

光ファイバ結合用裏面ガイド穴を有する面発光レーザの特性評価

Characterization of Surface-Emitting Lasers with Backside Guiding Holes for Fiber Coupling

目 次

1. はじめに	3
2. 裏面ガイド穴面発光レーザの構造	3
3. 測定結果	
3.1 電流－光出力特性	5
3.2 スペクトル特性	8
3.3 変調特性	10
4. 理論検討	
4.1 測定結果の定性的な考察.....	12
4.2 パッシブ共振器としての透過率	14
4.3 レーザ発振の位相条件	16
4.4 透過率と位相条件の関係	19
4.5 斜め方向光ビームの考慮	21
5. まとめ	23
参考文献	23
付録A	25
付録B	29

1. はじめに

東京工業大学の伊賀教授によって1977年に発明された面発光レーザ(SEL)は、1989年にAT&Tベル研究所のJ.Jewellが1波長(λ)共振器面発光レーザを開発したことで飛躍的な特性の向上を遂げた[1],[2]。SELには(1)モノリシックな共振器形成、(2)素子分離前のウエハ単位の検査、(3)100 μ A以下の極低閾値電流、(4)動的単一波長スペクトル、(5)狭出射角の円形ビーム、(6)高密度2次元レーザアレイが実現可能等の利点があり、現在は各社で実用化開発が進められている[3]。我々も、光並列配線への応用を目的とした発振波長980nmのSELの開発を進めており[4]、裏面ガイド穴を有する独自の構造で簡便でかつ高効率な並列ファイバ結合を実現してきた[5],[6]。SELの開発でファイバ結合に主眼を置いたのは、ファイバを用いた装置間あるいはボード間の光並列配線を考えると、チップコストよりもファイバ結合に要するコストが支配的となるためである。

裏面ガイド穴によるファイバ結合で高い(>80%)結合効率を得るためには、ガイド穴の底面を鏡面化することが重要である[7]。ところが、ガイド穴底面を鏡面化すると基板裏面からの反射光がSELに帰還され、基板の厚さ($\sim 340 \mu$ m)に相当する外部共振器が形成されることになる。この結果、電流-光出力特性が波打つ、発振スペクトルにサブモードを生じるなどの問題が発生する。本技術資料では、この外部共振器効果に関する測定結果および理論検討の結果について報告する。

2. 裏面ガイド穴面発光レーザの構造

裏面ガイド穴を有するSELにファイバテープを結合した断面構造を図1に示す。SELそのものは、InGaAs/GaAs単一量子井戸(SQW)よりなる活性層がGaAs/AlAs分布ブラッグ反射器(DBR)に挟まれた通常の構造である[8]。ただし、基板側のDBRがp型になっている。このコモンアノード構造は、当初p型DBRの抵抗を低減する目的で考案された[9]。しかし、現在ではコモンカソード型のSELでも種々の方法で抵抗低減が図られており、この点に関するコモンアノードの優位性はない。しかし、コモンアノードSELはn-p-nトランジスタのコレクタあるいはnチャネルFETのドレインに接続可能なことから、ドライバ回路の設計上は望ましい構造である。さらに、HBTとの集積にも

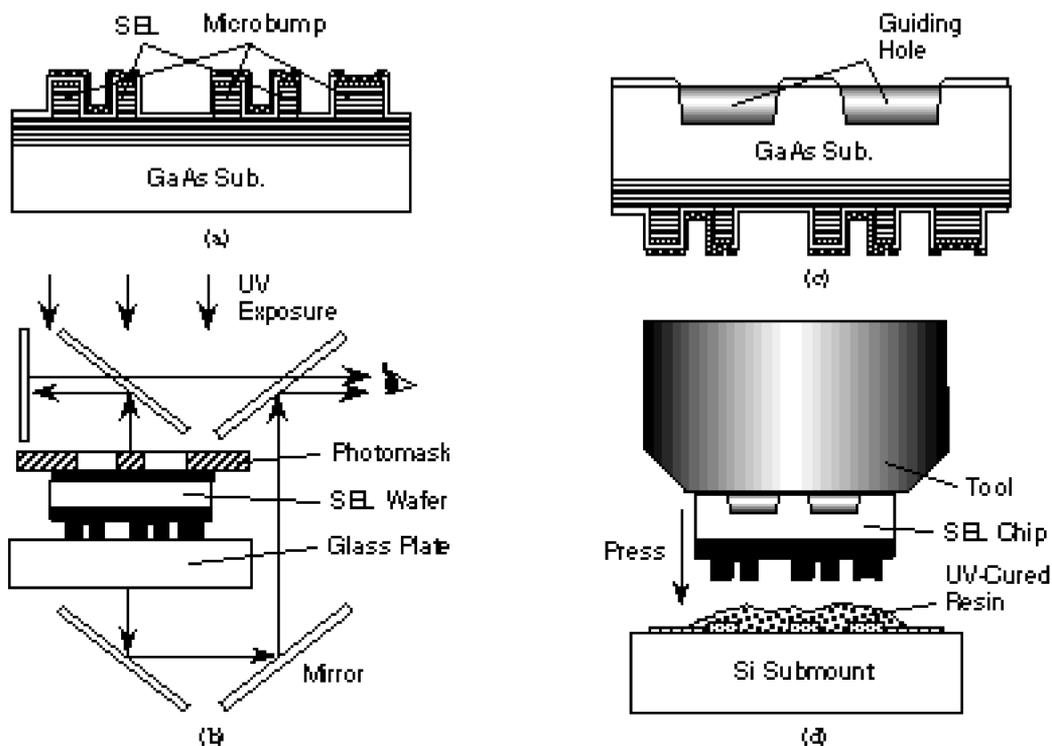


図2 裏面ガイド穴を有するSELのMBB実装までのプロセスフロー：
 (a)面発光レーザの形成、(b)両面アライナによる裏面ガイド穴の位置合せ、(c)裏面ガイド穴の開口、(d)MBB実装

る両面アライナによってガイド穴はSELメサに位置合せされる。HF溶液によってSiO₂をエッチングした後、反応性イオンビームエッチング(RIBE)によってGaAs基板をエッチングし、ガイド穴を形成する。ここまでのプロセスはオンウエハで行われるが、この後ウエハはチップに分割される。分割されたチップはMBBによってSiサブマウント上に実装される。サブマウント上に紫外線硬化樹脂を滴下した後、マイクロバンプをサブマウント上のパッドに位置合せして押し付ける。電極間の樹脂は圧力で押し出され、紫外線によって硬化された樹脂の収縮応力で電極間の接続が保持される。

3. 測定結果

3.1 電流－光出力特性

基板裏面からの反射戻り光が存在する場合に、まず観測される現象は電流－光出力特性の波打ちである。図3(a)および(b)に、基板裏面に反射防止膜が無い場合と有る場

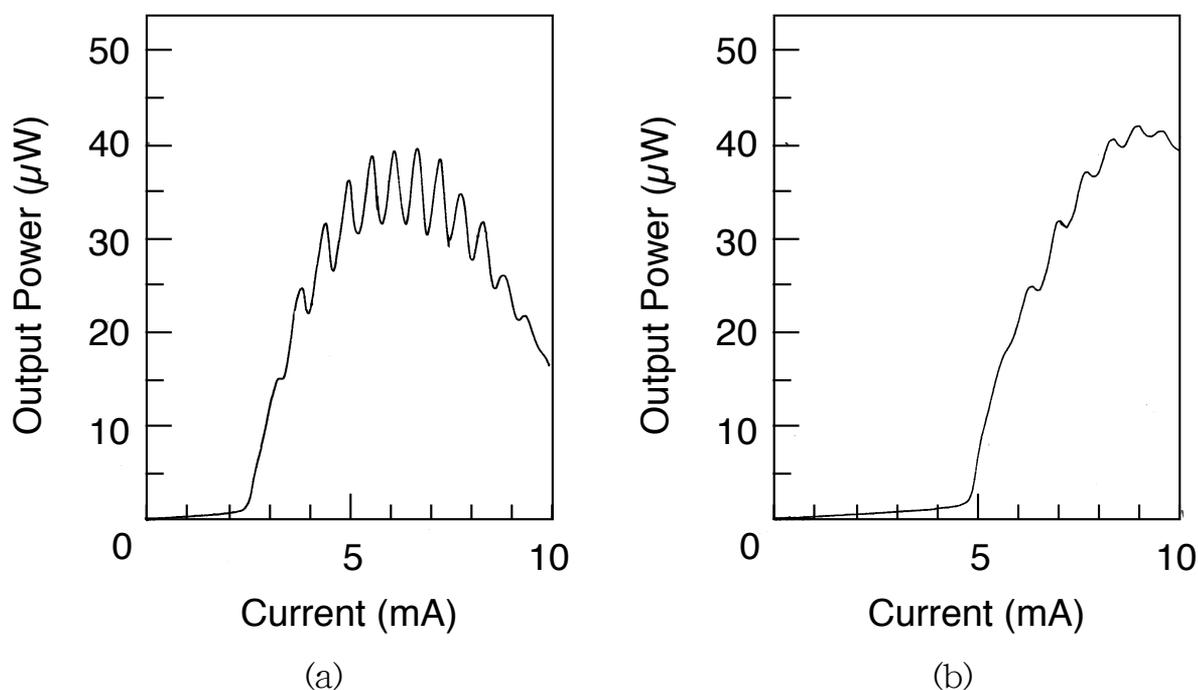


図3 基板裏面からの反射以外の外部反射がない状態で測定したSELの電流－光出力特性：(a)反射防止膜が無い場合、(b)有る場合

合の電流－光出力特性を示す。MBB実装したサンプルの光出力を、ファイバは挿入せずに直接パワーメータで測定した。パワーメータのヘッドは10mm角のSiフォトダイオードであり、SELからの出力光に対して 10° 以上傾けて10mm以上離れた位置にセットした。従って、基板裏面からの反射以外の反射戻り光は存在しないと考えられる。測定に用いたサンプルは、ファイバとの結合効率を高めるために、裏面が鏡面研磨されたGaAs基板上を用いており、エッチング底面が平滑となる条件でガイド穴を開口した。反射防止膜の有無を除き、(a)と(b)のサンプルは同一条件で作製されている(厳密には、同一のMBE成長基板を用い、ウエハプロセスのみを別々に行った)。(a)と比べて(b)のサンプルの閾値電流が大きく、また光出力が飽和する電流値も大きくなっているのは、(b)の方が発振波長と利得ピークのずれが大きいためであり、反射防止膜の有無による差ではない。

基板裏面に反射防止膜が無い場合には、GaAs基板(屈折率3.52)と空気の屈折率差による基板裏面で強度反射率は約31%となり、これに近い比率の反射光がSELに帰還されるものと考えられる。一方、(b)のサンプルに付加した反射防止膜は屈折率 n が2.015、

