

論文の内容の要旨

論文題目 UV 誘起グレーティングと LD をハイブリッド集積した外部共振器レーザに関する研究

氏名 田中 拓也

近年インターネットの普及に伴い、ADSL (Asymmetric digital subscriber line) 及び FTTH (Fiber to the home) 等のブロードバンドが家庭まで普及してきた。インターネット上を流れる情報量の増加に対応するため、通信ネットワークの大容量化が要求されている。現在、基幹系通信、都市圏通信のネットワークには波長多重 (WDM : Wavelength division multiplexing) 伝送システムが用いられているが、ブロードバンド (高速大容量) 化をさらにおし進めるためには低コスト化が必要になっている。WDM システムを構成する部品のコストにおいては光源のコストが大きな比重を占めており、安価な単一モード波長安定化光源及び 1 チップで多数の波長を出力する多波長光源が期待されている。

一方、著者の所属する研究所では Si 基板上に石英導波路を作製した石英系 PLC (Planar lightwave circuit) を研究し、様々な実用的なデバイスを開発してきた。さらに、石英系 PLC 上に半導体素子を集積する技術 (ハイブリッド集積技術) が開発されてきた。

ここで、ハイブリッド集積デバイスに UV 誘起グレーティングを集積した外部共振器レーザは、①発振波長がグレーティングのブラッグ波長に固定されるため単一モード発振をする、②石英の屈折率再現性が高いことから (グレーティングのブラッグ波長制御が容易であるので) 精密な発振波長制御が可能である、③ハイブリッド集積により熱的・機械的安定性が高い、④ PLC 上に構成されているので多波長化 (アレイ化) が容易であるという利点を有している。本構成による多波長光源は従来の集積型多波長光源に比較して波長間隔の高密度化が可能であ

り、ファイバとの光結合が容易である点に特色がある。

以上の背景のもと、本研究ではハイブリッド集積外部共振器レーザ (ECL: External cavity laser) の単一波長安定化光源及び多波長光源への適用性を検討することを目的とする。

以下、本論文における研究成果を要約する。

(1)ハイブリッド集積 ECL の原理

ECL を作製するための要素技術は UV 誘起グレーティング作製技術とハイブリッド集積技術である。UV 誘起グレーティングはフェイズマスクを通して UV 光を石英導波路に照射することで (屈折率変化を誘起して) 作製した。また UV 光誘起の屈折率変化の原因として提唱されているモデルを紹介した。続いてグレーティングの反射スペクトル・透過スペクトル・位相を解析的に求め、UV 誘起グレーティングのスペクトル特性を論じた。次に UV 誘起グレーティングの熱緩和を測定し Erdogan のモデルにフィッティングし、熱緩和の予想モデルを立てた。このモデルにより UV 誘起グレーティングの安定化条件を導出し、その条件に従いグレーティングを熱処理して信頼性を確かめた。また ECL 中のグレーティングは ECL の作製途上で加わる熱により安定化されることを確かめた。

次に、ハイブリッド集積技術について述べた。PLC 上にスポットサイズ変換 LD (Spot-size converter integrated laser diode : SS-LD) を搭載する技術 (著者の所属する研究所で開発) を紹介した。そして導波路の電界分布をガウシアン分布で近似することで SS-LD と石英導波路の結合効率及び結合トレランスを見積もり、ECL の閾値及びスロープ効率の計算に用いられるようにした。

最後に、ECL の出力とキャビティに関する理論を述べた。進行波レート方程式を用いて ECL の閾値とスロープ効率を解析的に求め、ECL の出力はグレーティングの反射率、SS-LD と石英導波路の結合効率等に依存することを確認した。また、ECL のキャビティはグレーティング中点から SS-LD の後端面で構成されるファイペローレーザのキャビティと等価であることを確認し、ECL の理論計算及び設計に応用できるようにした。

(2)ECL の基本特性

PLC 上に UV 誘起グレーティングと SS-LD を集積し単体の ECL を作製した。測定の結果、ECL は適切な温度で単一モード発振すること、及び温度を変えた際の発振波長の変化 (の平均値) は従来の半導体レーザに比較して 1 桁安定であるという良好な発振特性を確認した。そして、ハイブリッド集積されているため機械的・熱的に安定であることを示した。これにより、温度を制御すれば単一モード安定化光源として用いることが可能であることを確認した。

