

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19206011

研究課題名(和文) 非線形光・電子集積回路の基盤技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on basic technologies for nonlinear optoelectronic integrated circuits

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

研究成果の概要(和文)：副格子交換エピタキシー技術をベースにした GaAs/AlGaAs 導波路型 QPM 波長変換デバイスの高品質化に成功し、最低損失 2.7 dB/cm (GaAs 導波路@1.55 μm)、SHG 最高変換効率 34 %/W (2.96 mm 長 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 導波路@1.55 μm 基本波) を達成した。低温 MBE 再成長がキーテクノロジーであるが、さらなる高性能化のためには(111)A 面欠陥と組成変調の発生を今後克服する必要がある。HIC-BPM, ZQPM, TQPM といった新規位相整合法を取り入れた AlGaAs 導波路型高性能波長変換デバイスを新たに提案した。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in fabricating high-quality GaAs/AlGaAs waveguiding QPM wavelength conversion devices based on the sublattice reversal epitaxy technique, and have achieved the lowest propagation loss of 2.7 dB/cm (GaAs waveguide @1.55 μm) and the highest SHG conversion efficiency of 34 %/W (2.96-mm-long Al_{0.5}Ga_{0.5}As waveguide @1.55 μm fundamental). Low-temperature MBE regrowth is essential for this achievement. Formation of (111)A dislocations and spatial compositional modulation should be suppressed in order to achieve further improvements. We have also proposed novel high-performance AlGaAs waveguiding devices incorporating new phase matching techniques (HIC-BPM, ZQPM and TQPM).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	20,500,000	6,150,000	26,650,000
2008年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

研究分野：半導体フォトニックデバイス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用工学・量子光工学

キーワード：非線形光学、波長変換、半導体レーザー、擬似位相整合、化合物半導体、分子線エピタキシー、シリコンフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者らが研究開発を進めてきた化合物半導体を用いた擬似位相整合(QPM)導波路型波長変換デバイスは、その高効率性、小型化、半導体レーザー等とのモノリシック集積化や電流注入による特性制御の可能性など、多くの利点があり、従来の LiNbO₃ 等の

強誘電体系非線形光学材料を用いた波長変換技術を大きく変革するテクノロジーとして期待されている。しかしながら、化合物半導体導波路型 QPM デバイスには作製プロセス上の課題が山積しており、プロセス改善による低損失化、高効率化を実現しなければならない。また、電流注入による線形利得をこ

のデバイスに組み込むためには、デバイス中の欠陥を極力低減する必要があるが、副格子交換エピタキシー法を核としたプロセスによって作製されたデバイスの結晶性や欠陥の素性などはまったく明らかとなっていない。それに加えて、Si 基板上の電子回路と集積化した非線形光・電子集積回路を実現するためには、特殊なヘテロエピタキシーが必要であり、これの検討もまったく未着手の状態である。こうした問題点を解決するために本研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問題点を解決すべく、以下の研究課題に取り組んだ。副格子交換エピタキシー法によって作製できる AlGaAs 系周期空間反転導波路について、そのプロセスを見直して低損失化・高効率化を実現することを第 1 の目的とした。また、各種の微視的評価法を用いて周期反転 AlGaAs/GaAs デバイスの内部構造を詳細に調べて、その結晶性等がどのようにになっているのかを明らかにすることを目指した。これと並行して、2 光子吸収による端面破壊の問題を回避するため、GaP 副格子交換エピタキシーの開発と、それを用いた AlGaP 系導波路型 QPM デバイスの作製にも取り組んだ。さらに、QPM 以外の手法を用いたまったく新しいタイプの化合物半導体導波路型波長変換デバイスの提案とその作製、特性評価もあわせて進めた。また、Si 基板上への集積化を念頭に置いて、Si 基板上 Ge 中間エピタキシャル膜の上での GaAs MBE 成長についても検討した。

