

# 単結晶窒化ガリウム(GaN)基板の高速高精度加工法の開発 —紫外線援用テープ研削法の提案—

鷹巣良史<sup>\*1</sup>, 嶋田慶太<sup>\*2</sup>, 水谷正義<sup>\*2</sup>, 厨川常元<sup>\*3</sup>

Development of high-speed and high-accurate manufacturing of gallium nitride  
Suggestion of UV assist tape grinding method

Yoshifumi TAKASU, Keita SHIMADA, Masayoshi MIZUTANI and Tsunemoto KURIYAGAWA

ワイドギャップ半導体材料である単結晶窒化ガリウム(GaN)は電力損失の低いパワーデバイスへの活用が期待され, 基板の高品質化や大口径化などの取り組みが進められている. しかし同材は, 高硬度, 高化学安定性, および脆性という特性を有するため, 従来のシリコン基板に対する手法では加工が困難である. そこで本研究では, GaN (0001)基板 Ga 面において, 過酸化水素水(HP)への紫外線(UV)照射によってヒドロキシル(OH)ラジカルを発生させて, GaN 材料表層を改質し, 加工の高効率化を試みた. さらに改質と除去を連続的に行うことのできる UV 援用テープ研削加工法を考案した. その結果, 同加工法を利用することにより, 通常の加工法に比べて表面平坦化に及ぼす時間が 1/6 となり, 6 倍以上の加工速度向上の可能性が見いだせた.

Key words: gallium nitride, grinding with abrasive tape, ultraviolet, hydroxyl radical

## 1. 緒言

現在世界の電力消費量は年間約3%ずつ拡大しており, 電力制御で大きな省エネルギーを狙える次世代半導体デバイスのニーズが高まっている<sup>1)</sup>. 次世代半導体デバイスを構成する基板材料はバンドギャップが大きく, ワイドギャップ半導体とも呼ばれる. そのなかでも単結晶窒化ガリウム(以下, 単に GaN と称す)は, バンドギャップが 3.4eV と現行材料のシリコン(Si)の 1.2eV と比して大きい<sup>2)</sup>. また材料特性として, (i)高温での動作が可能, (ii)電子の飽和速度が速い, さらに (iii)絶縁破壊電圧が高いといった特長を有している<sup>3)</sup>. そのため, 電力損失の低いパワーデバイスへの活用が期待されており, 基板の高品質化や大口径化などの取り組みが進められている.

一方加工の観点からは, ビッカース硬度が 1800Hv~2000Hv と Si の 1050Hv と比較して硬く, かつ脆い難加工材として知られている. また, 気相成長面として活用される Ga 面は化学的に安定なため, 酸やアルカリとの反応がほと

んど起こらないことも加工を難しくする一因となっている<sup>4)</sup>.

同材を基板形状に加工するためには, 素材を円柱状に加工する外形加工, また表面の凹凸を除去し平坦な面を加工する平面加工, そして最後に原子レベルでの平坦面を加工する CMP 加工の工程が必要である. これらの加工工程のなかで, 外形加工, 平面加工ではダイヤモンド砥粒研削加工が用いられるが, GaN 材料は硬脆材料であるため, 条件によっては, 加工面あるいはその内部に脆性破壊を起因とするクラック層(加工変質層)が生じる. CMP 工程では加工変質層を完全に除去する必要があるため, 最大加工変質層厚み  $\delta_{SSD,max}$  が CMP 工程の律速条件となる. このため, 研削加工において, 加工変質層の発生を抑制し, かつ高速に加工することが重要となる. この課題に対して前報<sup>5)</sup>では砥粒の切込み量, すなわち切り取り厚みを小さく制御することで GaN (0001) 基板 Ga 面においても延性領域での加工が可能であることを明らかにした. 一方, 切り取り厚みを小さくすると除去量が小さくなることから, 加工能率の維持・向上のためには工具・工作物の相対運動を高速化し, 切削作用の回数を増加させる必要がある.

硬脆材料への加工能率向上の取組として, バンドギャップから求められる分子の結合エネルギーよりも短い波長である紫外線(Ultraviolet, 以下 UV)を照射し, 大気中の水分子と反応させラジカルを生成し GaN や SiC 表面に酸化膜を形成する方法<sup>6)</sup>や, 鉄触媒と過酸化水素水(Hydrogen peroxide, 以下 HP)の反応によるヒドロキシル(OH)ラジカルを用いた平滑化の取組<sup>7)</sup>, またプラズマによる表面改質層の高速除去<sup>8)</sup>

\*1 パナソニック(株)(東北大・学): 〒571-8502 大阪府門真市松葉町2番7号

Panasonic Corporation

\*2 東北大学 大学院工学研究科: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字6-6-01

Tohoku University

\*3 東北大学 大学院医工学研究科: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字6-6-01

Tohoku University

(学会受付日: 2019年 5月22日)  
(採録決定日: 2019年 6月24日)

等, ラジカルを用いた化学反応と表面酸化による高速化の可能性が提唱されている。

本稿では, 延性領域での加工状態を維持しながら, 更なる高速化を実現できる加工機構の提案を目的とし, 高速化の可能性として GaN (0001) 基板 Ga 面への OH ラジカル作用効果の検証と, 改質と除去を連続的に行うことのできる UV 援用テープ研削加工法を考案したので報告する。

## 2. GaN (0001) 基板 Ga 面表面の酸化検証

GaN (0001) 基板 Ga 面への化学反応として, 酸やアルカリでは反応がほとんど起こらないが, OH ラジカルを反応させることで, Ga 面において Ga-N 結合内に酸素が入り込み, 表面酸化を促進できる可能性があることが, 量子分子動力学によるシミュレーション結果<sup>9)</sup>にて報告されている。そこで本稿では, GaN (0001) 基板 Ga 面を試料として用い, 表面酸化を促進させる方法として, HP に対して UV を照射した際に生じる反応を利用した OH ラジカル発生機構に注目し利用した。HP に UV を照射した際の化学反応式は理論的には式(1)で示される。



OH ラジカルは活性化エネルギーが高く, 反応性も高いため, 生成されたラジカルの寿命は平均約 75  $\mu\text{s}$  と非常に短い<sup>10)</sup>。また HP への UV 照射では, 波長が短いほど OH ラジカルの発生量が多いことが知られている<sup>11)</sup>。本稿では波長 300nm 以下の波長も有し, 400nm 以下の短波長領域に総出力エネルギーの半分以上のエネルギー領域を有する低圧水銀ランプを用いた。

### 2.1 実験方法

表面酸化検証実験の構成を図 1 に示す。試料表面が UV 光源側に向く状態で HP 中に浸し, UV 光を Ga 面に対して直接照射する。また温度の影響を検証するために, ヒータの上にビーカーを配置し加熱できる構成とした。この構成により試料表面との OH ラジカルの反応による表面酸化状態の有無と最表面からの酸化状態の深さ依存性を検証した。HP の水位は UV 照射によって試料表面から気泡が発生する位置を目安に, 表面から 3mm の位置とした。酸化状態の検証として, X 線光電子分光分析 (XPS) による元素分析を行った。具体的には, 最表面から Ar イオンによるイオンミリングにより微量加工 (加工レート:  $\text{SiO}_2$  換算で約 5nm/min) し, その加工面に対して随時 XPS による評価を繰り返し実施することで深さ方向での酸化状態を評価した。なお酸素濃度への変換は分析装置内の相対感度係数を用いて算出した元素量を酸素濃度へ換算し実施した。実験条件を表 1 に示す。

