

## 論文の内容の要旨

論文題目 Study on Multiple Wavelength Gain-Coupled DFB Laser Array Fabrication  
(多波長利得結合 DFB レーザアレイの作製に関する研究)

氏名 アサワメーターパン ウィーラチャイ

(本文) 現在の高度情報化社会には情報伝達技術の勢いはとどまることを知らず、激増的に進歩している。現在では Tbit/sec の情報伝送を目指して光通信の研究が盛んに行われている。そして、光通信において光ファイバ当たりの総伝送容量を増やす技術として、時分割多重 TDM (Time division Multiplexing) 技術と波長分割多重 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術がある。特に、後者の WDM 技術は TDM 技術による大容量化の限界を打ち破り、さらに伝送容量を増大させられる。この理由から WDM システムの実用化が始まっている。

また、WDM システムの光源として分布帰還半導体レーザダイオードアレイ (multiple wavelength DFB laser diode array) が期待されている。その中で、利得結合 DFB レーザ (gain-couple DFB laser) はいろいろな分野で研究をなされている。利得結合 DFB レーザは、利得または吸収が周期的に変調されたレーザであって、位相シフトや反射防止膜がなくても安定に単一モード発振するという特長がある。本論文は利得結合 DFB レーザダイオードアレイの作製を目的とする。利得結合 DFB レーザアレイを作製するには同一基板上への異なる周期の回折格子を形成する必要がある。本論文は異周期回折格子の形成を電子ビーム (EB) 露光法による直接描画を採用することで利得結合 DFB レーザダイオードアレイの作製を成功した。

利得結合 DFB レーザの発振波長に影響を与えるパラメータがいろいろあるため、レーザを作製するときに、作製した利得結合 DFB レーザが所望の波長で発振するとは限らない。この問題は非常に深刻な問題である。この問題を解決するために、「発振波長トリミング」技術が提案された。この技術は DFB レーザの発振波長を作製後に微調整する技術である。これまで、屈折率が変わる物質を使う方法と活性層量子井戸無秩序化を行う方法が提案された。屈折率が変わる物質を使う方法による問題は波長トリミングの量 (0.14 nm) が現在の WDM システムに必要とされている集積型分光器 (Arrayed Waveguide Grating) の分解能に足りない問題だった。後者の方法の問題はレーザの活性層量子井戸の無秩序化が行われるため、レーザの電流-光出力 (L-I) 特性が悪くなる問題だった。

本論文はこれらの問題を解決するために光誘起超格子無秩序化による発振波長トリミング方法を提案した。この方法に使用される利得結合 DFB レーザ構造はレーザの活性層量子井戸の上にトリミング用の超格子が成長してある構造である。この方法は YAG レーザ

を照射することによってレーザの活性層の代わりに超格子の無秩序化を起こさせて波長トリミングを行う方法である。また、この方法で波長トリミングを行う際、YAGレーザのほとんどのフォトンが超格子で吸収され、利得結合DFBレーザの活性層の無秩序化を直接起こさせるわけではないため、レーザの発振波長以外の特性に影響を与えないと考えられる。

波長トリミング実験には中野研究室の従来の利得結合DFBレーザ構造と本研究で新しく提案した利得結合レーザ構造を使用した。両者は有機金属気相堆積法を用いてInP基板上に作製した。両者の利得結合DFBレーザは活性層としてバンドギャップが約1550 nmにある0.9%圧縮歪み多重量子井戸(InGaAsP組成)を含む半導体層構造である。活性層の井戸層(well)と障壁層(barrier)の膜厚はそれぞれ10 nmである。新しいレーザ構造の波長トリミング用の超格子と活性層量子井戸の距離は250 nmである。超格子層のwellとbarrierの組成は活性層量子井戸と同じである。ただし、超格子層のwellとbarrierの膜厚はそれぞれ3 nmである。超格子層のwellとbarrierの膜厚を活性層量子井戸のwellとbarrierの膜厚より狭く設計することによって、超格子層のバンドギャップエネルギーは活性層量子井戸のバンドギャップエネルギーに対して透明な波長の領域にあるように設計できる。そのため、超格子を従来のDFBレーザ構造に加えても、レーザのL-I特性に悪影響を与えない構造になる。

実験には超格子の無秩序化を起こさせるためにpulsed-YAGレーザを使用した。波長は選倍されているため、532 nmである。トリミングの条件のパラメータはpulsed-YAGレーザの1パルス当たりの照射エネルギーと照射のパルス回数とサンプルの温度である。実験の目的はトリミング後で発振波長以外の利得結合DFBレーザの特性が変化しないような最適なトリミング条件を探索することである。その結果、1パルス当たりの照射エネルギー $12 \text{ J/cm}^2$ 、サンプル温度 $125^\circ\text{C}$ のトリミング条件で実験を行うと、従来のレーザ構造の場合は活性層量子井戸の無秩序化による波長シフトが観察できなかった。つまり、この場合、レーザの活性層量子井戸の無秩序化が起こらなかった。それに対して、新しいGC-DFBレーザの場合は、波長トリミング後発振波長を長波長側に $0.32 \text{ nm}$ シフトさせながらレーザのしきいち電流が変化しなかった。また、両者の活性層量子井戸の構造が同じであるため、この場合の波長トリミングは超格子層の無秩序化だけによる屈折率変化による影響だと考えられる。

