

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760046

研究課題名（和文）超小型高効率ハイブリッド位相整合波長変換素子の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-compact and highly-efficient wavelength convertors based on hybrid-phase matching

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

研究成果の概要（和文）：直線導波路モード位相整合と曲げ導波路擬似位相整合を同時に達成した反転積層 AlGaAs/SiO₂ ハイブリッド位相整合素子は、導波路長 53.4 mm で変換効率が 47400 %/W であり、折り畳むことで 1.1 mm x 3.5 mm まで超小型化可能であることを数値計算にて示した。常温接合法を用いて導波路コア層に反転積層構造を有する AlGaAs/Al_xO_y 高屈折率差リブ導波路の作製に成功した。また、反転積層型 AlGaAs 波長変換素子を用いることでベクトルビームを発生させる波長変換素子を新たに提案した。

研究成果の概要（英文）：I have showed by numerical simulation that a hybrid modal-phase-matching and quasi-phase-matching wavelength convertor with laterally inverted core structure can achieve conversion efficiency as high as 47400 %/W in a 53.4-mm-long waveguide and be folded up into a 1.1 mm × 3.5 mm domain. By using surface activation bonding technique at room temperature, I have succeeded in fabricating high-index-contrast AlGaAs/Al_xO_y (AlAs oxidation layer) waveguides with laterally inverted core structure. And I have proposed a novel wavelength convertor with laterally inverted structure in order to generate frequency-doubled vector-beam.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：非線形光学

1. 研究開始当初の背景

化合物半導体波長変換素子は、化合物半導体が巨大な二次非線形定数と中赤外域における広大な透明領域を持つことから、次世代波長多重通信における光クロスコネクトを実現するだけでなく、分光の分野において待望久しい波長変換光源を実現するものとし

て期待されている。この素子の超小型化を実現すれば実用化に向けて飛躍を遂げる。高効率な波長変換のためには位相整合が不可欠であり、化合物半導体では周期的に空間反転構造を有する擬似位相整合が用いられてきた。しかしながら直線導波路のみをもつ擬似位相整合導波路では素子の小型化が困難で

あった。

そこで研究代表者は、化合物半導体の対称性を利用した曲げ導波路擬似位相整合に着目し、図 1 に示すような直線モード位相導波路と曲げ導波路擬似位相整合からなるハイブリッド位相整合素子を提案した。化合物半導体結晶の対称性から空間反転は[100]軸周りの 90° 回転と等価である。そこで、結晶を空間反転させるのではなく、光の伝搬方向を 90° 曲げることで擬似位相整合が達成できる可能性がある。一方、直線導波路では横高次モード位相整合を用い、横高次モードに起因するモードオーバーラップの低下を積層方向に空間反転した構造を導入することで補償する。この構造を導入することで、曲げ導波路擬似位相整合部ではコヒーレンス長を長くでき曲げ半径が数十マイクロメートルと大きくでき、曲げ導波路での放射損失と直線導波路と曲げ導波路結合部での結合損失を低減できる。したがって、ハイブリッド位相整合波長変換素子は小型で高効率なデバイスを実現することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、図 1 に示すような直線導波路モード位相整合と曲げ導波路位相整合の 2 つの位相整合を組み合わせた AlGaAs 高効率ハイブリッド位相整合波長変換素子を開発することである。具体的には、以下の 3 項目について研究した。

- (1) ハイブリッド位相整合波長変換素子の特性予測と設計
- (2) ハイブリッド位相整合波長変換素子の作製プロセスの確立
- (3) ハイブリッド位相整合波長変換素子の光学的評価

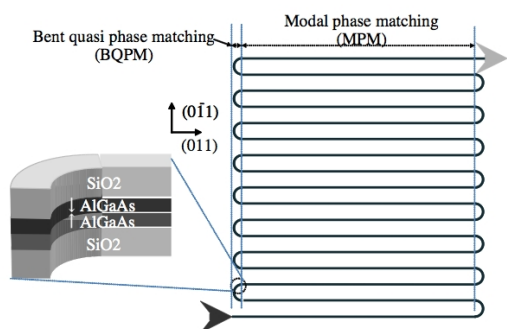


図 1. ハイブリッド位相整合波長変換素子の概略図

3. 研究の方法

- (1) ハイブリッド位相整合波長変換素子の特

性予測と設計

性能予測と設計は以下の 3 項目を有限要素法と結合波方程式に基づく数値計算を行った。

- ① 直線導波路モード位相整合と曲げ導波路擬似位相整合の同時達成

2 つの位相整合が一つのデバイス構造で達成しうるか、有限要素法を用いて等価屈折率を計算し、位相整合条件を計算した。曲げ導波路の等価屈折率には直線導波路近似を用いた。

