

2.5. 過飽和吸収体を用いた双安定レーザー

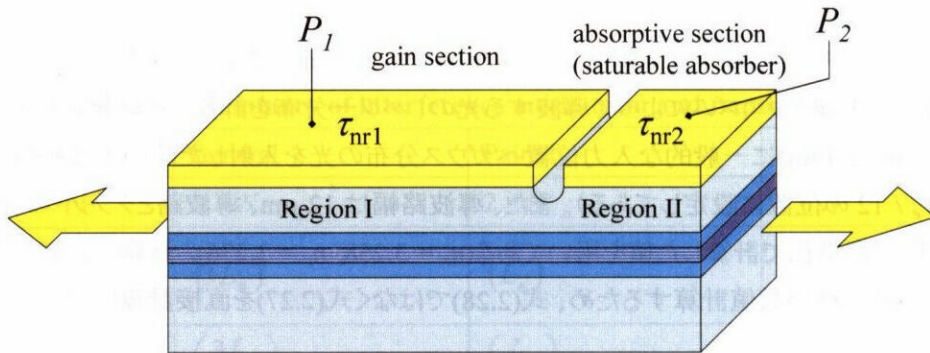


Fig. 2-15: Schematic view of absorptive bistable LD (two sectional LD).

双安定レーザーとは、安定した状態が 2 つ以上存在するレーザーのことである。ここでは特に、同じ電流注入値で発振する・しない、の 2 状態をあわせ持つ双安定レーザーについて述べる。これは単純にレーザーの共振器を 2 つに分割することによって得ることができる。この 2 セクションレーザーについては、1964 年に Lasher らによって最初に提案された[37]。

電流を注入すると利得を持つということは、逆に電流を注入しなければ(もしくは逆バイアスをかけると)光に対して損失となる。この部分を過飽和吸収体(saturable absorber)と呼ぶ。この時、外部から十分強い光が入ってくると電子正孔対が発生し反転分布となり、損失が飽和する。つまり、強い光を入射すると損失が下がる、という性質を持つ。これを用いると、ある電流値ですでにレーザーが発振している時には過飽和吸収体の損失が小さいため発振し続け、逆にある電流値でレーザーが発振していない場合には過飽和吸収体の損失が大きいため発振しない、という 2 つの状態をあわせ持つことができる。

このように、過飽和吸収体を用いた双安定レーザーの主な原理は、吸収の飽和である。吸収が飽和する主な要因は、注入された光によるバンドフィリング効果により吸収端がシフトすることにある。バンドフィリング効果について Fig. 2-16 に示す。

注入した光のエネルギーがバンドギャップより大きい場合は、価電子帯に存在する電子は励起され、電子正孔対を作る。この際、電子正孔対が再結合するよりも早く励起されると、伝導帯の底は全て電子で埋められバンドギャップは等価的に大きくなる。これがバンドフィリング効果である。これにより、フォトンの吸収端が短波側(高エネルギー側)へシフトし、着目している波長(エネルギー E_G)での吸収係数が下がる。

