

§1 はじめに

半導体レーザーは近年信頼性の高い素子の開発が進み、光通信や光情報処理などへの実用化をめざして日進月歩の速さで研究が進められている。しかし注入電流の増加や温度の変化に伴って起こるモードホッピング現象による雑音、半導体レーザーを実装した装置で起こる戻り光による発振臨界値のシフトや雑音の発生など解決を迫られる問題が残っている。このような雑音の問題はかなり根の深い問題であって、基本に立ち返った研究が必要と思われるが、必ずしもそれは十分に行われていない。

本研究では半導体レーザーの活性層内に励起される各モードの出力のゆらぎがモード同士の間でどのような相関をもっているかを測定し、特定のモードが注入電流の増加と共に発振へと成長する過程、ならびに温度の変化によって発振モードの交代が起きるときの様相を調べた。研究は未だ緒についたばかりであって、物理的背景についての説明はなされていないが、一先ず得られた実験結果を報告する。

§2 半導体レーザーにおける共振モード

一般にレーザーの共振器ではその長さで決まる共振をもった沢山の共振モードが存在する。ガスレーザーのように共振器が長い場合には隣り合うモードの波長の差は小さく、各モードをスペクトル分解することはむずかしいが、半導体レーザーでは共振器が小さいため各モードをスペクトル分解することが比較的容易である。いまレーザー共振器の長さを l 、実効的な屈折率を n_e 、共振波長を λ_0 。(モードによって違うが、モード間の波長差 $\Delta\lambda$ にくらべて圧倒的に大きいので代表値を使う)とすれば、隣り合うモードの波長差は

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 / 2n_e l$$

で与えられる。例えば、 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$, $n_e = 3.5$, $l = 300 \mu\text{m}$ の場合 $\Delta\lambda \approx 0.3 \text{ nm}$ 程度となる。

さて、屈折率導波型と呼ばれる半導体レーザーでは沢山の共振モードのうち特定の一つのモードが先ず発振へと成長するが、これは注入電流の増加と共に増大する利得が図1に示すように幅広い波長依存性をもっていて、その最大値に相当する波長のモードのみが成長するからである。利得の波長依存性は活性層を形成する半導体のバンドギャップや伝導帯、価電子帯の状態密度によって決まるものであり、利得曲線と呼ばれている。注入電流を増加させていったときこの利得曲線が全体として上昇し、最大値の波長に対応するモードが先ず閾値に達して発振を始めるが、そのとき他のモードはど

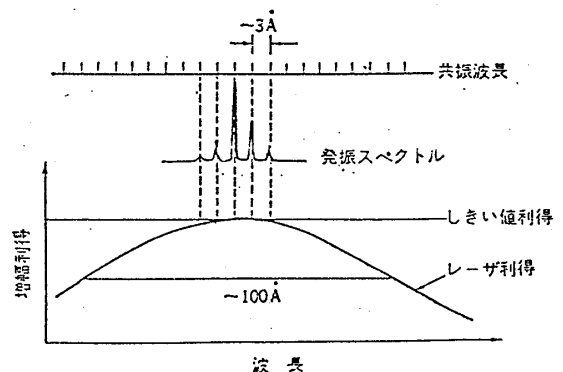


図1 レーザーの利得と発振モード

うなるか。また各モードの出力ゆらぎはモード同士どのような相関をもっているかについて以下のような方法で実験を行った。

§3 実験方法

実験方法のブロックダイヤグラムを図2に示す。レーザからでた光は反射型回折格子で波長分解し、それぞれの波長の光をレンズL₂によって別々の位置に集光する。その途中にビームスプリッターBS₁、BS₂を入れ、BS₂によって分けられた光は撮像素子CCD (Charge Coupled Device) で受け、共振スペクトルの全体像を観測するのに使う。他方BS₁で分けた光はアバランシェフォトダイオードAPD₁で、また直進した光はAPD₂で受ける。APD₁、APD₂はいずれも微動ステージの上に設置されていて任意のモードの光のみを選択的に検出できるようにしてある。APD₁とAPD₂からの信号の直流部分はとり去ってゆらぎ成分のみを相関器にとり込み、異なるモード間のゆらぎの相互相関関数を測定した。

