが、阻止帯域の両側のリップルを抑えるのは、2～3種類の屈折率を用いた設計では困難である。

一方、屈折率が膜厚方向に連続的に変化するルゲートフィルターにおいては、Fig. 2 (a) に示すウェーブレットという形の屈折率プロファイルにすれば、Fig. 2 (b) のようにリップルを完全になくすことが可能である。

しかしながら、一般的な成膜装置では、屈折率を連続的に膜厚方向（すなわち時間方向）に変化させるのは非常に困難である。筆者らは、Fig. 3 (a) のように、ルゲートフィルターの屈折率プロファイルの包絡線をデジタル的に分割して構成した場合でも、ルゲートフィルターと同様にリップルを抑えることができることを見いだした。このオプティカルフィルターでは、屈折率は連続的ではなく、ステップ的でかつ周期的な屈折率差をとりつつ徐々に変化し、加えて光学的膜厚は全層同じになっているため、従来のルゲートフィルターよりも比較的容易に成膜できると期待できる。

阻止帯域と透過帯域との境界部をさらに急峻な特性にするには、層数を増加させる必要がある。Fig. 4 (a) のようにプロファイルの中央部分を高屈折率層 (H) と低屈折率層 (L) の繰り返し層で構成することにより、境界部を急峻にすることができるが、同時に阻止帯域の両側にリップ

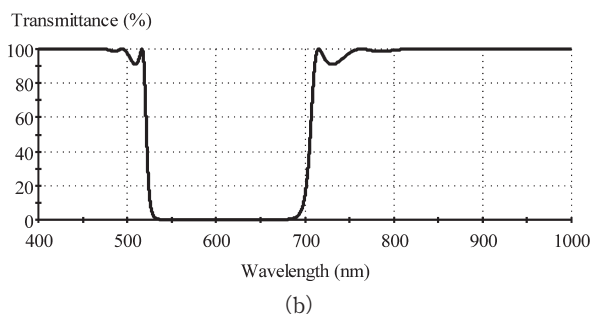
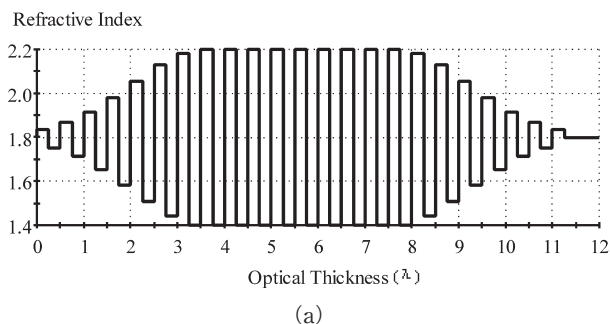


Fig. 4 (a) Refractive index profile of sharp edge filter. Optical thickness of each layer is 0.25λ . $\lambda=600$ nm. (b) Transmittance spectrum of sharp edge filter.

ルが生じてしまう (Fig. 4 (b)). しかし, Fig. 5 (a) の矢印で示す層に, 隣接する層と屈折率がやや異なる層を挿入することで, Fig. 5 (b) に示すようにリップルを完全を抑えた分光透過特性を得ることができる. これは, 屈折率の変化する部分と繰り返し層の間に調整層として変調部 (屈折率がやや異なる層) を設けることで, 両者のずれで発生するリップルを打ち消すことができた⁹⁾. 一方, 屈折率の変化する部分や繰り返し層内に屈折率が異なる層を挿入しても, その両者の形成する特性を崩すのみで, リップルを抑える効果はみられない.

また, 低屈折率側を一定として, 高屈折率側のみの屈折率を変化させた設計例を Fig. 6 (a) に示す (フジヤマ・プロファイル). このような設計でも, Fig. 6 (b) に示すような透過帯域にリップルのない分光透過特性を得ることができる.

これまで示した設計例では, フィルターの両側を基板で挟んだ構成としてきたが, 基板を接着する工程を省略するため, 入射側を空気とすることも可能である. 入射側を空気, 逆側を基板とした概念図を Fig. 7 (b) に示す. 入射側を空気とした Fig. 8 (a) に設計例を示す. 空気側に 8 層の反射防止層を追加することで, 各層の構成 (屈折率と膜厚) を変更することなく, Fig. 8 (b) のようにリップルのほとんどない分光透過特性を得ることができる.

