

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630136

研究課題名(和文)円筒ブラッグ反射導波路を用いた面発光レーザ用波長変換素子とその集積化の研究

研究課題名(英文)Study on wavelength convertor based on cylindrical Bragg reflection waveguide for vertical cavity surface emitting laser and its integration

研究代表者

松下 智紀(Matsushita, Tomonori)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50554086

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究の目的は円筒ブラッグ反射導波路に円筒全反射導波路を組み込むことで面発光レーザ用化合物半導体波長変換素子を開発することである。数値計算の結果、以下のような成果を得た。

- 1) GaAs/空気の円筒ブラッグ反射導波路において全反射モードとブラッグモード間での位相整合条件を達成できる条件を見いだすことはできなかった。
- 2) 超小型フットプリントデバイスを実現できるU字折畳み導波路が、その結果直線導波路と円弧導波路の幅を変え接合部にテーパ導波路を導入することで、超小型で高効率を達成することを明らかにした。

研究成果の概要(英文):Research objective is to develop wavelength convertors based on compound semiconductor for vertical cavity surface emitting lasers by introducing a total-reflection waveguide in a cylindrical Bragg-reflection waveguide. We have obtained research achievements by numerical simulation as follow:

- 1) In GaAs/Air cylindrical waveguide, phase matching condition between total-reflection and Bragg-reflection modes cannot be achieved.
- 2) In a folded U-shaped waveguide, high-efficiency as well as small foot-print size can be achieved by connecting straight waveguides with half-arc waveguides.

研究分野：光デバイス

キーワード：波長変換素子 ブラッグ反射導波路 面発光レーザ

1. 研究開始当初の背景

(1) 面発光レーザは、これまで通信用の光源または超短パルス光増幅素子として一部実用化されるまでに至った。このレーザは、波長変換素子を組み込むことで、活性材料のバンドギャップエネルギーによる発振波長の制限から開放され、紫外から中赤外領域の広大なスペクトル領域の光源となる可能性がある。

化合物半導体 AlGaAs を用いた導波路型の波長変換素子は、これまで端面発光レーザとの集積化に向けて積層方向に対して垂直に光を導波する横方向導波路型が主流であり、申請者の疑似位相整合素子とトロント大学のグループの積層ブラッグ反射導波路モード位相整合素子が研究されてきた。一方、既存の面発光レーザ用波長変換素子は、横方向励起積層方向出力型の位相整合波長変換素子とフォトニック結晶点欠陥導波路素子を用いた 2 種類であるが、位相整合の達成と相互作用長の長尺化を同時に実現できないために、ともに高い変換効率を実現していない。

(2) 波長多重通信用のキーデバイスとして期待されている波長変換素子として、横方向導波路型の波長変換素子はこれまで酸化物強誘電体で精力的に研究されてきた。しかしながら、その非線形光学定数が比較的小さいために、変換効率の向上には数 cm の長尺化が必要となる。化合物半導体の大きな非線形光学定数と屈折率を駆使して、高屈折率差導波路を折畳むことにより超小型なフットプリントを有する波長変換素子の実現が期待できる。これまで申請者は直線導波路と 1/2 円弧導波路を接続した U 字折畳み導波路を提案してきた。位相整合条件を決定するために、円弧導波路において有限要素法の直線導波路近似を用いて計算してきた。本研究中 GaAs/空気ブラッグ反射導波路の計算を行う上で、2次元 FDTD の方がより精度よく位相整合条件を決定することが明らかとなった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、ブラッグ反射導波路モードと全反射導波路モード間の位相整合を利用し、面発光型での初めての位相整合波長変換を実現することである。具体的には、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯基本波から第二高調波を発生させる素子设计了。面発光型での高効率な位相整合波長変換素子の理論予測を目指した。

(2) 申請者がこれまで提案した U 字折畳み導波路を実用化に向けて、2次元 FDTD 法を用いて精度良く再計算し、位相整合条件と変換効率を再算出した。具体的には、AlGaAs/AlOx U 字折畳み導波路において波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯基本波からの第二高調波を発生させる素子を

設計した。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に提案した面発光型波長変換素子の模式図を示す。本素子は GaAs(111)B 基板上に入射光と波長変換光を伝搬させる GaAs コアを同心円状に空気層クラッドと GaAs クラッドで交互に取り囲んだ円筒導波路で構成されている。入射光に対しては GaAs コアと空気第一層目の全反射導波路として機能し、波長変換光に対しては GaAs と空気層の周期クラッドのブラッグ反射導波路として機能する。ブラッグ反射導波路では放射モードの光を閉じ込めることができるため、ブラッグ反射導波路の等価屈折率が全反射導波路の等価屈折率より小さくできる。