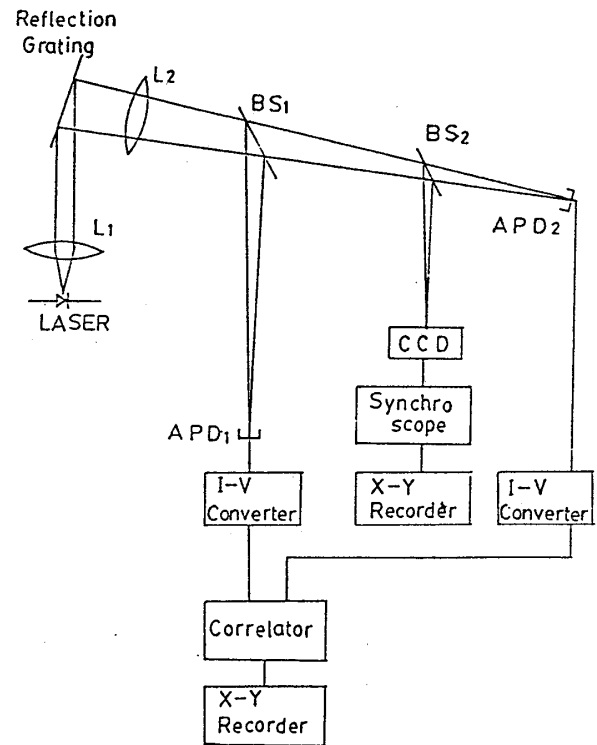


図2 実験のブロックダイヤグラム

§4 実験結果

用いた半導体レーザは日立製作所製のCSP型 (Channelled Substrate Planar) AlGaAsレーザである。先ず注入電流に対する全出力パワーの関係を測定した結果を図3に示す。出力パワーがたちあがっている直線部分を外挿して横軸をきる値を共振の閾値電流 I_{th} とするが、図からわかる通り閾値は温度の上昇と共に高い方へずれていく。

次にCCDによって観測した共振の臨界点前後でのモードの成長の様子を図4に示す。温度を一定(10°C)にし、注入電流を変えていったときの各モードの出力パワーのスペクトルの変化である。モードの番号は共振へと成長するモードを0とし、波長の長い方を順に1, 2, 3, 4, 波長の短い方を-1, -2, -3, -4と番号付

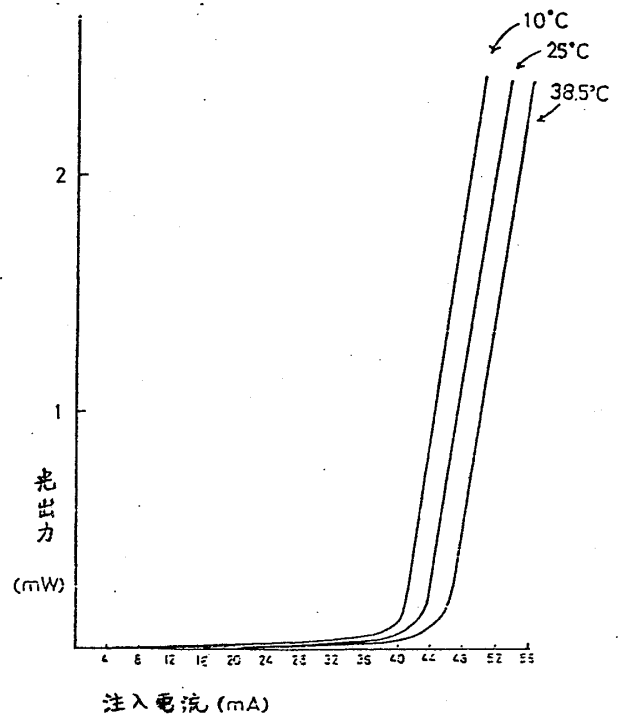


図3 注入電流-光出力特性

けしてある。モード間の波長差は $2.53 \text{ \AA}$ である。注入電流は I_{th} で割った reduced value $I' = I/I_{th}$ で表示しており、 $I' = 0.98$ は発振の閾値以下でのスペクトルであるが、モード0以外のモードもかなり成長している。閾値を越えるとモード0のみが成長し他のモードのパワーは相対的に減少する。すなわち発振の閾値以下では comparable に成長していたいくつかのモードのうち閾値を越えるとそのなかの一つのモードのみが他のモードを蹴おとす形で成長を遂げる。他のモードにとっての利得も図1に示したように特に小さいわけではないから、このように0モードのみが成長を遂げるのはモード間に何らかの相互作用があって、臨界点以上では0モードが周辺のモードのパワーを吸い取るような作用があると考えてよさそうである。

