

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26706019

研究課題名(和文)化合物半導体を用いた3次元2次非線形フォトニック結晶の開発

研究課題名(英文) Development of three dimensional quadratic nonlinear photonic crystals based on compound semiconductors

研究代表者

松下 智紀 (Matsushita, Tomonori)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：50554086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：高次横モード波長変換光を得るために、周期空間反転GaAs/AlGaAs導波路を表面活性化接合することで、積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶導波路の作製に成功した。3次元フォトニック結晶導波路作製上の基盤技術を確立した。また、電流注入した化合物半導体からの誘導放出を用いた光利得で伝搬損失を補償する方式を検討し、周期空間反転GaAs基板上にAlGaAs pinヘテロ接合ダイオードの作製に成功した。これは全く新しい高効率な電流注入型波長変換素子の基盤となるものである。

研究成果の概要(英文)：For obtaining wavelength-converted light waves with higher-order transverse modes, we have successfully fabricated GaAs/AlGaAs two-dimensional quadratic nonlinear photonic crystal waveguides, which are composed of inversion-stacked periodically-inverted waveguide, by using surface-activation bonding technique. This result will lead to the basis of the fabrication of three-dimensional quadratic nonlinear photonic crystal waveguides. Furthermore, we proposed high efficient wavelength conversion devices utilizing optical gain based on stimulated interband emission due to current injection to compensate propagation losses, and succeeded in fabricating AlGaAs pin heterojunction diodes on periodically-inverted GaAs substrates. This will open up novel wavelength conversion devices utilizing current-injection induced optical gain.

研究分野：総合理工

キーワード：非線形光学 波長変換デバイス 分子線エピタキシー フォトニック結晶 化合物半導体

## 1. 研究開始当初の背景

1次元2次非線形フォトニック結晶である擬位相整合(QPM)波長変換素子は、通信分野の1.55  $\mu\text{m}$ 帯差周波発生素子と量子もつれ光子対発生素子、分光分野の中赤外波長可変光源用素子、超短パルス光分野の光パラメトリックパルスチャープ増幅素子に至るまで幅広く用いられ、現代社会において不可欠なキーデバイスの一つである。さらに、QPM波長変換素子の周期性を1次元から2次元に拡張することにより、QPM位相整合波長可変帯域が拡張されるだけでなく、超短パルス波長変換において群速度整合により第二高調波を短パルス化する新規光技術も開発されてきた(Opt. Lett. 31 2780 (2006))。これまで、既存の1次元ないし2次元2次非線形フォトニック結晶は酸化物強誘電体材料で作製されてきたが、作製プロセスが開発し尽くされ、その素子の性能限界に到達したと言っても過言ではない。そこで本研究は、酸化物強誘電体より2次非線形光学定数が大きい化合物半導体AlGaAsを用いて2次元からさらに3次元へ拡張した3次元2次非線形フォトニック結晶の開発を行うとともに、3次元化によって発現する新奇光機能である高次横モードビーム発生波長変換についてその素子構造を数値的に設計し実際に試作することを目標とした。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、交互に反転積層構造をもつQPM AlGaAsを多重に積層したバルク型3次元非線形フォトニック結晶素子の作製技術の確立を目指すことと、最終的に1.55  $\mu\text{m}$ 帯ポンプの光パラメトリック蛍光実験を行い、バルク型素子からの初めての擬位相整合波長変換を実現することである。さらに、高品質な3次元非線形フォトニック結晶を実現するために、周期空間反転構造と反転積層構造の作製プロセスを改善し、各プロセスで素子の品質の向上を目指す。また、導波路型3次元非線形フォトニック結晶の新奇光機能である高次横モード発生波長変換の理論検討と素子試作を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶の設計

高次横モード(エルミートガウシアンビーム)波長変換用の導波路型2次元非線形フォトニック結晶の設計を行った。AlGaAsの $d_{14}$ 成分を用いたtype-I相互作用を想定し、最低次モードTM偏光の波長1.55  $\mu\text{m}$ ポンプ光から高次モードのTE偏光の縮退差周波発生を想定した。1次元フォトニック結晶導波路中の1次モードのシグナル光と差周波発生光の相互作用と、積層方向に反転した2次元フォ

