

博士論文概要

論文題目

1550nm 帯多重積層量子ドット構造の超高速全光信号処理集積素子への応用に関する研究

Study on the application of 1550nm-band highly-stacked quantum dots structure to ultra-fast all-optical signal processing integrated devices

申請者

松本	敦
Atsushi	MATSUMOTO

電気・情報生命専攻 機能フォトニクス研究

2014 年 7 月

本論文は、将来の超高速・低消費電力な全光ネットワークを構築する上でキーと考えられる全光信号処理デバイスの一つとして、全光論理ゲート集積素子の実現のための基礎研究の成果をまとめたものである。

近年の様々な広帯域サービスの普及による大規模な通信需要の増大とともに、年率 1.4 倍の伸びで日本の通信トラフィック量が急激に増加している。ネットワークの中継ノードでは電子回路によるルータが使われており、そこでは伝送された光信号を電気信号に一旦変換し、信号処理をした後、再度光信号に変換・転送処理をする。今後の一層のトラフィックの増大を考慮すると、さらなる信号処理・転送能力の向上が必要となり、ネットワークの高度化・大容量化が必須となっている。電子ルータ内の CPU 単体の処理速度の向上や並列化などにより一層の高速化が可能であるが、消費電力の著しい増大が懸念されている。このような通信におけるエネルギー問題に対し、全て光信号の状態のまま処理することにより、超低消費電力で超大容量・高速通信を可能とする次世代の全光スイッチングネットワークの確立が社会的に必須となっている。その実現には新たな光デバイスの創出・実用化が急務であり、そのために革新的な材料技術・作製技術、そしてシステムへの応用技術の開発が必要と考えられる。

全光スイッチングネットワークを実現するには、波長変換、ラベル認識、パターンマッチングなどの光信号処理が必要であるが、光論理ゲート素子を組み合わせることにより上記のような機能を実現でき、さらに大規模に集積し、組み合わせることでフリップフロップや、加算器などの高機能化が可能である。そこで本論文では全光論理ゲート素子を用いた光信号処理に注目し、単一の半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor Optical Amplifier) とリング共振器フィルタを集積させたデバイス構造の全光論理ゲート素子を新たに提案し、このデバイスの有用性を数値解析により明らかにした。また、1550 nm 帯の超高速な信号に対して動作させるため、未だ報告例の少ない InP (311) B 基板を使用した 1550nm 帯多重積層量子ドット (QD: Quantum Dot) SOA を作製し、高利得かつ高速動作可能であることを実証した。また、リング共振器フィルタのようなパッシブデバイスを集積化させるための量子ドット組成混晶化 (QDI: QD Intermixing) 技術を確立し、これらの研究が全光信号処理集積デバイス実現に資することを明らかにした。本論文の内容を以下のような章構成に従い論述する。

第一章では、全光信号処理に関する従来報告例を示し、研究開発状況について説明した。近年の通信ネットワークにおける情報量の増加とそれに伴うネットワーク機器における消費電力の増大に対して、次世代の全光ネットワーク構築によりそれらの課題の解決が期待されている。本論文では、そのためのキーとなる全光信号処理用光デバイスに注目した。ネットワークの中継ノードにおける電子処理を電気信号に変換せず、光信号のまま処理する研究が様々な研究機関で行われ

ており、これらの報告例から解決すべき課題を明らかにした。そして、本論文では新たに光論理ゲート素子を提案し、このデバイスの全光信号処理における意義とその研究目的について明らかにした。また、本論文の構成と第二章以降の内容の概要についても述べる。

第二章では、光信号処理デバイスの一例である波長変換素子への SOA の応用について述べ、その SOA 内におけるキャリアダイナミクスに関してレート方程式と伝達行列法による数値解析を用いて明らかにした。また、SOA の高速応答化手法として外部注入光であるアシスト光による効果を検討し、SOA を用いた波長変換デバイスへの設計指針を示した。SOA の解析では従来利得スペクトルを近似的に放物線近似により表現し計算することが多かったが、本研究では擬フェルミ準位を素子内の光強度に応じて逐次計算し、スペクトルホールバーニングを考慮して利得スペクトルを算出することで、より正確な利得スペクトルを反映できる点が特徴である。この方法を用いて、アシスト光による SOA 内のキャリアの振る舞いとその高速応答化を明らかにし、一例として、InGaAsP/InP マイケルソン干渉計型波長変換素子にアシスト光を用いて 10 Gb/s NRZ 信号で約 15 dB の良好な消光比で動作することを示した。

