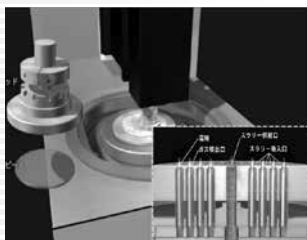


# 次世代化合物半導体の超精密加工・洗淨・評価技術の現状から将来を占う



土肥 俊郎\*

Toshiro DOI

九州大学・埼玉大学 名誉教授／(株)Doi Laboratory

會田 英雄

Hideo AIDA

長岡技術科学大学

## 1. はじめに

18世紀の第一次産業革命以来、イノベーション・技術の進歩は指数関数的に急激に進んでいる。今世紀に入ってデジタル化に象徴される第四次産業革命は、2045年にシンギュラリティ(技術的特異点)<sup>1)</sup>が想定され、その動向を認識する必要がある(図1)。今や、IoT(Internet of Things)、AI(Artificial Intelligence)を骨格とするデータ駆動社会は、データが社会の主役に躍り出て、その根底にある半導体産業は国力を左右する。日本が韓国をホワイト国除外(通常の東南諸外国と同様扱いにするだけ)によって韓国政府が大混乱に陥るように、先進諸外国は半導体を制することが国力を左右する。COVID-19禍にあっても半導体産業は、通信ネットワーク、データセンター、エッジコンピュータ、シリコンフォトニクス、パワーデバイス、3Dデバイスなどのキーワードに象徴されるように話題は次々と続出する。政府のデジタル庁を新設するという声明発出は、国を挙げた重要項目である証でもある。

そこで、前述のキーワードに密接に関係しグリーンデバイス用としても脚光を浴びているワイドバンドギャップ・化合

物半導体にフォーカスし、その代表格のSiC、GaNあるいは究極的とも言われているダイヤモンドの基板の加工プロセスについて考える。これら半導体基板は、優れた耐電界、耐温度などの耐環境性、高効率・長寿命発光特性を有しているのでパワーデバイス、高周波デバイス、次世代LED

用として、ポスト・シリコンとも位置付けられている<sup>2)</sup>。しかしながら、これらの基板は機械的にも化学的にも極めて安定した超難加工性材料であるため、その加工プロセスがネックになっていることは、関係万人の周知の事実である。

本稿では、超難加工化合物半導体について、その加工プロセスにおける超精密加工(研磨)・洗淨そして評価の一連のプロセス技術の係わりについて述べる。まず、現状の研磨/CMPについて理解し、新奇な加工の提案技術の足跡を辿り、今後はどのように発展していくべきか、私見を交えて紹介する。そのうえで、今日的課題を乗り越えるべく新規の考え方をヒントに、次世代の半導体プロセス技術のブレークスルーについて提言する。

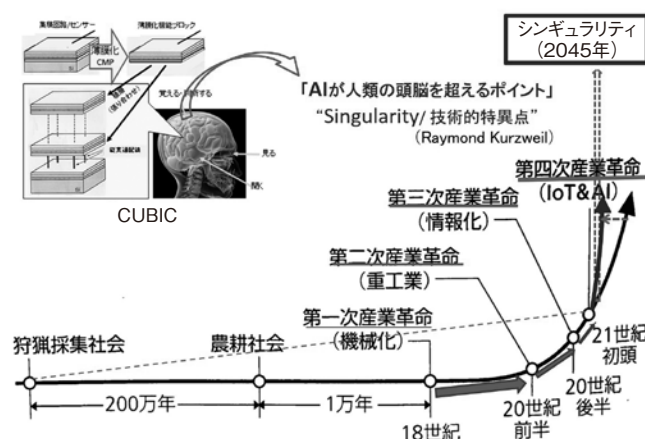


図1 産業革命以来指数関数的に加速するイノベーション

## 2. Si半導体とCMPの進展、そして化合物半導体の超精密加工

### 2-1 SiのCMPの起源と熟成加工プロセス、化合物半導体の現状加工技術

1947年に発明されたトランジスタの登場は、その下地基板(ゲルマニウムやシリコン)に高度な表面創製が必須となることから、研磨・加工技術への厳しい要求が突き付けられた。とりわけその時の革新的な加工技術として、CMP(Chemical Mechanical Polishing)に注目すべきである。従来の機械的研磨(ポリシング)作用のみでは、GeやSiなどの単結晶の原子配列を限りなく無擾乱にして平滑な鏡面にすることが困難で、結晶が有する特異な特性を発揮できないので所望のデバイス特性が得られなかった。そこで、新加工法として化学的(溶去)作用