位相整合達成可否を検討するために、有限要素法ソフトウェアを用いて、基本波 $1.55 \mu\text{m}$ の全反射モードと第二高調波波長 $0.775 \mu\text{m}$ のブラッグモードの等価屈折率を計算した。両等価屈折率が一致する条件が位相整合条件と呼ばれ、第二高調波強度が飛躍的に向上する。

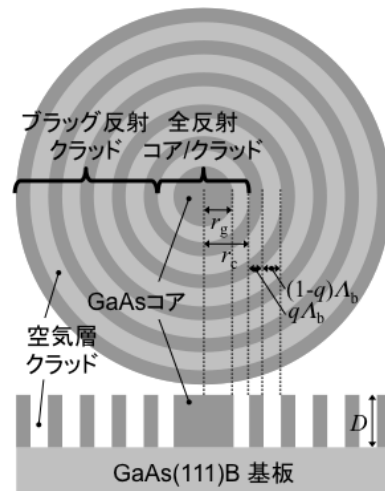


図 1. GaAs/空気 GaAs ブラッグ反射導波路型波長変換素子の模式図(上: 平面図, 下: 断面図)

(2) U 字折畳み導波路の位相整合特性を精度良く計算するために、2次元 FDTD ソフトウェアをもちいて、U 字導波路における基本波と第二高調波の伝搬様子を計算した。U 字導波路は、直線導波路と円弧導波路の導波路幅が同じ均一 U 字導波路と、幅の異なる不均一 U 字導波路の 2 つについて検討した(図 2)。円弧導波路の入射端から入射端までの各波の数を数え正確に位相を決定した。位相差がなくなったときに、直線導波路から発生した第二高調波が U 字導波路で発生した第二高調波と位相を揃えて足し合わされるため、位相整合が達成される。また、図 2 に示すように、

U字導波路の各点にモニターを設置し、入射した光との重なり積分を各モニターで算出することで透過率を算出した。

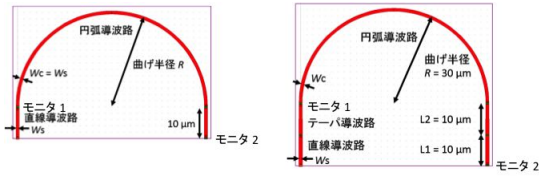


図2. 2次元 FDTD 法を用いて設計した U 字導波路の模式図. (左)均一幅 U 字導波路と(右)不均一幅導波路. 赤線が AlGaAs 導波路それ以外空気. 緑四角がモニターを表す

4. 研究成果

(1) GaAs/空気円筒ブラッグ導波路において、全反射モードの等価屈折率はおよそ 2 であり GaAs 全反射導波路のコアにほぼ閉じ込められている。一方、ブラッグモードでは等価屈折率は 1 以下となった。これはこのモードが放射モードに起因しているために、閉じ込めている空気の屈折率よりも小さくなることを示している。したがって、GaAs/空気のブラッグ円筒導波路では位相整合でできないことを示している。さらに、空気層クラッドを AlGaAs などの比較的屈折率の大きい材料を用いることで位相整合を達成できる可能性がある。

(2) 均一 U 字導波路における基本波と第二高調波の位相差 $\Delta\phi$ と第二高調波の透過率を算出した。図 3 に結果を示す。導波路幅 1.0 mm と 1.2 mm でともに、円弧導波路の半径を小さくすることで位相差を調整することができ、位相整合条件(点線と交わる点)が達成できることがわかる。ただし、第二高調波の透過率は、位相整合円弧半径での透過率は 0.6 程度となり、かなり低い。従って、均一幅導波路では、位相整合を達成できるものの、高効率な波長変換は実現できないことが明らかとなった。この結果は、これまでの有限要素法の直線導波路近似からは導けない新しい結果である。

