

超短パルスレーザーによる光学素子作製のための微細構造形成技術の基礎実験*

目黒 和幸**、渡邊 涼太***、大坊 真洋***

超短パルスレーザーは非熱的・非接触で微細加工を実現する優れたツールである。様々な素材に対して加工条件を確立することや、どの程度の寸法精度で加工できるかといった知見を有することが産業応用上非常に重要である。本報告では光学素子作製のための一手法としてレーザー微細加工に注目し、Si(100)表面への溝加工および周期構造形成について加工試験を行った。様々な素材に対して微細加工を行うには、超短パルスレーザーは有用なツールであることが示された。

キーワード：超短パルスレーザー、微細加工、レーザー誘起微細周期構造

Ultrashort Pulsed Laser for Microfabrication of Optical Devices: Fundamental Experiments

Kazuyuki Meguro, Ryota Watanabe and Masahiro Daibo

Ultrashort pulsed lasers have become important tools for noncontact and nonthermal microfabrication. For such fabrication, the precision-mechanics industry requires that the processing parameters (e.g., material, laser power, and groove width) of ultrashort pulsed lasers be optimized for a given application. Here we report of the use of ultrashort pulsed lasers for microfabrication of grooves and other periodic structures on a Si(100) surface. The results show that ultrashort pulsed lasers are suitable for fine fabrication of various materials.

key words : ultrashort pulsed laser, micro-machining, laser-induced periodical surface nano-structure

1 緒言

近年の表示素子では振幅(明るさ)と波長(色)の制御の他、液晶ディスプレイや偏光フィルタ型3DTVなど偏光特性を利用した素子が多く使われ始めている。このようなデバイスにはワイヤグリッド偏光子や回折格子などの偏光状態を制御する光学素子が使われており、その細線の太さや間隔は数百nm～数十 μm

の寸法に加工されている。

精密部品の微細加工は機械加工(微細切削、放電加工など)や半導体プロセスで行われるのが一般的である。しかし、上記のような光学素子やMEMS(微小電気機械素子)ではガラスや光学結晶などの硬脆材料や誘電体の加工が要求されることから機械的手法では加工が困難である。一方、半導体プロセスは原

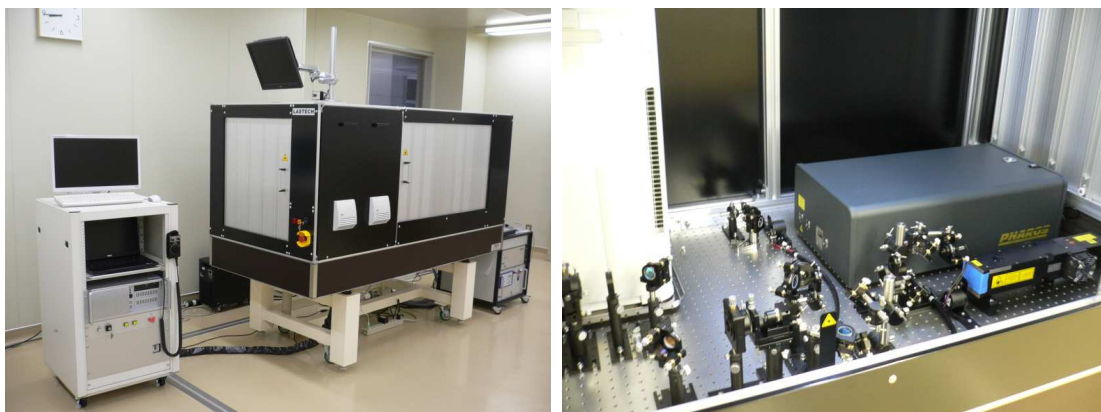


図1 超短パルスレーザー微細加工機(左)とレーザー発振器(右)

* 平成23年度 基盤的・先導的技術研究開発事業

** 電子情報技術部(現 機能表面技術部)

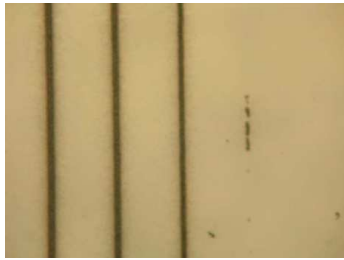
*** 岩手大学大学院工学研究科

版となるフォトマスクがあれば微細パターンニングが容易であるが、大量生産にならないと製造コストが高額となることが懸念される。そこで近年注目されているのがレーザー微細加工である。

超短パルスレーザーは非常に短い時間(ピコ秒~数百フェムト秒)の光パルスが発生するレーザーである。瞬間的に巨大なエネルギーをターゲットに与えることができ、熱が伝搬する前にレーザーパルスが消失することで溶融箇所のない非常にシャープな断面を得

