

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19059

研究課題名（和文）半導体ナノコラムによるトポロジカルフォトリック効果の研究

研究課題名（英文）Investigation on topological photonic effect by semiconductor nanocolumns

研究代表者

江馬 一弘（Ema, Kazuhiro）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40194021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカル効果の光版「トポロジカルフォトリック効果」を、半導体ナノコラムを用いて、実験的に確認することを目的とした。

前半では、ナノコラムの配列ゆらぎの影響を調べ、ゆらぎが大きくなると、フォトリックレーザーからランダムレーザーに移行していく様子が確認された。ただ、トポロジカル効果が発現する配置では、多少のゆらぎは問題なく、トポロジカル保護が効いていることを証明した。後半では、トポロジカル伝搬の実験を目指したが、実験室の改修工事と重なり、十分な研究成果をあげることはできなかった。その代わりに、InGaNナノコラムの局在状態からの発光について詳細に調べ、トポロジカルレーザーの基盤作りを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ユニークな光伝搬現象を示すトポロジカルフォトリック効果は新規な光デバイスとしての可能性が高い。本研究では、半導体ナノコラムでこれを実現させることを目指して、実際にデバイスを作製する際のゆらぎの効果について詳細に調べた。その結果、ゆらぎに対しては非常に強いというトポロジカル保護が効いていることが確認できた。実験での実証に関しては大きな成果が得られなかったが、シミュレーションでもナノコラムが有効であることが示せたことは非常に価値がある。そのため、この研究は、より大きな研究プロジェクト（JST・CREST）に繋がっている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to experimentally confirm the optical version of the topological effect, "topological photonic effect", using semiconductor nanocolumns.

In the first half of the study, we investigated the effect of nanocolumn array fluctuations, and confirmed that when the fluctuations increased, the transition from photonic lasers to random lasers started. However, in the arrangement where the topological effect appears, there was no problem with some fluctuations, and it was proved that the topological protection is effective. In the latter half, we aimed at experiments of topological propagation, but due to the renovation of the laboratory, we could not obtain sufficient research results. Instead, we investigated the emission properties from localized states of InGaN nanocolumns in detail and laid the foundation for the topological laser.

研究分野：光物性，光エレクトロニクス

キーワード：フォトリック効果 窒化物半導体 トポロジカルフォトリック ナノコラム

1. 研究開始当初の背景

研究開始当時(2017年頃),物理学の世界では「トポロジ」という概念が非常に重要になっており,その中から発展したトポロジカル絶縁体は,バルクでは絶縁体的で,エッジや表面にだけ欠陥や不純物に散乱されない電気伝導が現れるため,電子デバイス応用上も注目を集めていた.このトポロジカルの保護を光でも可能にして,光デバイスに応用できないかという研究もその頃に始まった.連携研究者の胡は,フォトリソグラフィ効果を利用して,その可能性を理論的に示した.フォトリソグラフィ効果とは,媒質中に光の波長程度の大きさで屈折率の変調を与え,光が伝搬する“バンド”と光が存在できない“バンドギャップ”を作るものである.胡によれば,図1に示すような蜂の巣状に配列された誘電体の位置を巧みに制御することによってトポロジカル特性(ここでは,「トポロジカルフォトリソグラフィ効果」と呼ぶ)が表れる.この効果により,光は欠陥などに散乱されずに伝搬することが理論解析と数値計算により実証された.

胡らの提案した構造を作製するには,ナノスケールでの結晶のサイズと配列の制御が必要となる.しかも,光の伝搬効果を見るためには,それなりの面積に渡って作製する必要がある.実現困難な構造であるが,連携研究者の岸野が開発した GaN ナノコラムは,まさしくこの条件を満たしている.GaN ナノコラムとは,図2に示すように,直径 20~500 nm,高さ 1 μm 程度の柱状結晶であり,コラム径と配列の高度な制御が可能である.