3. 研究の方法

(1) GaAs/AlGaAs QPM デバイス

GaAs/Ge/GaAs 副格子交換エピタキシー法に基づくデバイス作製プロセスの改善に取り組んだ。特に、周期反転テンプレート上の GaAs/AlGaAs MBE 再成長時の基板温度について重点的に検討を加えた。改善したプロセスを用いて、3 μm 帯発生用 GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As QPM DFG デバイスと 1.55 μm 帯波長変換に応用可能な Al_{0.5}Ga_{0.5}As/Al_{0.55}Ga_{0.45}As QPM SHG デバイスを作製し、その伝搬損失と波長変換効率の評価をおこなった。また、透過電子顕微鏡 (TEM) 観察、精密 X 線回折 (XRD) 測定、カソードルミネッセンス (CL) 測定等によって、これらの周期反転デバイス中の結晶の特性を詳細に評価した。

(2) GaP 副格子交換エピタキシー

GaP/Si/GaP 副格子交換エピタキシー法に基づく AlGaP 系導波路型 QPM デバイス作製プロセスの開発に初めて取り組んだ。また、このプロセスを用いて AlGaP 周期反転導波路を作製し、QPM パラメトリック蛍光の測定をおこなった。

(3) 新規位相整合法を用いた高性能デバイス 結晶の周期空間反転を用いない新しいタイプの位相整合法について検討をおこない、高屈折率差 (HIC) 扁平矩形導波路での副屈折率位相整合 (BPM)、4 回回反対称性を利用したジグザグ導波路擬位相整合 (ZQPM)、空間反転積層構造を持つ横方向擬位相整合 (TQPM) を新たに提案した。いずれもシミュレーションによってその波長変換特性に検討を加えた。また、HIC-BPM デバイスについては実際にその作製プロセスを開発し、作製したデバイスの SHG 特性を評価した。TQPM デバイスについては貼り合わせ法を用いたデバイス作製プロセスについて検討した。

(4) GaAs/Ge/Si ヘテロエピタキシー

Si (100) 基板上に CVD 成長した Ge エピタキシャル膜を疑似基板として使い、その上での GaAs MBE 成長について検討をおこない、APD フリーシングルドメイン成長の可否等について調べた。

4. 研究成果

(1) GaAs/AlGaAs QPM デバイス

GaAs (100) 面上での III 族原子異方性拡散に起因する再成長時の段差形成が導波損失の低下を阻んでいることを確かめたうえで、MBE 再成長時の基板温度を下げることで低損失化・高効率化を図った。

GaAs (コア) / Al_{0.1}Ga_{0.9}As (クラッド) QPM デバイスではこの戦略は極めて有効で、基板温度 430°C で最低損失 2.7 dB/cm (@1.55 μm) が達成できることを示した。これは周期反転化合物半導体導波路の数値としては最良のものである。また、このデバイスを用いて 1.064 μm ポンプ光と 1.55 μm 帯シグナル光の DFG による 3.4 μm 帯光発生実験をおこない、2.96 mm 長のデバイスで内部変換効率 3.7 %/W を実現した。これは既存の LiNbO₃ デバイスでは 16 mm 長に相当する非常に高い数値である。

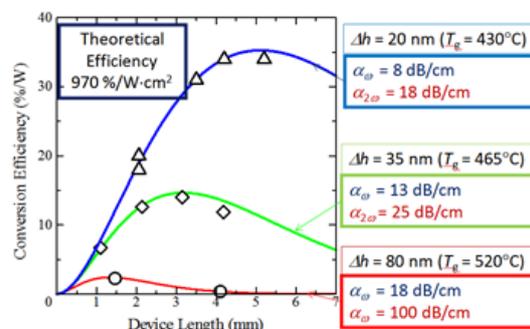


図 1 AlGaAs QPM SHG デバイスの変換効率

同じ戦略 (低温成長) で 1.55 μm 帯波長変換用 Al_{0.5}Ga_{0.5}As (コア) / Al_{0.55}Ga_{0.45}As (クラッド) QPM SHG デバイスを作製した。基板

温度低下に伴い伝搬損失が低下し変換効率が上昇することが示された(図1)。基板温度430°Cで作製した4.2 mm長デバイスで1.55 μm帯SHGにおいて34%/Wという極めて高い内部変換効率を達成した。このデバイスの伝搬損失は基本波に対して8 dB/cm、第2高調波に対して18 dB/cmであった。これは上記のGaAs系デバイスと比べてまだかなり大きい、その原因は後に述べる組成変調であろうと考えている。