ることができる。また、その強力な光電場により多光子吸収等の非線形光学効果により、透明体への加工あるいは基本波の回折限界を超えた微細加工も可能である。このような大きな魅力がある一方で、従来の超短パルスレーザーは環境の温度変化や振動で特性が揺らいでしまい非常に扱いにくい一面を有していたが、近年になって安定に動作する超短パルスレーザーが市場に出回りはじめ、サイエンスの道具から産業レベルで役に立つ加工機へと進展しつつある。

Si



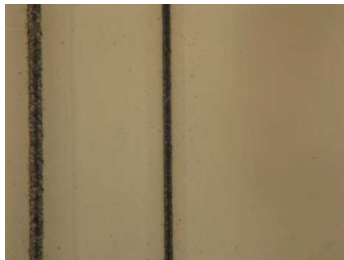
	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	36 mW	280 fs	10 μm	0.35 μm
(b)	36 mW	1 ps	9 μm	0.22 μm
(c)	36 mW	5 ps	7 μm	0.06 μm
(d)	36 mW	10 ps	×	×

サファイア



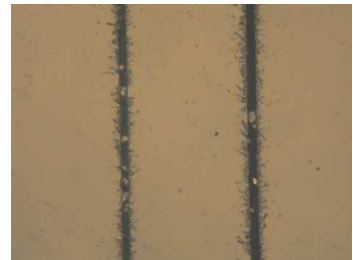
	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	980 mW	280 fs	12 μm	3.4 μm
(b)	445 mW	280 fs	×	×
(c)	980 mW	5 ps	×	×
(d)	980 mW	280 fs	12 μm	3.4 μm
(e)	4282 mW	5 ps	18 μm	5.3 μm

石英



	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	4282 mW	5 ps	20 μm	4.8 μm
(b)	1001 mW	280 fs	12 μm	2.8 μm
(c)	498 mW	280 fs	×	×

PMMA



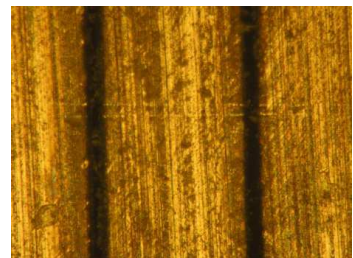
	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	318 mW	280 fs	10 μm	4.7 μm
(b)	450 mW	280 fs	12 μm	3.6 μm

SUS316L



	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	2039 mW	5 ps	28 μm	1.7 μm
(b)	998 mW	5 ps	18 μm	7.7 μm
(c)	1001 mW	280 fs	22 μm	3.9 μm

超硬合金



	平均パワー	パルス幅	加工幅	加工深さ
(a)	996 mW	5 ps	19 μm	9.0 μm
(b)	1002 mW	280 fs	18 μm	8.4 μm

図2 超短パルスレーザーによる各種素材の加工例

そこで、本研究では各種材料へのレーザー微細加工の試験を行い、光学素子作製に必要な基礎技術の開発を行った。

2 実験

実験に使用した超短パルスレーザー発振器は、Light Conversion 社 PHAROS-4W の Yb:KGW フェムト秒レーザー(発振中心波長 1,030 nm、バンド幅約 8 nm)である。図 1 に超短パルスレーザー微細加工機の外観写真を示す。このレーザーは①出力(~ 4 W)、②繰り返し周波数(1~200 kHz)、③パルス幅(260 fs~10 ps)を独立に変化させることが可能である、これに④試料ステージの移動速度を加えたパラメータを変化させながら、レーザー微細加工試験を行った。

3 結果と考察

3-1 様々な素材への加工試験

まず、どのような素材の加工が可能であるかを調査するために、様々な素材を用意して加工試験を行った。用意した加工素材は、Si、石英、サファイア、PMMA(アクリル)樹脂、SUS316L(ステンレス)、超硬合金である。レーザー加工時の集光レンズはミットヨ製赤外補正対物レンズ(倍率5倍)を用い、ガルバノスキャン速度 50 mm/s、レーザー繰り返し周波数 200 kHzに条件を固定して、照射パワーとパルス幅を変化させて加工の様子を観察した。加工痕の幅と深さは三鷹光器製NH-3SPによって断面プロファイルを測定して評価した。この結果を図2に示す。Siに対して照射パワーを36 mWに固定しパルス幅を変化させて加工の状況を観察したところ、パルス幅が長くなるにつれて加工痕の幅・深さ共に減少していき、パルス幅10 psでは加工ができなくなった。これは、パルス幅が長くなるとピークパワーが小さくなることで照射フルエンスが加工閾値を下回ったためと考察できる。サファイアの(a)と(d)は同

