

称号及び氏名	博士（工学） 小野 純
学位授与の日付	平成 30 年 9 月 25 日
論 文 名	「 1.7 $\mu\text{m}$ 帯半導体広帯域光源の開発とその応用に関する研究 」
論文審査委員	主査 山田 誠
	副査 大橋 正治
	副査 小西 啓治
	副査 遠藤 達郎

## 論文要旨

広帯域光源は、「高温発光型」、「半導体型」および「増幅、非線形媒体利用型」に分類される。半導体型の広帯域光源は、単一モード光ファイバとの結合効率が良好なため、光ファイバ出力の高出力化が可能であるとともに、光源の小型化や良好な量産性により低コスト化が実現できる。そのため、高速大容量の長距離伝送特性に優れる光ファイバ通信分野、高感度で機械的安定性に優れる光ファイバセンシング分野や光ファイバ計測に適用されている。代表的な半導体型広帯域光源であるSLD (Super Luminescent Diode) 光源とECL (External Cavity Laser) 光源の光ファイバ通信分野における役割として、光ファイバ通信システムを構成する光学部品の製造・検査工程における特性評価や、完成した光ファイバ通信システムの特性評価における測定光が挙げられる。近年、通信ネットワークの高度化やIoTの実現により、データトラフィックの情報通信量は飛躍的に増加している。将来的に十分な利用環境を実現するための高密度化された回線増設工事や維持管理を行うためには、測定用光源（現在は、主にSLD光源が用いられている）の広帯域化が必要である。ECL光源には、光ファイバ通信システムの送受信機用光源としての役割があり、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 伝送における任意の信号発生光源やコヒーレント検波用局発光として用いられる。高速光トランシーバには、小型 ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) が採用され、更なる小型化による実装性能の向上が求められている。光ファイバセンシングでは、FBG (Fiber Bragg Grating) による構造物の温度や歪みの多点計測が、草分け的な存

在である。このシステムは、ブロードなスペクトルのSLD光源と、複数のFBG測定点を設けた光ファイバで構成される。光源の広帯域化は、FBG測定点の増設と測定システムの普及に大きく寄与する。近年、ECL光源を用いたOFDR (Optical frequency Domain Reflectometry) が市販化され、高精度ファイバセンサーとして各種業界からその性能を期待されている。光ファイバ計測では、光干渉断層計 (OCT: Optical Coherent Tomography) に0.83  $\mu\text{m}$ 帯SLD光源が採用され、網膜剥離等眼科症例への非侵襲診断装置に実用化されたことを皮切りに、1.3  $\mu\text{m}$ 帯や1.55  $\mu\text{m}$ 帯のSLD光源による臓器観察用OCTの開発も進められている。血管内壁に形成した極薄い脂肪層の診断を目指したOCTの開発も進められており、1.7  $\mu\text{m}$ 帯SLD光源の実現が強く望まれている。光ファイバ近赤外分光システムでは、1.3  $\mu\text{m}$ 帯、1.55  $\mu\text{m}$ 帯SLD光源やECL光源を用いた農業や食品分野へのシステム応用の研究が開始されている。近赤外領域において1.6~1.85  $\mu\text{m}$ 帯は、大気中の水蒸気など、水による光の吸収が少ない領域であり、「水吸収の窓」(本論文では、「水吸収の窓」と称す)として知られている。この領域には、C-H結合基で構成されている有機溶剤の吸収スペクトルが存在するため、その物質の濃度評価が可能となる。

以上に述べた内容により、本論文では1.7  $\mu\text{m}$ 帯SLD素子およびモジュール特性について検討する。次に、開発した1.7  $\mu\text{m}$ 帯SLDモジュールとASE光源等で構成される直列および並列接続ハイブリッド光源の特性を明らかにする。また、1.7  $\mu\text{m}$ 帯ECL光源ゲインチップを作製し、そのゲインチップを搭載した小型ECL光源を実現し、出力特性を明らかにする。さらにその応用として光ファイバ近赤外分光システムを構築して、有機溶剤や日本酒等の濃度測定に適用し、その有効性について確認を行う。本論文は、6章で構成される。

