

YAG 高調波を利用したシリコンの微細加工*

—熱変形法によって作製したマイクロレンズの加工光学系への応用—

山田啓司** 加藤寛満*** 上田隆司† 細川 晃† 田中隆太郎†

Micro Machining of Silicon by Second-Harmonic Pulsed Nd:YAG Laser

- Application of Microlens Fabricated by Thermal Deformation Method as Optical System for Laser Machining-

Keiji YAMADA, Hiromitsu KATO, Takashi UEDA, Akira HOSOKAWA and Ryutarō TANAKA

Micro machining of single-crystalline silicon is performed with the second-harmonic of Nd:YAG laser in this study. In experiments, various shapes of plastic microlens are fabricated on a transparent substrate by the developed die-less method. These microlenses are shaped by thermal deformation induced by the Er:YAG laser beam absorbable for the acrylate resin. And then, these lenses are used as optical devices to generate the local high energy density desired for machining of silicon in air and water. Machining characteristics are investigated in the single groove machining process, and the grid groove pattern and the herringbone pattern are formed to demonstrate the feasibility of proposed methods.

Key words: laser machining, silicon wafer, microlens, grooving process, herringbone groove

1. 緒 言

集光光学系とマスクを併用したレーザ加工（マスクプロジェクション法）では、レンズやミラーといった光学系によってビームを細く収束して加工しきい値以上にエネルギー密度を高め、マスクによって加工材料の一部分に選択的にビームを照射することで材料の熱処理、熔融、蒸発等を引き起こす。この加工法は少品種大量生産では効率がよいものの、マスク製作に要する時間とコストが高いため少量生産には適さない。

筆者らは、簡便なレーザ加工装置を利用し、金型を使用せずにプラスチック製マイクロレンズを短時間に作製する方法を開発した¹⁾。本手法では作製できるレンズ形状の自由度が高く²⁾³⁾、図1に示すように集光機能を統合したマスクを短

時間で作製することができると考えられる。従来のマスクは加工に不必要な部分のレーザ光を遮断する役割を果たすものであったが、ここで提案するマスクは加工に必要な部分のみエネルギー密度を高めるものである。

本研究では、開発手法によってプラスチック基板上に集光レンズを作製し、これをマスクとした除去加工を試みる。プラスチック基板が透光性を示す波長 $\lambda=532\text{nm}$ のNd:YAG第二高調波を加工用レーザとして用いる。加工対象としては、硬脆材料であるために機械加工が困難で、平面度とあらさに優れた前加工済みの部材が入手容易であるため、微細加工の対象として取り上げられることが多い^{4)~6)}シリコンウエハとした。シリコンは可視光付近の波長で消衰係数がきわめて高い⁷⁾ことから、Nd:YAG第二高調波による加工が効率的であろうと予想される。また、 $\lambda=532\text{nm}$ の光が水に対して高い透過性⁸⁾を有していることを利用し、水中加工を試みている。

2. 実験装置・実験方法

2.1 マイクロレンズの作製

マイクロレンズの作製は波長 $\lambda=2940\text{nm}$ のEr:YAGレーザ（日本赤外線工業、NE-1010）を使用して行なう。図2に示すように、二軸自動テーブル上に設置したアクリル基板に対して鉛直上方よりEr:YAGレーザを照射することで熱変形を誘起し、基板に微小な凸レンズを形成する。レーザ光は焦点距離100mmのレンズで集光しており、焦点位置でのビーム径は約0.2mmである。

アクリル樹脂は加工実験に用いるNd:YAGレーザ第2高調波に対しては良好な透過性を示すが、Er:YAGレーザには吸収性を示す¹⁾。したがって、照射中にテーブルを移動させてレーザスポットを走査すれば、局所的な熱変形が任意の位置で誘起される。照射後も変形部の形状は凍結され、種々のレンズ形状を得ることができる^{1)~3)}。

