

# 新規狭帯域バンドパスフィルタの検討

井上 純一\*

## 【要 旨】

光導波路薄膜表面にサブミクロンサイズの微細周期構造の加工を施すことで空間光に対する狭帯域フィルタが得られる。このようなフィルタリング現象は導波モード共鳴と呼ばれる。最近、新規構造により入射角度低依存の導波モード共鳴バンドパスフィルタが提案された。本研究では光学評価用の素子作製に先駆けて、シリコン基板への電子ビーム直接描画リソグラフィと反応性イオンエッチングによる微細周期構造の作製が検討された。

## 1 はじめに

導波モード共鳴 (guided mode resonance : GMR) フィルタは、基板上の光導波路にサブ波長周期の表面周期構造 (グレーティング) を集積することで得られる波長フィルタである (図1)<sup>1)</sup>。空間光を入射すると、一部がグレーティングによって導波路内を伝搬する光波 (導波光) に結合され、導波光はグレーティングによって導波路から空気・基板側へ結合放射される。その際基板側への放射光が、基板側へ透過しようとする入射光と打ち消し合う。その結果、強い反射を得られる。また、複数モードの導波光への結合を利用することで狭帯域透過特性を示す GMR フィルタも得られる<sup>2)</sup>。

波長フィルタとして一般的な誘電体多層膜フィルタが基板表面に垂直な方向に周期構造を有するのに対し、GMR フィルタは基板表面に水平な方向に周期構造を有するため、光波との作用を制御するパラメータが多く、設計自由度が高いという利点があり、近年盛んに応用検討がなされている。

通常 GMR フィルタの特性は、光波の入射角度に依存性があり、角度変化に対してフィルタ波長のシフトや効率低下を引き起こす。図1に示した

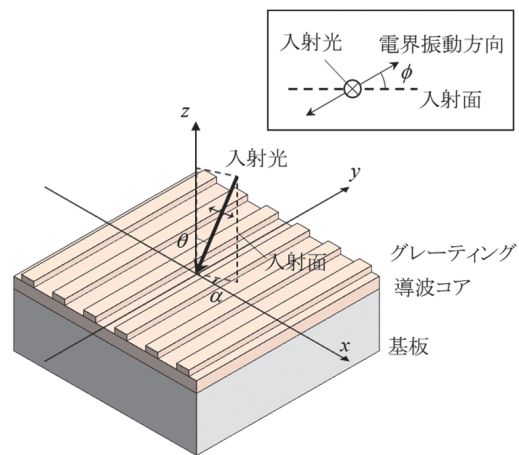


図1 GMR フィルタの基本構成と入射光の傾斜角 $\theta$ 、方位角 $\alpha$ 、偏光角 $\phi$

ように、入射光を規定する3つの角度を考える。傾斜角 $\theta$ は入射面内での伝搬方向の傾き、方位角 $\alpha$ は入射面の基板上での回転、偏光角 $\phi$ は入射光電界の振動方向を表す。フィルタ特性が狭帯域なほど、傾斜角ずれに対して敏感になる。またグレーティング構造の90°回転非対称性 (図1において $x$ 方向と $y$ 方向に沿った構造が異なること) により、方位角ならびに偏光角依存性がある。一方、応用によってはこれら角度変化に対して鈍感であることが望ましい場合がある。

そこで我々は、方位角・偏光角に依存せず傾斜角依存性の低い狭帯域透過型 GMR フィルタを提案し、これまでに数値計算による特性予測を示してきた<sup>3)</sup>。本研究では、提案素子実現に向けて、

\* 京都工芸繊維大学 電気電子工学系  
助教

電子ビーム (EB) リソグラフィとドライエッチングによるグレーティング作製を検討した。

## 2 提案デバイス

### 2.1 構造設計例

図2に提案した透過型 GMR フィルタの設計例を示す。透過波長は  $1.5\mu\text{m}$  帯とした。 $\text{SiO}_2$  ガラス基板に Si グレーティングを形成した構造である。高屈折率のグレーティング層は導波コアとしても機能する。複数の高次導波モードをサポートできるように Si 層は  $580\text{ nm}$  と厚くした。グレーティングは  $x$  方向と  $y$  方向の形状が等しく、 $840\text{ nm}$  の一周中に幅が  $550\text{ nm}$  と  $90\text{ nm}$  の二つの異なる高屈折率部分を持った二重周期構造である。

