

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360028

研究課題名(和文)半導体波長変換デバイスの電流注入による高機能化の研究

研究課題名(英文) Study on high-performance current-injected semiconductor-based wavelength conversion devices

研究代表者

近藤 高志 (KONDO, Takashi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60205557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：光学的非線形性を有する半導体材料を用いたレーザー光波長変換デバイスの高性能化に取り組んだ。周期空間反転GaAs/AlGaAsを用いた疑似位相整合(QPM)導波路素子の高効率化へ向けて、素子作製条件の最適化をおこなって伝搬損失の低減を図り、これまでで最小の伝搬損失(1.3 dB/cm @ 1.55 μ m)を実現した。電流注入AlGaAs QPM素子について初めてシミュレーションをおこない、現実的な電流注入条件の下で正味の利得が実現できること、その結果、極めて高い変換効率が達成可能であることを明らかにした。周期反転GaAs pn接合素子を初めて作製し、その電気特性、光学特性の評価をおこなった。

研究成果の概要(英文)：We have investigated high-performance wavelength conversion devices fabricated using semiconductors exhibiting quadratic optical nonlinearities. We have optimized process conditions for fabricating low-loss periodically-inverted GaAs/AlGaAs waveguiding quasi-phase-matching (QPM) devices in order to achieve higher conversion efficiencies. The obtained lowest propagation loss was 1.3 dB/cm at the wavelength of 1.55 μ m. We have performed a numerical simulation on performances of current-injected AlGaAs QPM devices for the first time. We have revealed that practical current densities lead to net gains and thus extremely high conversion efficiencies. We fabricated a periodically-inverted GaAs pn-junction device for the first time, and evaluated its electrical and optical properties.

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 MBE, エピタキシャル 波長変換 キャリア注入 副格子交換エピタキシー 高性能レーザー
導波路デバイス 疑似位相整合

1. 研究開始当初の背景

本研究の代表者らが研究開発を進めてきた化合物半導体の2次非線形光学特性を利用した導波路型波長変換デバイスは、その高効率性、小型堅牢であること、半導体レーザとのモノリシック集積化が可能であることなどの利点があり、既存のLiNbO₃などの強誘電体系非線形光学材料を用いた波長変換技術に革新をもたらすテクノロジーとして期待されている。半導体としての特長を活かすもう一つの重要なアプローチは、これまでに開発されてきた半導体ベース疑似位相整合(QPM)波長変換デバイスへの電流注入利得付与による格段の高効率化である。しかしながら、この魅力的な電流注入半導体QPMデバイスに関する具体的な検討はこれまでほとんどなされてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、半導体導波路型波長変換デバイスの最も重要な特徴である、電流注入による利得付与の可能性について実験・理論の両面から検討を加えることを目的とした。

3. 研究の方法

電流注入デバイス実現へ向けた前提条件として、まず線形損失の低減に取り組んだ。散乱等による線形損失を十分に低減しておかないと、電流注入によって生じる線形利得を十分に活かせないからである。また、1.55 μm 帯差周波発生(DFG)を念頭に置き、0.87 μm ポンプ光に対してバンド間遷移利得を与えるAlGaAsデバイスについて電流注入利得のシミュレーションをおこなった。また、周期空間反転GaAsのpn接合素子を初めて作製し、その電氣的・光学的特性の評価をおこなった。

4. 研究成果

(1) GaAs/AlGaAs QPM デバイスの低損失化

これまでの研究で、周期空間反転AlGaAs導波路デバイスの伝搬損失の主な原因はIII族原子のGaAs(100)表面上での異方性拡散に起因する段差形成と組成変調であることがわかっている。本研究では、中赤外光(波長3.4 μm)発生用のDFG(ポンプ波長1.064 μm, シグナル波長1.55 μm)素子を具体的なターゲットとして、MBE成長(KセルAs₄使用)時の基板温度の最適化をおこなった。図1に段差と伝搬損失(波長1.55 μm, TE偏光)の基板温度依存性を示す。基板温度460°Cで最低損失が得られることがわかった。高温側ではIII族原子の拡散長が長くなり段差と組成変調が大きくなって散乱損失が高くなっているのに対して、低温側では結晶性低下と欠陥の増加によって損失が増加しているものと考えられる。ここで得られた最低損失1.3 dB/cmは周期空間反転GaAs/AlGaAs導波路デバイスではこれまでで最小の値である。

