

共鳴領域の周期構造を利用した光学素子の作製

(株)ニューガラスフォーラム ナノガラス大阪研究室
産業技術総合研究所 関西センター*

中澤 達洋・植田 牧子・西井 準治*

Fabrication of optical devices using resonance domain micro-structure

Tatsuhiro Nakazawa, Makiko Ueta, Junji Nishii*

Nanotechnology Glass Project, New Glass Forum, Osaka Research Laboratory

*AIST Kansai Center

1. はじめに

最近の光情報通信分野では、メトロ系のWDM用パッシブデバイスの市場拡大に期待が寄せられている。そこでは、従来のフォトリソグラフィ等の高コストな加工を必要とするガラス材料の他に、ゾルゲル材料やポリマー材料も使われつつあり、将来的にはガラス材料に限定したデバイス研究にはそれなりのリスクがある。しかしながら、昨今の学協会の動向を見ると、半導体微細加工を利用したガラスデバイスの研究が、通信だけでなく情報家電機器やバイオ・分析機器への応用を目指して精力的に進められている。そこでは加工プロセスとデバイス化の研究が中心で、材料面での工夫はほとんどない。

このような状況の元で、ナノガラス技術プロジェクト大阪研究室では、微細加工に適したガラス材料の開発と、2次元、3次元的な周期構造形成技術およびデバイス応用に関する研究に取り組んでいる。

2. 周期構造と光機能

光機能素子の中には周期構造を巧みに利用した製品が多い。代表例には波長フィルタに用いられる誘電体多層膜やファイバブラッググレーティング(FBG)、あるいは分光素子として用いられる回折格子等が挙げられる。ここで周期構造の一周期の長さを L 、入射する光の波長を λ とした時、これら周期構造内の光の挙動は λ で規格化した周期 L/λ を用いて、解析的立場から以下の3つの領域に大別できる。

- (1) $\lambda \ll L$ の場合：光はスカラー理論の解析解によく一致し幾何光学的に光を追跡できる。
- (2) $\lambda \gg L$ の場合：光は構造体の平均屈折に従って挙動する。
- (3) $\lambda \simeq L$ の場合：光の挙動は厳密な波動解析によってほぼ正確に表現される。

中でも(3)の領域は共鳴領域と呼ばれ、非常に特異な伝搬現象が生じることが知られている^{1)~3)}。光が規則正しく並べられた構造体に対して入射した場合、光の伝搬はバンド構造によって支配される。バンド構造とは、周期構造体による光の反射と透過がある程度のコヒーレンシーをもっておこった結果形成されるエネル

〒563-8577 池田市緑丘 1-8-31
産業技術総合研究所 関西センター
TEL 0727-51-9543
FAX 0727-51-4027
E-mail: junji.nishii@aist.go.jp

ギー準位と考えることができ、光を通さないバンドギャップ領域や異常な分散を示す領域などが形成される⁴⁾。共鳴領域における周期構造体に関する応用研究は近年非常に活況で、これは計算機の演算処理能力の増大と微細加工技術の向上など、研究環境が整ってきたためである。演算解析には一般的に rigorous coupled-wave analysis (RCWA)⁵⁾や、finite difference time domain (FDTD)⁶⁾等の数値解析的手法が目的に応じて使用され、一方、微細加工には従来のリソグラフィ―表面加工技術だけでなく直接ビーム形成⁷⁾やモールド技術⁸⁾等、様々な手法が研究されている。

3. 微細加工

本研究では電子線描画とドライエッチングを用いて波長レベルの微細加工を行っている。図1にプロセスの概略を示す。基本工程は①電子線描画によるレジストのラインパターンニング②金属マスクの成膜③リフトオフ④ICP エッチングの4つである。溝の垂直性の維持および側面粗さの低減が加工のポイントである。特に溝形状は金属マスクの材質とパターン形状によって大きく支配される。高いアスペクト比(5以上)を有する溝を形成する場合には、プラズマに対する高い耐久性と被加工材料に対する高いエッチング選択比が要求される。周期構造のエッチングの場合には、マスク金属の比表面積が大きくなり、その選択比は例えばLSIのコンタクトホールのような孤立パターンの場合に比較して極端に低くなる。また、作製する素子

を短波長域で用いる場合は、マスク幅は100～200 nm程度となり、加工の難易度はさらに増す。また垂直エッチングの際には基板側に高いバイアスを印加する必要がある、選択比の低下に加え、マスクの表面粗さがそのまま被加工材表面に転写されるため、マスクパターンの形成には細心の注意が必要である。

