



研究紹介

「難加工材料の高効率加工を目指した革新的Plasma fusion CMPシステム(挑戦型; Bタイプ)の開発」 (九州大学 特任准教授 西澤 秀明:研究協力者)

【はじめに】

炭化珪素(SiC)、窒化ガリウム(GaN)及びダイヤモンドは次世代半導体材料として注目されている。これらの材料は化学耐性や機械的強度が高く、加工プロセス(特に仕上げ研磨加工)の高効率化が重要な課題として認識されている。本研究では、「難加工材料においてもエッチング反応により高効率加工が期待できるプラズマ相加工法(P-CVM)」と、「砥粒と研磨パッドとの物理的接触研磨により段階消滅性に優れた化学機械研磨法(CMP)」とを効果的に融合させる世界初の手法を提案し、実行可能な革新的CMP/P-CVM融合装置(Bタイプ)を研究・開発した。当グループではこれを「Plasma fusion CMP」と称している。

【Plasma fusion CMPによる加工原理とその装置化】

P-CVM (Plasma-chemical vaporization machining)による加工原理は、大気圧プラズマによって生成される中性ラジカルと被加工物表面の原子との化学反応により進行する。ここでは、揮発性の反応生成物の形成に伴う等方性エッチングに倣った加工である。この化学反応を効果的に発現させるためには、揮発性の反応生成物を形成させる反応ガス種の選定の他、被加工物表面近傍に高密度のプラズマを発生させることがキーとなる。Plasma fusion CMP法は、この等方性エッチングを加工原理とするP-CVM法に、基板表面の微細な凹凸の解消性に優れたCMP法を融合化させることを想定するものである。P-CVMとCMPの加工法を融合化させて装置化を図る場合、定盤/研磨ヘッドの回転運動中に、加工基板に対して連続的かつ均一にプラズマを発生させる必要がある。以下、本プロジェクトで設計開発したBタイプの融合CMP装置について紹介する。図1に示すように定盤内に多数のプラズマ発生電極を内蔵させた定盤(パッド)を、加工基板に対して高密度のプラズマが作用するように設計している。また、定盤の回転を単純な円回転運動ではなく、小径円運動を伴い大径円軌道を移動する「らせん回転円運動」となる運動機構を採用し、CMPにおける相対速度を確保しつつ、プラズマの作用性を重畳させ、高効率加工の効果を狙っている。定盤に内包されるプラズマ発生用のマイクロ電極においては、各マイクロ電極の周囲にスラリーの吸引口を設けている。被加工基板直下に供給されたスラリーは排出口へ吸引されるため、電極部上端のガス吐出口にスラリー(研磨液)の流入はない。従って、被加工面において安定なプラズマ発生と、新鮮なスラリー供給が見込まれる。

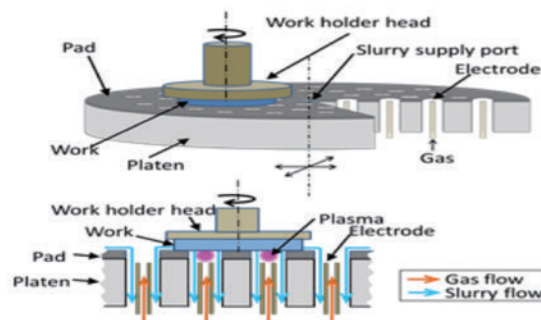


図1. Plasma fusion CMP装置(Bタイプ)定盤構造の模式図

【Plasma fusion CMPによる各種基板の加工事例】

本稿では、開発したPlasma fusion CMP装置を用いて、①事前検証としてのSiC基板の加工、②加工品位に着目したGaN基板の加工、③加工効率に着目したダイヤモンド基板の加工について、これまでに得られた成果を紹介する。

■SiC基板による加工原理検証

Plasma fusion CMP装置の動作性や加工コンセプトを検証するため、4H-SiC基板(Si面, on axis)を用いた加工実験を事前検証として、CMP単独法、P-CVM単独法、そしてPlasma fusion CMP法によるそれぞれの加工特性を把握・比較した。ここでは、四フッ化珪素(SiF₄)が大気圧で気体であるため、六フッ化硫黄ガス(SF₆)をプラズマ反応ガスとして用いることで、SiC表面をSiF₄化してエッチングすることを利用する。P-CVM及びPlasma fusion CMPでの加工実験においては、プラズマ生成ガスSF₆を用い、流量比率He : SF₆ = 99.5 : 0.5(合計流量8040sccm)でガスを供給しながら、印加電力100Wにてプラズマを発生させた。また、CMP及びPlasma fusion CMPにおいては加工圧力1kg/cm²にて、コロイダルシリカスラリーと研磨パッド(不織布)により加工を行った。図2は、各手法での4H-SiC基板(0001, Si面)の加工前後の表面粗さと加工レートの関係の一例である。加工レートは、Plasma fusion CMP > P-CVM >> CMPとなり、CMPに比べてSF₆プラズマによる加工効率の向上が顕著である。加工面状態も良好であり、加工中のプラズマ生成も安定であった。以上のことから、設計したPlasma fusion CMP装置が、想定通りの有効な加工システムであることが確認された。

