

自由自在なレーザー微細加工の実現に向けて

レーザー誘起背面湿式加工法による透明材料の大面積・深溝加工

石英ガラスなどの透明材料表面を微細加工する技術は、光デバイス研究開発のキーテクノロジーの1つであるが、一般的にフォトニクス材料は硬質で加工が難しく、また、大面積での加工が求められる。今回開発した装置は、産総研が独自に開発したレーザー誘起背面湿式加工法(LIBWE法：Laser-induced backside wet etching)という高品位表面加工法を用いたもので、寸法精度の高い露光マスク縮小型と、試作品の加工が簡単にできるレーザー走査照射型の二種類である。これらの装置により、従来のリソグラフィ加工では不可欠であった保護膜層を用いずに石英ガラスの大面積迅速試作加工が可能となった。

Two types of new apparatuses for surface micro-fabrication of UV transparent materials, based on AIST-original LIBWE (laser-induced backside wet etching) method, have been developed. One is an excimer laser mask projection system, and another is a diode-pump solid state laser beam scanning system. Both systems can micro-fabricate a silica glass surface of large area rapidly, and high aspect ratio of 60 was attained in a deep trench fabrication. Unlike conventional lithography methods, these apparatuses need no photo-resist, and can be operated under atmospheric pressure. The projection system attained 0.75 μ m resolution and the beam scanning system can fabricate prototypes rapidly.

研究の背景

石英ガラスなどの透明材料は広く光学素子などに利用されており、微細加工による光デバイスの微細化・高集積化は光技術応用の上でキーテクノロジーの1つになっている。産業界ではこれまで石英ガラスの微細加工を光リソグラフィ技術と強酸水溶液あるいはプラズマを用いたエッチングで行ってきたが、保護膜層であるフォトレジストの塗布、露光、エッチング、フォトレジスト除去等、多段階にわたる工程が煩雑であるなど大きな問題点を抱えており、簡便な微細表面加工法が求められてきた。

産総研では、LIBWE法(Laser-induced backside wet etching)と名付けた独自のコンセプトに基づく紫外パルスレーザーを用いた石英材料の微細加工技術を研究してきた。これは、紫外レーザー照射で誘起される溶液の光化学作用(アブレーション)によって石英基板表面を微細加工するレーザー間接励起加工法である¹⁾。これまで、レーザー照射光学系の改良ならびに溶液組成の最適化を行ってきた。



図1 LIBWE法による大面積加工の一例(基板5cmφ)
着色して見えるのは透過型回折格子からの散乱光の干渉現象。

LIBWE法の特徴

LIBWE法は、紫外光をよく吸収する色素溶液を加工対象に接触させた状態で、紫外レーザーを照射し、色素溶液のアブレーションによって間接的に石英ガラス表面を微細加工するレーザー加工法である。LIBWE法では高濃度の色素溶液を用いるので、溶液層に数 μ m程度しかレーザーは侵入できず、この薄い層内で完全に吸収される。したがって、レーザー照射による色素分子の高密度励起状態は石英の極近傍の表面のみに形成され、溶液中の過渡的な高温高圧状態によって石英ガラス表面層が所定量エッチングされる(1~30 nm \cdot pulse⁻¹)と考えている(図2)。その特徴は、

- 1) 大気圧下の直接描画型微細加工手法。
- 2) 加工部位の周囲にクラックなどのダメージが発生しない高品位な微細加工や高アスペクト比加工が可能。
- 3) マスク縮小露光法やガルバノ鏡走査法を用いることで、任意形状の大面積一括微細加工が可能。

などが挙げられる。他手法と比較して、フォトレジスト保護膜層形成工程や除去工程、あるいは真空装置などが不要であるため、前処理や後処理が著しく簡便である(図3)。

LIBWE法は、海外研究機関においても注目され、スイス・ポールシラー研究所、ドイツ・ライプツヒヒ表面科学研究所、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、台湾科学院等において、この手法を用いた微細加工研究が活発化している。われわれはLIBWE法の高度化技術の開発に関して、他研究機関に先行して大面積微細加工(図1)と深溝加工に成功した。これらの研究成果に基づく研究発表が、2005年4月米国にて開催されたLPM2005(第6回レー

