

環境調和性に優れた 高能率 GaN 表面研磨技術の開発

物理学系専攻 精密工学コース
超精密加工領域 山内研究室 萱尾 澄人

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、電気エネルギーの高効率利用は大きな課題であり、これに対してSiに代わる次世代半導体材料として窒化ガリウム (GaN) が注目されている。しかし、GaNの優れた物性を十分に活かしたデバイスを作製するためには、幾何学的、結晶学的に高度に規定され、原子レベルで制御された表面を持つ GaN 基板が必要となる。そこで、我々は新たな研磨技術として、触媒表面基準エッチング (CARE) 法^[1]を提案している。本手法では、純水中で白金などの触媒を成膜した研磨パッド (触媒パッド) に GaN 基板を接触させ、相対運動させる (図1)。

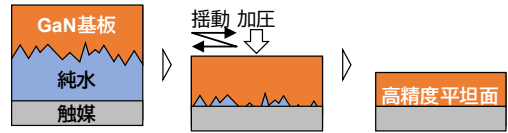


図1: CARE 法のご概念図

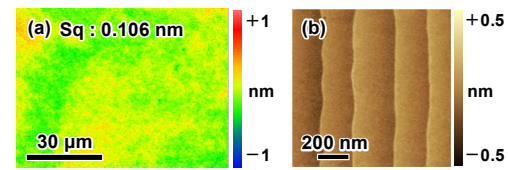


図2: GaN (0001) on-axis 基板の CARE 加工後表面; (a)白色干渉計像, (b)原子間力顕微鏡像

触媒が高頻度に接触する基板の凸部が選択的にエッチング

されることで、高精度な平坦化を実現する。CARE 法では水による化学的なエッチングのみで加工が進行するため、原理的に基板に機械的ダメージが導入されない。また、強烈な薬液や砥粒が不要なため、極めて環境負荷の小さい研磨技術であるといえる。CARE 法を GaN 基板に適用すると高精度平坦面を得ることができ (図2 (a)), さらに、原子間力顕微鏡 (AFM) 像 (図2 (b)) が示すような、ステップテラス構造を有する平滑面を創成できる。これは CARE 加工においてステップ端原子が選択的にエッチングされたことを示している。一方で、加工起点がステップ端に限定されるため、GaNの加工速度は1 nm/h程度に留まっております、加工速度の向上が課題となっている。

2. 光電気化学反応援用型 CARE 法による GaN 基板の高能率加工

上記のような背景のもと CARE 法の高効率化を目的として、光電気化学 (PEC) 反応を援用した PEC 反応援用型 CARE (PEC-CARE) 法を開発した。PEC 反応は加工液中で GaN 表面にそのバンドギャップ以上のエネルギーを持つ紫外光を照射したときに生成される正孔が表面を酸化させる反応である^[2]。PEC-CARE 法では PEC 反応を用いて GaN 基板の最表面原子層の一部を酸化し、酸化領域を CARE 加工で即座に除去するという過程を繰り返す。

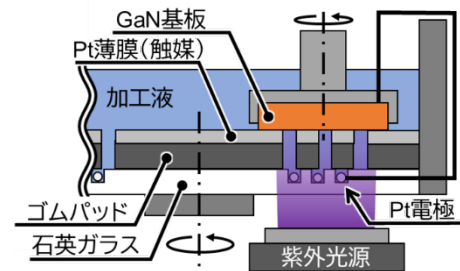


図3: PEC-CARE 加工装置

なお、酸化反応で分厚い酸化膜をつくり、それを除去する他の既存技術と区別して、本記事では PEC-CARE 法の原子スケールの酸化を最表面層の酸化処理と表記している。酸化領域が除去された後の表面には微小構造が形成され、この構造の端部が擬似的なステップ端となり加工起点としてはたらくことで加工速度が向上すると考えられる。PEC-CARE 加工装置を図3に示す。基板表面への紫外光照射を可能にするために、触媒パッドに貫通穴を設けた。光源には水銀キセノンランプを使用し、照度は70 mW/cm² (@波長245 nm)とした。また、酸化領域の自然溶解を防ぐために加工液には中性の緩衝液を用いた。この装置を用いると、GaNの加工速度は720 nm/hまで飛躍的に増大し、GaN基板の高速加工を実現できた^[3]。このように、加工中に基板表面へ紫外光を照射するだけで加工速度を向上させることができ、強烈な酸化剤などの薬液を使用しないため、PEC-CARE 法は CARE 法と同様に環境調和性に優れた研磨技術であるといえる。さらに、加工後表面には CARE 加工後表面と同様にステップテラス構造が形成されており、PEC-CARE 法で高速・高精度に GaN 基板を加工できることが明らかとなった^[4]。

この装置を用いると、GaNの加工速度は720 nm/hまで飛躍的に増大し、GaN基板の高速加工を実現できた^[3]。このように、加工中に基板表面へ紫外光を照射するだけで加工速度を向上させることができ、強烈な酸化剤などの薬液を使用しないため、PEC-CARE 法は CARE 法と同様に環境調和性に優れた研磨技術であるといえる。さらに、加工後表面には CARE 加工後表面と同様にステップテラス構造が形成されており、PEC-CARE 法で高速・高精度に GaN 基板を加工できることが明らかとなった^[4]。

3. PEC-CARE 加工中の PEC 反応の挙動

CARE 法に PEC 反応を援用することで、加工速度と精度を両立した加工系を実現した。これは PEC 反応による酸化が、単に CARE 法の加工速度を向上させるだけでなく、平滑化に積極的に寄与することを示している。

そこで、原子スケールの表面観察を通して PEC-CARE 加工における PEC 反応の挙動を調査した。まず、PEC-CARE 加工中の PEC 反応による酸化処理の効果を評価するために、短時間、紫外光を照射した表面に CARE 加工を施し、AFM を用いて表面を観察した。

その結果、紫外光照射と CARE 加工によって 1 原子層深さのピットがテラス全体に導入され (図 4 (a)), 追加の CARE 加工によってピット径が拡大し (図 4 (b)-(c)), CARE 加工による通常のステップ端のエッチングに加えてテラス上でも材料除去が進行した。この観察結果から、酸化処理と CARE 加工によって形成されたピットの端部が加工起点として作用することで、PEC-CARE 法の加工速度が増大していることが明らかとなった^[4]。続いて、紫外光を繰り返し照射したときの基板表面を AFM で観察した。GaN 基板表面に短時間の紫外光照射による酸化処理と硝酸水溶液への浸漬による酸化領域の除去からなる加工サイクルを 3 回施した。各サイクル後の表面を図 5 (a)-(c) に示す。1 度目の照射で 1 原子層深さのピットがテラス全体に形成され、追加の照射で新規ピットの導入やピットの深さ方向への拡大はほとんど生じず、ピットのテラス水平方向への拡大が支配的であった。また、図 5 (b) より、加工によってステップ端が白点線から白実線に移動していることが確認され、PEC 反応によってステップ端のエッチングが進行したことが示唆された。これらの観察結果は、PEC 反応はピットの端部やステップ端などを選択的に酸化する特性を持ち、CARE 法と同様のステップフロー型の反応であることを示しており、この特性が PEC-CARE 法の高速高精度加工の実現に寄与していると結論付けられた^[4]。

4. 結言

本研究では PEC-CARE 法を提案し、原子スケールの平滑面を 720 nm/h の高加工速度で実現する高能率 GaN 表面研磨技術を確立した。AFM を用いた表面観察の結果、PEC 反応の援用によって加工起点が増加し、CARE 法の加工速度が向上することが明らかとなった。さらに、PEC 反応そのものがステップフロー型の反応であることが示され、この特性によって、PEC-CARE 法では高速かつ高精度な加工を両立できていると結論付けられた。PEC-CARE 法は既存の研磨装置に触媒パッドと紫外光照射装置を取り付けるだけで容易に導入可能な技術であり、本成果は研磨工程の高能率化による製造コストの削減によって、GaN デバイスの更なる普及、ひいてはカーボンニュートラルの達成に貢献するものである。

謝辞

この度はこのような栄えある賞を賜り、大変光栄に存じます。本研究の遂行にあたり、熱心なご指導を賜りました大阪大学大学院 工学研究科 山内和人教授をはじめとする物理学系専攻の諸先生方に厚く御礼申し上げます。この賞を励みに、今後も引き続き研究に邁進して参りたいと存じます。

参考文献

- [1] J. Murata et al., *J. Cryst. Growth*, **349** 83–88 (2012).
- [2] M. S. Minsky et al., *Appl. Phys. Lett.*, **68** 1531–1533 (1996).
- [3] K. Kayao et al., *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **12** 063005 (2023).

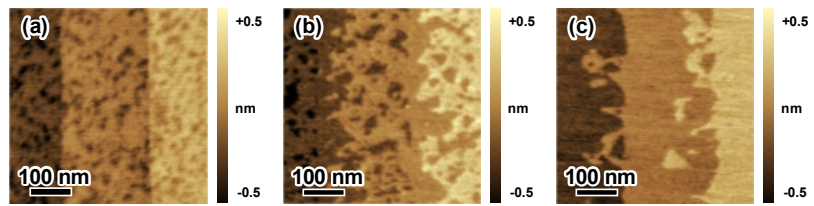


図 4：2 秒間の紫外光照射と CARE 加工を施した GaN (0001) on-axis 基板表面の AFM 像; CARE 加工; (a) 1 分後, (b) 10 分後, (c) 40 分後。

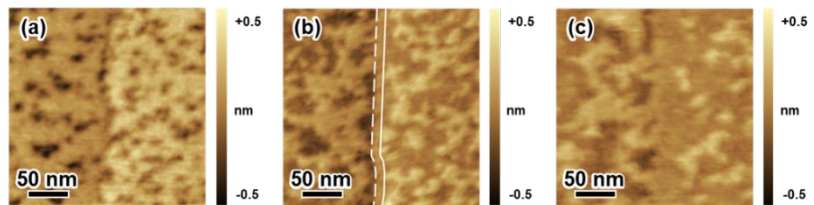


図 5：2 秒間の紫外光照射と硝酸水溶液への浸漬からなる加工サイクルを複数回施した GaN (0001) on-axis 基板表面の AFM 像; (a) 1 回, (b) 2 回, (c) 3 回。ただし、図(b)中の白点線は加工前のステップ端の位置、白実線は加工後のステップ端の位置を示し、線間の幅は加工によるステップ端のエッチング量を示している。