次に、波長トリミング方法を実際に多波長利得結合DFBレーザアレイの作製に応用してみた。まず、波長間隔 $0.8 \text{ nm}$  (100 GHz)の3波長利得結合DFBレーザアレイを作製した。しかし、利得結合DFBレーザの発振波長に影響を与えるパラメータがいろいろあるため、作製した利得結合DFBレーザはそれぞれのチャンネルレーザの波長間隔が設計した $0.8 \text{ nm}$ にならなかった。ここで、それぞれのチャンネルレーザの波長を所望の波長に微調整した。波長トリミング後では、全てのチャンネルレーザの発振波長は長波長側にシフトし、波長間隔 $0.8 \text{ nm}$  (100 GHz)の3波長利得結合DFBレーザアレイが得られるようになった。しかし、pulsed-YAGレーザを長く照射して波長トリミングを行うと、利得結合DFBレーザのしきいち電流が大きくなり、発光効率が下がる問題は残った。

そこで、本論文は超格子の無秩序化プロセスの実験を行ってみた。実験には YAG レーザの照射エネルギー、照射パルス回数、サンプルの温度を変化させながら、利得結合 DFB レーザの L-I 特性の変化と発振波長シフトの量を観察してみた。その結果、波長トリミングの量と L-I 特性の変化は pulsed-YAG レーザの照射エネルギーと照射パルス回数とサンプルの温度に依存すると分かった。pulsed-YAG レーザの照射エネルギーが高いほど、照射パルス回数が多いほど、サンプルの温度が高いほどのトリミング条件を使用すると、波長シフト量が大きくなると分かった。しかし、あるしきいち照射エネルギー以上で波長トリミングを行うと、利得結合 DFB レーザのしきいち電流が上大きくなってしまふと分かった。また、波長トリミングを行う際、発振波長シフトに影響を与える効果は 2 つ大きく分けられる。それらは超格子の無秩序化による影響と DFB レーザのしきいち電流の変化による影響だと考えられる。そこで、多波長利得結合 DFB レーザの発振波長を微調整する際、しきいち電流の変化による影響を抑える必要がある。

次に、波長トリミング方法を 5 波長利得結合 DFB レーザアレイの作製に応用してみた。今回は無秩序化プロセスの実験から得られた結果に基づいて、それぞれのレーザチャンネルにしきいち電流が大きくなるように、それぞれのトリミング条件で波長トリミングを行った。その結果、波長間隔 0.8 nm(100 GHz) の 5 波長利得結合 DFB レーザアレイの作製を成功した。また、波長トリミング前後で、すべてのレーザチャンネルのしきいち電流は変化しなかった。それぞれのチャンネルレーザにとっての最適なトリミングを使用することによって、トリミング後のしきいち電流が大きくなる問題を解決できた。

また、本論文は拡散モデルを使って波長トリミング後の超格子の屈折率変化と吸収係数スペクトルを計算し、超格子の無秩序化と波長シフトの関係を解析した。シミュレーションの結果より、超格子で III 族原子だけの拡散が起これば、超格子のバンドギャップエネルギーが red-shift になり、波長 1.55  $\mu\text{m}$  での屈折率が大きくなると分かった。超格子が DFB レーザ導波路の部分のため、超格子の屈折率が大きくなると、DFB レーザ導波路全体の等価屈折率も大きくなる。その結果、トリミング後、DFB レーザの発振波長が長波長側にシフトすることになる。それに対して、同時に超格子層で V 族原子も拡散し始めると、逆な結果が得られることが分かった。

実際に作製した超格子の構造は 0.9% 圧縮歪み多重量子井戸 (InGaAsP 組成) であるが、波長トリミングの量をさらに大きく得られるためには超格子層の構造とレーザの構造を改良する必要がある。まず、拡散モデルを使ってトリミング後の超格子層の屈折率変化を計算してから、SELENE Software を使って超格子層の屈折率変化による DFB レーザ導波路全体の等価屈折率変化を計算した。その結果、波長トリミングの量をさらに大きく得られるには超格子層と活性層量子井戸の距離を減らす必要がある。また、超格子の構造に関しては、いろんなことを考慮に入れると、InGaAs/ InGaAsP 超格子がその目的に適用する。特に、超格子の well 層に圧縮歪みを導入すると波長トリミングの量をさらに大きく得られると分かった。ただし、重要なのはその超格子のバンドギャップエネルギーは活性層量子

井戸のバンドギャップエネルギーに対して透明な波長の領域にあるように設計する必要がある。

以上のように、本論文では光誘起超格子無秩序化による発振波長トリミング方法を提案し、この方法を実際に多波長利得結合 DFB レーザアレイの作製に応用し、波長間隔 0.8 nm(100 GHz) の 5 波長利得結合 DFB レーザアレイの作製を成功した。また、それぞれのチャンネルレーザにとっての最適なトリミングを使用することによって、トリミング後のしきいち電流が大きくなる問題を解決できた。また、波長トリミング量を大きく得られるためには超格子層と活性層の距離を減す方法と InGaAs/ InGaAsP 超格子を使用する方法を提案した。