厚さ d が 1093\AA のSiNである。この時の残留強度反射率 R は、GaAs基板とSiN膜の間の振幅反射率を r_1 、SiN膜と空気との間の振幅反射率を r_2 、 $\delta = 4\pi nd/\lambda$ (λ は出力光の波長)とすると、

$$R = (r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos\delta) / (1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1r_2\cos\delta) \quad (1)$$

で与えられ、約1.6%と計算される。図3(a)では顕著に観測される電流－光出力特性の波打ちが、同図(b)では緩和されることから、波打ちの原因は基板裏面からの反射戻り光にあると考えられる。

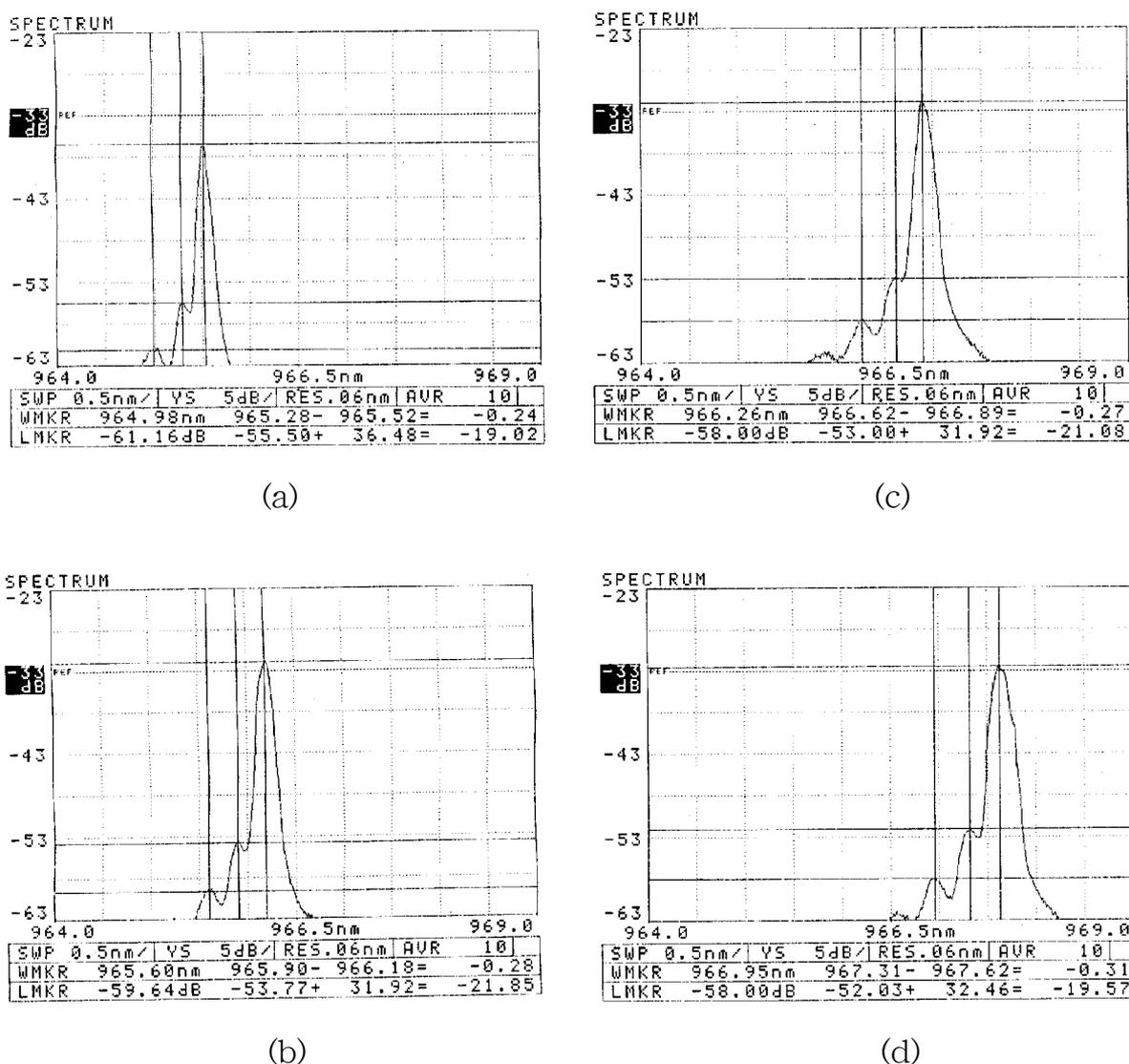


図4 ガイド穴にマルチモードファイバを挿入して測定したSELの発振スペクトル：(a)電流値4mA、(b)5mA、(c)6mA、(d)7mA

3.2 スペクトル特性

反射防止膜の無いサンプルに対して、駆動電流を変化させた場合の発振スペクトルの変化を図4に示す。測定に用いたサンプルは、図3(a)に電流－光出力特性を示したものと異なるが、同一のウエハから切り出されたチップである。ガイド穴に挿入したマルチモードファイバ(GI50/125)によって、SELの出力光を光スペクトラムアナライザ(安藤電気:AQ-6311C)に導入した。この場合、ファイバ端面からの反射がSELの特性に影響を与えることが考えられるが、ファイバの挿入状態を変化させても測定結果に変化は認められなかった。測定されたスペクトルには、(1)電流値の増加とともにピーク波長が長波長側にシフトする、(2)メインモードの短波長側にのみ、ほぼ等間隔にサブモードが存在する、(3)各モードの間隔・相対強度は電流値によってあまり変化しないという特徴が認められる。

図5は電流－光出力特性の波打ちに対応させて、より小さい電流範囲でのスペクトルの変化を測定した結果である。(a)は光出力が極大となる電流値、(b)は(a)よりも電流値を増やしていった最初に光出力が極小となる電流値におけるスペクトルである。(a)から(b)への変化で、各モードのピーク位置が、モード間隔のほぼ1/2ずつ長波長側に移動している。すなわち、モード間隔は保存されたまま、各モードのピーク位置が連続的に移動していくことが分かる。このメインモードおよびサブモードの連続的な平

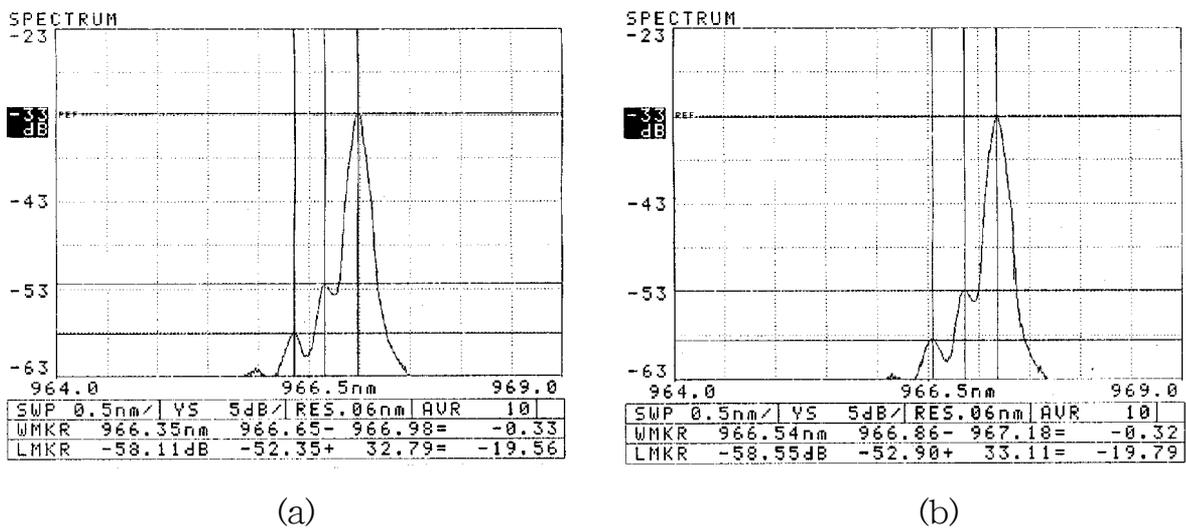


図5 電流－光出力特性の極大と極小におけるSELの発振スペクトル：
(a)電流値5.6mAで光出力が極大、(b)5.8mAで光出力が極小

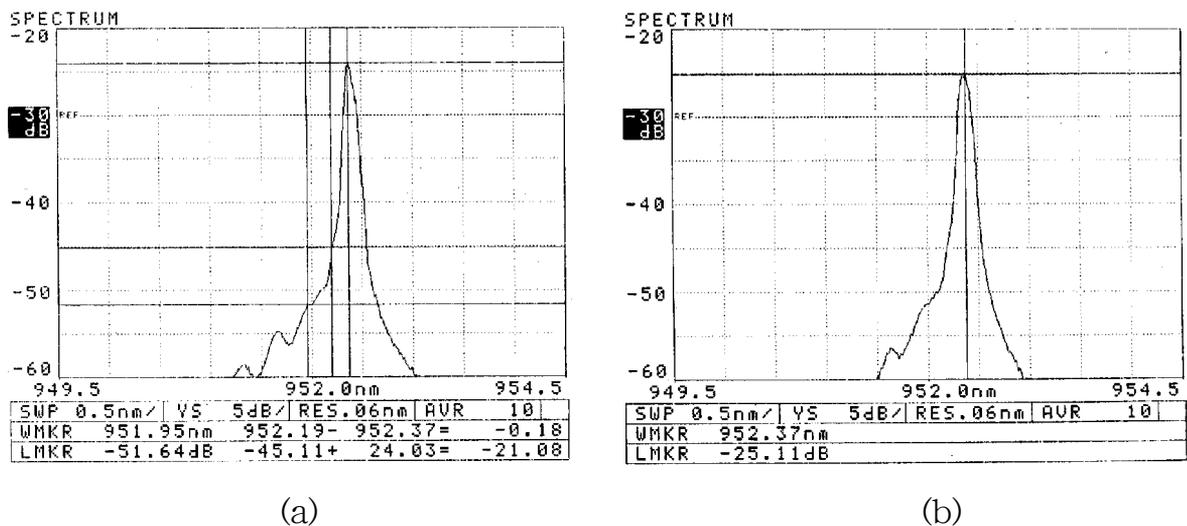


図6 反射防止膜を有するSELの発振スペクトル：(a)ファイバをガイド穴に挿入して測定した場合、(b)ロッドレンズ付きのマルチモードファイバを用いてファイバ端での反射の影響を低減した場合