本研究ではシリンドリカルレンズ、十字状レンズおよびハの字状レンズを作製し、これらを集光光学系として利用してレーザ加工実験を実施する。作製したマイクロレンズの形状は、顕微鏡観察とともに表面あらさ計による測定によって評価した。

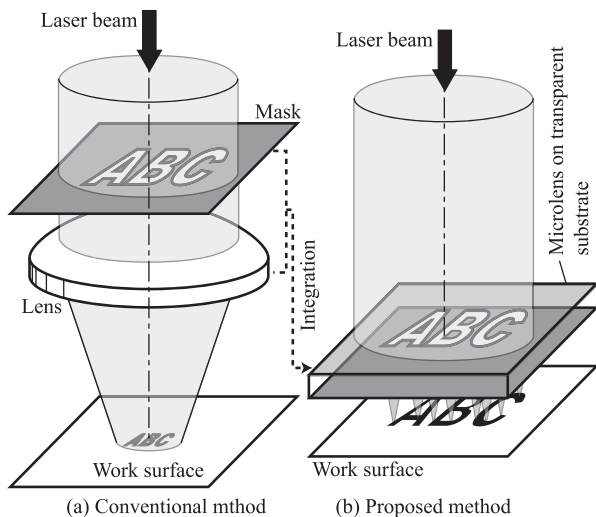


Fig. 1 Laser machining process by mask-projection method

* 原稿受付 平成22年4月7日
 ** 正会員 広島大学大学院工学研究科（東広島市鏡山1-4-1）
 *** パナソニック電工（株）（大阪府門真市大字門真1048）
 † 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科（金沢市角間町）

2.2 レーザ加工実験

上記手順によって作製したマイクロレンズを利用して Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 $\lambda=532\text{nm}$) を集光し, 加工実験を行う. 図 3 に示すように, アクリル基板の裏面からレーザー光を入射し, 加工材料に対向するマイクロレンズによって加工材料表面 (シリコンウエハ {100} 面) に集光する. アクリル基板は水槽の一壁を兼ねており, 加工材料は槽内に懸下保持されている. 水中加工を行う際には, 槽内に蒸留水を満たし, 加工材料の被加工部は水中に漬けられている. 加工材料を保持している治具は, 位置調整用の XY 微動ステージを介して Z 軸自動テーブル上に設置されており, 加工中に一定速度送りを与えることができる.

マイクロレンズと加工材料の間の距離は YZ 微動ステージで調整できる. 加工実験においてレンズとウエハ間距離を決定するには, レンズ焦点距離をあらかじめ求めておく必要がある. そこで, 可視波長の He-Ne レーザ光を入射し, 気中, 水中におけるマイクロレンズの焦点位置を事前に確認しておく, 加工実験では微動ステージで加工材料表面を焦点位置に調整した.

なお, マイクロレンズは後述のようにサイズが小さく, レンズ部に入射したレーザー光のエネルギーを測定することは困難である. そこで, 以下で示す照射エネルギーはレーザー加工機射出口で測定した値である.

加工後の材料は電子顕微鏡による観察とともに触針式あらさ計によるプロファイル測定も行なって加工形状を評価している. 水中加工で発生した加工くずを観察する際には, 水と