第三章では、コンパクトで高速動作が可能な光論理ゲート素子を実現するために、単一の SOA とリング共振器を InP 基板上に集積し、SOA の相互利得変調 (XGM: Cross Gain Modulation) 及び四光波混合 (FWM: Four Wave mixing) とリング共振器のフィルタ特性を利用することで、XNOR、AND、NOT、NOR 等のゲート動作が可能な光論理ゲート素子を新たに提案した。また、数値解析により、その有用性を明らかにした。従来、光論理素子には光ファイバの非線形性を用いたものや、相互位相変調により複数の SOA をマッハツェンダ干渉計の構成で用いるもの等の報告がある。しかし、光ファイバは大きさの観点から集積化には課題があり、マッハツェンダ干渉計では同一特性の SOA を用いる必要がある点で実現が難しく、本提案素子はこれらの点を解決し、さらに本提案素子を複数用いることで、ビットマッチングやヘッダ識別処理などの光信号処理に応用出来る点が特徴である。この光論理ゲート素子は第二章で述べた波長変換技術を応用したものであるが、その数値解析手法を QD 構造に発展・応用させて用いることにより、160 Gb/s という超高速な RZ 信号に対し非常に良好な論理動作をすることを明らかにし、この提案素子の有用性を示した。

第四章では、QD-SOA のデバイス作製とその特性評価について述べた。超高速な光信号処理デバイスの実現に向け、1550nm 帯での動作や超高速動作することを示す必要があるが、この問題を解決するために InP(311)B 基板を用いた歪補償

技術による QD 成長ウェハを用いた。このウェハは、InP 系組成で量子効果の発現に優れたドット状の QD 構造が得られ、かつ、20 層以上の多層・高密度 QD 構造も可能である。QD-SOA のその高速動作性や利点については、GaAs 基板上に成長した 1300nm 帯で動作する QD-SOA により既に数多く報告されているものの、InP 系による 1550nm 帯で動作する QD-SOA の報告例は非常に少ない。InP 系では QD の成長は難しく、量子細線的な構造の量子ダッシュ (QDash: Quantum Dash) 構造になってしまうことがその要因である。本論文では、実際に QD-SOA を作製し、1550nm 帯で高利得が得られることを実証した。また、InP (311) B 基板上の QD-SOA におけるキャリア遷移時間を評価し、QD 内の上のエネルギー準位から基底準位に遷移するキャリア遷移時間が 1ps 程度であることを示し、400Gb/s 程度の超高速な RZ 信号においても動作が可能であることを実験的に示した。これらを明らかにすることは未だ報告例がなく、学術的な観点から重要であると考えられる。

第五章では、パッシブ素子であるリング共振器フィルタを QD-SOA と同一基板上に集積させる技術について述べた。集積化技術には種々の方法があるが、特に量子井戸でよく使用される集積化技術である組成混晶化の手法をまだ非常に報告例の少ない 1550nm 帯 QD 構造に適用した QDI 技術を確立した。本論文で採用した組成混晶化の方法は、ICP-RIE 装置を用いた Ar プラズマの照射によるダメージングと急速加熱法により実現するため、非常に簡易的であり、一般的な装置で作製可能であることも大きな特徴の一つである。この QDI 技術により、QD の発光波長を 150 nm 程度短波長化させ、1550nm 帯の光に対し十分透明化させることが出来ることを実証した。そして、QDI を用いて実際にリング共振器フィルタを作製し、透過コントラスト 9 dB のフィルタ機能を有することを示し、光信号処理デバイスへの集積化にこの技術が有用であることを明らかにした。

