

半導体分布帰還型レーザの変調特性評価

Modulation Characteristics Evaluation of Distributed Feedback Laser Diodes

機械・電気システム工学専攻 A06106 勝又宏泰、佐藤憲史
Hiroyasu KATSUMATA and Kenji SATO

Abstract

The laser diode is an important device in the optical communication systems. Since the distributed feedback laser diode has single mode, it is suitable for high-speed transmission systems. The laser characteristics are sensitive to temperature. In this study, temperature dependence of the laser characteristics is investigated. When the laser module is kept at room temperature, the modulation bandwidth is over 8 GHz.

Key Words: DFB-LD, Threshold Current, Temperature dependence, Wavelength

1. 緒言

現在のネットワークの普及において、光通信は重要な役割を担っている。光通信システムは基本的に信号を発する光源、伝送する光ファイバ、および信号を受ける受光器からなる。半導体レーザは光源として最も適切である。特に、長距離・高速通信の光源として開発されてきた。光ファイバ通信に使用できる光波長には、短波長と、長波長と呼ばれる $1.3 \mu\text{m}$ 帯及び $1.55 \mu\text{m}$ 帯がある。石英ファイバにおける伝送損失及び分散特性では長波長帯の方が優れている。レーザ光は自然光にはない優れた特性、たとえば高いコヒーレンシを持っており、高精度な計測技術にも応用されている。長距離・高速光ファイバ通信において分布帰還型レーザという単一モードレーザが開発されている。半導体レーザは温度に対して敏感であり、特性が変化してしまう。分布帰還型レーザにおいて、変調特性の温度依存性が十分に明らかになっていない。本研究では、分布帰還型レーザを評価し、また変調特性での温度依存性を測定した結果について述べる。

2. 半導体レーザ

現在半導体レーザには、代表的なものとして、ファブリペロレーザ (FP-LD: Fabry-Perot Laser Diode) と分布帰還型レーザ (DFB-LD: Distributed Feedback Laser Diode) がある。ここでは半導体レーザの構造、発振原理、分布帰還型レーザについて述べる。発光ダイオードが LED と略称されるように半導体レーザ (LD: Laser Diode) も LD とされる。

2.1 構造

半導体レーザでは、細長い導波路を組成の異なる半導体を用いて形成し共振器としている。共振器長は $300 \mu\text{m}$ 程度である。ここで、導波路のコアとなる活性層のみが発光するように形成する。活性層は通常、幅が $1 \mu\text{m}$ 、層厚が $0.1 \mu\text{m}$ 程度である。このように微細な構造を持たせるのは、波長程度の長さにするこことで、光の横モードを単一モードとするためである。半導体結晶をある結晶面にそってへき開すると原子レベルで整った平面となり、ミラーとして機能させることができる。このようにして作製したレーザを、ファブリペロレーザという。

2.2 発振原理

レーザダイオードに順方向電流を注入すると、レーザ発振が起きる。レーザ発振はミラーでの光損失と導波路での光損失の和よりも増幅利得が大きくなったときに起きるため、しきい値特性をもつ。また、共振器内でレーザ光は定在波を形成し、その位相条件を満たす波長のみ発振が起きる。このとき、発振波長 λ は

$$m\lambda = 2nL \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 m はモード次数、 L は共振器長、 n は共振器の屈折率である。このため、レーザ光は LED 光と全く異なり、位相が揃ったスペクトル純度の高い光となる。これをコヒーレンシが高いという。

2.3 分布帰還型レーザ

通常の半導体レーザはへき開面を利用したファブリペロ

共振器を有する。このため、高周波で変調した場合縦モードは単一モードでなく、発振波長も流す電流によって変化する。単一モード化の基本技術は回折格子を共振器構造に組み込み、ブラッグ波長で発振させることにある。このようなレーザを分布帰還型レーザと呼んでいる。回折格子は、一定の周期 Λ で活性層近傍に凹凸を形成したものであり、ブラッグ波長 λ_B は

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2)$$

で与えられる。長波長での半導体材料としては、InGaAsP系が主体となっている[1]。

2.4 基本特性

半導体レーザの電流 - 光出力特性は温度によって変化する。温度が高くなるにつれしきい値も増大する。また光出力も低下する。電流が 100 mA では 15 °C に比べ、55 °C で光出力が 5 割程度低下する。

