

論文の内容の要旨

論文題目 歪多重量子井戸半導体光増幅器の高性能化に関する研究

氏名 田 中 信 介

近年の情報処理技術の急速な発展に伴い、これを支える大容量フォトニックネットワークや大規模データセンターに用いる光ファイバ通信技術の重要性は非常に高まっている。SOA は直接遷移型半導体基板上に成長した光活性層と、ダブルヘテロ構造 pin 接合を備えた光増幅器であり、ネットワークへの適用が期待される。SOA はその動作原理から小型で駆動が容易な利点を有する。しかし、SOA は偏波間利得差(PDG)が生じやすいことや、高出力動作時に波形劣化が生じやすいといった課題を有し、現在のフォトニックネットワークではより大型な光ファイバ増幅器が広く使われている。この状況を打破し SOA の特徴を生かして実用化を進めるためには、技術課題の克服とアプリケーション確立が重要である。本論文では SOA の技術課題克服に向け、新しい歪多重量子井戸(MQW)構造活性層を用いた高出力・偏波無依存化、内部損失の定量的評価と動作モデルの構築、AlGaInAs 系 MQW-SOA による偏波無依存型 SOA の高温動作化に取り組んだ。さらにアプリケーション確立に向けて、光パケットスイッチ向け 8:1 集積型 SOA ゲートスイッチの開発、微小ヒータ搭載 SOA による高出力光レベル制御、GaInNAs 系 MQW-SOA による C バンド内利得チルト低減といったテーマに取り組んだ。

第2章では歪バリア MQW 構造活性層を用いた SOA の高出力・偏波無依存化を議論する。フォトニックネットワークに適用する光増幅器では、広い波長領域に渡って小さな PDG と高い光出力が要求される。SOA においてパターン効果による波形劣化問題を回避しながら高出力化を実現するには、飽和光出力を増大させる必要がある。一般に SOA の飽和光出力は活性層の薄膜化により増大可能である事が知られている。しかし薄膜活性層では偏波モード間の活性層光閉じ込め係数差が大きくなりやすいため、偏波無依存化を実現するには活性層への結晶歪導入による材料利得異方性の導入が必須である。これまでに、伸長歪を導入した薄膜バルク GaInAs 活性層を適用した SOA において高出力化と偏波無依存化の両立が報告されている。しかし、この手法では PDG 波長依存性の制御が難しく、広い波長領域に渡る偏波無依存化が困難であった。そこで本研究では、より設計自由度が高く PDG の波長平坦化が期待できる活性層構造として歪バリア MQW 構造に着目し SOA 高性能化の可能性を探った。本活性層は InP 基板上に無歪 GaInAs 井戸層と伸長歪を持つ GaInAs バリア層を繰り返し積層した MQW 構造である。本構造は 1990 年に偏波無依存化が実証されているが、その詳細な利得発生メカニズムは解明されていない。そこで、本研究では歪 MQW 構造向けに開発した利得シミュレータを

利用して、バンド構造と利得スペクトルの計算を行った。計算結果により本 MQW 構造では PDG スペクトルの 1500nm 付近に特徴的な凸構造が形成されて全体が平坦化され、広い波長領域に渡る偏波無依存化が期待できる事がわかった。そこで、本構造における PDG スペクトル変調の起源と、更なる PDG スペクトル平坦化の可能性を調べるため、新しく井戸層への結晶歪導入を図った。井戸層に伸長歪を加える事で、井戸-バリア層間の伝導帯エネルギー障壁が低下し、均一な準位分布に近づく事で量子効果による凸構造発現が弱まり、従来構造よりさらに平坦な PDG スペクトルが実現できる見通しを得た。以上の計算結果を踏まえ、歪バリア MQW 構造活性層を持つ SOA 素子を試作し、広帯域偏波無依存化の実証を行った。評価結果から、シミュレーション結果同様な平坦かつ 0 に近い PDG スペクトルが確認され、利得 $>10\text{dB}$ と PDG $<\pm 1\text{dB}$ が得られる偏波無依存動作波長幅は 100nm 以上とバルク構造に比べて大幅に改善した。利得飽和特性を評価した所、1550nm において各偏波で $+20.0\text{dBm}$ 以上の偏波無依存型 SOA として世界最高の飽和光出力が得られた。この高い飽和光出力には薄膜活性層構造に加え、MQW 活性層採用による微分利得の低減が有効に作用したものと考えられる。