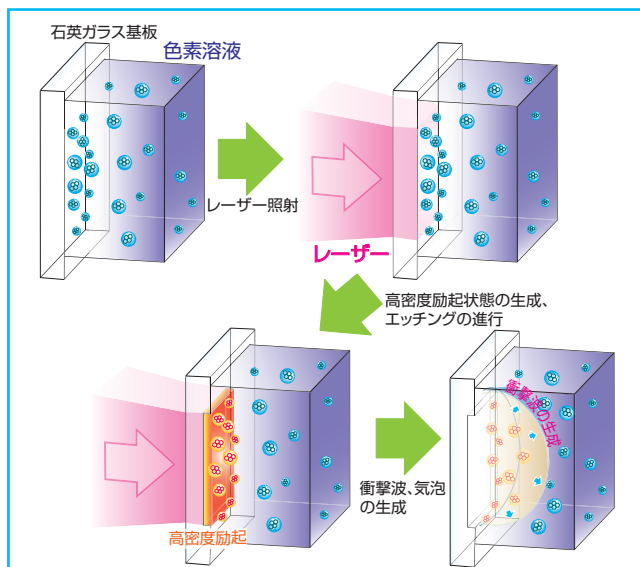


図2 LIBWE法による加工機構概念図

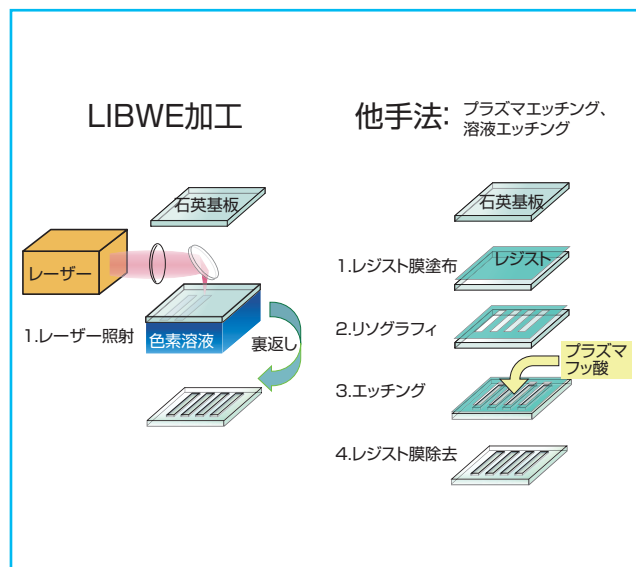


図3 LIBWE法の特徴:他のエッチング法との比較

ザ精密加工に関する国際会議)において、「The LPM2005 Outstanding Oral Paper Award」に選ばれた。

加工装置の開発と加工特性

今回、エキシマレーザー露光マスク縮小型(図4a)と全固体紫外レーザー/走査鏡照射型(図4b)の二種類の加工装置を完成させた。これらの装置では、焦点位置を連続的に表面(固液界面)から内部方向に補正しながらレーザーパルスを多数照射すると、高アスペクト比の深溝加工が可能である。図5は幅7 μm 、深さ420 μm の深溝加工を行った試料断面の顕微鏡写真で、世界一の高アスペクト比加工が達成されている。これは、溝加工が進むにつれて深溝部分に色素溶液が入り込むにもかかわらず、光活性化領域(モデル図中オレンジ色の部分)が数 μm 厚しかないために、加工済の溝壁表面に損傷を与えないことに起因していると

考えられる。背面方向からのレーザー照射が有利であることを示す実験結果である。

また、図5の深溝加工には1 J $\cdot\text{cm}^{-2}$ の強度で、25,000パルスのレーザー照射が必要であったが、80 Hzの繰返し周波数で照射しているため、約5分間の照射時間で作製できる。従来法ではこのような高品位な深溝加工は不可能であるとともに、比較的浅い溝の加工でも数時間を要していることから、この加工技術の先進性は明らかである²⁾。

マスク縮小型では投影露光法の特長である高い寸法精度が得られ、平面分解能の最高値として、1 μm サイズの正方格子状の微細加工や0.75 μm 間隔の回折格子を1 \times 1mmの面積に一括作製することができた(図6、7)。

走査鏡照射型ではCADデータから直接、高速転写加工ができるため、パターン・マスクなどを作製せずに5cm \times 5cmの大面积の迅速試作加工が行える。図1は産総研