### 2.2 実験結果

試料最表面での酸素割合の結果を図 2 に示す。なお酸素割合は各試料の 4 カ所を測定した平均値であり, 分析対象元

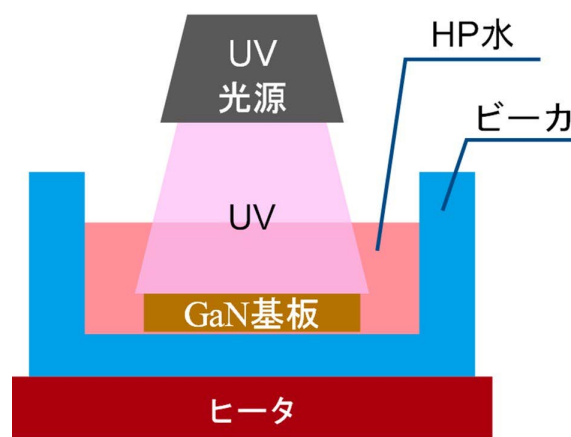


図 1 表面酸化検証実験構成

表 1 表面酸化検証実験条件

試料	GaN (0001) 基板 Ga 面
試料サイズ	□10 mm
紫外線光源	低圧水銀ランプ
UV 照射強度	100 W
HP 濃度	30 w%
照射時間	10 min
試験条件	(1) CMP 後 (UV 照射無) (2) HP 含侵のみ, 室温 (22°C) (3) UV+HP, 室温 (22°C) (4) UV+HP, ヒータ加熱 50°C (5) UV+HP, ヒータ加熱 100°C
X 線光電子分光分析	
装置	PHI ESCA-5600 (アルバック・ファイ社製)
使用 X 線	Mg-K $\alpha$ 線
分析領域	400 $\mu\text{m}$ $\phi$

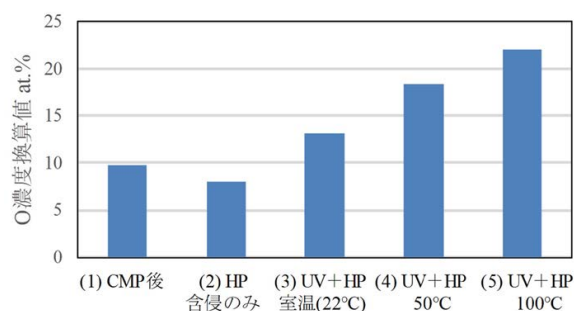


図 2 試料最表層での酸素割合

素として炭素, 窒素, 酸素, ガリウムの 4 元素として, それらの中での酸素量を割合として算出した。図 2 より UV 照射により酸素元素の割合が増加しており, さらに加熱により割合が上昇したことが確認できる。本結果より試料表面に対して HP+UV という構成によって表面の酸素割合が増加することが判明した。また CMP 後よりも HP 含侵のみで表面の酸素濃度が

低くなっている. CMP 後の XPS 分析では C 濃度換算値が 34.2at%であり, HP 含侵の他の条件は 10~20at%であったことより, CMP 後の洗浄工程において有機系酸化物の薄膜が生成され, 過酸化水素水に含侵することで除去されたと推測される.

次に, 温度 50℃, 100℃ の環境下でそれぞれ UV 照射を行った試料の照射面から内部方向への酸素濃度測定結果を図 3 に示す. 同図より CMP 後の試料を基準として, CMP 後の酸素濃度と同じ濃度になる深さは, 50℃ 条件の試料で, 0.3nm, 100℃ 条件の試料でも 0.45nm となった. XPS では X 線照射による光電子の平均自由工程距離の情報しか取得できず, 最大 2~3nm の厚み情報の平均値となるが, イオンミリングでの除去により表層除去で酸素濃度が大きく低減していることから, 酸化反応は 0~0.45nm 程度の極表面でのみ起きていると推測される. このことより, HP+UV 照射で生成される酸化膜厚みは非常に薄く, またラジカルの寿命が約 75μs ということを考えて, 短時間で反応が終了し, その後反応が深さ方向に進展しないと予測される. 本結果より OH ラジカル活性種の反応を利用した加工速度向上を実施するためには, 表面を酸化させる工程と, 酸化した GaN 材料を除去する工程を高速に繰り返す機構が効果的と推測される.

3. テープ研削機構の特徴と基本実験

基板加工の重要な要素として基板全面での平面度を維持させる必要があり, 本機構では, 前加工において平面加工を実施した状態を想定して機構を検討した. 加工点近傍にて OH ラジカルを発生させるため, 加工点近傍に UV が届き, かつ繰り返し被加工面との相対運動が可能な円柱形状を採用した. また基板全面への加工性を担保させかつ延性加工状態での加工できる機構として弾性体を用いたテープ研削機構を考案した.

3. 1 弾性体を用いたテープ研削機構

テープ研削機構の構成要素を図 4 に示す. 樹脂素材上に砥粒を分散させたテープ(研削テープ)を弾性ホイールに巻きつけ, 基板に押し付けた状態で回転および摺動の相対運動により加工を行う. 同図に示すように弾性ホイールは接触点で大きく変形することにより, 加工域での有効砥粒数を増加させる. また有効切れ刃数の増加は砥粒 1 個当たりの切込み深さを減少させ, 均一な加工が可能となることから低ダメージで平滑な仕上げが期待される. さらに加工域は線接触的であることから面接触となる一般的な研磨加工と比較して UV や HP の援用が容易である.

3. 2 切込み量に関する理論的検証

続いて, テープ研削における砥粒の最大切込み深さについて検証する. 弾性ホイールと基板の接触を円筒体対平面のヘルツ接触と仮定すると,  $x$  の位置における接触圧  $p(x)$ , 接触幅  $b$  は弾性ホイールのヤング率  $E$ , 接触長さ  $L$ , ホイール直径  $D$  および負荷荷重  $W$  より次式で表される<sup>12)</sup>.

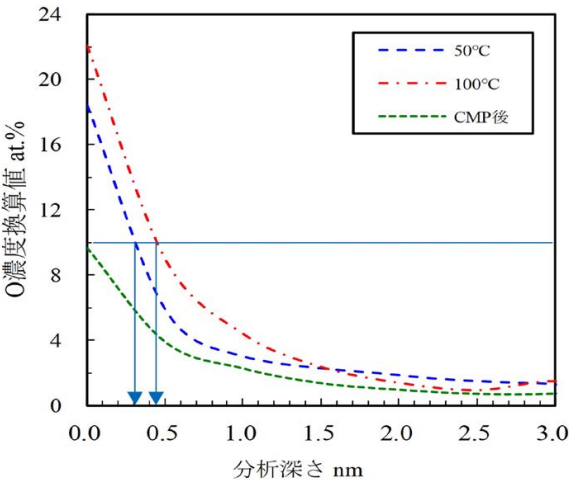


図 3 試料照射面から内部方向への酸素濃度測定結果

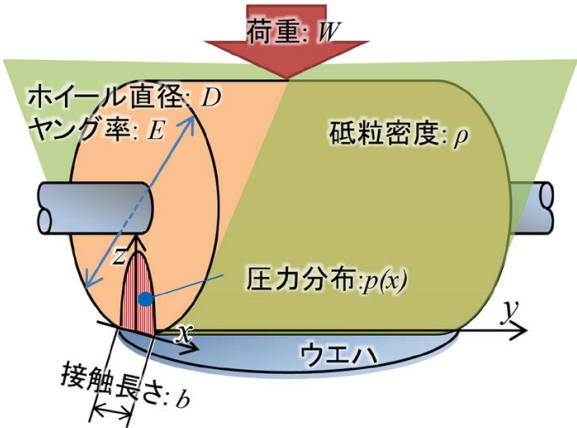


図 4 テープ研削機構モデル

表 2 計算条件

臨界切削力 $f_c$ (N)	0.5
ホイール直径 $D$	25 mm
接触長さ $L$	100 mm
ヤング率 $E$	45 MPa
負荷荷重 $W$	250 N
砥粒径 $d_g$	0.001 mm

$$p(x) = \frac{2W}{\pi b L} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2} \tag{2}$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{DW}{\pi E L}} \tag{3}$$

砥粒が受ける力が砥粒の投影断面積に比例すると仮定すると, 基板に作用する最大切削力  $f_{\max}$  は使用する砥粒の最大粒径  $d_{\max}$  と最大接触圧  $p_{\max}$  ( $=p(0)$ ) を用いて次式のように表せる.



$$f_{\max} = \frac{\pi d_{\max}^2}{4} p_{\max} \quad (4)$$

前報<sup>5)</sup>で求めた延性-脆性加工の臨界切込み深さ  $\delta_c = 180$  nm であったことから砥粒サイズは小さい方が延性加工状態を再現できると仮定し、#10000 の砥粒サイズを想定し切込み深さを考察した。なお、UV+HP での表面改質は 0.5nm 以下と極表面で行われるため、臨界切込み深さの 2.7%であるため、表面改質の影響は除いて計算を実施した。表 2 の条件と式 (4)よりにてこの弾性体の接触状態で考えられる最大切削力  $f_{\max}$  を計算すると、