行移動は、他のサンプルについても同様に観測される。

一方、図6は反射防止膜を有するサンプルの発振スペクトルである。この場合は、ファイバの挿入状態によってスペクトル形状が多少変化するので、その違いを(a)、(b)に示している。空気とファイバの屈折率差による強度反射率は約3.6%であり、反射防止膜が無い場合の基板裏面での反射率31%に比べると十分小さいが、反射防止膜を有する場合(反射率1.6%)にはこの関係が逆転する。従って、ファイバを挿入したときの基板裏面(ガイド穴底面)とファイバの距離によってスペクトルが変化するものと考えられる。(a)はファイバの先端がガイド穴の底面に当たるまで普通にファイバを挿入した場合のスペクトルであり、(b)は先端に集光用のロッドレンズ(焦点距離約3mm)がついたマルチモードファイバを用いてファイバ端での反射の影響を低減した場合である。(b)では反射防止膜が無い場合とほぼ同じ間隔でサブモードが観測されるが、メインモードに対するサブモードの強度比は小さくなっている。これが反射防止膜を有する場合の本来のスペクトルであると考えられる。これに対し、(a)ではより狭い間隔でサブモードが観測されており、これはファイバ端での反射の影響であると考えられる。

(a)と(b)のファイバ出力による電流-光出力特性も測定し、直接フォトダイオードで受光した場合の特性と比較した。これを図7(a)~(c)に示す。受光パワーの絶対値は結

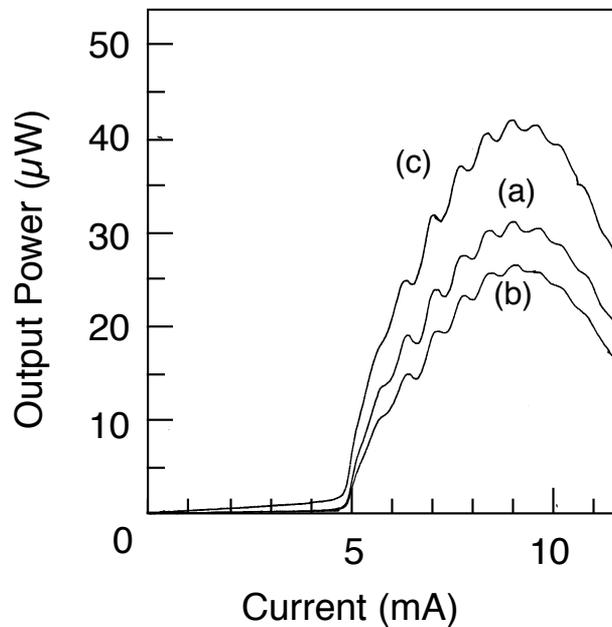


図7 反射防止膜を有するSELの電流－光出力特性：(a)ファイバをガイド穴に挿入して測定した場合、(b)ロッドレンズ付きのマルチモードファイバを用いてファイバ端での反射の影響を低減した場合、(c)直接フォトダイオードで受光した場合

合効率の差により変化しているが、波打ちの形状には顕著な違いは認められない。レンズ付きのファイバを用いた(b)の方がファイバに直接結合した(a)よりも結合効率が低くなっているのは、スペクトルの測定で反射の影響を避けるためにレンズを多少傾けて配置したためである。

3.3 変調特性

電流－光出力特性が大きく波打つ反射防止膜の無いサンプルについても、50Mbps以上のパルス変調波形には静特性での波打ちに対応する波形の変化は観測されない。これは、静特性での波打ちが電流値に対応した温度変化によって引き起こされているためと考えられる。250MbpsのNRZ交番信号(125MHzの方形波パルス)で変調した場合の光出力波形を図8に示す。InGaAsフォトダイオードを用いたより高速の受光回路で測定した結果から、パルスの立上りに観測されるオーバーシュートはSELの緩和振動と駆動回路の電氣的なオーバーシュートが複合したものであると考えられる。また、図8の波形は閾値以下から駆動しているために立下りは立上りに比べてフラットである。

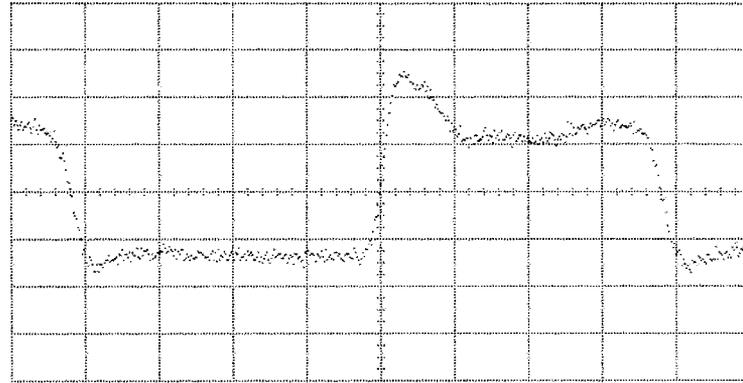
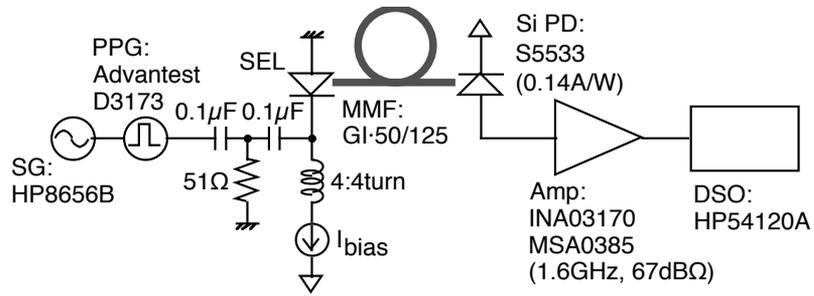


図8 SELの変調特性測定回路と、250MbpsNRZ交番信号で変調した光出力波形：[横軸]1ns/div、[縦軸]2mV/div(6.4 μ W/div)、[バイアス電流]3.5mA、[変調電圧振幅]2.0V_{p-p}

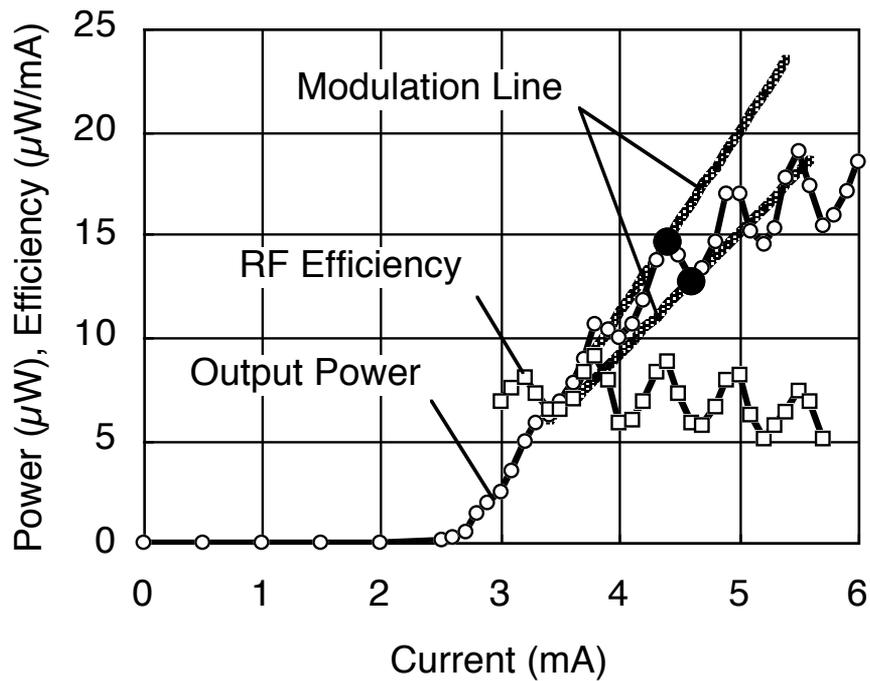


図9 バイアス電流に対するSELの光出力と変調効率の関係、および高周波変調時の電流と光出力の変調範囲(黒丸がバイアス点で、変調線は変調範囲の両端を結ぶ直線)

るが、バイアス電流を5.0mA以上にすると立下りにもアンダーシュートが観測される。変調効率(光強度変調振幅と電流変調振幅の比)はバイアス電流を変化させると大きく波打つ。バイアス電流に対する光出力と変調効率の関係を図9に示す。電流-光出力特性が極大・極小となる電流値において変調効率も極大・極小となることが分かる。一方、図9には高周波変調時の電流と光出力の変調範囲も重ね書きしてある。電流-光出力特性が極大となる電流値にバイアスした場合には、極大値を結ぶ包絡線に沿って変調され、極小となる電流値にバイアスした場合には、極小値を結ぶ包絡線に沿って変調されていることが分かる。

4. 理論検討

4.1 測定結果の定性的な考察

外部共振器効果によって電流-光出力特性が波打つ現象は、定性的には以下のように理解される。図10に模式的に示すように、裏面反射を有するSELでは上下のDBRに挟まれた本来の1波長(λ)共振器の他に、下部DBRと基板裏面(ガイド穴底面)によって形成される外部共振器が存在する。 λ 共振器はSELの利得ピーク内に単一の共振波長しか持たないが、外部共振器は多数の共振波長を持つ。外部共振器の共振波長間隔(モ

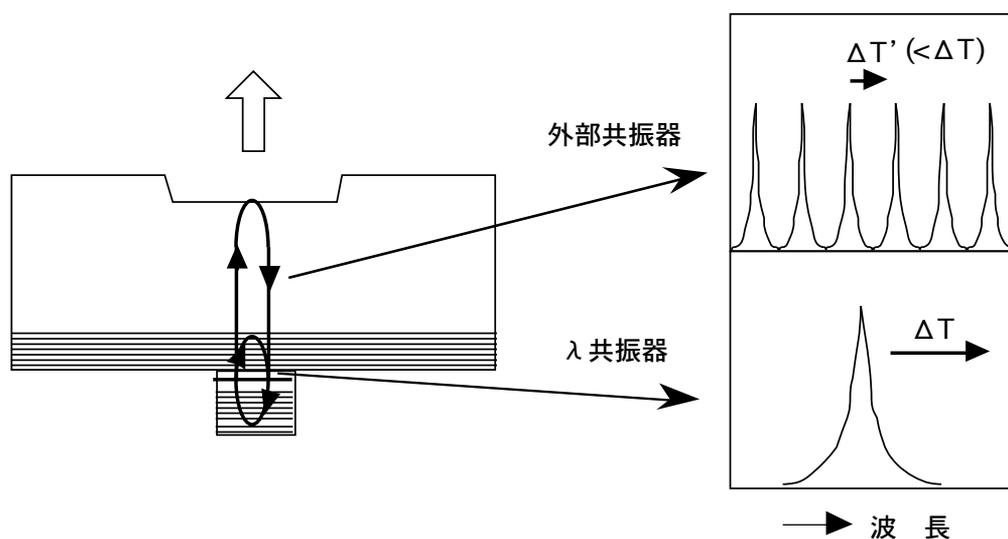


図10 外部共振器効果によって電流-光出力特性が波打つ現象を定性的に説明する模式図

ード間隔) $\Delta\lambda$ は、GaAs基板の屈折率 n の波長依存性を考慮すると次式で与えられる[12]。

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / [2nL\{1 - (\lambda/n) \cdot (dn/d\lambda)\}] \quad (2)$$

