

氏名（本籍）	千葉 翔悟（秋田）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博 第257号
学位授与の日付	令和元年12月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理工学研究科 総合理工学専攻
学位論文題目 （英文）	樹脂パッドと電界砥粒制御技術を適用した先進結晶材基板の 低ダメージ機械研磨技術に関する研究 (Study on damage-less mechanical polishing technique for advanced crystal substrates using a resin pad and electric field-assisted polishing)
論文審査委員	(主査) 教授 村岡 幹夫 (副査) 教授 渋谷 嗣 (副査) 教授 奥山 栄樹 (副査) 准教授 山口 誠 (副査) 准教授 野老山 貴行

論文内容の要旨

近年、パワーデバイスなどの電子デバイスの高性能化に伴い、構成部品に用いられる基板にはサファイア、SiCなどに代表される優れた特性を有する次世代結晶材料の採用が進展している。しかしながら、これらの材料は概して高硬度かつ優れた化学安定性を有する難加工材料であり、加工には多くの時間とコストを要している。

前述の基板加工プロセスは一般に①結晶インゴットの切断工程、②形状精度の創成工程であるラップ工程、③表面の最終仕上げ工程である化学的機械的研磨（Chemical Mechanical Polishing: CMP）工程に大別される。ラップ工程においては銅、錫などの軟質金属製の定盤とダイヤモンド等の高硬度砥粒を用いた機械的除去加工がなされるが、ラップ加工後の基板表面には用いた砥粒サイズや定盤硬度などに応じたダメージ層（加工変質層）が形成される。この加工変質層は後工程であるCMP工程において完全に除去する必要があるため、加工変質層深さの低減はCMP工程の負担低減に直結する。また、CMP工程は加工プロセスの中で最も多くのコストと時間を要する工程であることから、ラップ工程における加工ダメージの低減はプロセス全体の低コスト化に大きく寄与する。本研究は、このラ

ップ工程に着目し、従来の軟質金属製定盤を樹脂製パッドに代替した新たなメカニカルポリッシング工程を提案し、加工プロセスの高度化により、電子デバイス分野の発展に貢献することを目的とする。

本論文は7章より構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では序論として、本研究の背景と基板加工プロセスにおけるラップ加工の位置づけ並びに従来ラップ技術に関する概要と課題をまとめ、本研究の目的並びに意義について述べた。

第2章では従来ラップ加工における研磨界面の砥粒挙動並びに摩耗状態等を明らかにすることを目的とし、研磨界面のin-situ観察に関する検討を実施した。高感度EMCCD(Electron Multiplying Charge-Coupled Device)カメラを用いたその場観察摩擦試験機を構築し、暗視野による観察及び蛍光染色したダイヤモンド砥粒の蛍光発光を用いた粒子挙動の観察可能性について明らかにし、ダイヤモンド砥粒の摩擦面への侵入を確認した。

第3章では樹脂パッドの基礎特性の評価として砥粒の保持性に関する検討を行った。銅板並びに樹脂パッド上にダイヤモンド砥粒を配置し、サファイア基板を介して荷重を印加することで砥粒を押し込み、走査型白色干渉顕微鏡を用いて各表面の突起高さを評価した。得られた突起高さより、印加荷重の増加に伴い金属定盤には金属の塑性変形に起因する砥粒の埋め込みが確認されたが、樹脂パッドには埋め込みが認められなかった。これより、金属定盤を用いた従来のラップ加工は、埋め込まれた砥粒による除去が支配的な半固定砥粒加工であり、樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングは砥粒の転動によって除去がなされる遊離砥粒加工に近似した除去メカニズムである可能性を示した。

第4章ではサファイア基板を研磨試料とし、従来金属定盤と樹脂パッドの研磨特性に関する比較検討を行った。小型片面研磨装置を用いた研磨実験により、樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングは金属定盤による加工と比して、加工レートは70%程度低下するものの表面粗さRaは91%低減し、良好な表面平滑性が得られることを確認した。また、実験に供した基板に対し、段階的に除去量を振ったCMPを行い、それぞれの加工変質層深さを比較した。金属定盤を用いた加工では、加工変質層の除去に9 μm を要したが、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングにおいては1.5 μm 時点で加工変質層は除去された。これより、ダイヤモンドポリッシングによる加工変質層深さは従来加工技術と比して1/6程度であり、本加工法によるダメージ低減が可能であることを明らかにした。

第5章では他の難加工材料へのダイヤモンドポリッシング適用可能性を検討するため、SiC基板を被加工材とした研磨評価を実施した。ダイヤモンド粒径を1 μm 、3 μm の2水準とし、4章の研磨評価同様、金属定盤と樹脂パッドの加工特性を比較した。3 μm 径のダイヤモンド砥粒を用いた際の加工レートは金属定盤に対し30%程度低下するが、金属定盤と1 μm 径ダイヤモンドを組み合わせた条件よりも良好な表面粗さが得られた。これより、SiCの加工においても低ダメージな形状創成加工が可能であることを明らかにした。

第6章では、第4章並びに第5章の結果を受け、ダイヤモンドポリッシング技術における加

工レート向上の可能性について検討した。研磨界面における作用砥粒数に着目し、砥粒の配置制御技術である電界砥粒制御技術を導入可能な研磨装置を構築し、本装置を用いた電界印加条件の検討を行った。印加周波数5.5Hzの時に加工レートは最も向上し、電界を印加しない場合と比して2.4倍となることを得た。これより、電界砥粒制御技術をダイヤモンドポリッシングに適用することで、高効率かつ低ダメージを実現する加工が可能となることを示した。

最後に、第7章では本論文の総括として本研究の成果ならびに今後の課題についてまとめた。

論文審査結果の要旨

本論文は、難加工結晶材であるパワーデバイス半導体のウエハ加工に関して、従来のラッピング工程を、樹脂パッドと電界砥粒制御技術を併用した独自の新工程に置き換えることによって、低ダメージの機械研磨を可能にし、さらに総工程時間の短縮を図れる技術を開発した。総工程時間を0.29倍に短縮できる技術の提案であり、当該産業界への寄与は大きい。また、導入されている技術も新規性があり独創的であり、試験結果の考察も定性的ではあるが妥当であることが認められる。

申請者による約45分の発表および40分の討論により最終試験を実施した。質疑に関しては、従来技術との比較指標、ラッピングとポリッシングの定義、完全結晶の定義、電界砥粒制御における周波数の影響、など多岐にわたる質問が出された。概ね妥当な回答が得られた。樹脂パッドおよび電界砥粒制御技術に関して、最適仕様・条件の明確化やメカニズムの定量的考察およびそれによる最適条件の予測手法など、今後の課題が望まれる点や、従来技術との比較に関して、指標となるコストを、より明確に定義すべきである点が指摘された。特に、電界砥粒制御技術のこれらについて、今後の課題として認識していること、計画について回答があり、今後の発展が期待できると認められた。また、質疑応答も慎重かつ適切であった。

審査員一同は、本研究の成果を高く評価し、総合的に判断して博士論文および最終試験を合格とした。また、取得単位など大学院課程における研鑽も含め、申請者が博士(工学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。