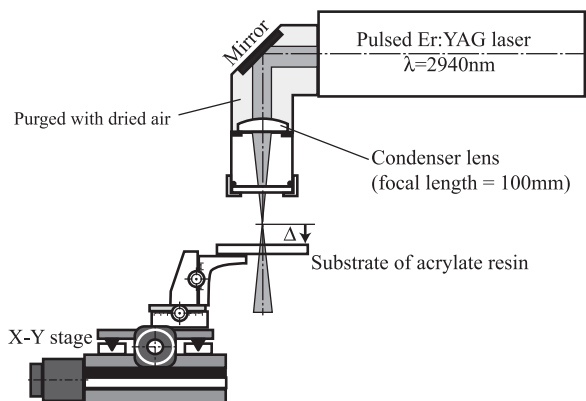


Fig. 2 Experimental set-up for fabrication of microlens on substrate

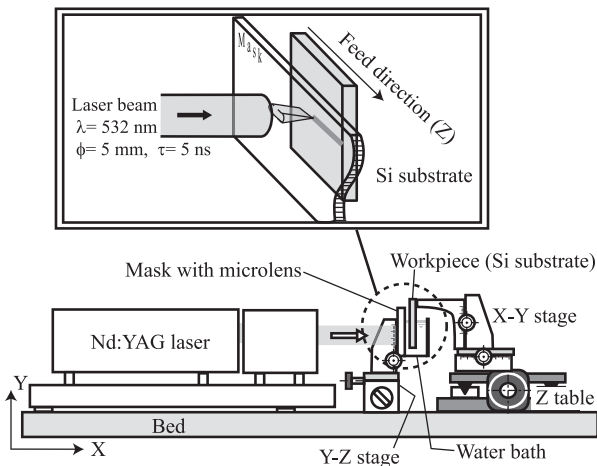


Fig. 3 Experimental set-up for laser machining of silicon substrate

ともに沈澱している加工くずを採集して室温下で乾燥させてサンプルとした.

3. 実験結果・考察

3.1 マイクロレンズの性状

作製したマイクロレンズの実体顕微鏡像写真を図 4 に示す. 図 4(a)-(c) は直線走査によって作製したシリンダリカルレンズ, 十字状レンズ, ハの字状レンズである. いずれも Er:YAG レーザ光の焦点は基板表面から 10mm 下方 (アクリル基板内部) に調整しており, エネルギー $E=13.25\text{mJ/pulse}$, パルス幅 $\tau=0.2\text{ms}$, パルス周波数 $f=4\text{Hz}$ と一定の条件下で照射を行った. レーザの走査速度は $V=0.12\text{mm/min}$ とした. 図示した作製レンズの中では, もっとも作製時間を要するのは (b) 十字状レンズであるが, 段取り時間を含めても 1 時間未満で作製は終了する.

図 4(a) 中に記した矢印 (1), (2) は, 触針式あらさ計によってシリンダリカルレンズの形状を測定した際の触針走査方向を表しており, それぞれ図 5(1), (2) に示した測定プロファイルに対応している. Er:YAG レーザの走査方向に対して垂直なプロファイル (1) からは, レンズ中心でサグ (突き出し高さ) 及び曲率が最大となっており, また優れた対称性を有したなめらかな面が得られていることがわかる. 一方, レーザ走査方向と平行に触針走査して測定したプロファイル (2) では, 照射開始点と終了点においてサグが大きくなっている. したがって, レンズ両端では焦点位置がずれていると考えられるので, レンズ中央部を集光に利用して次項以降のシリコンウエハのレーザー加工実験を行った. 可視波長の He-Ne レーザを作製したレンズに入射し, 集光像をスクリーンに投影し