第1章では、序論として広帯域光源の特徴および役割、歴史について述べるとともに、本研究の位置付けと、目的および構成について示した。

第2章では、1.7  $\mu\text{m}$ 帯SLDモジュールを実現するために、SLD素子の検討を行った。1.7  $\mu\text{m}$ 帯でフォトルミネッセンスのピーク波長が得られるように、歪み量を調整したInGaAs/InGaAsP多重量子井戸構造 (MQW: Multiple Quantum Well) の活性層、高出力化を実現するための量子井戸層数や活性層長 (導波路長とも呼ばれる) を検討した。その結果、各種応用計測に十分適応する光出力と、広いスペクトル半値幅の特性が得られるSLD素子が得られた。なお、光スペクトル上のリップルを抑制し、かつ広

帯域化された SLD 素子の実現にあたり、素子端面に真空蒸着技術で誘電体膜を密着形成させた反射防止膜を設け、活性層の斜めストライプ構造、出射部に向けて徐々に導波路幅を広げるフレア導波路構造、および導波路を形成しない領域を示す窓構造の 3 種類の構造的なアプローチも行った。モジュール化においては、SLD 素子から放射光を 1 枚レンズ系で集光し、光アイソレータを通過させて単一モード光ファイバに結合した。SLD 素子および主要光学部品を収容する筐体は、通信用 14 ピンバタフライパッケージを用い、レンズおよび光ファイバ部は長期信頼性に優れた YAG レーザ溶接により固定した。

第 3 章では、第 2 章で述べた 1.7  $\mu\text{m}$  帯 SLD モジュールや、既存の SLD モジュールの更なる高出力化および広帯域化を実現するために、各 SLD モジュールと ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源を合成した並列および直列ハイブリッド構成広帯域光源を提案した。新規に開発した 1.8  $\mu\text{m}$  帯 ASE 光源は、 $\text{Tm}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  添加ファイバと  $\text{Tm}^{3+}$  添加ファイバを用いて ASE 光生成ユニットと ASE 特性改善ユニットから構成されている。さらに、1.55  $\mu\text{m}$  帯 ASE 光源、1.66  $\mu\text{m}$  帯 SLD モジュールと 1.8  $\mu\text{m}$  帯 ASE 光源を合成した並列ハイブリッド構成広帯域光源を開発し、十分な出力特性が得られることを示した。直列ハイブリッド構成広帯域光源は、SLD モジュールの課題である「高出力化に伴いリップルが増加する」の改善するために、SLD モジュールと T DFA (Thulium Doped Fiber Amplifier) から成る直列ハイブリッド構成広帯域光源を開発した。1.73  $\mu\text{m}$  帯 SLD モジュールと T DFA の直列接続により、リップルの増大がなく SLD モジュールの出力増加を確認した。1.66  $\mu\text{m}$  帯 SLD モジュールを用いた直列ハイブリッド構成広帯域光源では、十分広い出力スペクトルを実現した。直列ハイブリッド構成は、SLD モジュールの出力増加に寄与するだけでなく、出力スペクトルの広帯域化に有効なことも明らかにした。

第 4 章では、1.7  $\mu\text{m}$  帯 ECL モジュールおよび ECL ユニットの實現した。ECL モジュール用のゲインチップは、InP 系 InGaAs/InGaAsP・MQW を活性層に適用した。ゲインチップの外部共振出力側の出射端面は、共振器と対向するため十分に導波路反射が低減されねばならず、真空蒸着技術による誘電体反射防止膜を施すとともに、曲がり導波路構造を適用して反射抑制に対応した。光ファイバ出力側端面には、低反射率の誘電体膜を形成して、外部共振器との間でレーザ発振させることで、広帯域な出力スペクトルと低リップル・スペクトル特性が得られた。1.7  $\mu\text{m}$  帯 ECL モジュールは、ゲインチップ、音響光学チューナブルフィルタ、波長ロッカー、エタロンと圧電トランスデューサ上に配置された反