ここで、 L はGaAs基板の厚さであり、実際のデバイスでは約 $340\mu\text{m}$ である。また $dn/d\lambda$ の値は波長 980nm において $-7.4 \times 10^3\text{cm}^{-1}$ 程度である[13]。従って、モード間隔は約 0.33nm となる。

次にSELに電流を注入していった場合の共振波長の変化について考える。半導体に電流注入した際には、キャリア密度の増大による負の屈折率変化と温度上昇による正の屈折率変化を生じるが、一般に後者が支配的である。特に、今回特性評価に用いたSELは直列抵抗が 500Ω 以上と大きく、電流注入による発熱が大きい。従って、電流注入によって屈折率は大きくなる方向に変化し、 λ 共振器の共振波長も外部共振器の共振波長も長波長側に移動することになる。しかし、SELの直列抵抗は主に上下のDBRによるものであり、電流が注入されるのもDBRと λ 共振器のみである。このため、 λ 共振器の温度上昇に比べて、外部共振器の温度上昇は相対的に小さくなる。すなわち、電流注入による共振波長の長波長側への移動量は、 λ 共振器モードに対しては大きく、外部共振器モードに対しては小さくなる。この結果、電流注入によって λ 共振器モードと外部共振器モードが一致する同位相状態と、外部共振器モードの谷に λ 共振器モードがくる逆位相状態が繰り返されることになり、光出力が波打つことになる。

上記の解釈は、図4に示した発振スペクトルにおけるピーク波長の移動量からも裏付けられる。電流値を 4mA から 7mA に増加させることでメインモードのピーク波長は 2.1nm 長波長側に移動している。一方、図3(a)の電流-光出力特性では、電流値が 4mA から 7mA に増加させる間に5周期の波打ちが生じている。外部共振器モードが全く動かずに、 λ 共振器モードのみが移動したとすれば、 2.1nm の移動で5周期の波打ちが生じるための外部共振器のモード間隔は 0.42nm ということになる。実際には、外部共振器のモード間隔は 0.33nm なので、外部共振器モード自体も 0.45nm 移動したことになる。GaAsの屈折率の温度依存性は約 $4 \times 10^{-4}\text{deg}^{-1}$ であり[14]、 2.1nm の移動は

5.3℃の温度上昇、0.45nmの移動は1.1℃の温度上昇に相当する。電流値を4mAから7mAに増加させるとSELの消費電力は35mWから78mWに増加することから、これらの温度上昇値は妥当であると考えられる。

4.2 パッシブ共振器としての透過率

スペクトル特性についてより定量的な解釈を得るために、裏面反射のあるSELをパッシブ共振器と見なしてその透過率を計算した。今回特性を評価したSELは、5層のλ共振器(AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs)、上下各49層のDBR(24.5ペアのAlAs/GaAs)、GaAsコンタクト層、およびGaAs基板の計105層よりなるが、各層の厚さおよび屈折率を与えて実効複素振幅反射率 r_e を計算した。 r_e から実効強度反射率Rおよび透過率Tは

$$R = |r_e|^2 \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (4)$$

によって求められる。入射光波長をパラメータとしてRとTを計算するFOTRLANプログラムを付録Aに示す。このプログラムによって計算したGaAs基板の厚さが無限大の

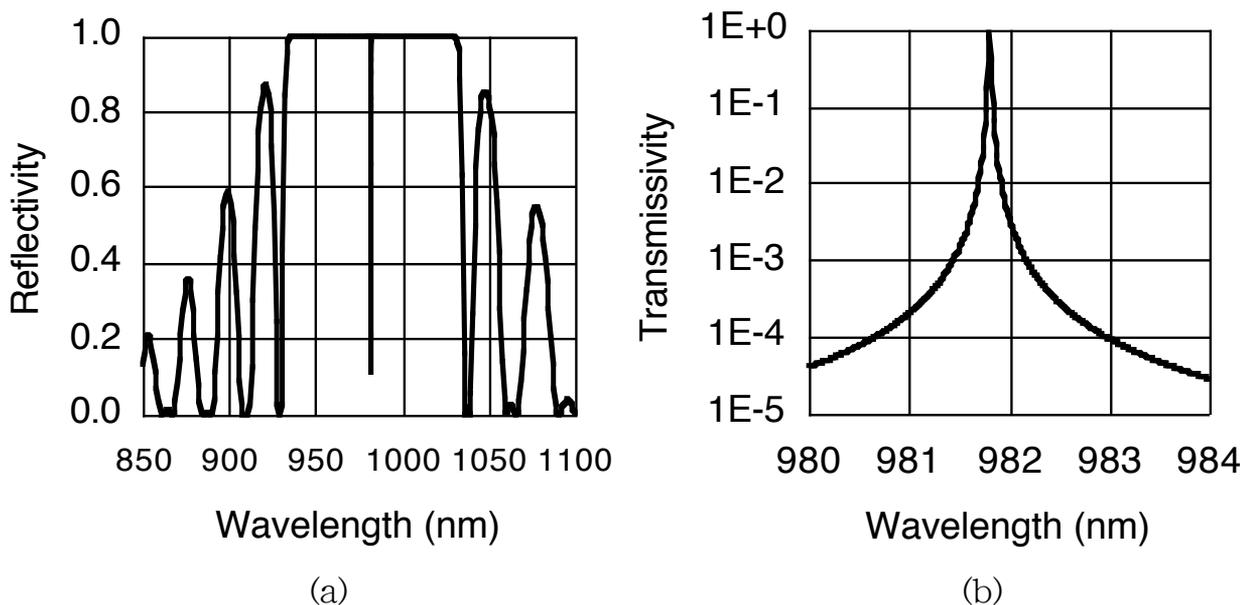


図11 SELをパッシブ共振器と見なして計算したGaAs基板の厚さが無限大の場合(裏面反射が無い場合)の(a)反射スペクトルと(b)透過スペクトル

場合(裏面反射が無い場合)の反射スペクトルと透過スペクトルを図11(a)、(b)に示す。図11(a)は932nmから1034nmの間が高反射率のストップバンドとなっており、共振波長(981.8nm)のところだけが反射率0になるという、典型的なSELの反射スペクトルになっている。この反射スペクトルの共振波長近傍のみを拡大して、透過率を対数表示したのが図11(b)である。左右対称の滑らかなスペクトルとなっている。ここで、 λ 共振器の光学長を980nmに設定しているにもかかわらず共振波長が若干長波長側にずれるのは、 λ 共振器が単一の半導体層からなっておらず、AlGaAsとGaAsの複合構造となっているためである。

次に、GaAs基板の厚さが有限の場合(裏面反射が有る場合)の透過スペクトルを図12(a)、(b)に示す。図11(b)と違って、多くのサブピークが生じている。サブピークの間隔は(2)式で計算されたのと同じく0.33nmであり、外部共振器モードであることが分かる。図12における(a)と(b)は、メインピーク(λ 共振器モード)と外部共振器モードが同位相になる場合と逆位相になる場合を示している。計算パラメータ上の(a)と(b)の違いは、基板を除く各層の屈折率を一律に変化させる変数DNの値であり、(a)ではDN

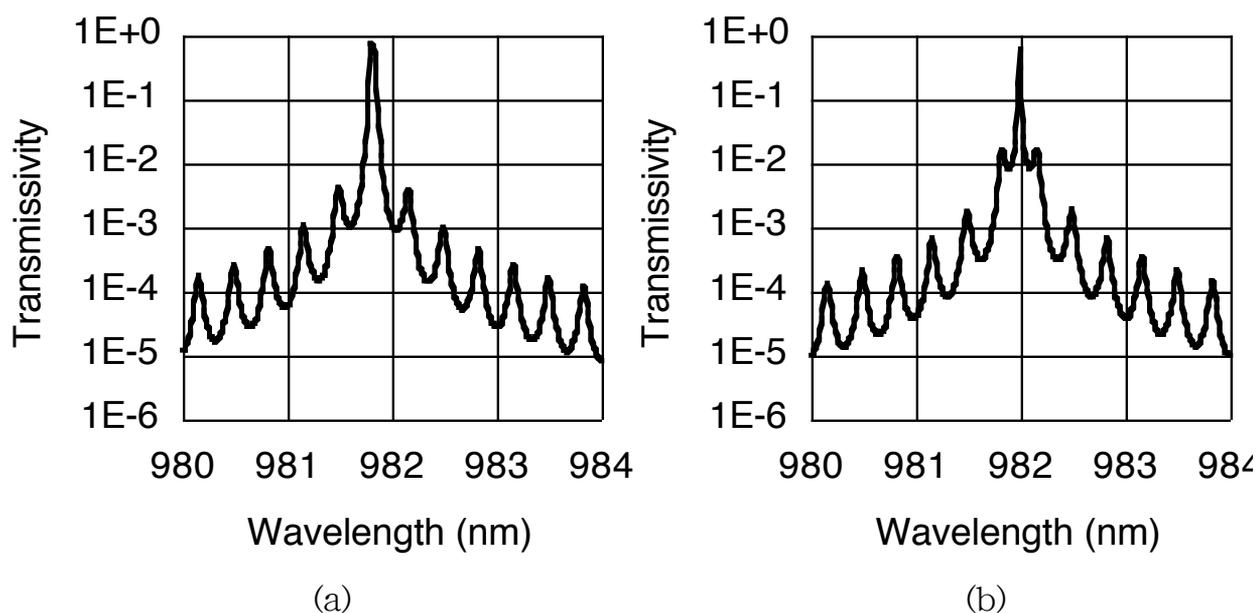


図12 SELをパッシブ共振器と見なして計算したGaAs基板の厚さが有限の場合(裏面反射が有る場合)の透過スペクトル：(a) λ 共振器モードと外部共振器モードが同位相になる場合(DN= 1.2×10^{-4})、(b)逆位相になる場合(DN= 3.4×10^{-4})

を 1.2×10^{-4} としているのに対し、(b)では 3.4×10^{-4} としている。すなわち(a)と(b)では入共振器の屈折率が0.022%異なることになる。屈折率の波長依存性を考慮するとこの屈折率変化によって入共振器モードは0.18nmだけ長波長側に移動することになり、外部共振器モードとの関係が同位相から逆位相に変化する。