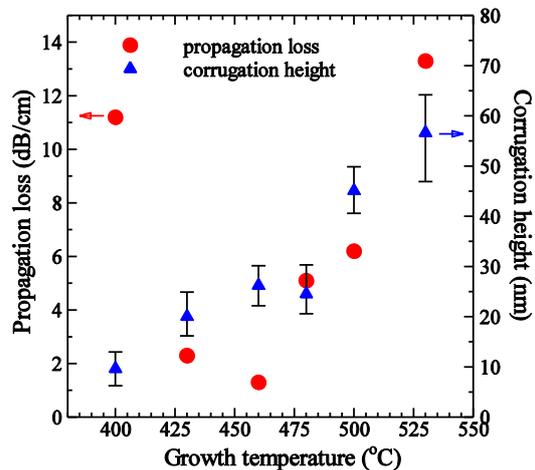


図1 GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 素子の伝搬損失の温度依存性

この最適基板温度で作製した周期空間反転GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As導波路デバイス(コア厚1.6 μm, QPM周期7.8 μm, デバイス長5.1 mm)を用いてDFG特性の評価をおこなった。得られたDFGチューニングカーブを図2に示す。規格化変換効率は3.9%/Wで、これは理論値とほぼ一致した。

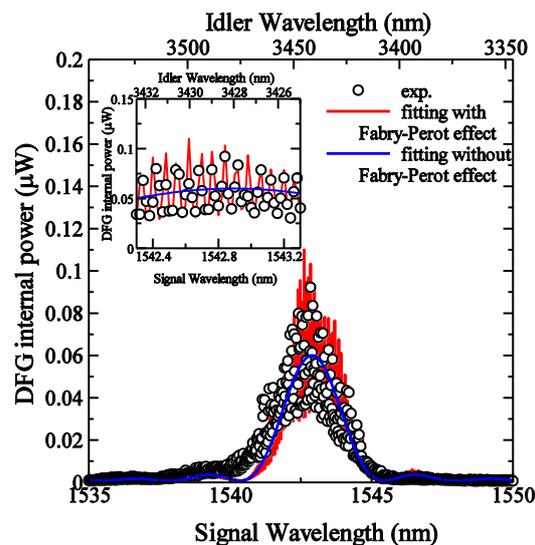


図2 GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 素子のDFGチューニングカーブ

また、周期空間反転GaAs(100)基板上的GaAs/AlGaAs MBE再成長時に形成される段差を低減するために、Asソースとしてバルブドクラッカーセルを用いたAs₂ソースによるMBE再成長に取り組んだ。通常のKセルを用いたAs₄ソースの場合と比較して、同じ基板温度でもGaの拡散長が減少して段差が小さくなることが確認された。これを用いることで、さらに低損失化が実現できるものと考えている。

(2) 電流注入デバイス(シミュレーション)

電流注入による線形光学利得が波長変換に及ぼす影響について、シミュレーションによって初めて定量的に評価した。コアはi-Al_{0.145}Ga_{0.855}As(厚さ1.5 μm)、クラッドはn-p-Al_{0.55}Ga_{0.45}Asのデバイスについて検討した。キャリア注入による利得・損失スペクトルと

波長変換効率の相互作用長依存性を計算した結果を図3に示す。注目すべきは正味利得発生時の変換効率の相互作用依存性で、図に示したように、ほぼ指数関数的な増幅に似た特性が表れることである。また、現実的な電流密度で、正の正味利得が得られ、極めて高い変換効率が達成できることも示すことができた。