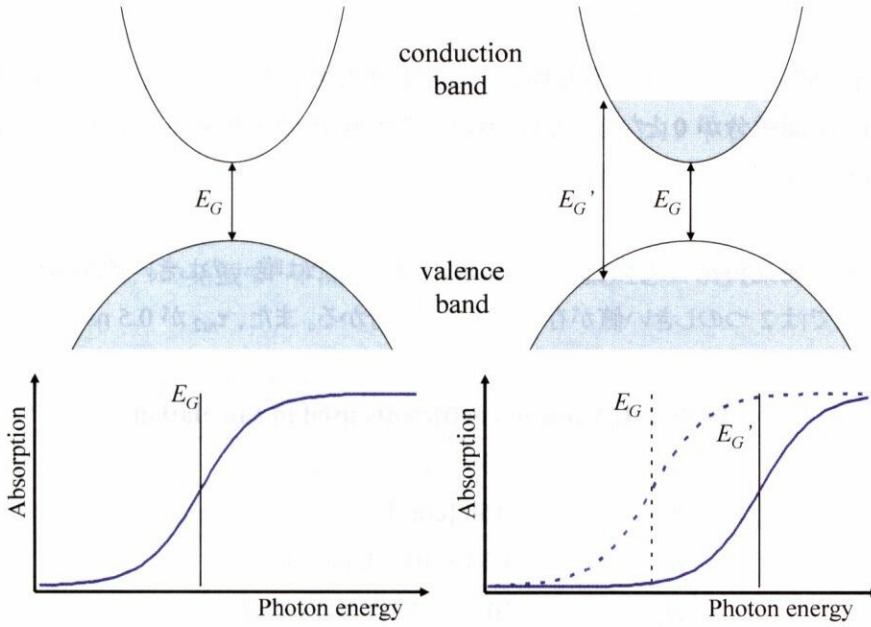


Fig. 2-16: Band filling effect.

ここから、2分割されたレーザーの双安定性について解析する[39]。この動作は主にキャリア寿命によって変化する。解析の前提としている構造は Fig. 2-15 に示した通り、領域 I と II に分割されており、それぞれの領域に別々に電流が注入されている。注入されている注入光は P_1 、 P_2 であり、また非発光再結合によるキャリア寿命を τ_{nr1} 、 τ_{nr2} とする。この状態でレート方程式は

$$\begin{aligned}\frac{dn_{c1}}{dt} &= P_1 - Bn_{c1}^2 - g_1(n_{c1})n_p v_g - \frac{n_{c1}}{\tau_{nr1}} \\ \frac{dn_{c2}}{dt} &= P_2 - Bn_{c2}^2 - g_2(n_{c2})n_p v_g - \frac{n_{c2}}{\tau_{nr2}}\end{aligned}\quad (2.52)$$

また

$$\frac{dn_p}{dt} = n_p v_g [\gamma_1 g_1(n_{c1}) + \gamma_2 g_2(n_{c2})] - \frac{n_p}{\tau_p} + \beta_{sp} B (\gamma_1 n_{c1}^2 + \gamma_2 n_{c2}^2) \quad (2.53)$$

である。ただしここで γ_1 と γ_2 は全体の共振器長のうち領域 I、II が占める割合であり、常に $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ である。また、 n_c は注入したキャリア数であり、 n_p は光子数である。また、単位体積あたりのポンプ率は $P = I/qV$ であり、ここで I は全体に注入している電流値であり、 V は体積である。 B は再結合係数であり、 v_g は光の群速度、 β_{sp} は自然放出の係数である。InGaAsP のレーザーでは注入電流と利得に線形な関係を仮定すると良いことが実験からも示されている[40]。よって、この2セクションレーザーでは場所に依存したキャリア寿命と、それに線形に依存する利得分布を仮定している。実際

の利得としては

$$g_i(n_{ci}) = an_{ci} + b \quad (i = 1, 2) \tag{2.54}$$

を仮定している。ここで、これまで仮定に際して使用してきた各係数をまとめる。

発振しきい値についてはレート方程式を定常状態で解くことによって得られる。すなわち、式 (2.52),(2.53)の時間微分が 0 となる。発振しきい値を領域 II の非発光再結合寿命に対してプロットした結果を Fig. 2-17 に示す。

領域 II の非発光再結合寿命 τ_{nr2} が 2 ns 以下の状況では唯一のしきい値がある一方、 τ_{nr2} が 2 ns 以上の領域では 2 つのしきい値が存在することが分かる。また、 τ_{nr2} が 0.5 ns 以下の領域では、

Table 2-2: Value of coefficients used in calculation

a	$1.35 \times 10^{-16} [\text{cm}^2]$
b	$-150 [\text{cm}^{-1}]$
B	$1.33 \times 10^{-10} [\text{cm}^3 \text{s}^{-1}]$
β_{sp}	10^{-5}
v_g	$0.67 \times 10^{10} [\text{cm s}^{-1}]$
τ_{nr1}	20 [ns]
τ_p	$3.73 \times 10^{-12} [\text{s}]$
$g_1 = g_2$	0.5
P_2	0

