

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14788

研究課題名（和文）窒化物半導体スラブ型フォトニック結晶の品質改善と光集積回路への応用

研究課題名（英文）Improvement of quality in nitrides semiconductor slab-type photonic crystals and their application to photonic integrated circuits

研究代表者

田尻 武義 (Tajiri, Takeyoshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00842949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：中空状の窒化ガリウム薄膜の面内に周期的な屈折率分布を形成した構造（GaNスラブ型フォトニック結晶）は、可視光帯の光回路素子への応用が期待される。本研究では、レーザー光源によって引き起こされる化学反応を原理とする新たな溶液エッチング法を用いることで、GaNスラブ型フォトニック結晶の品質改善に取り組んだ。同手法により、GaNスラブ型フォトニック結晶の下地にある窒化インジウムガリウム材料を選択的に除去することで、従来法より高い可視光の閉じ込め強度を持つ微小共振器の実現に成功した。本成果は、GaNスラブ型フォトニック結晶を基軸とする可視光帯光回路素子の高品質作製技術への応用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、GaNスラブ型フォトニック結晶をこれまでより高品質に作製するための新たな加工技術を明らかにしたものである。GaNスラブ型フォトニック結晶を基盤とする微細な可視光制御素子の高品質化が進展することで、可視光帯で動作する微細な素子を集積した光回路技術への応用展開が期待される。また、GaN系半導体のデバイス加工技術として従来から用いられる光電気化学エッチング法の高度化は、光デバイスの枠組みを超えた広範なデバイスの作製技術としても、今後その貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：Air-suspended gallium nitride thin films with periodic refractive indices in plane (GaN slab-type photonic crystals) are expected for photonic circuit applications in visible wavelengths. This study addressed the improvement of their fabrication by employing a novel chemical etching technique where chemical reactions are induced by laser light. Using this method, we selectively removed the indium gallium nitride underneath the GaN slab-type photonic crystal. This led to GaN photonic crystal cavities with higher confinement strength for visible light, compared to conventional methods. This work would pave the way towards high-quality fabrication of optical circuit elements based on GaN slab-type photonic crystals for visible light control.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：III族窒化物半導体 フォトニック結晶

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

屈折率に光波長程度の周期性を有する構造体(フォトニック結晶)は、周期性に起因した特徴的な光分散特性が得られるため、様々な光の制御に応用されている。特に、薄膜(スラブ)の面に二次元的な空孔配列を形成することで屈折率の周期性を実現した構造(スラブ型フォトニック結晶)では、スラブ面内方向に生じる光禁制帯を活用した光の制御が可能となる。これまでフォトニック結晶内部に点状や線状の周期性の乱れを適切に形成することで、導波路などの基礎的な光回路素子が実現されており、それらが集積された光回路は、センサーや光通信などの用途で応用研究が進展している。これまでは、ファウンドリサービスが利用できるシリコン半導体を中心に近赤外光を制御する光回路の技術が開発されてきたが、近年では、より広範な分野に応用するために、可視光帯における光回路の研究も進展しており、その基盤材料として新たに透明帯域の広い材料を用いた光回路技術が開発されている。

窒化ガリウム(GaN)は、紫外域まで透明であると共に、窒化インジウム(InN)との混晶化により、紫外から赤外までの発光が可能であることから、可視光帯で動作する光回路用光源の材料候補として期待されている。これまでの GaN 系半導体を用いたスラブ型フォトニック結晶の研究では、微小光源①や導波路②などの基礎的な光回路素子が実現されている。しかしながら、量子井戸の発光を利用した微小共振器レーザ等、光回路において重要な素子の一部は実現に至っていない。その原因として、微細加工の困難性により、スラブの品質が十分ではないことが可能性の一つとして挙げられる。GaN 系半導体のスラブ型フォトニック結晶の作製では、化学エッチングが可能な層(犠牲層)の上にスラブ層を成膜し、半導体プロセスによりフォトニック結晶構造を形成した後、犠牲層のみを選択的に除去(アンダーカット)することが主要な作製法の一つである。特に、アンダーカットの方法としては、溶液エッチングが可能なシリコンを犠牲層とする方法③が主流であるが、シリコン上の GaN 系半導体は格子不整合により結晶品質に課題がある。より高品質な作製には、格子整合した GaN 系半導体を犠牲層とする加工技術が重要となるが、薬品耐性の高い同半導体では現在もその手法が研究されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、光化学反応を原理とする溶液エッチング法(光電気化学エッチング法)を用いたアンダーカットプロセス①④の改善に取り組むことで、GaN スラブ型フォトニック結晶の高品質化の可能性を検証する。特に、同手法における照射光源として、新たにレーザ光源を用いる方法(レーザ援用光電気化学エッチング法)を探索することで、GaN スラブの品質改善を目指すと共に、これまで実現されていない量子井戸を光利得とする GaN スラブ型フォトニック結晶共振器レーザの実現可能性を検証する。

