

双対型フリップ・フロップ半導体レーザ

Set-Reset Flip-Flop Semiconductor Lasers

渡辺正信
M.WATANABE

Cross-coupled lateral mode operation in twin-stripe lasers has been investigated both theoretically and experimentally. With symmetric structure and symmetric current injection, asymmetric output light pattern was observed where the peak position at one facet is opposite to that at the other facet. Consequently, the laser exhibits bistability of set-reset flip-flop type with complementary outputs and identical switching-on and -off times.

§ 1 はじめに

本研究で行ってきた双対型フリップ・フロップ半導体レーザの理論、概念、実験とその意義について概説する。現象としては、補出力も持つフリップ・フロップの形をしている点で興味深く、概念としては、縦横の共振を同時に考慮することによってはじめて見いだされるモードであるという意味で新しいものである。

1983年に、英国ケンブリッジ大学のホワイトらにより、通常の認識と異なる半導体レーザの発振モードが観測された。二本の陽極を持つツインストライプレーザと呼ばれる構造において、それぞれの端面の光出力分布のピーク位置が互いに反対側の陽極の下にあるものであった¹⁾。

両端面の光分布が異なる非対称性はあり得ることである。例えば、陽極の幅が $20\mu\text{m}$ くらいある初期の利得導波型レーザにおいては、横モードが構造的に制御されず、光が強くなった部分のキャリアが消費されることによって屈折率が高くなり、ますますそこに光が集中する自己収束またはフィラメンテーションと呼ばれる現象が見られていた。このようなレーザでは、共振器内の光は予測しがたい蛇行をし、両端面の光の分布も異なる。

一方その後、半導体レーザの横モード制御が精力的に行われ、陽極幅を $7\text{--}8\mu\text{m}$ 以下にしたり、メサ構造や

埋め込み構造等の屈折率閉じこめを行うなどにより、横単一モードが普通の状況となった。ここまで進歩した時点では、両端面の光分布は同じであるのが当たり前であり、したがって両端面の光分布を同時に測定することは通常行われなかったと考えられる。

ケンブリッジ大学のケースは、 $3\mu\text{m}$ の幅を持つ二本の陽極が $3\mu\text{m}$ の間を置いて配置されたものであり、フィラメンテーションが起こりにくくなる寸法であった。また非対称とはいえず、陽極の真下にピークがあることから、必ずしも不安定性に起因する予測しがたいものとも限らない。ホワイトらは新しい現象だとして、交差結合モードと名付けたが、発生機構は明らかにしていない。また昔からある不安定性によるものに過ぎないと反論する報告もあった²⁾。

筆者らは、電流注入や構造の小さな非対称性が、光出力に大きな非対称性をもたらす可能性を考え、ホワイトらの協力を得て計算を行った。結果は予想を越え、構造的対称性は不要であり、全く対称なレーザにおいてそのような非対称出力光が得られる条件があることが示された³⁾。

§ 2 解析のモデル

実際のレーザでは最初に注入電流が与えられ、それに対してキャリア密度と光の分布が決まるので、その

KEY WORDS: 半導体レーザ, 光双安定性, 双対型フリップ・フロップ, 縦横共振モード

ような順序で解析するのが最も明快である。しかしながら一般的には、このようにして横モードを求める計算は煩雑である。キャリアまたは光の分布を仮定したのち、収束するまで両者を交互に繰り返し計算することが必要となる。しかもここで扱う交差結合モードは縦方向(共振器長方向)にも光分布が変化するため、その方向の光とキャリアの分布も考慮に入れる必要があり、膨大な計算になると予測される。

ところが、キャリア分布の形を予測できる場合には、キャリアや注入電流の分布を注目する領域ごとに平均して単純化し、計算順序を次のように変えることによって、繰り返し計算を避けることができる。すなわち、最初にキャリア分布を与え、それに対する横モードを求め、最後にそれらを保持するのに必要な注入電流分布を求めるという順序で解析を行えば良い。この単純化が、明らかにしたい現象の特徴を失わないように行なえれば、定性的に意味のある結果を得るこ

とができ、有用である。本研究ではこの手順で計算を行なった。横モードの形がキャリア分布に依存しないという近似が可能な場合には、最初に注入電流を与えてもキャリア密度と光子密度との単純な連立方程式として容易に解けるが、ここでの目的には使えない。