条件(照射パワー $P = 980$ mW、パルス幅 $\tau = 280$ fs)であり加工が行われているが、照射パワーが小さい時(b)やパルス幅が長い時(c)では加工されないことが明確にわかる。パルス幅を長くして照射パワーを極端に大きくする(e)と加工されるが、加工痕の周辺部に熱影響層が観察される。その他の石英、アクリル樹脂(PMMA)、ステンレス鋼(SUS316L)、超硬合金でも加工幅10~20 μm の溝加工が加工であった。これらの内、レーザー波長(1,030 nm)の領域で透明な材料であるサファイア、石英、PMMAについて、いずれの素材も表面に溝加工が可能であった。これは少なくとも3光子以上の多光子吸収による光化学作用で加工が進行したことが容易に推測される。

3-2 Si(100)の詳細な加工試験

微細光学素子の作製に当たりMEMSや電子デバイスでも多用されるSi(100)への微細加工条件を詳細に調査した。Si(100)は容易に平滑な試験片を入手でき、ナノインプリントの金型としても使用が可能である。

10 倍の対物レンズを用いた Si(100)に対する超短パルスレーザー加工した結果を図 3 に示す。CCDカメラで加工部を観察し、加工痕の有無をパルス幅に対してプロットしたものである。パルス幅が短くなると小さなパルスエネルギーでも加工が可能であることが明らかである。 Δ 印は、一樣に加工されず空間的・時間的に加工されたり加工できなかったりした条件である。この原因は、加工対象表面に不純物による汚染があることや、基板が傾いていたことによる試料表面-レンズ間距離の変化で照射フルエンスに差が出たものと考えられる。正確な加工閾値を見出すためには各加工条件に対して、清浄な試料表面の準備、加工環境の安定化、実験回数を増やすことが必要である。

次に、パルス幅を最短の 259 fs に固定して Si(100)表面を加工した際の加工溝幅とパルスエネルギーの関係を図 4 に示す。約 5 nJ が加工閾値となり、約 10

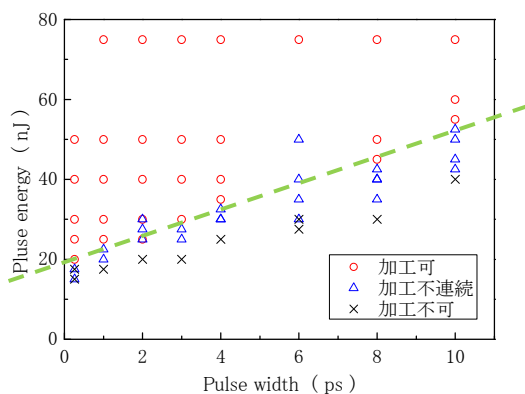


図3 加工痕の有無のパルス幅依存性

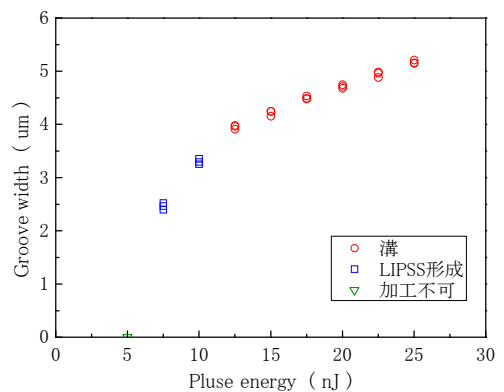
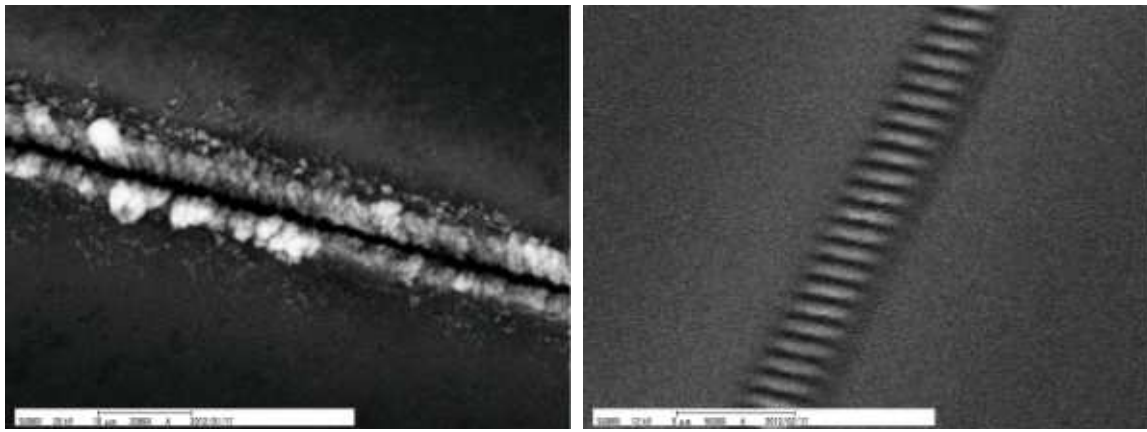