\*【著者問合せ】

〒814-0001 福岡市早良区百道浜3-8-33

Tel.092-986-3507

E-mail toshiro.doi.883@m.kyushu-u.ac.jp

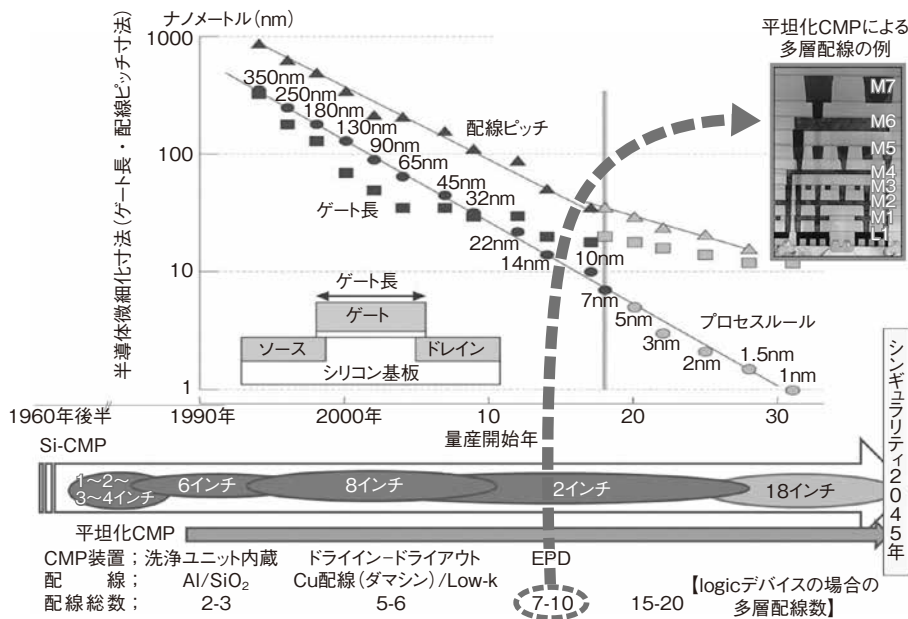


図2 半導体微細化の推移と将来予測(東大・平本教授の原図にCMP関係を加筆)

と機械的作用を複合させたCMPが考案され、このCMP技術の誕生によって現在のICT社会の駆動力となった。このCMPは1960年代中ごろに米国のIBM、ベル研究所などから提案され、CMPあるいはMCP (Mechano-Chemical Polishing) と呼称され現在に至っている<sup>3)</sup>。1970年代以降になると Mooreの法則に象徴される半導体集積回路・デバイス化の急発展は、高品質・大口径化のSi単結晶の育成(チョクラルスキー引上げ法)とともに、スライシングから外周・エッジ研削(ベベリング)、ラッピング(平面加工)、エッチング、CMP(最終仕上げ)、そして精密洗浄(パーティクルや不純物のない清浄化)に至る「精密加工プロセス」が支えてきた。

いつも先端的デバイス側の難しい要求を受け入れながら、その精密加工プロセス、特にCMP技術は急速に深化した。その実績は、ほかの機能性材料の高度な表面創製・加工法のモデルとなりその波及効果は絶大である。最も分かりやすいのが、1990年代に超LSIデバイスの多層配線のために応用された平坦化CMP技術で超LSIデバイス製造になくならない加工技術として定着している(図2)。そして、加工システムはじめ、パッド、スラリー、洗浄、制御・計測(エンドポイン

ト検出含む)など、多方面の周辺技術に波及し、大きなビジネスチャンスを与えて日本の活力の源の一つとなった。ロジック・デバイスのみならず、複雑極まる構造のNANDフラッシュメモリ・デバイスでも、3D化に平坦化CMPは必須であり、100層以上の多層化も可能となった。中国・YMTC社が超精密CMPプロセスとウエハーの接合プロセスによって、高性能メモリデバイスを発表し<sup>4)</sup>、最新のトピックスとして注目される(図3)。このように「先端的3D化デバイス」の実現には、平坦化CMP技術の導入は当然であって、その上ウエハーの高精度ボンディング技術のプロセス融合が要求されつつある。超高度化デバイスの三次元化を実現するため、超精密CMPを施したうえで、異種材料を含めて大口径ウエハーにおけるハイブリッドボンディング技術の融合プロセス技術の適用が拡大し、キーワードは超精密のCMP技術とボンディング技術であることを頭に入れてほしい。

しかし、パワー系、高周波系などのデバイスとなると、Siでは物理的限界があって、

ワイドバンドギャップ・化合物半導体として、SiC、GaNあるいは究極的ダイヤモンドが注目されている。これらの結晶は、Si結晶と違って化学的にも安定し、結合力が極めて強い超難加工材料である。加工困難を極め、何らかのブレークスルーが求められているところであるが、現状ではシリコンウエハーの製造プロセスを参考にして基板の加工プロセスを設計している。一般的にコロイダルシリカによる最終仕上げCMP工程が律速となる。そのため、コロイダルシリカのようなスラリーの改良を図ろうとする。あるいは、その直前の前加工で加工面の表面粗さ、スクラッチや加工変質層の僅少化を高効率で実現し、コロイダルシリカポリッシングで除去すべき量の僅少化を図る前加工条件を工夫する。