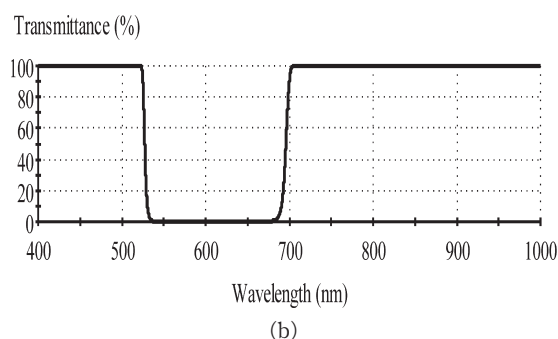
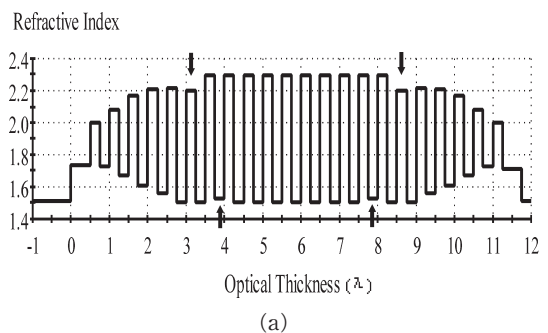


Fig. 5 (a) Refractive index profile of sharp edge filter with inserted layers whose index is lower/higher than neighboring high/low index layers. Optical thickness of each layer is 0.25λ . $\lambda=600$ nm. (b) Transmittance spectrum of sharp edge filter.

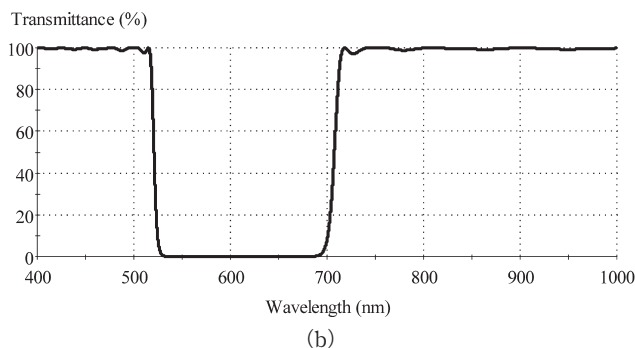
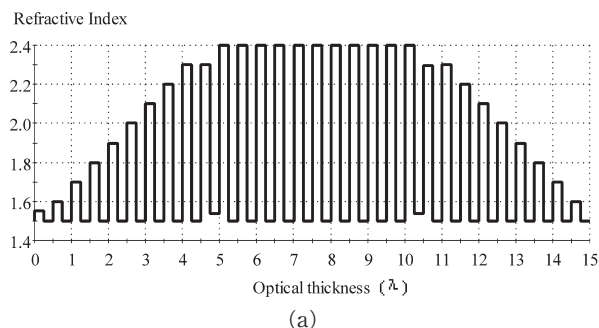
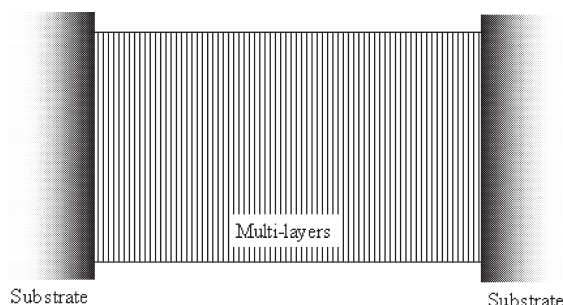
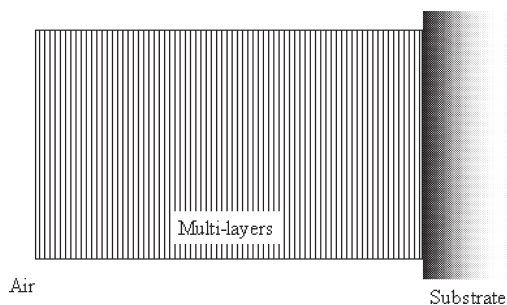


Fig. 6 (a) Refractive index profile. Only the high index layers are varied ('Fujiyama'-profile). Optical thickness of each layer is 0.25λ . $\lambda=600$ nm. (b) Transmittance spectrum of the filter of (a).



(a)



(b)

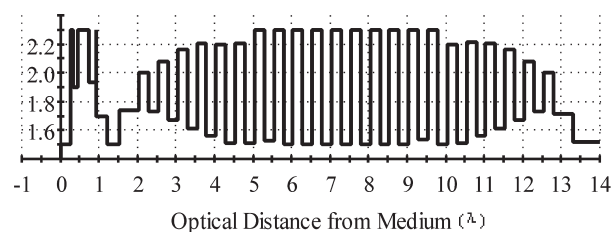
Fig. 7 (a) Cross section, both sides are substrate. (b) Cross section, substrate (right side) and incident medium (left side).