次に、発振波長間隔を 2 nm に制御した 4 波長光源を作製して各チャンネルの単一モード発振を確認した。これにより多波長光源作製のためのアレイ化及び集積化が可能であるとの見通しを得た。また、ECL のグレーティングのブラッグ波長は ECL 作製後でも UV 照射により調整が可能であることを示し、4 波長光源において発振波長間隔を $2.0\text{nm} \pm 0.1\text{nm}$ とより精密に制御できることを示した。

また、温度を変えた際に（キャビティ中の石英導波路の長さに依存せず）5°Cおきにモードホッピングが生じることを見出した。ECL を直接変調して温度を変えながら BER (Bit error rate)を測定し、モードホッピングが生じている温度では BER が劣化し ECL は使用できないことを確認した。考察では石英ガラスの温度係数と LD の温度係数が異なることが原因でモードホッピングが生じることを述べ、その温度周期は石英導波路長ではなく半導体 LD の長さに依存することを定量的に説明した。

(3)温度に依存したモードホッピングの抑制

温度を変化させた場合、モードホッピングが生じる温度では ECL が使用できないことは前に述べた。ECL をアレイ化して多波長レーザを作製した場合、各チャンネルにおいてモードホッピングが生じる温度はランダムであるので、ECL 型多波長レーザの使用できる温度範囲はチャンネル数分だけ狭まる。したがって温度に依存したモードホッピング抑制は解決すべき重要な課題である。

モードホッピングの原因は石英ガラスの温度係数と LD の温度係数が異なることが原因である。ここでは LD と温度係数が逆のシリコン樹脂を LD とグレーティングの間に挿入し、LD の温度係数を打ち消すことで、モードホッピングを抑制する手法を考案した。具体的には、シリコン樹脂を挿入した ECL キャビティを設計及び作製し、発振波長、発振出力、(一定の BER を得るための) 最小受光パワーの温度依存性を測定し、これらが連続的に変化していることから、温度に依存したモードホッピングが抑制されていることを実験的に示した。つづいて、モードホッピングを抑制できる温度範囲のシリコン長依存性を理論的に求め、実験結果を説明した。またモードホッピングを 50°C以上にわたり抑制するために必要な溝長の作製トランスは±15%と広いことを示した。

応用例としてモードホッピング抑制型 ECL にパワーモニタ用 PD (Photo diode) が集積された構成の ECL を作製した。PD でパワーをモニタし APC (Auto power control) 制御が作動することを実験的に確かめた。また、SS-LD と導波路の間で結合しなかった光は、PD を集積する場合ノイズ光として問題になることを見出した。

以上、ECL において課題となっていた温度に依存したモードホッピングを抑制する方法を確立した。

(4)多波長光源

高精度な波長制御を行うため、フェイズマスクに改良を加え、グレーティングを作製した結果をフェイズマスクの設計値にフィードバックした。UV 誘起グレーティングを作製した結果、8 波のグレーティングのブラッグ波長を ITU グリッドに絶対波長精度 0.2nm・相対波長精度 0.08nm で制御できた。次に温度に依存したモードホッピングを抑制するためにシリコン樹脂を挿入することに加え、縦モード波長をブラッグ波長に対して安定な位置に制御した。ここでは UV 光を ECL キャビティ中の石英導波路に照射することで（屈折率を変化させて）光路長を変化させることで縦モード波長を制御している。縦モードを制御する理由は、多チャンネルの ECL では、あるチャンネルの縦モードがブラッグ波長に対して安定な位置にあっても、他のチャンネルの縦モードが安定な位置にある保証がないからである。以上の技術を元に 8 波長光源を作製し、ITU グリッドに波長制御された 100GHz (0.8nm) 間隔 8 波長の発振を得た。また発振波長の温度依存性を測定し、全波長において温度に依存したモードホッピングが

抑制されていることを確認した。次に 8 チャンネル光源の動的特性を測定し 2.5Gb/s で 8 チャンネルすべてを直接変調できることを確認し、隣接チャンネルをクロストークの影響なく同時変調できることを確認した。

以上、UV 誘起グレーティングと SS-LD を PLC 上に集積して DWDM (Dense WDM) 用 100GHz 間隔 8 波長光源を作製し、ハイブリッド集積 ECL が多波長光源に適用できることを確認した。

以上、本研究はハイブリッド集積型 ECL とそれを集積した多波長光源の開発にあらたな知見をもたらすものであり、最終的に多波長光源として DWDM 用光源の低コスト化及び省スペース化への貢献が期待される。