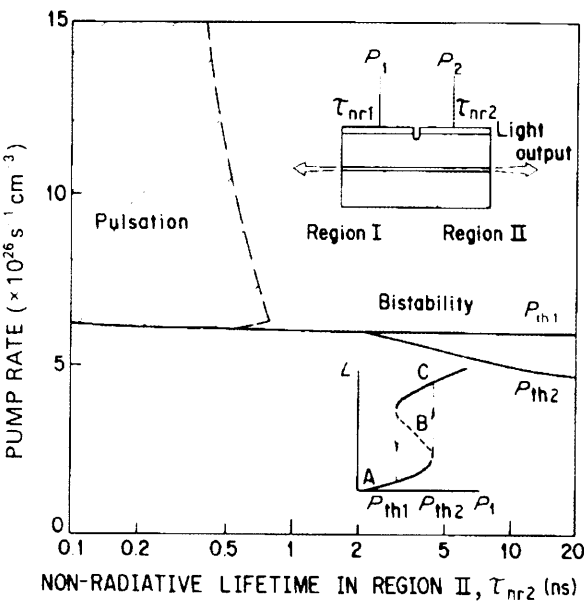


Fig. 2-17: Threshold pump rates (full lines) and pulsation region (shaded region) [39].

しきい値が徐々に上昇しているのが分かる。これは、領域Ⅰに注入したキャリアが領域Ⅰで自然発光し、それが領域Ⅱに入って光吸収されることにより、領域Ⅱの活性層にもキャリアが染み出していることによっている。

この τ_{nr2} が2 ns以上の領域を用いることによって双安定性を得ることができる。すなわち、ポンプ光(ないし注入電流)と光出力の間にヒステリシスが生じる(Fig. 2-17 中右下図を参照)。発振しきい値までポンプすると急激に光出力が上がり、逆に一度発振すると立ち上がりのしきい値以下まで下がっても発振を続ける、という現象である。この現象を用い、2つの発振モードの結合が弱い場合においても、その2つの発振モード間に双安定性を持たせることができる(本章 2.6.2 参照)。

2.6. MMI-BLD の双安定性

ここで、2.1 で簡単に紹介した動作原理について、詳細に説明する[24]。

2.6.1. 一般的な2モード間の双安定性

先述の通り、MMI-BLD の双安定性は主に相互利得飽和によって起こっている。MMI-BLD のように2モードが存在するレーザーでは、1次の非線形性より飽和した利得は

$$\begin{aligned} g_1(N) &= \frac{g_0}{1 + \varepsilon_{11}S_1 + \varepsilon_{12}S_2} \\ g_2(N) &= \frac{g_0}{1 + \varepsilon_{22}S_2 + \varepsilon_{21}S_1} \end{aligned} \quad (2.55)$$

と表される。ここで ε_{11} 、 ε_{22} と ε_{12} 、 ε_{21} はそれぞれ自己利得飽和係数 self gain saturation coefficient と、相互利得飽和係数 cross gain saturation coefficient であり、 g_0 は未飽和の状態での利得である。また、2つのモード間には、強結合と弱結合状態がある。

