

二酸化チタンで光ナノ(フォトニック結晶)構造を形成

次世代フォトニックネットワーク用光デバイス作製技術として期待

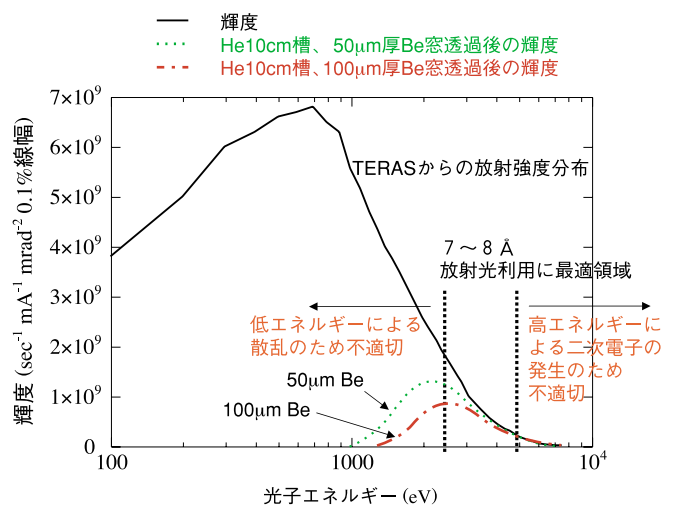
産総研光技術研究部門では、セラミックスの代表的材料二酸化チタンで光ナノ(フォトニック結晶)構造を形成する新しい作製技術を開発した。セラミックス材料微細加工には、シリコン半導体の加工技術の応用が困難であったが、今回、シンクロトロン放射光によるX線リソグラフィーの手法を用いて、セラミックス材料への微細加工を可能にした。本作製技術によって、フォトニック結晶の光透過率の向上、光ファイバーとの接合損の軽減、そして温度管理負担の軽減が実現されれば省エネ効果も期待できる。さらにプロセスにドライエッチング工程がないので低環境負荷であることや、鋳型成型法であるために低コストで作製が可能なことなどの利点も有しており、今後注目される作製技術である。

二酸化チタンでのデバイス構築に対する各分野からのニーズ

多波長通信時代のフォトニック素子として、小型で高性能の光部品(光合分波器、光スイッチ、平面型光増幅器、光回路等)が必要とされている。現在これらの部品は加工技術に蓄積のあるシリコンに代表される半導体での構築が検討されている。しかし例えば二酸化チタン(TiO_2)と比較すると、伝送波長帯 $1.5\ \mu\text{m}$ での損失は2桁以上、また熱膨張係数でもシリコンは劣っている。また、光ファイバーとフォトニック素子の接合の観点からも、屈折率が光ファイバーに近いシリカガラスや二酸化チタンでのデバイス構築が望ましい。しかしながら、二酸化チタンでの精密な加工技術はほとんど開発されていない。またシリコンの加工技術に蓄積があるといっても、それはマイクロマシンや電子部品加工用であり、比較的大きなデバイスパターンを有し、ナノ精度での精密加工が要求されるフォトニック素子には向いていない。例えば、光ファイバーの伝送損失は、 $0.15\ \text{dB/km}$ であるのに対して、現状の光合分波器が、材料系が同一(Ge ドープ SiO_2)であるにもかかわらず、4桁も損失が大きいことの原因の一つは、加工精度の問題である。目的とする部品に最も有利な材料を用いて加工できる手法を持っていることは、製造業の観点からも重要と思われる。環境の観点からみると、ドライエッチングはわずか数 μm の厚さの加工のために大量のガスを用いるため、環境負荷の高いプロセスといえる。

PMMA製テンプレート作製に望ましいDXL

我々が開発した二酸化チタンでフォトニック結晶を作製する手法は、厚い有機高分子膜に対して高精細なX線リソグラフィーを施し、テンプレートを作製するという工程から始める。レジスト剤としては、ポリメチルメタクリレート(PMMA)を選んだ。現在、数社から何種類ものレジスト剤が販売されているが、X線に対しての露光感度の選択性がよく、また感度の低いものをあえて選んだ。将来的には高感度品が望ましいと思われるが、実験を行うには低感度の方が作業しやすいためである。また、厚い膜で



