



これまでの研究成果の概要【総集編】

「究極デバイスとしてのダイヤモンド基板の 革新的超精密加工プロセスへのブレークスルー」

研究代表 土肥 俊郎

(九州大学産学連携センター 特任教授/九州大学名誉教授)

【骨子】

ワイドギャップ半導体SiC, GaN, ダイヤモンド基板の超難加工材料基板の超精密加工プロセスを確立し、低炭素化社会に向けた省エネルギーの将来型デバイスの早期実用化に貢献する。本研究では、前処理には基板の極表面層部に疑似ラジカル場を付与し次の仕上げ加工工程での加工容易化を図る。そして、仕上げ工程では、CMP(Cheical Mechanical Polishing)とP-CVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)の融合をベースとする、新しい革新的CMP/P-CVM融合(プラズマ融合CMP, Plasma fusion CMP)装置を設計・試作するとともに各難加工材料基板の高効率の超精密加工を実現するものである。

近年、ワイドギャップ半導体の主役である炭化ケイ素SiCと窒化ガリウムGaNは、他の半導体にはないすぐれた様々な特異な物性を有していることから脚光を浴びており、新奇のオプト・エレクトロニクスデバイスが続々と登場している。これらの化合物半導体単結晶は、優れた耐電界、耐温度などの耐環境性を有しているので、高効率・長寿命の青色や緑色の発光ダイオード(LED)・レーザダイオード、白色LED照明、紫外線LEDなどを製作することが可能となっている。さらにそして、電子飽和速度が高く熱伝導性も高いなどの物性を有することから、超低ロスで超高耐圧の超高速電子デバイスの実現が可能となる。ここで適用される結晶は、きわめて結合力が強いことを反映して物理的・化学的に極めて安定であることが知られている。

パワー半導体分野を例にして考えると、現在のSi結晶基板でこれ以上の性能を求めることは物理的・理論的に限界になっている。そのため今後は、SiCやGaN系といった次世代パワー、高周波デバイスの利用が徐々に増えることは間違いない(図1参照)。しかしながら、前述のように結晶の結合力が極めて強いということは、結晶成長や物性制御をはじめ、加工プロセスを含めたデバイス化が極めて難しいことを意味するのである。

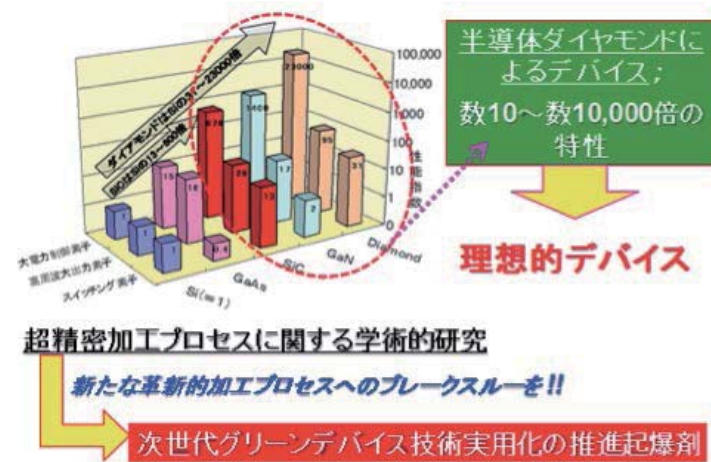


図1. 本研究の背景 一次世代型デバイス基板のインパクトと超精密加工プロセスへの期待

そこで加工プロセスに焦点を当てると、これらに適用する結晶材料は、言うまでもなく超精密無じょう乱の平滑鏡面の高品位、かつ所定の形状・寸法精度に効果的に仕上げるのが要求される。前述のように、これらの適用材料は難加工材料で構成され、シリコンデバイスと同様に原子オーダーの加工精度、品位を達成する必要もあって、加工困難を極め何らかのブレークスルーが求められてきた。とくに究極的なデバイス用基板として注目されているダイヤモンド基板については、これまでの研磨の加工条件を改良しただけでは大量製造プロセス対応は不可能に近く、したがってコストダウンを全くできないことに等しく、何らかの新たな高効率・高品質の革新的加工技術へのブレークスルーを切望されているところであった。ここに本研究を行う理由がある。