それを調べるために発振モードとその周辺のモードのゆらぎの相互相関を測定した。すなわちアバランシェフォトダイオード APD₁ でモード0（発振モード、温度が違っても図4における発振モード0とは違う）の出力を受光し、APD₂ で1, 2, 3, 4, -1, -2, -3, -4などのモードの出力を受光し、両者の相互相関関数を測りそれから同時刻における相互相関の値を求めた。図5にその結果を示す。図において縦軸は相関の値を示し、例えば(0,3)はモード0とモード3との相関を意味する。

これによると閾値以下 ($I' = 0.98$) では相関は殆んどなく0に近いが、閾値 ($I' = 1.0$) ではやや正の相関が現われ、閾値を越えると逆に負の相関となって注入電流の増加と共にふえていく。(0,-1)を除いては一般に発振モードとそれから近いモードとの間ほど相関が強く、波長が離れたモードとは相関が弱い。負の相関があるということは、例えばモード0のパワーがその平均値よりプラス側にゆら

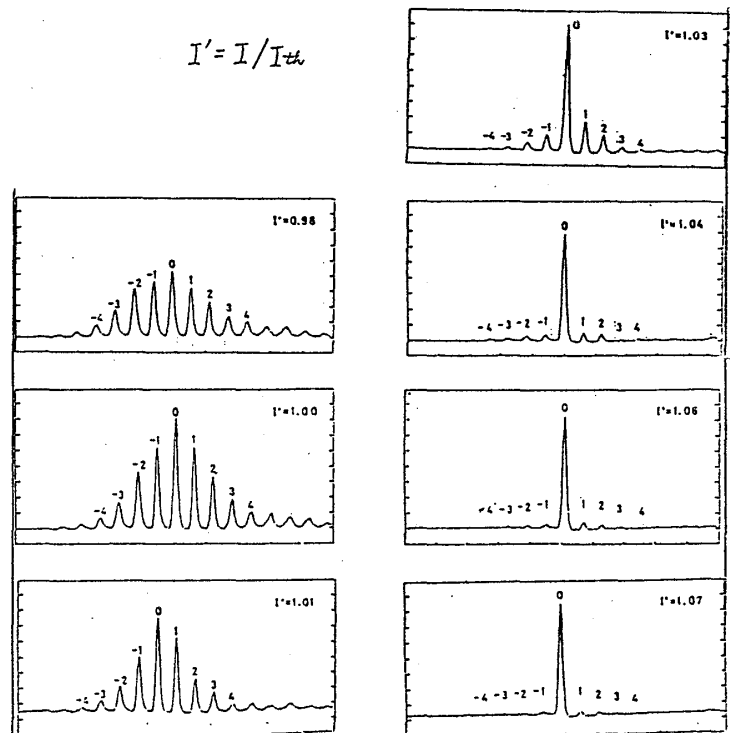


図4 10°Cにおける出力パワー・スペクトル

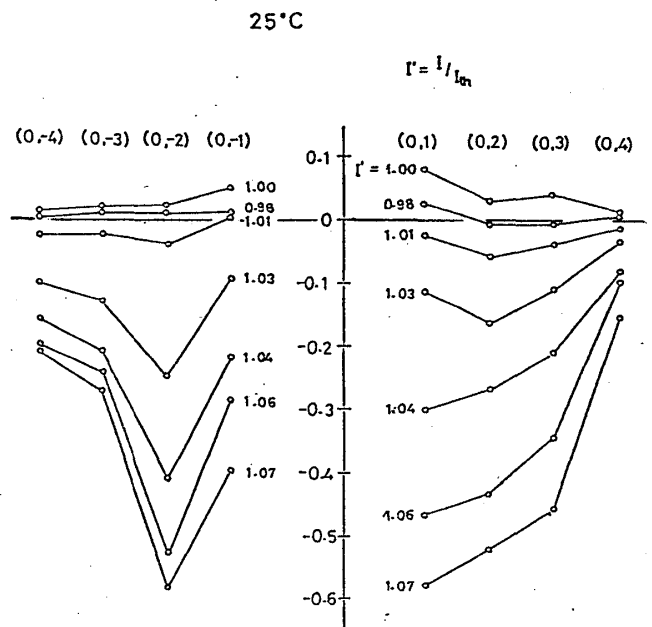


図5 25°Cにおける発振モードとその周辺モードとの間のゆらぎ相関

げばモード2のパワーはマイナス方向にやうぐということであって、その間にパワーのやりとりがあることを示唆している。つまり共振状態ではモード間には雑音のレベルでもパワーのやりとりが行われていると考えてよい。

ところで(0, -2)にくらべて(0, -1)は近いもの同士であるにもかかわらず相関が小さいが、このことは以下に示すようにモードホッピング現象と関連している。図6は温度を変えていったとき共振スペクトルがどう変化するかを示したものである。この図におけるモードの番号は35°Cにおいて共振するモードを0として通しの番号付けをしたものである。

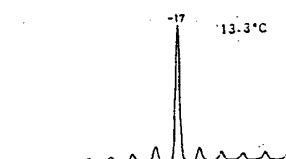
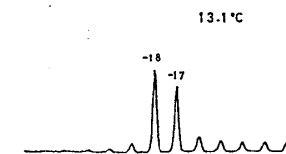