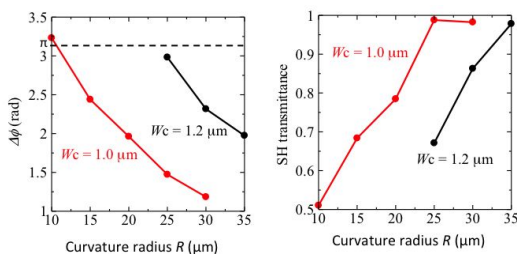


図3. 均一 U 字導波路における円弧導波路半径に対する位相差(左)と第二高調波透過率(右)導波路幅が 1.0 μm(赤線)と 1.2 μm(黒線)を示す。

一方、不均一導波路について同様な計算を行った。第二高調波の透過率を大きくするために、直線導波路幅を 1.04 mm と円弧半径を

30 μm と固定し、円弧導波路幅を変化させて位相差 $\Delta\phi$ を計算した。その結果を図 4 に示す。円弧導波路幅を変化することで位相差を調整することができる。円弧導波路幅 1.007 μm で位相整合を達成した。この時の第二高調波透過率は 0.9843 であり、十分高い。

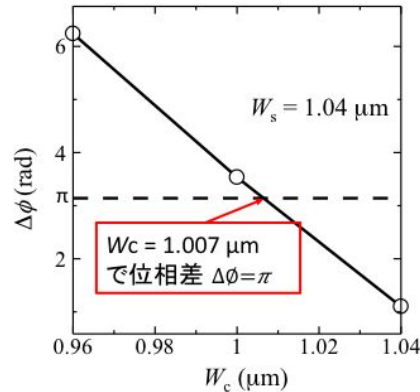


図4. 不均一導波路の円弧導波路幅に対する位相差

この導波路の変換効率を上記の結果と結合波方程式に基づき計算した。計算した導波路は直線導波路長 1.0 mm, 直線導波路幅 1.04 μm, 円弧導波路幅 1.007 μm, 円弧半径 30 μm を持つ AlGaAs/AlOx U 字折畳み積層反転導波路である。図 5 に示すように導波路長(相互作用長)を長くするにつれて変換効率は大きくなる。16 回折り返すことで、相互作用長を 18.7 mm にまで長尺化可能であり、理論第二高調波変換効率は 47000 %/W であった。既報値の最高効率 2400 %/W よりも約 20 倍大きいことがわかる。

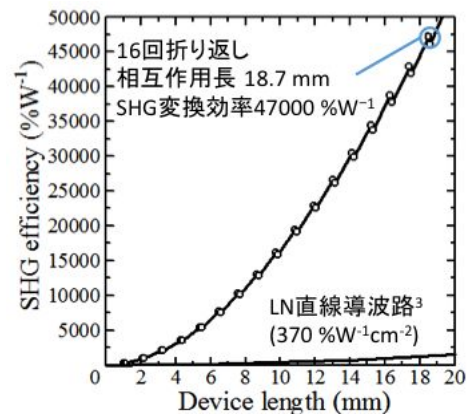


図5. 不均一 U 字折畳み導波路の変換効率の素子長依存性(白丸が U 字折畳み導波路、黒実線は LiNbO3 直線導波路の既報告値)

図 6 に設計した AlGaAs/AlOx U 字折畳み導波路の模式図を示す。フットプリントサイズは 1.1 mm 四方で、導波路長(相互作用長)は 18.7 mm である。先ほどの既報値の最高効率を有する導波路長 5 cm と比べると、50 分の 1 までの超小型化が可能である。

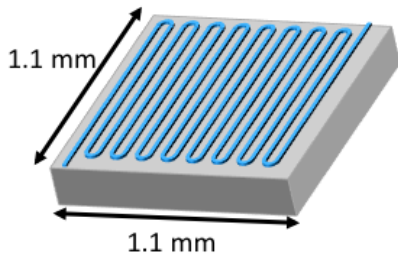


図 6. 設計した U 字折り畳み導波路の模式図

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 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

中村勇貴, 松下 智紀, 近藤 高志, AlGaAs/Al_xO_y 高屈折率差 U 字導波路における第二高調波発生^の位相整合特性, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 13 日, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県・平塚市).

中村勇貴, 松下智紀, 恩田友美, 庄司一郎, 近藤高志, 高次モード位相整合 AlGaAs/Al_xO_y 反転積層高屈折率差導波路の作製, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 19 日, 同志社大学京田辺キャンパス (京都府・京田辺市).

T. Matsushita, Y. Nakamura, S. Matsumoto, T. Onda, I. Shoji and T. Kondo, Fabrication of AlGaAs/Al_xO_y waveguides with inversion-stacked core structure for higher-order modal phase matching devices, The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), 2013 年 7 月 3 日, Kyoto (JAPAN).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.castle.t.u-tokyo.ac.jp/achievement/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下 智紀 (MATSUSHITA, Tomonori)
 東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号: 50554086

研究者番号:

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし