レーザー生成プラズマ支援アブレーション (LIPAA) によるサファイアの加工

Microfabrication of Sapphire by Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation (LIPAA)

花田 修賢*, **, 杉岡 幸次*, **, 高瀬 史裕***・宮本 岩男**
高井 裕司***・緑川 克美*

Yasutaka HANADA, Koji SUGIOKA, Fumihiro TAKASE, Iwao MIYAMOTO,
Hiroshi TAKAI and Katsumi MIDORIKAWA

(Received January 14, 2004)

Crack-free microfabrication of sapphire with little debris deposition and little swelling around ablated regions by laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) using a second harmonic of Q-switched Nd:YAG laser is described. LIPAA process has been originally developed by ourselves in which merely a single conventional pulsed laser is used. In this process, the wavelength of laser beam must be transparent to the substrate, so that the laser beam goes through the substrate first and is then absorbed by a metal target placed behind. For laser fluence above ablation threshold for the target and below damage threshold for the substrate, the laser-induced plasma is generated from the metal target and then the species fly towards the rear surface of the substrates with very high speed. Due to the interaction of the laser beam and the plasma, ablation takes place at the rear surface of the substrate. Dependence of ablation depth and width of ablated grooves on scanning speed and target-substrate distance are investigated. Based on the obtained results, LIPAA process is applied for scribing of sapphire substrates. Double scan of laser beam with a shift of the focal point shows a great potential of high-quality scribing of sapphire substrates.

Key Words: Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation (LIPAA), Micromachining, Sapphire, Scribing

1. 緒言

硬質材料として知られるサファイアは光学透過性、耐熱性および絶縁性等に優れており、その性能に応じて、半導体産業における半導体の保持基板や光エレクトロニクス産業における光導波路及び電子産業における集積回路基板など広く工業分野への応用がなされている。なかでも、近年ワイドバンドギャップを有する GaN 系半導体を用いた青から紫外領域の発光ダイオード・レーザーダイオード (LED・LD) の基板として広く用いられている。これらのデバイスの開発が急速に進むにつれ、サファイア基板の切断加工技術には、高歩留り、高生産性、さらにはプロセスの自動化や量産への適応が必須となってきた。現在、サファイア基板の切断加工技術には、ダイヤモンドのような非常

に硬い物質で表面をスクライプする、いわゆる接触式の機械的スクライピング法が行われている。しかし、本手法はダイヤモンド針の磨耗、それによる加工性の変動、コストが問題となっている¹⁾。

一方、短パルスのレーザーを用いたアブレーション技術は高速かつ非接触な固体の微細加工を実現する方法であり、様々な材料への応用が期待されている。しかしながら、一般的にアブレーション加工に用いられるレーザー (エキシマレーザー、YAGレーザー等) によるサファイアの加工は多光子吸収によって行われるため、非常に大きい照射強度 (数十-数百 J/cm²) が必要であると同時に、パルス幅が数 ns-数十 ns 程度であることから加工対象となる固体の周囲への熱影響が無視できず、損傷やクラックが発生する。そこで、高性能な加工を行うためにはさらに短い波長、つま

* 理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research) (2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

** 東京理科大学基礎工学研究科電子応用工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

Department of Applied Electronics, Faculty of Industrial Science & Technology, Tokyo University of Science (2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510, Japan)

*** 東京電機大学工学部電気工学科 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2本館402)

Department of Electrical Engineering, Tokyo Denki University (Nishiki-cho 2-2, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457, Japan)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental principle.

り真空紫外領域の波長をもつレーザー，もしくはフェムト秒といったさらに短いパルスのレーザーを用いる事が必要となる。しかしながら，これらのレーザーは出力，フォトンコスト，安定性，信頼性等に問題があり，実用化には程遠いとされている。これに対し，我々が開発したレーザー生成プラズマ支援アブレーション (Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation; LIPAA) は汎用的パルスレーザー光源を用い，簡便かつ高速，高品質な透明材料の微細加工を実現する²⁻⁴⁾。本研究では，我々がこれまで開発を行ってきたLIPAAシステムを用いサファイア基板のスクライビングへ適用した結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 LIPAAプロセスの概念