第1次の非線形性により、理想的なレーザーのモード*i*の飽和利得 $g_i(I)$ は、未飽和の利得 g_{i0} と、モードの強度 I_i と、飽和パラメータ I_{isat} を用いて

$$g_i(I) = \frac{g_{i0}}{1 + \varepsilon_{ii}I_i} \quad (2.56)$$

と表される。ここで $\varepsilon_{ii} = 1/I_{isat}$ である。 $\varepsilon_{ii}I_i \ll 1$ の時には

$$g_i(I) = g_{i0}(1 - \varepsilon_{ii}I_i) \quad (2.57)$$

と近似できる。2つの発振モードが存在するときには、片方のモードの強度はもう一方の強度に依存しており、そのモードのレート方程式は

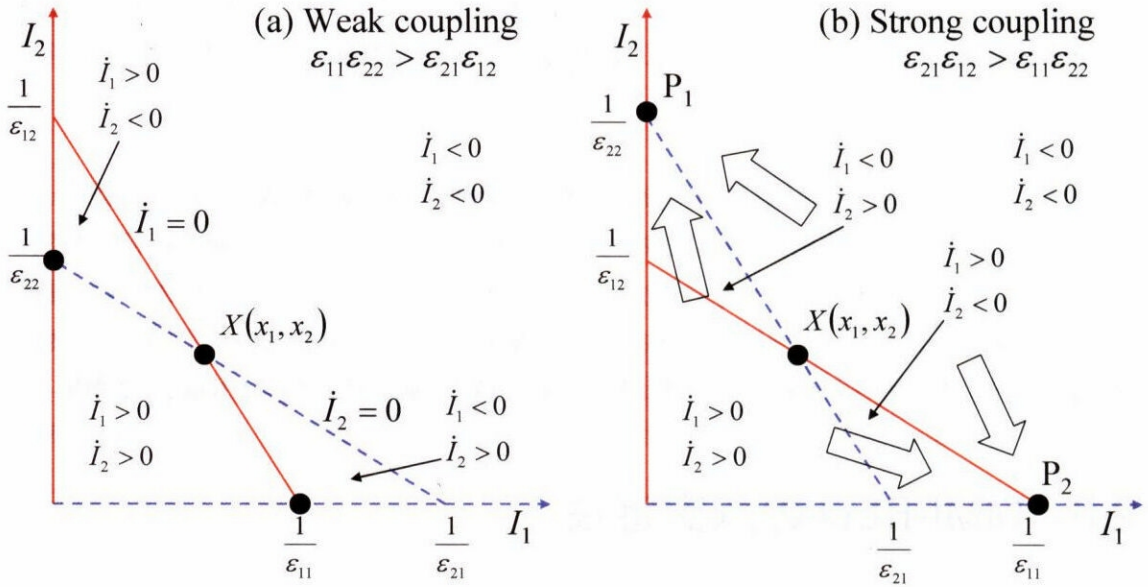


Fig. 2-18: Diagram for light powers I_1 and I_2 of two-mode oscillation [24], in (a) weak coupling case, (b) strong coupling case.

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= g_1 I_1 (1 - \varepsilon_{11} I_1 - \varepsilon_{12} I_2) \\ \frac{dI_2}{dt} &= g_2 I_2 (1 - \varepsilon_{21} I_1 - \varepsilon_{22} I_2) \end{aligned} \quad (2.58)$$

となる。これは (I_1, I_2) の平面で議論すると分かりやすい。定常状態では式(2.58)の時間微分が0となるため、

$$\text{when } \dot{I}_1 = 0, I_1 = 0 \text{ or } \varepsilon_{11} I_1 + \varepsilon_{12} I_2 = 1 \quad (2.59)$$

$$\text{when } \dot{I}_2 = 0, I_2 = 0 \text{ or } \varepsilon_{21} I_1 + \varepsilon_{22} I_2 = 1 \quad (2.60)$$

となる。この式を模式的にプロットした結果を Fig. 2-18(a)に示す。ただし $\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} > \varepsilon_{21}\varepsilon_{12}$ とする。

ここで $\dot{I}_1 = 0$ となる条件を赤色実線で、 $\dot{I}_2 = 0$ となる条件を青色破線で示す。これらの線で囲まれた各領域での \dot{I}_1, \dot{I}_2 の符号を示してある。これより交点は 3 ヶ所あることが分かる (Fig. 2-18 中黒丸で示す)。この中央の X とラベルしてある点では