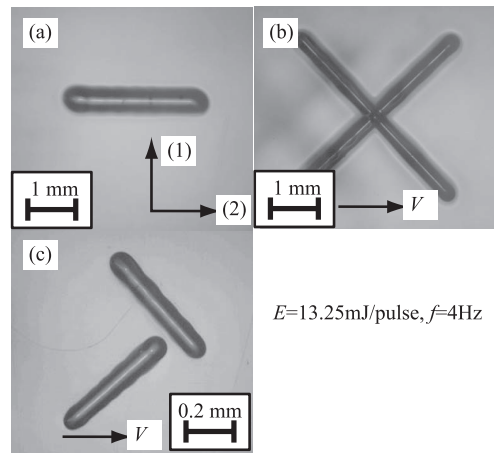


Fig. 4 Photographs of microlens fabricated on PMMA substrate

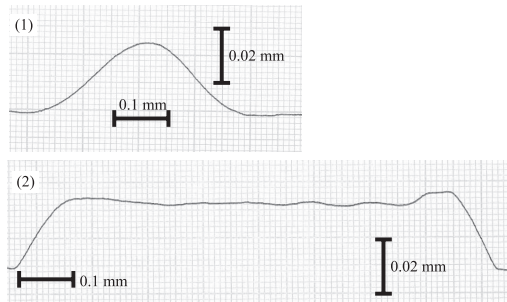


Fig. 5 Profiles of cylindrical lens fabricated on PMMA substrate

て焦点位置を調査したが、この際、いずれのレンズにおいても作製レンズと同一形状に集光可能であることを確認した。

図4(b)および(c)中に示した矢印は、シリコンウエハ上に形状創製加工を行った際のウエハ走査方向を示しており、図3中のZ方向と同一である。

3.2 マイクロレンズを用いたレーザ溝加工

大気中においてシリンドリカルレンズを使用してシリコンウエハ上に加工した溝をSEM観察した。溝幅を計測する場合には溝加工後のウエハ照射面を観察し(図6)、溝深さを計測する場合にはウエハを機械的に切断して得た断面をSEM観察した(図7)。図6および7から、加工された溝周囲は損傷を受けておらず、マイクロレンズによって集光された部分のみに溝が形成されていることがわかる。しかしながら、比較的広範囲に多量のデブリ散乱があり、また溝の両側にはデブリ堆積によるものと思われる高い盛り上がりが見られる。加工物は観察前に蒸留水中にて超音波洗浄を行ったが、これらのデブリは除去できなかった。また、加工中に照射点に向けて圧縮空気(0.3MPa)を噴き付けた場合にもデブリ除去は困難であった。

照射パルス数と溝幅および溝深さの関係を図8に示す。図から、レーザパルス数 n を変化させても加工される溝幅は大きく変化しないことがわかる。これに対して、溝深さはパルス数増大につれてほぼ直線的に漸増している。

水中での加工では、気中加工に比べて除去能率が非常に低かった。これは、今回の加工機構が熱的プロセスであり、水中では加工しきい値が高くなっていることが原因と考えられ

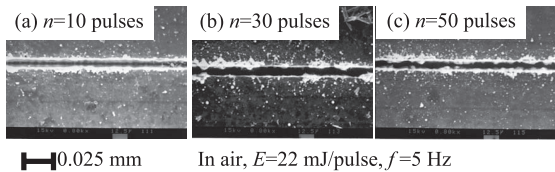


Fig. 6 Surface of silicon on which groove is machined in air

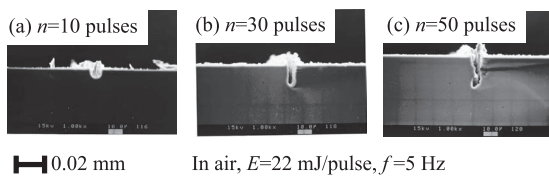


Fig. 7 Cross section of silicon on which groove is machined in air

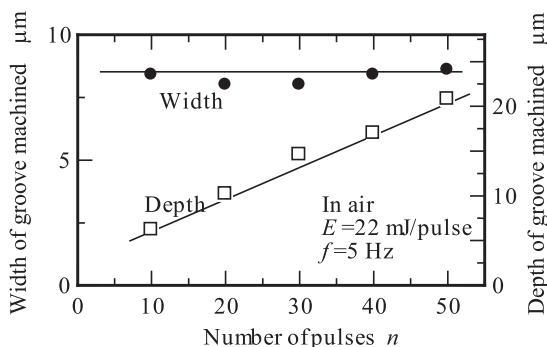


Fig. 8 Development of groove machined in air

る。加工特性の調査のため、気中加工よりも照射パルス数を大きく設定し、 $n=1000$ とした。照射エネルギー E を変化させて溝加工したウエハ照射面および断面SEM像を図9および10に示す。