これらが現状の加工プロセス・加工方法を基本とする加工条件の改善型的手法である<sup>5)</sup>。図4は現状の加工プロセスの概略をまとめたものである。ただし、単枚加工か多数枚同時加工によって加工時間が変わるし、また各社各様であることを念頭に、全体の流れと概略条件を眺めていただきたい。そして、洗浄方法と検査方法も併記してあるので、SiCとGaNの現状加工プロセスを理解するうえで参考になろう。

この流れ図を俯瞰して理解してほしい

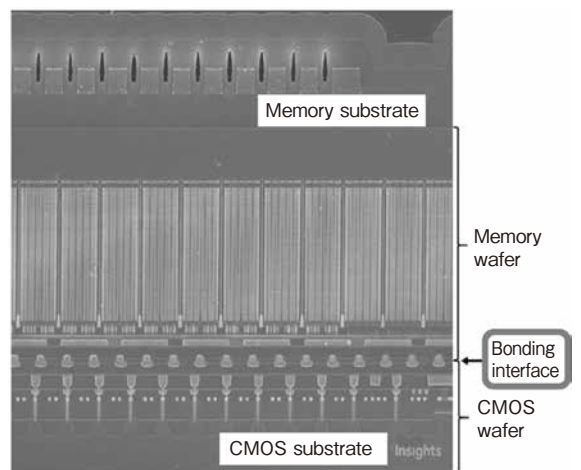
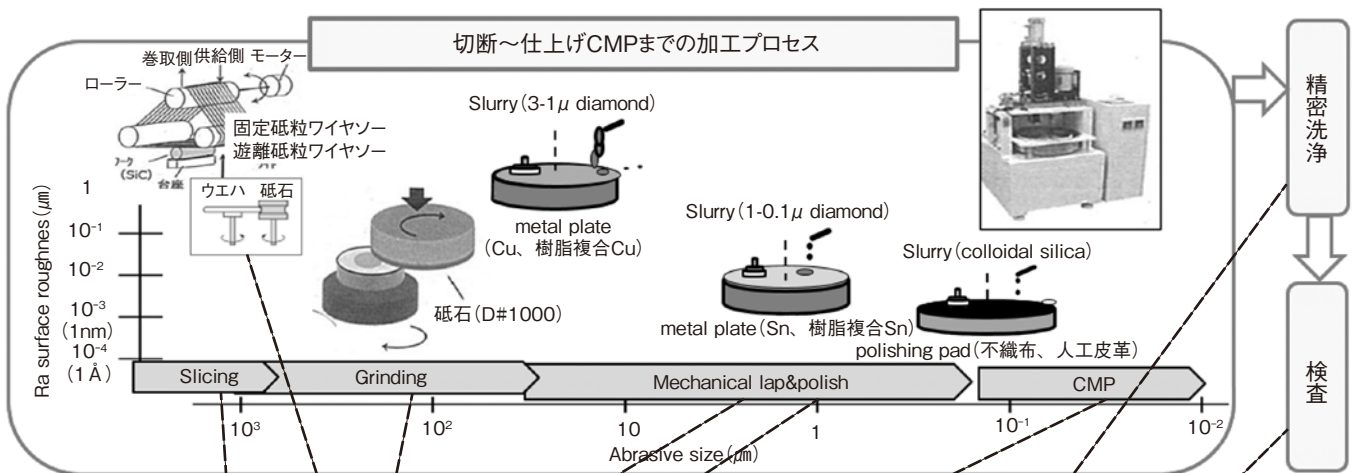


図3 超精密CMPプロセスと接合プロセスをキーとした融合技術による高性能メモリデバイスの例  
【配線形成したCMOS回路とメモリアレイを別々ウエハーで形成後、配線層の最上層同士を張り合わせて完成したデバイスの断面SEM写真】



ウエハー	主流口径	切断	面取り	前加工		中間加工		仕上げ加工 (CMP)	洗浄	検査	熟成度
				研削	ラッピング	D-ポリッシング	D-ポリッシング				
Si	12インチ (~8インチ)	ラッピング式ワイヤソー	あり	D#1000-2000 (加工時間数分)	GC#1500 (加工時間10分)	—	—	コロイダルシリカ (pH8-10) で30分	RCA	SP-5 マクロ検査 (例: AMI3000) OS-check	◎
SiC	6インチ	D固定砥粒 / 遊離砥粒式ワイヤソー	あり	同上 (加工時間30分)	同上 (加工時間1~2時間)	Cu / 樹脂複合Cu定盤 + D3-1μで1時間	Sn / 樹脂複合Sn定盤 + D1-0.1μで2時間	コロイダルシリカ (強酸化剤) で10時間	メガソニックSP (濃硫酸+過水)、オゾン水、RCA	共焦点顕微鏡 (レーザーテック)、カンデラ (KLA-Tencor)、MEM分析 (Hitachi-Hi)、TEM	△
GaN	1~2インチ	同上	あり	同上 (加工時間30分)	同上 (加工時間1時間)	同上	Sn / 樹脂複合Sn定盤 + D1-0.1μで3~5時間	コロイダルシリカ (強酸化剤) で数10時間	THAH溶液、ブラシ洗浄、メガソニック、アンモニア+過水	同上 カソードミネッセンス (CL)	△ ×
ダイヤモンド	0.1インチ	レーザー切断	あり	—	—	スカイフ盤で数時間	スカイフ研磨で数十時間	コロイダルシリカ (強酸化剤) で100時間以上	ブラシ洗浄、メガソニックSP、RCA	同上	×