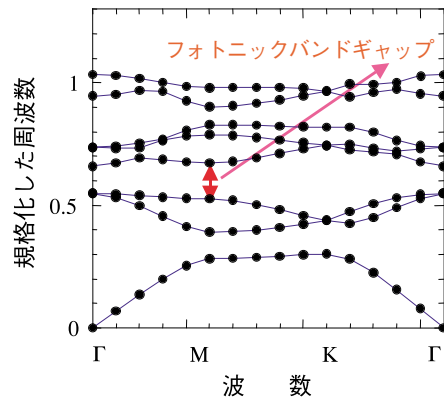
● 図1 産総研のシンクロトロン放射光TERASの輝度とX線の強度

の加工・テンプレート化となると、Deep X-ray Lithography (DXL) が必要となる。

図1に産総研のシンクロトロン放射光 (SR 光) 施設 TERASの輝度と光子エネルギーの関係をまとめた。DXL 用ビームラインは、上流側 (SR 光側) は超高真空中で、ベリリウム (Be) の膜を介して下流側は大気圧としてある。照射を受ける試料とベリリウム窓の距離は10 cmで、この間はヘリウムガスで置換する必要がある。ベリリウム窓 50 μm と 100 μm の場合の試料まで到達する光の輝度を図中にそれぞれ緑と赤の線で示した。X線露光の解像度は、波長 λ ×マスクとウエハのギャップ g の1/2乗で表せる。従って、単純には解像度の向上には短波長化が有効であるといえる。しかし、短波長X線はエネルギーが大きいためレジストや基板の原子に衝突して出てくる二次電子の量が増えるばかりでなく拡散距離も長くなり、光学像がぼやける (解像度の悪化) ことになる。このため現在、波長7~8オングストローム (\AA) がDXLに最適であると考えられている。このような観点から産総研のSR光施設は本プロセスに最も適した蓄積エネルギーで運転されていることがわかる。

PMMA 製テンプレートの作製

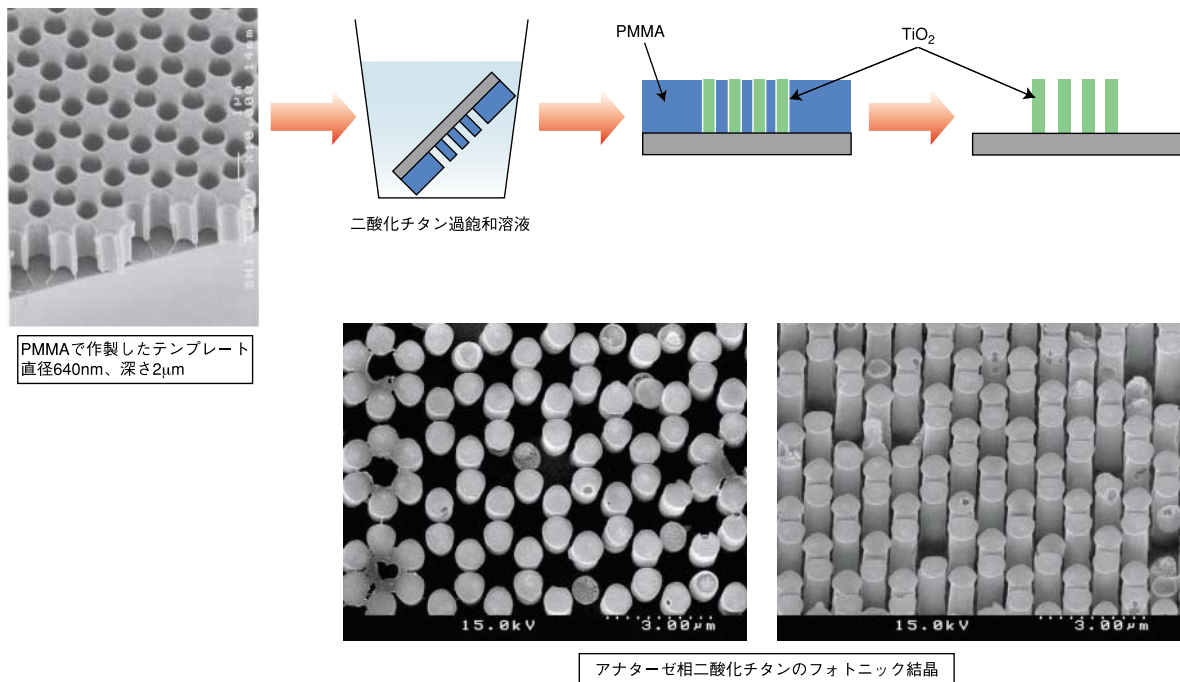
波長多重通信で利用される波長1.5 μm での光合分波を目指し、波長1.5 μm でフォトニックバンドギャップが形



●図2 二酸化チタン系二次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造
ブリルアンゾーン M 点においてフォトニックバンドギャップの形成が確認される。

