

ダブルパルス照射による基板表面励起加工過程の調査に関する研究

Investigation for ablation dynamics for photo-excited surface by ultrashort pulse laser

九州大学 林 照剛¹⁾ 松永啓伍¹⁾ 量 研 長谷川 登²⁾ 錦野 将元²⁾ Dinh Thanh Hung²⁾

Terutake Hayashi, Keigo Matsunaga, Norobru Hasegawa, Masaharu Nishikino, Dinh Thanh Hung

¹⁾九州大学 ²⁾量研

(概要)

ダブルパルスビームを用いたフェムト秒レーザー加工の加工現象解明のため、X線プローブを用いたSiC基板の加工面の時間発展の特徴を調査するための研究を遂行する。本年度は、X線プローブを用いた観察を行うレーザー加工現象について、レーザー照射条件の設定、また、加工時の基板の結晶構造変化の確認するための基礎実験を遂行したのでその結果について報告する。

キーワード : ablation, photo excitation, double pulse beam, femto second laser, x-ray laser

1. 目的

シリコンカーバイド(SiC)は、高い絶縁破壊強度、高い熱伝導度、高温での動作が可能といった特徴を持つため、次世代パワー半導体素子用基板として注目が集まっている¹⁾。しかし、SiCは高剛性・高脆性材料であるため、その高品位な加工には多くの時間とコストがかかり、それらを低減することが急務となっている²⁾。特に仕上げ工程で発生する加工影響層は、表面の品位を下げ、LSIなどのデバイス性能を劣化させる原因となるため、ダメージが少ない新しい加工法を確立する必要がある^{3,4)}。

そこで、SiC基板の高効率・高精度加工技術の確立を目的として、フェムト秒レーザーを利用したダブルパルスビーム照射による光励起加工を提案している。提案手法では一つの超短パルスを励起用と加工用に分け、サブピコ秒～数百ピコ秒オーダーの間隔で照射を行う。超短パルスレーザーを半導体に照射すると、レーザー侵入領域の電子が価電子帯から伝導体に励起し光吸収率が上昇する。試料表面が脱励起する前に加工用のパルスを照射することで、低フルエンス光による加工が実現する。この加工法では、光励起領域でレーザーの進行を止めることができるため、従来のフェムト秒レーザー加工と比較して周辺部への加工変質が少ない加工が可能であると考えられる。

本研究課題の目標は、X線プローブを用いて上記のような加工閾値以下の低フルエンスレーザーを照射した時のSiC基板の加工現象を計測し、その加工プロセスの解明を目指した研究を遂行する。加工中のSiC基板の結晶構造変化と、X線プローブを用いたレーザー加工現象の時間発展の様子を比較照合することで、ダブルパルスビームによるSiC基板加工プロセスと従来のシングルパルスビームによる加工プロセスの相違点が明らかになると考えられる。

2. 方法

本年度は、SiC基板のレーザー加工条件を検討するため、レーザー照射後の基板結晶状態を観察した。SiC基板をフェムト秒レーザーで加工し、その加工痕について、透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy : TEM)を用いて加工痕断面を観察した。

加工に使用した光学系の概要をFig.1に示す。加工用レーザーは、中央部のビームスプリッター(BS)によって1:1に分割される。それぞれの光はミラーによって反射され、BSによって再び一つの光路に重なり、ターゲットに照射される。この時、片方の光路に距離差をつけることで、パルスの照射時間を変化させることができる。過去の実験⁵⁾からパルス間隔1~10psの条件が最も加工が安定し、加工効率が良いことがわかっているため、今回の実験ではパルス間隔を1psに設定した。加工に用いた光源は、チタンサファイヤレーザー(中心波長794nm, パルス幅60fs, 繰り返し周波数10Hz)であり、SiCの(11 $\bar{2}$ 0)面に平行になるように偏光方向を設定した。

照射する一方のレーザーのパルスエネルギーを17 μ Jに設定し、レンズで80 μ m(FWHM)に集光することでピークフルエンス680 mJ/cm²に調整した。4H-SiCの加工閾値は990 mJ/cm²であり⁵⁾、片方のパルスだけでは加工は発生しないことを確認している。このパルスを1psの時間間隔をつけて二回照射することで加工を行った。