### 3. 研究の方法

GaN スラブ型フォトニック結晶の構造は、厚み 100 nm 程度の GaN スラブの面内で、円孔(半径  $r$ )が三角格子状(格子定数  $a$ )に形成されたものを対象とする。本構造は、 $a$ が 100~200 nm 程度のときに、青色から緑色の波長領域に比較的広帯域な光禁制帯が得られることが、光バンド構造の数値解析より予想されている。同構造の作製には、InGaIn 量子井戸が発光層として埋め込まれた GaN スラブの下に、200~300 nm 程度の InGaIn/GaN 超格子が犠牲層として成膜された基板を用いる。同基板は、有機金属気相成長法により製膜を行った。同基板のスラブ層に、電子線リソグラフィと反応性イオンエッチングによって円孔配列を形成した後、犠牲層を光電気化学エッチングによって取り除くことで、GaN スラブ型フォトニック結晶を作製する。光電気化学エッチングは、光吸収によって材料に生成される電子正孔対に起因した材料の腐食過程を利用した加工法である。本研究では、特にスラブと犠牲層のエッチングの選択比を向上するために、レーザ援用光電気化学エッチング法を新たな手法として用いる。同手法では、反応性イオンエッチング後の試料を白金電極と共に薄い塩酸溶液に浸した状態で、試料にレーザ光を一定時間照射する。加工後の試料を走査型電子顕微鏡により観察することで、フォトニック結晶構造の表面荒れや、犠牲層とスラブのエッチングの選択比の評価を行うことで、レーザ光の照射強度などの実験条件を調整した。また、アンダーカット工程後の GaN スラブの光学特性を評価するために、GaN スラブに適切な共振器構造を作製し、室温顕微フォトルミネッセンス分光法による共振器特性の評価を行った。試料に対して He-Cd 連続波レーザ(波長 325 nm)もしくはパルス光(波長 355 nm)を対物レンズで集光し、共振器における InGaIn 量子井戸の光励起を行う。フォトルミネッセンス光のスペクトルを、回折格子型分光器と CCD 検出器を用いて共振器の発光スペクトルの測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 高品質 GaN ディスク型共振器の作製と評価

GaN スラブ型フォトニック結晶の高品質化に向けて、まずは簡便なディスク型の共振器を作製することで、自身が開発したレーザ援用光電気化学エッチング法を用いた作製プロセスの評

価を行った。ディスク型共振器は、スラブを円盤状に加工した後にアンダーカットを行うことで作製が可能である。本構造では、光が円盤の縁を周回することで閉じ込められ、光の共振状態（ウィスパーリングギャラリモード）が現れる。構造が比較的単純であることから、GaN ディスク型共振器における光閉じ込め強度に関する先行研究がいくつか報告されている。作製プロセスにおいては、電子線リソグラフィと反応生イオンエッチングによってスラブを円盤状に加工すれば、フォトニック結晶の場合と同様の工程で作製が可能となる。ここでは高品質な作製を目指して、レーザ援用光電気化学エッチング工程で照射するレーザ波長を、スラブの透明帯域に選定してアンダーカットを行った。光電気化学エッチング後の GaN ディスク型共振器の電子顕微鏡像（図 1(a)）に示されるように、ディスクの縁において下地材料が選択的に除去されており、アンダーカットが可能であることを確認した。顕微フォトルミネッセンス分光測定では、図 1(b)に示す発光スペクトルを観測した。波長 390 nm 付近の広帯域な量子井戸発光スペクトル上に、狭線幅の複数のピークが観測される。これらのピークは周期的に現れており、その波長間隔は、ウィスパーリングギャラリモードの共振周波数間隔の理論値と概ね一致することが確認されている。共振器スペクトルの線幅から求められる光の閉じ込め強度（ $Q$  値）を評価したところ、評価系の測定限界に律速される 6700 程度が得られることがわかった。この値は先行研究⑤と比較しても高い水準であり、本作製法が高品質な共振器の作製に有効である可能性を見出すことができた。