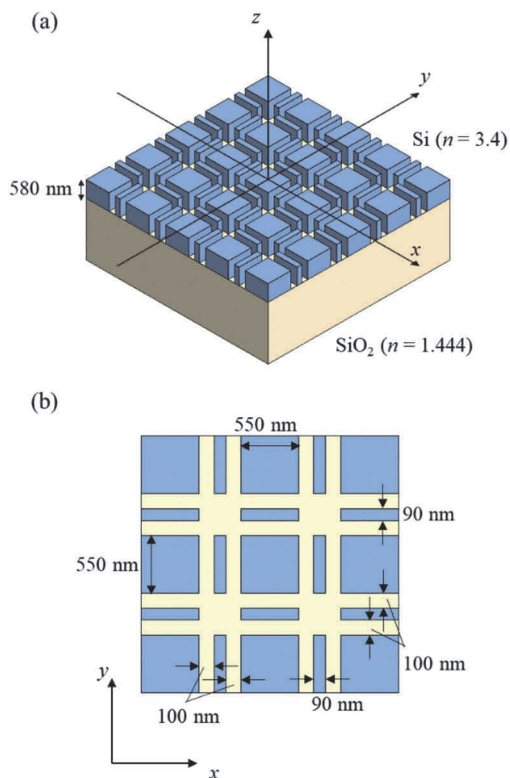


図2 提案している角度低依存の狭帯域透過型 GMR フィルタの設計例  
(a) 鳥瞰図 (b) 上面図

### 2.2 特性予測

以下に厳密結合波解析 (RCWA) シミュレーションの結果を示す。図3は、傾斜角  $\theta$ 、方位角  $\alpha$ 、偏光角  $\phi$  が共に  $0^\circ$  のときの反射・透過スペクトルである。共鳴波長は  $1.517\mu\text{m}$  であり、ピーク透過率  $98\%$ 、半値全幅  $12\text{ nm}$  の透過スペクトルが予測された。図4(a)、(b)はそれぞれ  $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  における共鳴波長透過率の  $\theta$ 、 $\alpha$  依存性である。また図4(c)、(d)はそれぞれ  $\alpha = 0^\circ$  と  $\alpha = 45^\circ$  における共鳴波長透過率の  $\theta$ 、 $\phi$  依存性である。 $\theta$  が  $4^\circ$  以内の場合、 $\alpha$ 、 $\phi$  に依存せず透過率が  $80\%$  以上となると予測された。

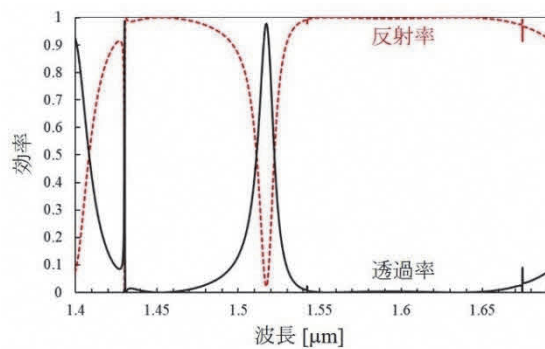


図3  $\theta = 0^\circ$ 、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$  における 反射・透過スペクトル

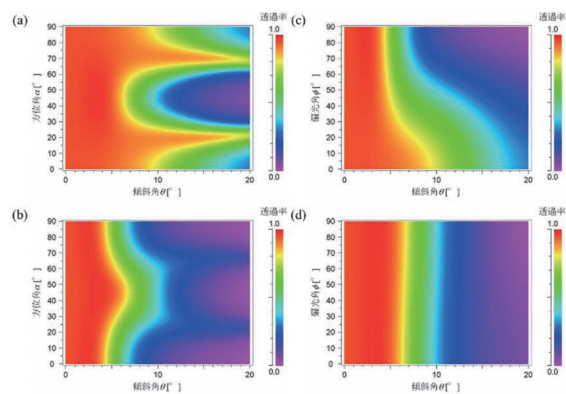


図4 (a)  $\phi = 0^\circ$  および (b)  $\phi = 90^\circ$  における 共鳴波長透過率の  $\theta$ 、 $\alpha$  依存性、ならびに (c)  $\alpha = 0^\circ$  および (d)  $\alpha = 45^\circ$  における 共鳴波長透過率の  $\theta$ 、 $\phi$  依存性