本研究プロジェクトでは、SiC, GaNを包含した半導体ダイヤモンド基板を対象として、“疑似ラジカル場の形成法”の検討により超難加工材料でも容易に加工し易くする状況を醸成する考え方を提案した。併せて、これまで培ってきた独自の密閉式研磨/CMP法と、阪大の山内・佐野らの大気圧下で行うプラズマ加工/P-CVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)法の二者を効果的に融合させた“革新的CMP/P-CVM融合加工法”とその装置化を提案した。準高圧の酸素環境下で光触媒反応とプラズマ援用も視野に入れて、高品位面を従来の10~数10倍の加工能率を狙う加工法を将来的目標とした。このCMP/P-CVM融合加工技術については特許出願中であり、非常にユニークな革新的加工法でもあることから著名な研究者からの助言もあって“プラズマ融合CMP技術”(英文名: Plasma fusion CMP)と名付けて商標登録の出願をしている。

本研究プロジェクトは、次世代グリーン・デバイス 用の難加工材料基板の超精密加工の体系化を図り、低炭素化社会に向けたデバイスの早期実用化に貢献すべく研究開発を展開するものである。具体的には超難加工材料の超精密加工プロセス設計に当たり、下記の二つの加工工程(図2参照)を基本としている。

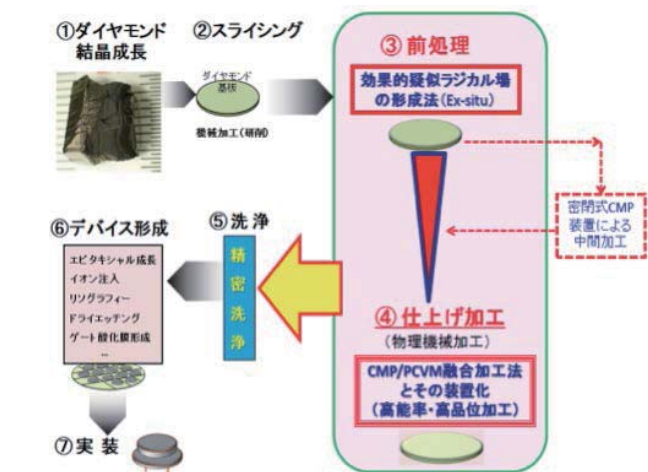


図2. 本研究における超難加工材料の超精密加工プロセスの骨子

前加工工程の検討

加工対象基板の極表面層に限定(数~100原子層)してフェムト秒レーザーによる超微小欠陥種を形成する。この疑似ラジカル場を形成することによって、機械的研磨あるいはCMPにて摩擦摩耗をともなう化学反応とラジカル場(超微小欠陥種)を誘起させ、大気圧下での研磨/CMPを容易にしようとするものである。

仕上げ加工工程の検討

高効率・高品位加工を可能とする革新的プラズマ融合CMP装置を試作・提案する。本試作装置の最もキーとなる加工箇所には、物理的作用を与える特殊パッドやスラリー/スラリーレスでラジカル場を形成させながら効果的P-CVM作用を誘発させる。酸素などのガス雰囲気下におけるCMP/P-CVMの高効率・高品位化の重畳効果も期待するものである。

後者については、特許出願(2件)をし世界初の“Plasma fusion CMP(プラズマ融合CMP)”と呼称することとした。

ここでは、基板の極表面層部に疑似ラジカル場を付与する前処理工程、CMP(Cheical Mechanical Polishing)、並びにP-CVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を融合した仕上げ工程を提案し各工程に関する研究開発成果を、以下、要約する。

(1) 前処理としての疑似ラジカル場形成について、より高効率な利用法としてSiC 基板の研磨前ラップ面にフェムト秒 レーザ照射を施した部分について実際に研磨を行ったところ、アブレーションが発生した部分において、コロイダルシリカによるCMP研磨における表面粗さの改善効果が観察された。これは、前処理面として、平坦化に必要な時間の短縮を意味しており、材料除去率で比較すると、約7倍の加工速度増大効果が明らかとなった。また、ダイヤモンド基板においては、アブレーションが起こっていないにもかかわらず、レーザ照射域に基板表面に光学的な変化が起こっていることが観察された。これは新しい発見であり、基板表面の粗さ変化・形状変化を伴っていないにも関わらず、基板結晶に何らかの変化が生じていることを示唆しており、この領域にCMPを付加することで、材料除去率が改善する可能性がある。以上のことから、ダイヤモンド基板に対しても、先に述べたSiC基板と同様の効果が現れており、後に続く研磨工程において同様に劇的な高効率化が期待できる。

