

超短パルスレーザーによるダイヤモンド内部加工

千葉大学 ○徳永 大二郎 千葉大学 ◎比田井 洋史, 松坂 壮太, 千葉 明, 森田 昇

要旨

ダイヤモンドはシリコン半導体に代わる高耐圧、低損失の半導体材料として注目されている。本研究では赤外のフェムト秒パルスレーザーによる内部加工現象を利用し、ダイヤモンドのスライス加工を試みた。試料内部にレーザーを集光し、焦点を光軸と垂直に走査することで内部変質を生成した。変質の出力、走査速度、集光レンズの開口数、結晶面への依存性を明らかにした。

1. 緒言

合成ダイヤモンドは熱伝導性、絶縁耐圧が高く、半導体への応用が検討されている。そのためダイヤモンドの効率的なスライス加工法が求められているが、ダイヤモンドの一般的な加工方法であるレーザーによるアブレーション現象を利用した切断加工では、加工幅が広い材料ロスが大きい。そこで、超短パルスレーザーによるダイヤモンド内部変質(黒鉛化)現象を応用した、加工幅が小さく、スライス加工に適した加工方法が研究されている^{1,2)}。

本研究では、レーザー光軸と垂直方向にレーザーを走査することで大面積のスライスに対応できる変質を生成することを目的とする。出力や走査速度等のパラメータを調整することで、加工に適した条件を模索する。

2. ダイヤモンド内部加工

2.1 実験方法

実験装置の模式図を図1に示す。レーザー光源はトルンプ(株)の「Tru Micro 5070FE」を使用した。レーザーの主な仕様を表1に示す。図1のようにレーザー光をダイヤモンド上部から照射した。X方向から光源で照らし、変質の挙動をCCDカメラで撮影した。試料はHTHPダイヤモンドの(211)面、(111)面が表面であるものと、(100)面が表面であるものを用いた。試料は α - β ステージに両面テープで固定した。繰り返し周波数は100 kHzとした。レーザー焦点をY方向に500 μ m走査した。ダイヤモンドのレーザー照射面を原点として、レーザー光軸方向にZ座標を設定した。

2.2 結果

2.2.1 内部加工閾値推定

照射するレーザーの出力を20, 10, 6, 5 μ J/pulseに調節し、ダイヤモンド内部加工閾値を推定した。レーザーを(211)面に照射し、走査速度は100 mm/sとし、NA=0.04のf θ レンズを用いた。空気とダイヤモンドの屈折率差を考慮しない状態において焦点位置がZ = -0.3 mmとなるよう設定した。生成した変質の光学顕微鏡による観察画像を図2に示す。図2に示すようにダイヤモンド内部に線状の変質が生成されている。また、5 μ J/pulseでは、変質は生成されなかった。よって加工閾値は5~6 μ J/pulseである。

2.2.2 走査速度依存性

レーザー走査速度が内部変質に及ぼす影響を検証した。走査速度を0.1, 5, 50, 100 mm/sで行った。他の条件は実験2.2と同一とし、出力は10 μ J/pulseとした。生成した変質の観察画像を図3に示す。図3より、走査速度が遅い場合(a), (b)のように上下表面から加工が始まり、速いほど(c), (d)のようにダイヤモンド内部で加工されていることがわかる。

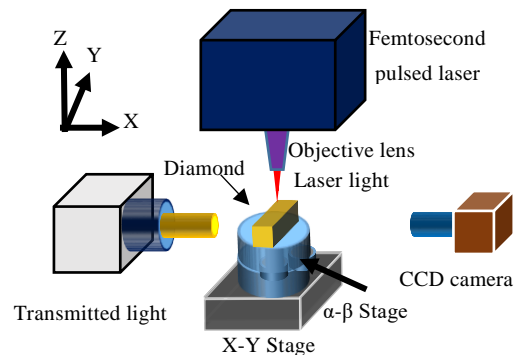


Fig. 1 Schematic illustration of experiment system

Table. 1 Light source parameter

Wavelength	1030 nm
Maximum power	200 μ J/pulse
Repetition rate	~800 kHz
Pulse width	900 fs
Beam mode	TEM ₀₀ M ² <1.3
Beam diameter	5 mm