3. オプティカルフィルターの作製

3.1 実験装置

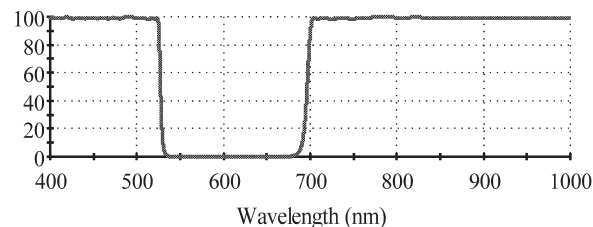
2章で検討した構成のオプティカルフィルターを作製するために、スパッタリング法により2種類の材料の混合膜を作製することで任意の中間屈折率層を作製する装置を考案した。Fig. 9に装置の構成を示す。2種類のスパッタリングターゲットを有し、スパッタリングターゲットに対向する位置に複数の基板を配置した。成膜中には、この基板は基板ホルダーで保持され、2種類のターゲットに対向する位置を順次通過するように回転する。それぞれのターゲットと基板の間に、遮蔽マスクを設け、各ターゲットから基板に到達する量を基板の回転方向に対して可変できるように、開口幅を任意設定できる構造とした。この機構により、それぞれの遮蔽マスクの開口幅を変えることで、基板上に形成される混合膜の混合比を任意に変えることができ

Refractive Index



(a)

Transmittance (%)



(b)

Fig. 8 (a) Refractive index profile of sharp edge filter. One side of the filter is the air. $\lambda = 600$ nm. (b) Transmittance spectrum of the filter of (a).

る。遮蔽マスクの開口幅条件を変えて、あらかじめ設計された屈折率で所定の膜厚を数十層以上積層することで、一度に複数の基板上にオプティカルフィルターを作製することが可能である。遮蔽マスクの位置出し精度は、設定開口幅に対して ± 0.05 mm以下である。

3.2 混合膜の作製および評価

ターゲット材料として、 $\phi 4$ インチのシリコンおよびチタン低級酸化物を用い、直流印加方式の反応性スパッタリング法により成膜した。投入パワーは両材料とも 400 W、スパッタリングガスにアルゴン、反応性ガスとして酸素を真空装置内に導入し、トータル圧力 1 Pa 以下でスパッタリングを行った。なお、遮蔽マスクの開口幅は、 $\phi 4$ インチのターゲットに対して最大 80 mm 以下で調整可能となっている。基板として、OHARA 製の光学ガラス (BSL-7) を使用した。

作製した膜の屈折率および膜厚の評価には、分光エリプソメーター (V-VASE, J. A. Woollam 製) を用いた。遮蔽

Table 1 Open space size, physical thickness, refractive index and extinction coefficient of the layer.

	Open space (mm)		Physical thickness (nm)	Index @ 500 nm	Extinction coeff. k @ 500 nm
	SiO ₂	TiO ₂			
SiO ₂	—	—	175.9	1.467	0
SiO ₂ +TiO ₂ mixed layer	40.0	70.0	235.5	1.859	0
SiO ₂ +TiO ₂ mixed layer	16.0	70.0	86.7	2.104	1.3E-04
SiO ₂ +TiO ₂ mixed layer	5.0	70.0	57.8	2.335	1.4E-04
TiO ₂	—	—	112.2	2.530	5.9E-04

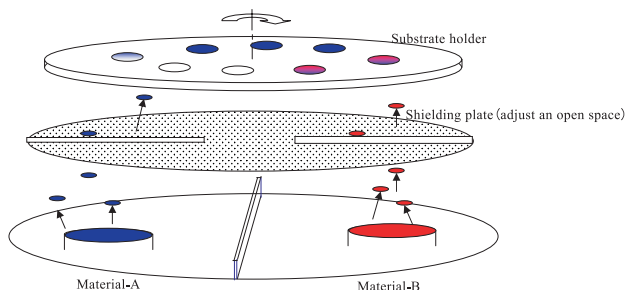


Fig. 9 Schematic diagram of the sputtering system.