(2) Plasma fusion CMPの2方式機種(A-type, B-type)の原理試作を行い、その装置運動機構などを確認後、SiCならびにGaN基板の基本的加工特性を把握した。当初の加工原理の妥当性・加工メカニズムを追究しながら、本プロジェクトの目標であるダイヤモンド基板の加工特性を把握し、さらに仕上げ加工を行ったダイヤモンド基板へのエピタキシャル成長を施し加工面の評価を行った。

① 基本型プラズマ融合CMP(A-type): 疑似ラジカル場(超微小欠陥種)の形成のための物理的機械加工と疑似ラジカル場を有する層を効率的にエッチングするP-CVMを交互に繰り返すことを加工原理・加工法である。P-CVMは化学的な等方性エッチングで結晶性を乱さず高効率加工が可能であるが、凹部でも等方的にエッチングが進行するので本質的に平坦化特性は期待できない。本提案加工では研磨によって凸部のみ疑似ラジカル場を形成することでP-CVM加工に凸部選択性を付与することを意図し、これまで段差を完全に平坦化する核原理を確認し、本融合加工原理が平坦化加工法として機能することを実証した。

そこでダイヤモンドにおいてもP-CVM基礎実験装置を用いて検証した結果、SiCやGaN同様に表面極近傍にて加工速度が約2倍になることを見出した。そして、ダイヤモンド基板に対しても本融合加工法が適用可能であることを実証でき今後の加工特性の向上が期待される。

② 挑戦的プラズマ融合CMP(B-type): 難加工材料であるSiC, GaNを用いて基礎検討し、そしてダイヤモンド基板への応用加工を試み加工面への評価を行った。以下、結果を要約する。SiC基板ならびにGaNのPlasma fusion CMPでは、従来のCMPと比較して加工レートが約18から数倍に上昇し、表面粗さも1/2の値に大きく改善できた。その中でGaN基板の長時間加工を試みカソードルミネッセンス法により加工変質層を評価したところ、通常のCMPと比較してPlasma fusion CMPでは、加工変質層の除去が3倍以上速いことが分かった。これまでの結果を踏まえて、ダイヤモンド基板のプラズマ融合CMPに展開したところ、加工レートと表面粗さは従来の特性を大幅に上廻ることを実証した。さらに、プラズマ融合CMP加工によって仕上げられたダイヤモンド基板は、加工起因の残留ダメージが存在せず、デバイス成長に適した表面を達成していることも確認することができた。当初の予想を超える成果を得た。

今後は投入電力や反応ガス濃度などの条件最適化を図ることにより、更なる高効率化を図る必要があるが、プラズマ融合CMP加工では、CMPとP-CVMのシナジー効果を十分に発揮することが出来たことは大きな成果である。

以上、概述したように、計画通りに実施され多くの成果を出すことができた。各研究項目について、次ページ以降で詳細に研究成果を紹介する。

今年度で本プロジェクトが終了するに当たり、第三者の研究者の方々にコメント・評価をいただく機会を得た。ここにご協力いただきました皆様方にお礼申し上げます次第である。(いただきましたコメントについては、最終ページで紹介・掲載させていただきます。)

なお、本研究プロジェクトで得られた成果を様々な角度から適宜まとめてニュースレターを発行し、多くの関係者に情報発信するとともに研究代表・分担者、連携研究者および研究協力者などの密なる連携を図ることを心がけてきた。本研究プロジェクトでは、学術的な研究論文、国内はもとより海外での国際会議にも多数発表し、また特許や商標登録出願をするなどを行い各界から脚光を浴びることができた。これらの成果を生み出すことができたのは、定例連絡会を頻繁に開催して多くのアイデアを出す議論の場を設けてきたことによる。ここに、関係者の皆様方に研究プロジェクトを代表して篤く御礼申し上げます次第である。