### 3 グレーティング作製

#### 3.1 作製プロセス

図5にグレーティング作製プロセスの概略図を示す。Si グレーティングの試作を目的としているため今回はSi基板を用いた。まずSi基板に、ポジ型EBレジスト (ZEP-520A、日本ゼオン) を厚さ400 nm となるようスピン塗布、バークし、EB 描画装置 (ELS-F125HS、エリオニクス) にて設計パターンを描画した。基板を現像液 (ZED-N50、日本ゼオン) に100秒浸して現像し、その後IPAに40秒浸してリンス処理することでレジストパターンを得た。その後ドライエッチング加工を施しレジストパターンをSi基板に転写した。最後に、基板を35°Cの剥離液 (DMAC) に2分×2回、IPAに2分×2回浸してレジストを除去した。

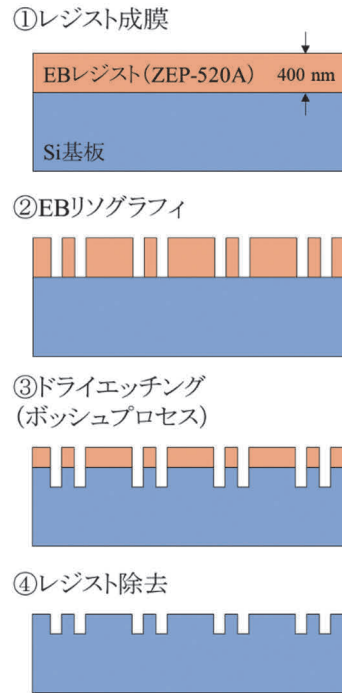


図5 Si グレーティングの試作プロセス

#### 3.2 EB描画工程

EB描画リソグラフィの工程までで得られたレジストパターンの走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を図6に示す。設計通りの形状が得られているのが確認できた。

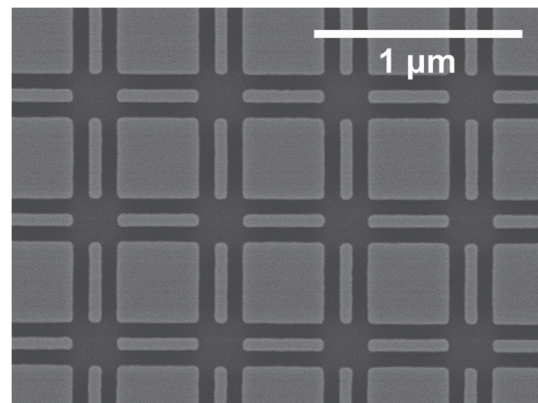


図6 レジストグレーティングの上面SEM画像

表1 エッチングレシピ

Step	Time [sec]	ICP [W]	BIAS [W]	Pres. [Pa]	SF <sub>6</sub> [sccm]	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> [sccm]	O <sub>2</sub> [sccm]	Ar [sccm]
1	5	1000	100	2.0	30	0	300	0
2	2	0	0		0	60	10	0
3	<i>d</i>	300	10	1.7	0	60	10	300
4	2	300	10	1.7	60	0	10	300
5	1	0	0		60	0	10	300

Temp. : 20°C    Cycle : 20回

### 3. 2 エッチング工程

#### 3. 2. 1. ボッシュプロセス

今回作製しようとしたグレーティングでは、掘る溝の幅が 100 nm、深さが 580 nm である。このような深堀を行うには一般的なドライエッチングでは側壁エッチングが強いため、所望のグレーティング形状が得られない。そのため、側壁を保護しながら掘り進めるボッシュプロセスを用いた。使用するプラズマは SF<sub>6</sub> と C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> であり、それぞれエッチング、側壁保護の作用がある。2種類のプラズマを交互に切り替えることで真っすぐに深く掘るエッチングが可能である。最適なエッチング条件を求めて条件出し実験を行った。エッチング条件を表 1 に示す。Step 3 が側壁保護膜生成工程、Step 4 がエッチング工程であり、Step 3 と 4 を繰り返す回数 (Cycle) によってエッチング深さを制御する。今回、Step 3 の時間  $d$  [sec] を変化させた場合の結果を観察した。

#### 3. 2. 2. エッチング結果

$d=1$  [sec] とした場合のエッチング後の SEM 観察画像を図 7 に示す。図 6 ではあった二重周期グレーティングの細かい方の凸部が見られない。側壁保護が不十分であると分かった。また Si 表面に残留物が見られた。

