

研究報告アーカイブ

そこで、ここではダイヤモンドの従来型CMP加工について、詳しい調査を進めることにする。その難易度は著しく高い。図6は、従来型のアモルファスカーボン除去によるダイヤモンド加工によって事前加工したダイヤモンド基板をCMP加工した際の、表面状態の経時変化をとらえたものである。先述の通り、研磨前のダイヤモンドは、ダイヤモンドの加工しやすい面方位を考慮した加工を施している。そのため、図中に認められるような一方向に発生した加工傷が確認できる。

この基板に対しCMP加工を行った場合、一方向に生じていた加工傷が徐々に除去されていく様子を確認できた。完全な平坦化を達成するまでに、最終的に100時間を要した。この間に除去した研磨量を正確に把握することは難しいが、10~30nm程度の除去量であったと推定している。これを研磨レートに換算すると、0.1~0.3nm/hである。従来からの結晶素材であるSiのCMP加工速度がおおよそ10μm/h程度、難加工素材といわれるサファイアが1μm/h程度、超難加工素材といわれるGaNでは10~30nm/hであることを考慮すれば、ダイヤモンドで推定される0.1~0.3nm/hという加工レートは、究極の難加工素材と言わざるを得ない加工レートである。加工圧力、回転数など、いわゆるプレストン則に基づいた加工条件の最適化によってもたらされる加工レートの改善は、多く見積もっても10倍程度が限界である。当研究室においても、最大2nm/h程度までの改善を確認しているが、ほぼ限界に達しているといえる。さらなる向上を目指して、革新的な加工技術での対応が必須である。

3.2 プラズマ融合CMPによるダイヤモンド基板の加工
本研究プロジェクトで設計製作したB-type挑戦型プラズマ融合CMP加工装置については、図1で述べたが、ウェット環境で実施するCMP加工とドライ環境で実施するP-CVM加工による同時加工の実現という、革新的な加工技術への取り組みであり、本プロジェクトで「挑戦型」加工装置と位置付ける所以である。ダイヤモンドのプラズマ融合CMPを実施するにあたっては、最適なプラズマガスの選択が求められる。そこで、我々はま

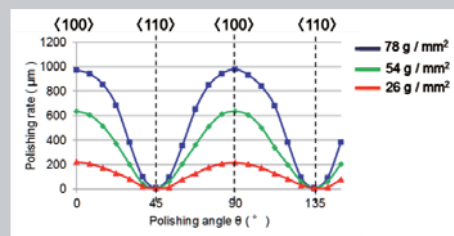


図4 ダイヤモンド(001)面の研磨方向依存性 (実験結果)

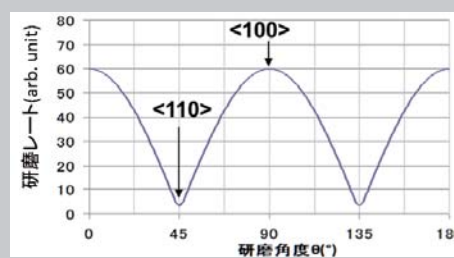


図5 ダイヤモンド(001)面の研磨方位依存性 (理論計算値)

ず、P-CVM加工単独での最適化検討を実施した。ダイヤモンド表面の炭素がCOxあるいはCF4として気化する反応が生ずることを前提に、O2ガスおよびSF6ガスの使用を検討した。これらの反応ガスをを用いたP-CVMによるダイヤモンドの加工レートをプラズマ生成のための印加電力の関数として図7に示す。いずれの反応ガスにおいても、印加電力の上昇とともにP-CVM加工レートの上昇が認められた。また加工速度そのものはO2ガスによるP-CVMのほうが、SF6によるそれに比べ1.5~2倍ほど高いことがわかった。