上記のデバイス作製プロセスで得られる低温MBE成長周期空間反転AlGaAsについて、TEM観察、逆格子マッピングを含むXRD測定、CL測定をおこなった。TEM、XRDにより、高Al組成周期反転AlGaAs中には(111)A面上を伝搬する面状欠陥(その多くはツインである)が、反転ドメイン、非反転ドメインのどちらにも存在することが初めて明らかとなった。また、CL測定の結果、周期空間反転AlGaAs層には図2左のような組成変調が存在することがあきらかとなった。これは、GaAs(100)面上でのIII属原子の異方性拡散とGa・Alの拡散長の差が原因である。また、反転ドメイン・非反転ドメイン境界(アンチフェイズ境界APD)に非発光性再結合中心が高密度に存在する(図2右)こともわかった。

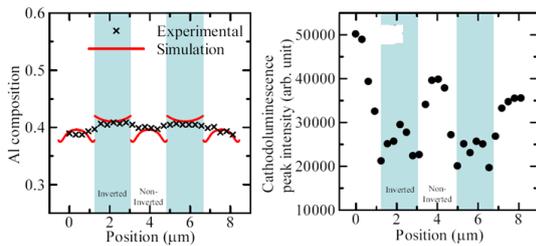


図2 周期反転AlGaAsの組成変調とCL強度分布

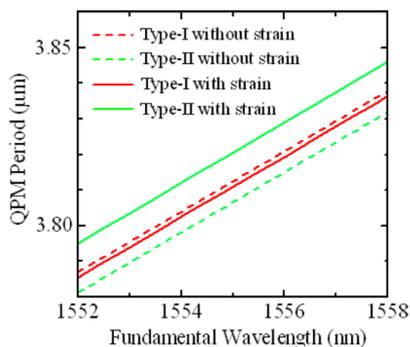


図3 光弾性効果の位相整合波長への影響

また、精密XRD測定の結果、周期反転GaAs/AlGaAsエピタキシャル層はいずれもほぼ完全なスードモルフィック成長をしており、わずかな格子不整合に起因した歪が存在することがあきらかとなった。この歪によって、光弾性効果を介して導波路コア/クラッド層に屈折率の異方性が導入され、それが位

相整合波長に影響を与えていることもあきらかとなった(図3)。これは実測されたType-I、Type-II位相整合波長の大小関係とコンシステントである。

(2) GaP副格子交換エピタキシー

GaP/Si/GaP(100)副格子交換エピタキシーが可能であることを確かめた上で、これを用いて周期空間反転GaP/AlGaP QPMデバイスを作製した(図4)。2.96 mm長のデバイスで1.064 μmポンプ光に対してQPMパラメトリック蛍光(波長1.6 μm帯と3.1 μm帯)が発生することを確認した。出力光強度から見積もった規格化変換効率は16%/W cm²(導波損失を差し引いた値)で、これは理論値とよく一致した。AlGaAs系と比較して低損失化が難しく、現状では30 dB/cm程度のロスが残っている。

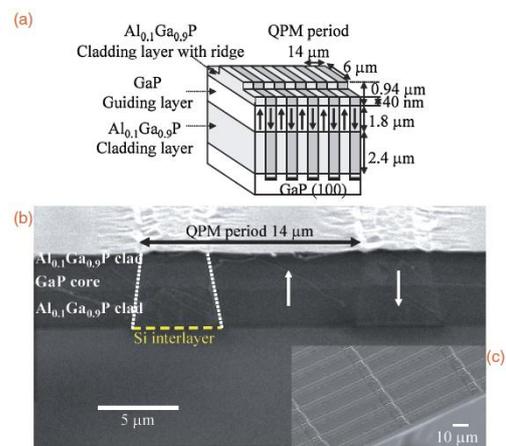


図4 周期反転AlGaP QPMデバイス

(3) 新規位相整合法を用いた高性能デバイス

扁平矩形断面構造を有するHIC AlGaAs/AIOx導波路における大きな構造複屈折性を位相整合に利用できることを初めて見だし、この原理に基づいた高効率波長変換HIC-BPMデバイスを新たに提案した。1.55 μm帯SHGにおいて10⁴%/W cm²を上回る超高効率化が実現できることをシミュレーションによって示した。

