

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04176

研究課題名（和文）半導体三次元フォトニック結晶における電流注入型ナノ共振器レーザの実現

研究課題名（英文）Electrically driven nano-cavity laser in semiconductor three-dimensional photonic crystals

研究代表者

高橋 駿（Takahashi, Shun）

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：60731768

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、半導体三次元フォトニック結晶に電氣的接続を試みることで、将来の光・電子回路の三次元集積デバイスにおける重要な素子のひとつとして、高効率な電流注入型の発光デバイスを開発することを目的とした。まず、国際共同研究を通じて三次元フォトニック構造を設計し、新たに開発した光学顕微鏡観察下でのマイクロマニピュレーション法によって、設計した半導体三次元ナノ構造の作製に成功した。この試料に対する光学測定では、電圧印加による量子閉じ込めシュタルク効果や、レーザ発振に向けた共振器モードを観測したことから、半導体三次元フォトニック結晶への初の電氣的接続に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である、半導体三次元フォトニック結晶による電流注入型の発光デバイスは、将来の光・電子回路の三次元集積デバイスにおける重要な素子のひとつになりえる。指数関数的に増大する情報量とともに、その情報を処理する消費電力の増大が地球規模のエネルギー問題にまで発展しつつある現代において、ジュール熱を発生しない光を利用した光・電子回路の相互接続の微細化が進んでおり、本研究成果はそのさらなる微細化と省電力化に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to realize an electrically driven light emitting device by forming electrical connection in a semiconductor-based three-dimensional (3D) photonic crystal, towards 3D photonic and electric integrated devices. After designing the 3D photonic crystal, the 3D nanostructure was fabricated by a novel micro-manipulation method under optical microscope observation. The performed optical measurements on the electrically connected 3D photonic crystal showed the quantum confined Stark effect and cavity mode for a nano-laser. This is the first demonstration of electrical connection in a semiconductor-based 3D photonic crystal.

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：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

IoT や 5G が実用化され、情報量が指数関数的に増加するとともに、情報を処理するデータセンタの消費電力の増大も顕著であり、地球規模のエネルギー問題にまで発展しつつある。この電力問題の根本的な解決方法として、ジュール熱を発生しない光の利用が挙げられる。光はその伝播の速さから制御が困難であるが、電気/電子回路の微細化の推移と同様に、通信用の光(波長 1.3, 1.55  $\mu\text{m}$ )に対して光ファイバを用いた m サイズの制御から、電子部品が搭載されたボード間(cm サイズ)の通信、簡易な導波路構造を用いたチップ間またはチップ内(mm サイズ)の伝送が実現され、電子回路との相互接続の微細化が進んできた。

さらなる微細化・小型化に向けて、通信波長程度の周期的な屈折率分布をもつ  $\mu\text{m}$  サイズのフォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶が形成するフォトニックバンドギャップを利用することで、nm サイズの領域に光を閉じ込めるナノ共振器や、低損失な導波路が実現されてきた。特に、三次元フォトニック結晶が有する完全フォトニックバンドギャップでは、あらゆる方向に伝播する光の侵入を禁止するため、光を三次元的に完全に制御可能であり、損失をさらに低減できる。そこで、現在まで発展してきた電子回路との親和性も考慮して、半導体を用いた三次元ナノ構造が求められるが、高精度な作製は困難であり、電流注入による発光などの電氣的制御の報告は皆無である。

### 2. 研究の目的

本研究では、マイクロマニピュレーション法によって作製した半導体三次元フォトニック結晶に対して電氣的接続を試み、将来の光・電子回路の三次元集積デバイスにおける重要な素子のひとつとして、三次元的に光を閉じ込めた高効率なナノ共振器レーザを、電流注入によって駆動するデバイスの実現を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 三次元フォトニック結晶を形成する半導体薄膜構造の設計

本研究では、通信波長程度の三次元的な屈折率周期をもつ三次元フォトニック結晶について、面内に周期構造を有する半導体薄膜を積層した構造を採用する。この周期の大きさと同程度の波長の光に対して、フォトニックバンドギャップが形成され、さらに構造内に周期の不連続性を導入することで、フォトニックバンドギャップ内に共振器モードを形成することができる。ここでは、蘭国 Twente 大学の教授との国際共同研究を行うことで、本研究に最適な周期の大きさや不連続性の導入を検討し、数値計算によって確認した。また、三次元フォトニック結晶に電氣的な接続をすることを考慮して、薄膜構造に配線用の引き出し線を新たに設けた構造設計を行ったほか、半導体薄膜の高精度な積層法として採用するマイクロマニピュレーション法のさらなる改善も検討した。