我々は様々なマスク材を真空蒸着と直流スパッタの両方で成膜し、最適な条件を検討している。一般に真空蒸着はスパッタに比較すると、基板への到達原子のエネルギーが2桁ほど小さいため膜の緻密性、密着性が劣る。しかし一方で方向性が強いいためレジスト側壁への付着を最小限に抑えることができ、リフトオフには適した成膜手法である。また電子線描画によりパターンニングしたレジストの表面粗さは数nm～10 nm程度であり、リフトオフ後の金属マスク表面粗さも同程度に抑えることができるので、レジストの厚さに匹敵した厚膜マスク(膜厚～500 nm)が形成できる。

ドライエッチングにはICP-RIE(inductively coupled plasma reactive ion etching)装置を用いた。ICP-RIEは安定した高密度プラズマによって大面積を高い面内均一性で加工できる。プロセスガスには CHF_3 や C_3F_8 等を用いた。図2は市販の石英ガラスに微細加工を施した例である。金属マスクの除去が不十分ではあるが、溝幅200 nm、深さ2 mm程度(アスペクト比約10)の加工ができています。しかしながら、表面直下の側壁の浸食(サイドエッチング)が激しく、ボトム近傍の溝幅が狭くなっており、理想の形状から外れている。溝幅が深さ方

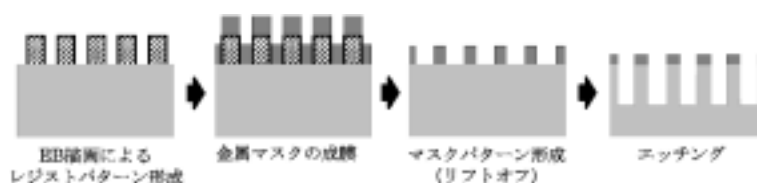
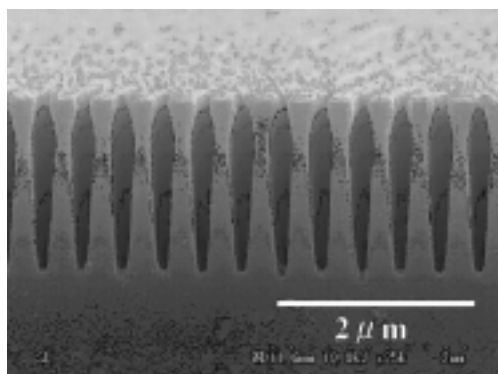


図1 加工プロセスの模式図

図2 微細加工されたSiO₂ガラスのSEM写真

向に変化しないように深く加工するには、プロセスガスやプラズマ条件の最適化だけでは困難であり、材料面での工夫が必要である。我々は、石英ガラスと類似の物性を有し、エッチング速度が異なるガラス材料をプラズマCVD法で探索している。現在のところ、石英ガラスの1.5倍以上のエッチング速度を有し、屈折率の制御も可能な組成が見出されつつある。

4. 共鳴領域を利用した回折素子の設計

誘電体多層構造に波長レベルの周期の1次元の溝を形成すると、光学的には2次元の周期構造と同等な効果があり、バンド構造が形成される。バンド構造は伝搬する光を制限し、従来の均質媒体にはない特異な伝搬現象を引き起こす。そこで、RCWA法を用いてその伝搬現象をシミュレーションしてみた。図3は、計算に用いたモデルの一例である。大きな屈折率差($n_1=1.5$, $n_2=2.0$)をもつ材料からなる20層の誘電体多層構造(各膜厚0.1μm)に対して、アスペクト比(=溝幅に対する深さの比)8の周期的な溝を形成した2次元周期構造を想定した。図中の矢印は光の入射とその角度 θ および、回折光の様子を表している。図4は入射角度 θ を変化させた時の1次回折効率の計算結果である。入射光は波長535nmのTM