図9(c)のように、高エネルギーでは溝の両側に損傷を生じてしまったものの、気中とは異なり、照射面にデブリは飛散しておらず、断面の観察からも溝両側へのデブリ堆積もない良好な加工が可能であることがわかる。同様の結果は金属材料を対象とした水中レーザ加工で報告されている⁹⁾。

本研究では前述のように加工能率は低かったが、水中レーザ加工では気中よりも加工能率が高いと報告している例¹⁰⁻¹¹⁾もあり、水中における加工能率向上にはプラズマの発生が寄与していると言われている。本研究ではそれら事例に比べて照射エネルギー密度が低いためにプラズマ圧による材料除去作用がなかったものと考えられる。

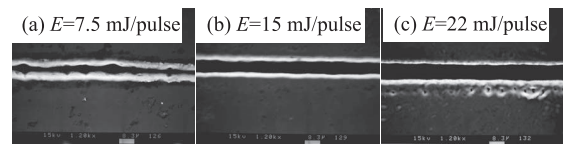


Fig. 9 Surface of silicon on which groove is machined in water

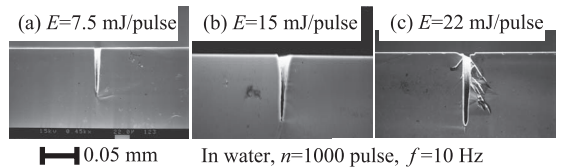
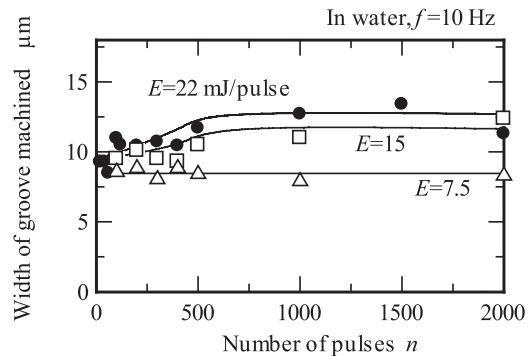
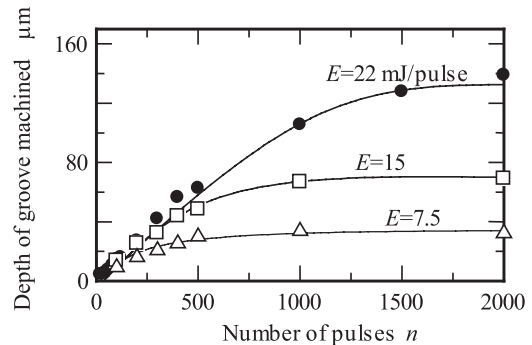


Fig. 10 Cross section of silicon on which groove is machined in water



(a) Width of groove machined



(b) Depth of groove machined

Fig. 11 Development of groove machined in water

図 10 に示す溝断面形状は、入口が幅広く、溝底部が尖ったテーパ状となった。図 11 (a) および (b) は照射パルス数増大に伴う溝幅（入口部）、溝深さの変化をそれぞれ示している。図 (a) の結果から、 $E=7.5\text{mJ/pulse}$ の場合には図 8 と同様に幅は照射パルス数 n によらずほぼ一定であり、 $E=15, 22\text{mJ/pulse}$ の場合には n 増大とともに漸増して後に収束傾向にある。また、図 (b) に示す結果では、比較的小さい領域では図 8 と同様にパルス数増加に対して直線的に溝深さが増しているものの、パルス数が大きい領域では深さがほぼ一定値に収束していくことがわかる。これは焦点がウエハ表面に固定されているために、溝が深くなるとエネルギー密度が加工しきい値を下回るためであろう。なお、溝加工の進行が停止した時点での溝形状のアスペクト比は約 4 ~ 10 であった。