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{\varepsilon_{12} - \varepsilon_{22}}{\varepsilon_{21}\varepsilon_{12} - \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}} \\ x_2 &= \frac{\varepsilon_{21} - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{21}\varepsilon_{12} - \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}} \end{aligned} \quad (2.61)$$

となる。また、ここで書き加えてある $\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} > \varepsilon_{21}\varepsilon_{12}$ が、2 つの発振モードが弱結合の状態であり、相互利得飽和係数の方が自己利得飽和係数よりも小さくなっている。この状態ではどのような初期値でも基本的に 1 つの状態へ収束する。交点 X の座標がどちらも正 ($x_1 > 0, x_2 > 0$) には 2 つの発

振モード (Mode 1 と Mode 2) の両方が発振する (点 X)。つまり、どのような初期値でも点 X へ収束する。交点 X の座標のうち、どちらか一方でも負になる場合には片方のモードのみが発振する。 x_1 のみ負の時には Mode 2、 x_2 のみ負の時には Mode 1 である[43]。すなわち、それぞれにおいて I_2 軸、 I_1 軸の交点へ収束する。

一方、強結合状態 $\varepsilon_{21}\varepsilon_{12} > \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}$ では線の傾きが変わり、ここで双安定性が現れる。この状態でのグラフを Fig. 2-18(b)に示す。この交点 X が第1象限に存在するときに双安定性が現れる。この状態では、初期値によって Mode 1 が発振するか (点 P_2)、Mode 2 が発振するか (点 P_1) 分かれる、という結果になる。また、この状態においては、 x_1 のみ負の時には Mode 1 が、 x_2 のみ負の時には Mode 2 が発振する。弱結合状態の時とは逆である。これより強結合の状態では片方のモードのみが発振し、もう一方のモードはそれによって抑えられることが分かる。2つのモードが同時に発振することは無い (かならず I_1 、 I_2 軸のどちらかに収束する)。

さらに、この定常状態の議論において、自己・相互利得飽和係数については結晶の対象性からある制約がかかる。InGaAsP においては、TE モード動作時の自己利得飽和係数と相互利得飽和係数の間に

$$\begin{aligned}\varepsilon_{12}(\omega_1 = \omega_0, \omega_2 = \omega_0) &= 2 \times \varepsilon_{11}(\omega_0) \\ \varepsilon_{21}(\omega_2 = \omega_0, \omega_1 = \omega_0) &= 2 \times \varepsilon_{22}(\omega_0)\end{aligned}\tag{2.62}$$

という制約がかかる。ここで ω_1 と ω_2 は2つの発振モードの角周波数である。また相互利得飽和係数は $\omega_1 = \omega_2$ の付近でのみ重要であるため、2つの発振モードの角周波数が等しい時を考える。

MMI-BLD においては2モード間の双安定性は、MMI 中で重なりを持つ2つの発振モード (Fig. 2-2)間で起こる。ここで Fig. 2-2 中に示した2つの発振モードは対象であり、同じ角周波数を持つため、式(2.68)は常に満たされる。よって2つのモード間は、本来は常に強結合状態となる。ところが、MMI 中では2つのモードは異なる分布をもつ。言い換えると、2つのモード間の重なりは100%ではないため、MMI 中での実効的な相互利得係数は小さくなってしまう。2つのモードの重なりは、それぞれの分布を $P_1(x, z)$ 、 $P_2(x, z)$ とすると

$$(\text{overlap}) = \frac{\iint \sqrt{P_1(x, z)P_2(x, z)}(dx)dz}{\sqrt{\iint P_1(x, z)(dx)dz} \sqrt{\iint P_2(x, z)(dx)dz}}\tag{2.63}$$

となる。これは100%よりも小さくなり、実際に FD-BPM で計算した結果を用いると60%程度となる。よって、実効的な相互利得飽和係数は上に示したほどは大きくならない。