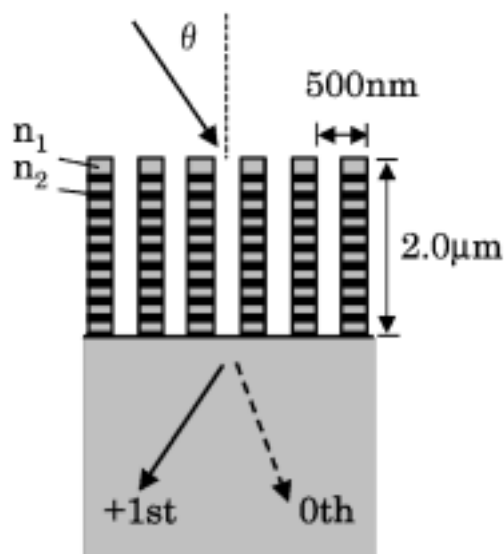
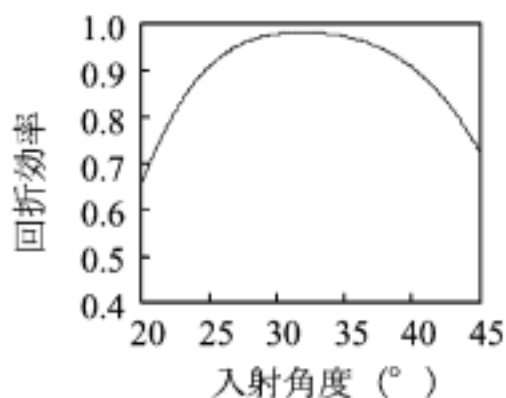


図3 誘電体多層構造に形成されたグレーティング形状と、その回折現象の概略図

図4 入射角度 θ と1次回折効率の関係

直線偏光とした。その結果、最高回折効率は98%に達し、20°の許容角度幅で効率80%以上を得ることができる。本周期構造は共鳴領域の利用を原則とすることから、その加工精度は使用波長の10%以内、表面粗さは5%以内が必要と思われる。また高いアスペクト比を得るための技術も当然必要である。

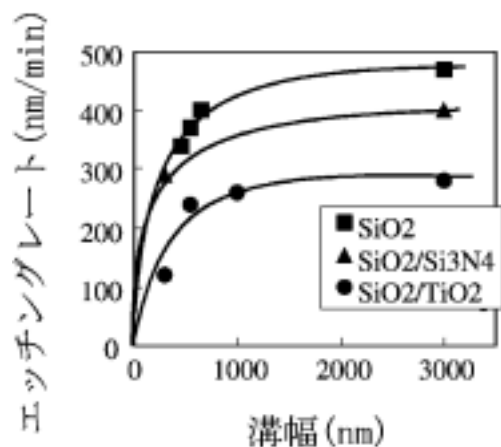


図5 各材料におけるエッチングレートと溝幅の関係

5. 二次元回折格子の試作

多層構造材料は光学バンド形成の観点から屈折率差が50%以上と大きく、かつ使用波長域で透明でなければならない。低屈折率材料をSiO₂ (n=1.4) とすると、高屈折率材料は例えばSi₃N₄ (n=2.1) のような窒化物やTiO₂ (n=2.4), Ta₂O₅ (n=2.1) のような金属酸化物が挙げられる。我々はSiO₂/Si₃N₄ およびSiO₂/TiO₂ の2つの多層構造体の微細加工を検討した。Si₃N₄系はCVD法で、TiO₂系は真空蒸着法で作製した。図5は、これら多層構造体とSiO₂のエッチングレートと溝幅の関係である。溝幅500 nm以下では、SiO₂のエッチングレートに比較してSiO₂/Si₃N₄ はほぼ同じであったが、SiO₂/TiO₂のエッチングレートは1/2程度である。このようなエッチング速度の違いを利用して、以下の2種類の2次元周期構造を試作した。

(a) SiO₂/Si₃N₄ 系

SiO₂/Si₃N₄ 多層構造体（各層厚100 nm, 20層）において、溝幅250 nm, 深さ2 μm（アスペクト比8）の周期溝を形成した。図6に示すように、垂直性が比較的良好（>88°）加工が可能であった。多層構造の加工ではサイドエッ

