

## 講 義

## フレッシュマンのための現代光学—III

## レーザー共振器とレーザービームの伝搬 (2)

有 本 昭

(株)日立製作所日立研究所 〒319-12 日立市久慈町 4026

(1992年7月6日受理)

## Modern Optics for Freshmen—III

## Laser Resonator and Laser Beam Propagation (2)

Akira ARIMOTO

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.,  
4026, Kuji-machi, Hitachi 319-12

## 1. はじめに

今回は気体レーザーに引きつづき半導体レーザーの振舞について述べる。1970年の室温発振によって注目を集めた半導体レーザーの実用化は1980年からの小型レーザープリンターや1982年に製品化されたコンパクトディスクから始まっている。その後光通信や記録可能な光ディスクとその応用範囲を広げているが、その実用化は比較的新しい。しかし、世の中にでまわっている数からすると他のレーザーのそれを圧倒的に凌駕しておりわれわれの生活に最も入り込んでいると考えられる。

## 2. 半導体レーザーの共振器

半導体レーザーは共振器長約1mmで両端の反射鏡が平面鏡で周囲を屈折率の異なる物質で囲まれ光が外にでないように閉じ込められた導波路型共振器<sup>1,2)</sup>である。共振器の例を図1に示す。左側のレーザーは左右両側はとくに導波路構造を有していないが、電流の流れる領域に非常に高い利得分布が得られその分布によりレーザー光が閉じ込められる利得導波型とよばれるものである。一方、右側のレーザーは水平方向が屈折率の異なる媒質による壁で囲まれており屈折率導波型レーザーと呼ばれている。垂直方向の構造は活性層の上下がクラッド層に挟まれたダブルヘテロ構造になっている。垂直方向の解析は図2に示すようなスラブ型導波路として考えることができる。

2.1 スラブ型導波路(垂直方向)の解析<sup>1,3)</sup>

基本的なモデルとして  $n_1=n_3$  の上下のクラッド層の屈折率が等しい対称スラブ型導波路を考える(図2)。

$z$  方向に進む進行波があるとする、次の波動方程式を満足する必要がある。

$$\nabla^2 E = \frac{n_i \partial^2 E}{c^2 \partial t^2} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$c$  は真空中の光の速度である。ここでモードとしては、TEモードとTMモードの二つが考えられるが、半導体レーザーの場合はTEモードが発振するので、ゼロでない電磁界( $E_y, H_x, H_z$ )を有するTEモードのみここでは考える。

これを満足する方程式は

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (n_i k_0^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (i=1,2) \quad (2)$$

となる。ここで  $k_0$  は真空中の光の波数、 $\beta$  は伝搬係数である。

解としては偶の対称性を持つものと奇の対称性を有する2種類の解が得られる。ここではその結果のみを示す。

$$E_y = \begin{cases} A_e \cdot \cos(\chi x) & (\text{偶モード}) \\ A_o \cdot \sin(\chi x) & (\text{奇モード}) \end{cases} \quad [\text{活性層の中}] \quad (3)$$

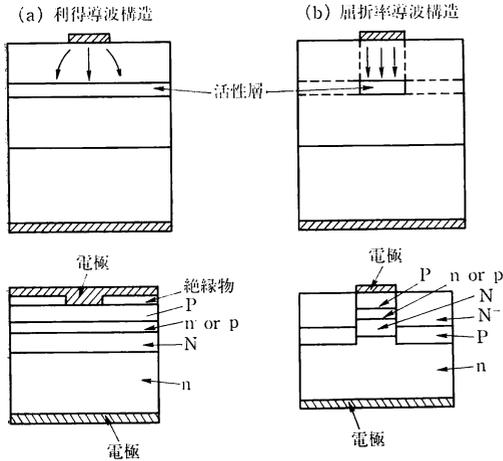


図1 半導体レーザー共振器の構造 (断面図)

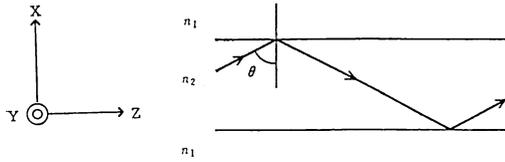


図2 スラブ型導波路

$$E_y = \begin{cases} A_e \cdot \cos(\chi d/2) \cdot \exp[-\gamma(|x| - d/2)] & \text{(偶モード)} \\ [x/|x|] A_o \cdot \sin(\gamma \chi d/2) \cdot \exp[-\gamma(|x| - d/2)] & \text{(奇モード)} \end{cases}$$

[クラッド層の中]

(4)

ここで  $d$  は活性層の長さ,  $\chi$  は活性層中の  $x$  方向の波数成分,  $\gamma$  はクラッド層での光波の減衰係数であり,

$$\begin{aligned} \chi &= k_0 \sqrt{n_2^2 - n_{eff}^2} \\ \gamma &= k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_1^2} \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる ( $n_{eff}$ : 実効屈折率).