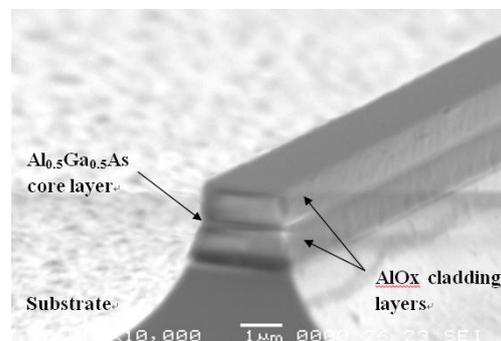


図5 AlGaAs/AIOx HIC-BPMデバイス

また、図5に示すHIC-BPMデバイス

(Al_{0.5}Ga_{0.5}As コア層厚 0.103 μm, コア幅 ~ 1.8 μm) を実際に作製し, その SHG 特性の評価をおこなった。基本波波長 1.55 μm 帯で BPM が達成されていることを初めて確認した (図 6)。もちろんこれは世界初の業績である。

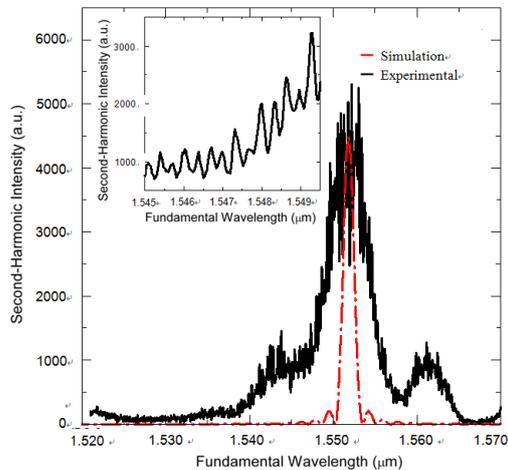


図 6 1.86 μm 幅 AlGaAs/AlOx デバイスの HIC-BPM SHG

これ以外に, 伝搬方向の 90° 回転に伴う非線形光学定数符号反転を利用した ZQPM デバイスと, 高次モードを利用したモード位相整合において重なり積分低下による低効率化を避ける空間反転積層型 TQPM デバイスを新たに提案し, そのパフォーマンスをシミュレーションによって評価した。TQPM デバイスについては, ウエーハ貼り合わせ技術を用いた作製プロセスの開発にも取り組み, 一定の見通しを得るに至った。

(4) GaAs/Ge/Si ヘテロエピタキシー

Si(100)微傾斜基板上 CVD 成長 Ge エピタキシャル層を疑似基板として用い, GaAs の MBE 成長をおこなった。事前の基板処理等の最適化により, APD のないシングルドメイン成長が可能であることをあきらかにした。XRD 測定より, じゅうぶん高い結晶性を有していることもわかった。しかしながら, 成長した GaAs エピタキシャル層の副格子配列はさらなる副格子交換が不可能なものになってしまっている (したがって, この上での QPM デバイス作製が現状ではできない) ことが明らかとなった。しかしながら, 上記の HIC-BPM デバイス等の作製は可能であり, 非線形光・電子集積回路のプラットフォームとして有望であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- 1) T.-W. Kim, T. Matsushita, and T. Kondo, “Phase-matched second-harmonic generation in thin rectangular high-index-contrast AlGaAs waveguides,” to be published in Appl.

Phys. Express. (査読有り)

- 2) T. Matsushita, I. Ohta, and T. Kondo, “Quasi-phase-matched parametric fluorescence in a periodically inverted GaP waveguide,” Appl. Phys. Express **2**, 061101 (2009). (査読有り)
- 3) J. Ota, W. Narita, I. Ohta, T. Matsushita, and T. Kondo, “Fabrication of periodically-inverted AlGaAs waveguides for quasi-phase-matched wavelength conversion at 1.55 μm,” Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 04C110 (2009). (査読有り)
- 4) H. Ishikawa and T. Kondo, “Birefringent phase matching in thin rectangular high-index-contrast waveguides,” Appl. Phys. Express **2**, 042202 (2009). (査読有り)
- 5) 近藤高志, 太田生馬, 松下智紀, “中赤外領域半導体擬似位相整合波長変換デバイス,” レーザー研究 **36**, 58 (2008). (査読有り)

