

1. 氏名	田尻 武義
2. 所属機関	電気通信大学大学院情報理工学研究科
3. 研究題目	結晶性エッチングを利用した中空状の窒化ガリウムスラブの表面改善
4. 研究の目的:	<p>直接遷移型ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム (GaN) は、可視光領域で動作する光回路素子の構成材料として注目されている。特に、中空状の GaN 薄膜(スラブ)構造は、スラブ面内に光を閉じ込められるため、光回路素子の基本構造として重要である。中空 GaN スラブをディスク形状や細線状にすることで、可視光帯で動作する微小な共振器や導波路などが実現されており、これらを組み合わせた光回路が近年盛んに研究されている。こうした GaN スラブ構造の作製法には多くの提案があるが、応用研究の更なる進展には、スラブの品質改善が求められている。</p> <p>本研究では、比較的高品質な GaN スラブ構造の作製法として知られる光電気化学エッチング法に着目し、光回路における光散乱損失の要因となる表面凹凸の改善を目指す。特に、結晶面が引き起こす異方性エッチング(結晶性エッチング)に着目し、原子層レベルでの材料制御を含む包括的な加工プロセスの開発によって、スラブ表面の凹凸を低減できることを検証する。また、開発した手法により作製された GaN スラブ構造に、マイクロディスク共振器等の光回路素子を形成することで、その素子性能を明らかにすることにも取り組む。</p>

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):	<p>GaN スラブの作製に用いる光電気化学エッチング法は、光化学的な酸化反応を利用することで材料を削る微細加工法である。特に、GaN スラブの作製では下地材料として、窒化インジウム (InN) と GaN との混晶 (InGaN) が用いられる。GaN 系半導体の酸化反応は、光吸収によって生じる正孔が引き起こすため、バンドギャップの狭い InGaN を下地材料として用いることで、正孔の局在化などにより材料選択的なエッチングが可能であることが知られている。本研究では、光電気化学エッチングによって取り除く下地材料(犠牲層)の材料成膜方法として、原子層レベルで組成などを制御可能な有機金属気相成長法を用いることで、犠牲層の材料構成を含めた加工プロセスの改善を行う。また、光電気化学エッチング法の光源としては、当研究室のこれまでの知見を活かして、レーザ光源を新たに用いる。従来では光源としてキセノンランプを用いる方法が主流であったが、近年の研究では、より波長選択性の高いレーザ光を用いた光電気化学エッチング法が注目されている。筆者らの研究グループでは、これまで青色レーザを用いたレーザ光電気化学エッチング法を開発しており、紫波長帯で動作する GaN マイクロディスク共振器の作製に成功している。本研究では、表面改善による GaN マイクロディスク共振器の性能向上の可能性も検証する他、これまで高品質な作製が困難であった二次元フォトニック結晶スラブの作製にも挑戦した。これらの光素子の性能を評価するために、発光層となる単一 InGaN 量子井戸層をスラブ内部に埋め込み、その発光スペクトルの測定と分析を行なった。</p>
---	---

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

光電気化学エッチングにおけるエッチングの進行は、スラブと犠牲層の界面における結晶構造が関与することが予想されるため、本研究では、スラブ/犠牲層界面における混晶組成制御によって、表面改善の可能性を検討した。スラブ背面部の犠牲層の InN 組成を、より下層の犠牲層より高めることで、スラブ背面部に正孔を局在化させる方法を検討した。これにより、犠牲層の結晶構成に起因した背面の選択的なエッチングが促進される一種の結晶性エッチングが生じると期待される。同手法でマイクロディスク共振器の作製を行ったところ、光閉じ込め強度(Q 値)が、青色波長帯域で 5000 を超える値が観測されることが分かった。この値は、先行研究で光電気化学エッチング法により達成されてきた最大の Q 値と同程度であり、高品質なマイクロディスク共振器の作製が可能であることを明らかにした。一方、筆者がこれまでの青色レーザを用いて作製した試料と比較するために、光学評価を詳細に行ったところ、Q 値が光学評価系の測定限界に達していることが新たに明らかになった。そのため、マイクロディスク共振器については、更なる改善の可能性を検証するために、今後、光学評価系の改良も課題の一つとなる。