通常の半導体レーザーでは活性層の厚さを薄くすることで単峰性の偶基本モードを発振させている.

### 2.2 水平方向の解析

屈折率導波型レーザーの導波路は一種のステップ型の導波路と考えられる. その導波モードの一例を図3に示す. この場合水平方向も活性層の両側が屈折率の異なる物質で挟まれたスラブ構造と考えると解析することができる. 実際のレーザーは単峰の基本モードを発振させるように導波路の幅を決めている. 一方, 利得導波型レーザーはプレーナ方向の屈折率差の壁に替わり利得分布による横モードが形成される. 導波路としては導波路の中心が逆に屈折率が周囲に比べて低い反導波路となってい

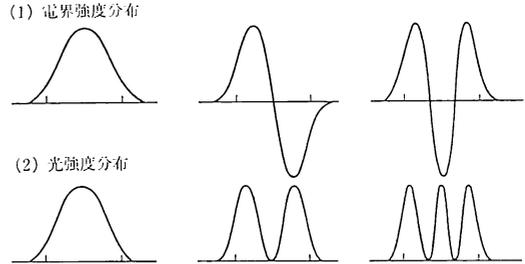


図3 屈折率導波型レーザーの横モード

る. 前回の講義<sup>4)</sup> でレーザー光が往復する方向と直交する方向が開放端のレーザー共振器では両端の反射鏡とともに平面鏡の時は高損失領域と低損失領域の境界にあると述べたが利得導波型レーザーはその場合に相当する.

これにさらに反導波路構造になってレーザー光が漏洩しやすくなっておりまた3.2で述べるように波面が歪み反射鏡面での位相分布が平面でなく非点収差を発生することを考えると水平方向の構造は実際は高損失域に存在する不安定共振器と考えることができる. それでもレーザー発振が可能であるのは損失を十分補うだけの利得があるからである. このように半導体レーザーは水平方向と垂直方向で共振器構造が異なっているため, 出射した光の振舞も気体レーザーとは異なる.

## 3. 半導体レーザー光源の基本的性質

### 3.1 電流-光出力特性

半導体レーザーの出力-電流特性を図4に示す. 注入電流がある閾値を超すと1次直線的な電流-出力特性を示す. この直線性を用いて光通信ではアナログ伝送が行われている. またその出力特性は温度の影響を強く受け, 温度の上昇とともに閾値が増加する. 温度変化にかかわらず一定の出力を得る場合には使用する方向と反対側に光検出器を配置し, その出力が一定になるように電

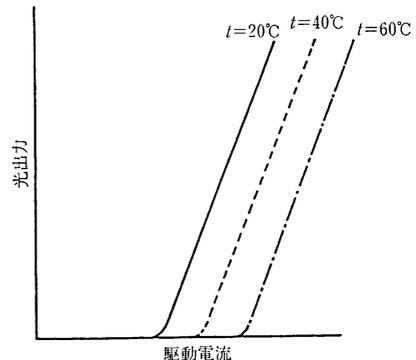


図4 半導体レーザーの出力特性

流調整をする APC (automatic power control) 回路が必要となる。

レーザーが不良品の場合にはその電流-光出力特性の直線性が電流がある量を超すと崩れ折線的になる。その現象をキックと呼んでいる。このキックが生じると横モードに変化があったり、アナログ通信では高調波信号が生じ隣接信号域に雑音を生じたりするので注意を要する。