[学会発表] (計 35 件)

- 1) 松下智紀, 近藤高志, “化合物半導体を用いた波長変換デバイス,” 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 「非線形光学 50 周年に分極反転はどこまで来たか?」シンポジウム, 2011 年 3 月 25 日, 神奈川工科大.
- 2) 松下智紀, 近藤高志, “モード位相整合と曲げ導波路擬似位相整合を達成した AlGaAs 導波路型ハイブリッド位相整合波長変換素子,” 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月 26 日, 神奈川工科大.
- 3) T. Matsushita, T.W. Kim, and T. Kondo, “Phase-matched second-harmonic generation in high-index contrast AlGaAs waveguides,” 3rd International Conference on Silicon Photonics, January 24, 2011, Ghent University, Belgium.
- 4) 金泰雄, 石川裕士, 松下智紀, 近藤高志, “高屈折率差 AlGaAs/AlOx 扁平コア導波路の複屈折位相整合第 2 高調波発生,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics in Japan (OPJ2010), 2010 年 11 月 10 日, 中央大学.
- 5) 近藤高志, “半導体擬似位相整合波長変換デバイス,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics in Japan (OPJ2010), 2010 年 11 月 9 日, 中央大学.
- 6) T. Matsushita, J. Ota, I. Ohta, and T. Kondo, “Quasi-phase-matched second-harmonic generation in high-quality AlGaAs waveguides pumped at 1.55 μm,” The 2010 Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science XXVI (LS) Conference, October 28, 2010, Rochester, New York, USA.

- 7) K. Hanashima, I. Ohta, J. Ota, T. Matsushita, and T. Kondo, "Quasi-phase-matched difference-frequency generation at 3.4 μm in high-quality GaAs/AlGaAs waveguides," 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), September 22, 2010, Tokyo, Japan.
- 8) 松下智紀, 石川裕士, 近藤高志, "高効率 AlGaAs ジグザグ導波路疑似位相整合波長変換素子の設計," 2010 年秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎大学.
- 9) 金泰雄, 石川裕士, 松下智紀, 近藤高志, "AlGaAs 高屈折率差導波路複屈折位相整合波長変換素子の作製," 2010 年秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎大学.
- 10) 雨堤耕史, 太田順也, 松下智紀, 近藤高志, "周期反転 AlGaAs 導波路における格子不整合の位相整合波長への影響," 2010 年秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎大学.
- 11) T.W. Kim, H. Ishikawa, T. Matsushita, and T. Kondo, "Fabrication of thin rectangular high-index-contrast AlGaAs waveguides for efficient wavelength conversion," 4th EPS-QEOD Europhoton Conference, September 1, 2010, Hamburg, Germany.
- 12) T. Matsushita, H. Ishikawa, and T. Kondo, "Highly-efficient quasi-phase-matched wavelength conversion in GaP/AlOx zigzag waveguides," Integrated Photonics Research, Silicon and Nano Photonics (IPR), July 26, 2010, Monterey, USA.
- 13) T. Kondo, "Infrared wavelength conversion in semiconductor waveguides," 15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2010), July 7, 2010, Sapporo, Japan.
- 14) K. Amazutsumi, J. Ota, and T. Kondo, "Strain-induced birefringence and phase-matching characteristics of a periodically-inverted AlGaAs waveguide," 2010 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2010), June 23, 2010, Toyama, Japan.
- 15) T. Kondo, "Wavelength conversion via quadratic nonlinear optical effects in semiconductor waveguides," 2nd International Conference on Silicon Photonics, January 22, 2010, Boston, USA.
- 16) 花嶋香織, 太田順也, 太田生馬, 松下智紀, 近藤高志, "疑似位相整合 AlGaAs 導波路型デバイスによる波長 3 μm 差周波発生 III," 2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009 年 9 月 11 日, 富山大学.
- 17) T. Kondo, "Epitaxial growth of III-V compound semiconductors with spatial inversion structures---applications to quasi-phase-matched nonlinear optical devices," International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec 2009), August 27, 2009, Berlin, Germany.
- 18) T. Kondo, "Wavelength conversion in semiconductor waveguiding devices," Nonlinear Optics (NLO 2009), July 15, 2009, Honolulu, USA.
- 19) T. Kondo, "Semiconductor guided-wave wave-length conversion devices," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2009), June 4, 2009, Baltimore, USA.
- 20) 松下智紀, 石川裕士, 近藤高志, "半導体曲げ導波路疑似位相整合波長変換素子の高効率化," 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 31 日, 筑波大.
- 21) 松下智紀, 太田生馬, 近藤高志, "周期空間反転 GaP/AlGaP 導波路における疑似位相整合パラメトリック蛍光," 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 31 日, 筑波大.
- 22) 花嶋香織, 太田順也, 太田生馬, 松下智紀, 近藤高志, "疑似位相整合 AlGaAs 導波路型デバイスによる波長 3 μm 差周波発生 II," 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 31 日, 筑波大.
- 23) 太田順也, 太田生馬, 松下智紀, 近藤高志, "疑似位相整合 AlGaAs 導波路型デバイスにおける 1.5 μm 帯 SHG の高効率化," 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 31 日, 筑波大.
- 24) 片山竜二, 福原裕次郎, 近藤高志, 尾鍋研太郎, "MBE 法を用いた GaN 格子極性反転構造の作製," 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 「不透明な時代を切り拓く分極反転光デバイス」シンポジウム, 2009 年 3 月 30 日, 筑波大.
- 25) T. Kondo, T. Matsushita, J. Ota, K. Hanashima, T.-W. Kim, I. Ohta, and H. Ishikawa, "Wavelength conversion via quadratic nonlinearities in compound semiconductors," 1st International Conference on Silicon Photonics, January 23, 2009, Tokyo, Japan.
- 26) 近藤高志, "半導体導波路型波長変換デバイス," 2008 年度第 3 回光材料・応用技術研究会「非線形光学とフォトニック結晶—新領域技術の現状と展望—」, 2008 年 11 月 21 日, 京都.
- 27) T. Matsushita, I. Ohta, and T. Kondo, "Fabrication of periodically-inverted GaP/AlGaP waveguides for quasi-phase matching nonlinear optical devices," IEEE Nanotechnology Materials and Devices