$$f_{\max} = 1.03 \mu\text{N} \quad (5)$$

となる。次に切削深さ  $\delta$  と加工力  $f$  の関係について、切削断面積に比例する、すなわち係数  $k$  を用いて

$$f = k\delta^2 \quad (6)$$

と表せることを仮定する。前報の臨界切込み深さ  $\delta_c = 180$  nm および臨界切削力  $f_c = 0.5$  N を用いて式 (6) の  $k$  を求め、 $f_{\max}$  の際の切込み深さを計算すると、

$$\delta = 0.26 \text{ nm} \quad (7)$$

となる。この深さは改質層の深さ 0.45nm よりも小さいため、#10000 の砥粒を用いた加工での除去量にて問題無いと判断し、最大砥粒径が 0.001mm サイズであるダイヤモンド#10000 を用いた。

### 3.3 テープ研削試験

テープ研削機構の実験装置を図 5 に示す。平面研削盤（ナガセインテグレックス製 SHSD80 $\alpha$ ）に弾性体（ウレタンゴム材）と研削テープを治具にて固定している。また試料として GaN (0001) 基板 Ga 面が被加工面になるように熱溶解性ワックスにて、X 軸方向に往復運動する揺動テーブル上に固定した。本機構による除去量と、加工変質層の発生について検証するため表面仕上げの異なる 2 種の試料を準備した。材料除去量の検証用には平面研削盤にて粗加工した試料（表面粗さ Ra 10.3nm）を用いた。また、加工による加工変質層評価には Ga 面をコロイダルシリカ砥粒での CMP 加工にて加工変質層を完全に除去し、表面粗さを Ra 0.3nm の面粗さに仕上げた試料を用いた。加工時にはテープ研削加工条件を表 3 にまとめる。

### 3.4 テープ研削試験結果

粗加工を実施した試料への加工前、加工後の表面粗さを白色干渉型表面測定器 (ZYGO 社 NewView) により測定した結果を図 6 に示す。加工前後で表面粗さは Ra 10.3nm から Ra 4.2nm へと表面粗さが低減しており、本機構にて試料の除去加工ができていたことが判明した。次に表面粗さが Ra 0.3nm の光学鏡面を持つ試料に対しての加工性評価を実施した。加工結果を図 7 に示す。加工前表面粗さ Ra 0.3nm に対して加工後の表面粗さは Ra 0.314nm とほぼ変化はないが、

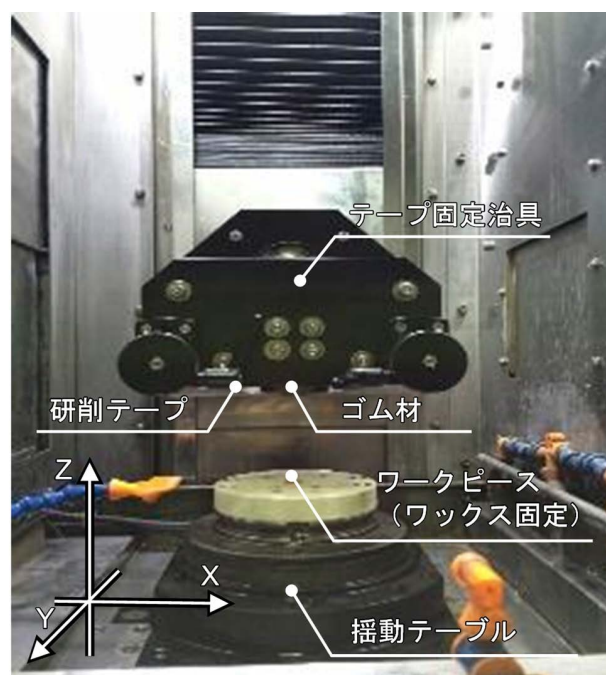
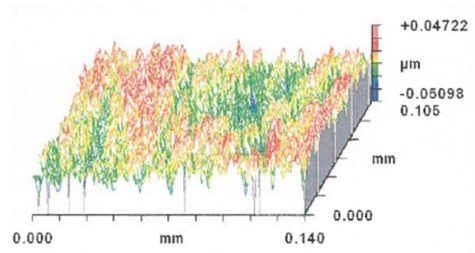