トニック結晶導波路中の最低次モードのシグナル光と1次モードの差周波発生光の相互作用に関して計算した。有限要素法により各光のモード分布と等価屈折率を計算し、空間反転周期と規格化変換効率を計算した。GaAs/AlGaAs2次元フォトニック結晶導波路構造は1.5  $\mu\text{m}$ 厚 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 上部クラッド層/3  $\mu\text{m}$ 厚GaAsコア層/7  $\mu\text{m}$ 厚 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 下部クラッド層からなるヘテロ構造にリッジ幅10  $\mu\text{m}$ 、リッジ深さ1.4  $\mu\text{m}$ とした。

### (2) 積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶の作製

ウッドパイル型3次元2次非線形フォトニック結晶の作製プロセスを図1に示す。本研究では3次元フォトニック結晶の作製には至らず、設計した積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶を図1の4)項目まで作製した。1)では、これまで開発してきた空間反転構造を得る結晶成長技術(副格子交換エピタキシー)、フォトリソグラフィ技術、GaAs分子線エピタキシー(MBE)成長技術を用い周期空間反転GaAs基板を作製した。2)のCMPでは、スラリーとして次亜塩素ナトリウム(INSEC-NIB)を用い平坦化した。3)の工程は平坦化周期空間反転GaAs基板同士をArプラズマビームによる表面活性化接合技術で接合し、2次元2次非線形フォトニック結晶を作製した。

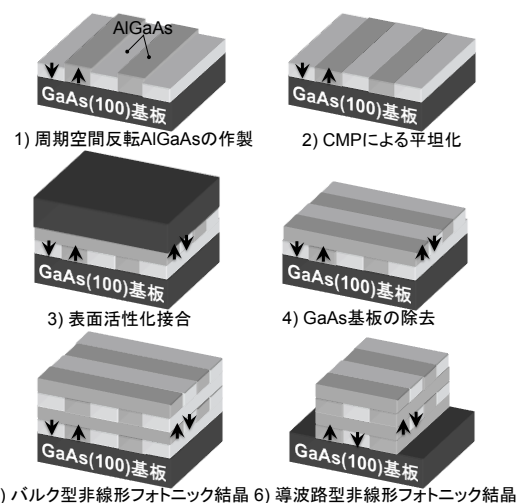


図1. ウッドパイル型3次元2次非線形フォトニック結晶の作製プロセス

### (3) AlGaAs積層反転高屈折率差導波路の光学評価

表面活性化接合界面の光学特性を評価するために、周期空間反転構造のないAlGaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>積層反転高屈折率差導波路を作製し、光学特性を評価した。MBEによりGaAs(100)基板上に $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ コア層/ $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ クラッド層の構造を結晶成長し、互いに空間反転するように表面活性化接合した。片方のGaAs基板を除去し、 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ クラッド層を熱酸化することでAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>層を作製した。作製した素子の伝搬損失を測定する

ために、1.55  $\mu\text{m}$ 帯のレーザ光をエンドファイヤカップリングで導波し、ストリーク法で伝搬損失を見積もった。

#### (4) 電流注入型1次元フォトニック結晶ダイオードの作製

接合界面の3 nm程度のアモルファス層による光吸収が回避困難であると考え、化合物半導体の電流注入によるバンド間発光をもちいた光増幅によって光吸収を補償することを考案した。周期空間反転GaAs構造(1次元フォトニック結晶)上に電流注入機構であるGaAs pn ホモ接合ダイオードとGaAs/ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  pinヘテロ接合ダイオードを作製した。各pとnドーピングのためにSiとBe原子を使用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 積層2次元2次非線形フォトニック結晶の設計

2次元2次非線形フォトニック結晶導波路を設計した。空間反転周期は15.6  $\mu\text{m}$ であった。また規格化変換効率は25  $\% \text{W}^{-1} \text{cm}^{-2}$ であった。これは1次元2次非線形フォトニック結晶導波路のそれと比べて16%大きい。2次元2次非線形フォトニック結晶の規格化変換効率は1次元のそれよりも大きな変換効率を期待できる。

#### (2) 2次元2次非線形フォトニック結晶の作製

GaAs/ $\text{AlGaAs}$  積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶の作製に初めて成功した。これはフォトニック結晶の作製技術の根幹であり、GaAs ウッドパイル型2次非線形フォトニック結晶は十分に作製可能であることを示した。

