

半導体レーザーの高性能化に関する基礎研究

山田 実
金沢大学工学部 教授

1. はじめに

半導体レーザーは、光ファイバ通信システムや光ディスク技術あるいは高精度光計測技術などの光源として実用化されているが、コヒーレント通信方式や並列光情報処理など、さらに大規模な通信や情報処理を行なうためには、解決すべき課題がいくつか残っている。本研究ではこれらの課題のうち、発振しきい値の低減化、発振線幅の狭化および戻り光雑音の解明と低減化法などについて研究した。

以下、これらの課題についての研究成果の概要を述べる。

2. ポテンシャル制御および有効質量制御による発振しきい値の低減化

半導体レーザーでは、レーザー発振に必要な電子反転分布を形成するためにバイアス的な電流が必要であり、発振しきい値電流 I_{th} と言う。発振しきい値電流を低減できるレーザー構造として、筆者らはポテンシャル制御構造を提案してきた^(2,4,5,8)。類似の構造が同時期に国内某メーカーの研究所で開発され、変調ドープ構造とも呼ばれている。また、米国では有効質量制御による低減化が提案され、歪量子井構造により実現された。そこで、本研究では、ポテンシャル制御と有効質量制御とを理論的に比較した。

通常の半導体では、価電子帯正孔の有効質量が伝導帯電子より大きいので、価電子帯の状態密度関数が伝導帯よりも大きい。そのため、伝導帯電子と価電子帯正孔を等量注入しても、価電子帯端付近に電子が残っており、光吸収が消えにくい。光放出を光吸収より大きくするためには、かなりの電子と正孔を注入しなければならない。もし、価電子帯正孔が予め過剰になっていると、光吸収が消え、注入電流0から反転分布が生じ得る。活性層の近接層にアクセプタ原子を多量にドープして正孔を供給させ、この原理を実現したのがポテンシャル制御構造または変調ドープ構造である。また、価電子帯正孔の有効質量を減少させ、両帯の状態密度を同程度にすると、少ない電子数で反転分布が形成できる。この原理が有効質量制御法である。

ポテンシャル制御と有効質量制御の特性比較は、以下の通りとなった。

- 1) 電子数=正孔数の中性条件下では、有効質量制御法が有利である。
- 2) 正孔濃度を 10^{19}cm^{-3} より高濃度にしても異常な非発光再結合や光吸収が生じなければ、ポテンシャル制御構造の方が有効質量制御法よりも優れている。
- 3) ポテンシャル制御構造を用いる場合は、正孔と電子の有効質量比は大きい方がよい。つまり、ポテンシャル制御構造と有効質量制御法を同時に用いない方がよい。

3. SCH量子井戸構造データでの発振線幅増大現象の解明

半導体レーザの発振線幅は、コヒーレント光としての性質を直接現わしている特性であり、線幅が狭いほど良質のコヒーレント光と言える。

SCH (Separate Confinement Hetero) 量子井戸構造は、電子を閉じ込める活性層 (量子井戸層) を光導波層で挟み、活性層への光集中効果を強化したレーザ構造である¹⁾。このSCH構造において、発振線幅が急増する現象が、時々観測された。この現象を理論解析し、増加現象が生じない条件を検討した。結論は以下の通りである。

- 1) 発振線幅異常増大現象は、光導波層への電子・正孔のオーバーフローによるもので、この現象が生ずるレーザでは発振しきい値電流が高い。
- 2) 発振線幅が安定に最小になる量子井戸数は、2～3程度である。

4. 戻り光誘起雑音の解明

半導体レーザからの出力光が、光ファイバ端面や光ディスク表面で反射しレーザ内に再入射すると、半導体レーザの出力光が変動し過剰雑音を発生する。この雑音を戻り光誘起雑音と呼ぶ。

筆者らは、戻り光によるレーザと反射点とで形成する外部共振器モードがレーザ自身のモードとの相互作用して雑音が増加するものとし、その特性を解析した²⁾。結論は、以下の通りである。

- 1) 戻り光雑音は、レーザと反射点とで形成する外部共振器モードの発生に付随して発生する。
- 2) 外部共振器モードは、反射点までの距離が長いほど、低い戻り光率で発生し、距離が数mでは 10^{-7} の低戻り光率でも発生する。
- 3) 戻り光雑音を防ぐためには、レーザ自身の共振器長を長く、出射端面の反射率を高くした方がよい。
- 4) さらに、戻り光が強くなると、モードホッピングなどの不安定な現象へ移行する。

5. 高周波重畳による雑音低減法の解明

半導体レーザでの、戻り光雑音やモードホッピング雑音を低減化する方法として、レーザ注入電流に高周波電流を重畳させる方法が実用化されている。ここでは、モード競合理論³⁾に基づき、高周波重畳による雑音低減化の機構を理論解析し、より効率的な動作条件を検討した。結論は以下の通りである。

- 1) レーザ注入電流に高周波を重畳すると、電子密度と光強度の周期的変動のため、1つのモードへ集中してエネルギーを供給しなくなり、モードホッピング現象は生じなくなる。
- 2) 雑音低減化が最大効率となる駆動周波数は、直接変調の共鳴状周波数である。
- 3) 実際のレーザでは、素子の静電容量のため高周波電流が流れにくく、低周波側で見かけ上の効率が良くなる場合がある。
- 4) 高周波重畳の効率をよくするためには、素子の高周波特性を良くした方がよい。
- 5) 熱抵抗の高い素子ほど、高周波重畳による低減化の効率は良いが、しきい値電流増加などの悪影響があるので、熱抵抗は下げるべきである。

6. おわりに

本研究は、半導体レーザをより高性能にするためのいくつかの課題を研究したものである。助成金を受けた後の成果を中心に述べたが、正規の学術論文としては投稿準備中のものが多い。なお、この研究期間内に出版した関連論文を参考文献としてまとめた。半導体レーザの解析手法はかなり確立されてきており、本研究のように論理的かつ組織的に検討できるようになってきた。しかし、レーザ単位での特性には限界があり、発振波長の絶対安定化や多数レーザの一体化など、より高性能の光源とするためには、集積化技術を併用した検討を今後も行なう必要がある。

先日、新聞で高柳先生の他界を知りました。本助成金を受けられた幸運に感謝し、今後も電子工学の発展のために意義ある研究を心がける事を誓い、高柳先生のご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- (1) M. Yamada, "Theoretical Analysis of Line-Broadening Due to Mode Competition and Optical Feedback in Semiconductor Injection Lasers", Trans. of IEICE, E71, 2, pp. 152-160, 1988.
- (2) M. Yamada and K. Omi, "Optimum Structure of a Potential Controlled Low Threshold Lasers", Trans. of IEICE, E71, 6, pp. 607-613, 1988.
- (3) M. Yamada, M. Gamo and Y. Nashida, "Analysis of Threshold Current in GaAs-AlGaAs SCH Lasers", Trans. of IEICE, E71, 7, pp. 701-708, 1988.
- (4) 山田 実「ポテンシャル制御構造による低しきい値化」応用物理、57, 5, pp. 714-719, 1988.
- (5) M. Yamada, H. Nagano and K. Omi "Application of the Potential Control Structure to Surface Emitting Lasers", Opto-electronics--Devices and Technologies--, 3, 2, pp. 241-246, 1988.
- (6) M. Yamada "Theoretical analysis of nonlinear optical phenomena taking into account the beating vibration of the electron density in semiconductor lasers", J. Appl. Phys., 66, 1, pp. 81-89, 1989.
- (7) Y. Yamada and M. Suhara "Analysis of Excess Noise Induced by Optical Feedback in Semiconductor Lasers Based on Mode Competition Theory", Trans. of IEICE, E73, 1, pp. 77-82, 1990.
- (8) M. Yamada and Y. Haraguchi, "Temperature Dependence of Threshold Current and Linewidth Enhancement Factor in Modulation-Doped Semiconductor Laser", Trans. of IEICE, E73, 1, pp. 131-132, 1990.
- (9) M. Yamada, M. Kamiya and Y. Kuwamura, "Method for Estimating the Threshold Current Level in Semiconductor Injection Lasers", Trans. of IEICE, E73, 1, pp. 133-134, 1990.