Conference 2008, October 21, 2008, Kyoto, Japan.

- 28) J. Ota, W. Narita, I. Ohta, T. Matsushita, and T. Kondo, "Quasi-phase-matched second-harmonic generation in AlGaAs waveguides pumped at 1.5 μm ," 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008), September 25, 2008, Tsukuba, Japan.
- 29) 松下智紀, 太田生馬, 近藤高志, "GaP/AlGaP リッジ導波路型疑似位相整合波長変換素子の作製," 2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会, 2008年9月4日, 中部大学.
- 30) 太田順也, 太田生馬, 成田渉, 松下智紀, 近藤高志, "周期反転 AlGaAs 導波路における疑似位相整合第二高調波発生," 2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会, 2008年9月4日, 中部大学.
- 31) 太田順也, 松下智紀, 太田生馬, 近藤高志, "短周期空間反転 AlGaAs 導波路デバイスの作製," 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月28日, 日大船橋.
- 32) 石川裕士, 太田生馬, 近藤高志, "高屈折率差半導体扁平矩形導波路における複屈折位相整合," 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月28日, 日大船橋.
- 33) 太田生馬, 松下智紀, 近藤高志, "疑似位相整合 GaAs 導波路による波長 3 μm 差周波発生," 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月28日, 日大船橋.
- 34) 松下智紀, 太田生馬, 石川裕士, 太田順也, 近藤高志, "半導体疑似位相整合波長変換デバイスの進展," 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 「横展開を始めた分極反転光デバイス」シンポジウム, 2008年3月27日, 日大船橋.
- 35) I. Ohta, T. Matsushita, J. Ohta, and T. Kondo, "Quasi phase matched parametric fluorescence in high-quality GaAs/AlGaAs waveguides," Advanced Solid-State Photonics, January 27, 2008, Nara.

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) 研究分担者

和田 一実 (WADA KAZUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：30376511
(H19→H20：連携研究者)

(3) 連携研究者

和田 一実 (WADA KAZUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：30376511