



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Photo-electrochemical Etching of Nitride Semiconductors for Electron Device Application [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	渡久地, 政周
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15073号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85215">https://hdl.handle.net/2115/85215</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Masachika_Toguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 渡久地 政周

### 学位論文題名

#### Photo-electrochemical Etching of Nitride Semiconductors for Electron Device Application

（窒化物半導体に対する光電気化学エッチングと電子デバイス応用）

近年、我々の暮らしは「第4次産業革命」とも称されるような、従来の生活様式からの転換期にあり、リモートワーク・キャッシュレス化・IoT・スマートシティなど、暮らしの様々な部分がデジタル化の傾向にある。それに伴い、電気・電子機器の利用率はこれからも増加の一途を辿ると考えられ、その電力利用効率向上による「省エネルギー」が最も重要な課題の一つとして検討されている。電気・電子機器の省エネルギー化のためには、電力の変換・制御を担っているパワーデバイス・システムの性能向上が必要不可欠である。現在パワーデバイスの主流はシリコン (Si) Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) トランジスタであるが、既に Si の物性的な限界が近付いていることから、トランジスタの革新的な性能向上のため、新たな半導体材料の利用が広く検討されている。

Si に代わる新たな半導体材料の一つとして、窒化ガリウム (GaN) を初めとした「窒化物半導体」が、高い注目を集めている。GaN は、Si と比べて広い禁制帯幅 (3.4 eV) と約 10 倍大きな絶縁破壊電界を有し、次世代パワーデバイスに求められる様々な要望に応えることができる。例えば、GaN を利用した縦型トランジスタの一つであるトレンチ MOS トランジスタは、従来の Si MOS トランジスタと比べて大電力駆動が可能であり高集積化にも適している。また、窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn)/GaN のヘテロ界面に蓄積する高密度の 2 次元電子ガス (2DEG) を利用した高電子移動度トランジスタ (HEMT) は、耐圧が 600V を超えるのに加えて高周波動作・低オン抵抗動作に秀でている。このように、窒化物半導体電子デバイスの普及が省エネルギー社会の発展に大きく貢献すると期待されているが、窒化物半導体はデバイス作製時の加工技術に大きな課題を抱えている。化学的耐性の高い窒化物半導体の加工には、プラズマを利用したドライエッチングが用いられるのが一般的であるが、プラズマの物理的衝突により半導体表面に欠陥などのダメージが導入され、それがデバイス特性劣化の要因となることが報告されている。また、従来のドライエッチング法では、エッチング加工深さについてナノメートルオーダーの精密な制御が難しい点も課題としてあげられる。そのため、窒化物半導体電子デバイスの性能を最大限に活かすには、反応制御性に優れており、かつ加工損傷の導入が少ないエッチング技術の開発が求められている。

本論文では、ドライエッチングに代わる新たな低損傷エッチング技術として、「光電気化学 (PEC) エッチング」に着目し、窒化物半導体電子デバイス作製プロセスへの応用を検討した。具体的には、窒化物半導体である GaN、AlGaIn を対象に、電解液/窒化物半導体界面の光電気化学特性を明らかにし、アスペクト比の高いトレンチ構造を形成するための「異方性エッチング技術」、トランジスタの閾値電圧を精密に制御する「リセス加工エッチング技術」、既存の半導体デバイスプロセスへの適合性を向上させるために電気化学セルを簡略化した「コンタクトレス PEC エッチングプロセス」を開発した。特に、AlGaIn/GaN ヘテロ構造に対するコンタクトレス PEC エッチングにおいて「エッチングの自己停止現象」を見だし、従来のドライエッチング技術を上回る高い加工制

御性を達成した。さらに開発した技術を、リセスゲート AlGaIn/GaN HEMT の作製プロセスに適用し、その有用性について議論した。

本論文は全 7 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章では、研究背景および目的を述べた。パワーデバイスの性能向上の必要性和、窒化物半導体に対する低損傷加工技術の必要性について述べた。

第 2 章では、この論文を理解する上で重要となる電気化学の基本原則、特に半導体電極を利用した半導体/電解液界面のバンド構造とキャリア輸送、そして電気化学反応に至るまでの電気化学加工技術を理解する上で必要な現象を記した。また、電気化学反応を利用した窒化物半導体の加工技術に関する報告例を示した。

第 3 章では、全章に関わる実験手法について述べた。電気化学実験における一般的なセットアップ、デバイスプロセスにおいて用いたドライエッチング技術の基本原則、エッチング後の構造評価および光学的・電気的特性評価に使用する各装置の原理について述べた。

第 4 章では、主に電解液/GaN 界面で見られる電界吸収効果に関する解析と、それを利用した GaN の異方性 PEC エッチング技術の開発を行った。電解液/GaN 界面に発生する電位障壁を基にした各波長の光吸収係数の変化を計算し、光電流値の実験値を再現することで、界面において Franz-Keldysh(F-K) 効果が発現することを実証した。また、初期加工を施した低ドナー密度の GaN 試料に対して開発した異方性 PEC エッチング技術を適用し、アスペクト比の高いトレンチ構造形成に向けた構造制御や、その有用性について議論した。

第 5 章では、硫酸ラジカル ( $\text{SO}_4 \cdot^-$ ) を含む酸性水溶液を使ったコンタクトレス PEC(CL-PEC) エッチングを開発し、それを GaN 単層のエッチングに適用した結果について示した。これまで報告されている  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{SO}_4 \cdot^-$  系水溶液を用いた GaN のエッチングは、全て水酸化カリウム (KOH) 混合溶液が用いられているが、リン酸 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 混合溶液の方が pH 安定性の点で優位であることを明らかにした。エッチングレートに直結する  $\text{SO}_4 \cdot^-$  の生成レートは両溶液とも同等であることを実験と理論解析により実証し、エッチング表面の平坦性も同等であることを確認した。また、酸系溶液の開発により、ポジ型フォトレジストを直接エッチングマスクとして利用できることを示し、既存のデバイスプロセスへの適合性が飛躍的に高まることを実証した。

第 6 章では、第 5 章の結果を受け、AlGaIn/GaN ヘテロ構造に対して CL-PEC エッチングを用いたりセス加工を行い、エッチング後の表面状態およびエッチング面上に作製した各種デバイスの電気的特性を評価した。CL-PEC エッチングによるリセス加工後時に、AlGaIn 上層の途中でエッチングが停止する現象 (自己停止現象) を見だし、その時の AlGaIn 残存膜厚が試料面内において高い均一性を示すことを明らかにした。電気特性評価の結果、リセス加工面に作製した Schottky-Barrier diodes, MIS-capacitors, Schottky-HEMTs および MIS-HEMTs は、非リセス加工面に作製したデバイス特性と比較して、リーク電流が減少し、リセス加工の設計通りに閾値電圧が正方向へシフトすることを示した。さらに、CL-PEC エッチングにより、デバイス特性の均一性が大幅に向上することを明らかにし、その要因について議論した。これらより、本エッチング手法が窒化物半導体デバイスプロセスとして有望であることを示した。

第 7 章では、本論文の結論を述べた。