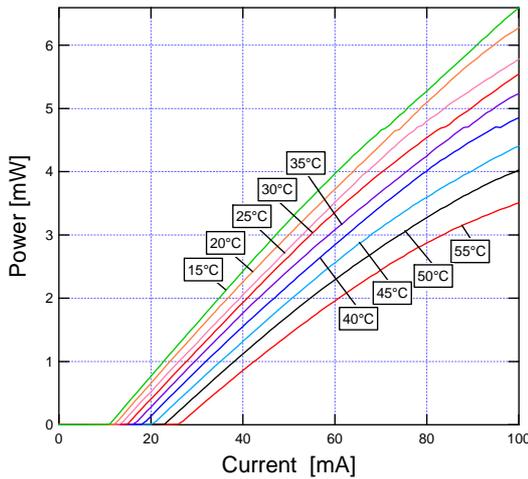


Fig.1 Current-power characteristics

電流 - 光出力特性に微分処理して得られた微分効率を Fig.2 に示す。レーザから得られる光出力は次の式で表される。

$$P = \eta_D h\nu \frac{I - I_{th}}{e} \quad (3)$$

ここで、 η_D は微分量子効率、 $h\nu$ は光子エネルギー、 I は注入電流、 I_{th} はレーザのしきい値、 e は電荷素量である。微分量子効率は注入電子数の増加分に対する出力光子数の比である。この図から微分量子効率を求めるには $\frac{e}{h\nu}$ をかければよい。図より 25 °C のしきい値近傍でのピーク値 80×10^{-3} mW/mA から、 $\eta_D = 0.10$ である。55 °C のし

きい値近傍でのピーク値 65×10^{-3} mW/mA では、 $\eta_D = 0.081$ である。このように温度が上がると効率が低下する。効率が低下する原因は、共振器内の光損失が増大するためである。光損失の増大は同時にしきい値電流を増加させる。

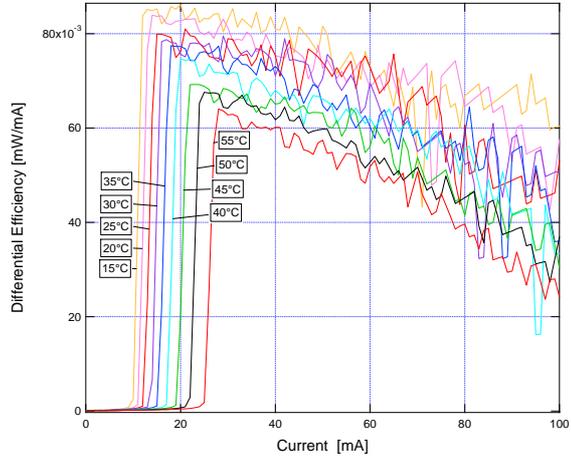


Fig.2 Differential efficiency

Fig.3 に光スペクトルの温度依存性を示す。温度が上昇すると、屈折率が大きくなるため、発振波長は長くなる。ブラッグ波長 λ_B は式 (2) で与えられる。屈折率は温度上昇に伴って増大し、ブラッグ波長が長くなることがわかる。

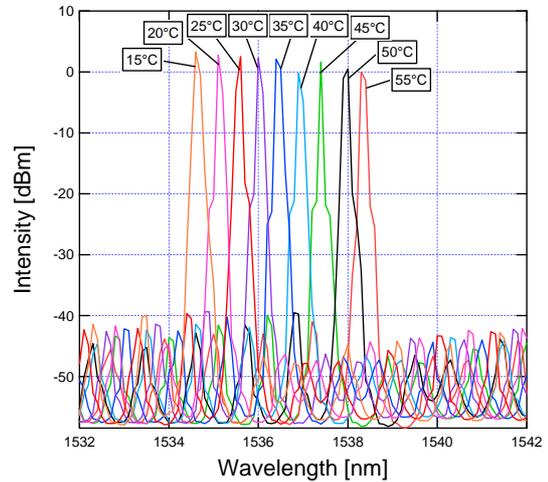


Fig.3 Optical spectra

3. 実験

3.1 半導体レーザの変調特性

半導体レーザに注入する電流に高周波信号を重畳すると、光出力が変調される。この高周波信号の周波数を変えて応答特性を評価する。高周波信号の振幅がバイアス電流に比べ小さい時には小信号変調特性という。

3.2 構成

レーザ変調の概略を Fig.4 に示す。注入電流を変調することで変調された光出力を得る。これを直接変調方式という。レーザの光出力はしきい値以上の電流と比例関係にあり、線形な変調となる。入力信号を電流振幅 I_{p-p} とすると光出力振幅 P_{p-p} が出力信号となる。(p-p はピーク - ピーク値を示す)