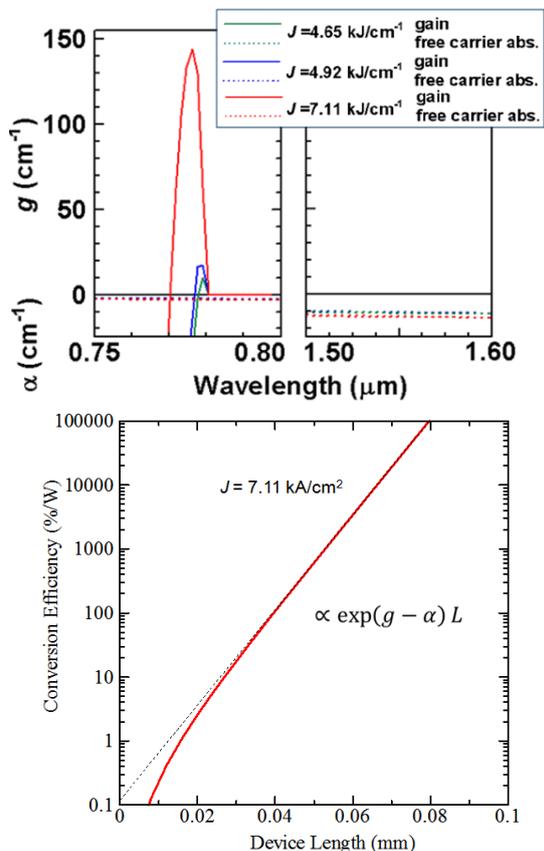


図3 電流注入 AlGaAs 素子の利得・損失スペクトルと変換効率のデバイス長依存性

(3) 周期空間反転 GaAs の電流注入

電流注入 QPM デバイス実現の第一歩として、周期空間反転 GaAs ダイオードの作製に初めて取り組んだ。周期空間反転 GaAs と一様反転 GaAs について pn 接合ダイオードを初めて作製し、その電気特性、光学特性の評価を通常の一様非反転 GaAs pn 接合ダイオードと比較しつつおこなった。その結果を図4に示す。一様反転 GaAs ダイオードは、同一条件で作製した一様非反転 GaAs ダイオードとほぼ同じ電圧・電流特性を示し、同程度の光学利得が得られた。しかしながら、周期空間反転 GaAs では正常な整流特性が得られなかった。また電流注入光学利得も得られなかった。顕微フォトルミネッセンス測定では周期空間反転素子でもある程度の強度のバンド端発光が得られているので、これは反転・非反転各ドメインに十分にキャリア注入がおこなえていないことが原因であると考えられる。現在のところ、反転・非反転ドメイン境界がなんらかの原因で電流パスになってしまっている