LIPAAプロセスは我々が独自に開発したプロセスである。その概念図をFig. 1に示す。LIPAAプロセスを大きく分けるとレーザー光源を含む照射光学系，加工対象材料，金属ターゲットの3つの主要部品によって構成されている。この時，加工対象材料は用いるレーザー光の波長に対して透明であることが必要である。LIPAAでは透明材料裏面に金属ターゲットを配置し，レーザー光を加工対象材料表面側から照射する。加工対象材料はレーザー光に対して透明なため，透過したレーザー光はその下の金属ターゲットで吸収され，アブレーションによってプラズマを生成する。プラズマはただちに加工対象材料裏面に到達し加工対象材料に光吸収変化を生じさせる。その結果，照射しているレーザー光の吸収が生じ，試料裏面がアブレーションされることによって，透明材料裏面での微細加工が可能となる。

2.2 LIPAAシステム

近年我々は，実用化に向けたLIPAAシステムの開発を

Fig. 2 Photo of processing part of LIPAA system. It consists of the objective lens (right) for high-resolution microfabrication, the observation system with the CCD camera (middle) and the galvano mirror type scanner (left) for high-speed patterning of complicated microstructures.

行った。Fig. 2にその加工装置内部の写真を示す。本装置はレーザー光源及びPC制御による集光光学系，観察系，XYZステージによって構成されている。光源にはNd YAGレーザー (JDS Uniphase, 波長: 532nm, パルス幅: 500ps, 繰り返し周波数: 1kHz) を使用している。集光光学系は，高分解能加工及び高速かつ複雑な形状加工の両方を行うために，用途に応じて2つの光学系から成り立っている。高分解能加工用には対物レンズ集光光学系 (焦点距離: 6mm, 開口数: 0.2) を，高速かつ複雑な形状加工用にはガルバノスキャナー光学系 (焦点距離: 80mm) を用いている。今回の実験では，直線的加工しか行わないため，対物レンズ集光光学系のみを用いた。対物レンズはマイクロメーターによって10 μm の解像度で焦点位置を調整できる。基板ホルダーはターゲットホルダーの上に取り付けてあり，ターゲット-基板間隔は0.1 μm の分解能で，0-5.5mmの範囲で調整できる。パターン加工を行う場合は，試料とターゲットの両方を同時にXYステージ上で走査する。このとき0.1 μm の分解能で最大50mm移動することが可能である。観察系にはCCDカメラ ($\times 20$) が取り付けられてあり，加工前後の試料の状況を観察する事が可能となる。集光光学系及び観察系は，それぞれをスライドすることによって切り替えを行う。金属ターゲットには銅板 (99.96%) を，透明材料には厚さ330 μm のサファイア基板を用い，ターゲット-基板間距離は0-100 μm と変化させた。レーザー光照射は大気中で行う。レーザーフルエンスはほとんどの場合3.5J/cm²であり，一部の実験においては1.6-4.0J/cm²と変化させた。走査速度は1および3mm/minの二通りで行った。また，ターゲット-基板間距離の変化に関わらず，レーザー光の焦点は常に基板の裏面に維持されて

Fig. 3 Optical microscope image of microstructured sapphire substrates using objective lens.

Fig. 4 Cross sectional profile of groove fabricated by LIPAA process.

いる。サファイア基板加工後、塩酸処理を施し、純水による5分間の超音波洗浄を行った。加工溝の観察及び断面形状測定には光学顕微鏡および触針型表面段差計を使用した。

3. 実験結果及び考察

3.1 サファイアの加工特性

サファイアのスクライビング加工を行うにあたり、結果として評価する点は加工幅、加工深さ及び加工断面形状等があげられる。加工形状を制御するパラメーターにはレーザーフルエンス、走査速度及びターゲット-基板間距離がある。今回、我々はレーザーフルエンスを $3.5\text{J}/\text{cm}^2$ 一定にし、ターゲット-基板間距離及び走査速度に対する加工形状の依存性を調べた。

Fig. 3にLIPAAプロセスによって加工されたサファイア

Fig. 5 Dependence of ablated linewidth on distance between Cu target and sapphire substrate for laser scanning speeds of 1 and 3 mm/min. The laser fluence is set at $3.5\text{J}/\text{cm}^2$.