図4 現状の各種半導体基板の加工プロセスとその概略加工条件 (Doi Laboratoryの調査による)

ところは、大口径 (φ 300mm) Siウエハーの数十倍あるいは100倍以上、加工処理に時間がかかることから、超難加工材料であることを認識されたい。すなわち、SiC (φ 4~6inch) と GaN (φ 2inch) の加工方法・条件と洗浄方法が確立しているわけではなく、ここに新たなブレークスルーが切望される所以がある。

以下、筆者らの次世代加工技術開発の着眼点とその開発事例を紹介する。

## 2-2 次世代加工技術の着眼点とその開発事例

CMPによる原子レベルの無擾乱鏡面の創成メカニズムは、スラリーなどの化学的作用で形成した機械的に脆弱な反応生成層を、軟質砥粒や軟質パッドによって微少除去して進行する。前述のように、難加工性単結晶基板は高硬度かつ化学的安定性に優れるため、表面の脆弱層形成は容易ではない。ただ表面脆弱層の厚さの大小は別にして、形成することは可能

である。例えば、紫外線 (UV) 照射でOHラジカルの生成作用や、マイクロナノバブル水適用で高溶存酸素含有スラリーによる表面改質の反応促進作用などで、加工促進の効果を見出している<sup>6), 7)</sup>。このような成果を踏まえて、表面脆弱層の生成効率を高めるために着目したのは、スラリー中のケミカル成分 (酸化剤など含む) の検討、付与する外部エネルギー (紫外線照射など) による援用法の検討などである。さらに、これまで手付かずの環境 (CMP加工装置の加工部の雰囲気ガスやその圧力) にも着目し、加工メカニズムを検証しつつ高効率加工を追究する。

### 2-2-1 密閉式加工環境コントロール型CMP法の概略

図5に密閉式加工環境コントロール型CMPを行うためのベルジャー (チャンバー) 型CMP装置の外観図および断面模式図を示す<sup>8)</sup>。密閉容器 (ベルジャー) の内部には、通常回転定盤、試料保持回

転ヘッド、スラリー供給ノズルなどが備え付けてある。ベルジャー内へは様々なガス (空気、酸素、窒素、二酸化炭素、アルゴンなど) を導入し、内圧を減圧 (ゲージ圧: -0.1MPa) から加圧 (ゲージ圧: 1.0MPa) 状態まで制御可能である。

この装置適用によるSiCおよびGaN基板のCMP特性を図6に示す<sup>9)</sup>。本事例は、空気または酸素の加工雰囲気において、ゲージ圧0.5MPaまで加圧した際の加工結果である。いずれの基板に対しても、通常の加工 (大気圧解放雰囲気) に比べ、加圧雰囲気下での大幅な加工レート上昇を確認した。SiC基板では、通常400nm/hに対して酸素加圧環境下で1100nm/h (図6左)、GaN基板は通常15nm/hに対して空気加圧環境下で32nm/h (図6右) と、通常CMPの2~3倍の加工レートである。加工レートが、加工雰囲気ガスや内圧に強く依存する。一連の結果は、スラリー中に存在する酸素の役割の重要性を



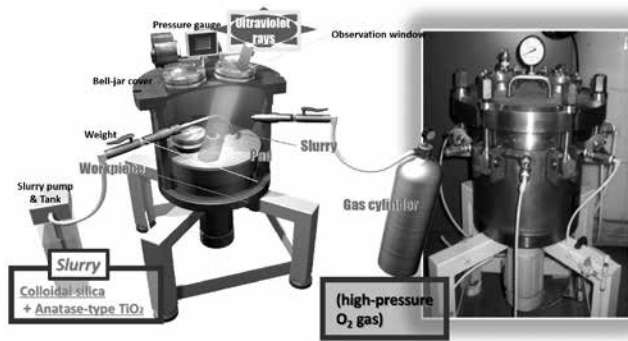


図5 密閉加工環境コントロール型ベルジャー-CMP装置の構造模式図と外観写真  
(石英覗き窓からUV照射によって光触媒反応援用CMPも可能)

示唆する。事実、加圧加工雰囲気のスラリー中には、空気加圧で25mg/L、酸素加圧で46mg/Lの酸素溶込みがある。通常状態の溶存酸素量8mg/Lに比べ約3~6倍も高い値である。