加工後の水槽に沈殿した加工くずを採取して観察した例を図 12 に示す。水とともに採取して乾燥した後に観察しているので、多数の加工くずが凝集しているが、個々の加工くずは数 μm の大きさであることが確認できる。また、加工くずは水中で急冷されたために、いびつな形状をなしていることがわかる。

3.3 繰り返し溝加工によるパターン創製

水中加工で溝加工が可能であることが確認できたが、前述のようにアスペクト比は高くはないことから、深く材料除去を行うよりも、ウエハ表層の加工への応用が適当と思われる。そこで、微細な溝加工を組み合わせることで微小な表面構造を創製する加工を試みた。

加工材料は前項と同じくシリコンウエハで、図 4 (b) に示した十字状レンズを使用した。同一箇所への照射の後に加工物に一定量の送りを与える工程を繰り返すことで十字状の溝を一定間隔で重畳し、格子状の溝を創製した。送り方向は、図 4 (b) 中に示した矢印方向で、図 3 における Z 方向と同一である。したがって、送り方向に対して $\pm 45^\circ$ 傾いた多数の溝が加工される。

100 パルス照射を繰り返して格子状溝を加工したウエハ表面 SEM 像を図 13 に示す。図 (a) は溝間隔 $60\ \mu\text{m}$ 、図 (b) は溝間隔 $30\ \mu\text{m}$ の格子状溝を創製した例であり、いずれの溝間隔においても、表面にデブリ堆積はなく、規則的な格子状溝が創製できている。

同図 (c) は $30\ \mu\text{m}$ ピッチ格子状溝を拡大観察した像であるが、溝底は面粗さが大きいことが確認できる。また、交差する部分では溝深さが大きかった。

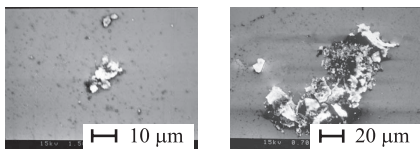


Fig. 12 Debris collected in water bath ($E=15\text{mJ/pulse}$, $f=5\text{Hz}$)

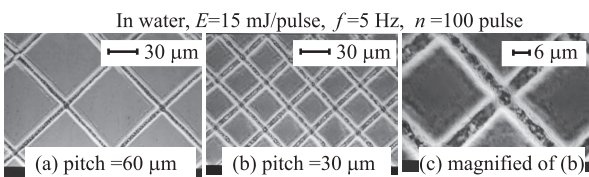


Fig. 13 Grid grooves machined in water ($E=15\text{mJ/pulse}$, $f=5\text{Hz}$)

3.4 連続加工による段差形状創製

レーザー照射中に連続的に加工物を一定速度 V で送り続けることで、段差（幅の広い溝）の加工を試みた結果を図 14 に示す。図 (a) ~ (c) は照射エネルギー E とパルス周波数 f を一定とし、送り速度 V を変化させて加工したシリコンウエハの断面プロファイル測定例である。送り速度以外は図 (a) ~ (c) と同条件である。いずれも段差幅は約 0.2mm と設定通りに加工されており、溝底面もおおむね平坦である。送り速度 $V=0.6, 1.2, 1.8, 3.6, 6\ \mu\text{m/s}$ と 5 通りの条件で加工した溝底面のあらさは $Ra=0.1 \sim 0.68\ \mu\text{m}$ とばらついた。このとき、底面のあらさ Ra と送り速度 V との間には相関関係は見られなかった。また、プロファイルからは溝側壁に傾斜がついていることがわかる。こう配比は 5:3 程度であり、側壁はなだらかな傾斜をもっている。

図 (d) は加工部を光学顕微鏡観察した例である。送り速度による差異は観察されなかったため、 $V=6\ \mu\text{m/s}$ の場合のみを示した。底部、側壁のいずれにもき裂・欠損は見られず、段差や加工部幅が局所的に増減している箇所もなかったが、走査方向の縮状加工痕が残ってしまっている。これはシリンドリカルレンズの長手方向にエネルギー密度が一樣ではないことが原因であると考えられ、今後改善の必要がある。