ものと推察している。

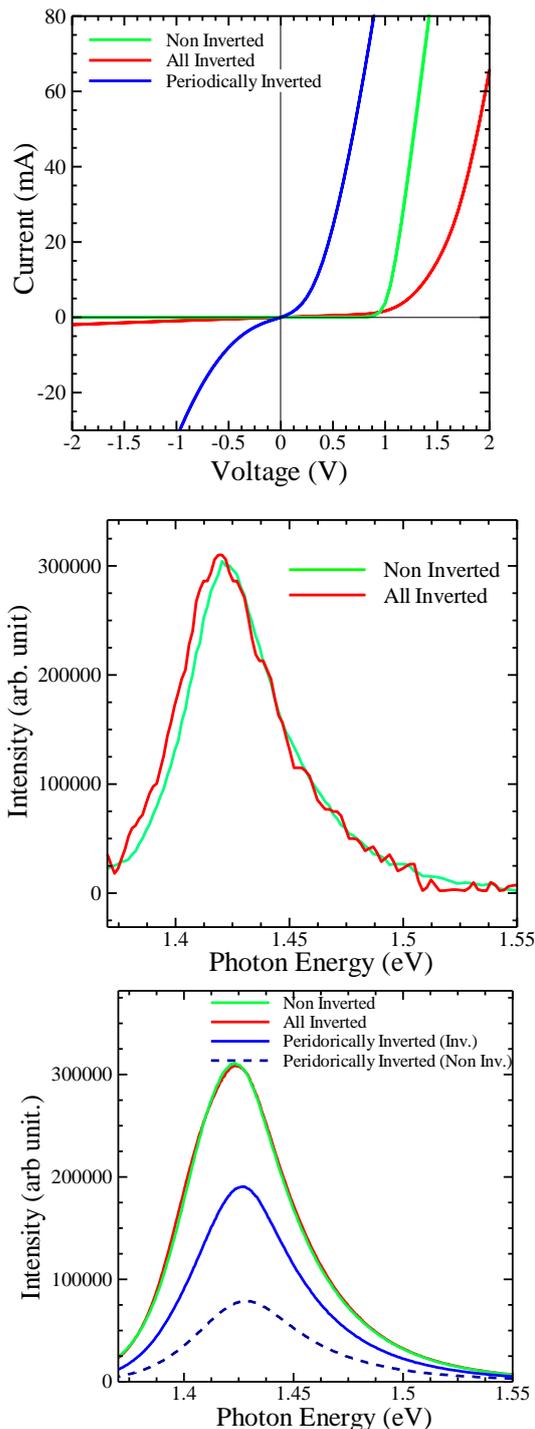


図4 一様非反転、一様反転、周期反転 GaAs pn 接合ダイオードの電圧・電流特性、EL スペクトルと PL スペクトル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- 1) T.-W. Kim, T. Matsushita, and T. Kondo, "Phase-matched second-harmonic generation in thin rectangular high-index-contrast AlGaAs waveguides," *Appl. Phys. Express* **4**, 082201-1--3 (2011). (査読あり)
DOI: 10.1143/APEX.4.082201
- 2) M. Abe, N. Awata, T. Matsushita, M. Hakamata,

K. Ozawa, R. Murakami, I. Shoji, and T. Kondo, "Accurate measurement of quadratic nonlinear-optical coefficients of zinc oxide," *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 2302--2396 (2012). (査読あり)
DOI: 10.1364/JOSAB.29.002392

[学会発表] (計 25 件)

- 1) T. Matsushita and T. Kondo, "Hybrid modal-phase-matched and bent-quasi-phase-matched wavelength conversion in AlGaAs/SiO₂ rib-type zigzag waveguides," *CLEO: Science and Innovations 2011*, May 1--6, 2011, Baltimore, USA (JThB90).
- 2) 松下智紀, 金泰雄, 近藤高志, "化合物半導体導波路を用いた波長変換素子の進展," 電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術時限研究専門委員会 (IPDA) 研究会「アクティブデバイスと集積化技術、一般「材料デバイスサマーミーティング」, 2011年6月30日, 機械振興会館 (Tech. Rep. of IEICE, OPE2011-19, 21--24 (2011)).
- 3) K. Amazutsumi, J. Ota, T. Matsushita, and T. Kondo, "Impact of photoelastic effect on phase-matching wavelengths in periodically-inverted AlGaAs waveguides," *Nonlinear Optics (NLO)*, July 17--22, 2011, Kauai, USA (NTuE3).
- 4) T. Matsushita, K. Iwamoto, J. Ota, and T. Kondo, "Periodic modulation of Al composition in a periodically-inverted AlGaAs waveguide," *Nonlinear Optics (NLO)*, July 17--22, 2011, Kauai, USA (NTuE4).
- 5) 近藤高志, "III-V 族化合物半導体材料とデバイス," 学振素材プロセッシング第 69 委員会第 2 分科会 (新素材関連技術) 第 65 回研究会「捨てられないものも使いよう: 毒性元素を利用する新しい機能性素材の開発」, 2011年7月27日, 名古屋大学.
- 6) 阿部真, 庄司一郎, 須田淳, 近藤高志, "バルク単結晶 GaN における電場誘起第 2 高調波発生," 2011 年秋季第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011 年 8 月 29 日--9 月 2 日, 山形大学 (1p-ZN-3).
- 7) 雨堤耕史, 金泰雄, 松下智紀, 近藤高志, "AlGaAs 擬似位相整合波長変換デバイスにおける結晶欠陥," 第 4 回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム, 2011 年 11 月 14 日, 名古屋キャッスルプラザホテル.
- 8) 阿部真, 栗田尚紀, 松下智紀, 庄司一郎, 近藤高志, "ZnO の 2 次非線形光学定数精密測定," 日本光学学会年次学術講演会 *Optics & Photonics Japan 2011*, 2011 年 11 月 28 日--30 日, 大阪大学 (29aG2).
- 9) 松下智紀, 吉田成輝, 太田順也, 近藤高志, "擬似位相整合 AlGaAs 導波路における Al 組成の 2 次元マッピング," 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日--18 日, 早稲田大 (16p-F4-4).
- 10) 阿部真, 庄司一郎, 須田淳, 近藤高志, "バルク単結晶 GaN における電場誘起第 2 高調波発生 II," 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日--18 日, 早稲田大 (16p-F4-5).
- 11) 雨堤耕史, 金泰雄, 松下智紀, 近藤高志, "MBE 成長周期空間反転 AlGaAs における {111}A 面欠陥," 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日--18 日, 早稲田大 (16a-A8-10).
- 12) T. Matsushita, S. Yoshida, J. Ota, and T. Kondo, "Influence of anisotropic diffusion of Ga and Al atoms during AlGaAs growth for periodically-inverted AlGaAs waveguides," *Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO2012)*, May 6--11, 2012, San Jose, USA (CTh3D.3).
- 13) T. Matsushita, K. Murakami, K. Hara, I. 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), May 27--30, 2012, Huangshan City, Anhui, China, (O3.1).
- 14) T. Matsushita and T. Kondo, "Design of inversion-stacked AlGaAs waveguiding wavelength convertors for higher-order-mode beam generation," *Topological light-wave synthesis and its applications (T-LWS 2012)*, July 5--6, 2012, Chiba University, Chiba, Japan, (5A-3) (Invited).
- 15) 吉田成輝, 花嶋香織, 松下智紀, 近藤高志, "周期空間反転 GaAs/AlGaAs 導波路の MBE 再成長における異方性拡散効果の温度依存性," 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 2012 年 9 月 11 日--14 日, 愛媛大・松山大 (11a-J-6).
- 16) 松下智紀, 村上航規, 原健二郎, 庄司一郎, 近藤高志, "高次モード位相整合反転積層 AlGaAs 導波路型波長変換素子の設計と作製," 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 2012 年 9 月 11 日--14 日, 愛媛大・松山大 (12p-C5-5).
- 17) S. Yoshida, K. Hanashima, I. Ohta, T. Matsushita, and T. Kondo, "Influence of anisotropic surface diffusion on AlGaAs MBE regrowth of periodically-inverted GaAs/AlGaAs waveguides," *The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2012)*, September 23--28, 2012, Nara, Japan, (MoP-66).
- 18) 吉田成輝, 花嶋香織, 太田生馬, 松下智紀, 近藤高志, "周期空間反転 GaAs/AlGaAs 導波路の伝搬損失の成長温度依存性," 第 60 回応用物理学学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27 日--30 日, 神奈川工科大 (28p-B3-8).
- 19) 栗田尚紀, 雨堤耕史, 松下智紀, 近藤高志, "MBE 成長空間反転 AlGaAs の CuPt 型オーダーリング," 第 60 回応用物理学学会春季