図 5 テープ研削機構実験装置

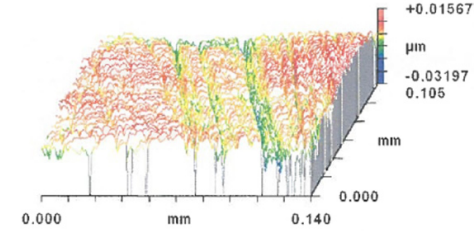
表 3 テープ研削条件

試料	GaN (0001) 基板 Ga 面
加工前の表面	平面研削 (除去量検証用) Ra 10.3nm, CMP 仕上げ (加工変質層評価用) Ra 0.3nm
試料サイズ	□10 mm
加工装置	ナガセインテグレックス製 SHSD80 $\alpha$
弾性体	ウレタンゴム ショア硬さ 95
砥粒サイズ	ダイヤモンド#10000
加工条件	
揺動幅	$\pm 2.5$ mm
揺動回数	1000 回/min
加工時間	5 min
切込み量	5 $\mu\text{m}$

研削による加工痕が確認でき、研削による除去加工ができていいると考えられる。この加工面についてより詳細な分析を行うため、加工変質層の観察を行った。具体的には、集束イオンビーム (FIB) による断面加工を実施し、透過電子顕微鏡 (TEM) により断面の原子配列の観察を実施した。図 8 に示す結果より、加工面極表層において原子配列の乱れが原因の加工変質層が存在することがわかる。これはテープ研削を施したことによるダメージに起因するものであると考えられるが、同変質層にはクラックのような脆性破壊状態は観察されないことから、当初の狙いであった延性状態における除去加工が実施できたといえる。また最大加工変質層厚み  $\delta_{\text{SSD,max}}$  も 146 nm と非常に小さく、加工での原子配列の乱れが少ない低ダメ