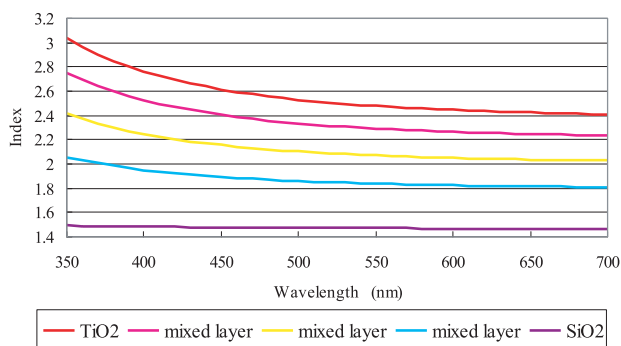


Fig. 10 Refractive indices of TiO_2 , SiO_2 and mixed layers.

マスクの開口幅に対する膜厚，屈折率，消衰係数を Table 1 に示す。また， TiO_2 膜， SiO_2 膜および混合膜 3 条件についての屈折率の波長分散を Fig. 10 に示す。混合膜 3 条件はそれぞれ波長 500 nm における屈折率が 1.859，2.104，2.335 となる混合膜である。

2 種材料それぞれで得られる TiO_2 膜， SiO_2 膜の屈折率範囲内における混合膜を，遮蔽マスクによる開口幅を変えることによって混合比を変えることで，3 つの異なる屈折率の膜を作製することができた。消衰係数は，波長 500 nm において TiO_2 膜で $5.9\text{E-}4$ ，混合膜で $1.4\text{E-}4$ 以下であり，問題のないレベルであった。

TiO_2 側の開口幅が 70 mm 一定で， SiO_2 側の開口幅が 5 mm の場合に屈折率は 2.335， TiO_2 側の 2.530 に向けて SiO_2 側の開口幅を 5 mm 以内で 0.195 を制御することから，1 mm で 0.039 程度変化する。装置起因の屈折率の誤差は， ± 0.005 以下にはしたいことから，遮蔽マスクの位置出し精度 ± 0.05 mm 以下は，余裕をもった仕様といえる。

3.3 オプティカルフィルターの作製

Fig. 9 の装置を用いて，フジヤマ・プロファイルを単純化したフィルターを作製した。屈折率プロファイルを Fig. 11 (a) に，分光透過特性を Fig. 11 (b) に示す。

基板側から数えて 2，4， $\dots$ ，14 層目は混合膜ではなく

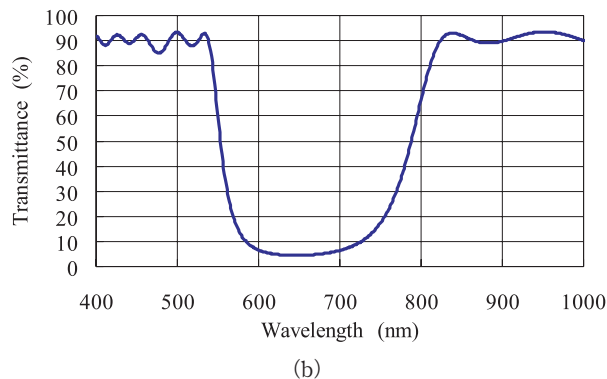
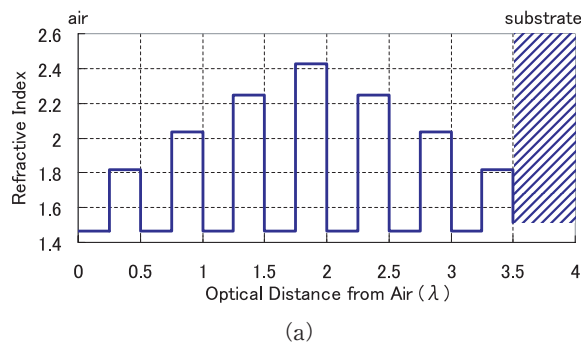


Fig. 11 (a) Refractive index profile of the optical filter with 14 layers ('Fujiyama'-profile). Optical thickness of each layer is 0.25λ . $\lambda = 650$ nm. (b) Design transmittance spectrum of the optical filter.

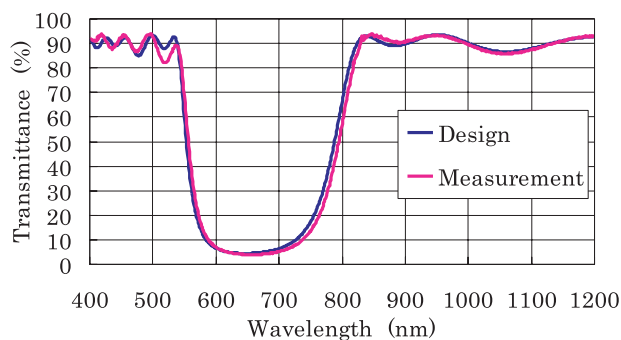


Fig. 12 Spectra of design and measured transmittance.