射ミラーから成るリトロー式外部共振系とした。同モジュールは、小型 ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) の規格寸法より小さく実装性に優れる。1.7 $\mu$ m 帯 ECL モジュールは、出力強度および発振波長を制御する回路基板とヒートシンク上に搭載されて、RF 発振器、TEC コントローラ、および PZT 電源電圧コントローラとともに、同一筐体へ収容され ECL ユニットの構成を実現した。同ユニットには、レーザー出力のための FC コネクタポート、ITLA 仕様に準拠したコマンドを送受信するための USB ポートを付加するとともに、レーザー発振設定機能を組み込んだ構成とした。ECL ユニットの光学特性を評価し、光出力、波長可変範囲ともに優れた特性を有することを確認した。また、レーザー発振光のサイドモード抑圧比も市販の ITLA と同等であり、かつ単一モード発振であることを確認した。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章において、新規に開発した広帯域光源による光ファイバ近赤外分光システムを構築するとともに、有機溶剤及び日本酒のアルコール濃度の評価を行った。並列ハイブリッド構成広帯域光源を用いた光ファイバ近赤外分光システムは、リファレンスとした超純水と評価対象とする溶液の吸光量変化では、10 dB 以上のダイナミックレンジが得られ、アルコール濃度評価への使用が可能であること、また温度依存性の確認において優れた安定性を示した。同システムを用いて、有機溶剤であるエタノール、メタノール、ジメチル・スルホキシドの吸収スペクトルの評価を行い、各々の有機溶剤特有の吸収ピークが観測できることが確認できた。低濃度な有機溶剤についても評価可能であることを示した。さらに、本システムを日本酒のエタノール濃度評価にも適用した。エタノール溶液特有の 2 つの吸収ピーク波長の吸収レベル値の差分を用いる方法により、日本酒のアルコール濃度評価が実現できる可能性を示した。1.7 $\mu$ m 帯 ECL 光源を用いて光ファイバ近赤外分光システムを構築するとともに、市販の日本酒および焼酎のエタノール濃度評価を行い、それらのアルコール濃度を、ラベル表示値の濃度範囲以内の評価が実現できることが分かった。以上のことから、SLD モジュールを用いた広帯域光源、ECL 光源及び同光源を光源とする光ファイバ近赤外分光システムの有効性を確認した。

最後に、第 6 章では、結論として本論文についての総括をしている。

## 審査結果の要旨

本論文は、将来の光ファイバ通信システム、光センシング分野で開発が進められている新規 1.7mm

帯 OCT、1.6~1.85  $\mu\text{m}$  帯の「水吸収の窓」波長域を用いた新たな光ファイバ近赤外分光システムを実現する上で必要な広帯域半導体光源である SLD 光源、ECL 光源に関する研究ならびに SLD 光源の広帯域化に関する検討を実施した。また、開発した広帯域半導体光源の光ファイバ近赤外分光システムへの応用に関する検討も行った。以下に得られた成果を示す。

- 1) 1.7mm 帯アイソレータ内蔵 SLD モジュールを試作した。同モジュールは、MQW 活性層を有する SLD 素子の構造と SLD 素子端面構造の検討、新規の SLD モジュール化技術を用いることにより実現した。特性評価により、優れた特性を有することを明らかにした。
- 2) ECL モジュールおよび ECL ユニットの試作した。波長選択用エタロン、音響光学チューナブルフィルタ、波長ロッカー等で構成される外部共振光学系をもちいると共に MQW ゲインチップの素子構造の検討により、小型の ECL モジュールを実現した。また、ECL モジュールに、エタロン、フィルタ、ロッカー制御器等を付加してユニットを実現した。試作したモジュール及びユニットの評価を行い、優れた波長可変発振特性を有することを明らかにした。
- 3) SLD 光源の更なる特性向上をするために、ハイブリッド構成を検討した。ASE 光源と SLD モジュールを用いた並列ハイブリッド構成により、1.5~1.9  $\mu\text{m}$  帯にわたる出力スペクトルが実現できることを確認した。Tm<sup>3+</sup>添加ファイバ増幅器と SLD モジュールを用いた直列ハイブリッド構成では、SLD 光源の課題である「高出力化に伴いリップルが増加する」という課題改善に有効性であることを明らかにした。
- 4) 広帯域光源を用いて光ファイバ近赤外分光システムを構築した。有機溶剤のスペクトル評価と日本酒の度数評価を実施し、試作した広帯域半導体光源と同光源を用いた光ファイバ近赤外分光システムの有効性を確認した。

以上の成果は、将来の大容量光ファイバ通信の実現や新規の光センシングシステム構築に必要な不可欠となる広帯域半導体光源を実現すると共にその応用に関しても検討したものであり、電気情報工学分野に大きく貢献する。また、申請者が自立した研究活動を行うことに必要な能力と学識を有することを証したものである。