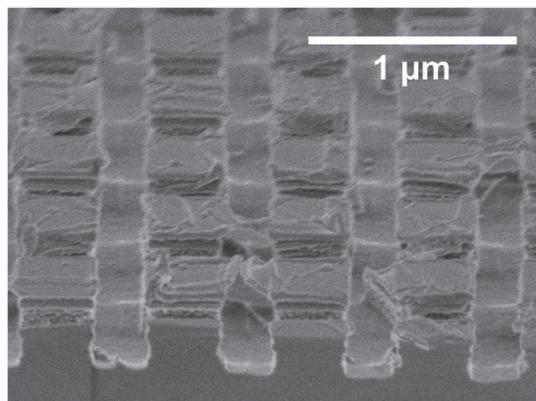


図 7  $d = 1$  [sec] の場合のエッチング結果

次に側壁保護を増強するために  $d = 2$  [sec] とした。この場合のエッチング後の SEM 観察画像を図 8 に示す。二重周期構造が形成されていることを確認できた。ただし凸部の幅は縦方向に沿って一様ではなく、下へ向けて幅が細くなる傾向があった。また、図 7 とは様子が異なるが Si 表面に残留物が見られた。

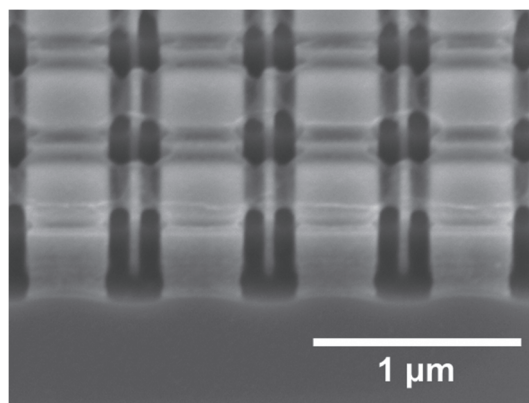


図 8  $d = 2$  [sec] の場合のエッチング結果

Si 表面の残留物は、ボッシュプロセスの側壁保護膜がレジスト表面にも付着したために剥離液でレジストを除去できなかったものであると予測した。そのため以後は、図 5 で示したプロセスの後に O<sub>2</sub> アッシング処理を追加した。

側壁保護をさらに増強するために  $d = 3$  [sec] とした。この場合のエッチング後の SEM 観察画像を図 9 に示す。側壁がほぼ垂直の二重周期構造が形成できた。また Si 表面の残留物も見られなかった。

### 4 まとめ

入射角度低依存の透過型 GMR フィルタの実現に向けて、Si の微細なグレーティング形成のためにボッシュプロセスの最適化を試みた。側壁保護膜形成時間を調整することで、所望の Si 凹凸構造を得られた。

本研究において、シリコンドライエッチング加工装置にはサムコ株式会社製 RIE-400iPB を用い



た。エッチングプロセスに関して豊富な経験をもとにプロセス提案を頂いた同社開発部の野中知行氏、内田聡充氏に謝意を表す。

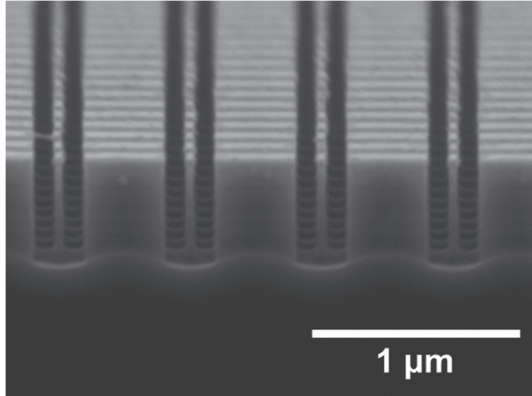


図9  $d = 3$  [sec] としたエッチング後に  $O_2$  アッシング処理を行った結果

#### (参考文献)

- 1) R. Magnusson and S. S. Wang, “New principle for optical filters,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 1022-1024 (1992).
- 2) Y. Ding and R. Magnusson, “Doubly resonant single-layer bandpass optical filters,” *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1135-1137 (2004).
- 3) J. Inoue, Z. Yang, S. Ishioka, K. Kintaka, and S. Ura, “Design of incidence-angle insensitive guided-mode-resonance bandpass filter,” in *Proc. of 27th Microoptics Conference in Jena*, pp. 56-57 (2022).