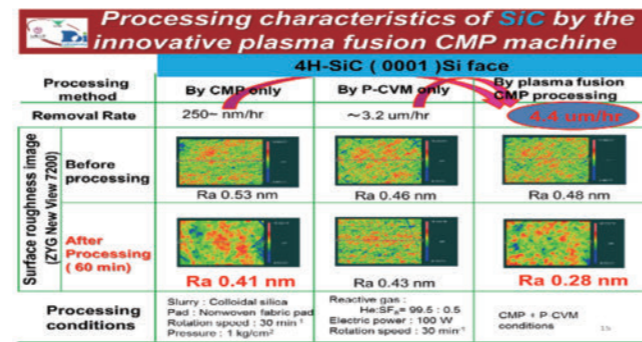


図2 各種加工法によるSiC基板の加工特性比較

■GaN基板の加工特性とその加工メカニズム

硬脆材料であるGaN基板のCMPにおいては、基板の前処理加工によるダメージ層が優先的に加工促進され、研磨面が潜傷の深さに到達すると、基板の表面粗さ(Ra)の一時的な悪化(ピーク値)として観測できる。GaN基板の表面の結晶性はカソードルミネッセンス法(CL)により可視化評価できるため、加工の表面品位の評価をすることができる。そこで、Plasma fusion CMP法によるGaN基板加工における表面品位をCL法により評価するため、

以下の実験を行った。φ0.5 μmダイヤモンド砥粒/金属定盤による前処理加工(ラップ研磨)を施したGaN基板(Ga面, 1cm²)を、CMP法、P-CVM法、Plasma fusion CMP法によりそれぞれ加工し、その加工速度及び加工中の表面粗さRaの推移を評価した。ここでは、CMP及びPlasma fusion CMPにおける加工圧力1 kg/cm²、ヘッド/定盤回転運動(線速度)1.44m/minとし、スラリーにはコロイダルシリカスラリーを用いた。一方、P-CVM法及びPlasma fusion CMPにおいては、大気圧でGaと反応して気化する安全な反応種が少ないため、O₂による酸化反応を利用することを考えた。具体的にはHeガス:O₂ガス= 99.5 : 0.5の割合(合計流量8040sccm)で供給し、印加電力は100Wで実験を行った。図3に示すように、Plasma fusion CMP法では、CMP法と比べて1/3の加工時間で表面粗さ(Ra)値のピークが現れており、加工効率、加工変質層及びダメージ層の除去性能に優れていることを確認した。CL像においても、良好な結晶状態に起因する発光が研磨経過時間の早い段階から見られており、高品位な加工を効率良く達成できる。また、加工メカニズムを検証するため、P-CVM処理をしたGaN基板表面をX線光電子分光法(XPS)により評価したところ、表1に示すような含有元素比率の結果が得られた。

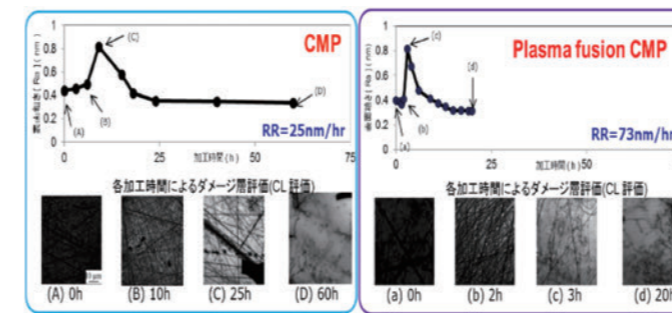


図3 GaN基板の加工中における基板表面粗さ(Ra)の推移とCL像

サンプル	元素割合(%)			
	Ga	O	N	C
未処理	25.4	21.8	25.8	27.0
P-CVM(弱)	29.8	33.8	17.3	19.1
P-CVM(強)	9.9	64.8	9.7	15.6