加工対象材料により、最適雰囲気ガスが異なる点が興味深い。最適環境は必ずしも酸素100%雰囲気ではなく、窒素の存在も何らかの効果を発揮している可能性がある。酸素と窒素の混在雰囲気の有効性を示す類似の結果が、セリアスラリーを用いたガラスの加圧環境CMP加工においても得られている<sup>10)</sup>。加圧環境CMP加工は、ガラス加工用スラリーの代替技術開発(セリアスラリーを二酸化マンガン系スラリーへ代替)にも効果を発揮し注目を浴びている<sup>11)</sup>。本技術を適用できる材料範囲は実に広い。以上のように、高圧環境下でのCMP加工より、難加工性単結晶材料の加工能率向上の端緒を得たのである。

さらに、加工時チャンパー内圧(減圧~加圧)のリアルタイム制御機構による加工レート精密制御の可能性も見出している。加工レートは、被加工物に与える負荷荷重と運動量(研磨定盤・被加工物の回転運動速度)で制御するのが一般的である。加工環境コントロールによる加工レート制御が加わることで、より精密で広範囲な加工レートのリアルタイム制御も可能となる。

## 2-2-2 UV照射による光触媒反応援用CMPと高圧酸素雰囲気の効果

UV照射の加工レート促進効果を、GaN基板の加工実験で確認した結果が図7で

ある<sup>12)</sup>。GaN基板の加工レートは、通常のCMPではプレストン則により加工圧力に比例して増加しているが、そこにUVを照射(GaN基板に直接照射)すると、GaN基板の加工レートが3倍程度増大する。直接GaN表面にエネルギーの高い短波長のUV照射すると、表面に酸化膜的な改質層が生成され、その層をスラリー中の微粒子(コロイダルシリカ)あるいはパッドによって除去しているものと思われる。事実、GaN基板を熱処理によって酸化膜を形成してからCMPを行うと、通常CMPよりも仕上げ加工時間が1/3になる。SiC基板の場合は加工レートの増大効果が2倍に満たないが、UV照射の効果は確認できている。

これまでの結果をヒントに、酸素を加工面に積極的に供給させれば、さらなる高能率化が期待できると考えた。その一手法として光触媒反応による活性酸素の導入・活用を考えた。一般的にTiO<sub>2</sub>粒子に紫外線を照射すると、電子がより高いエネルギーバンドに励起され、同時にその抜け穴であるホールはO<sup>2-</sup>イオンを酸化力の非常に強いOHラジカルに変化させる<sup>13)</sup>、とされている。そこで、さらに高圧酸素雰囲気内でCMPを行うに際し、コロイダルシリカ中に微量のチタニア(TiO<sub>2</sub>)粒子を添加したスラリーに、装置付属のガラス窓(図4参照)から紫外線を照射しながらSiC基板の加工を行う。

図8は、密閉したベルジャー型CMP装置の各種雰囲気ならびに紫外線照射の有無による単結晶SiC基板の加工レートを比較した結果の一例である<sup>14)</sup>。TiO<sub>2</sub>粒

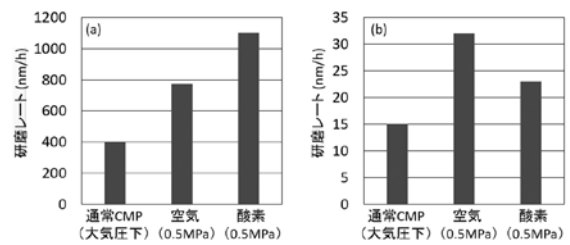


図6 加工環境制御(チャンパー型)CMP装置によるガス圧力を変化させたときのSiC並びにGaN基板の加工特性

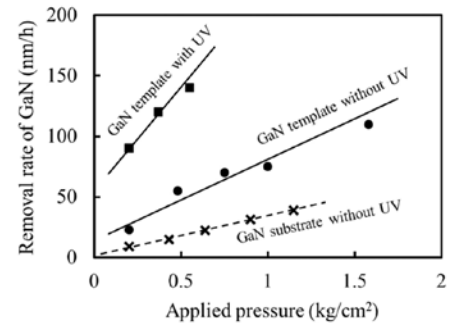


図7 GaN基板を直接UV照射により加工特性を把握した一例  
(加工レート促進の効果の確認試験結果)

子を添加したコロイダルシリカ・スラリーに紫外線を照射すると、加工レートが約2倍になる。これは光触媒反応の効果と思われ、とくに高圧酸素雰囲気下で紫外線を照射する場合、通常の大気圧下で行う際の4倍を越す加工レートとなる。高圧の酸素雰囲気下でUVを照射すると、高圧酸素雰囲気下で紫外線を照射しながら加工したSiC基板の表面粗さは、Ra0.2nm前後と、良好な加工面が得られる。