図4 加工溝幅のパルスエネルギー依存性



(a) $E_p = 22.5 \text{ nJ}$ のとき

(b) $E_p = 7.5 \text{ nJ}$ のとき

図5 加工痕のSEM像

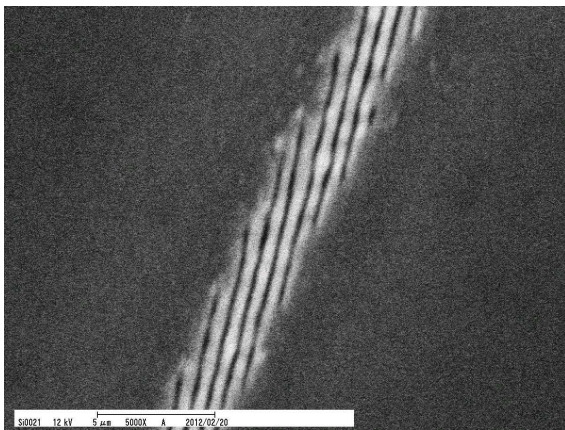


図6 垂直偏光の時のLIPSS形成

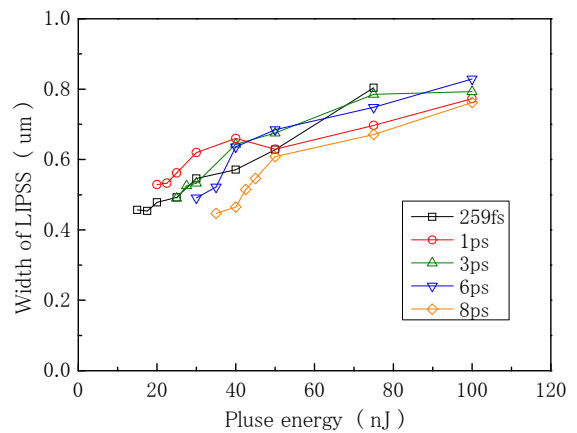


図7 LIPSS幅とパルスエネルギーの関係

nJ以上の領域で溝加工が可能であった。詳細な加工痕の形状をSEMによって観察した結果を図5に示す。図5(a)はパルスエネルギー $E_p = 22.5 \text{ nJ}$ の時のもの、図5(b)は 7.5 nJ の時のものである。図5(b)には溝形状の内部に周期的な微細溝が形成されているが、これは入射光と試料表面の散乱光の干渉によって生じるレーザー誘起周期表面構造(LIPSS: Laser Induced Periodic Surface Structure)と呼ばれるものである。この条件の場合には約 800 nm 周期のLIPSSが形成された。

図5(b)は入射光の偏光方向と溝の長軸方向がほぼ平行の状態で行った結果で、この場合にはLIPSSは偏光方向と直行する方向に周期的な溝が形成された。次に $\lambda/2$ 波長板で偏光を 90° 回転させてLIPSS形成を試みた。この結果を図6に示すが、偏光の回転に沿ってLIPSSの方向も回転している様子が観察できた。図5(b)と図6で溝方向に対して完全に直交/平行でない理由は、手持ちの $\lambda/2$ 波長板が $\lambda = 1,064 \text{ nm}$ 用であり、 $1,030 \text{ nm}$ に対してわずかに位相差のずれが生じているためであると考えられる。 $1,030 \text{ nm}$ 用の $\lambda/2$ 波長板および $\lambda/4$ 波長板を準備する必要があるが、任意の方位角への周期構造を形成できる目途が立った。

図7にLIPSSの幅に対する入射パワーエネルギーの依存性を示す。 40 nJ 以下の領域でLIPSSの幅がパルス幅に依存している可能性のあるデータが見られる。

超短パルスレーザーによってSi(100)表面に対して溝加工およびLIPSSの形成が可能であり、溝幅やLIPSS間隔が照射パワーに依存していることが分かった。

4 結 言

光学素子作製のための加工技術開発を目指し、超短パルスレーザー加工機を用いて各種素材の加工試験およびSi(100)における溝加工およびLIPSS形成の加工実験を行った。レーザー波長($1,030 \text{ nm}$)専用の光学素子が手元に無く、特に偏光に関しては十分な条件で加工実験を行うことができなかったが、レーザー波長以下の微細周期構造を持つLIPSS形成を行うことに成功した。また、LIPSSの幅とパルスエネルギーの間に相関があることを示唆するデータが得られたが、確度が乏しいため再現実験が必要である。目的としていた光学素子(回折格子や複屈折素子など)に対して超短パルスレーザー微細加工は非常に有用なツールであることが分かった。