純粋な SiO_2 膜であるため， TiO_2 を成膜する側のターゲットにはパワーを投入していない。逆に，7 層目は純粋な TiO_2 膜であるため， SiO_2 を成膜する側のターゲットにはパワーを投入していない。それ以外の層では，各ターゲットへの投入パワーやガス圧は一定とし，遮蔽マスクの開口幅のみを変化させた。膜厚は，成膜時間で制御した。

試作したフィルターの分光透過特性を，設計値と比較して Fig. 12 に示す。可視から近赤外波長領域において，ほぼ設計値と一致した。Fig. 13 には，試作したフィルターの電子顕微鏡（日立製作所製 S-4700）による断面構造を

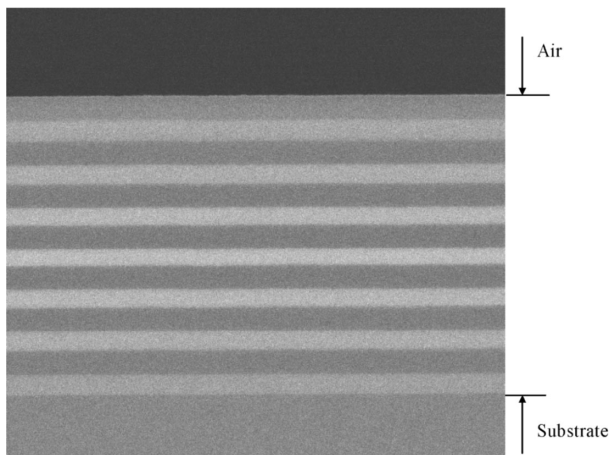


Fig. 13 SEM micrograph of the filter.

示す。各層の界面がはっきり確認でき、かつ濃淡があることから、層間で主たる組成にはっきりとした差があることがうかがえる。

4. ま と め

屈折率を連続的ではなくステップ的に変化させる構成により、ルゲートフィルターと同様に透過帯域でリップルのないオプティカルフィルターを設計することができた。このフィルターでは、高屈折率層と低屈折率層の2種類だけでなく、中間の任意の屈折率層が必要となる。

遮蔽マスクの開口幅を変えるだけのシンプルなオペレーションで、任意の屈折率層を実現できるスパッタリング装置を考案した。この装置を用いて、簡単な設計例について作製し、有用性を確認することができた。

今後は、オプティカルフィルター作製における繰り返し再現性などについても、さらに検討を重ねていく予定である。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究として実施されたものである。

文 献

- 1) W. H. Southwell: "Using apodization functions to reduce sidelobes in rugate filters," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 5091-5094.
- 2) W. E. Johnson and R. L. Crane: "Introduction to rugate filter technology," *Proc. SPIE*, **2046** (1993) 88-108.
- 3) P. G. Verly, J. A. Dobrowolski, W. J. Wild and R. L. Burton: "Synthesis of high rejection filters with the Fourier transform method," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 2864-2875.
- 4) P. L. Swart, B. M. Lacquet, A. A. Chitchebakov and P. V. Bulkin: "Automated electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition system for the growth of rugate filters," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **18** (2000) 74-78.
- 5) 王 新栄, 増本 博, 染野義博, 平井敏雄: "屈折率傾斜 SiO_2 - TiO_2 薄膜の光学特性", *日本金属学会誌*, **62** (1998) 1069-1074.
- 6) 唐 駿: "TSH 反応スパッタリング法による光学薄膜への応用", *オプトロニクス*, **7** (1998) 160.
- 7) 徳弘節夫, 太田達男, 中野智史: "スパッタリング法による高機能光学薄膜作製", *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT*, **1** (2004) 95.
- 8) O. Stenzel, S. Wilbrandt, R. Leitel, D. Gabler and N. Kaiser: "Non-optical and optical characterization of gradient index layers and rugate filters," *Topical Meeting on Optical Interference Coatings*, Tucson, USA (Optical Society of America, 2004).
- 9) Y. Wada, N. Toyohara, Y. Shinta, S. Iura, K. Takahashi and K. Kawamata: "Design of minus filters using arbitrary refractive index films," *Topical Meeting on Optical Interference Coatings*, Tucson, USA (Optical Society of America, 2004).