以上、ベルジャー型密閉研磨装置における高圧酸素雰囲気と光触媒反応援用によって、これまで極めて加工が困難であったSiCやGaNなどの難加工性材料をも効率よく高品位に加工できる端緒を見出し、将来の加工技術の一つとして期待される。しかしながら、前述で述べたベルジャー型CMP装置によっても、ダイヤモンド基板の場合は困難である。

## 3. プラズマ融合CMP法とその加工特性の概略

究極のデバイスと位置付けられている半導体ダイヤモンド基板の加工に対しては、単純な砥粒加工法ではもちろん、密閉式加工環境コントロール型CMP法で

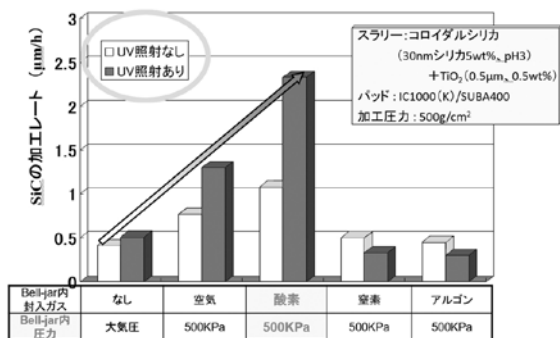


図8 チャンバー内への紫外線 (UV) 照射の有無によるSiC基板の加工レート促進の効果 (各種ガス雰囲気におけるチタニア添加スラリーへのUV照射の有無)

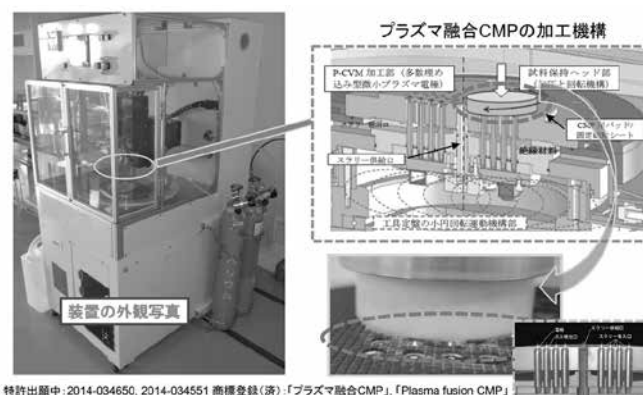


図9 プラズマ融合CMP装置の外観写真と加工原理図

も高効率加工は難しい。

筆者らは、砥粒加工に囚われることなく、他の加工手法を融合させたCMP法を考案した。そのコンセプトは次のとおりである。パッドの基準平坦面を加工基板面に転写することを原理とする研磨加工は、表面平坦性を得るために重要である。一方、平坦性にある程度目をつぶれば、加工能率が高いドライエッチング加工手法が存在する。難加工性材料の通常CMP加工レートが数~数百nm/h(材料により差が大きい)に対し、ドライエッチング加工ではCMP加工に比べ1~2桁高い加工レートが得られる(ガス種や圧力などの加工条件による)。そこで、平坦化に弱点を持つが高効率なドライエッチング法、加工能率に課題を持つが平坦化に優れたCMP法、これらのそれぞれの特徴(長所)を活かしながら融合する。重畳効果により高効率・高品位表面創成を目指すコンセプトを考案した高次元の次世代融合加工法が「プラズマ融合CMP」である<sup>15)</sup>。加工変質層を与えず高効率材料除去を可能とする大気圧プラズマCVM (Chemical Vaporization Machining/P-CVMと略す)法に着目し、それをCMP法と同時融合させた。ウェット環境で行う湿式CMPとドライプラズマガス加工の同時適用を実現している。材料ごとの最適なガス種選択により、二つの加工法の同時融合による相乗的な材料除去の促進効果が発揮され、極めて高い加工レートを得ることができる。また、酸素系ガスを用いた表面酸化促進型の融合加工も可能である。因みに「プラズマ融合CMP」