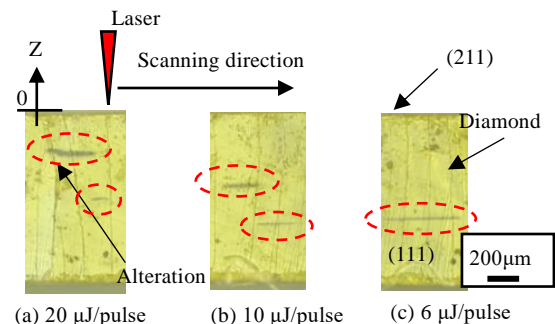


Fig. 2 Observation images of experiment 2.2.1

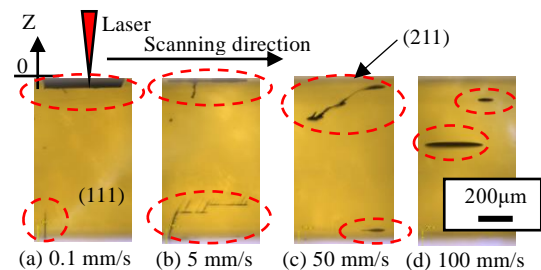


Fig. 3 Observation images of experiment 2.2.2

2.2.3 NA 依存性 集光レンズを高 NA のレンズ、「MPlan Apo NIR ×100」(NA=0.5)に変更し、内部変質の NA 依存性を検証した。出力は 5, 7.5, 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ とし、走査速度は装置の都合上 5 mm/s とした。Z=-0.3 mm とした。観察のしやすさを考慮し、10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ のみ走査距離を 1000 μm とした。生成した変質の観察画像を図 4 に示す。図 2, 図 4 より NA = 0.5 のレンズで集光したレーザーによる変質は、NA = 0.04 のレンズを用いた変質に比べ Z 方向の位置のずれが小さい。また、図 4 (c) に示す(1), (2)のように(1)で起点が Z 方向に成長し、(2)で起点から変質が横方向(Y 方向)に成長していると考えられる。

2.2.4 結晶面依存性

レーザー照射面を(211)面照射から(100)面に変えることで、結晶面が変質に及ぼす影響を検討する。結晶面以外の条件は実験 2.4 に等しく、出力は 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ とした。生成した変質の観察画像を図 5 に示す。変質の形状は、変質の成長方向とは異なる方位性を持った細かい変質が連続的に生成されていることがわかる。この方向は(111)面方向と一致していた。また、実験は複数回行ったが、加工されない場合も確認できた。

2.3 考察

2.2.1 項の実験において、レーザー集光位置は(a) ~ (c)で等しいが、加工の Z 軸方向の位置が安定していない。これは、NA が小さく、レーザーの焦点深度が深いためであると考えられる。そのため 2.2.3 項の実験では、NA が大きくなったことにより焦点深度が浅くなったため、加工の Z 軸方向の位置が安定している。

2.2.3 項の実験において、図 4 (a)および(b)は変質が横方向に進展していないが、(c)では変質が進展しているため、起点生成と変質の成長閾値は異なると考えられる。

2.2.4 項の実験において、変質がレーザー走査方向と異なる方向に変質生成されているのは、変質がダイヤモンドの劈開面である(111)面に沿って生成されるためであると考えられる。また、変質の生成プロセスは 2 段階であり、(211)面に照射して生成したものと酷似している。この 2 つのプロセスを 2 つの工程に分けることで、変質を安定して、かつ細く生成する手法を次章で考案する。