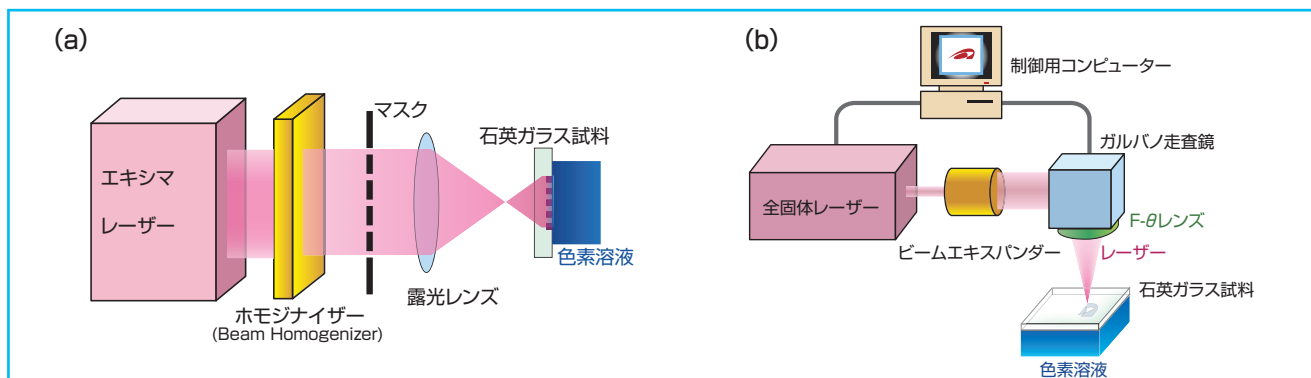


図4 実験装置図 (a) エキシマレーザー露光マスク縮小型、(b) 全固体紫外レーザー/走査鏡照射型

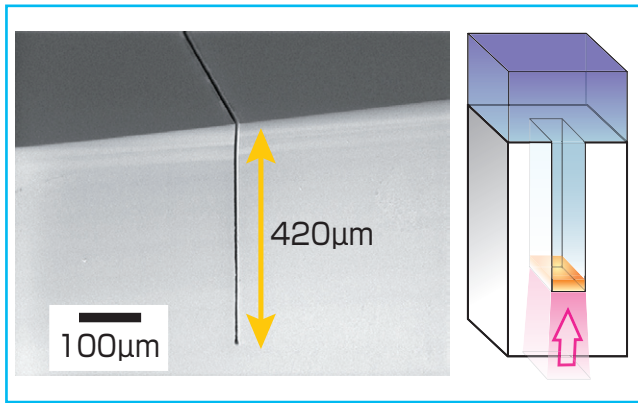


図5 深溝加工後の断面顕微鏡写真とモデル図

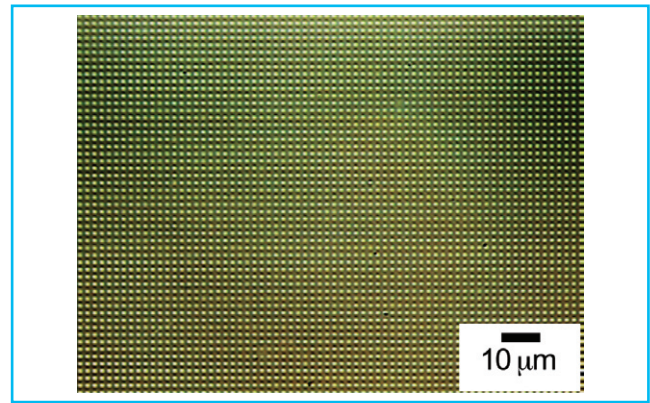


図6 石英ガラス上の格子状1ミクロン微細加工

マーク形状の透過型回折格子を作製したもので(照射時間: 6分)、表面の微細な縞構造から散乱された可視光の干渉・散乱により着色して見える。加工設計図がコンピュータ上にあるので、容易に加工パターンの修正が可能であり、製作期間の短縮に大きく貢献できる。

なお、LIBWE法は、石英ガラスだけでなく、フッ化カルシウム、サファイア、フッ素樹脂などの紫外線に透明な材料なら、加工部周囲にクラックなどの損傷のない高品位な微細加工が行える。

応用例：ガラス表面修飾法の開発

応用例として、ガラス表面の機能化を試みた。シランカップリング処理により自己組織化単分子膜 (SAM) を作製した石英ガラス基板にLIBWE加工を行うと、石英表面層の加工と同時にSAMのパターニングができた³⁾。レーザー加工部位はガラス表面が露出しており、加工後の基板を色素溶液等に浸せきすると、色素分子とSAMやガラス表面との相互作用によって色素薄膜の微細パターニングができる(図8)。SAM分子と色素の組み合わせの最適化によって、最高10μm分解能までの微細パターニングが可能である。また、タンパク質分子やポリマー微小球(図9)でも適した