解析するツイinstライプレーザの構造を図1に示す。AlGaAs系材料で作られた埋め込みヘテロ構造の2本の導波路を想定している。利得導波型と比べて横モードの計算を簡単にできるため、この構造を採用した。活性(active)領域 横方向(lateral)クラッド 縦方向(transverse)クラッドの誘電率はそれぞれ $\epsilon_a=13.1 - 0.023i$, $\epsilon_l=12.9$, $\epsilon_t=11.4$ とした。これらはAlとGaとの比率によって容易に得られる値である。2本のストライプの間隔は、結合長を実際のレーザの長さ程度(数百 μm)にすることを条件として決定した。

一樣な電流注入のときに、もし交差結合モード発振が原理的に可能ならば、そのような光分布は、図1(a)に示

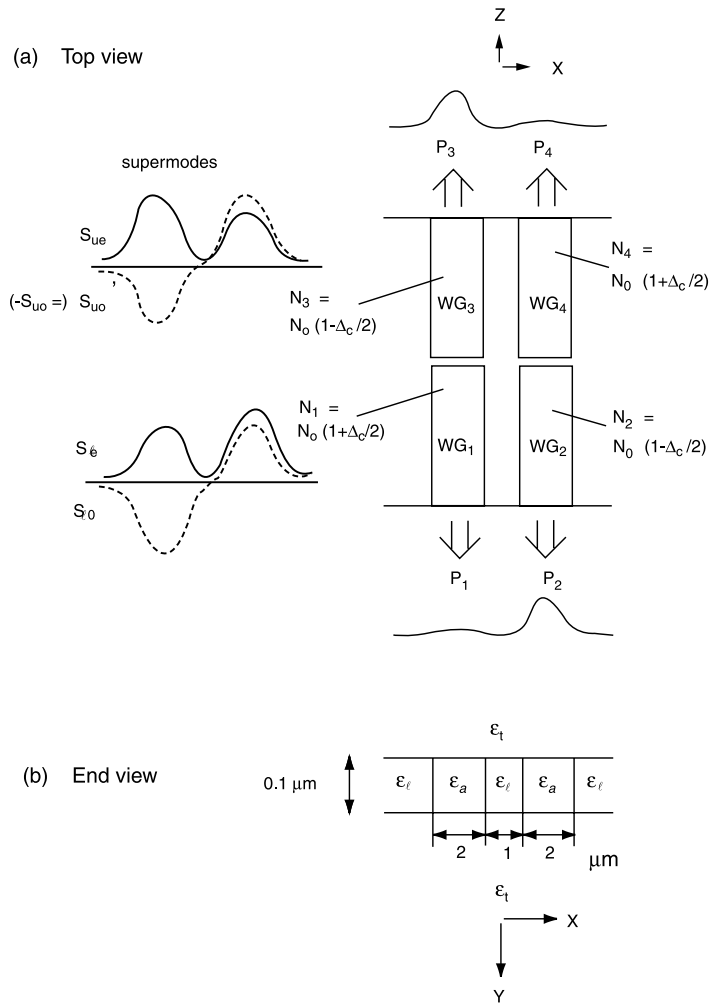


図1 解析モデルのツイinstライプ半導体レーザ構造図
各斜めのペアの領域には等しいキャリア密度を持たせてある。

したような斜めのキャリア分布を作り出す。これを最も単純に表現するため、四つの領域にのみ区分してある。

図1(a)に示したように、斜めのペアの活性領域についてはキャリア密度 N を等しくし、隣り合う導波路間での N の差を ΔN で代表させる。活性領域のキャリア密度 N による複素屈折率変化は、キャリア密度 N に対して線形に与えた。ここで、キャリア密度の増加に対して利得が増加するのは当然であるが、屈折率も変化(この場合は低下)することが本質的に重要である。

キャリア分布をパラメータとして与えると、導波路および共振器形状が完全に決定される。まずこれに対して共鳴モードの光分布を求め、次に必要な電流分布を求める。具体的な手順を以下に述べる。

Maxwell方程式を一次元化するために有効屈折率法を採用し、まず y 方向の3層スラブにおけるMaxwell方程式を解く。この計算の間、 x 方向の屈折率変動よりも y 方向の屈折率段差の方がずっと大きいので、 x 方向の屈折率分布は無視している。次の段階で、 x 方向の5層スラブ方程式を解いてツイン導波路の基本(0次)モードと1次モードを求める。これらのモード形状を、図1(a)の左側に模式的に示した。実線が0次、波線が1次モードである。 z 方向の電界分布変化は、この二つのモードを同時に存在させることによって表現される。さらに z 方向の伝搬を考えた固有値方程式を解き、一往復後に形の変化しない界分布(共鳴横モードと呼ぶ)を求める。求められたモードは、ある特定の比率で0次と1次のスーパーモードの和を取ったものとして表現されている。求めた共鳴横モードのうち、増幅率の最も大きい物が、キャリア分布が作り出そうとする光である。最後に、与えたキャリア分布と求めた光分布を保持するのに必要な電流分布を、レート方程式から求める。