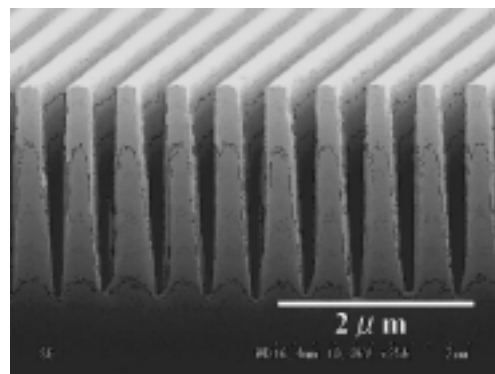


図6 SiO₂/SiN 多層構造体の深溝加工後の断面形状

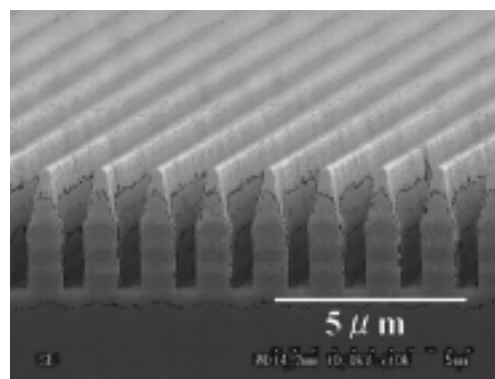


図7 SiO₂/TiO₂ 多層構造体微細加工したグレーティングの断面形状

チングによる側壁での段差の形成が懸念されたが、そのような問題も見られなかった。本構造での分光特性評価実験の結果、波長500 nmで、入射角度30°の時、非常に効率の高い回折光が発生し、高効率回折素子として有望であることがわかった。

(b) SiO₂/TiO₂ 系

一般に矩形グレーティングにおいて高効率を得るには高いアスペクト比が必要となるが、先端が細った構造（ここではロケット型構造と呼ぶ）あるいは完全に三角形の構造体になると低いアスペクト比でも高効率化が可能になることが知られている⁹⁾。このような構造は、金属マスク

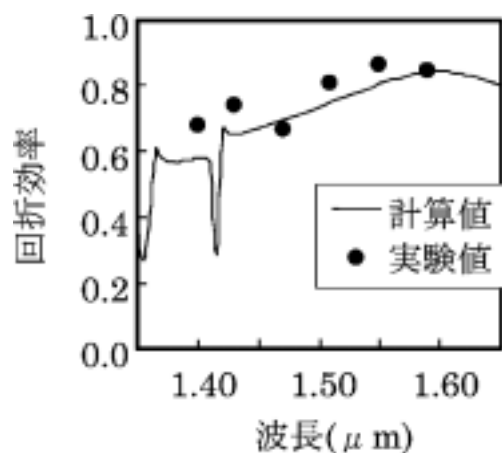


図8 SiO₂/TiO₂ グレーティングでの入射波長と1次回折効率の関係

を徐々にやせ細らせながらエッチングすれば得ることができる。図5に示したようにSiO₂/TiO₂系はエッチングレートが遅いため、そのような傾斜加工に適している。図7はSiO₂/TiO₂多層構造体(各層厚310 nm, 10層)の加工の一例である。底部より1.5 mmの高さの辺りから先端部にかけて先細った構造に加工できた。図8は入射光の波長と1次の回折効率の関係を示した。波長1560~1650 nmで効率80%以上を得ることができた。RCWAでの計算でも、単純な矩形からロケット型構造への形状変化と共に回折効率は40%から80%に連続的に上昇し、頂角(先端部の角度)が11°の時に実験値を再現できた。

6. ま と め

ガラス材料をベースにした波長レベルの2次元周期構造形成技術の現状について紹介した。従来の回折格子よりもさらに微細なピッチで、厚み方向に屈折率の周期性を有する構造の内部にフォトリソニックバンドを形成することによって、特異な光学特性の発現を目指している。今回は強い回折光の発生について紹介した

が、その他にも高効率な波長分離や光信号の遅延、偏波分離、アイソレーションなどの機能を集積化することができ、光通信デバイスだけでなく、光メモリの光学系、チップ間光インターコネクションなどの将来技術へ応用が期待される。波長レベルの微細な高次周期構造を精密に形成するためには、加工技術の高度化に加えて、材料の探索と計算機設計が必須であり、ナノガラス技術プロジェクト大阪研究室の最重要課題として取り組んでいる。

謝 辞

本研究は、経済産業省のプロジェクトである「〈ナノテクノロジープログラム〉ナノマテリアル・プロセス技術 ナノガラス技術プロジェクト」の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) 財団法人応用物理学会日本光学会光設計研究グループ, 『回折光学素子入門』, オプトロニクス社(1997).
- 2) J. Turunen and F. Wyrowski, "Diffraction optics for industrial and commercial applications", Akademie Verlag (1997).
- 3) H. P. Herzig, "Micro-Optics elements, systems and applications", Taylor & Francis (1997).
- 4) E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett., 58, 2059 (1987).
- 5) M. G. Moharam and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., 71, 811 (1981).
- 6) K. S. Yee, IEEE Trans. Antennas Propag., AP-14, 302 (1966).
- 7) M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison, R. G. Denning and A. J. Turberfield, Nature, 53, 404 (2000).
- 8) Shu Shimada, Kun'ichi Miyazawa, and Makoto Kuwabara, J. Appl. Phys., Part2 41, L291 (2002).
- 9) M. G. Moharam and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., 72, 1385 (1982).