(a)テープ研削前(粗仕上げ後) Ra 10.3nm



(b)テープ研削後 Ra 4.2nm

図 6 粗仕上げ面に対するテープ研削前後の表面性状

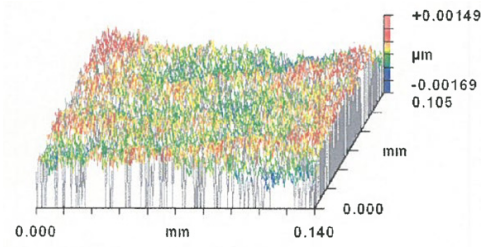


図 7 鏡面に対するテープ研削後の表面

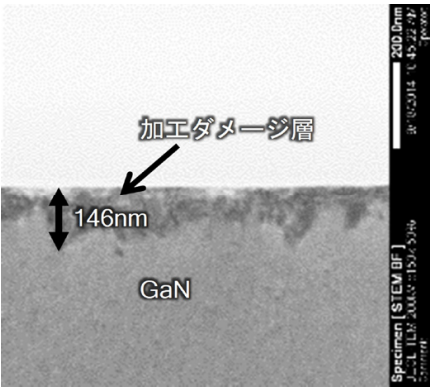


図 8 テープ研削後の断面 TEM 画像

ージ加工が実現されている。本実験により弾性体を用いたテープ研削機構によって、延性状態にて試料を加工できることが判明した。

4. 複合機構での検証

HP での装置汚染を防ぐために、ステンレス製の廃液トレイを設け、長時間の加工検証を実施できる検証モデル機を構

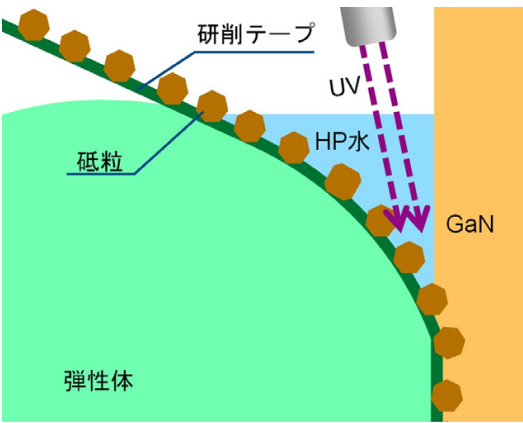


図 9 UV 援用テープ研削モデル

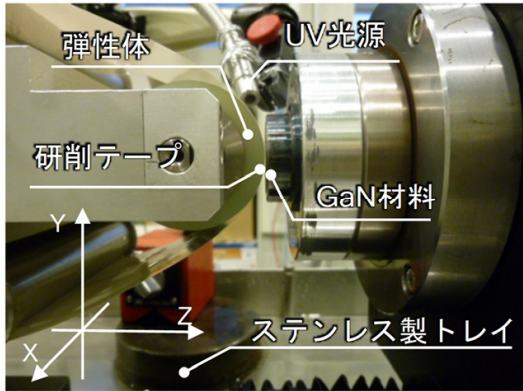


図 10 UV 援用テープ研削実験装置

表 4 複合機構条件

試料	GaN (0001) 基板 Ga 面
試料サイズ	□10 mm
弾性体	ウレタンゴム ショア硬さ 95
砥粒サイズ	ダイヤモンド#10000
加工条件	
揺動幅	±1.5 mm
揺動回数	500 回/min
切込み量	5 μm
UV 照射強度	1.0 W
UV 波長	365 nm
HP 濃度	30 w%

築した。本機構での加工点近傍での加工モデルを図 9 に、検証装置概観を図 10 に示す。円柱状の弾性体に砥粒を保持した研削テープを巻き付け、試料と研削テープが接触部に HP が滞留するように、スポイトにて HP の滴下と、スポット型 UV 装置により研削テープと試料の接触点への照射を実施する。駆動軸として研削テープを X 方向に揺動する揺動機構と、Z 軸方向の移動を行うためのスライドレールを有し、試料は熱溶解性ワックスにて固定した。また弾性体、テープ材、砥粒サイズはテープ研削機構で検証した条件を採用した。

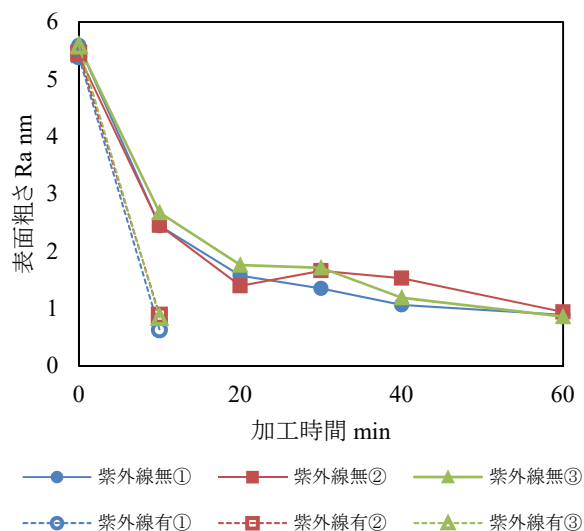


図 11 検証機構での加工結果

本実験ではテープ研削による前加工での面粗さ除去速度を検証目的として、試料表面を平面研削加工し、Ra 5.3nm の表面粗さとした。また加工時間 10min 毎に表面粗さを先述の白色光干渉計にて測定し、Ra が 1nm 以下となるまで加工を実施した。また加工バラツキの影響を鑑み、UV+HP 有、無でそれぞれ 3 サンプルを準備し、計 6 サンプルにて加工を実施した。実験条件を表 4 に示す。また、本検証機構での加工結果を図 11 に示す。

測定結果より、UV+HP 援用が無い場合において、表面粗さの低減は初期の 10min までが最も大きく、最初の 10min 間で約半分の Ra 値になっていることがわかった。10min 以降は Ra 値の低減率は下がるものの徐々に低減し、目標である Ra 1nm 以下には 60min 後の測定時に到達した。本挙動は表面粗さが粗い状態では、凹凸の高い部分を優先的に除去するため、初期が表面粗さの低減率が最も高く、凹凸の差が少なくなると平面部の面積が増加し、表面粗さの低減率が低下していると予測される。一方 UV+HP 援用での試料は最初の 10min 後の測定時にすでに表面粗さが 1nm 以下になっていた。本結果より、提案したテープ研削機構によって試料表面の平坦化が出来ることと、UV+HP 援用を用いることで、平坦化までの時間が低減することが判明した。UV+HP 援用による表面改質が極表層ということを鑑み、平坦化には加工による除去が支配的と考え、UV+HP 援用により援用がない場合と比較して 6 倍以上の除去速度向上の効果が有ると推測される。