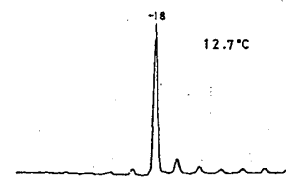
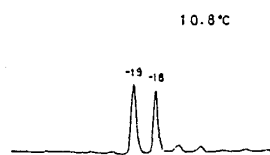
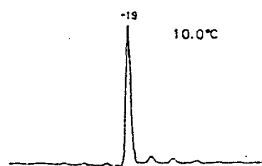
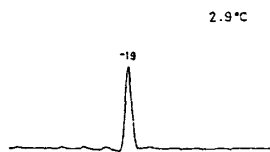
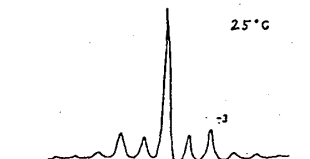
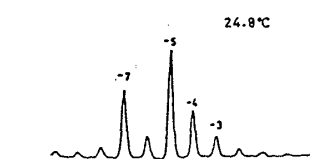
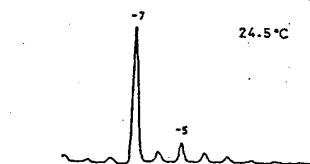
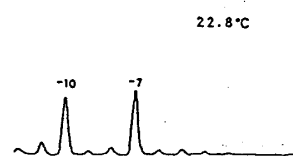


図6を見ると温度の上昇と共に共振モードは次々と隣りの長波長モードへ移っている。しかし25°C付近での共振モードの交代を示す図7においては、モードの交代は隣り同士ではなく一つあるいは二つとんだ先のモードとの間に起きている。図5と図7におけるモード番号は

図5 -3 -2 -1 0 1 2 3

図7 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2

のように対応しているが、図7において24.5°Cから25°Cへ温度をあげたとき、共振モードが-7から-5へとんでいて、-6が振れているのは図5において(0, -2)の相関が強く、(0, -1)の相関が弱いことに対応している。つまりモードホッピングは夏の相関が強いもの同士の間で行われることを意味している。



このような共振モードの交代におけるスキップが何故起こるか。使用した素子の半導体中の格子欠陥などによって、たまたま-6のモードの波が成長しにくかったのか、理由はわからないが、とにかく、モード間にはパワーのやりとりで協力的関係にある(やうぎに夏の強い相関がある)ものとそうでないものとがあって、モードの交代は協力的関係にあるモード間で行われることがわかった。

図6 温度変化(2.9~13.3°C)による共振モードの交代 図7 温度変化(22.8~25°C)による共振モードの交代