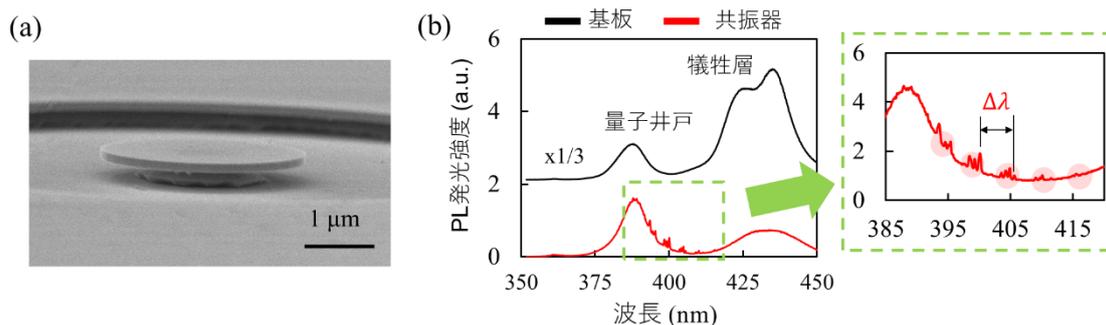


図 1 (a)レーザ援用光電気化学エッチングにより作製した GaN ディスク型共振器の電子顕微鏡像 (b)ディスク型共振器および未加工基板から観測された発光スペクトル⑥

## (2) 高品質 GaN スラブ型フォトニック結晶の作製

レーザ援用光電気化学エッチングを用いた作製プロセスを GaN スラブ型フォトニック結晶に適用することで、その品質改善が可能であることを検証した。GaN スラブ型フォトニック結晶は、スラブ内の構造を局部的に乱すことで共振器として機能させることが可能である。ここでは、先行研究と比較可能な構造として、一列に並ぶ 7 個の円孔を取り除いた共振器構造を採用した。特に、可視光帯での応用を念頭に、青色から緑色の波長領域において共振状態を示す構造の作製に取り組んだ。量子井戸の発光波長が可視光帯域にシフトすることで、レーザ援用光電気化学エッチングの工程では、スラブへのレーザ光の吸収の影響が懸念されたため、ここでは犠牲層内部の材料組成に変調を加える新たな方法で、スラブと犠牲層のエッチングの選択比を向上させることを検討した。特に、光吸収時に犠牲層内部で生成されるキャリアが、スラブへ移動することが抑制されることを期待して、超格子の InN

組成をスラブ背面部でわずかに高める方法を採用した。図 2(a)は、アンダーカットプロセス後の GaN スラブ型フォトニック結晶共振器の電子顕微鏡像である。構造表面に粗さは観測されず、スラブの下地材料だけが選択的に除去されていることがわかる。また、フォトルミネッセンス分光評価では、図 2(b)に示すように、青色帯の量子井戸発光スペクトル上に狭線幅のピークがいくつか観測されている。時間領域差分法により得られる共振周波数の計算値（図 2(b) 破線）と比較すると、測定されたピークの波長は、材料分散の影響の範囲内で概ね理論計算値と一致することが確認される。この結果は、格子定数の異なるフォトニック結晶共振器の光学評価の結果においても同様であり、観測されたピークが作製されたフォトニック結晶共振器における共振現象に起因することを示している。また、最も高い光閉じ込め強度は、最低周波数に位置する基底モードで観測されており、この傾向は、数値解析と一致することも確認している。測定で得られた最高値

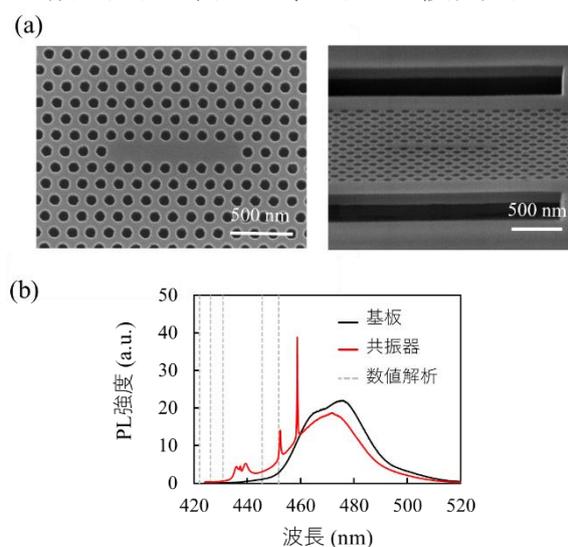


図 2 (a)レーザ援用光電気化学エッチングにより作製した GaN スラブ型フォトニック結晶構造の電子顕微鏡像 (b)共振器より観測された発光スペクトルと、基板発光スペクトルおよび共振周波数の理論値との比較⑦

