

# 研究報告アーカイブ



## (1) 難加工基板の高効率精密加工法 — 前処理工程としてのfsレーザー照射による疑似ラジカル場形成の検討 —

共同研究者 黒河周平  
(九州大学大学院工学研究院 教授)

本研究は、難加工基板の革新的加工プロセスの確立を目指すもので、具体的には、機械加工では高効率な加工が困難な、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)、ダイヤモンドといった硬脆材料を主対象として、疑似ラジカル場の形成法を検討するとともに、加工環境コントロール型密閉式研磨法とPCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining) 法を融合させた革新的密閉式CMP/PCVM融合装置による高効率平坦化加工法を提案するものである。前処理工程としての疑似ラジカル場形成に関して、SiC基板や単結晶ダイヤモンド基板を加工対象として、フェムト秒(fs)レーザーを基板表面に照射することで、加工表面の極表層に微小欠陥種(疑似ラジカル場)を形成する(図1)ための基礎検討を行ったもので、各種表面分析手法や研磨加工を通してその可能性を探った結果を報告する。

極短パルスによるレーザー光のうち、パルス幅が1ピコ秒未満のものをフェムト秒レーザー(fsレーザー)と呼ぶ。すなわち、フェムト秒(10-15秒)オーダの極短パルスレーザーであり、その特徴は、極短パルスを集光することでピーク強度がテラ(10<sup>12</sup>)ワットからペタ(10<sup>15</sup>)ワットの領域に達し、この極めて高い強度を持つレーザーの電界により照射面の原子・分子から直接電子をはぎ取るという直接加工が可能となる点にあり、その性質を利用した除去加工が注目を浴びている。あまりにも短い時間でのエネルギー照射であるため、照射部周辺への熱拡散がほとんど起こらないうちに加工が終了し、熱影響部を最小にできるという特徴を持つ。本プロジェクトで新たに導入したfsレーザー加工装置の全体外観写真を図2に、レーザー加工部詳細を図3に示す。パルス幅は400fs未満で、パルスエネルギー200nJ/pulse以上、最大出力2W、パルス最大周波数は10MHzで、パルスピッカにより1Hzまでパルス周波数を低減することができる。

fsレーザー照射後の基板に対する実際の研磨の効果を観察するため、研磨レート等が既に明らかとなっている難加工材SiC

基板の研磨を通して検討を行った。オフ角4°の4H-SiC基板のSi面に対して、130mW、10MHzにて3mm x 3mmの領域に照射を行った結果と、その基板をコロイダルシリカで研磨した結果を図4に示す。レーザーアブレーションが起こっている領域の中で、周辺部よりも高く盛り上がっている部分が観察された。これは、fsレーザー照射により基板が酸化されているためと考えられる。そのことは、同じ基板を研磨した結果からも理解できる。すなわち、酸化された部分はコロイダルシリカにて容易に研磨されるため、僅か4分間の研磨で明らかに研磨が進行していることが分かる。ただし、SiC基板の場合、レーザーアブレーションが起こった部分の表面粗さは照射前の基板表面に比べて格段に大きくなっているため、このままでは研磨表面を一度大きく荒らす結果となる。そこで、前処理工程としての効果的利用法を考え、SiC基板のラップ加工後の表面に対してレーザー照射を行い、CMP研磨の適用を行った。

実験では、ラッピング後の4H-SiC(C面)について、15mm角チップに切り出し、全面にfsレーザー照射を行った。レーザーフルエンスは0.44J/cm<sup>2</sup>とした。その際、レーザー照射の方法として2種類の方法をとった。1つは、fsレーザー照射を一度施したもの(Transverse Scanning)、もう一つは、一度fsレーザー照射を行った基板を90°水平面内で回転させ、もう一度fsレーザー照射を施したもの(Cross Scanning)である。図5にその模式図を示す。基板を90°



図2 新たに導入したfsレーザー加工装置(全体写真)