#### (2) 半導体三次元フォトニック結晶の作製

(1)で設計した半導体薄膜構造に基づいて、三次元フォトニック結晶の作製を行った。電子線リソグラフィおよびドライ・ウェットエッチングによって GaAs 薄膜を作製し、マイクロマニピュレーション法によって、この薄膜を 1 層ずつ積層することで、半導体三次元フォトニック結晶を作製した。特に、電子線リソグラフィについては、本研究期間の途中で、所属機関に高性能な電子線描画装置が導入されたことで、高いスループットで試作可能となった。また、マイクロマニピュレーション法については、光学顕微鏡の観察下での実施ができるように、試行錯誤を重ねて新たな手法の開発を試みた。

#### (3) 作製した三次元フォトニック結晶の電氣的接続

量子ドットを含む半導体薄膜(ドーピングなし)を用いたフォトニック結晶について、マイクロマニピュレーション法によって金属電極上に配置し、低温でのフォトルミネッセンス測定を行った。電極に電圧を印加することで、構造内部の量子ドットの発光波長を変調する、量子閉じ込めシュタルク効果の観測を目指した。一方で、n 型ドーピングした半導体薄膜を用いたフォトニック結晶について、引き出し線に銀ナノペーストによる電極を形成し、量子ドット活性層を流れる電流がレーザ励起によって変化する光電流の測定も行った。ただし、作製した試料の光学測定については、所属機関において実験室を含む建物の改修が長期間にわたって行われたため、測定を十分に実施することができなかった。そこで、本研究目的を達成するために研究期間を延長した。

#### (4) pn 接合を有する半導体薄膜で作製した三次元フォトニック結晶共振器における電流注入によるレーザ発振

パターンマスクを施した複数回のイオン注入によって、活性層を含む半導体基板の面内に p 型・n 型ドーピングを縞状(100  $\mu\text{m}$  周期)に形成し、この基板を使って、(1)の設計および(2)で開発した作製方法に基づいたフォトニック結晶を作製し、(3)で構築した測定系にて三次元フォトニ

ック結晶ナノ共振器における電流注入発光測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 三次元フォトニック結晶を形成する半導体薄膜構造の設計

本研究で対象とした三次元構造は、図1に示したウッドパイル構造である。これは、最大のフォトニックバンドギャップを形成するダイヤモンド構造を簡易積層化した構造である。この三次元構造に対して、蘭国 Twente 大学の教授との国際共同研究を行い、FDTD 法（有限差分時間領域法）による詳細な電磁場解析を行った。FDTD 法は、マクスウェル方程式を差分化して逐次的に数値計算を進める方法であり、現実の実験系に近い計算手法である。その結果、本研究における量子ドットの発光波長 1100 nm においてフォトニックバンドギャップを形成する構造として、150 nm 幅の誘電体ロッド（厚さ 200 nm）が 500 nm の周期で並んだウッドパイル構造を採用した。以上の結果は、学术论文にまとめて出版した。

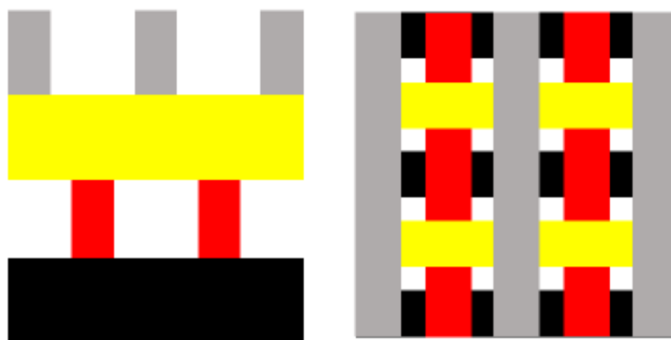


図1 対象としたウッドパイル構造の模式図（左：断面図、右：上面図）

##### (2) 半導体三次元フォトニック結晶の作製

電子線リソグラフィおよびドライ・ウェットエッチングによって GaAs 薄膜を作製し、マイクロマニピュレーション法によって、この薄膜を1層ずつ積層することで、(1)で設計した woodpile 構造を作製した。まず、分子線エピタキシー法によって、GaAs 基板の上に 1.5 μm の厚さの AlGaAs 犠牲層、200 nm の厚さの GaAs スラブ層の結晶成長を行った。GaAs スラブ層の結晶成長では、途中で高密度な InAs 自己形成量子ドットを形成させた。この量子ドットは近赤外光の内部発光体として利用する。この基板の上に電子線リソグラフィによって 500 nm の周期をもつロッド配列パターンを形成した。ロッドの幅は 150 nm に設定し、ロッド方向の異なるパターンを4種類用意した。その後、誘導結合型反応性イオンエッチング（ドライエッチング）によって、この面内パターンを GaAs スラブ層に転写し、フッ化水素酸を用いたウェットエッチングによって、AlGaAs 犠牲層を除去した。最終的に、中空に浮いた GaAs スラブ層（薄膜プレート）を得た。このようなプレートをマイクロマニピュレーション法によって、積層の順番に注意して20枚積層した。マイクロマニピュレーション法については、光学顕微鏡の観察下での実施ができるように改善を試み、新たな手法を開発した。図2のように光学顕微鏡の観察下で微細な針を使って、半導体薄膜を取り上げ、1枚ずつ積層することに成功した。積層数は20層であり、積層誤差は50 nm 以下に抑えることに成功した。以上の結果は、学术论文にまとめて出版した。

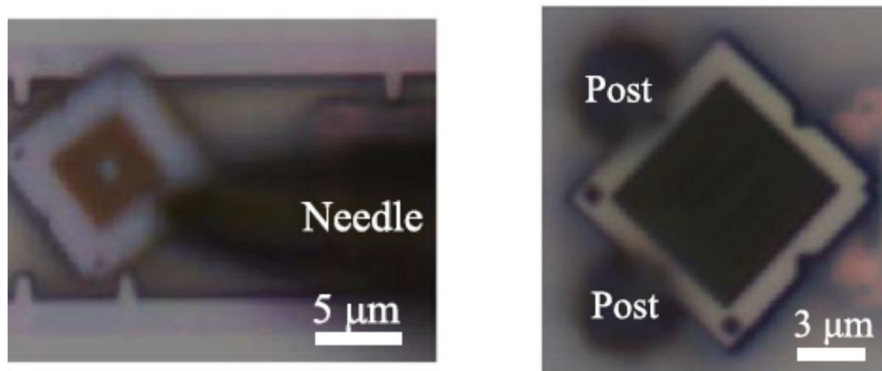


図2 新たに開発した光学顕微鏡の観察下でのマイクロマニピュレーション法の様子（左）  
作製した半導体三次元フォトニック結晶の例（右）

##### (3) 作製した三次元フォトニック結晶の電氣的接続

三次元フォトニック結晶を構成する半導体薄膜に量子ドットを導入し、金属電極上に配置して、低温（4 K）でのフォトルミネッセンス測定を行った。その結果、量子ドットの発光波長が

印加電圧によって変化することを観測し、量子閉じ込めシュタルク効果の観測に成功した。図3に示すように、波長 1105 nm 付近の量子ドットの発光ピークが、印加電圧を正に変えるとともに、短波長側にシフトしていることがわかる。このシフト量はエネルギーに換算すると 15.6  $\mu\text{eV/V}$  であり、これまでに InAs 量子ドットで報告されていた値と同程度のシフトとなった。

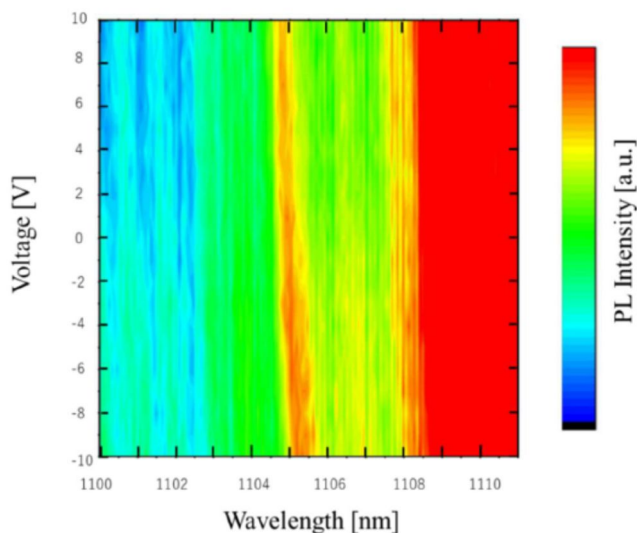


図3 測定された量子閉じ込めシュタルク効果

また、電気的な接続を施した n 型半導体フォトニック結晶において、量子ドット活性層を流れる電流がレーザ励起によって変化することも観測した。波長 785 nm のレーザ光を照射しながら、試料の電流電圧特性を測定したところ、照射する光のパワーの増大に伴って、電流値が増加する結果が得られた（図4左）。これは、一般的な光電流の傾向と一致しており、フォトニック結晶の電気的接続に成功したことを示す。一方で、波長 976 nm のレーザ光を照射した場合、照射する光のパワーの増大に伴って、電流値が減少するという逆の結果が得られた（図4右）。数値計算で見積もった結果、量子ドット直下のウェットティングレイヤーにおいて生成された高密度な励起子が、電流を妨げていると考察した。

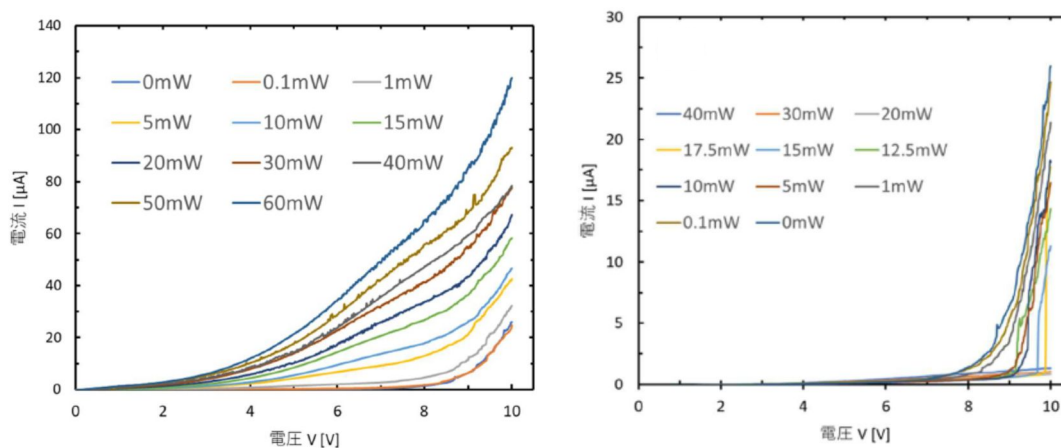


図4 波長 785 nm のレーザ光を照射したときの電流電圧特性（左）  
波長 976 nm のレーザ光を照射したときの電流電圧特性（右）

(4)pn 接合を有する半導体薄膜で作製した三次元フォトニック結晶共振器における電流注入によるレーザ発振

以上の結果を踏まえて、本研究の最終的な目標である、三次元フォトニック結晶ナノ共振器を利用した電流注入型の高効率な小型レーザの実現に向けて、pn 接合を有する半導体薄膜を用いた三次元フォトニック結晶の作製を行った。ここに電極を接続して、低温で電流注入によって放射された光の分光測定を行い、共振器モードを示唆する発光ピークを得た。現在、その印加電圧依存性などのデータを詳細に解析中である。低温での測定のため制限していたが、注入する電流量を増加することで、レーザ発振を実現することが可能と考えられる。

このように、三次元フォトニック結晶の数値計算による設計から、新たに開発したマイクロマ

ニピュレーション法による半導体三次元ナノ構造を作製し、これまで実現されてこなかった三次元フォトニック結晶への電氣的接続を実現した。これらの成果を踏まえて、当初の目的である、三次元フォトニック結晶共振器における電流注入による分光測定を行い、共振器モードを示唆する結果が得られたことから、レーザ発振も十分実現可能と考えられる。

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahashi Shun, Tajiri Takeyoshi, Arakawa Yasuhiko, Iwamoto Satoshi, Vos Willem L.	4. 巻 107
2. 論文標題 Optical properties of chiral three-dimensional photonic crystals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.107.165307	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 該当する

1. 著者名 Takahashi Shun, Kimura Erika, Ishida Takeshi, Tajiri Takeyoshi, Watanabe Katsuyuki, Yamashita Kenichi, Iwamoto Satoshi, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Fabrication of three-dimensional photonic crystals for near-infrared light by micro-manipulation technique under optical microscope observation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 015001 ~ 015001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac414a	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Takahashi, T. Tajiri, Y. Arakawa, S. Iwamoto and W. L. Vos
2. 発表標題 Transport of Circularly Polarized Light in Three Dimensional Chiral Photonic Crystals
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2022 (CLEO-PR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十野誠生、山下兼一、高橋駿
2. 発表標題 半導体薄膜内の量子ドットにおける量子閉じ込めシュタルク効果に関する考察
3. 学会等名 第7回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Vreman, P. van Essen, M. J. Goodwin, C. A. M. Hartevelt, S. Takahashi, and W. L. Vos
2. 発表標題 Spontaneous Emission of PbS Quantum Dots Controlled by 2D Silicon Photonic Crystals
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-XIII) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Isono, S. Takahashi, K. Oka, K. Yamashita, T. Fujita, H. Kiyama, A. Oiwa, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa
2. 発表標題 マイクロマニピュレーション法で配置したGaAs 薄膜における量子ドット発光波長の電氣的制御
3. 学会等名 第6回JSAPフォトニクスワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Onishi, S. Takahashi, K. Yamashita, T. Ishida, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa
2. 発表標題 光学顕微鏡マイクロマニピュレータで作製したウッドパイル型3次元フォトニック結晶の角度分解透過測定
3. 学会等名 第6回JSAPフォトニクスワークショップ
4. 発表年 2021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

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			
オランダ	University of Twente			