

ホログラムを通過した1パルスの超短パルスレーザー光で 三次元造型をガラス内部に作製する方法

社団法人ニューガラスフォーラム つくば研究室

田中修平, 山地正洋, 川島勇人, 鈴木潤一

Three dimensional micromachining inside a glass by single pulse femtosecond laser through a glass-hologram

Shuhei Tanaka, Masahiro Yamaji, Hayato Kawashima, and Jun'ichi Suzuki

New Glass Forum

概要

8層・16個のサッカーボール状の異質相よりなる三次元フォトニック結晶の基本パターンを, CGH (Computer Generated Hologram) を通過したパルス幅が100 fs (1 fs=1 フェムト秒= 10^{-13} 秒) 以下の1パルスを超短パルスレーザー光 (フェムト秒レーザー光) で照射することにより石英ガラスの内部に作製した。この作製において, 絶対位置, 相対位置, そして形状の制御が非常に重要である。特に, 形状においては設計通りの加工ができ, 従来から大きな問題となっている光軸方向での異質相の伸びを解決できることがわかった。これ等についての実験結果を以下に記す。

1. まえおき

フェムト秒レーザー光の集光照射で, 多光子吸収などにより, 非常に局所的な物理化学変化がガラス内部で起こる。この変化部を利用してデバイスの作製が試みられている。筆者らはこ



NGFつくば研究室 (写真の3階に位置している)

の変化部を異質相と呼んでいる。レーザーの発光時間は格子振動の周期以下で, 光エネルギーの格子への移動が殆どなく, 熱的な効果が非常に小さく, 精度の良い加工ができる。光導波路や回折格子などの三次元デバイスの作製に使用される。従来は, これらをレーザーパルスの逐次照射で作製してきた。したがって, 作製時間が長いために装置の不安定性などで精度の高いものができなかった。また, パルスエネルギーを効率よく使用できなかった。そこで, 筆者らはCGHを使用した三次元構造¹⁾⁻³⁾を1パルスで作製する方法を開発した⁴⁾。

〒300-2635 茨城県つくば市東光台5丁目9番1号
筑波研究コンソーシアム パイロット棟3F

TEL 029-848-1880

FAX 029-848-1882

E-mail: tanaka-s@newglass-lab.jp

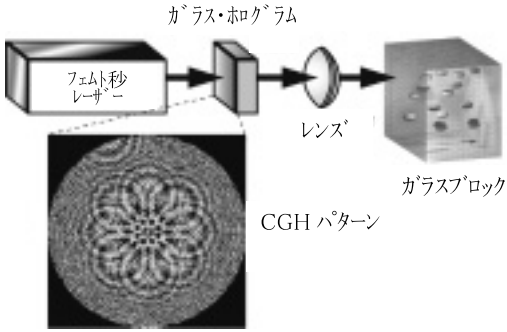


図1 ガラス・ホログラムによる一括加工システム

2. ガラス・ホログラムによる一括加工システム

図1にガラス・ホログラムによる一括加工システムを示した。なお、一括加工システムの“一括”の意味は、従来の逐次の加工に比べてホログラムを介して一度の照射で加工ができるためにこのように呼んでいる。図において、フェムト秒レーザーから出射した光は三次元デバイス情報を記録したCGHの情報を書き込んだガラス・ホログラムを通過した後に、M20のレンズでガラス内部に集光され、異質相の形成によりデバイス像ができる。今回使用したレンズのNA (Numerical Aperture) は0.46、焦点距離は10 mmである。CGHのデバイス像の設計によってはレンズなしでの加工も可能である。

図1に、図2のサッカーボール状の三次元パターンCGHを示した。CGHは電子線描画とRIE (Reactive Ion Etching) で石英ガラスの表面に作製した。これをガラス・ホログラムと呼ぶ。

実験に使用したレーザー光源は、パルス幅の可変範囲が25-735 fs、繰り返し周波数が1-1,000 Hz、波長が800 nmのTi:Al₂O₃フェムト秒レーザーである。

3. 三次元パターンの作製例

図1に示した装置構成で、図2に示した三次

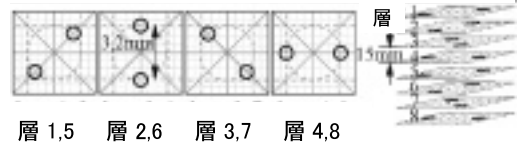
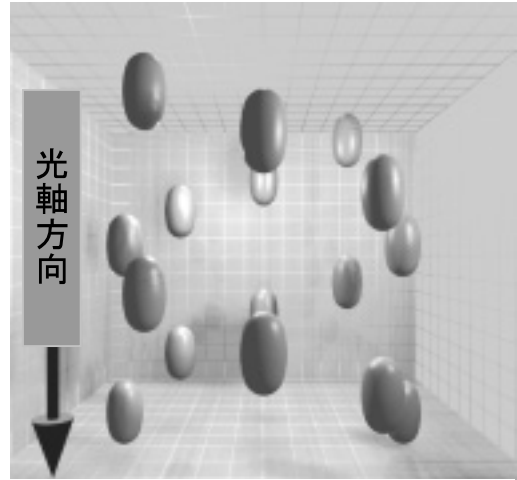