- ② ハイブリッド位相整合素子の波長変換性能の予測

結合波方程式を直線導波路部と曲げ導波路部での基本波と第二高調波の電場振幅の大きさを計算し、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の基本波からの第二高調波強度を算出した。この際、曲げ導波路部の放射損失と直線導波路と曲げ導波路の結合部での結合損失を考慮した。

- ③ 折り畳むことによる小型化

ハイブリッド位相整合素子は曲げ導波路を有しているため、折り畳むことで 2 次元的に導波路を作成可能である。折りたたみ高価によってどの程度ダウンサイズ可能か計算した。

- (2) ハイブリッド位相整合波長変換素子の作製プロセスの確立

クラッド材料として SiO_2 (屈折率 1.4) を考えていたが、 SiO_2 同士の接合が困難であったため $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (屈折率 3.0) または AlOx (屈折率 1.6) を採用した。

- ① 反転積層 AlGaAs 低屈折率差導波路の作製プロセスの確立

常温接合法を用いて反転積層 AlGaAs 構造の作製プロセスの確立を行った。その直線リッジ導波路の作製プロセスを確立した。

- ② 反転積層 AlGaAs/AlOx 高屈折率差導波路の作製プロセスの確立

前の①のプロセスに AlGaAs 熱酸化のプロセスを追加し、そのプロセス条件の確立を目指した。

- (3) ハイブリッド位相整合波長変換素子の光学的評価

光学的評価は基本波 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の伝搬損失をファブリペロー法により評価した。

4. 研究成果

- (1) ハイブリッド位相整合波長変換素子の

特性予測と設計

① 直線導波路モード位相整合と曲げ導波路擬似位相整合の同時達成

図2に幅 $0.5 \mu\text{m}$ の $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{SiO}_2$ リブ型直線導波路と曲げ半径 $2.2 \mu\text{m}$ を持つリブ型直線導波路のモード分散を示す。基本波は波長 $1.55 \mu\text{m}$ の TE_{00} モード、第二高調波は波長 $0.775 \mu\text{m}$ の TM_{01} モードであり、図2右側にそれぞれのモードプロファイルを示す。この図から、直線導波路ではコア膜厚 $0.3047 \mu\text{m}$ においてモード位相整合が達成される。また、同じコア膜厚でコヒーレンス長が $1/4$ 円弧に等しい擬似位相整合条件を満足することも明らかとなった。したがって、直線導波路モード位相整合と曲げ導波路位相整合が同じ構造(導波路幅とコア膜厚)で達成される。

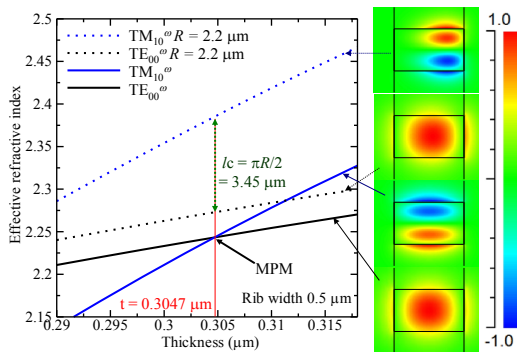


図2. $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{SiO}_2$ モード分散と電場プロファイル

② ハイブリッド位相整合素子の波長変換性能の予測

幅 $1.1 \mu\text{m}$ 、曲げ半径 $37.2 \mu\text{m}$ と直線導波路長 1.07mm を持つ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{SiO}_2$ ハイブリッド位相整合素子は、導波路長 53.4mm で変換効率 $47400 \%/W$ を持つと算出された。理論変換効率は、既存の周期分極反転 LiNbO_3 直線導波路(約 $2000 \%/W@50 \text{mm}$)と比較すると、ほぼ同じ長さで約20倍も大きい。

また、反転積層型 $\text{AlGaAs}/\text{SiO}_2$ 埋込導波路型波長変換素子を用いることでベクトルビームと最低次モードの基本波との間でモード位相整合が達成できることを確認した。