こうして、キャリア分布を媒介にして、注入電流分布と光分布との関係を調べる。

4つの電極に注入すべき電流は電流密度を各電極上で積分することにより求める。斜めのペアの領域のキャリア密度が等しいと光パワーも等しく、結果として電流も等しくなる。

§ 3 解析結果

3.1 共振器長に対する出力光分布の依存性

ここでは、平均キャリア密度を、共鳴横モードの一

往復の利得がほぼ1になるような値に固定する。

図1のようにキャリアが斜めの分布のとき、共鳴モードの光パワーも斜めの分布を持つ。例として、 $\epsilon = 0.024$ 、 L (共振器長) $= 0.95L_c$ (結合長)の場合の2つの共鳴モードの光パワー分布($\pm z$ 方向に進む光の電力を足し合わせてある)を図2に示す。通常、一方の共鳴モード電界の導波路間位相差は 0° に近く、他方のモードでは 180° に近くなっている。そこで、この位相差が 0° に近い方を偶類似モード、 180° に近い方を奇類似モードと呼ぶことにする。図2では(a)が奇類似、(b)が偶類似である。これらのモードは互いに反対側の導波路に最大ピークをもっている。キャリア分布が固定され、これら2つの共鳴モードの利得が異なっていれば、利得の大きいほうの共鳴モード(主モードと呼ぶ)のみが現われ、利得の低い共鳴モード(副モードと呼ぶ)は現われない。

$\epsilon = 6 \times 10^{-3}$ に固定し、共振器長 L のみを変えて左右の光出力比を計算した場合の結果を図3に示す。主モードを実線で、副モードを破線で表わしてある。この場合のように、 ϵ が小さい時、主(副)共鳴モードはいつも奇(偶)類似モードになっている。この理由は次のように説明される。共鳴モードの利得を決める要因としては局所利得だけでなく、閉じ込め係数(モードパワー全体に対する活性領域内の部分の比率)も忘れてはならない。 ϵ が小さければ後者の寄与の方が大きいため、奇類似モードの利得の方が大きくなる。

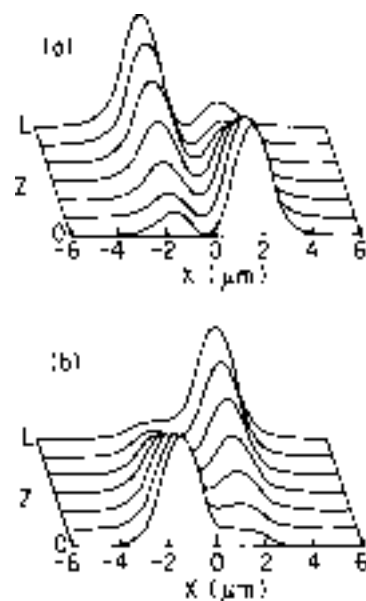


図2 共鳴モードの光パワー分布の例
(a)の奇類似モードは中心に零点を持ち、
(b)の偶類似モードは持たないことに注目。

図3の主共鳴モードの振舞いで最も興味深い点は、 $L < L_c$ における光パワー比 P_1/P_2 が1より小さく、最大パワーがキャリア密度の小さい WG_2 側にあることである。これは直観的な想像とは逆になっているが、これが内部的な正帰還を引き起こし、非対称発振の原因となる。このようなことが起こる理由も説明された³⁾。もう1点指摘しておくべきことは、図(b)において $L=L_c$ 付近においてのみ、左右の位相が 0° または 180° からずれることである。このことは、一様導波路の偶と奇の横モードが混在していることを示しており、図(a)において L/L_c が1から大きくずれることと対応している。

$\rho = 3 \times 10^{-2}$ に増加した時の結果を図4に示す。 $L=L_c$ の近辺で各共鳴モードの P_1/P_2 が1から大きくずれ、また位相差が 0° または 180° からずれること、また L が小さいところで主モードの P_1/P_2 が1より小さくなるという大筋は同じである。異なる点がいくつかある。

まず P_1/P_2 の1からのずれがずっと大きくなっているが、これはキャリア分布の非対称性が大きくなっていることから生じている。次に P_1/P_2 が1を横切る点が左にずれて $L/L_c=0.93$ 付近となっているが、これはキャ