### 3.2 遠視野像

レーザーの出射端面の大きさは二次元的に非対称で約  $1\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$  程度と非常に小さく、幾何光学的には点光源として考えて良い。指向性の良い平行光束に直すにはレンズを用いて光の向きを修正する必要がある。また出射した光の開き角は狭い方向で、 $5\sim 15$  度、広い方向では  $10\sim 30$  度と非常に大きく、出射したレーザー光を有効に使用する必要がある場合には NA の大きいレンズを用いてレーザー光を損失少なく光学系に取り込む必要がある。図5はレンズの NA と光の有効利用率を示したものである。50% 以上の効率を得るには、0.35 以上の NA が必要である<sup>5)</sup>。光学系は、カメラレンズにみられるように一般に回転対称な形状をしているので、半導体レーザーのように非対称形状をした光束を用いるのには都合がわるい。このような非対称形状光束を回転対称に直すために三角プリズムを用いたり、シリンダリカルレンズを用いる方法が考案されている。

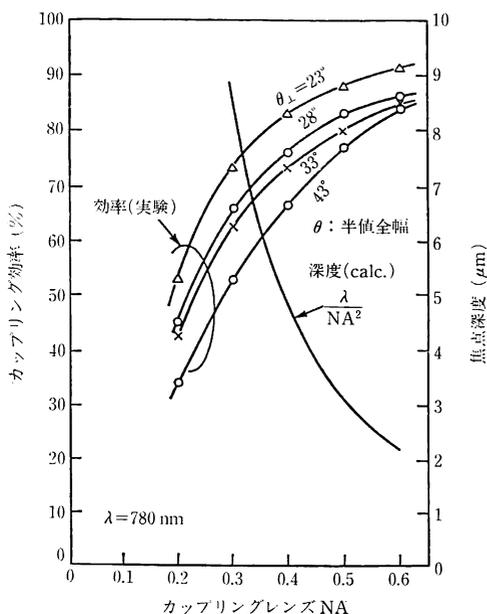


図5 半導体レーザーの光利用効率と焦点深度

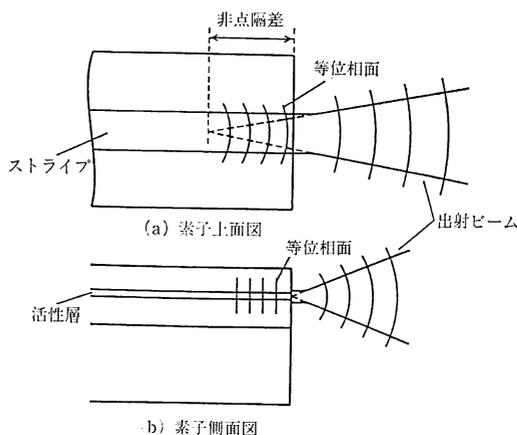


図6 利得導波構造における非点収差発生メカニズム

### 3.3 非点収差

半導体レーザーは共振器の水平と垂直方向で大きさが異なること、レーザー光の導波路での閉じ込め方が異なることから、水平方向と垂直方向で出射点異なる非点収差を有する。特に利得導波型レーザーではその傾向が強く、図6に示すようにレーザー光の出射点が水平方向と垂直方向で異なっている。水平方向では導波路の屈折率が周辺になるに従って高くなり、中心部の位相が周囲より進んだかたちになっており、あたかもレーザーの内部からレーザー光が発散光源としてでて来るような形になっている。一方垂直方向は上下が屈折率差の壁で囲まれており、波面は内部で平面性を保っている。非点隔差量はレーザーによって  $20\sim 30\mu\text{m}$  以上にもなる。このような光源を用いると、いかにレンズ光学系から収差を除去した設計、加工がなされていても求める絞り込みスポットが回折限界以下にならず、分解能の低下を招くことになる。

水平方向の閉じ込め方が強い屈折率導波型レーザーではあまり大きくないが、それでも  $5\mu\text{m}$  程度は存在する。

図7は非点収差の影響を、取り込む結合レンズの NA をパラメータとして調べたものである<sup>6)</sup>。レンズ通過後の非点収差の影響は波面収差  $\phi$  で表すと、

$$\phi = 0.25 \text{NA}^2 \Delta Z \quad (6)$$

で表される。ここで  $\Delta Z$  は発光点間の距離で非点隔差である。たとえば、レーザーの基準  $1/4$  波長以内に波面収差が収まっていることを条件とし、 $\lambda$  を  $0.8\mu\text{m}$  としたとき、NA が 0.15 程度だと、許容される非点隔差は  $20\sim 30\mu\text{m}$  もあるのにたいし、NA が 0.5 と高い場合には  $5\mu\text{m}$  以内となり適用できるレーザーは屈折率導波型レーザーに限られる。どの NA 値、あるいはレーザー