研究代表者の江馬は,半導体ナノ構造の光物性の研究に長年携わってきた.特に,岸野らとの共同研究においては,ナノコラム光物性で多くの成果を挙げている.当初はナノコラムという特異な形状と高品質性を生かした光物性研究が中心であったが,ナノコラムの配列制御技術の革新によって,配列効果の研究も始めた.これにより,フォトリソグラフィ構造を利用したレーザー発振や,ランダム配列の光局在などの研究を,実験と計算の両面から行い,ナノコラム配列の光学特性に関して多くの知見を得ることができた.そして,トポロジカルフォトリソグラフィ効果の実現にはナノコラムの配列制御が最適と考え,本研究課題がスタートした.

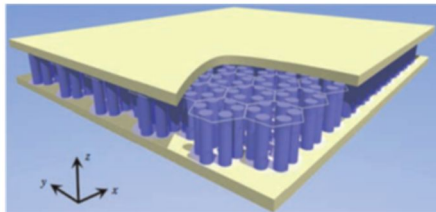


図1 胡の提案による蜂の巣状に誘電体が並んでいるトポロジカルフォトリソグラフィ構造(「応用物理」第85巻より)

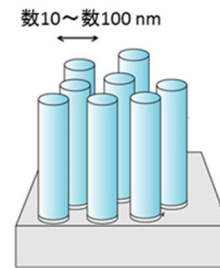


図2 ナノコラムの模式図

2. 研究の目的

本萌芽研究の目的は,胡らによって提案されたトポロジカルフォトリソグラフィ効果を,実際に GaN ナノコラムを用いて,実験的に確認することにある.図3は GaN ナノコラムの SEM 像の一例であるが,胡らの提案の構造に適していることが一見してわかる.ただし,ナノコラムは,結晶成長で作製するため,乱れ(ゆらぎ)が必ず存在する.したがって,規則配列してフォトリソグラフィレーザーを目指しても,ゆらぎの程度によっては,光局在が生じ,フォトリソグラフィレーザーでなくランダムレーザーになる可能性がある.トポロジカルフォトリソグラフィの場合は,トポロジカルの保護があるため,ゆらぎは影響しないとも考えられるが,そもそも光局在が起きるよう状況では,トポロジカルの保護は実現しないと考えるのが妥当であろう.

本研究では,現実存在するゆらぎの効果を最初に検証し,その後,GaN ナノコラムの物性パラメータを用いてトポロジカルフォトリソグラフィ効果の計算を行い,最終的に実験で実現させることを目指した.

具体的には,以下の項目の研究を行った

- A) 規則配列ナノコラムの配列ゆらぎの影響を調べる
- B) GaN ナノコラムの物性パラメータを用いてトポロジカルフォトリソグラフィ効果が生じる配置を計算する
- C) 計算された配置を作製し,トポロジカルフォトリソグラフィ効果を実験的に確認し,最適なデバイス作製指針を与える
- D) InGaN/GaN ナノコラムによるトポロジカルフォトリソグラフィ効果を利用した発光デバイスを目指して,InGaN の発光メカニズムの解明

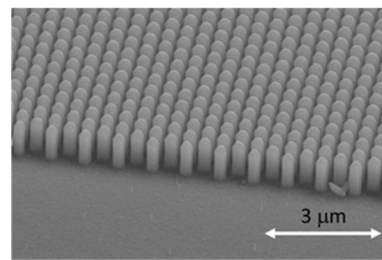


図3 岸野が開発した GaN ナノコラムの一例

以上の4項目を目指したが,研究期間中に実験室の改修・引越しがあり,残念ながら項目Cは実現できなかった.しかし,A,B,Dに関しては,十分な成果が得られたので,以下に報告する.