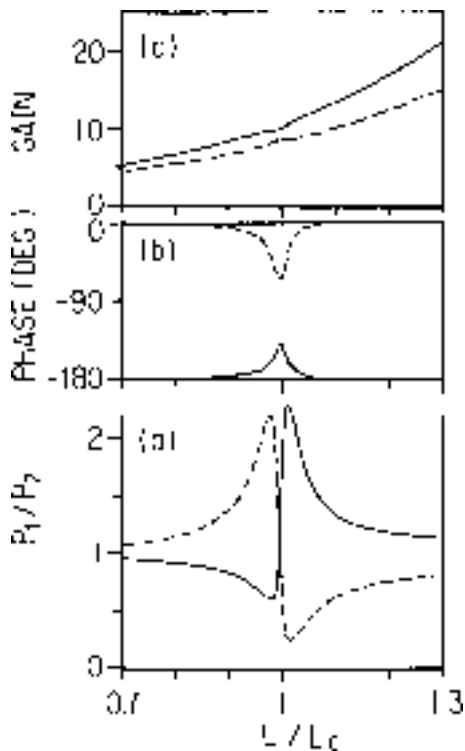


図3 キャリア分布パラメータ ρ を 6×10^{-3} に固定して共振器長を変化させた時の、(a)光出力ピークの比、(b)位相差、(c)モード利得の依存性である。実線が利得の高い方の共鳴モード。 $L/L_c < 1$ の時に、このモードがキャリアの少ない方にピークを持つことに注目。

リア分布の非対称性の増大によって、閉じこめ係数よりも利得の効果が強くなるためである。

質的に異なるのは P_1/P_2 が1を横切る点が、図3では連続、図4では不連続であることである。これはパワー分布を表す(a)および位相差を表す(b)の両方においてそうになっている。図3の場合には奇類似モードは常に奇類似モードであり、このモード自身が共振器長 L の変化にしたがって形を変え、 $P_1/P_2=1$ を横切る。従って P_1/P_2 は連続的に変化する。一方図4では、奇類似モードが L/L_c 付近を境にして偶類似モードに変化していくが、通常閉じこめ係数の大きい奇類似モードが優勢なので、利得の大小関係がどこかで逆転し、その点で P_1/P_2 は不連続に変化することになる。

仮想的なケースとして、キャリア密度によって屈折率変化のみが起こる場合および、その逆に利得変化のみが起こる場合についても同じ計算を行った。前者については、キャリア分布の非対称性を強くしていても、定性的には図3および図4と全く同じであり、ただ、 ρ が大きい場合でも主モードのスイッチする点が常に $L=L_c$ においてであることのみが異なる。後者の利得変化のみが起こる場合を図5に示す。これは図3とも図4とも異なる。奇類似モードは常に奇類似モードであるが P_1/P_2 は常に1より大きい。したがって、前者の場