以上の結果を受け、ダイヤモンドのプラズマ融合CMP加工には、O2ガスをプラズマガスに用いた融合加工を実施した。図8に従来型のCMP加工、O2ガスをを用いたP-CVM加工、およびこれらを組合せたプラズマ融合CMP加工の加工レートを示す。CMP単体での加工レートがおおよそ2nm/hであるのに対し、プラズマ融合CMP加工では、その約300倍に相当する668nm/hもの加工レートが得られた。CMP、P-CVMのそれぞれの単独加工の比較では、P-CVMが圧倒的に高い加工レートを示しており、通常であればP-CVMの加工レートが支配的になることが予測されるが、プラズマ融合CMP加工では、P-CVM加工単独に対してもさらに約2倍の加工レートを示す結果が得られている。また、表面の平坦化率をP-CVM単独加工およびプラズマ融合CMP加工で比較した場合、プラズマ融合CMP加工では約3倍高い平坦化効果を実現していることも確認できた。すなわち、CMPとP-CVMの融合による効果的なシナジー効果が発現したと考えることができる。この結果は、P-CVM加工が表面からのCOx生成反応に基づく高速表面除去を行う一方、CMPが従来型の表面平坦化の役割を担ったという単純な加工メカニズムでは説明がつかない。そこで、シナジー効果に対し、例えば、以下のような加工メカニズムを考察することができる。まず、P-CVM加工に基づきCOx生成反応に基づく高速表面除去が生じる。これと同時に、ダイヤモンド基板表面には表面酸化層が形成される。表面形成された酸化層はCMPによって効果的に除去されるため、P-CVM単体以上の高い加工レートが、高平坦化効果とともに達成されるといった加工メカニズムである。詳細なメカニズムの立証には、さらなる検討が必要であるが、従来CMP加工に対し300倍もの高効率除去を達成した点は、極めて興味深く、有意義な結果である。

3.3. ダイヤモンド薄膜のエピタキシャル成長によるプラズマ融合CMP加工ダイヤモンドの表面の評価
本報告の最後に、ダイヤモンドに対し高い加工効率および平坦化効果を示したプラズマ融合CMP加工法を用いて加工したダイヤモンド基板の表面品質評価について報告する。様々な評価方法が存在するが、ここではより実践的かつダイレクトな評価方法として、加工基板上へのダイヤモンド薄膜のホモエピタキシャル成長を实

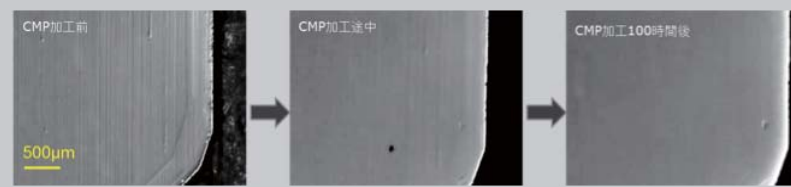


図6 CMP加工によるダイヤモンド基板の表面状態の変化

施した。加工した基板のデバイス化プロセスへの適用を想定した場合、より実用的な視点からの評価結果が得られるため極めて有効な評価法である。

図9はプラズマ融合CMP加工を行ったダイヤモンド基板へ、ダイヤモンド薄膜のエピタキシャル成長した後の、基板表面の全体写真、顕微鏡写真、およびAFM像である。比較として、スクイフ研磨をベースとした従来手法によって仕上げたダイヤモンド基板による結果についても併せて報告する。エピタキシャル成長後に認められる外観上の大きな違いとして、従来法ではエピタキシャルダイヤモンド薄膜に多数のヒロック成長が観察されたのに対し、プラズマ融合CMP加工では、ヒロックのない極めて良好なエピタキシャルダイヤモンド薄膜成長が確認できた。加工に基づく残留ダメージがヒロック成長の起点として作用した可能性が高い。プラズマ融合CMP加工では、残留ダメージのない表面が達成された可能性を強く示唆している。顕微鏡による観察においても、その表面粗さに明確な違いが見てとれる。極微小エリアにおけるAFM像においても表面粗さおよび結晶成長粒の大きさに違いが確認でき、いずれもプラズマ融合CMP加工において良好な研磨状態が得られたことを示唆する結果となっている。

プラズマ融合CMP加工の優位性は、X線回折測定によって具体的に明確な数値データとしても示すことができている。エピタキシャル成長前後の基板の結晶品質をX線ロックンクカーブ測定により評価した結果を表1に示す。市販のダイヤモンド基板そのものの結晶品質に多少のばらつきがあるため、適用加工法の異なる2つの基板間での半値幅の比較評価はここでは意味を持たないことを考慮する必要があるが、各々の基板の研磨前後でのロックンクカーブ半値幅の増減からは、十分な優位性を示す結果が得られている。従来加工ダイヤモンド基板では、ダイヤモンド(004)面および(311)面のいずれのロックンクカーブ評価においても、半値幅の増加が認められる。ダイヤモンドの再成長において、新たな再成長転位が導入され、結晶のチルトおよびツイスト成分が増加している証拠である。一方、プラズマ融合CMP加工を施したダイヤモンド基板では、これらの値がわずかに減少していることがわかる。再成長転位の発生がなく、再成長による膜厚増加によって転位密度が僅かではあるが低減しており、結晶のモザイク性が改善した可能性を示している。プラズマ融合CMP加工によって加工された表面が、残留ダメージのないデバイス成長に適した表面を達成できたことを強く示唆する結果である。