第六章では、全光信号処理集積デバイスや光論理ゲート素子実現に向けた QD-SOA とリング共振器フィルタの集積化に関して述べた。前章までで明らかにし、実証してきた技術を光論理ゲート素子へ応用し、その際の課題についてもまとめ、全光信号処理集積デバイスの作製指針を示した。

最終の第七章では本論文で述べた内容を総括した。本論文で実証した InP(311)B 基板を用いて 1550nm 帯で動作する QD-SOA とその高速動作性について、改めてその意義を述べるとともに、光信号処理デバイスへの集積に非常に有用な QDI 技術の重要性を述べ、本論文で行った研究が超高速全光ネットワーク実現に向けた光信号処理集積デバイスの創出のために非常に有用であることをまとめた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 松本 敦 印

(2014 年 12 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	○ <u>A. Matsumoto</u> , A. Matsushita, Y. Takei, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, K. Utaka, “Intermixing of InP-Based Quantum Dots and Application to Micro-Ring-Resonator Wavelength-Selective Filter for Photonic Integrated Devices,” Applied Physics Express, vol. 7, pp. 092801-1 - 092801-3, 2014.
論文	○ <u>A. Matsumoto</u> , K. Kuwata, A. Matsushita, K. Akahane, and K. Utaka, “Numerical Analysis of Ultra-Fast Performances of All-Optical Logic-Gate Devices Integrated with InAs QD-SOA and Ring Resonators,” IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 49, No.1 & 2, pp. 51-58 (2013).
論文	○ <u>A. Matsumoto</u> , K. Nishimura, K. Utaka, and M. Usami, “Operational Design on High-Speed Semiconductor Optical Amplifier With Assist Light for Application to Wavelength Converters Using Cross-Phase Modulation”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 42, No. 3, pp. 313-323 (2006).
論文	K. Yoshioka, E. Miyazaki, K. Utaka, K. Uchida and <u>A. Matsumoto</u> , “Michelson Interferometer-Type Wavelength Converter Integrated with Multimode Interference Coupler; Fundamental Characteristics”, Japanese Journal of Applied physics, Vol. 43, No. 6A, pp. 3424-3428 (2004).
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , Y. Takei, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, “Femto-Second Optical Pulse Response of 1550nm-Band QD-SOA for Ultra-Fast All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, P-46, 2014.
国際会議	Y. Takei, T. Ozaki, <u>A. Matsumoto</u> , K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, “Highly-Stacked Quantum Dot Intermixed Waveguide for All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, P-45, 2014.
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , Y. Takei, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Experimental and Calculated Gain Characteristics of 1550nm-Band QD-SOA Grown on InP(311)B Substrate for Ultra-Fast All-Optical Logic Gate Devices”, Proc. of the OptoElectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT2014), WE9D (2014).
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , Y. Takei, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Gain Characteristics and Femto-Second Optical Pulse Response of 1550nm-Band QD-SOA for Ultra-Fast All-Optical Logic Gate Devices”, Proc. of Internatinal Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2014), Th-B2-4 (2014).