は、3400 に達しており、この値は、光電気化学エッチングで作製された GaN スラブ型フォトニック結晶共振器としては最高値となっている。これらの結果より、レーザ光を光電気化学エッチングに用いることで GaN スラブ型フォトニック結晶共振器の高品質化が可能であることを明らかにした。また、GaN ディスク型共振器レーザの研究と比較しても共振器の性能指標は高水準であり、今後の研究で同共振器を用いた更に微小な可視レーザ光源の実現が期待される。

#### 引用文献

- ① C. -H. Lin, *et al.*, *Nanotechnology* **22** 025201 (2011).
- ② N. V. Triviño *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 081120 (2013).
- ③ N. V. Triviño *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 071103 (2012).
- ④ P. D. Anderson, *et al.*, *Opt. Mater. Express* **8** 3543 (2018).
- ⑤ I. Aharonovich, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 021112 (2013).
- ⑥ T. Tajiri *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SC1069 (2023).
- ⑦ T. Tajiri *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SG1019 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Tajiri, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, and K. Uchida	4. 巻 62
2. 論文標題 Fabrication and optical characterization of GaN micro-disk cavities undercut by laser-assisted photo-electrochemical etching	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1,5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acb65a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Tajiri, M. Yoshida, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, and K. Uchida	4. 巻 62
2. 論文標題 Mode analysis of GaN two-dimensional photonic crystal nanocavities undercut by photo-electrochemical etching	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1,5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acba80	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Shimoyoshi, S.Ukita, K. Uchida, and T. Tajiri	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication of deeply undercut GaN micro-disks by selective photo-electrochemical etching of thick InGaN/GaN superlattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of the 2021 International Conference on solid-state devices and materials	6. 最初と最後の頁 646-647
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takeyoshi Tajiri, Sho Sosumi, Kazuo Uchida	4. 巻 H-6-02
2. 論文標題 Fabrication and optical characterization of a GaN-based micro-disk laser undercut by laser-assisted photo-electrochemical etching	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of the 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials	6. 最初と最後の頁 387-388
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/SSDM.2023.H-6-02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Yoshida, S. Sosumi, K. Shimoyoshi, K. Uchida, and T. Tajiri
2. 発表標題 Gallium nitride two-dimensional photonic crystal nanocavities undercut by a two-step photo-electrochemical etching using laser sources
3. 学会等名 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sosumi, K. Shimoyoshi, K. Uchida, and T. Tajiri
2. 発表標題 Fabrication and optical characterization of GaN microdisk cavities undercut by laser-assisted photo-electrochemical etching
3. 学会等名 the 2022 International Conference on solid-state devices and materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 理人, 惣角 翔, 下吉 賢信, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 二段階光電気化学エッチングによるGaN二次元フォトリソニック結晶共振器の作製と光学評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 惣角 翔, 吉田 理人, 下吉 賢信, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 マイクロマニピュレーション法によるGaNスラブ型光ナノ構造の積層
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下吉 賢信, 浮田 駿, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 レーザアシスト光電気化学エッチングによるGaNマイクロディスク共振器の作製と光学評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shimoyoshi, S.Ukita, K. Uchida, and T. Tajiri
2. 発表標題 Fabrication of deeply undercut GaN micro-disks by selective photo-electrochemical etching of thick InGaN/GaN superlattice
3. 学会等名 2021 International Conference on solid-state devices and materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下吉 賢信, 浮田 駿, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 紫波長帯にフォトニックバンドギャップを有する窒化ガリウム二次元フォトリソニック結晶スラブの設計
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下吉 賢信, 浮田 駿, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 厚膜InGaN系犠牲層の光電気化学エッチングによる中空GaNマイクロディスク構造の作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 惣角 翔, 内田 和男, 田尻 武義
2. 発表標題 レーザー援用光電気化学エッチング法によるGaNマイクロディスクレーザの作製とその評価
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeyoshi Tajiri, Sho Sosumi, Kazuo Uchida
2. 発表標題 Fabrication and optical characterization of a GaN-based micro-disk laser undercut by laserassisted photo-electrochemical etching
3. 学会等名 the 2023 International Conference on solid-state devices and materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

research map <a href="https://researchmap.jp/takeyoshi_tajiri">https://researchmap.jp/takeyoshi_tajiri</a> 電気通信大学 紹介ページ <a href="https://researchers.uec.ac.jp/search/detail?systemId=7b3a81b9ba695305520e17560c007669&amp;lang=ja">https://researchers.uec.ac.jp/search/detail?systemId=7b3a81b9ba695305520e17560c007669&amp;lang=ja</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------