3. 研究の方法

本研究は4名の連携研究者と協力して進めてきた。胡と岸野は前述の通り、それぞれ、理論的サポートと試料作製で協力を受けた。猪瀬と下迫は、江馬と協力して光学実験を行うとともに、トポロジカルフォトリック効果による光伝搬の数値計算を行った。

それぞれの研究項目の具体的な研究方法については、次の「4. 研究成果」の中で説明する。

4. 研究成果

A) 規則配列ナノコラムの配列ゆらぎの影響を調べる

ナノコラム集団の持つゆらぎの影響を調べる必要があるため、規則配列ナノコラム配列におけるフォトリック効果と局在の関係を調べた。規則配列のフォトリックレーザーを目指して作製した試料に、わずかなゆらぎが含まれると、光局在によるランダムレーザーになることを見出した。可視光で発光するInGaN量子井戸を内在させたGaNナノコラムを用いて、光励起によるフォトリックレーザー発振とランダムレーザー発振の関係を図4の顕微分光法で調べた。レーザー発振したスペクトルの例を図5に示す。図の一番左は2つのナノコラム配列を真上から見たSEM像であり、どちらも規則配列しているように見える。しかし、空間フーリエ変換すると微妙なゆらぎが判定可能となり、そのゆらぎの程度によって、光励起したときのレーザー発振がランダムレーザーになることがわかった。図6はレーザー発振の空間分布であり、微妙なゆらぎによって、フォトリックレーザーがランダムレーザーに遷移することがわかった。

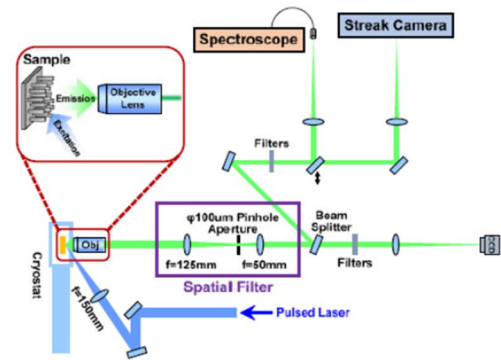


図4 フォトリックレーザーとランダムレーザーの関係を調べる光学系

この程度のゆらぎはトポロジカルな保護には関係ないのか、それともレーザー発振と同様に重要なのか、という点が重要課題であったが、最終的には系統的に配列制御した試料の作製にまで至らずに、その目的は達成できなかった。

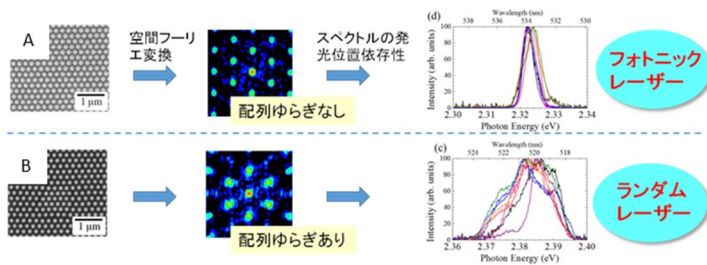


図5 配列ゆらぎの程度によって、フォトリックレーザーからランダムレーザーに遷移

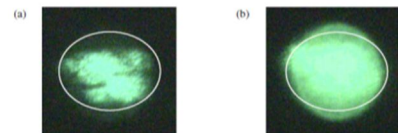


図6 ランダムレーザー(左図)とフォトリックレーザー(右図)の空間分布

B) GaN ナノコラムの物性パラメータを用いてトポロジカルフォトリック効果が生じる配置を計算する

研究スタート前の予備的な計算として分散曲線の計算は既に行っていた。それによると、蜂の巣構造を利用すると、GaNナノコラムの物性パラメータでも、トポロジカルなバンド構造が実現することが判明した。図7に示すように、直径80nmのナノコラムで、可視域の波長500nm台にトポロジカルフォトリック効果が現れる。本研究では、これらの計算を発展させ、実際に光伝搬されたときの電磁場シミュレーションを行い、トポロジカルな伝搬が生じていることを確認した。図8は、FDTD法を用いて、定常状態になっている界面モードを励起した様子を表している。CW励起であり、赤と青は電場の正負、矢印はポインティングベクトルを表している。界面にへばりつくように、うねりながら伝播している様子が分かる。