- 学術講演会, 2013年3月27日--30日, 神奈川工科大 (29a-PB7-21).
- 20) S. Yoshida, K. Hanashima, I. Ohta, T. Matsushita, and T. Kondo: “Reduced propagation losses in quasi-phase-matched GaAs/AlGaAs waveguides,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2013), June 9--14, 2013, San Jose, USA (JW2A.35).
 - 21) T. Matsushita, Y. Nakamura, S. Matsumoto, T. Onda, I. Shoji, and T. Kondo: “Fabrication of AlGaAs/Alox 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), June 30--July 4, 2013, Kyoto, Japan (WA3-3).
 - 22) 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/Alox 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16日--20日, 同志社大学 (19p-A8-4).
 - 23) 檜崎亮太, 松下智紀, 近藤高志: “As₂を用いた MBE 成長による周期空間反転 GaAs の段差形成抑制,” 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月17日--20日, 青山学院大学 (18a-E11-1).
 - 24) 吉田成輝, 松下智紀, 近藤高志: “周期空間反転 GaAs/AlGaAs 導波路における 3.4 μm 帯差周波発生の変換効率の精密評価,” 2014年3月17日--20日, 青山学院大学 (18a-F8-12).
 - 25) 大塚温, 松下智紀, 近藤高志: “周期空間反転 AlGaAs 導波路における QPM SHG の偏光特性,” 2014年3月17日--20日, 青山学院大学 (18a-F8-13).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 高志 (KONDO, Takashi)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 60205557

(2) 連携研究者

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