## 5. 結言

HPへのUV照射におけるOHラジカルのGa<sub>2</sub>N (0001) 基板Ga面表層改質状態評価と、改質と除去を連続的に行うことのできるUV援用テープ研削加工法での検証により、下記の結果を得た。

- (1) GaN (0001) 基板 Ga 面に対して UV+HP の構成により表面の酸素割合が増加し、酸化反応は 0~0.45nm 程度の極表面で起きていることがわかった。本結果より OH ラジカルの反応を利用した加工速度向上を実施するためには、表面を酸化させる工程と酸化した Ga 材料を除去する工程を高速に繰り返す機構が効果的と推測される。
- (2) 弾性ホイールに樹脂素材上に砥粒を分散させたテープ (研削テープ) を巻きつけ、基板に押し付けた状態で回転および摺動の相対運動により加工を行うテープ研削機構を提案した。テープ研削機構での加工検証の結果、クラックのような脆性破壊状態は観察されず、また最大加工変質層厚み  $\delta_{SSD,max}$  も 146nm と非常に小さいことが判明した。
- (3) UV+HP の援用効果とテープ研削機構を複合することにより、初期表面の Ra 5.3nm が 10min 加工後の測定時に表面粗さが 1nm 以下になった。UV と HP を用いない場合では表面粗さが 1nm 以下になるまで平均 60min の時間を要したことから、UV+HP 援用により、援用効果を使用しない場合と比較して 6 倍以上の加工速度向上の効果が有ることが判明した。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H02305, 19H00734 の助成を受けたものである。

## 6. 参考文献

- 1) T. Ueda, S. Takahashi and H. Hiroyuki: Next-generation Power Switching Devices for Automotive Applications: GaN and SiC, Panasonic Technical Journal 61, 1 (2015) 67(in Japanese).
- 2) A. A. Burk Jr. et al.: SiC and GaN wide bandgap semiconductor materials and devices, Solid-State Electron. 43, 8 (1999) 1459.
- 3) M. Hikita, M. Yanagihara, Y. Uemoto, T. Ueda, T. Tanaka and D. Ueda: GaN-Based Power Devices, Panasonic Technical Journal 55, 2 (2009) 91(in Japanese).
- 4) Zhuang, D. and J. H. Edgar: Wet etching of GaN, AlN, and SiC: a review, Materials Science and Engineering, R: Reports 48, 1 (2005) 1.
- 5) Y. Takasu, K. Shimada, M. Mizutani and T. Kuriyagawa: Study of crack generation process in scratching of gallium nitride, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 61, 7(2017) 392 (in Japanese).
- 6) T. Sakamoto, A. Kubota and M. Touge: Ultraviolet-assisted polishing of 2inch SiC substrate, J. Jpn. Soc. Avras. Technol., 57, 8 (2013) 524 (in Japanese).
- 7) J. Murata, A. Kubota, K. Yagi, Y. Sano, H. Hara, K. Arima, T. Okamoto and K. Yamauchi: Chemical planarization of GaN using hydroxyl radicals generated on a catalyst plate in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Journal of Crystal Growth.,310,7(2008)1637.
- 8) TK. Doi, Y. Sano, S. Kurokawa, H. Aida, O. Ohnishi, M. Uneda and K. Ohyama: Novel Chemical Mechanical Polishing / Plasma-Chemical Vaporization Machining (CMP/P-CVM) Combined Processing of Hard-to-Process Crystals Based on Innovative Concepts, Sensors and Materials., 26, 6,(2004)403.
- 9) K. Kawaguchi, T. Aizawa, Y. Higuchi, N. Ozawa and M. Kubo: Chemical mechanical polishing mechanisms for gallium nitride, Proc. Int. Conf. on Planarization/CMP Technol. (2014) 39.
- 10) 佐野 浩亮, 内海 英雄:活性酸素・フリーラジカルの分析, 化学と生物, 37, 5 (1999) 328.
- 11) T. Toki et al: Synergistic interaction between wavelength of light and concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in bactericidal activity of photolysis of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, J. BIOSCI. BIOENG., 119, 3 (2015) 358 (in Japanese).
- 12) 村木 正芳: 図解トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術, 日刊工業新聞 (2007).