加工溝の光学顕微鏡像を示す。ターゲット-基板間距離は $30\text{ }\mu\text{m}$ であり、走査速度は $3\text{ mm}/\text{min}$ である。また、この時の加工溝の触針型表面段差計による断面形状測定結果をFig. 4に併せて示す。Fig. 3, 4よりLIPAAプロセスでは良好なサファイアの線溝加工が行えることが確認できる。加工部周辺には熱的損傷によるクラックやひび割れは見られず、デブリの堆積も極めて少ない。加工線幅は半値幅で $13\text{ }\mu\text{m}$ 、加工深さは約 $12\text{ }\mu\text{m}$ である。

Fig. 5にターゲット-基板間距離を変化させた時のLIPAAプロセスによるサファイアの加工溝線幅の変化を測定した結果を示す。この時の走査速度は1および $3\text{ mm}/\text{min}$ である。LIPAAプロセスによって形成される加工溝線幅は、ターゲット-基板間距離の増加に伴い減少する。また、走査速度 $3\text{ mm}/\text{min}$ に比べ、 $1\text{ mm}/\text{min}$ の方が加工溝線幅は大きくなる。

ターゲット-基板間距離の増加に対する加工溝線幅の減少は、レーザー光によって生成されたプラズマとレーザー光との相互作用の大きさに起因すると考えられる。一つの原因として推測されるのは、ターゲット-基板間距離の増大によって、ターゲット-基板間でのプラズマのエネルギー損失がある。すなわち、実験は大気中で行っているため、プラズマ中の種は基板裏面への飛行中に、その運動エネルギーを損失するが、距離が増加するにつれ、その損失量は大きくなる。また、ターゲット-基板間距離が増大するに伴い、金属ターゲット上のレーザーフルエンスはレーザー光の焦点が基板裏面に常に保持されていることから、減少する。したがって、生成されたプラズマ中の種が本来持っているエネルギーも小さくなると考えられる。その結果、ターゲット-基板間距離が増加するに伴い、生成されたプ

Fig. 6 Dependence of ablation depth on distance between Cu target and sapphire substrate for laser scanning speeds of 1 and 3 mm/min. The laser fluence is set at 3.5 J/cm^2 .

Fig. 7 Dependence of average ablation depth per pulse on distance between Cu target and sapphire substrate for laser scanning speeds of 1 and 3 mm/min. The laser fluence is set at 3.5 J/cm^2 .

ラズマの基板裏面での影響は小さくなり、強度の大きいレーザー光の中心部分のみにアブレーションが生じ、加工溝線幅が減少すると推測される。

また、この時のアブレーション深さ及び1パルス当りのアブレーション深さの変化を測定した結果をFig. 6, 7に併せて示す。Fig. 6より、アブレーション深さはターゲット-基板間距離の増加に伴って減少する。ターゲット-基板間距離の増加に対するアブレーション深さの減少は上で述べ

たように、ターゲット-基板間距離の増大により、プラズマの影響が減少されることによって説明ができる。また、走査速度3mm/min時のアブレーション速度に比べ、1mm/min時のアブレーション深さは同一箇所への照射パルス数が多くなるため、大きくなる。

Fig. 7より、1パルス当りのアブレーション深さは、ターゲット-基板間距離の増加に伴い減少するが、走査速度3mm/min時の方が1mm/min時よりも1パルス当りのアブレーション深さは約2.5倍小さくなる。走査速度3mm/min時の同一箇所への照射パルス数は400であり、走査速度1mm/min時のパルス数は1200であるが、照射パルス数の増加に伴い、アブレーション速度が減少することが主な原因と考えられる。その原因の一つは、レーザーの焦点位置を常に基板のオリジナル裏面に固定しているため、加工が進むにつれ加工点におけるスポットサイズが増大し、レーザーフルエンスが減少するためである。また形成された加工形状によってレーザー光が散乱、あるいは反射され、ターゲット表面でのレーザーフルエンスが減少している可能性もある。しかし、後述のレーザー光を2度走査した場合の結果から、前者が支配的であると考えられる。

3.2 レーザースクライビングによるサファイアの切断

今回、我々はLIPAAプロセスによってスクライビングされたサファイアの加工溝部分に力を加え、分割するという方式でサファイアの切断を行った。しかし、走査速度が3mm/minの場合はスクライブ深さが10 μm 以下のため、加工痕に沿って切断することは不可能であった。スクライビングの加工条件は後の割段を容易に行う事を目的とし、上の実験結果をもとに条件を設定し、アブレーション深さが最大になる条件を最適と評価し実験を行った。そこでレーザーフルエンスは 3.5 J/cm^2 、走査速度は1mm/minとしてスクライビングを行った。Fig. 8にターゲット-基板間距離を

Fig. 8 Optical microscope images of scribed sapphire. (left) surface and (middle) cross section of LIPAA processed sapphire and (right) wall surface after cutting sapphire along scribed line.