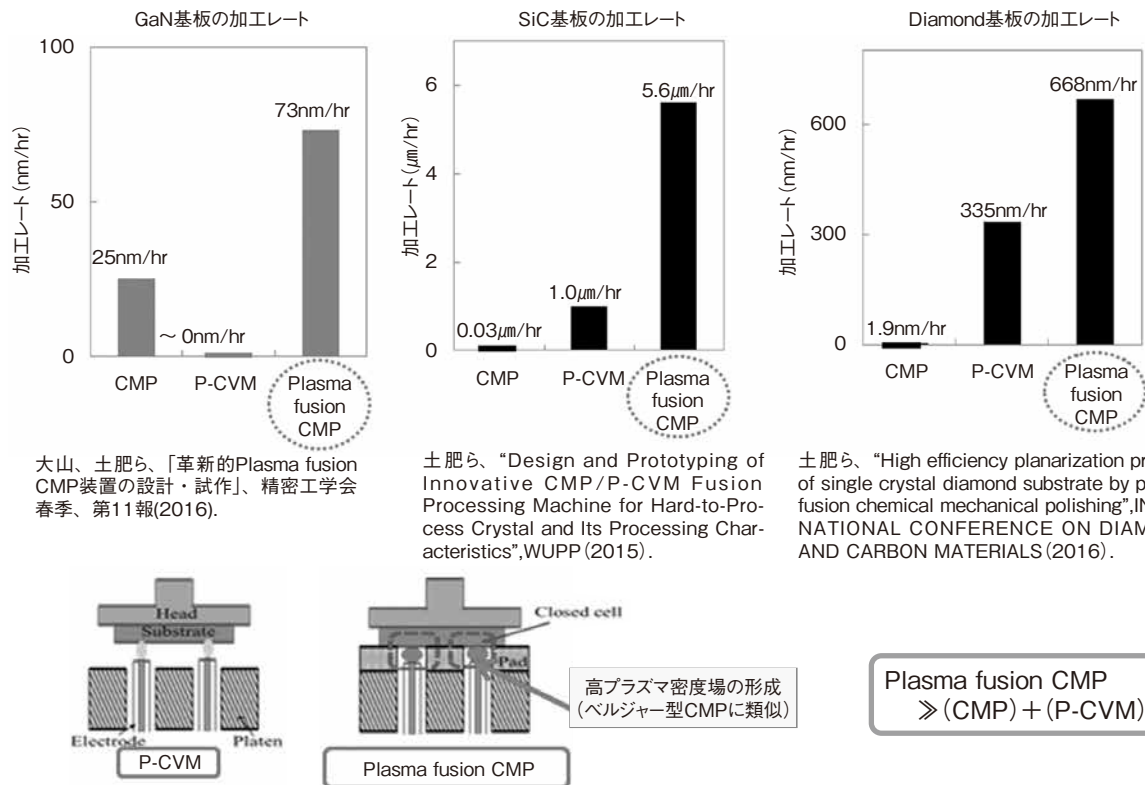
は商標登録されている。

図9に、プラズマ融合CMP加工装置の装置外観写真と基本原理図を示す<sup>15)</sup>。通常のCMP装置のように配置された研磨用定盤に微小なマイクロプラズマ電極を多数内蔵し、P-CVM法を同時融合させている。併記した図からは、同時融合加工中の基板/研磨パッド周辺の微細電極上部からプラズマ発光を確認できる。P-CVM法は、大気圧プラズマ加工を駆使した高密度中性ラジカルによる高効率エッチングを加工原理とする。イオン照射による衝撃がないため、加工ダメージを与えず加工できるが、中性ラジカルによる等方性エッチングのため平坦化に対しては原理的弱点を持つ。しかし、平坦化に優れたCMP加工法との同時融合を行い、相互補完しつつ相乗効果を引き出す。CMP加工中におけるプラズマ発生は、電極部分を常にドライ環境とする必要があるため、マイクロプラズマ電極部分にスラリー流入を防ぐ特殊構造を考案し、微小電極プラズマ照射部を局所的なプラズマ反応ガス雰囲気(高密度プラズマ)状態としている。これは、前述の「密閉式加工環境コントロール型CMP法」のコンセプトも取込んだ構造である。

プラズマ融合CMP装置を用い、SiC、ダイヤモンド、およびGaN基板の加工を行った結果を図10に示す<sup>16)</sup>。SiC基板に対しては六ふっ化硫黄(SF<sub>6</sub>)ガスを、ダイヤモンド基板に対しては酸素ガスをそれぞれ反応ガスとして用いた。その結果、SiC基板のCMP単独加工レート250nm/h程度に対し、プラズマ融合CMP加工レ

率は4.4μm/hとなり、1桁以上の加工効率向上を実現した(図10中央)。単結晶ダイヤモンドのプラズマ融合CMP加工では、667nm/hの加工レートを得ている(図10右)。加工レートの絶対値は、SiC基板に遠く及ばないものの、ダイヤモンドのCMP単独加工レートがほとんどゼロ(2nm/h以下)ということ顧みれば、融合加工効果は極めて高いことに気づく。いずれの基板材料に対する融合加工レートも、CMP、P-CVMの単独加工レートの単純総和値をはるに上回っていることから、融合によるシナジー効果が効率よく発揮されていることは明らかである。一方、GaN基板に対するプラズマ融合加工では、表面酸化効果に着目し酸素ガスを適用してプラズマ融合CMPを行った。P-CVM単独での加工レートはゼロであるが、加工中の表面酸化が効果的に行われ、CMP単独加工レート25nm/hに対し、融合加工レート73nm/hを得た(図10左)。現在、塩素系ガスによるP-CVM法を適用し、直接的材料除去作用をCMP法と融合することを視野に入れ大幅な加工能率の向上を狙っている。