図 15 は段差と送り速度の関係を示しており、照射エネルギー $E=15, 22\text{mJ/pulse}$ の二種類の条件下で加工した結果を比較している。送り速度 V が增大するにつれて単位面積あたりの照射エネルギーは減少することから、段差が減少していく。この傾向はいずれの照射エネルギーでも同様であるが、両者の差は低速度において若干大きかった。

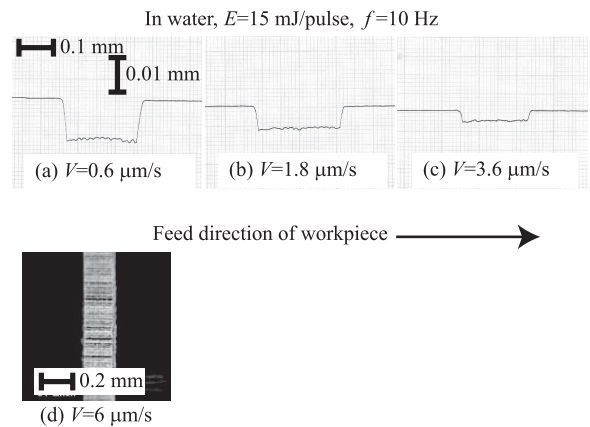


Fig. 14 Profile and aspect of steps machined in water

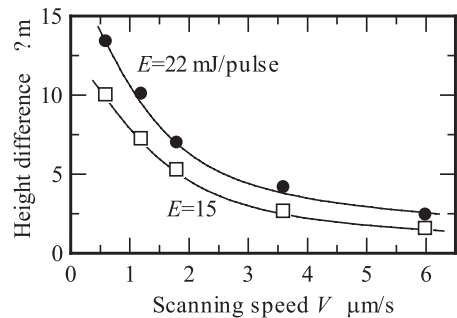


Fig. 15 Development of groove machined in water

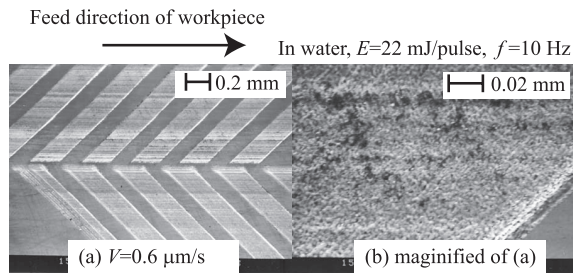


Fig. 16 Herringbone grooves machined in water

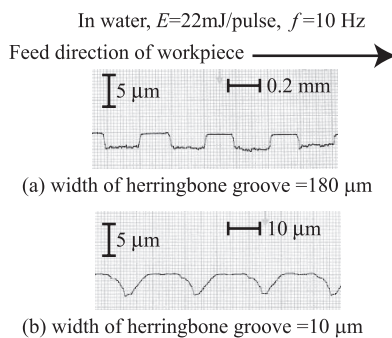


Fig. 17 Profiles of herringbone grooves machined in water

図 4(c) に示したハの字状レンズを同図中に記した矢印方向に走査し、一定幅の段差を複数組作製すると、図 16 に示すようなヘリンボーン溝を創製することができる。同図 (a) には加工部幅が約 180 μm の構造を示しているが、デブリや加工くずの堆積はなく、同一形状の周期的な構造を創製することができる。溝部底面を拡大した図 (b) から、底面は非加工部に比べてあれていることがわかる。

加工部の断面プロファイルを図 17(a), (b) に示す。ここで、(a) は加工部幅が 180 μm であり、底面部のあらさは $Ra=2.7\mu\text{m}$ であった。図からわかるように、(a) のように加工部の幅が大きい場合には平坦な底面を得られているが、(b) のように加工部幅が小さくなると平坦な底部を得ることが困難になってくる。これは、図 10 で観察されたように、入口部では幅が広く底部が尖った形状の溝が加工されるためである。