図12の計算結果は、図4(および図5)に示した発振スペクトルの実測結果との類似点が多い。すなわち、メインモードが連続的に長波長側に移動していく、サブモードの間隔が0.33nmである、メインモードに対する第1サブモードの大きさが-20dB程度であるなどの点である。しかし、両者には大きな相違点もある。図4に示した実測結果ではメインモードの移動に連動してサブモードも移動していくのに図12ではサブモードが移動しないという点、および図4では短波長側にのみサブモードが観測されるのに対して図12ではメインモードに対して長波長側と短波長側が完全に対称であるという点である。本来、図12の計算はSELをパッシブ共振器と見なしてその透過率を計算しただけであり、図4の発振特性と直接一致するものではない。そこで、次節ではレーザー発振の条件について検討する。

4.3 レーザ発振の位相条件

外部共振器レーザーの発振特性については、すでに多くの報告がなされている[15]-[20]。これをまとめると、以下のようなになる。図13に模式的に示す外部共振器レーザーを考え、外部共振器および内部(利得)共振器の長さを L_0 、 L_1 、外部共振器遠端、内部-外部共振器界面および内部共振器遠端の振幅反射率を r_0 、 r_1 、 r_2 、外部共振器および内部共振器の屈折率を n_0 、 n_1 とする。このとき、外部共振器遠端からの反射も含めた内

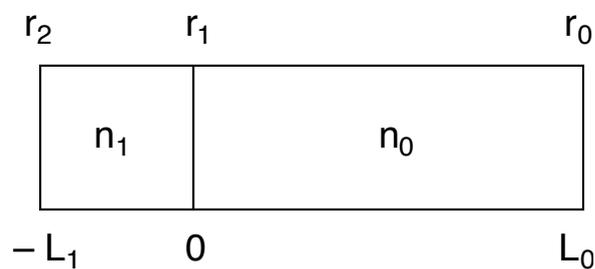


図13 従来の外部共振器レーザーのモデル

部-外部共振器界面での実効反射率 r_{1e} は次式で与えられる。

$$r_{1e} = \{ r_1 + r_0 \exp(i\phi_0) \} / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i\phi_0) \} \quad (5)$$

ここで、 ϕ_0 は外部共振器を往復することによる位相変化量であり、反射光の波長を λ とすると $4\pi n_0 L_0 / \lambda$ で与えられる。この r_{1e} と r_2 、および内部共振器の単位長当たりの利得と損失を g 、 α とすると、内部共振器を往復しても光の複素振幅が不変であるというレーザ発振の条件は、

$$r_{1e} r_2 \exp \{ (g - \alpha) L_1 + i\phi_1 \} = 1 \quad (6)$$

となる。 ϕ_1 は内部共振器を往復することによる位相変化量であり、 $4\pi n_1 L_1 / \lambda$ で与えられる。 $G = \exp \{ (g - \alpha) L_1 \}$ とおくと、(5)式および(6)式から求められる発振条件は以下のようなになる。

$$G = \{ 1 + r_0 r_1 \exp(i\phi_0) \} / [r_2 \exp(i\phi_1) \{ r_1 + r_0 \exp(i\phi_0) \}] \quad (7)$$

レーザ発振の位相条件は G が実数になることであり、その時の G の値から求められる g が閾値利得となる。

以上が外部共振器レーザの発振特性に関する従来の理論であるが、今回の構造では内部共振器の反射面がDBRであり、条件はより複雑である。そこで、図14に示すモデルで G を数値計算した。まず、内部共振器に相当するものとしては、 λ 共振器ではなくSQW活性層を考えた。これは、 λ 共振器の内部にも多層構造を含んでおり反射面が存

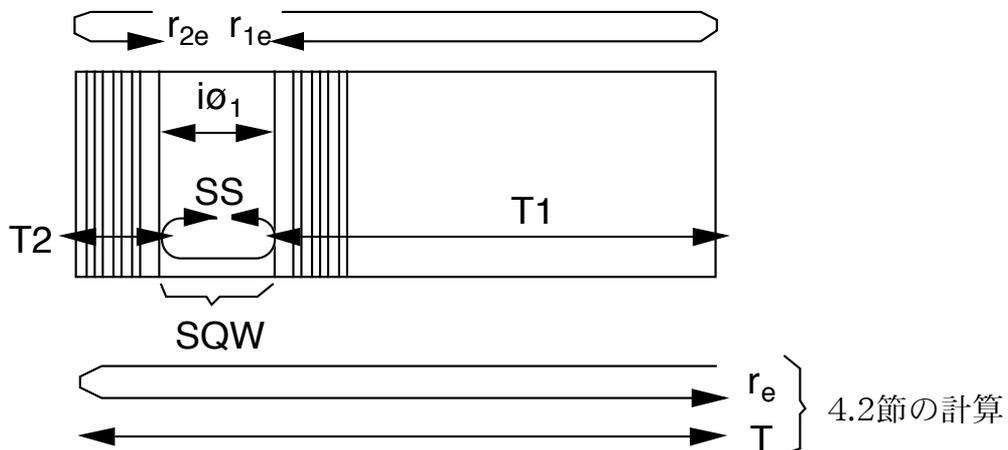


図14 今回の計算に用いた外部共振器レーザのモデル

在するという点、および利得を与える半導体層はSQW活性層のみであるという点を考慮した結果である。そして、前節の透過率の計算で実効複素振幅反射率を求めたのと同じ手法で活性層から基板側およびコンタクト層側を見た実効複素振幅反射率 r_{1e} 、 r_{2e} を計算し、(6)式と等価な次式によってGを計算した。

$$G = \{ r_{1e} r_{2e} \exp(i\phi_1) \}^{-1} \quad (8)$$

Gの絶対値の対数およびGの位相(偏角)を計算するためのFORTRANプログラムを付録Bに示す。なお、このプログラムは活性層内での多重反射の結果も計算し、多層構造に垂直でない斜め方向の光ビームの場合にも適用できるように拡張されている。これらは次節および次々節で述べる計算を行うためのものである。

図11(b)、図12と同じ波長領域におけるGの計算結果を図15に示す。この計算では、図12でパラメータとしたDNを0としている。図15(a)は基板裏面からの反射が無い場合、(b)は裏面からの反射が有る場合である。(a)、(b)ともGの絶対値は1よりもわずかに大きい値であり、(b)では0.33nm間隔の小さなピークを有している。また、(a)ではGの位相は負の値から正の値へと直線的に変化しており、(b)では絶対値のピークに対応

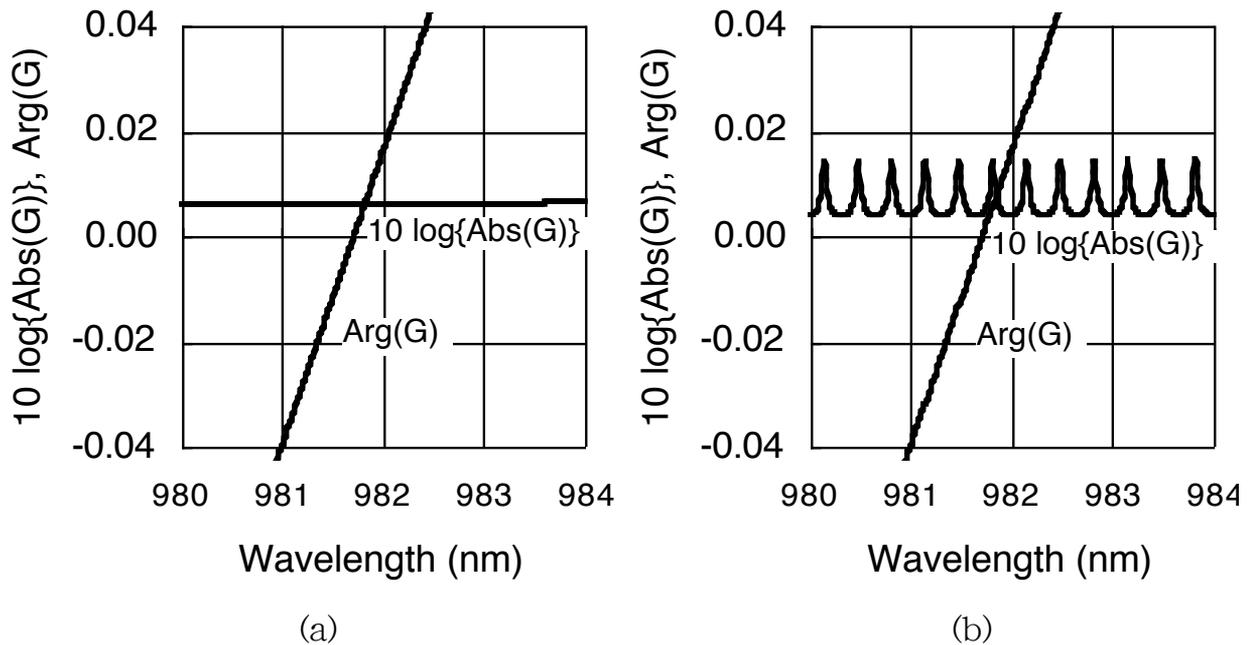


図15 SELの発振条件を与える $G=\exp\{(g-\alpha)L_1\}$ の計算結果：(a)基板裏面からの反射が無い場合、(b)は裏面からの反射が有る場合

する位置にわずかな折れ曲がりをもっている。レーザ発振の位相条件はGが実数になる、すなわちGの位相が0になるということなので、裏面反射が存在する場合も発振可能なモードは1つだけということになる。これは、図4に示した発振スペクトルにおいて、サブモードが観測されるという結果と相反する。ただし、屈折率変化によって発振波長が変化していくとGの絶対値は変化するので、電流－光出力特性が波打つという現象は説明可能である。

4.4 透過率と位相条件の関係

図11(b)と図12の違いに比べて、図15(a)、(b)の相違は小さい。これは一見矛盾するように思われるが、以下の計算で両者の関係を明らかにする。位相条件の計算では、活性層内を往復しても光の複素振幅が不変であるという条件を用いたが、活性層内の多重反射を考えると次式のSSに相当する光エネルギーが活性層内に蓄積される。

$$SS = |1 / \{1 - r_{1e} r_{2e} \exp(i\phi_1)\}|^2 = |1 / (1 - G^{-1})|^2 \quad (9)$$

この光エネルギーが、実効反射率 r_{1e} の界面(基板側)あるいは r_{2e} の界面(コンタクト層側)を通過して外部へ出ていくと考えると、その透過光T1およびT2は

$$T1 = (1 - |r_{1e}|^2) \cdot SS \quad (10)$$

$$T2 = (1 - |r_{2e}|^2) \cdot SS \quad (11)$$

で与えられることになる。さらに、これを拡張すれば、4.2節で計算した透過率Tは

$$T' = (1 - |r_{1e}|^2) \cdot (1 - |r_{2e}|^2) \cdot SS = T1 \cdot T2 / SS \quad (12)$$

によっても計算されることになる。付録Bのプログラムは、SS、T1、T2、T'も同時に計算するようになっている。DNを 1.2×10^{-4} とした場合(図12(a)と同じ条件)のSS、T1、T2、T'の計算結果を図16(a)～(d)に示す。

まず、(d)に示すT'の計算結果は図12(a)のTと数値計算の精度において完全に一致している。すなわち、付録AおよびBのプログラムによって矛盾のない結果が得られていることが分かる。次に、(b)と(c)に示すT1、T2の結果を比較すると、T2はSSと同じくかなり滑らかな形であるのに対し、T1はT(=T')と同じく大きなサブピークを有する

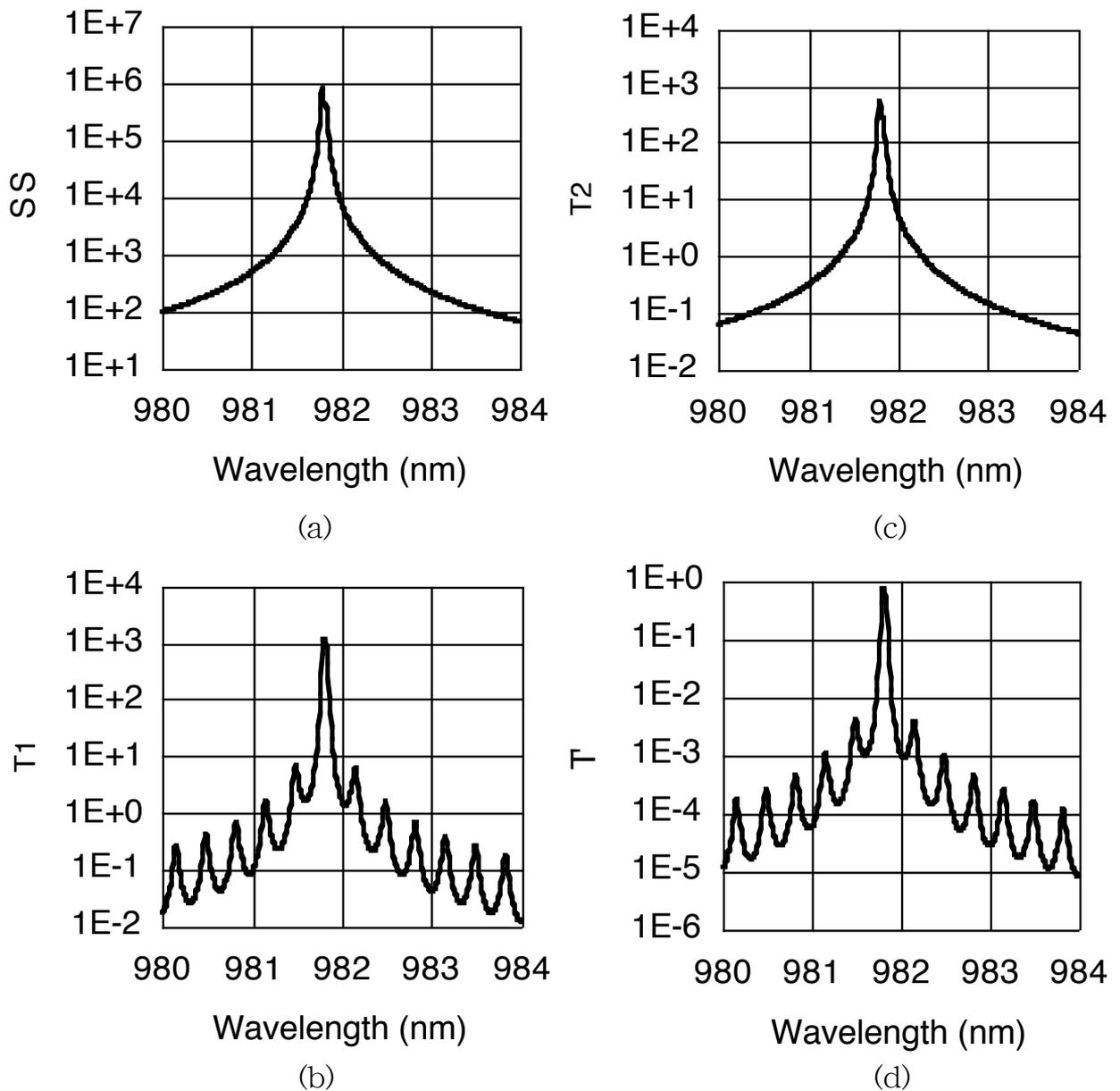


図16 (a)SS、(b)T1、(c)T2および(d) $T'=T1 \cdot T2 / SS$ の計算結果

形をしている。これらを総合的に判断すると、活性層内から見た場合には基板裏面における反射光は特性に大きく影響しないが、基板側を通過して光が出力される場合には外部共振器が光フィルターとして機能するので大きなサブピークを生じるということになる。ただし、この特性は自然放出光に対するものであり、考慮している波長範囲において活性層からの発光強度スペクトルが均一であるとした場合の結果である。これに対し、レーザ発振は発振条件を満たす波長でのみ生じる。4.3節の結果によれば、発振条件を満たす波長は一つしか存在しない。従って、外部共振器が光フィルターと

して機能しても、サブモードが生じるということはない。

4.5 斜め方向光ビームの考慮

前節の発振スペクトルがサブモードを持たないという結論は、発振スペクトルの測定結果と一致しない。これは、レーザ発振条件を考える際に、多層構造に対して垂直方向の光ビームしか考慮していないためであると考えられる。一般に、横方向の寸法が波長に比べて十分に大きい平面共振器では、斜め方向の光ビームの効果を考慮する必要があると言われている[21]。この効果を考慮すると垂直ビームの共振波長よりも短波長側に斜めビームの共振波長が存在することになる。付録Bのプログラムで、斜め方向の光ビームに対するGを計算することができる。垂直方向からの偏角がGaAs中で 1.64° であるビームに対するGの計算結果を図17に示す。斜めビームでは、基板裏面からの反射戻り光は共振器に結合しないと考えられるので、裏面からの反射は無いものとしている。図17(a)はS波、(b)はP波に対する計算結果である。数値的にはS波とP波で%オーダーの違いがある。レーザ発振条件を満たす波長は、図15に比べて0.40nmだけ短波長側に移動していることが分かる。

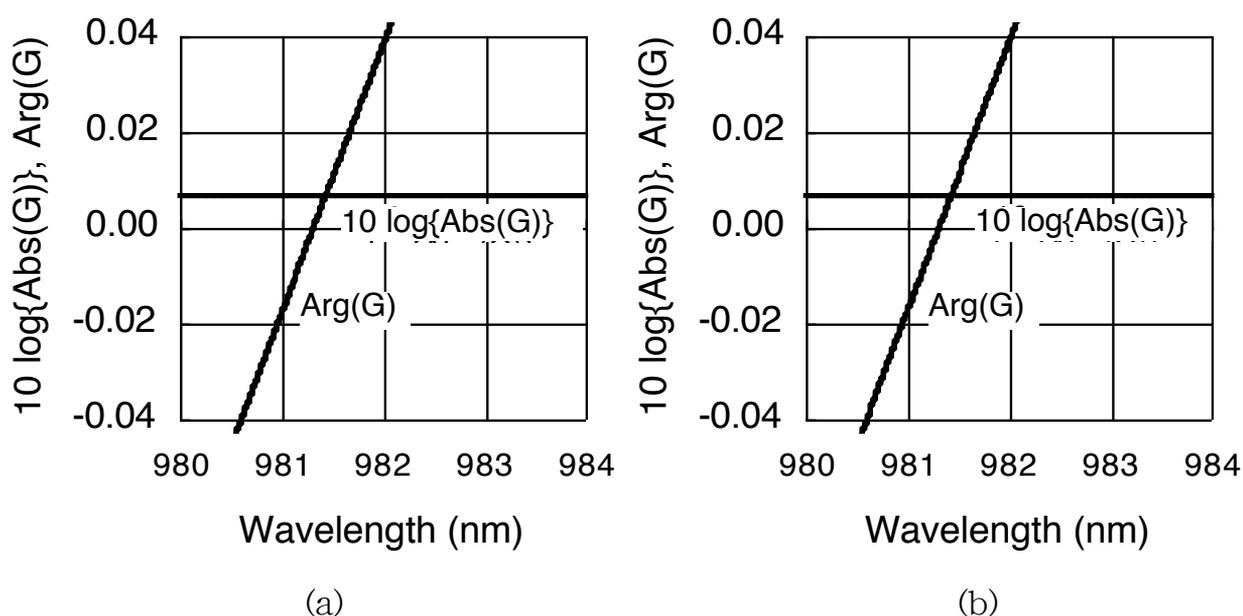


図17 1.64° 傾いた斜めビームに対する $G=\exp\{(g-\alpha)L_1\}$ の計算結果：
(a) S波の場合、(b) P波の場合

斜めビームを考慮すると垂直ビームの発振モードに対して短波長側にのみ連続的に発振モードが存在することになるので、図4の発振スペクトルが非対称であることはうまく説明される。しかし、サブピークが生じる理由はこれだけでは説明できない。さらに、外部共振器の効果を考慮する必要がある。斜めビームの発振モードがピークを示すのは、斜めビームの発振モードと垂直ビームの発振モードの間隔が外部共振器の往復時間と一致するときであると考えられる。すなわち、連続的に存在する全ての斜めビームモードは、垂直モードとのビートを生じるが、このビート周期(の整数倍)が外部共振器の(垂直)往復時間と一致する場合には共鳴現象が起こり、斜めビームのモードが強められるものと考えられる。これを定式化すれば、以下のようになる。

メインモードと第1サブモードの光周波数を ν_m 、 ν_s とすると、ビート周期が外部共振器の往復時間と一致するという条件は、 c を真空中の光速として次式で与えられる。

$$(\nu_s - \nu_m)^{-1} = 2n_0L_0 / c \quad (13)$$

従って、メインモードとサブモードの間隔 $\Delta\lambda$ は、

$$\Delta\lambda = (c/\nu_m) - (c/\nu_s) = c^2 / \{(\nu_m\nu_s) \cdot (2n_0L_0)\} = \lambda^2 / (2n_0L_0) \quad (14)$$