実際にこの MMI-BLD での L-I 特性を、過飽和吸収体を取り付けていない状態で均一に電流を注入し、かつ Mode 1 に 5 dB 強い光を注入した状態で L-I 特性を計算してみても、Mode 1 と Mode 2 は同時に発振を始め、モード間の双安定性は見られなかった[24]。このことから、MMI で

双安定性を出すためには過飽和吸収体が必要であると考えられる。

2.6.2. 過飽和吸収体がある状態での双安定性

MMI の入出力ポートに過飽和吸収体を取り付けると、実効的な自己利得飽和係数は小さくなり[44]、これによってさらに強結合状態となる。過飽和吸収体が利得媒質と同じような飽和特性を持っているとすると、2 つの発振モードのレート方程式は

$$\begin{aligned}\frac{dI_1}{dt} &= \left(\frac{g_1}{1 + \varepsilon_{11}I_1 + \varepsilon_{12}I_2} - \frac{a_1}{1 + \varepsilon_{a11}I_1 + \varepsilon_{a12}I_2} \right) I_1 \\ \frac{dI_2}{dt} &= \left(\frac{g_2}{1 + \varepsilon_{21}I_1 + \varepsilon_{22}I_2} - \frac{a_2}{1 + \varepsilon_{a21}I_1 + \varepsilon_{a22}I_2} \right) I_2\end{aligned}\tag{2.64}$$

となる。括弧内の第 1 項、第 2 項はそれぞれ利得媒質中と、過飽和吸収体での利得飽和を示している。双安定性についてはこれを定常状態で解き、その解の安定性を見ればよい。定常状態では時間微分が 0 となり、新たに

$$\begin{aligned}G_1(I_1, I_2) &= \frac{g_1}{1 + \varepsilon_{11}I_1 + \varepsilon_{12}I_2} - \frac{a_1}{1 + \varepsilon_{a11}I_1 + \varepsilon_{a12}I_2} \\ G_2(I_1, I_2) &= \frac{g_2}{1 + \varepsilon_{21}I_1 + \varepsilon_{22}I_2} - \frac{a_2}{1 + \varepsilon_{a21}I_1 + \varepsilon_{a22}I_2}\end{aligned}\tag{2.65}$$

と置くと

$$\begin{aligned}I_1 &= 0 \text{ or } G_1 = 0 \\ I_2 &= 0 \text{ or } G_2 = 0\end{aligned}\tag{2.66}$$

となる。これは 2.6.1 の時と同様に、 $G_1 = 0$ と $G_2 = 0$ の 2 つの直線を (I_1, I_2) 平面内に引くことができる。これを Fig. 2-19 に示す。

ここで変数の置き換えを行い、

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{11} &= \varepsilon_{11} - \frac{g_1}{a_1} \varepsilon_{a11} \\ \varepsilon'_{22} &= \varepsilon_{22} - \frac{g_2}{a_2} \varepsilon_{a22} \\ \varepsilon'_{12} &= \varepsilon_{12} - \frac{g_1}{a_1} \varepsilon_{a12} \\ \varepsilon'_{21} &= \varepsilon_{21} - \frac{g_2}{a_2} \varepsilon_{a21}\end{aligned}\tag{2.67}$$