積層方向2次非線形フォトニック結晶の改善点は、面内位置合わせと面内回転である。図2に示すように、QPM周期16  $\mu\text{m}$ に対しておよそ2.7  $\mu\text{m}$ 位置ずれしている。また、[011]同士が[100]軸周りに0.2°ずれていた。これらは接合装置の問題で、線形フォトニック結晶の作製時と同様に位置調整用の治具を開発することで解決可能である。

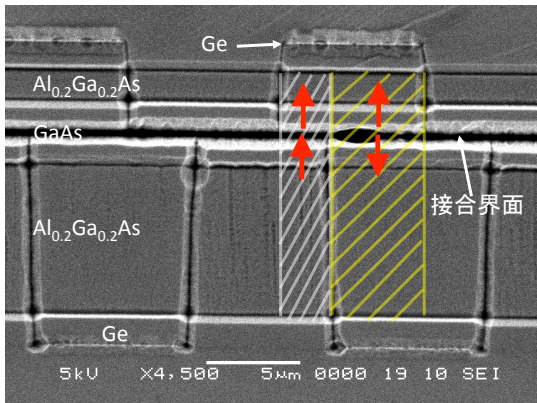


図2. GaAs 積層方向2次元2次非線形フォトニック結晶の断面SEM像(ステインエッチング後)

次に周期空間反転構造の表面活性化接合の制限について調べた。表面活性化接合の可否は、接合前の表面のRaが1 nm以下かどうかで決まると経験的に明らかにした。GaAsの場合、これまで開発してきた次亜塩素酸ナトリウムスラリー(INSEC-NIB)でRaを1 nm以下を達成でき、接合に高い確率で成功した。一方、2光子吸収を回避するための $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ では、同CMP直後でRaが2 nm程度であり、CMP後に平坦化可能な塩酸過水の表面処理を施しても、接合には至らなかった。スラリーなどのCMPプロセス条件と表面活性化接合のプラズマガス種などの最適化が不可欠である。

#### (3) $\text{AlGaAs}$ 積層反転高屈折率差導波路の光学評価

図3に作製した積層反転高屈折率差導波路の透過断面電子顕微鏡像を示す。波長1.55  $\mu\text{m}$ のレーザ光をエンドファイヤカップリングで導波し、導波路終端劈開面からニアフィールドパターンを観察した。これは反転積層導波路における初めての光導波であり、フォトニック結晶の作製上大きな進歩である。

ストリーク法を用いて測定した同導波路の伝搬損失はおよそ500 dB/cmであった。この原因は、 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$  界面や導波路のサイドウォールの揺らぎによる光散乱ではなく、接合界面に存在する3 nm程度のアモルファス層の光吸収であることを明らかにした。リーキーモードを許容した有限要素法で吸収係数を計算することで、数100 dB/cmとオーダーで一致した。

さらに、アモルファス層の解消をめざし、積層反転高屈折率差導波路を窒素雰囲気中でアニール処理を施した。その結果、アモルファス層の膜厚の0.1 nm程度の低膜厚化に成功したものの、この膜厚低減の場合ではほぼ伝搬損失は変化しない。表面活性化接合での接合界面のアモルファス層の形成は、プラズマ照射による表面からのAs抜けが原因であることが知られている。アモルファス層を解消するためには、接合時のプラズマガス種、プラズマ強度分布や照射時の圧力などの条件を最適化する必要がある。