第 3 章では SOA の動作効率改善に向けた内部損失の把握と動作効率モデル構築を議論する。光増幅器は電氣的に与えられた励起エネルギーを光エネルギーに変換するが、そのエネルギー変換効率（動作効率）は光増幅器において非常に重要な指標である。これまでに報告された SOA の動作効率は 10%以下と非常に低く、光ファイバ増幅器に劣る特性となっている。しかし、これまでにその本質的要因についてはほとんど議論されていない。そこで、本研究では SOA の内部損失 (α_i) を定量的に評価し、これを取り込んだ動作モデルを確立する事で動作効率が決まるメカニズムを定量的に把握する検討を行った。内部損失評価では SOA の利得スペクトルと雑音指数(NF)スペクトルから α_i を評価する手法を提案し、評価を行った。測定結果では α_i は明確な電流依存性を示し、キャリア誘起吸収の強い影響が示唆される。またその値は 30cm^{-1} 以上と従来の半導体レーザにおける報告値より非常に大きい。この事は、活性層内の高いキャリア密度における強いキャリア誘起吸収の関与を示唆している。キャリア誘起吸収の起源を調べるため、 α_i の構造依存性を評価した。評価結果では明確な偏波依存性が見られ、TM 偏光における k は TE 偏光より大きい。また $1.55\mu\text{m}$ 帯 SOA は $1.3\mu\text{m}$ 帯 SOA に比べて約 1.9 倍大きくなっており、これらは価電子帯間吸収 (IVBA) の特徴と良く一致する。続いて α_i の電流依存性を取り込んだ SOA 動作モデルの構築を行った。動作モデルは SOA を光伝搬方向に対して微小セクションに分割した多分割モデルである。動作効率のシミュレーション結果は電流依存性や構造依存性において、実測結果と非常に良く一致しており、本モデルは SOA 動作効率を定量的に良く再現した。本計算結果から、SOA の動作効率は軸方向の不均一な誘導放出分布と、出力端の内部損失によるキャリア損失によって強く制限されており、動作効率を向上するために効率的な励起プロファイルの実現と活性層改良による IVBA 低減が重要である事が示唆された。

第 4 章では SOA モジュールの低消費電力化に向けた SOA 素子の高温動作化を述べる。SOA 素子は増幅特性の温度依存性が大きく、高温環境下では光利得が大きく低下してしまう。そこで SOA をモジュール化するには熱電冷却素子 (TEC) を搭載して、SOA 素子の温度管理を行う事が一般的である。しかし、TEC は 2W 以上の大きな電力を必要とするため、現状 SOA モジュールの消費電力は光ファイバ増幅器よりも大きい。この課題を克服するためには、SOA 素子の高温動作化による無温調動作実現が最も有効である。これまでに SOA の高温動作化については、GaAs 基板上量子ドット (QD) 活性層を利用した最高 70°C までの温度無依存動作が報告されている。しかし、現状の InAs/GaAs QD-SOA はその結晶成長における制約から偏波無依存な利得を得る事が困難である。そこで本研究では、歪制御による偏波無依存化が可能な MQW 活性層において半導体レーザ高温動作の実績がある AlGaInAs 材料系を適用した MQW-SOA による偏波無依存型 SOA の高温動作化を検討した。本材料系の歪 MQW-SOA 適用妥当性を検証するため、利得シミュレータによる計算を行った。利得スペクトル計算結果では、AlGaInAs 歪井戸 MQW は従来構造に比べて急峻な利得スペクトル形状と高温まで大きなピーク利得が得られた。これは、伝導帯ミニバンド幅の圧縮と大きなバンドオフセットのため、状態密度が狭いエネルギー領域に集中した影響と考えられる。この急峻な利得スペクトル形状により、利得の温度依存性では利得ピーク波長の長波側において各温度の利得スペクトルが重なり合う波長領域が見られ、ここでの温度安定な動作が期待できる。そこで実際に AlGaInAs MQW-SOA と無温調モジュールの試作を行った。モジュールから TEC を排除した事により、従来比体積約 20% の大幅な小型化を実現している。波長 1310nm における、 $25\text{-}75^\circ\text{C}$ 間の利得変動量は PDG 込みで 3.8dB と十分小さく、本結果

により世界初の偏波無依存型 SOA のアンクルド動作が実証された。なお、駆動電流調整を行った場合、さらに広い $15\sim 85^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において利得 $15\pm 0.5\text{dB}$ への利得一定制御が可能である。本モジュールの消費電力は、電流一定動作で 0.3W 、利得一定制御時に 0.53W 以下であり従来 SOA モジュールに対して約 75% の大幅な低電力化が実現できた。

第 5 章から第 7 章では、SOA の製品化に向けたアプリケーション確立に向けた制御技術や応用技術について議論する。第 5 章は SOA におけるパターン効果による波形劣化の影響を回避しながら高い光出力で利得制御を行うために、新しく素子上に微小ヒータを搭載し素子温度を局所的に調節する事で、大きな飽和光出力を保持しながら 10dB 以上の利得制御を実現する技術を述べる。第 6 章では SOA の利得制御における高速性を利用して、SOA を高速光ゲートスイッチとして用いるアプリケーションに向け、9 つの SOA と 8:1 光カプラを単一基板上にモノリシック集積した 8:1 集積型 SOA ゲートスイッチアレイの研究成果を述べる。第 7 章では、SOA における C バンド内の特性均一化を目的として、活性層に窒素を導入した GaInNAs/GaInAs MQW-SOA による利得スペクトルの長波長化技術を述べる。