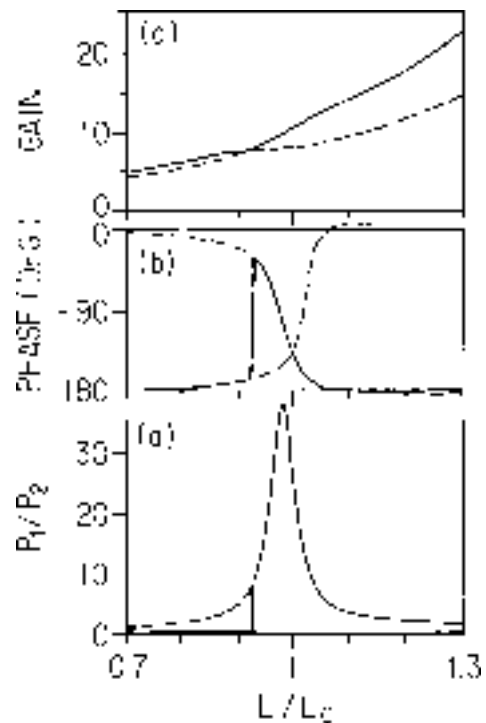


図4 $\rho = 3 \times 10^{-2}$ に大きくした時の、図3と同様の計算結果。

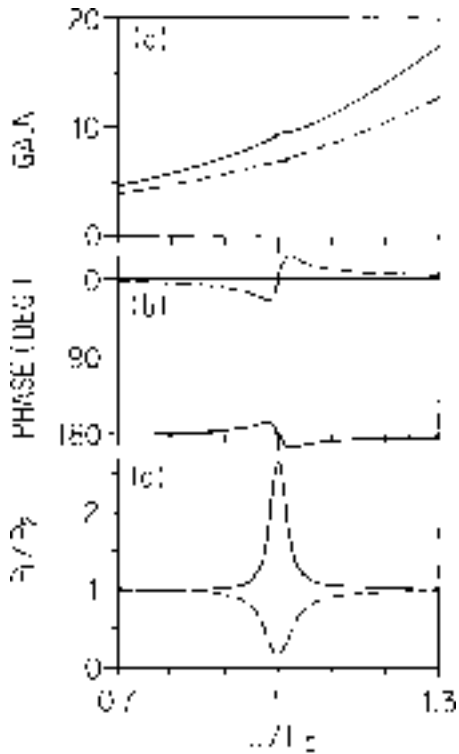


図5 キャリア密度によって利得変化のみが起こる場合についての計算結果。 $\epsilon_0 = 2 \times 10^{-2}$ 。

合には交差結合モード発振は顕著に起こる(条件が広く、また非対称性も強い)が、後者では起こらない。

3. 2 注入電流分布に対する出力光分布の依存性
- 交差結合モード間の双安定性

これまでではキャリア密度を与えた場合の電界分布を調べたが、実際のレーザデバイスでは外部から制御できるのはキャリア密度ではなく、注入電流であるため、最終的には電流分布に対する出力光分布の依存性を知らねばならない。まずキャリア分布(n_0)を与えると3.1で調べてきた方法により P_1/P_2 が決まる。次にこの n_0 と P_1/P_2 を保持するために必要な注入電流はキャリアのレート方程式から求められる。このようにして n_0 を媒介にして P_1/P_2 と Cu_1/Cu_2 の関係を求める。

A. $L/L_c > 1$

一様電流の場合には光分布は対称となり、通常見られる対称な発振状態となる。

B. $L/L_c < 1$

図6は $L/L_c = 0.95$ に固定し、光出力を変えた場合の計算結果である。注入電流は光パワーに比例する誘導再結合項とキャリア密度のみに依存する自然再結合項

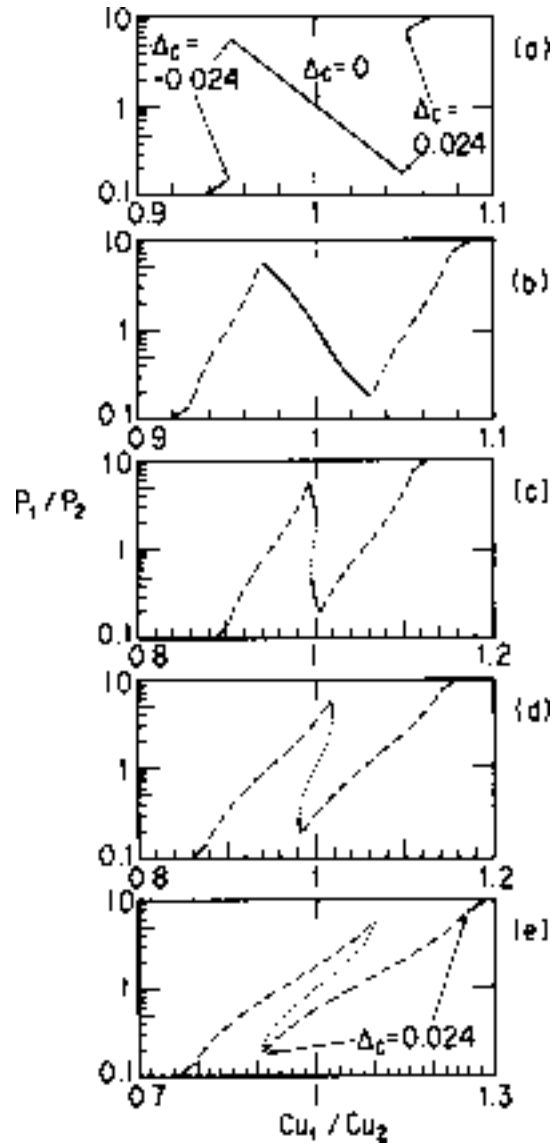


図6 $L/L_c = 0.95$ の時の光パワー比と電流比の関係。光パワーを(a)0mW, (b)0.22mW, (c)0.55mW, (d)0.88mW, (e)2.2mWと、少しずつ増加させて計算したもの。(c)より下では対称光出力解が不安定となり、二つの非対称出力解となることに注目。

とからなる。出力光パワーが零である図6(a)においては、電流分布はキャリア分布のみによって決まり、 n_0 に対して電流比 Cu_1/Cu_2 は単調に増える。光パワー比 P_1/P_2 は n_0 が0から0.024まで増加する間は単調に減少し、 $n_0 = 0.024$ において不連続に変化する。これは奇類似モード {図2(a)} から、キャリアの多い導波路にピークをもつ偶類似モード {図2(b)} へスイッチするためである。