SAMを選ぶことで微細パターニングが可能である。

レーザー加工後の石英基板は熱エンボス法やインプリント法の金型(マスター)としても利用可能なので、高分子部材の鋳型表面加工にも使用することができる(図10)。

加工機構：溶液アブレーションの観測

パルスレーザー照射下で誘起される溶液アブレーションは未解明な点が多い。そこで、シャドグラフ法や過渡圧力測定法を用いて、加工機構の検討を行った。シャドグラフ法で側面方向からKrFエキシマレーザー照射(パルス幅30ns)によるトルエン溶液アブレーションを観察した(図11)。レーザー照射100ナノ秒後、衝撃波の伝播が観測され、10マイクロ秒後にはトルエン気泡が膨張/収縮した。このような気泡の膨張・収縮現象によって生じる衝撃波が、硬い石英ガラスを削ることができる。この現象を詳しく解析した結果、エッチング速度とレーザー照射エネルギーの間に直線関係があることがわかった。

また、高速応答型液浸用圧力センサーを使い、レーザー照射時の過渡圧力測定を行った。圧力ピーク信号はレーザー照射直後と気泡崩壊時に観測された。2つのピーク信号の時間間隔 τ は、入射レーザーエネルギーの1/3乗に

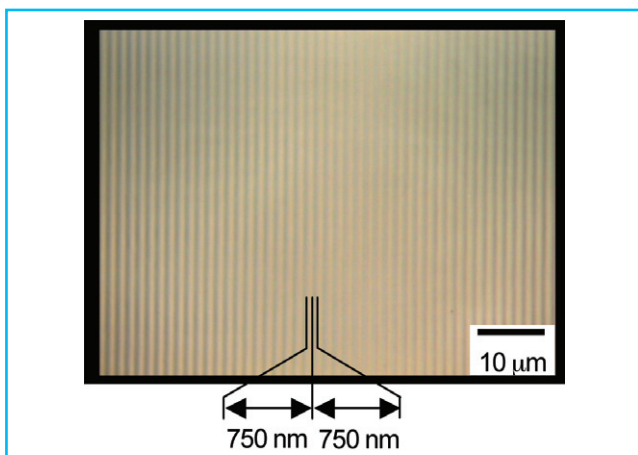


図7 0.75ミクロン間隔の回折格子加工

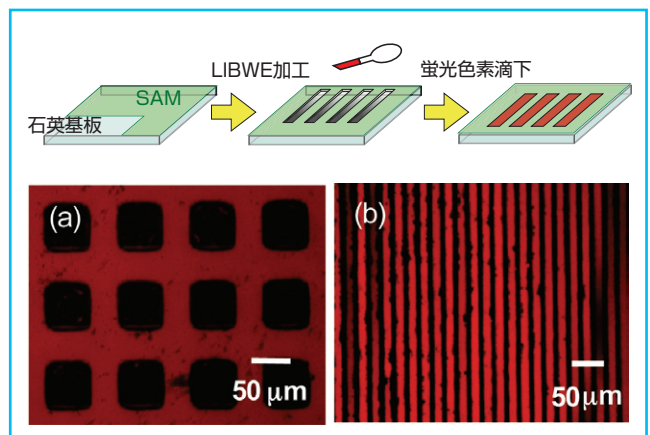


図8 色素薄膜蛍光パターン像

(a) ローダミン色素、(b) 蛍光色素標識アルブミン蛋白質

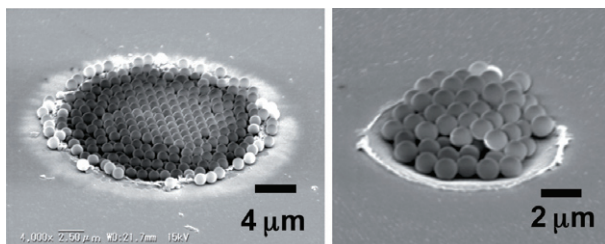


図9 ポリスチレン微小球集合体のSEM写真

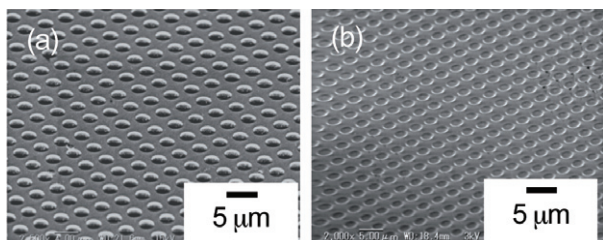


図10 石英ガラス基板を鋳型とするポリマー微細加工
(a) ポリスチレン加工表面、(b) 石英鋳型(2μm径)。

比例することを見出し、入射エネルギーを絞ることで τ 値を20 μ s程度まで小さくすることができることを確認した。全固体レーザーはパルス高繰り返し照射が可能であり、ビーム品位が高いのでフルエンスを確保する高集光ビームを簡便につくることができる。これらの知見に基づいて、40 kHzまでのパルス繰り返し周波数で走査鏡照射型でのLIBWE加工が可能であることを実証できた。

まとめ

レーザーによる光加工は、高い加工精度を要求される産業分野で着実に応用の幅を広げ始めている。現在は、数 μ mの分解能の加工をcmサイズの基材で行うことが主流であるが、高集積化や高密度実装の要求は年々大きくなっており、さらに微小なナノサイズの微細加工の切り札の一つとしての期待は大きい。光と物質の相互作用は、本質的には光子と分子・原子との相互作用であることから、ナノサイズの