今後、プラズマ融合加工装置を大気開放型(現状)から局所密閉型(マイクロセル・ベルジャー型)へと改良することで、近い将来に実施可能となろう。誌面の都合で割愛したが、融合加工法は前述のいずれの材料に対しても高い平坦化効果を示している。図10(左下)に示すとおり、加工物基板へのプラズマ照射部分は局所的な密閉空間である。ここに反応ガスが供給されるため、電極-基板部は局所的



大山、土肥ら、「革新的Plasma fusion CMP装置の設計・試作」、精密工学会春季、第11報(2016)。

土肥ら、「Design and Prototyping of Innovative CMP/P-CVM Fusion Processing Machine for Hard-to-Process Crystal and Its Processing Characteristics」, WUPP (2015)。

土肥ら、「High efficiency planarization process of single crystal diamond substrate by plasma fusion chemical mechanical polishing」, INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIAMOND AND CARBON MATERIALS (2016)。

図10 各種難加工材料基板のCMP、P-CVM単独加工とプラズマ融合CMPの加工レートの比較例 (Plasma fusion CMP ; プラズマ融合CMP)

加圧状態と推測される。つまり、局所型の“密閉式加工環境コントロール型CMP法”と捉えることができ、この局所密閉式加工環境コントロール型CMP法とP-CVP法の同時融合加工が高効率・高品位加工に寄与しているものと考えている。加工メカニズムの全容解明と、多岐にわたる加工条件の最適化により、実用化へと繋げていくことが今後の検討課題である。

#### 4. おわりに

本稿では、次世代デバイスとして実用化が期待されるSiC、GaN、ダイヤモンドなどの難加工性単結晶素材に対する次世代加工技術開発の必要性を概説し、新しくユニークな“密閉式加工環境コントロール型CMP法”および“プラズマ融合CMP法”を紹介した。事例に示したとおり、これらの手法を適用した難加工性単結晶材料の研磨特性は、従来加工技術を大幅に上回る高効率・高品位加工を実現している。

今後のオプトメカトロニクス部品あるいはシステムの開発に対応して、より高

度な超精密加工プロセス技術の確立と新たなブレークスルーが極めて重要なキーとなることを認識しなければならない。本稿が、化合物半導体をはじめ超精密加工に関する技術者・研究者にお役に立てれば幸甚である。

#### 参考文献

- 1) 斎藤：シンギュラリティ・ビジネス、幻冬舎新書(2017)。
- 2) 赤崎、松波(編著)：ワイドギャップ半導体、培風館(2013)。
- 3) 学振145・技術の伝承プロジェクト編(監修・田島)：第3章 加工技術、3.1序(土肥)、福島企画印刷(2015)p.149。
- 4) 土肥：月刊トライボロジー、33、11(2019)30。
- 5) 土肥ら：革新的概念に基づく超高効率加工技術の構築、日本機械学会論文集、81、823(2015)pp.1-12。
- 6) Handbook of Ceramics Grinding and Polishing：Elsevier(2014)。
- 7) H. Aida, et al.：Precision Mechanical Polishing of Brittle Materials with Free Diamond Abrasives Dispersed in micro-nano-bubble Water, Precision Engineering, 40, 81-86(2015)。
- 8) T. Doi, et al.：Design and Performance of a Controlled Atmosphere Polisher for Silicon Crystal Polishing, Electrochem. Solid-State Lett. 7(8), G158-G160(2004)。

- 9) 會田、土肥：真空ジャーナル、165号(2018.7)11-14。
- 10) 山崎 努ら：加工環境コントロールCMP装置によるガラス基板の研磨特性—CeO<sub>2</sub>スラリー使用量の低減を目指した加工雰囲気の効果—、精密工学会誌、78149-154(2012)。
- 11) T. K. Doi, et al.：Study on the Development of Resource-Saving High Performance Slurry -Polishing/CMP for glass substrate in a radical polishing environment, using manganese oxide slurry as an alternative for ceria slurry-, Adv. Sci. and Technol. 64 65-70(2011)。
- 12) H. Aida, et al.：Progress and Challenges for Chemical Mechanical Polishing of Gallium Nitride, MRS Online Proceedings Library (MRS 2013 spring meeting), 1560, mrs13-1560-bb03-02,(2013)。
- 13) 藤島：第五回板橋オプトフォーラム(基調講演)、板橋区立グリーンホール(2018.10)。
- 14) T. K. Doi, et al.：ICM/NFT'06(2006)1-06。
- 15) T. Doi：Next-Generation, Super-Hard-to-Process Substrates and Their High-Efficiency Machining Process Technologies Used to Create Innovative Devices, Int. J. of Automation Technology, 12, 2(2018)145-153。
- 16) H. Aida, et al.：Plasma fusion chemical mechanical polishing as a next generation processing technology and its applications to SiC, GaN, and diamond substrate, Advanced Micro-Fabrication and Green Technology, 5, 70-75(2017)。