表1 P-CVM前後におけるGaN基板のXPS元素比分析結果

この表から、未処理の基板においてはNの割合が高く、GaNが組成の大部分を占め、Oについては自然酸化膜起因のものであることが推察される。一方、印加電力100W、ガス比He : O₂ = 99.75 : 0.25でP-CVM処理した基板はOの割合が増えるとともに、Nの割合が減少しており、スペクトル解析ではGa(3d)において21eV(Ga₂O₃を示す)にピークが確認できたことから、Ga₂O₃の生成とその増加が起こっておりGaとGa₂O₃との混在状態であると推察できる。印加電力250W、ガス比He: O₂ = 99.5 : 0.5でP-CVM処理した基板では、更にOの割合が増大し、基板表面はGa₂O₃が支配的な組成となっていることを示唆する。これらのことから、O₂ガスを用いたGaN基板のP-CVMでは、想定通りGaN表面が酸化されてGa₂O₃となり、この酸化物がCMPにより研磨除去されることで加工が進行するということが明らかとなった。この酸化膜の生成はプラズマ発生における印加電力や酸素ガス濃度を高めることで効率化でき、加工効率化条件として適用できる。現在、表面酸化膜質と加工特性にも興味深い相関が得られており、更なる高効率加工へ向けた最適加工条件導出を見込んでいる。

■加工効率に着目したダイヤモンド基板の加工特性とその加工メカニズム

究極的な半導体基板材料として位置付けられる単結晶ダイヤモンド基板(100)に対して、Plasma fusion CMP装置による加工を適用した。ここでは、四フッ化炭素(CF₄)、一酸化炭素(CO)及び二酸化炭素(CO₂)が常温で気体であることから、プラズマ反応ガスとしてSF₆ガスあるいはO₂ガスを取りあげ、ダイヤモンド表面をCF₄化またはCO_x化させることを想定した。実験条件は前項の①に準じ、まずは印加電力を変化させた場合のP-CVMによる加工効率を評価した。P-CVMによるダイヤモンドの加工特性は、図4に示すように、SF₆あるいはO₂ガスで加工が促進していることがわかり、想定通りダイヤモンド表面が揮発性反応物に変化することを確認した。また、SF₆ガスよりもO₂ガスの方がP-CVMによる加工レートが高い。炭素との反応において、酸素に起因するプラズマの方がSF₆起因のプラズマよりも反応性が高いためと考えられる。また、印加電力を大きくすることで加工レートが増大していることから、高印加電力によるプラズマの高密度化が高効率加工に有効である。図5は、CMP、P-CVM及びPlasma fusion CMP法によるダイヤモンド基板の加工レート及び基板表面粗さの低減率の比較である。この実験には、プラズマガスとして、図4の結果からO₂(He: O₂=99.5:0.5)を用いた。従来法であるCMPによる加工レートは1.9nm/hrであるのに対して、Plasma fusion CMPでは667.7nm/hrと約300倍の高レートを示し、表面粗さの低減率も最も高い。特筆すべきことは、加工レートも基板表面粗さ低減率も、Plasma fusion CMP法の結果はCMP法とP-CVM法の単独加工特性の相和よりも高い点である。この重畳効果の要因として、「局所的密閉空間における高密度プラズマの生成による高加工効率化」と「中間生成物の生成と研磨による凸部優先加工(表面粗さ低減効果)」と考えて差し支えない。

ここで局所的密閉空間とは、Plasma fusion CMP時において基板が研磨パッドに押し付けられることで、プラズマ電極部近傍が擬似的に密閉された状態を指す(図6)。パッドに押し付けられていないP-CVM法と比べて、明らかにガス濃度とプラズマ密度が高くなり、これが高加工効率に寄与していると考えられる。これは、恰も密閉容器(ベルジャー)内で行うCMPに類似する。

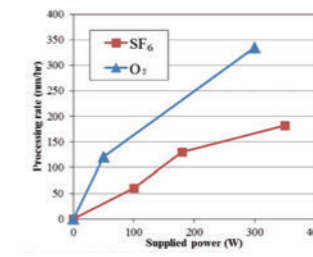


図4 P-CVMによるダイヤモンド基板の加工効率比較(O₂, SF₆)

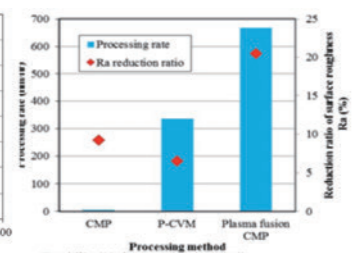


図5 各種加工法とダイヤモンド基板の加工性能比較

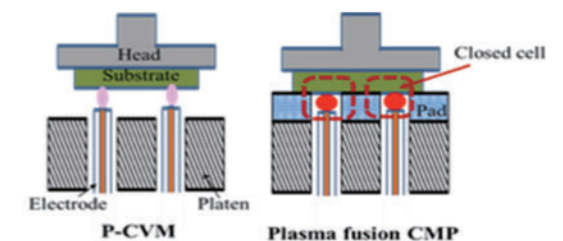


図6 Plasma fusion CMPにおける局所的密閉空間