図2 三次元パターン

元パターンのCGHを形成したガラス・ホログラムを用いて石英ガラス内部にフェムト秒レーザー加工を行った。その結果を図3の右図に示した。図3で左側は三次元設計パターン、右側に実際に作製したパターンを示す。左側の上図はフェムト秒レーザー光の入射方向(光軸方向)から見た図で、立体感を表すために進行方向に少し小さく描いている。実際には上に少し大きく見えているボールは下の少し小さく見えているボールとは同じ大きさで光軸に沿って上下の位置関係にある。従って、光軸方向から見ると下のボールは上のボールの影に隠れて見えない。その様子を実際に加工した右側の上の写真で示す。写真では上側のボールしか見えない。これらボールの上下位置を、横から見た様子を下段の図に示した。左の図が設計パターンで右の図が加工した図である。加工した図で示されているように下側のボールが作製されているのがわかる。たとえば、同図のAとBが光軸に沿って上下位置にある。レーザー光の入射方向で影になった場所での加工ができているの

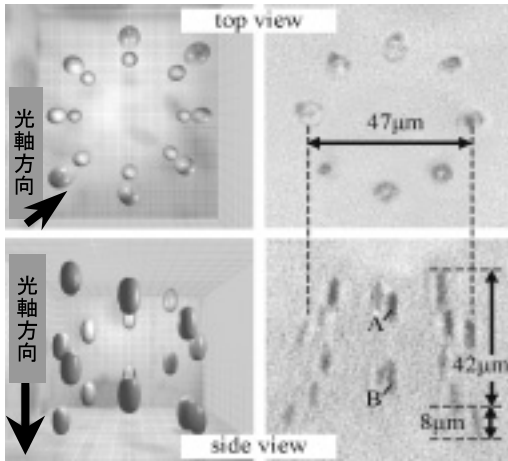


図3 蛍光シリカ粒子の合成法三次元設計パターン (左), 作製したパターン (右) の顕微鏡写真像

がわかる。これは、ホログラム加工の特長である。このことより三次元加工をホログラムでできることがわかる。

これらの三次元加工はパルス幅がおおよそ 100 fs の 1 パルスでおこなわれたものである。これは、格子振動の一周期にも満たない、非常に短い時間での加工ができることを示している。

作製したボールはサッカーボール状で、CGH で設計した形状および寸法とほぼ同じであった。したがって、本手法では、従来から大きな問題となっている光軸方向での異質相の伸びを押さえられることがわかる。

4. ガラス・ホログラムによる一括加工の特長

4. 1 加工形状のレーザー照射方向への伸びの抑制

一般にフェムト秒レーザーによる加工では、レーザー光の入射方向に加工形状が数十 μm から数 mm と大きく伸びることが観察されている。通常のレンズを使用した加工法では避けられないものと考えられている。したがって、フェムト秒レーザーによるデバイスの作製ではこれが大きな問題となり、小さな加工は不可能と考えられてきた。今回のホログラムを使用した

実験では、形状と寸法共に CGH の設計通りで、しかもビームプロファイラーで観察した形状ともほぼ同一の加工ができており、この伸びはかなり抑えられたものとみられる。これはホログラムによる加工の大きな特長である。これによりホログラムを使用すれば三次元構造デバイスを設計通りに作製できることがわかる。

4. 2 加工速度の向上と加工時間の短縮

従来のフェムト秒レーザーによる加工法は逐次照射方式で、レーザー光の 1 パルス毎に非照射側のガラスを移動して作製されていた。このときに使用されるパルスエネルギーは加工に必要なエネルギーの $1/10,000$ 以下である。ホログラムによる加工は、これらの光エネルギーを全て加工にて消費するために効率の良い加工ができ、従来比で 10,000 倍以上の高速の加工も可能となる。例えば、従来法で徹夜で 1 週間の加工をすると、この時間はおよそ 10,000 分である。これをホログラムで加工すると 1 分以下で加工できるということに等しい。非常に高速で加工できることがわかる。これにより作製にかかるコストは大幅に減少し、広く普及できるデバイスの作製を期待できる。

謝辞

本研究は、経済産業省のプロジェクトである「<ナノテク部材イノベーションプログラム>三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」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) 黒岩, 田中他, 2003 年秋季・応用物理学
- 2) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao, Proc., SPIE 5339, 185 (2004)
- 3) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao, Opt. Express 12, 1908 (2004)
- 4) Masahiro Yamaji, Hayato Kawashima, Jun'ichi Suzuki, and Shuhei Tanaka, APPLIED PHYSICS LETTERS 93, 041116 (2008)