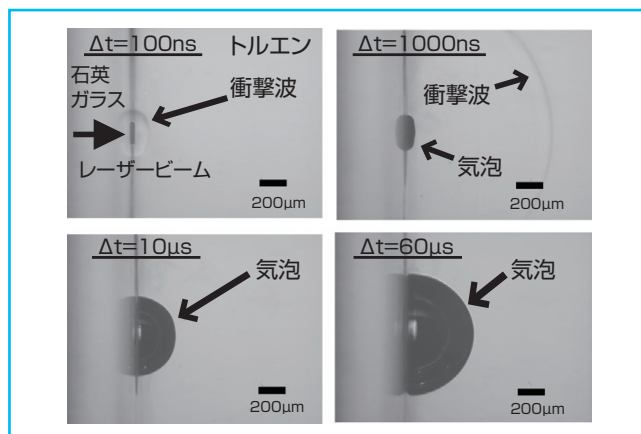


図11 遅延時間 Δt での溶液アブレーション像、側面方向からの観察、KrFエキシマレーザー照射



光技術研究部門レーザー精密プロセスGメンバー（前列中央 新納G長）エキシマレーザー露光型実験装置（後方）、LPM2005表彰盾。

現象といえる。近年の光源開発の急速な進歩、および、分子・原子の構造や励起状態の理解が深まることで、固体のように複雑な緩和過程が起こる反応場においても、徐々に位置制御性が向上し、ナノサイズの極微反応場で微細表面加工が行える環境が整いつつある。今後、オプトエレクトロニクス用石英ガラス製微小光デバイスの開発、バイオ・化学センサー等への応用などを進めていく予定である。

用語解説

◆アブレーション

アブレーション（Ablation）は高出力パルスレーザーを材料に照射した際に、照射部位が瞬間的に蒸散する現象で、固体や液体などの凝縮した物質相で観測される。照射条件を最適化すると固体表面の照射周囲に熱損傷やひび割れを生じさせることなく、高品位な微細加工を高速で行うことができるので、電気回路基板等の精密穴あけ加工や視力矯正手術などに応用されている。

◆アスペクト比

要素の縦横比のことで、この場合は加工溝の幅と深さの比のこと。

◆CAD（キャド）

Computer Aided Design（コンピュータ支援設計）の略で、コンピュータを用いて工業製品の設計を行うシステム。製図作業・図面作成など、これまで人の手に頼っていた作業がコンピュータの利用によって短時間で正確に処理できるようになった。設計作業の大幅な効率化を達成している。

参考資料

- 1) J. Wang, H. Niino, A. Yabe, Appl. Phys., vol.A68, p.111 (1999) ; 日本国特許 3012926号 (他に、米、英、独、仏国特許) .
- 2) Y. Kawaguchi, et. al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, p.L176 (2005) .
- 3) 新納 他、AIST Today, vol.4, no.6, p.17 (2004) .

● 問い合わせ先

独立行政法人 産業技術総合研究所

光技術研究部門 レーザー精密プロセスグループ

グループ長 新納 弘之

E-mail: niino.hiro@aist.go.jp

〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第五