となる。(14)式の右辺は、屈折率の波長依存性を考慮しない場合の外部共振器モードの波長間隔と同一である。屈折率の波長依存性を考慮すると、(13)式は

$$\nu_s \cdot 2n_0(\nu_s)L_0 / c - \nu_m \cdot 2n_0(\nu_m)L_0 / c = 1 \quad (15)$$

となる。従って、 $\Delta\nu = \nu_s - \nu_m$ とおくと

$$\Delta\nu = c / [2n_0L_0 \{1 + (\nu/n_0) \cdot (dn_0/d\nu)\}] \quad (16)$$

である。 $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$ および $\nu \cdot (dn_0/d\nu) = -\lambda \cdot (dn_0/d\lambda)$ を考慮すれば、

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / [2n_0L_0 \{1 - (\lambda/n_0) \cdot (dn_0/d\lambda)\}] \quad (17)$$

となり、 $\Delta\lambda$ は(2)式の外部共振器モードの波長間隔と一致する。すなわち、外部共振器モードの波長間隔だけメインモードから離れたところにサブモードが生じることになる。このサブモードはメインモードによって励振されるものなので、メインモード

が温度上昇による屈折率変化で連続的に長波長側に移動すれば、サブモードもこれに連れて長波長側に移動することになる。

以上の解釈で、発振スペクトルの実測結果に見られた(1)電流値の増加とともにピーク波長が長波長側にシフトする、(2)メインモードの短波長側にのみ、ほぼ等間隔にサブモードが存在する、(3)各モードの間隔は外部共振器モードの間隔に一致する、(4)各モードの間隔・相対強度は電流値によって変化しないという特徴がすべて説明できたことになる。

5. まとめ

裏面ガイド穴を有する当社独自のSEL構造は、簡便かつ高効率な並列ファイバ結合を可能にするが、ガイド穴底面を鏡面化すると基板裏面からの反射光がSELに帰還され、外部共振器効果が生じる。この結果、電流－光出力特性が波打つ、発振スペクトルにサブモードを生じるなどの問題が発生する。この外部共振器効果は、基板裏面に反射防止膜を堆積することで低減されるが、完全に無くすことは困難である。電流－光出力特性の波打ちを完全に無くすためには、ガイド穴の底面を傾斜させるなどの対策が必要である。

変調特性に関しては、電流－光出力特性の波打ちに対応して変調効率が変動する。ただし、現在までの測定結果では、ジッタ・雑音特性等に関して外部共振器効果によると考えられる大きな問題は生じていない。これらの特性については続報で詳細を述べるが、相対雑音強度(RIN)としては電流－光出力特性の波打ちに対応すると思われる2～3dBの劣化があるものの、無変調時の値で-125dB/Hz以下が得られている。

外部共振器効果がある場合の発振スペクトルには(1)電流値の増加とともにピーク波長が長波長側にシフトする、(2)メインモードの短波長側にのみ、ほぼ等間隔にサブモードが存在する、(3)各モードの間隔は外部共振器モードの間隔に一致する、(4)各モードの間隔・相対強度は電流値によって変化しないという特徴がある。これらの特徴、特に(3)、(4)は外部共振器効果だけでは説明がつかず、斜め方向の光ビームと外部共振器効果を併せて考慮することで初めて説明可能である。

参考文献

- [1] 伊賀, 小山, 「面発光半導体レーザ」 応用物理, vol. 60, pp. 2-13, 1991年1月.
- [2] J.L. Jewel, A. Scherer, S.L. McCall, Y.H. Lee, S. Walker, J.P. Harbison, L.T. Florez, "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 1123-1124, Aug. 1989.
- [3] 山下 「光インタコネクットの製品化が始まる」 日経エレクトロニクス, no. 640, pp. 137-148, 1995年7月.
- [4] 松田, 小林, 足立, 知野, 「垂直共振器型面発光レーザの開発」 登録技術資料, SRC-SO-93S-019, 1994年1月.
- [5] 松田, 小林, 足立, 知野, 「光ファイバ結合用裏面ガイド穴を有する面発光レーザの開発」 登録技術資料, SRC-94S-071, 1995年2月.
- [6] K. Matsuda, T. Yoshida, Y. Kobayashi, and T. Chino, "A surface-emitting laser array with backside guiding holes for passive alignment to parallel optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. , Apr. 1996.
- [7] 知野, 松田, 吉田, 小林, 畑田, 「面発光レーザアレイとテープファイバのパッシブアライメントによる高効率光結合」 電子情報通信学会総合大会講演論文集, エレクトロニクス1, p. 200, 1996年3月.
- [8] J.L. Jewell, J.P. Harbison, A. Scherer, Y.H. Lee, and L.T. Florez, "Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, growth, fabrication, characterization," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1332-1346, June 1991.
- [9] H. Adachi, Y. Kobayashi, T. Chino, and K. Matsuda, "Surface-emitting laser with a common-anode configuration for application to the photonic parallel memory," *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 33, pp. 836-839, Jan. 1994.
- [10] T. Chino, Y. Kobayashi, H. Adachi, and K. Matsuda, "An 8 X 8 array of surface emitting lasers with heterojunction bipolar transistors integrated on them," in *Tech. Dig. IEDM*, Washington, DC, 1993, pp. 921-923.
- [11] K. Hatada, H. Fujimoto, T. Ochi, and Y. Ishida, "LED array modules by

- new technology micro-bump bonding method," IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., vol. 13, pp. 521-527, Sept. 1990.
- [12] H.C. Casey, Jr. and M.B. Panish, Heterostructure Lasers, New York: Academic Press, 1978, Part A, p. 167.
- [13] *ibid.*, Part B, p 11.
- [14] *ibid.*, Part A, p. 31.
- [15] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-16, pp. 347-355, Mar. 1980.
- [16] A. Olsson and C.L. Tang, "Coherent optical interference effects in external-cavity semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, pp. 1320-1323, Aug. 1981.
- [17] J.H. Osmundsen and N. Gade, "Influence of optical feedback on laser frequency spectrum and threshold conditions," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, pp. 1320-1323, Mar. 1983.
- [18] T. Fujita, S. Ishizuka, K. Fujito, H. Serizawa, and H. Sato, "Intensity noise suppression and modulation characteristics of a laser diode coupled to an external cavity," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-20, pp. 492-499, May 1984.
- [19] H. Sato, T. Fujita, and J. Ohya, "Theoretical analysis of longitudinal mode coupling in external cavity semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-21, pp. 284-291, Apr. 1985.
- [20] 雄谷, 佐藤, 芹沢, 「外部共振器半導体レーザのスペクトル線幅の理論」電子情報通信学会技術研究報告, OQE85-121, 1985年12月.
- [21] G. Bjoerk, "On the spontaneous lifetime change in an ideal planar micro-cavity—Transition from a mode continuum to quantized modes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 30, pp. 2314-2318, Oct. 1994.

付録A

入射光波長をパラメータとして、SEL多層構造のパッシブ共振器としての透過率を計算するFORTLANプログラムを以下に示す。基本は、I番目以下の層までの実効複素振幅反射率CRRと、I番目の層とI+1番目の層の間の複素振幅反射率CRから、I+1番目以下の層までの実効複素振幅反射率CRRを計算するというループ(DO_50)である。これを層数分だけ繰り返して多層構造全体の実効複素振幅反射率CRRを求め、これから多層構造全体の実効強度反射率Rおよび透過率Tを計算する。さらに入射光波長を変えてこの計算を繰り返す(DO_30)という構成になっている。

動作確認OS : SunOS UNIX Release 4.1.3-JLE1.1.3_U1 ("f77"でコンパイル)

入出力ファイル :

REF.RED	各層の実屈折率N、厚さL、吸収係数A等の入力ファイル
REF.OUT	各入射光波長に対する反射率Rと透過率Tの出力ファイル

プログラム中の変数 :

N_ARY	多層構造の層数の上限値
NL	多層構造の層数 - 2 (各層には0~NL+1の番号を割付け)
I	多層構造中の各層を順次変えていくための番号
I_WL	入射光波長を順次変えていくための番号
PI	円周率
WL	層の厚さを波長の倍数で与える場合の基準波長 (単位 : nm)
WL_S	入射光波長変化の開始値 (単位 : nm)
WL_E	入射光波長変化の終了値 (単位 : nm)
DWL	入射光波長変化の間隔 (単位 : nm)
N(0:N_ARY)	各層の実屈折率
L(0:N_ARY)	各層の厚さ : 数値が5.0未満であれば波長の倍数、5.0以上であれば実厚さ (単位 : nm) と自動的に判断
A(0:N_ARY)	各層の吸収係数 (単位 : cm^{-1})
DN	基板を除く各層の屈折率を一律に変化させる変数
R	多層構造全体の実効強度反射率
T	多層構造全体の透過率
CI	虚数単位
CN(0:N_ARY)	各層の複素屈折率

CR I番目の層とI+1番目の層の間の複素振幅反射率
 CRR (代入前) I番目以下の層までの実効複素振幅反射率
 (代入後) I+1番目以下の層までの実効複素振幅反射率
 CWK1~3 計算式簡略化のための補助複素変数
 THT0, SPFLG, NC 本プログラムの計算では使用しない読込み変数
 (付録BのプログラムとREF.REDを共通化するために導入)

ソースプログラム :

```

PROGRAM REF_VN_TRANS
C -----
C CALC. OF REF. FOR A VERTICAL CAVITY
C
C      I=0,1,2,...,NL,NL+1
C      <----- LIGHT
C
C                                     WRITTEN BY K. MATSUDA
C -----
C
PARAMETER(N_ARY=150)
COMPLEX*16  CI, CN, CR, CRR
COMPLEX*16  CWK1, CWK2, CWK3
REAL*8      PI, WL, N, L, DN
REAL*8      A, R, T, THT0
REAL*8      WL_S, WL_E, DWL
INTEGER     SPFLG
DIMENSION   CN(0:N_ARY)
DIMENSION   N(0:N_ARY), L(0:N_ARY), A(0:N_ARY)
OPEN(7, FILE='REF.RED', STATUS='OLD')
OPEN(8, FILE='REF.OUT', STATUS='OLD')
CI = (0,1.0)
PI = 3.1415926
WRITE(*,*) 'START'
WRITE(*,*) 'READING...'
READ (7,*) WL, THT0, SPFLG
READ (7,*) NL, NC
READ (7,*) N(0)
DO 10 I=1, NL
10  READ (7,*) N(I), L(I), A(I)
READ (7,*) N(NL+1)
READ (7,*) WL_S, WL_E, DWL
READ (7,*) DN