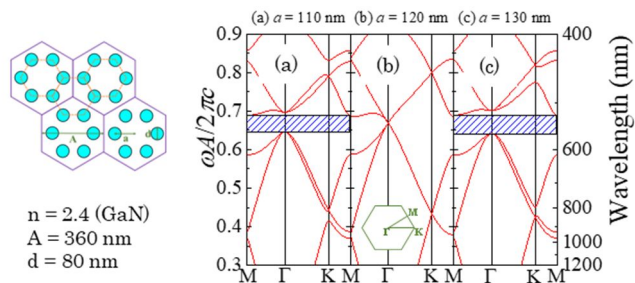


図7 蜂の巣状格子のGaNナノコラムで計算された分散曲線。(b)が完全なハニカム格子、(a)と(c)は六角形内のナノコラム間隔を変化させたもの。(c)がトポロジカル的な分散曲線になる

さらに、実際に作製したときに問題となる配置のゆらぎの効果についても詳細な計算を行った。例えば、ナノコラムの位置や直径にゆらぎがあった場合に、トポロジカルな伝搬が維持するかどうかを数値シミュレーションで検証した。図9は、コラムの位置に揺らぎを与えた場合の

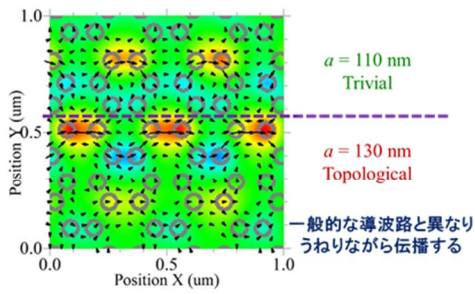


図8 FDTD法による界面モード分布の計算結果

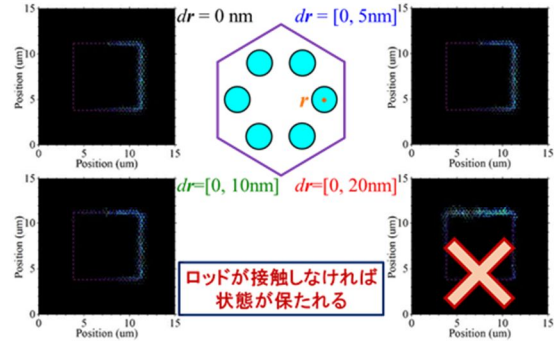


図9 ナノコラムの位置にゆらぎを与えた計算結果

計算結果である。「x」のついていない3つの計算結果では、ランダムなゆらぎを与えても、界面に沿った伝搬が現れていることがわかる。「x」のついているものは、ゆらぎによってナノコラム同士が接触した場合であるが、この場合はトポロジカルな伝搬が壊れている。通常は、それほど大きなゆらぎはないため、実用上は全く問題ないという結論に至った。同様に、ナノコラムの直径のゆらぎに関して、十分に強いことが判明したため、ナノコラム配列はトポロジカルフォトリック効果を実現する、最適な材料であることを確認することができた。

C) 計算された配置を作製し、トポロジカルフォトリック効果を実験的に確認し、最適なデバイス作製指針を与える

研究目的の項でも述べたように、この研究項目は最も重要な部分にも関わらず、研究期間内に達成することはできなかった。ただし、上記の項目 B で判明したように、ナノコラム配列は最も有力の候補であるため、この研究は別のプロジェクトに引き継いで進めている。

また、本研究項目の中で、トポロジカルレーザー発振の研究で実施予定であった、励起相関分光は、別の材料の物性研究に応用された。材料はハイブリッドペロブスカイト材料であり、本研究対象とは異なるが、本研究の発展であるため、2019年度の研究業績の中の一つに加えている。