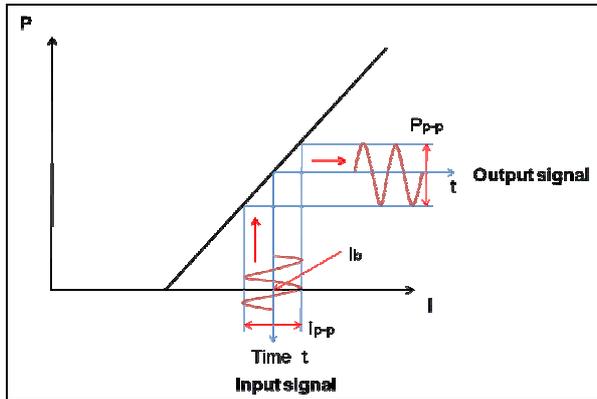


Fig.4 Modulation of a laser diode

変調特性を測定する実験構成図を Fig.5 に示す。信号源から信号が送られバイアスティー (Bias-TEE) に入る。バイアスティーに、ある一定の電流 (バイアス電流) を流し、RF 信号を重畳しレーザを駆動する。バイアスティーによってバイアス電流 I_b による直流成分と RF 信号による正弦波成分を合成することができる。また DC ブロックによってバイアス電流が入力側には流れないようにブロックしている。半導体レーザは温度が変わると特性が変化する。そのため使用する際は温度制御をすることにより、一定の温度に保つことが必要である。半導体レーザには素子近傍の温度制御をするためにサーミスタとペルチェ素子がついている。サーミスタは温度を測定するセンサとして素子近傍の温度をモニタする。ペルチェ素子はペルチェ効果を利用した素子で吸熱、放熱することによって温度を調整する。この二つによって設定温度に保つことができる。半導体レーザから放たれた光はファイバを通り、フォトダイオード (PD: Photo-Diode) に入射する。フォトダイオードは電圧駆動されている。入射した光はそこで電気信号に変換されオシロスコープで測定することができる。一般にはネットワークアナライザを用いて測定するが、広帯域のものがなかったので、オシロスコープを用いて電圧振幅を測定し、RF パワー値に変換し評価した。

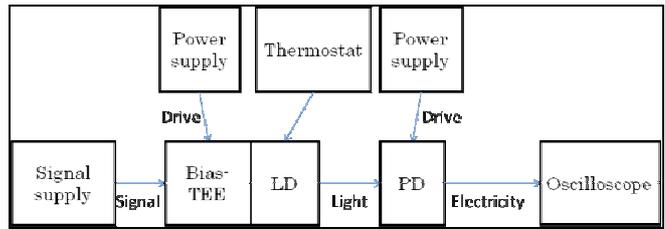


Fig.5 Experimental setup of modulation characteristics

GHz 以上の高周波変調では、変調する RF 信号を有効にレーザに供給するため、インピーダンス整合が重要となる。変調時はレーザは数オームの抵抗とみなせる。これを通常の 50Ω の特性インピーダンスを持つ系で駆動するために、Fig.6 に示すようにマッチング抵抗 R_M が直列に接続されている。

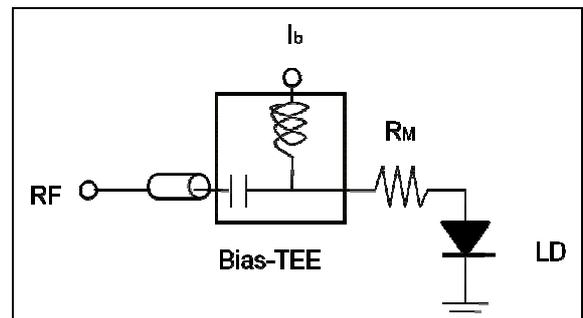


Fig.6 Electrical circuits for a laser diode

注入する信号の振幅を 10mA とした。これは受信側の感度の限界を考慮し、最適な値として決めた。よってこの回路での電圧振幅は 500mV となる。

電圧振幅は信号源での RF パワー値に換算しなければならないので対応図を作り、それをもとに -2dBm として設定した。以下に電圧振幅と RF パワー値を換算する式を示す。

dBm と mW との関係式を示す。

$$P [\text{dBm}] = 10 \log (P [\text{W}] / 1[\text{mW}]) \quad (4)$$

電圧振幅 V_{p-p} を使って書き直すと次のようになる。

$$P [\text{W}] = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{V_{p-p}}{2} \right)^2}{R} \quad (5)$$