図3 fsレーザー加工部詳細

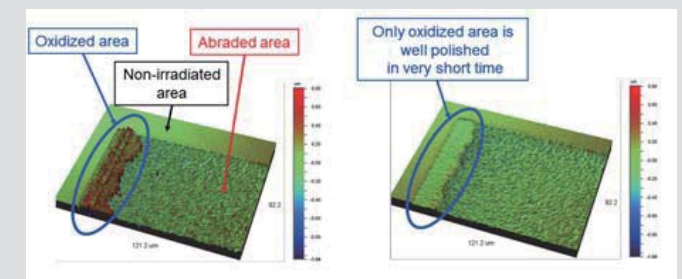


図4 fsレーザー照射を施されたSiC基板(Si面)と研磨後の表面状態

回転させた理由は、fsレーザーによる表面リップル構造に対して、2回目の照射をその直角方向にスキャンさせるためである。作成した15mm角SiCチップに対して、一般的なコロイダルシリカを用いたCMP研磨を施した。研磨時間を短く刻みながら、その都度表面粗さの研磨時間に対する変化を測定した。図6は、fsレーザー照射の有無による研磨前後の表面粗さの状態を示したものである。ラップ加工面そのものと、ラップ面にfsレーザー照射一方向スキャンを施した後の面で、初期の表面粗さはそれほど変わらない。しかしその後の研磨における効果には明らかな差があり、fsレーザー照射基板については、表面粗さの改善が急速に起こり、短い時間で研磨が進行していることが分かる。さらに、クロススキャンを施した初期の表面粗さは、先の2者に比べてさらに大きくなっているにもかかわらず、研磨後の表面粗さの改善は最も短時間で如実に表れていることが分かる。ラッピング後のCMP工程で、fsレーザー照射による研磨時間短縮効果が明らかに現れており、高効率加工への一つの指針が得られた結果である。

図7は、研磨時間に対する表面粗さRaの推移をプロットしたグラフである。研磨前の初期状態はいずれの基板も100nmを大きく超える表面粗さを有している。研磨が進行するにつれ、fsレーザー照射を施した基板の表面粗さの改善ははっきりと分かる。一方向スキャンの場合、約5分で劇的な改善が見られており、この傾向はクロススキャンにおける基板でもほぼ同じ傾向である。興味深いのは、研磨開始から約13分以降における違いである。クロススキャンの場合、13分以降において、2段階目の表面粗さ改善効果が得られており、一方向スキャンに比べ、

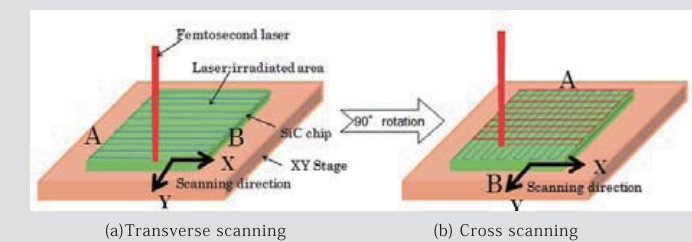


図5 異なるfsレーザー照射方法

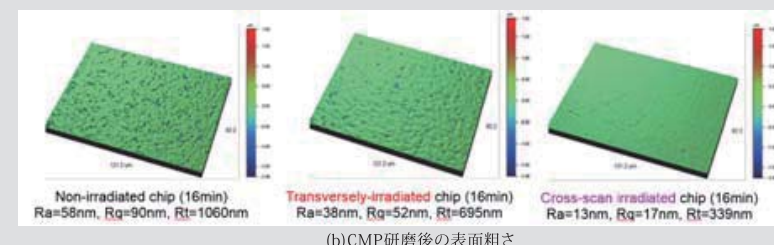
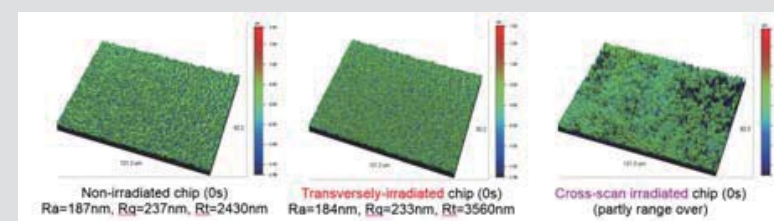