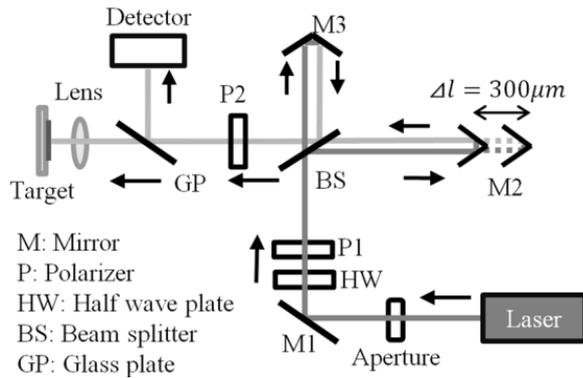


Fig.1 Double pulse processing system

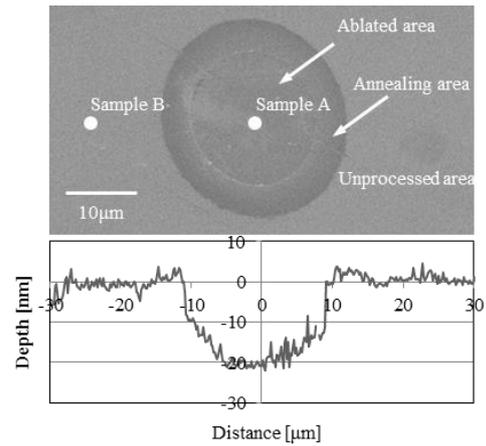


Fig.2 SEM image of SiC ablated crater and cross -sectional profile

3. 結果及び考察

Fig. 2 に、SEM で観察した加工痕表面と、AFM で取得した断面プロファイルを示す。Fig. 2 から、レーザ加工した SiC の表面が 3 つの領域に分かれていることが確認できる。この領域は、フェムト秒レーザで加工した他の半導体にも見られ、中心からアブレーション領域・アニーリング領域・未加工領域である。アブレーション領域の直径は $20 \mu\text{m}$ であり、アニーリング領域の直径は $30 \mu\text{m}$ だった。この加工痕から、中心のアブレーション領域 (Sample A) と中心から $22 \mu\text{m}$ 離れた未加工領域 (Sample B) を切り出した。それぞれのサンプルは、加工痕をタングステン (W) で保護した後、収束イオンビーム (Focused Ion Beam: FIB, FEI Quanta 3D 200i, 日本電子) で切り出し、(1010) 面を TEM 観察した。それぞれのサンプルを TEM 観察した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、TEM 像が 3 つの層に分かれていることが確認できる。一番上の層はタングステン層であり、周囲の原子よりも重いいため黒くなっている。2 つ目の層は結晶性のない SiC アモルファス層であり、レーザ照射によって発生したダメージであると考えられる。一番下の層は SiC 結晶層であり、これ以降も結晶層が続いていた。Sample A ではアモルファス層の厚さが平均 9nm 、Sample B では平均 2nm だった。また、光励起加工した表面を TEM を用いて分析した結果、レーザによるダメージと思われるアモルファス層の厚さは、最大でも 9nm に抑えられ、中心から $22 \mu\text{m}$ の領域では 2nm 程度となった。

本研究課題の遂行によって、SiC 基板について、X 線レーザープローブを用いたレーザー加工現象の計測に向けた加工用ターゲットの照射条件に関して確認できた。

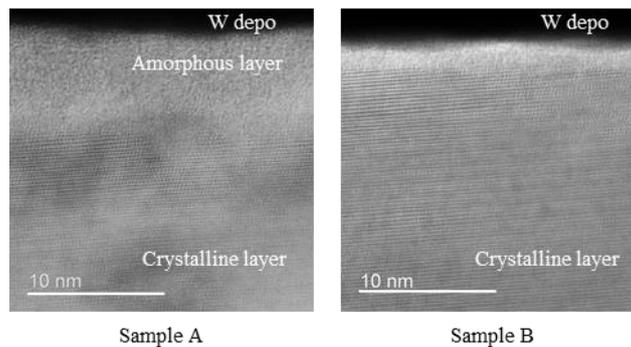


Fig.3: TEM image of SiC target (sample A and B)

4. 引用(参照)文献等

- (1) Cooper, James A, et al. IEEE Transactions on Electron Devices 49.4 (2002) 658-664
- (2) Adelman, B. and R. Hellmann. Applied Physics A 122.7 (2016) 176-178
- (3) 山村和也 他. 砥粒加工学会誌 55.9 (2011): 534-539.
- (4) 服部梓 他. 表面科学 31.9 (2010): 466-473.
- (5) 林照剛. 塑性と加工 57.670 (2016): 1034-1037.