光の存在が上記のグラフに与える影響を調べてみよう。次の図(b)は光出力が $P_0 = 0.22mW$ の場合である。光パワーが大きいほど誘導再結合の効果は大きい。し

たがって $P_1/P_2 > 1$ (< 1) である上(下)半分は右(左)へ、 P_1/P_2 が1より離れている点ほど大きく移動する。その結果、どちらの共鳴モードも単独では光パワー比を与えない電流比の領域 $\{(b)\}$ においては $1.03 < Cu_1/Cu_2 < 1.07$ が現われる。不連続になる $P_0 = 0.024$ mW においては2つの共鳴モードの利得は等しいため2モードが共存し、これによって上記の電流領域における光パワー比が与えられる。2つのモードの波長は一般に異なるので、全体の光分布は各モードの光パワー分布の単純な和で与えられる。2モード共存状態に対する計算結果を破線で図(b)に示してある。これらの動作点においては P_0 の増加(減少)に対して、その状態を保持するために必要な Cu_1/Cu_2 は増加(減少)するので安定である。以上の考慮によって、任意の Cu_1/Cu_2 に対して P_1/P_2 が得られる。

図(c)は $P_0 = 0.55$ mW の場合である。単一モード解の一部は不安定になり、点線で示してある。この図は非常に狭い双安定領域 $0.997 < Cu_1/Cu_2 < 1.003$ を持つ。特に、もし注入電流が一樣 ($Cu_1 = Cu_2$) であったとしても $P_1/P_2 = 3$ または $1/3$ という非対称な光出力が現われる。このときキャリア分布も非対称である。したがって、これらの存在によって起こる自然再結合と誘導再結合に

よるキャリアの減少を補うために必要な、それぞれの電流もまた非対称である。しかしながら、キャリアと光の最大ピークは互いに反対側の導波路にあるため、この2つの電流の総和は対称になり得るのである。単一奇類似モードによるこのような双安定性が得られる条件は、電流比のみでなく光出力も狭い範囲に限られている ($0.5 \text{ mW} < P_0 < 0.7 \text{ mW}$)。

図(d)に $P_0 = 0.88$ mW の場合の結果を示す。光出力がこれくらい大きいと、 $Cu_1/Cu_2 = 1$ における安定単一モード解は消失する。その代わりに、それぞれの安定状態が2つの共鳴モードよりなる双安定性が現われる。この2モード双安定性は $P_0 > 0.7$ mW (上限は無い) において現われる。

光出力をさらに2.2mWまで増加すると、(e)に示したように、 $Cu_1/Cu_2 = 1$ 付近の単一モード解は全て不安定になる。この場合の2モード双安定の電流比範囲は $0.9 < Cu_1/Cu_2 < 1.1$ であり、単一モード双安定の場合よりもはるかに広い。 P_0 の増加とともにこの電流範囲は広がるが、光パワー比は1に近づいていく。

図7に、光出力を変えた時の光パターンの変化を示す。左が近視野像、右が遠視野像で下の図ほどパワーが大

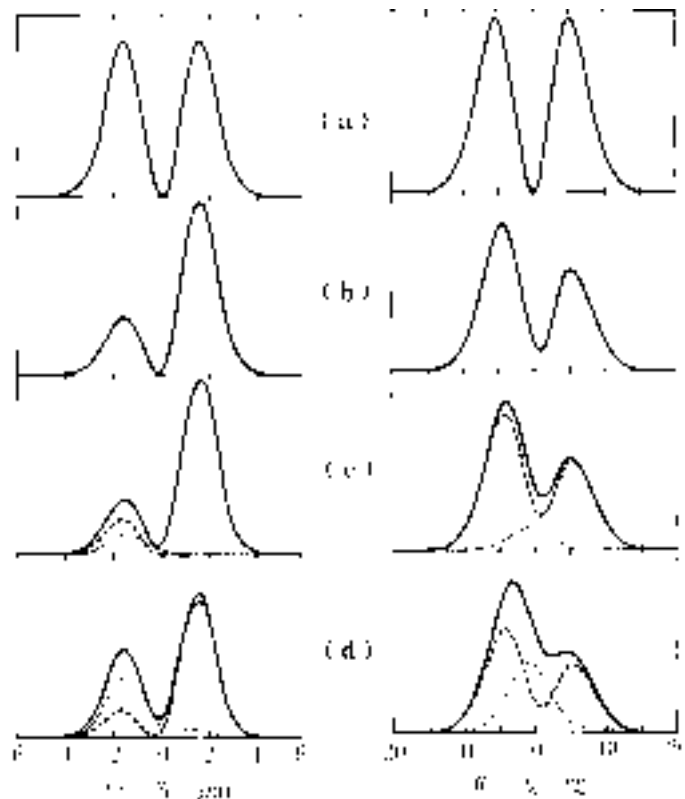


図7 ツインストライプへー様に電流を注入した時の近視野像(左)と遠視野像(右)。光出力パワーは、(a)0.5mW以下、(b)0.55mW、(c)0.88mW、(d)2.2mWである。