4. 結 論

本研究では、集光機能を有するマスクを要望に応じて短時間で作製する方法として透光性基板上にレーザー誘起熱変形法を適用して、種々形状のマイクロレンズを作製した。さらに、作製したマスクを使用して単結晶シリコンウエハの微細加工を試みた。得られた結果を以下に要約する。

- (1) レーザ誘起熱変形法によって作製したマイクロレンズは Nd:YAG 第二高調波を集光する機能を果たし、シリコンウエハを対象とした微細レーザー加工に適用できることを示した。

- (2) 上記手法によって作製したシリンドリカルレンズを使用した溝加工を行って、シリコンウエハへの基本的加工特性について明らかとした。気中加工では加工能率は高いものの、デブリ堆積によって表面が汚染されてしまった。一方、Nd:YAG 第二高調波が水に対して高い透過性を有することを利用して水中加工を行えば、デブリ堆積を防ぐことが可能で、アスペクト比 4 ~ 10 程度の溝を加工することができた。
- (3) 同様に作製した十字状レンズによる溝加工と間欠送りを繰り返すことで、シリコンウエハ上に直交格子パターンを創製することができた。非加工部には損傷を与えずに規則的な格子状溝を加工できることを示した。
- (4) シリンドリカルレンズを使用し、連続的な送りとレーザー照射と同時に与えることで幅の広い溝を加工して、非加工面との段差を創製した。作り出される段差は、送り速度に反比例して減少していた。
- (5) ハの字状レンズを作製して、送りを与えつつ連続的なレーザー照射とレーザー休止を繰り返すことでヘリンボーン状溝の創製を行った。

参 考 文 献

- 1) 山田啓司, Hery Mochtady, 平出寛明, 細川晃, 上田隆司: レーザ誘起熱変形によるプラスチック・マイクロレンズの作製, 精密工学会誌, **69**, 10(2003)1487.
- 2) K. Yamada, H. Mochtady, T. Ueda, A. Hosokawa and R. Tanaka: Rapid Fabrication of Various-shape Microlens by Laser-induced Deformation, Proc. of 4th. Int. Conf. of EUSPEN (2004) 57.
- 3) H. Mochtady, K. Yamada, T. Ueda and A. Hosokawa: Fabrication of Cylindrical Plastic Microlens Using Er:YAG Laser Beam -Influence of Process Parameter-, Proc. 5th Int. Sym. on Laser Precision Microfabrication (2004) 243.
- 4) 浅田晋助, 佐野智一, 宮本勇: エキシマレーザーによるシリコンの加工特性評価, 溶接学会全国大会講演概要, **66**(2000) 74.
- 5) 野崎聖和, 渡部武弘: YAG レーザによる Si のマイクロ加工, 2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001) 150.
- 6) 川本訓裕, 篠原亘, 寺川朗, 田中誠: 積層型薄膜シリコン太陽電池におけるレーザーパターニング, レーザ加工学会誌, **15**, 2(2008) 85.
- 7) E. Palik: Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando, (1985).
- 8) G. Hale, M. Querry: Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μm Wavelength Region, Applied Optics, **12**, 3(1973) 555.
- 9) 高橋邦充, 小林弘実, 米山友之: Q スイッチ Nd:YAG レーザーによる金属材料の水中アブレーション加工, 溶接学会全国大会概要, **66**(2000) 70.
- 10) 高橋邦充, 吉田智武, 米山友之, 大沢基明: 水中レーザーアブレーションによる金属材料微細加工, 溶接学会全国大会概要, **70**(2002) 118.
- 11) J. Maehara, Y. Yamada, H. Kumagai, K. Midorikawa, T. Yabe: Comparison of Simulations of and Experiments on Femtosecond Laser Ablation of Nickel in Gaseous and Water Environments, Japanese Journal of Applied Physics, **43**, 1 (2004) 172.