これより $P [\text{dBm}]$ と $V_{p-p} [\text{V}]$ との関係式が導かれる。

$$V_{p-p} [\text{V}] = 2\sqrt{10^{10} \times 0.1 P} \quad (6)$$

この式をもとに RF パワーと電圧振幅の関係は Fig.7 のようになる。

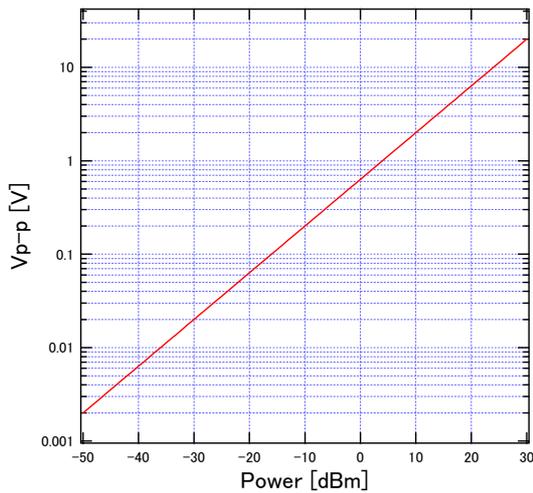


Fig.7 Relation between RF power and voltage amplitude

4. 結果

モジュールを用いて半導体レーザーへのバイアス電流を 20 mA~60 mA まで 10mA ずつ変化させたときの応答特性を Fig.8 に示す。数 GHz のところにピークがあることがわかる。これは共振現象といわれ、このときの周波数は共振周波数といわれる[2]。20 mA では約 4 GHz のところでピークがみられ、その後急激に応答は低下している。バイアス電流を増加させると共振周波数が高くなり、広帯域になる。40 mA 以上のバイアス電流では、10 GHz 以上の変調帯域を有していることがわかる。

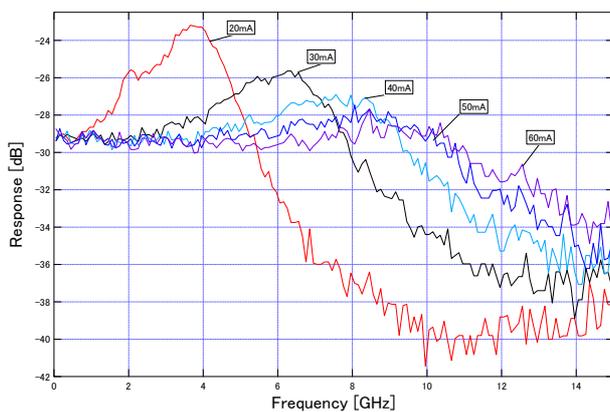


Fig.8 Modulation response for different bias currents

半導体レーザーへのバイアス電流を 40 mA 一定にした状態で、半導体レーザー内の温度を 15 °C~55 °C まで変化させた場合の応答特性を Fig.9 に示す。温度が上がることに伴って帯域が狭まり、ピークをもつようになってくることわかる。

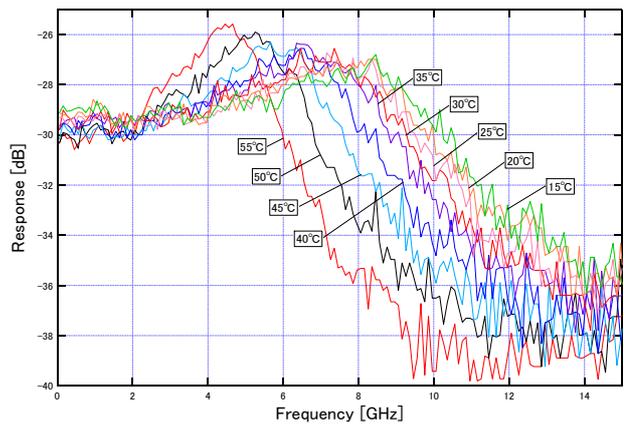


Fig.9 Modulation response for different temperatures

5. 考察

温度上昇によってピークをもつようになることは温度上昇に伴ってしきい値が上がり、相対的にバイアス電流が低くなったことに対応している。

バイアス電流の増加によって広帯域になる理由として、光子密度が増加することにより光子数(光)が増加する。これにより誘導放出が強まる。LD にはしきい値特性があるが、しきい値近傍では自然放出による影響が強い。しかし、バイアス電流を増加させ、誘導放出を強めることで速度を速めることができ、広帯域になる。

またピークの後、応答がなくなっていくのは、光子密度の変化に追従できなくなるためである。

6. 結言

長波長帯は長距離・高速光通信にとって重要な波長帯である。今回、実験には長波長帯の半導体レーザーを用いて変調特性を測定した。半導体レーザーは温度依存性をもつのでモジュールには温度制御がされている。測定結果により分布帰還型レーザーの変調特性の温度依存性が明らかとなった。モジュール内の温度が室温に保たれている場合、約 8GHz の変調帯域を有していることがわかった。

参考文献

- [1] 末松安晴・伊賀健一：光ファイバ通信入門、オーム社、2000
- [2] 米津宏雄：光通信素子工学—発光・受光素子—、工学図書、2000