とすると、条件 $G_1 = 0, G_2 = 0$ は

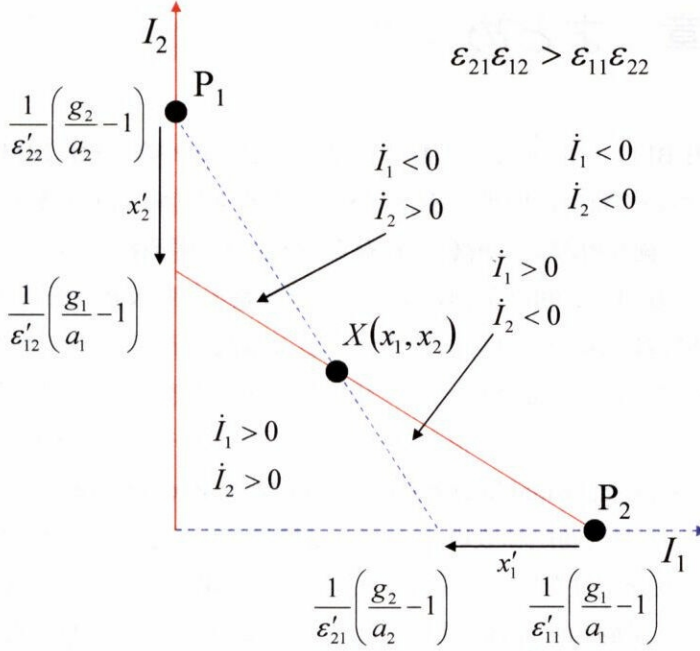


Fig. 2-19: Diagram for light power I_1 and I_2 of two-mode oscillation with saturable absorber [24].

$$G'_1(I_1, I_2) = \frac{g_1}{1 + \epsilon'_{11}I_1 + \epsilon'_{12}I_2} - a_1 = 0 \quad (2.68)$$

$$G'_2(I_1, I_2) = \frac{g_2}{1 + \epsilon'_{21}I_1 + \epsilon'_{22}I_2} - a_2 = 0$$

と書き換えることができる。ここで新たに

$$x'_1 = \frac{1}{\epsilon'_{21}} \left(\frac{g_2}{a_2} - 1 \right) - \frac{1}{\epsilon'_{11}} \left(\frac{g_1}{a_1} - 1 \right) \quad (2.69)$$

$$x'_2 = \frac{1}{\epsilon'_{12}} \left(\frac{g_1}{a_1} - 1 \right) - \frac{1}{\epsilon'_{22}} \left(\frac{g_2}{a_2} - 1 \right)$$

という変数を導入すると、発振条件について良く整理ができ、

- $x'_1 < 0$ and $x'_2 > 0 \rightarrow$ Mode 1 のみ発振
- $x'_1 > 0$ and $x'_2 < 0 \rightarrow$ Mode 2 のみ発振
- $x'_1 > 0$ and $x'_2 > 0 \rightarrow$ Mode 1 と Mode 2 が両方とも同程度に発振
- $x'_1 < 0$ and $x'_2 < 0 \rightarrow$ 双安定性

となる。Fig. 2-19 は 4 番目の条件について示してある。これより、双安定性を示す条件は

$$\epsilon'_{21}\epsilon'_{12} > \epsilon'_{11}\epsilon'_{22}$$

となる。式(2.67)を見ると、これは弱結合状態である $\epsilon_{11}\epsilon_{22} > \epsilon_{21}\epsilon_{12}$ でも成り立ちうることが分かる。つまり、過飽和吸収体を取り付けることにより、弱結合状態であっても双安定性を示しうると言える。

2.7. 第2章 まとめ

本章では MMI-BLD の原理と、その解析手法について述べた。まず MMI-BLD の全光フリップ・フロップ動作について簡単に原理を述べた後、その要素となる部分の解析手法や原理について述べた。まず最も単純な導波路で解析解が存在するスラブ導波路について述べ、次にスラブ導波路解析を直交する方向で 2 回行うことによりリッジ導波路を解析できる等価屈折率法について述べ、実際の導波路構造について計算した例を示した。次に、このデバイスの中でも最も重要なものの 1 つである MMI について、高次モードへの展開と、各高次モードの伝搬定数差によって起こる結像位置などについて述べた。また、高次モードのうち特定のモードを遮断することによって結像位置を近くすることができる、paired interference と symmetric interference について述べ、各結像条件についてまとめた。その後過飽和吸収体の双安定性について述べ、最後に MMI-BLD の動作原理を 2 モード間の双安定性を用いて説明した。これより、MMI 中の 2 つの発振モードの重なりがそれほど強くなくても、過飽和吸収体を取り付けることにより発振モードの双安定性が現れることが分かった。