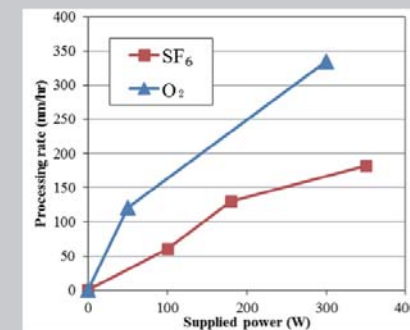


図7 P-CVM加工によるダイヤモンド基板の加工レート (O2ガスおよびSF6ガスによる加工レートの相異)

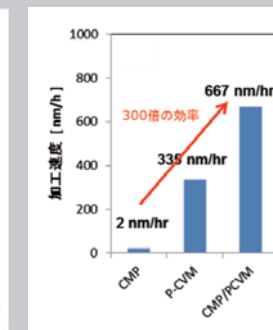


図8 ダイヤモンド基板に対するCMP、P-CVM、およびプラズマ融合CMPの加工レートの相

4. むすび

理想的ダイヤモンド半導体デバイスの実現構想の一環として、ダイヤモンドの高効率・高品質加工のための革新的加工技術の開発を進めてきた。ダイヤモンドは究極的な半導体特性をもつ理想材料であると同時に、その加工難易度の観点から究極的な難加工素材である。本研究で設計試作したB-type 挑戦型プラズマ融合CMP加工装置を用いることにより、P-CVMとCMPとの同時加工が世界初で可能となり、革新的な革新加工技術であるプラズマ融合CMP加工が実現した。また、プラズマ融合CMP加工を世界に先駆けてダイヤモンド基板加工に適用し、ダイヤモンド基板に対する極めて高い加工効率と優れた平坦化効果を、CMPとP-CVMの融合によるシナジー効果とともに実証することができた。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。

これらの一連の結果は、次世代ダイヤモンド半導体デバイスの実現を、ダイヤモンド基板加工技術の側面から強力に加速させる成果であると確信している。プラズマ融合CMP加工の実用化を視野に入れた今後のさらなる応用研究にも、ぜひ期待をして頂きたい。

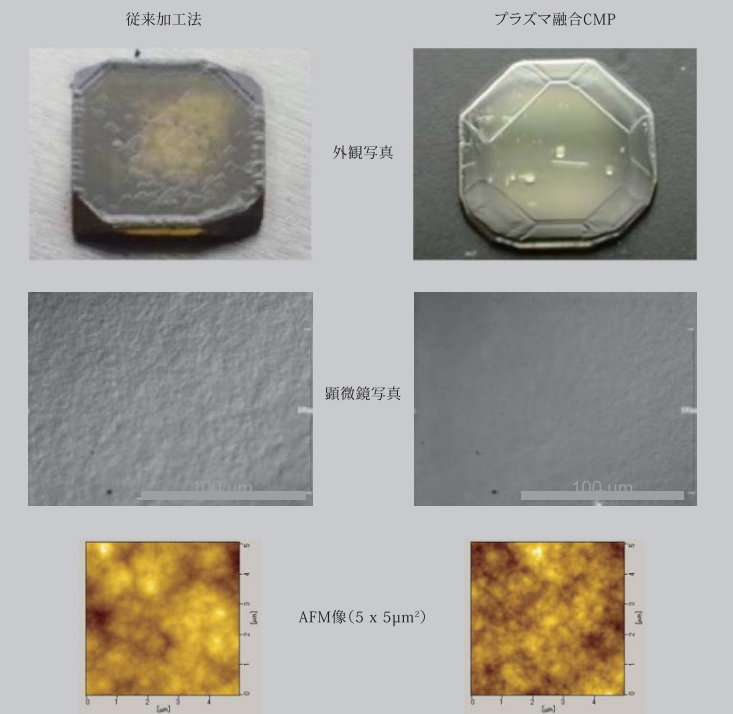


図9 ダイヤモンド基板上へのダイヤモンド薄膜エピタキシャル成長後の基板の外観写真、表面顕微鏡写真、および表面AFM像 (エピタキシャル成長後処理: 従来加工法とプラズマ融合CMP法の比較)

	従来研磨		プラズマ融合CMP	
	研磨後	成長後	研磨後	成長後
(004)	26	30	36	35
(311)	20	27	50	36

表1 ダイヤモンドホモエピタキシャル成長による加工表面の評価 (エピタキシャル成長後のXRDロックンクカーブ半値幅(arcsec)の評価)