3 起点生成及び横方向進展

3.1 目的

NA = 0.5 のレンズで生成した変質は 2 段階のプロセスで生成されるように観察できる。2.2.4 項において、同条件で加工が行われない場合は、この工程のうち起点の生成に失敗していると考えられる。そこで、高出力かつ低パルス数のレーザーにより、安定して小さな起点を得ることで、レーザーの吸収率を上昇させる。その後、低出力でレーザーを走査して幅の狭い変質を進展させる新しい手法を考案する。本稿では、加工工程を 2 つに分けることが可能であるか検証する。

3.2 起点生成

起点生成はレーザーを走査せず、照射パルス数を 100~500 パルスの範囲で 100 パルス刻み、1000~5000 パルスの範囲で 1000 パルス刻みに変化させ計 10 回実験を行う。レーザー出力は 30 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ として、(100)面に照射した。照射位置は Z=-0.3 mm とした。結果を図 6 に示す。起点が生成されたのは、100, 200, 1000, 3000, 4000 パルスの時である。また、1000 パルス以上照射した場合、変質がレーザー光軸方向に伸びている。

3.3 横方向の成長

起点は起点生成実験を参考に 500 パルスで生成し、起点を生成した位置から横方向にレーザーを走査する。出力は 2.2.4 項と等しく 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ を用いた。結果を図 7 に示す。変質が(1)に示

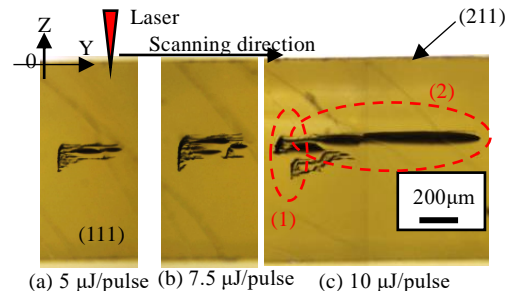


Fig. 4 Observation images of experiment 2.2.3

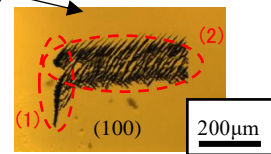


Fig. 5 Observation images of experiment 2.2.4

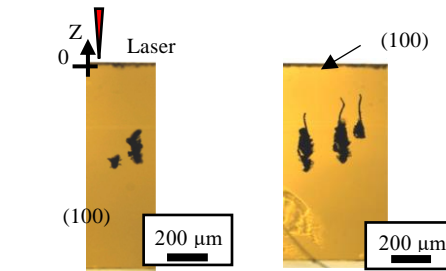


Fig. 6 Observation image of experiment 3.2

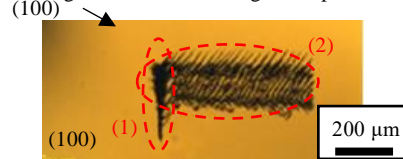


Fig. 7 Observation image of experiment 3.3

す起点から(2)のように進展している。これは、2 つのプロセスを同時に行った図 5 に酷似している。

3.4 考察

起点の生成において、照射パルス数と起点の生成閾値には関係性が薄いと考えられる。また、パルス数が少ない方が小さな起点を生成できているのは、パルス数が多い場合は、生じた起点にレーザーが吸収され、変質が進展するためである。

4 結言

- 1) レーザと垂直方向にレーザーを走査した際にダイヤモンド内部で起こる変質の加工出力依存性、走査速度依存性、集光レンズの NA 依存性、結晶方位依存性などが判明した。
- 2) 起点生成と横方向進展は 2 工程に分けて生成可能である。これにより、厚さの薄い変質を安定して生成できるようになることが期待できる。

5 謝辞

実験にあたりフェムト秒レーザーを提供していただいたトルンプ株式会社の皆様に心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T. V. Kononenko, E. V. Zavedeev, V. V. Kononenko, K. K. Ashikkalieva, V. I. Konov: Graphitization wave in diamond bulk induced by ultrashort laser pulses, Appl. Phys. A Vol. 119 No. 2 (2015) 405-414
- 2) T.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, N.M. Rossukany, A.I. Rukovishinikov, V. Romano: Three-dimensional laser writing in diamond bulk, Diam. Relat. Mater. Vol. 20 No. 2 (2011) 264-268