```

C

```
WRITE(*,*) 'CALC...'
WRITE(8,*) 'WAVELENGTH, REFLECTIVITY, TRANSMISSIVITY'
DO 20 I=1, NL
20  IF(L(I).LT.5.0) L(I) = WL*L(I)/N(I)
DO 30 I_WL=0, 999
    WLIN = WL_S + I_WL*DWL
    IF(WLIN.GT.WL_E) GOTO 70
    CN(0) = CMPLX((N(0)-7.4D-4*(WLIN-980.0))*(1.0+DN), 0)
DO 40 I=1, NL-1
40  CN(I) = CMPLX((N(I)-7.4D-4*(WLIN-980.0))*(1.0+DN),
    -A(I)*(WLIN/1.0D7)/(4.0*PI))
    CN(NL) = CMPLX(N(NL)-7.4D-4*(WLIN-980.0),
    -A(I)*(WLIN/1.0D7)/(4.0*PI))
    CN(NL+1) = CMPLX(N(NL+1), 0)
    CRR = (CN(1)-CN(0)) / (CN(1)+CN(0))
DO 50 I=1, NL
    CR = (CN(I+1)-CN(I)) / (CN(I+1)+CN(I))
    CWK3 = CI*4.0D0*PI*CN(I)*L(I)/WLIN
    CWK1 = CR + CRR*EXP(CWK3)
    CWK2 = 1.0 + CR*CRR*EXP(CWK3)
50  CRR = CWK1/CWK2
    R = ABS(CRR)**2
    T = 1.0D0 - R
30  WRITE(8,100) WLIN, R, T
70  CONTINUE
100 FORMAT(3H      ,F9.4,2(6H,      ,E15.5))
WRITE(*,*) 'END.'
STOP
END
```

入力ファイルREF.REDの一例 (左端の行番号は便宜上付加したもの):

1	980	1.64	0
2	104	52	
3	3.52		
4	2.955	0.25	0
5	3.52	0.25	0
6	2.955	0.25	0
7	3.52	0.25	0
8	2.955	0.25	0
9	3.52	0.25	0
:			

```

      :      (2行ずつの繰り返し)
      :
50      2.955      0.25      0
51      3.52      0.25      0
52      2.955      0.25      0
53      3.24      0.4496     0
54      3.52      10        0
55      3.542     8         0
56      3.52      10        0
57      3.24      0.4496     0
58      2.955      0.25      0
59      3.52      0.25      0
60      2.955      0.25      0
      :
      :      (2行ずつの繰り返し)
      :
101     3.52      0.25      0
102     2.955      0.25      0
103     3.52      0.25      0
104     2.955      0.25      0
105     3.52      0.25      0
106     2.955      0.25      0
107     3.52      340.0D3    0
108     1
109     980      984      0.01
110     0.0D0

```

付録B

波長をパラメータとして、SELの発振条件を与えるパラメータ $G=\exp\{(g-\alpha)L_1\}$ を計算するFORTRANプログラムを以下に示す。SQW活性層から基板側およびコンタクト層側を見た実効複素振幅反射率CRR1およびCRR2を計算し(ループDO_60およびDO_50)、これからGの絶対値の対数GAB_LOGと位相GPHを計算する。さらに、活性層内での多重反射の結果SS、基板側への透過光T1、コンタクト層側への透過光T2、および全透過率Tも計算する。また、光ビームの垂直方向からの偏角(GaAs中での屈折角)THT0を与えて、斜め方向の光ビームに対する計算も行えるようになっている。斜め方向ビームではS波とP波で反射率が異なるので、S波かP波かの設定を行う。

動作確認OS : SunOS UNIX Release 4.1.3-JLE1.1.3_U1 ("f77"でコンパイル)

入出力ファイル：

REF.RED	付録Aのプログラムと共通の入力ファイル
REF.OUT	各波長に対するGの絶対値の対数GAB_LOGと位相GPH、 活性層内での多重反射の結果SS、基板側への透過光T1、 コンタクト層側への透過光T2、全透過率Tの出力ファイル

プログラム中の変数 (付録Aのプログラムと共通のものは省く)：

NC	SQW活性層の番号
I_MAX	I_WLの最終番号
SPFLG	S波かP波かを指定するフラッグ (= 0 : S波、= 1 : P波)
NW(0:N_ARY)	屈折率の波長依存性を考慮した各層の実屈折率
THT0	光ビームの垂直方向からの偏角(GaAs中での屈折角)
THT1	光ビームの垂直方向からの偏角(I番目の層中での屈折角)
THT2	光ビームの垂直方向からの偏角(I+1番目の層中での屈折角)
PHI1	活性層の往復による位相変化量
GAB_LOG	Gの絶対値の対数
GPH	Gの位相
SS	活性層内での多重反射の結果
T1	基板側への透過光
T2	コンタクト層側への透過光
T	全透過率
CRR1	活性層から基板側を見た実効複素振幅反射率
CRR2	活性層からコンタクト層側を見た実効複素振幅反射率
CG	複素数のG
CWK1~3	計算式簡略化のための補助複素変数

ソースプログラム：

```
PROGRAM REF2
C -----
C CALC. OF PHASE CONDITION FOR A VERTICAL CAVITY
C
C      I=0,1,2,...,NC(QW),NC+1,...,NL
C      <-----> LIGHT
C
C                               WRITTEN BY K. MATSUDA
C -----
```

```

C
PARAMETER(N_ARY=150)
COMPLEX*16  CI, CN, CR, CRR, CRR1, CRR2, CG
COMPLEX*16  CWK1, CWK2, CWK3
REAL*8      PI, WL, N, L, A, WL_S, WL_E, DWL, DN
REAL*8      NW, THT0, THT1, THT2, PHI1
REAL*8      GAB_LOG, GPH, SS, T1, T2, T
INTEGER     SPFLG

C          (SPFLG: =0 for S-wave, =1 for P-wave)
DIMENSION  CN(0:N_ARY)
DIMENSION  N(0:N_ARY), L(0:N_ARY), A(0:N_ARY)
DIMENSION  NW(0:N_ARY)
OPEN(7, FILE='REF.RED', STATUS='OLD')
OPEN(8, FILE='REF.OUT', STATUS='OLD')
CI = (0,1.0)
PI = 3.1415926
WRITE(*,*) 'START'
WRITE(*,*) 'READING...'
READ (7,*) WL, THT0, SPFLG
READ (7,*) NL, NC
READ (7,*) N(0)
DO 10 I=1, NL
    READ (7,*) N(I), L(I), A(I)
10 CONTINUE
READ (7,*) N(NL+1)
READ (7,*) WL_S, WL_E, DWL
READ (7,*) DN
WRITE(*,*) 'CALC...'
IF(SPFLG.EQ.0) WRITE(8,*) 'S-wave'
IF(SPFLG.EQ.1) WRITE(8,*) 'P-wave'
WRITE(8,*) 'WAVELENGTH, GAB_LOG, GPH, SS, T1, T2, T'
THT0 = THT0*PI/180.0
DO 20 I=1, NL
    IF(L(I).LT.5.0) L(I) = WL*L(I)/N(I)
20 CONTINUE
IMAX = INT((WL_E-WL_S)/DWL)
DO 30 I_WL=0, IMAX
    WLIN = WL_S + I_WL*DWL
    DO 40 I=0, NL-1
        NW(I) = (N(I)-7.4D-4*(WLIN-980.0))*(1.0+DN)
        CN(I) = CMPLX(NW(I), 0)
40 CONTINUE

```

```

NW(NL) = N(NL)-7.4D-4*(WLIN-980.0)
CN(NL) = CMPLX(NW(NL), 0)
NW(NL+1) = N(NL+1)
CN(NL+1) = CMPLX(NW(NL+1), 0)
CRR = CMPLX(0.0, 0.0)
DO 50 I=0, NC-1
  THT1 = ASIN(SIN(THT0)*NW(0)/NW(I))
  THT2 = ASIN(SIN(THT0)*NW(0)/NW(I+1))
  IF(SPFLG.EQ.0) CR = (CN(I+1)*COS(THT2)-CN(I)
    *COS(THT1)) / (CN(I+1)*COS(THT2)+CN(I)*COS(THT1))
  IF(SPFLG.EQ.1) CR = (CN(I)*COS(THT2)-CN(I+1)
    *COS(THT1)) / (CN(I)*COS(THT2)+CN(I+1)*COS(THT1))
  IF(I.EQ.0) THEN
    CRR = CR
  ELSE
    CWK3 = CI*4.0D0*PI*CN(I)*L(I)*COS(THT1)/WLIN
    CWK1 = CR + CRR*EXP(CWK3)
    CWK2 = 1.0 + CR*CRR*EXP(CWK3)
    CRR = CWK1/CWK2
  ENDIF
50 CONTINUE
CRR2 = CRR
CRR = CMPLX(0.0, 0.0)
DO 60 I=0, NL-NC
  THT1 = ASIN(SIN(THT0)*NW(0)/NW(NL-I+1))
  THT2 = ASIN(SIN(THT0)*NW(0)/NW(NL-I))
  IF(SPFLG.EQ.0) CR = (CN(NL-I)*COS(THT2)-CN(NL-I+1)
    *COS(THT1)) / (CN(NL-I)*COS(THT2)+CN(NL-I+1)
    *COS(THT1))
  IF(SPFLG.EQ.1) CR = (CN(NL-I+1)*COS(THT2)-CN(NL-I)
    *COS(THT1)) / (CN(NL-I+1)*COS(THT2)+CN(NL-I)
    *COS(THT1))
  IF(I.EQ.0) THEN
    CRR = CR
  ELSE
    CWK3 = CI*4.0D0*PI*CN(NL-I+1)*L(NL-I+1)
    *COS(THT1)/WLIN
    CWK1 = CR + CRR*EXP(CWK3)
    CWK2 = 1.0 + CR*CRR*EXP(CWK3)
    CRR = CWK1/CWK2
  ENDIF
60 CONTINUE

```

```

CRR1 = CRR
THT1 = ASIN(SIN(THT0)*NW(0)/NW(NC))
PHI1 = 4.0D0*PI*NW(NC)*L(NC)*COS(THT1)/WLIN
CG = 1.0D0/(CRR1*CRR2*EXP(CI*PHI1))
GAB_LOG = LOG(ABS(CG))
GPH = ATAN2(IMAG(CG), REAL(CG))
SS = ABS(1.0D0/(1.0D0-1.0D0/CG))**2
T1 = (1.0D0-ABS(CRR1)**2)*SS
T2 = (1.0D0-ABS(CRR2)**2)*SS
T = T1*T2/SS
WRITE(8,100) WLIN, GAB_LOG, GPH, SS, T1, T2, T
30 CONTINUE
100 FORMAT(3H      ,F9.4,6(6H      ,E15.5))
WRITE(*,*) 'END.'
STOP
END

```