D) InGaN/GaN ナノコラムによるトポロジカルフォトリック効果を利用した発光デバイスを目指して、InGaN の発光メカニズムの解明

最終的に、トポロジカルフォトリック効果を利用した発光デバイスを実現するためには、ナノコラムの材料である InGaN の発光メカニズムの詳細を解明する必要がある。InGaN の発光メカニズムに関しては、青色や緑色領域では良くわかっているが、In 組成が多くなった、黄色や赤領域では未解明である。これらの解明を目指して、In 組成揺らぎによる局在状態からの発光特性の研究を行った。

図10は GaN ナノコラムに InGaN/GaN の量子井戸 (QW) を組み込んだものである。In 組成を多くして、黄色～赤領域で発光するナノコラムを作製し、その発光特性を詳細に測定した。図11は低温と室温における発光スペクトルの励起強度依存性である。これらの結果と、時間分解測定の結果から、InGaN では局在励起子でなく、局在電子と局在正孔の発光であることが判明し、局在状態の密度を増やすことで、赤領域でも効率良い発光特性が得られることがわかった。この結果については、現在論文投稿中である。

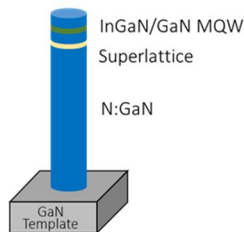


図10 InGaN/GaNのQWを含む GaNナノコラム

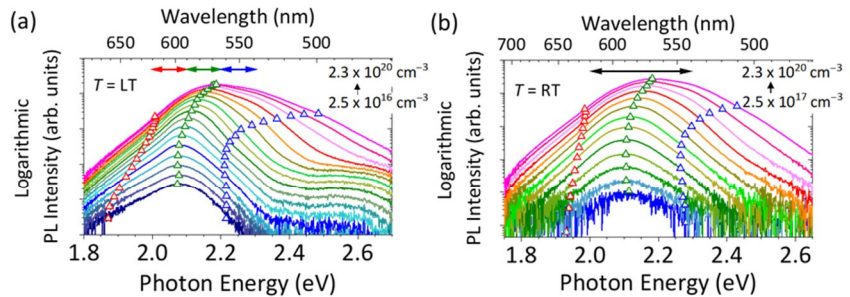


図11 InGaN/GaNのQWを含むGaNナノコラムの発光スペクトルの励起強度依存性. (a)77 K (b) 室温

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Oto Takao, Mizuno Yutaro, Yoshida Jun, Yanagihara Ai, Miyagawa Rin, Ema Kazuhiro, Kishino Katsumi	4. 巻 255
2. 論文標題 Effects of Introduction of InGaN Quantum Structures on Structural and Optical Properties of InGaN Nanocolumns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1700481 ~ 1700481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201700481	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 Inose Yuta, Ema Kazuhiro, Kishino Katsumi	4. 巻 56
2. 論文標題 Randomness dependence and generation mechanism of stimulated emission in regularly arranged InGaN/GaN nanocolumns	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 082101 ~ 082101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.082101	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 1. 柳沢優光, 猪瀬裕太, 江馬一弘, 中岡俊裕, 大音隆男, 岸野克巳
2. 発表標題 GaNナノコラムにおける励起子多体効果のコラム径依存性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪瀬 裕太、柳沢 優光、江馬 一弘、中岡 俊裕、大音 隆男、岸野 克巳
2. 発表標題 GaNナノコラムにおけるナノサイズ効果およびナノ構造効果
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017年9月5 - 8日
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳沢 優光、猪瀬 裕太、江馬 一弘、中岡 俊裕、大音 隆男、岸野 克巳
2. 発表標題 GaNナノコラムにおける励起子多体効果
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会，福岡国際会議場，2017年9月5 - 8日
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大音 隆男、加納 達也、吉田 純、宮川 倫、江馬 一弘、岸野 克巳
2. 発表標題 規則配列GaNナノコラム上InGaN/AlGaN量子井戸の光学特性
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会，福岡国際会議場，2017年9月5 - 8日
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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