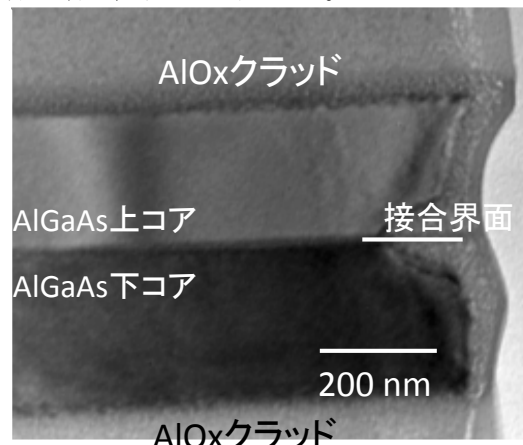


図3.  $\text{AlGaAs}$  反転積層導波路の断面TEM像

(4) 電流注入型1次元フォトニック結晶ダイオードの作製

周期空間反転構造上のGaAs pn ホモ接合ダイオード(図4(a))とAlGaAs pin ヘテロ接合ダイオード(図4(b))の作製し、初めてダイオードの整流の観察に成功し、周期空間反転ダイオードからの電流注入によるバンド間発光(エレクトロルミネッセンス)を初めて観察した。周期空間反転GaAs ホモ接合/AlGaAs ホモ接合ダイオードからの発光は、通常のダイオードである一様非反転ダイオードの発光と比べて共に1/5程度であった。これは注入電流の増加によって容易に補償できる差である。これら結果は、高い伝搬損失を補償できる波長変換素子を実現できる可能性を示すだけでなく、ポンプ光の自己発振した全く新しいタイプの波長変換素子の基盤技術となる成果である。

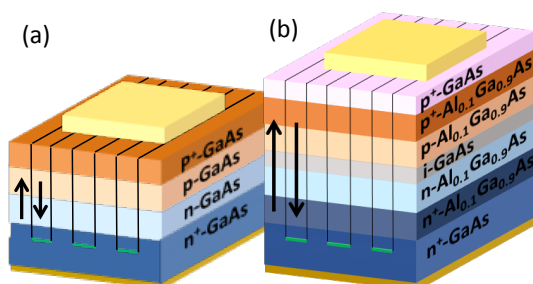


図4. 作製した周期空間反転(a) GaAs pn ホモ接合ダイオードと(b) AlGaAs pin ヘテロ接合ダイオード

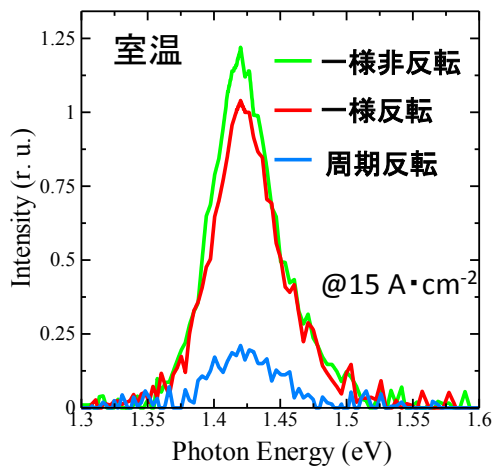


図5. GaAs pn ホモ接合ダイオードのエレクトロルミネッセンススペクトル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ryota Narasaki, Tomonori Matsushita and Takashi Kondo, "Corrugation reduction in periodically inverted GaAs by molecular beam epitaxy growth using arsenic dimers, Appl. Phys. Express, 査読有, vol. 8, 2015 pp. 25601.

DOI: 10.7567/APEX.8.025601

- ② Tae Woong Kim, Kaori Hanashima, Tomonori Matsushita, and Takashi Kondo, Antiphase structures in a periodically inverted GaAs/AlGaAs waveguide investigated by transmission electron microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 55, 2016, pp.15502.

DOI: 10.7567/JJAP.55.015502

[学会発表] (計 11 件)

国際学会のみ記載

- ① Takashi Kondo, Wavelength conversion using quadratic optical nonlinearities in compound semiconductors, EMN Hong Kong Meeting 招待講演, 2015年12月10日, Hong Kong, (China).
- ② Ryosuke Suzuki, Tomonori Matsushita, and Takashi Kondo, Homojunction GaAs diode with periodically-inverted structure for nonlinear optical devices, The 2016 Compound Semiconductor Week (CWS), 2016年6月28日, Toyama (Japan).
- ③ Tomonori Matsushita and Takashi Kondo, Recent progress of AlGaAs wavelength conversion devices, International Symposium for Advanced Materials Research (ISAMR2016) 招待講演, 2016年8月12日, Sun Moon Lake, (Taiwan).
- ④ Takashi Kondo, GaAs/AlGaAs waveguiding wavelength conversion devices, SPIE Photonics West 2017 招待講演, 2017年2月1日, California, USA.

[その他]

ホームページ等

<http://www.castle.t.u-tokyo.ac.jp/achievements/index.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下 智紀 (MATSUSHITA, Tomonori)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号: 50554086