

補助事業番号 2024M-492

補助事業名 2024年度 ダイヤモンドのレーザスライシング手法および加工機の開発
補助事業

補助事業者名 千葉大学 大学院工学研究院 機械工学コース 比田井 洋史

1 研究の概要

本研究では、硬く脆い単結晶ダイヤモンドに対し、高精度・低損傷なスライス加工を実現する新しいレーザ加工技術と、それを支援する装置の開発を行った。具体的には、超短パルスレーザを用いてダイヤモンド内部に変質層を形成し、その層に沿って亀裂を進展させることで任意の面で分離(スライス)する手法を確立した。また、加工条件の制御性と再現性を高めるために、位置精度 $0.1\mu\text{m}$ を有する自動制御加工装置を開発するとともに、加工後の試料に外力を加えて剝離挙動を定量評価する専用装置も設計・試作した。さらに、ラマン分光等を用いて変質層周辺の応力評価を実施し、材料特性と加工応答の関係を明らかにした。これにより、ダイヤモンドをウエハ状に加工するための基盤技術を確立した。

2 研究の目的と背景

近年、ダイヤモンドはその高い熱伝導性、広いバンドギャップ、高い絶縁耐圧といった特性により、次世代の高性能パワーデバイス材料や量子センシング基板材料として注目を集めている。しかし、実用化に向けては、デバイス基板として使用するためのウエハ成形が不可欠であり、そのスライスには技術的ハードルが存在する。特に、従来の機械加工ではダイヤモンドの硬度が障壁となり、スライス加工を行うことは困難である。また、従来技術ではカーフロス(切削損失)が大きく、コスト的にも量産化には不向きであった。

本研究では、これらの課題を解決すべく、レーザ照射によってダイヤモンド内部に非破壊的に変質層を形成し、その層に沿って制御された亀裂進展を誘導することで、接触を伴わないスライスを可能とする「レーザスライシング手法」の開発を目的とした。加えて、この手法を再現性高く実現するために、レーザ加工条件の最適化、自動化装置の構築、さらに加工後の剝離力を評価するための測定系までを一体的に整備し、実用化に向けた技術体系の確立を目指した。

3 研究内容

(1)レーザ加工装置の開発

本研究では、ダイヤモンド内部に超短パルスレーザを照射し、加工面に沿った変質層を形成する自動加工装置を開発した。具体的には、照射位置精度 $0.1\mu\text{m}$ を達成可能な高精度ステージと、ユーザーインターフェース付き制御ソフトウェアを組み合わせたシステムであり、走査範囲 10mm 角の加工が可能である。超短パルスレーザ発振器の導入により、加工品質と再現性が大幅に向上した。この装置によって、変質層の連続性や密度を制御することができ、亀裂の進展性に優れたスライス前処理が実現した。

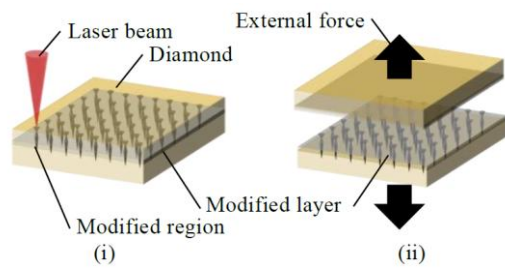


図 加工方法模式図

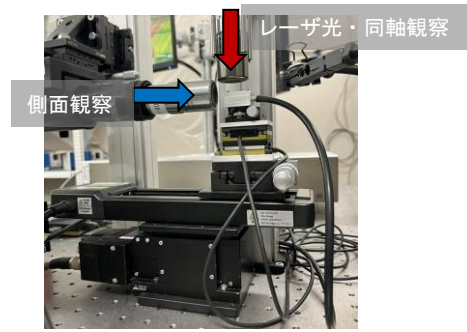


写真 レーザ加工装置

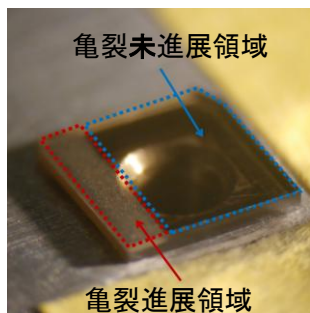


写真 加工中の様子

(2) 剝離装置と定量評価手法の開発

変質層に沿った剝離を誘導するため、外力を精密に加えることが可能な垂直引張型剝離装置を設計・試作した。本装置は、ダイヤモンド試料を上下の金属ロッドに固定し、ユニバーサルジョイントとロードセルを組み合わせた構造を採用しており、実験中の引張応力をリアルタイムに記録できる。これにより、レーザー照射条件と剝離力の相関を定量的に評価することが可能となり、加工プロセスの評価に寄与した。