Fig. 9 Dependence of scribing depth on laser fluence.

変化させた時のLIPAAプロセスによりスクライビング加工されたサファイア表面、加工溝断面および割段後の壁面を示す。Fig. 8より、LIPAAプロセスにより良好な加工溝を形成し、サファイア基板を割断することが可能であることが確認できる。

LIPAAプロセスによるスクライビングは、通常の炭酸ガスレーザー等によるスクライビング⁵⁾とは異なり、加工部周辺の盛り上がり極めて少ないことから良好なスクライビングを行うことが可能となる。しかしながら、Fig. 8の条件でスクライビングを行っても良好割断できない場合がある。これはスクライブ深さが10-11 μm程度であることに起因する。一般的に割断を容易に行うためには基板厚の1/3程度のスクライブ深さが必要とされており、厚さ330 μmのサファイア基板の場合、容易な分割を行うには110 μm程度のスクライブ深さが要求される。スクライブ深さをより深くするためには、レーザーフルエンスを増加することが考えられる。Fig. 9に、ターゲット-基板間距離0 μm、走査速度1mm/minの条件におけるスクライブ深さのレーザーフルエンス依存性を示す。スクライブ深さはレーザーフルエンスの増加に伴い増加する傾向が見られるが、本研究で使用するLIPAAシステムはレーザーフルエンス4.0J/cm²が最大出力であり、本装置では12 μm以上の溝加工は困難である。

そこで、スクライブ深さをより深くすることを目的とし、1度スクライビングされたサファイア基板に再度、焦点位置を加工溝底面まで移動しスクライビングした時の実験結果をFig. 10に示す。Fig. 10はスクライビングによる加工表面、加工溝断面及び割段により分割された壁面である。また比較のため、レーザー光の走査を1度のみ行った時の実験結果も併せて示す。この時のレーザーフルエンスは双方とも3.5J/cm²で、走査速度は1 mm/min、ターゲット-基板

Fig. 10 Optical microscope images of scribed sapphire. (upper) double scan with shift of focal point of laser beam and (lower) single scan.

間距離は0 μmである。2回目のレーザー走査では焦点位置を10 μmほど試料表面側(レーザー光照射側)に移動している。

Fig. 10より、2度レーザー光を走査したサファイアは1度走査したものと比較して加工溝線幅はほとんど増加していない。加工溝断面に関しては、スクライブ深さが1度のレーザー光走査に比べ、2倍の約20 μmとなり、その後割断を容易に行うことが可能となった。

2度レーザー光を走査することにより、同一箇所への照射パルス数が2倍となるため、スクライブ深さが深くなると考えられる。この時、2度目の走査を行う前に、レーザー光の焦点位置を1度目の走査で形成された加工溝底面まで移動しているため、Fig. 7で観察されたパルス数増加、すなわちアブレーションの進行に伴うアブレーション速度の減少は生じていない。従って、約2倍の深さの加工溝が得られている。その結果、複数の試料に対して安定して良好な割断を実現することができた。

4. 結論

Nd:YAGレーザーの2次高調波を用いたレーザー生成プラズマ支援アブレーション(LIPAA)によるサファイアの微細加工を行い、加工の基本特性を調べた。本手法をサファイアなどの透明硬質材料加工に使用することで、熱的影響や損傷、クラック等の発生のない良好な微細加工を実現した。さらに本手法によって形成された表面加工溝を利用し、スクライビングへの応用を試みた。サファイアのスクライビングでは、焦点位置の移動による2度のレーザー走査により、スクライブ深さを増加させ、より容易なサファイアの割断を可能とした。

謝辞

本研究を行うにあたり株式会社丸文の倉田昌実氏に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 長友正平, 李日会, 栗山規由: 第60回レーザー加工学会論文集, **60** (2003) 24-28.
- 2) J. Zhang, K. Sugioka and K. Midorikawa: Appl. Phys., **A67** (1998) 545-549.
- 3) J. Zhang, K. Sugioka and K. Midorikawa: Appl. Phys., **A69** [Suppl.], (1998) 879-882.
- 4) J. Zhang, K. Sugioka and K. Midorikawa: Opt. Lett., **23** (1999) 1486-1488.
- 5) 木原伸雄: “レーザープロセッシング”, 日経技術図書, (1990) 277-279.