図6 fsレーザー照射直後ならびにCMP研磨後の表面粗さの比較(SiC基板C面)

その改善効果が大きいことが分かる。これはfsレーザーを合計2回ほど超すことで、アモルファス層がさらに厚く形成されたか、あるいはクロススキャンを施すことで、リップル構造に対する依存性が弱い、より均一なアモルファス層が形成されていることが推察される。

SiC基板に対してこれらの実験から、短時間で劇的な表面粗さ改善結果が得られた。その理由としては、特徴的なリップル形成による表面構造の違い、アモルファス形成状態の違い、表面酸化状態の違いなどによる相乗効果が考えられる。

SiC基板で一定の研磨レート向上の成果が得られたため、ダイヤモンド基板に対してもfsレーザー照射の効果を確認した。我々の初期の目的は基板極表層のみへの疑似ラジカル場形成であるため、まず、いわゆるレーザーアブレーションが起こる一歩手前の弱い出力の下で、極表層のみの電子状態を変化させることでその影響の有無を観察することを試みた。レーザー出力を通常のレーザーアブレーションが起こる場合の1/5の出力に設定し、ダイヤモンド単結晶基板(5mm角の(100)面)の表面に、波長1045nmのfsレーザーを全面照射した。このfsレーザーを照射したダイヤモンド単結晶基板面について、微小押し込み硬さ試験により基板の硬度の変化を観察した。観察は、ダイヤモンド球状圧子(R=0.5mm)にて最大試験力1961mN、負荷速度35mN/s、負荷保持時間15sの条件で行った。押し込み試験力と変位量の関係を、未照射試料に対する結果と比較したところ、僅かながらfsレーザーの照射の有無によって押し込み量の差異が出ており、fsレーザーを照射したダイヤモンド試料は、未照射のものに比べて押し込み量が大きくなっていることが判明した。このことは、想定したように疑似ラジカル場形成によってダイヤモンド単結晶のC-Cの結合力が弱められていることを示唆するものである。ただし、押し込み量の差が僅かであることから、疑似ラジカル場の厚さも非常に薄いことが推測された。

微小押し込み試験は簡便な評価方法ではあるが、僅かな押し込み量の差を詳細に評価するには困難を伴うこと、また基板ごとの違いや測定箇所の違いによるばらつきも無視できない。より詳細に

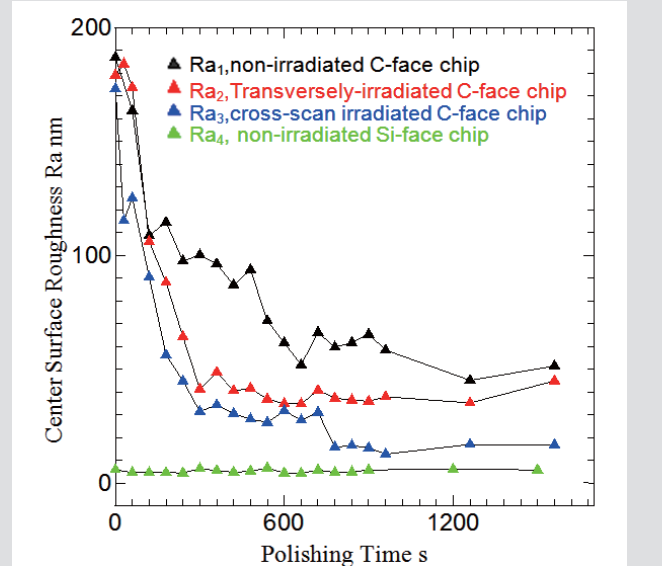


図7 CMP研磨時間に対する表面粗さの推移(SiC基板C面)