きい場合である。図7(a)が図6の(a)と(b)、図7(b)-(d)がそれぞれ図6(c)-(d)に対応している。図7(c)-(d)では奇類似モードと偶類似モードが混在したマルチモード発振になっており、それぞれの成分を波線と点線で書いてある。このように、近視野像と遠視野像の両方に非対称性が現れ、双安定状態に変化するパラメータの所でもっとも非対称性が強い。

§ 4 短共振器化の限界

これまでの議論から、顕著な非対称光出力をもつ双安定性が現れるためには、共振器長が二本の導波路の結合長に近い必要がある。従って、共振器長を短くするためには結合長を短くすること、言い換えれば、二本の導波路の結合を強くすることが必要である。そのための条件は、

- (1) コアとクラッドの屈折率差(以下、屈折率差と略記する)が大きいこと、
 - (2) 光が他方の導波路まで大きく漏れ出てその導波路に結合すること、したがって、導波路幅が狭くかつ導波路間隔はもっと狭いこと、
- の2点である。このことは定性的には次のように考えれば理解できる。

結合モード近似の見方からは、光の電界が外へ漏れなければ近くに別の導波路があっても結合するわけではない。また他方の導波路のコア・クラッド間屈折率差が極端な場合にゼロであれば、いくら漏れだしていても結合する相手が無い。一方全体のツイン導波路を一つとして見る見方からは、結合長は二つのモードの伝搬定数の差に反比例するが、伝搬モードの規格化屈折率(モードの伝搬定数を真空中における伝搬定数で除して規格化したもの)は必ずコアとクラッドの屈折率の間にある。また(2)の条件を強めて行くと、一次モードはカットオフに近づき、その規格化屈折率はクラッドの屈折率に近づくと、基本モードのそれはコアの屈折率に近い値に止まるため、その差は大きくなる。

さて、上記の2点の条件に関して、図8(a)に示したような従来型の、活性層に平行に二本の導波路を並べる構造を検討してみる。まず図1の計算モデルのような作りつけの屈折率差は無く、キャリア密度分布による導波路(いわゆる利得導波構造)の場合、実効的な屈折率差を大きくするのは困難である。埋め込み構造を用

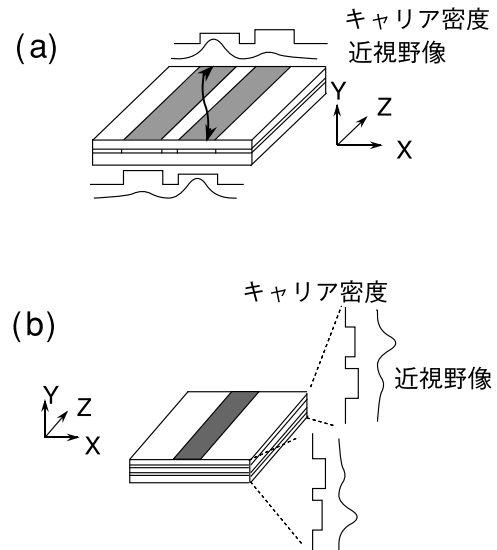


図8 (a) 導波路を活性層面に配置する従来型と、(b)活性層に垂直な方向に二本配置する二段活性層型の模式図。

いれば屈折率差は大きくでき、(1)はクリアできるが、導波路幅や導波路間のクラッド幅をサブミクロンにするのは現状では困難である。

しかしながら考え方を換え、図8(b)に示すように、活性層に垂直な方向に二本の導波路を作れば大幅に改善できる。屈折率差は容易に大きくでき、しかも導波路の幅や間隔はnmオーダーで作ることも可能である。この二段活性層構造を想定し、AlGaAs材料の場合における短共振器化の限界を計算した。その結果、短共振器化の限界は約1 μm であることがわかった。

§ 5 実験

結合長に近い約500 μm の共振器長をもつツインストライプ半導体レーザを作製した。それぞれの電極への注入電流が90mAと95mAという、ほぼ均一な条件において、図9に示したように、それぞれ自身の両端面の光出力分布が互いに反対称である二つの近視野光出力分布が得られ、理論が裏付けられた⁵⁾。遠視野像も同様に反対称であったことから、位相分布も含めて反対称になっている。図9(a)の状態にある時に下から右側の導波路に光を入射すると、(b)の状態にスイッチするはずである。従来よく知られた全パワーがオン・オフする双安定性半導体レーザと違い、元の状態に戻すのも同様のスイッチングが可能である。すなわち補出力