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	Y. Takei, <u>A. Matsumoto</u> , A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Micro-Ring-Resonator Wavelength-Selective Filter using Highly-Stacked Quantum Dot ntermixed Waveguide”, Proc. of Internatinal Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2014), Mo-B2-4 (2014).
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , Y. Takei, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima and K. Utaka, “Fundamental Characteristics of 1550nm-Band 20-Layer-Stacked QD-SOA Grown on InP(311)B Substrate for All-Optical Logic Gate Device”, Proc. of The 18th Microoptics Conference(MOC2013), H18 (2013).
国際会議	Y. Takei, <u>A. Matsumoto</u> , A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima and K. Utaka, “Polymer Wavelength-Selective Filter Using High-mesa Structure Directly-Coupled Double Micro-Ring Resonators”, Proc. of The 18th Microoptics Conference(MOC2013), H10 (2013).
国際会議	A. Matsushita, <u>A. Matsumoto</u> , K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Intermixing of Highly-Stacked InAs/InGaAlAs Quantum Dots Grown on InP (311)B Substrate by SiO2 Sputtering and Annealing Technique”, Proc. of International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2013), TuD4-5 (2013).
国際会議	A. Matsushita, K. Kuwata, <u>A. Matsumoto</u> and K. Utaka, “Wavelength Selective Filter Using High-mesa Structure Polymer Micro-Ring Resonators”, Proc. of The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), 4E3-2 (2012).
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , K. Kuwata, K. Akahane and K. Utaka, “Proposal and Numerical Analysis of Ultra-fast Optical Logic Devices with Integrated InAs QD-SOA and Ring Resonators”, Proc. of Internatinal Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2011), pp.414-417 (2011).
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , K. Utaka, T. Asai, M. Ozaki, and T. Minagawa, “Analysis on dynamic behavior of Michelson Interferometer-type wavelength converter with multi-mode interference coupler (MIWC-MMIC)”, Proc. of 9th OptoElectronics Communication Conference / 3rd International Conference on Optical Internet (OECC/COIN2004), 16E2-1 (2004).
国際会議	T. Yazaki, R. Inohara, K. Nishimura, M. Usami, <u>A. Matsumoto</u> , and K. Utaka, “Spectral chirping suppressed wavelength conversion at 10 Gb/s using cross gain modulation in semiconductor optical amplifier with injection of counter-propagating assist light”, Proc. of IEEE 19th International Semiconductor Laser Conference(ISLC2004), pp. 101-102 (2004).

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	○ <u>A. Matsumoto</u> , K. Nishimura, K. Utaka, and M. Usami, “Simulation of Fast-Recovery Cross-Modulation Characteristics in Semiconductor Optical Amplifier with Assist Light”, Proc. of 8th OptoElectronics Communication Conference (OECC2003), 16F4-3 (2003).
国際会議	K. Yoshioka, K. Uchida, <u>A. Matsumoto</u> , K. Miyazaki, and K. Utaka, “Fabrication of Michelson Interferometer- type Wavelength Converter Integrated with Multi-Mode Interference Coupler (MIWC-MMIC)”, Proc. of IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference, WA6, (2002).
国内会議 【招待講演】	○ <u>松本 敦</u> 、宇高 勝之、「1550 nm 帯量子ドット半導体光増幅器の高速応答特性」、第6回超高速フォトニクスシンポジウム、pp.23-27, 2014.
国内会議	○ <u>松本 敦</u> 、武井 勇樹、松下 明日香、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「超高速全光論理ゲート素子に向けた InP(311)B 基板に成長させた 1550 nm 帯 QD-SOA の利得特性とピエゾ効果の検討」、電子情報通信学会光通信システム研究会、信学技報、pp. 87-91、2014.
国内会議	○ <u>松本 敦</u> 、武井 勇樹、松下 明日香、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「1550nm 帯多層積層 QD-SOA のフェムト秒パルス応答特性」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18a-F9-8 (2014) .
国内会議	武井 勇樹、松下 明日香、 <u>松本 敦</u> 、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「多重積層量子ドット組成拡散導波路を用いたリング共振器型波長選択フィルタ」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-PA2-11 (2014) .
国内会議	○ <u>松本 敦</u> 、武井 勇樹、松下 明日香、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「全光論理ゲート素子に向けた InP(311)B 基板を用いた 1550 nm 帯 20 層積層 QD-SOA の基本特性」、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-21、2013 年.
国内会議	○ <u>松本 敦</u> 、松下 明日香、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「超高速全光論理ゲート素子に向けた多重積層 QD-SOA の基礎特性」、第 60 回 応用物理学会春季学術講演会、29p-B3-5、2013 年.
国内会議	○ <u>松本 敦</u> 、松下 明日香、桑田 圭一郎、赤羽 浩一、宇高 勝之、「超高速 (160Gb/s) 光論理ゲート素子のためのトンネル注入電流構造多重積層 QD-SOA の数値解析による検討」、2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、17p-F4-11 (2012) .
その他	<u>松本 敦</u> 、H26 年度科研費若手研究 (B)、「ICP Ar Intermixing による量子ドットレーザ集積光デバイスの研究」、平成 26~平成 27.
	国際会議 (査読有り) 1 件 (共著)、(査読なし) 1 件 (共著)
	国内会議 14 件 (うち、共著 6 件を含む)