成される構造をシミュレーションにより見積もった。計算により得られたバンド図を図2に示す。

シミュレーション結果より、フォトニックバンドギャップが形成されるようにX線マスクを設計・作製した。これは、電子ビーム描画装置を用いて、メンブレン (X線透過部分) はシリコン窒化膜、X線マスクパターンはタンタルで作製した。このX線マスクを介して、高分子 (PMMA) 膜にSR光を用いてX線を照射する。SR光の蓄積電流にもよるが、照射時間は数分である。現像は、ケト



●図3 PMMAテンプレートに二酸化チタンを析出させた後、テンプレートを溶解・除去した試料細孔細部にまで緻密な二酸化チタンが室温で充填されたことがわかる。

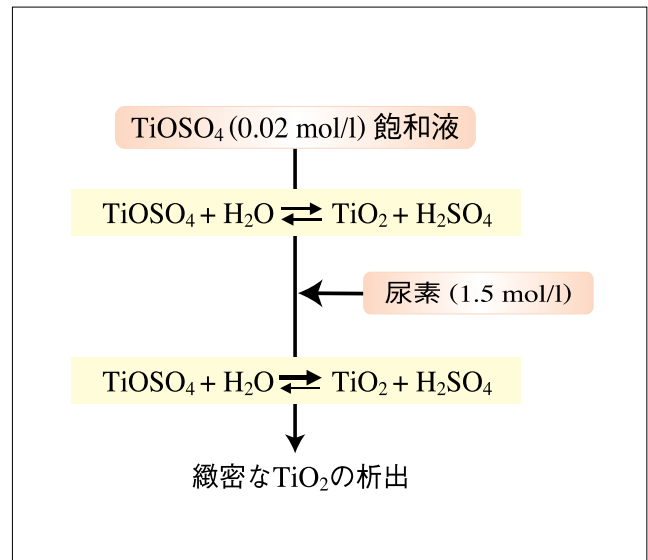
ン系の溶剤で20秒程度行った。こうして、高アスペクト比の高分子テンプレートを形成した。図3左上の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真はSR光で形成したPMMA製のテンプレートで、直径640nm、高さ2 μ mの加工ができてることがわかる。次にこのテンプレートに液相析出法で二酸化チタンを析出させ、高分子を溶剤で溶かすことにより、室温で緻密なアナターゼ相二酸化チタンの作製を行った。図3の左下のSEM像は真上からの観察、右下のSEM像は斜め45°からの観察で、PMMAテンプレートとは逆パターンの二酸化チタンの円柱が整然と並んでいることがわかる。マスク界面付近を除くと円柱の倒壊はほとんど見られないことから、二酸化チタンの円柱は基板と強固に化学結合していることもわかった。ここで用いた液相析出法のフローチャートを図4に示した。通常の膜形成技術の場合、細孔の内部を埋めることは極めて困難であるが、本手法では、毛細管現象で細孔内部まで緻密にセラミックスが充填できる。

今後の展開

本手法は全てのセラミックス材料に対して有効である。今後はナノプリント技術としての展開が期待できる。また、DXLには波長7~8Åが最適であると先に述べた。しかし、次世代DXLではこの定説を見直し、二次電子の影響を最小限にできるレジストの開発により、広い波長域を有効に活用させることを考えている。広い波長域の活用により、露光時間の大幅な短縮を目指す。さらにマスク形成材料を抜本的に見直すことにより、高い透過率を持つメンブレンを有するマスクを作製する。低アスペクト比のマスクパターンで高透過率のメンブレンを用いることで露光時



- 放射光を利用して二酸化チタンでフォトニック結晶を作製する技術を開発した光技術研究部門 粟津主任研究員 (2003.1.31 第2回つくばテクノロジー・ショーケースにて)



●図4 液相析出法フローチャート

のコントラストが良好になる。従って、高精度な露光パターンの形成が可能となるばかりでなく、深く精密な加工が短時間で達成できる。まずメンブレンとしてSiN, SiCが今日、広く用いられているが、ダイヤモンドに置き換えることにより著しく透過率が增大する。これはシリコン原子による吸収がなくなるためである。特に短波長(高エネルギー)領域で顕著である。ただし、現在通常手に入るダイヤモンド膜はアモルファスでないため、結晶構造を反映し平滑でなかった。表面平滑化の一つの手法としてクラスターイオンビームの利用が提案されている。クラスターイオンビームはクラスターがダイヤモンド表面で炸裂し、表面を走ることにより平滑化させる技術である。ダイヤモンド開発は目覚ましい勢いで進んでおり、将来的には通常の膜形成技術により平滑表面を有する膜を作製できると考えられている。

- 本研究は、文部科学省の原子力試験研究費により実施された。

●問い合わせ
 独立行政法人 産業技術総合研究所
 光技術研究部門
 放射光利用技術グループ 粟津 浩一
 E-mail : k.awazu@aist.go.jp
 〒 305-8568
 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2