

博士論文審査報告書

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

まつもと 松本	あつし 敦
MATSUMOTO	Atsushi

電気・情報生命専攻 機能フォトニクス研究

2014年 12月

近年の広帯域サービスの普及により、日本の通信トラフィック量が年率約 1.4 倍で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ルータが使われており、そこでは光ファイバにおいて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・転送処理がされる。今後の一層のトラフィックの増大に対応するために、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図られているが、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、光信号のままに処理することにより超低消費電力で大容量・高速通信を可能とする次世代全光ネットワークの確立が期待されている。その実現には新たな光機能デバイスの創出が急務であり、そのために革新的な材料技術・作製技術、そしてシステム応用の開発が必要と考えられる。全光ネットワークを実現するには、高速光スイッチ、波長変換、ラベル認識、光メモリなどの光信号処理が必要であるが、中でも光論理ゲート素子は信号のルーティング判定に不可欠なレベル認識などの機能を実現することができ、さらに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全光論理ゲート素子を新たに提案し、これを 1550 nm 帯の超高速な信号に対して動作させるため、これまで報告例の少ない InP(311)B 基板上に成長した 1550nm 帯 InAs/InAlGaAs/InAlAs 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解析的及び実験的に示している。また、リング共振器フィルタのような受動デバイスを集積化させるための QD 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ている。

本論文はその一連の成果をまとめたものである。以下に各章ごとにその成果の概要を述べ、評価を加える。

第 1 章「序論」では、次世代超高速ネットワークの低消費電力化に向けての全光信号処理デバイスの重要性を述べ、本論文で新たに提案した集積光論理ゲート素子の目的と意義を明らかにしている。その際、大容量光ファイバ通信波長帯での超高速動作の達成のために、InP(311)B 基板上成長 1550nm 帯多重積層 QD-SOA 及びその光集積デバイス化技術の意義について示している。

第 2 章「光論理ゲート素子用 SOA の高速動作指針の理論解析」では、本研究のテーマである QD-SOA とリング共振器を集積した超高速光論理ゲート素子の理論的基礎を示している。まずその基本構成を提案し、超高速ラベル認識などで重要な機能である XNOR、AND 等の論理ゲートの、SOA の非線形効果である相互利得変調 (XGM: Cross Gain Modulation) 及び四光波混合 (FWM: Four Wave mixing) を用いた動作原理を説明している。そしてその実現のための基礎部品で

ある SOA について、素子内部のキャリア及びフォトンの動特性、そしてそれに基づく光増幅特性に関して、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ている。その際、申請者はより正確な利得スペクトルを反映できる手法として、擬フェルミ準位の素子内の光強度に応じた逐次計算、スペクトルホールバーニングを考慮した利得スペクトルを導入した方法を提案している。そして、そのプログラムを用いて、外部注入光（アシスト光）による SOA の高速応答化の効果を検討し、一例として、InGaAsP/InP マイケルソン干渉計型波長変換素子において 10 Gb/s NRZ で高速動作することを示している。さらに 1550nm 帯 QD-SOA について同手法で解析を行い、利得回復時間がアシスト光無しで約 7ps までの超高速応答が可能である事を示している。この結果は光ネットワークの超高速化の一つの指針である 160Gb/s 動作が可能であることを示しており、QD-SOA の有するポテンシャルの高さを示したという事で評価に値する。

第 3 章「QD-SOA を用いた光論理ゲート素子の超高速動作に向けた設計指針」では、申請者が提案した QD-SOA とリング共振器による集積光論理ゲート素子について、超高速論理動作に向けた素子設計の指針を与えている。そのために、QD-SOA については第 2 章で得られた XGM 及び FWM 特性を高速フーリエ変換 (FFT) により波長領域に展開して、リング共振器の透過スペクトルを与える伝達関数との演算を行い、逆 FFT により出力光のアイパターンを求めるプログラムを新たに構築して、デバイス特性評価及びそれに基づいた最適なデバイス構造や動作条件を提示している。その結果、一定の非線形効果を得るための素子長や入力光強度、さらに注入電流などの重要な知見を得ている。そして二重リング共振器構成において、共振器長差や導波路間結合係数の最適化により透過帯域の平坦化かつ最適帯域幅化により 160Gb/s においても消光比が約 17dB、アイ開口率 98% の良好な超高速動作が可能である事を示している。これらの値は現実的なものであり、提案した光論理ゲート素子実現への指針を与えた意義は極めて大きい。

第 4 章「多重積層 QD 構造 SOA の作製と特性評価」では、実際に QD-SOA を作製し、特性評価を行った成果についてまとめている。1550nm 帯での超高速動作のために、InP(311)B 基板を用いた歪補償技術により 20 層以上の多層・高密度化が可能な QD 構造に着目し、作製条件の最適化により約 35dB の高利得や非線形特性が得られることを示した。その際、利得の偏光依存性に関する興味深い現象を実験的に見出しており、基板面方向にも依存した歪みが影響したピエゾ効果との仮説を立て、吸収スペクトルに関する実験結果や波動関数の重なりの影響から論じている。これら QD-SOA の物理的考察は、歪み補償多重積層 QD 構造の本質的な特性を明らかにする点で評価に値する。さらに、申請者が独自に考案したフェムト秒光源を用いた短パルス応答測定法により、QD 内のキャリア遷移時間が 1ps 程度であることを示している。この結果は、InP(311)B 基板上の歪み補償 QD-SOA が、400Gb/s 程度の超高速動作も可能であることを実験的に示している

ことで、その意義は大きい。

第5章「多重積層 QD 成長ウエハのモノリシック集積化技術の検討」では、リング共振器のような受動素子を QD 構造の組成混晶化(QDI)により形成し、QD との集積化技術の開発について述べている。誘導性結合プラズマエッチング(ICP-RIE)法を用いた Ar プラズマの照射による欠陥導入と急速加熱法により実現する方法であり、一般的な装置で簡易に作製可能であることが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が可能な事を実証した。そして、実際にリング共振器フィルタを作製し、透過コントラスト約 9dB 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ことは大きな評価に値する。

第6章「光論理ゲート素子集積化に向けた検討」では、QD-SOA 及び QDI による集積デバイスへの課題と展開について述べている。特に ICP-RIE による欠陥導入時に不可避免的に導入されるウエハのエッチングが与える影響の低減化策や、光論理ゲートの更なる展開について指針を与えている点は有意義である。

第7章「結論」において、以上の議論を総括した上で本論文の結論を述べ、今後の研究課題について述べる。

以上を要約するに、本論文は低消費電力全光ルーティングに重要な機能である 1550nm 帯超高速光論理ゲート素子として、InP(311)B 基板上に成長した多重積層 QD-SOA とリング共振器の集積素子を提案するとともに、新たに開発した解析手法により 160Gb/s の超高速動作が可能であることを示し、そして実際に QD-SOA を作製して約 35dB の高利得特性を実証した。さらに受動素子の集積化のための QDI 技術を開発し、リング共振器を作製してその有効性を実証した。これらの成果は多重積層 QD 構造の超高速光信号処理デバイスへの展望を開くものであり、次世代高度情報化社会構築に向けて光デバイスの面から多大な貢献をするものと評価することができる。よって、本論文は博士(工学)に値するものと認める。

2014年12月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士(東京工業大学)	宇高	勝之
	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	加藤	勇
	早稲田大学教授	博士(工学)早稲田大学	中島	啓幾
	早稲田大学教授	博士(理学)大阪大学	竹内	淳