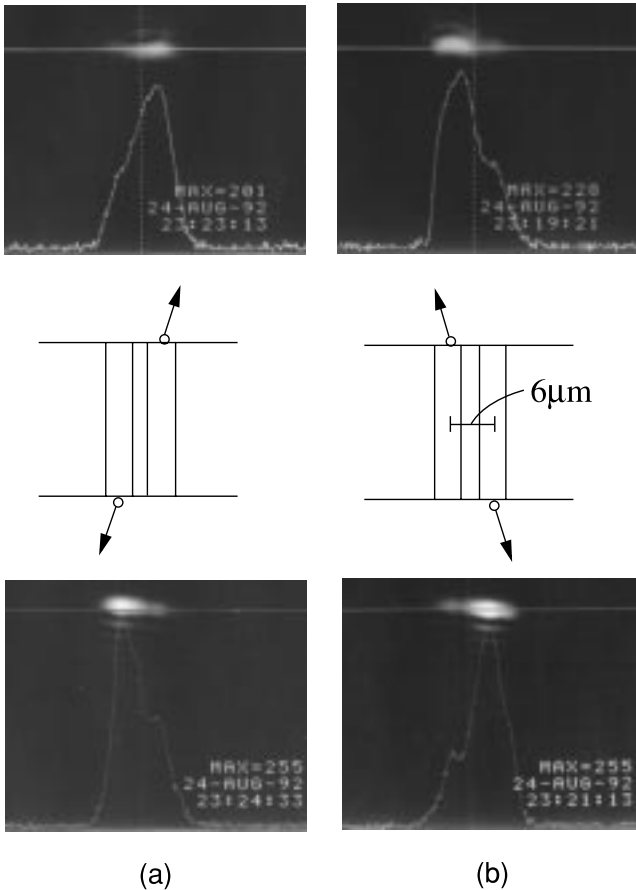


図9 近視野像観測結果。(a)と(b)はほぼ均一の、同じ電流注入に対するもの。

も出すこと、オン・オフとも光入力のできること、オン・オフの時間が等しいことという特長がある。

二段活性層型のレーザも試作し、単純なレーザ発振まで確認している。

§6 まとめ

現象面に関しては、このデバイスは電子回路のセット・リセット・フリップ・フロップと類似している点の特長である。従来のオン・オフ型双安定半導体レーザもフリップ・フロップと呼ばれることがあるが、それらは出力ポートが一つしか無く、またオフスイッチングは光入力ではできない。ここで述べたレーザは、0と1が対となって出力され、他方の状態へのスイッチングも同様の光入力のできる。

理論面に関しては、ここで述べた交差結合モードは、縦(光の進行方向)と横(それに垂直な方向)の両方の共振を同時に考慮してはじめて見いだされるもの

である。従来、出射光の分布を調べる場合には縦モードを固定して横モードのみの変化を調べ、発振波長を調べる場合には横モードを固定して縦モードの変化を調べるのが通常であり、そのため、このようなモードの存在が見落とされていたといえる。

大出力用に開発されているアレイ半導体レーザにおいても条件によっては類似の現象が起こっている可能性が推測される。三安定等のもう少し複雑な現象が存在する可能性も考えられる。

参 考 文 献

- 1) I.H. White and J.E. Carroll, "New mechanism for bistable operation of closely coupled twin stripe lasers", *Electron. Lett.*, vol.19, pp.337-339, 1983.
- 2) K.A. Shore, "Mode-guiding in bistable twin-stripe lasers", *Electron. Lett.*, vol.19, pp.874-875, 1983.
- 3) M. Watanabe, I.H. White, and J.E. Carroll, "Analysis of the cross-coupled lateral mode in a twin-stripe four-contact laser with diagonal current injection", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-26, pp. 1942-1953, 1990.
- 4) M. Watanabe and S. Mukai, "Cavity length limitation of the crosscoupled mode bistability in a semiconductor laser", *Proc. SPIE*, vol. 2693, pp. 386-397, 1996.
- 5) M. Watanabe, H. Fujiki, S. Mukai, M. Ogura, H. Yajima, K. Shimoyama, and H. Gotoh, "Observation of switching related to bistability between two cross-coupled lateral modes in twin-stripe lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-30, pp.2232-2234, 1994.

(2000.3.3受付)