一方で、中空 GaN スラブによって可視光帯の光をより高度に制御するためには、マイクロディスク構造以外にも様々な形状の構造が必要となる。そのため、本研究では、光回路の基本構造として利用できる二次元フォトリソニック結晶構造に着目し、その高品質化の可能性を検証した。本構造は、GaN スラブの面内に三角格子状に円孔が形成された構造であり、一部の領域の円孔を形成しないことで、その領域が共振器として機能する。結晶性エッチングを利用した本研究手法を用いて作製した GaN 二次元フォトリソニック結晶共振器(図)では、共振器に起因した発光ピークスpektral(図)がこれまでより鋭く観測されることがわかった。スペクトル線幅より Q 値を評価したところ、光電気化学エッチング法を用いた先行研究の報告値を一桁上回る $Q \sim 3400$ を達成できることを明らかにした。この結果から、GaN スラブの表面凹凸が改善したことが示唆される。また、数値解析を用いて詳しく調べたところ、観測した共振器スペクトルは本共振器の基底モードであることを明らかにした。基底モードは、一般に Q 値が高くなるため応用上重要であるが、これまでの文献を調べたところ、光電気化学エッチング法では基底モードの観測の報告はない。今回の研究手法を用いて GaN スラブを高品質化したことで、その観測

に初めて成功したものと考えられる。本研究で作製された二次元フォトリソニック結晶共振器は GaN スラブを用いた例としては高い値であるが、従来の III-V 族化合物半導体やシリコンで実現されてきたものと比べると未だ低い値である。こうした課題は、加工プロセスの更なる改良によって今後解決されることが期待される。

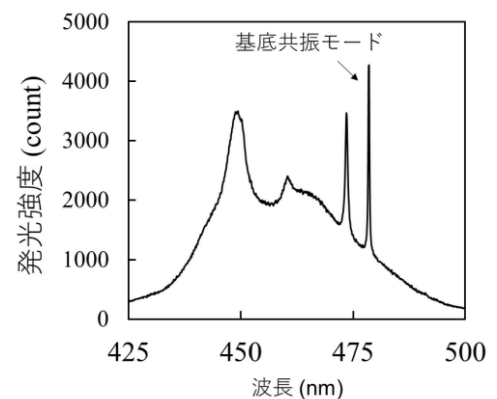
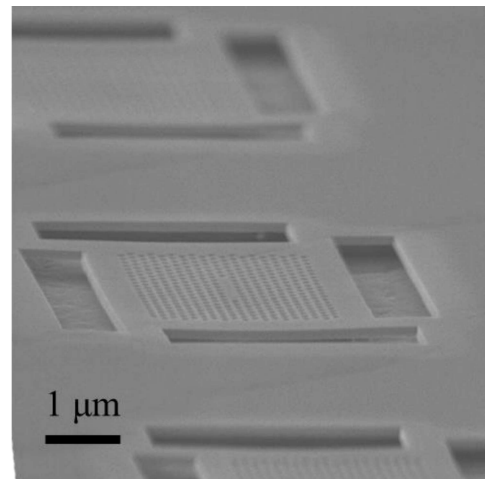


図 (上)作製したフォトリソニック結晶共振器 (下)測定した発光スペクトル

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

本研究では、材料成膜時に InGaN 系犠牲層の組成制御を行うことで、光電気化学エッチングによる GaN スラブの高品質化の可能性を示した。同成果は、結晶性エッチングのアイデアを取り入れることによって達成されたもので、新たな微細加工手法の提案とその光デバイス作製への応用可能性を示した点に学術的価値がある。

7.2_社会的価値:

GaN スラブ構造は、その平面内に所望の微細構造を形成することによって、ナノ光デバイスを集積化・回路化することが可能であり、光通信用途などでは様々な機能を集積した小型光システムが実現されている。特に、混晶制御によって可視光帯の発光が得られる GaN 系半導体を用いたスラブ構造は、可視光帯で動作する光回路光源への応用が期待されており、将来的に、小型の表示デバイス作製技術等として IoT 技術分野への貢献が期待される。

7.3_研究成果:

【研究論文】

- 1) T. Tajiri, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, and K. Uchida: Mode analysis of GaN two-dimensional photonic crystal nanocavities undercut by photo-electrochemical etching, Japanese Journal of Applied Physic, **62**, pp. SG1019-1 - SG1019-5 (2023).
- 2) T. Tajiri, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, and K. Uchida: Fabrication and optical characterization of GaN micro-disk cavities undercut by laser-assisted photo-electrochemical etching, Japanese Journal of Applied Physic, **62**, pp. SC1069-1 - SC1069-5 (2023).

【国際会議発表(プロシーディングス)】

- 1) M. Yoshida, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, K. Uchida, and T. Tajiri: Gallium nitride two-dimensional photonic crystal nanocavities undercut by a two-step photo-electrochemical etching using laser sources, International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC) Digest Papers, 10D-1-4, pp. 1-2 (2022).
- 2) S. Sosumi, K. Shimoyoshi, K. Uchida, and T. Tajiri: Fabrication and optical characterization of GaN microdisk cavities undercut by laser-assisted photo-electrochemical etching, Extended Abstracts of the 2022 International Conference on solid-state devices and materials (SSDM), pp. 23-24 (2022).