写真 剝離装置

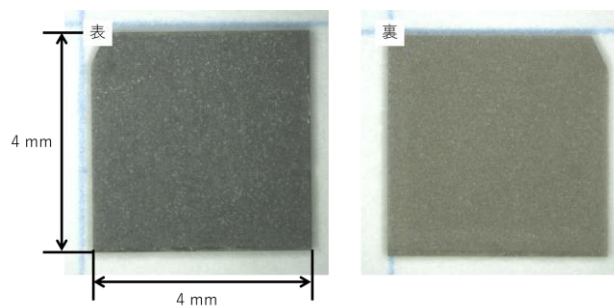
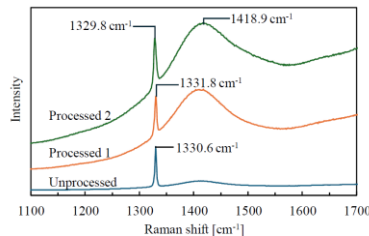


写真 剝離後のダイヤモンド

(3)加工変質層および応力分布の評価

レーザ照射によって形成された変質層の形状および応力分布を、ラマン分光および光学観察を通じて評価した。ダイヤモンド基板でも、合成手法により変質層の連続性や応力状態に大きな違いがあった。精密なスライス制御に向けた貴重な知見が得られた。



グラフ ラマン分光分析結果

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で開発されたレーザスライシング技術は、従来困難とされていたダイヤモンドウエハの量産加工を可能にするものであり、次世代パワーデバイス基板製造への応用が期待される。高絶縁性・高熱伝導性を持つダイヤモンドは、電力損失の少ない高性能電子機器に最適な材料である一方、その加工難度の高さが普及の大きな障壁であった。本技術により、非接触かつ高効率なスライスが可能となり、カーブロスの削減や歩留まりの向上を実現できる。また、他の硬脆材料への展開も視野に入れた応用研究が進められており、幅広い領域への波及効果が見込まれる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究は、申請者がこれまでに取り組んできたレーザ微細加工・ガラス内部構造制御・金属微粒子移動などの基礎研究成果を発展させたものであり、これまでの研究の蓄積の延長線上にある応用展開である。特に、装置設計と加工評価、材料解析を融合的に進める本プロジェクトは、単一の分野にとどまらず、光学、機械工学、材料工学の複合的知見を生かした学際的取り組みとして位置づけられる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・池野真宏, 比田井洋史, 坂本康輔, 川原一馬, 伊東翔, 小山浩司, 金聖祐, 松坂壮太, 超短パルスレーザを用いた単結晶ダイヤモンドレーザスライス及び変質層亀裂可視化, 精密工学会第32回「学生会員卒業研究発表講演会

・川原一馬, 坂本康輔, 池野真宏, 比田井洋史, 伊東翔, 松坂壮太, 小山浩司, KIM Seong-Woo, レーザスライシングによるダイヤモンド剝離, 2025年度精密工学会春季大会学術講演論文集

・池野真宏, 坂本康輔, 比田井洋史, 伊東翔, 小山浩司, Kim SeongWoo, 松坂壮太, 超短パルスレーザを用いた単結晶CVDダイヤモンドレーザスライス, 2025年度精密工学会春季大会学術講演論文集

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

<https://www.em.eng.chiba-u.jp/~lab5/Researches/DiamondSlicing.html>

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名 : 国立大学法人 千葉大学(コクリツダイガクホウジン チバダイガク)

住 所 : 〒263-8522

千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33

担 当 者 : 教授 比田井 洋史 (ヒダイ ヒロフミ)

担 当 部 署 : 工学研究院機械工学コース (コウガクケンキュウインキカイコウガクコース)

E - m a i l : hidai@faculty.chiba-u.jp

U R L : <https://www.em.eng.chiba-u.jp/~lab5/index.html>