③ 折り畳むことによる小型化

②と同じ素子を折り畳むことで長さ 53.4mm の素子を $1.1 \text{mm} \times 3.5 \text{mm}$ まで超小型化することができる。既存の周期分極反転 LiNbO_3 直線導波路と比較して、この素子は $1/50$ まで集積化可能である。

(2) ハイブリッド位相整合波長変換素子の

作製プロセスの確立

① 反転積層 AlGaAs 低屈折率差導波路の作製プロセスの確立

② 反転積層 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$ 高屈折率差導波路の作製プロセスの確立

図4に反転積層 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$ 高屈折率差リブ型導波路の作製プロセスを示す。分子線エピタキシー法で GaAs 基板の上に $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ コアと $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 酸化層を成長した。常温表面活性接合法を用いて、積層反転 AlGaAs 構造を作製した。クエン酸エッチャントを用いて上層の GaAs 基板を除去した。さらに塩酸系エッチャントを用いてリブを作製し、水蒸気雰囲気中の酸化炉で加熱酸化を行った。①と②のプロセスの違いは酸化の有無だけである。

図5に作製した反転積層 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$ 高屈折率差リブ型導波路の断面 SEM 写真を示す。2種類の幅 ($1.3 \mu\text{m}$ と $3.2 \mu\text{m}$) をもつ反転積層 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$ リブ型直線導波路の作製に成功した。劈開にも十分耐える強度で接合できていることがわかる。これらの導波路の理論規格化変換効率は、それぞれ $6000 \%/W\text{cm}^2$ と $17000 \%/W\text{cm}^2$ であった。この規格化変換効率は既存の LiNbO_3 導波路と比較すると、20倍以上大きい。また、図には示していないが AlGaAs 低屈折率差導波路の作製にも成功した。

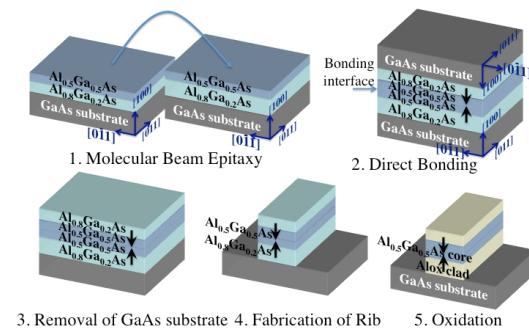


図4. 反転積層 $\text{AlGaAs}/\text{AlOx}$ 高屈折率差リブ型導波路の作製プロセス

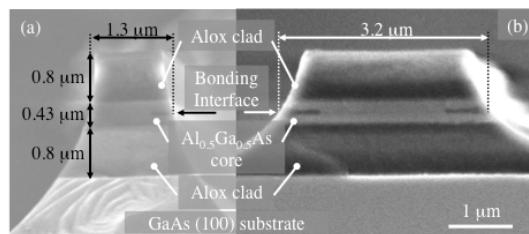


図5. 作製した反転積層 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlOx}$ 高屈折率差導波路の断面 SEM (a)幅 $1.3 \mu\text{m}$ (b)幅 $3.2 \mu\text{m}$

(3) ハイブリッド位相整合波長変換素子の

光学的評価

作製した反転積層 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 低屈折率差導波路の導波実験を行ったところ、導波路からのニアフィールドパターンを確認した。マルチモードを示す複数ピークが観察されたため損失を決定するにはいたらなかった、基本波のファブリペロー干渉パターンを確認することができた。

今後の課題として、波長変換特性の評価と曲げ導波路さらにハイブリッド構造の作製があげられる。

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 4 件)

1. 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 Laser and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), 2013/07/03, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan

2. T. Matsushita and T. Kondo, “Design of inversion-stacked AlGaAs waveguiding wavelength convertors for higher-order-mode beam generation,” Topological lightwave synthesis and its applications (T-LWS 2012), 2012/07/05, Chiba University, Chiba, Japan (Invited)

3. T. Matsushita, K. Murakami, K. Hara, Ichiro Shoji, and T. Kondo, “Fabrication of AlGaAs waveguides with laterally inverted core structure for higher-order modal phase matching devices,” 8th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2012), 2012/05/29, Huangshan City, Anhui, China

4. T. Matsushita and T. Kondo: “Hybrid modal-phase-matched and bent-quasi-phase-matched wavelength conversion in AlGaAs/SiO₂ rib-type zigzag waveguides,” Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO2011), 2011/5/5, Baltimore, Maryland, USA.

[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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし