

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間	：2021～2025
課題番号	：21H05005
研究課題名	：プラズマノ製造プロセスによる完全無歪加工の実現とその学理の探究
研究代表者氏名（ローマ字）	：山村 和也（YAMAMURA Kazuya）
所属研究機関・部局・職	：大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号	：60240074

研究の概要：

局所プラズマの数値制御走査による形状創成とプラズマ照射による表面改質を援用した高能率無歪研磨仕上げから構成される『プラズマノ製造プロセス』を構築し、硬脆機能材料に対するスラリーを用いない革新的な高能率完全無歪加工プロセスを実現するとともにその学理を探究する。

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：プラズマ、超精密加工、ワイドギャップ半導体、難加工材料、スラリーレス研磨

1. 研究開始当初の背景

SiC、GaN、ダイヤモンド等のワイドギャップ半導体は、高温環境下においても信頼性の高い動作が可能であり、低損失パワーデバイスの作製に不可欠な材料である。また、高精度ガラスレンズの製造に用いる金型材料には、耐摩耗性、耐熱性、化学的安定性等が要求されるため、高硬度の焼結 SiC や CVD-SiC、あるいは超硬合金(WC)等の高機能セラミックス材料が用いられる。これらの材料は高硬度ゆえに形状創成や粗加工にはダイヤモンド工具を用いた機械加工が適用され、最終仕上げにはスラリーと呼ばれるアルカリ等の薬液と砥粒を含む懸濁液を用いた CMP (Chemical Mechanical Polishing) プロセスが一般的に用いられる。被加工材料と工具の硬度差を利用する機械加工プロセスでは、塑性変形や脆性破壊といった破壊現象を利用するため、熱衝撃を受けた時に破壊の原因となるマイクロクラック、光散乱の要因となるスクラッチ、電子物性の劣化や摩耗・剥離によって金型寿命を短くする加工変質層が生成される。また、工具が接触する加工であるため、外部からの振動や熱変形等の影響により、工具の接触位置が変動して加工特性が変化する、いわゆる母性原理に支配されるため、ナノメートルオーダの加工精度を恒常的に得ることは困難である。さらに、CMP プロセスは、スラリーの購入コストと環境負荷が大きい等、多数の問題点を有している。したがって、母性原理に支配されることなくナノ精度の形状創成を可能にするとともに、スラリーを用いない革新的な完全無歪加工プロセスの実現とその学理を明らかにすることが強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、プラズマプロセスを基幹技術として適用し、本プロセスが有する再現性ならびに制御性の高い化学反応現象を除去あるいは表面改質に利用することで、

- 被加工物表面にダメージを与えない、①形状創成加工、②表面仕上げ加工プロセスを実現することで脱機械加工による完全無歪加工
- プラズマを用いた形状創成は非接触加工プロセスであるため、機械精度に依存せず、また振動・温度等の周囲環境の変動の影響を受けることなくナノメートル精度の自由曲面を再現性良く決定論的に創成することで脱母性原理によるナノ精度加工

が可能となる。そして、高密度プラズマプロセスを精密に制御することで高能率化と高精度化（高再現性、高安定性、高制御性）という従来の機械加工では相反する加工特性を両立し、高機能性材料の優れた特性を確実に担保した上で所望する形状や表面粗さを得る新しいものづくり工学『プラズマノ製造科学』を精密加工学分野における新たな学問領域として創出し、有史以来連続と受け継がれてきた機械加工プロセスを一新する革新的な“ものづくり”プロセスを構築する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために以下の研究項目を実施する。

(1) 精密局所プラズマの数値制御走査によるナノ精度形状創成プロセスの開発

- (1)-1 高精度非球面ガラスレンズ製造金型に対応する加工の高空間分解能化と高能率化を両立するプラズマ生成方法および数値制御加工シミュレーションにおけるアルゴリズムの最適化
- (1)-2 自由曲面形状をナノメートルオーダの精度で創成する5軸数値制御加工装置の開発
- (1)-3 反応生成物量の *in-situ* 計測および一定制御システムの構築による加工の高精度化
- (1)-4 エッチングメカニズムの解明と加工条件の最適化

(2) プラズマ照射を援用したスラリーレス完全無歪研磨プロセスの開発

- (2)-1 プラズマ生成方法の検討とその最適化による表面改質レートの向上
- (2)-2 電極/研磨部一体型加工ヘッドを搭載した平面・自由曲面形状対応研磨装置の開発
- (2)-3 ヒトリファイドボンド砥石を用いた完全ドレスフリー研磨プロセスの開発
- (2)-4 加工面の精密物性分析と第一原理分子動力学シミュレーションによる材料別の表面改質および平滑化メカニズムの解明とプロセスパラメータの最適化

以上により、難加工材料であるワイドギャップ半導体基板や高精度ガラスレンズ用金型の形状創成から最終仕上げに至

るまでを、プラズマを援用した物理化学的な手法により一貫して行うという、従来の機械加工技術を革新する完全無歪加工プロセス体系を構築するとともに、新たな学問領域として『プラズマナノ製造科学』を創出すべくその学理を探究する。

4. これまでの成果

4.1 基板対向型プラズマ生成電極と研磨ヘッドを搭載した減圧型 PAP 装置の開発

単結晶 GaN ウェハ等の平坦化・平滑化を目的とした減圧型プラズマ援用研磨 (PAP: Plasma-assisted Polishing) 装置を試作した。2022 年度は、GaN ウェハの PAP 加工レートを律速する表面改質レートを向上させるため、改質に使用するプロセスガス種の選定を行い、H₂プラズマ照射が GaN の表面改質に対して最も効果的であることを明らかにした。

4.2 プラズマオートドレスによる AlN 基板の脱粒フリー研磨プロセスの開発

CF₄プラズマとビトリファイドボンドダイヤモンド砥石を用いた AlN 基板の PAP において、ドレッシングを実施しなくても、ビトリファイドボンド砥石のボンド材主成分であるシリカがエッチングされ、リアルタイムに適度なドレッシング作用が生じて研磨レートが向上することを明らかにするとともに、従来の機械研磨法の限界を突破する Sa 表面粗さ 3 nm を脱粒フリーで達成した。

4.3 単結晶ダイヤモンド基板の高効率無歪研磨プロセスの開発

走査型カソードルミネッセンス測定により、ダイヤモンド砥石を用いたスカイフ研磨の場合には結晶欠陥に起因する Band-A 発光がスクラッチに沿って見られるが、PAP の場合にはその発光強度は極めて微弱であり、PAP によるダイヤモンドの研磨プロセスはダメージフリーであることを明らかにした。また、レーザートリミングと PAP を複合した新しい高効率平坦化・平滑化プロセスを開発し、特許を出願した。

4.4 加工面の物性評価

多様な単結晶半導体表面 (SiC、GaN、ダイヤモンドなど) に対するプラズマ援用研磨特性を極限レベルで明らかにするため、超高真空中で加工表面への汚染や自然酸化膜の成長を抑えた上で、試料表面の原子構造を可視化できる、走査型トンネル顕微鏡 / 非接触原子間力顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy (STM)/non-contact atomic force microscopy (nc-AFM)) システムを構築した。

5. 今後の計画

5.1 ナノ精度数値制御プラズマ形状創成プロセスの開発と高精度 SiC セラミックス製非球面ミラーの作製

ミリメートルスケールから原子スケールにおけるプラズマ加工現象を予測するマルチスケール 3D シミュレーションモデルを開発する。本モデルを用いてリアルタイムに取得する種々の計測データを入力して基板表面におけるエッチング状態を推測し、加工物の表面形状の変化によるガス流れ場の変化や表面温度の変化に伴うエッチングレートの変化に対応してエッチングレートが一定になるようにプラズマ生成電力や走査速度をフィードバック制御することで、ナノメートル精度の形状創成プロセスの実現を目指す。

5.2 GaN ウェハの高効率・低コスト加工プロセスの開発

結晶成長後のバルク GaN 結晶をスライスしたウェハに対して、ダイヤモンド固定砥粒定盤を用いたラップ加工による平坦化と平滑化とプラズマ援用研磨による加工変質層とスクラッチの高速除去を複合した新規の GaN ウェハ一貫製造プロセスを構築する。

5.3 多結晶ダイヤモンド基板の高効率超平滑化プロセスの開発

多結晶ダイヤモンド基板のプラズマ援用研磨において、吸着種および吸着種密度と研磨レートの面方位依存性の相関評価、ならびにダイヤモンド基板に吸着した反応種と表面再構成の相関評価を行い、結晶粒ごとの面方位の違いによる研磨レートの差を低減するプロセス条件を探索する。

5.4 加工面の物性評価

半導体表面における STM/nc-AFM 像の第一原理シミュレーション、各種半導体表面に特化した加工後処理プロセスの確立、およびプラズマ援用研磨面の STM/nc-AFM 観察により、研磨特性や創成される表面電子状態の分布を原子スケールで明らかにする。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

原著論文(他2件)

- 1) Highly efficient finishing of large-sized single crystal diamond substrates by combining nanosecond pulsed laser trimming and plasma-assisted polishing, N. Liu, K. Sugimoto, N. Yoshitaka, H. Yamada, R. Sun, K. Arima, K. Yamamura, Ceram. Int., 査読有, in press (2023).
- 2) Effects of polishing pressure and sliding speed on the material removal mechanism of single crystal diamond in plasma-assisted polishing, N. Liu, K. Sugimoto, N. Yoshitaka, H. Yamada, R. Sun, K. Kawai, K. Arima, K. Yamamura, Diam. Relat. Mater., 査読有, 124, 108899 (2022).

その他、国内会議発表 3 5 件、国際会議発表 1 6 件、招待講演 6 件、図書 2 件、国内特許出願 2 件

7. ホームページ等

山村研究室ホームページ <http://www-nms.prec.eng.osaka-u.ac.jp>