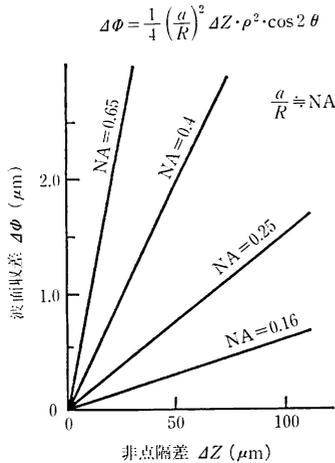


図7 波面収差と非点隔差の関係<sup>6)</sup>

を用いるかは応用上さまざまであるが、遠視野像が広がる半導体レーザーの場合には、レーザー光の利用効率との影響を考えつつ決める必要がある。

収差の除去にはシリンドリカルレンズや平行平板を斜めに挿入するなどの方法が考えられている<sup>5)</sup>。

### 3.4 偏光特性

図1で示す図で水平方向 (TE 波) に偏光している。その理由は半導体レーザーは共振器端面の反射率が TE 波と TM 波で異なり、TE 波に対する反射率が高く光損失が少ないためである。どちらかが発振するとレーザー利得が奪われ他方は抑制されるので、水平方向 (TE 波) が発振すると TM 波の偏光は抑えられる。偏光比は 10 mW の出力で約 100 : 1 程度であり、その 1 に相当する部分は自然発光光によるものである。複屈折媒体を通過時の光路や偏光面の回転、境界面に斜入射するときの反射率などを問題とする応用では偏光方向のチェックが必要である。

### 3.5 変調特性

半導体レーザーの気体レーザーなどと最も大きく異なる性質は直接変調ができることである。変調可能周波数は GHz を超している。レーザープリンター、光ディスクの光源や光通信用光源として幅広く使うことができる。

ここでは高速変調で問題となる時間遅れと緩和振動について触れる。

レーザーに電流を流すとキャリアが注入され反転分布が形成されるが、レーザー発振が可能となるキャリアに達するまで時間遅れが生じる。電流を  $J_1$  から  $J$  に増加した場合、これは光子とキャリアのレート方程式を解くことによって、

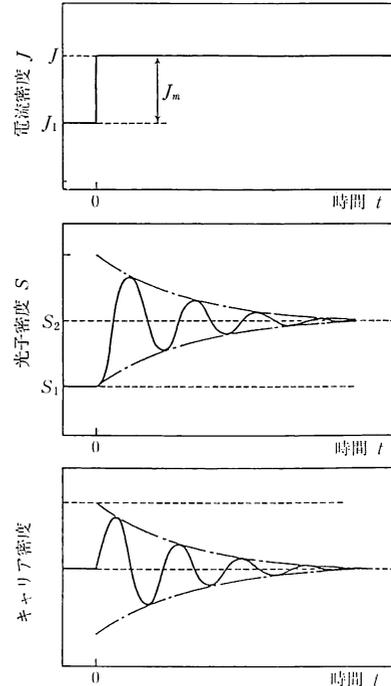


図8 電流パルスと光子数およびキャリア密度の過渡応答特性

$$T_d = \tau_s \ln \left\{ \frac{(J - J_1)}{(J - J_{th})} \right\} \quad (7)$$

で与えられる<sup>1)</sup>。ここで  $J_{th}$  はレーザーの閾値電流、 $\tau_s$  はキャリアの寿命である。一方、光出力が一定になるまでである振動を伴う。これは注入するキャリアと放出する光子があるバランスになるまで図8のように時間を要するためである。

この振動周波数は 1 GHz 近辺にあるので、数百 MHz 以上での応用では注意が必要である。

## 4. 縦モード特性

半導体レーザーは縦モードが 1 本で発振する単一モードレーザーと複数モードが発振する多モードレーザーがある。一般に屈折率導波路型レーザーは前者に属し、利得導波路型レーザーは後者に属する。

高速の光通信、ホログラフィや干渉計測に使うには前者、光ディスクには後者が使われている。

しかしもっぱら、シングルモードレーザーといっても完全にシングルモードを保つことのできるレーザーは DFB (distributed feed back), DBR (distributed bragg reflector)<sup>2)</sup> といった共振器の中に発振波長の半分の周期のグレーティングを刻んだものに限られる。他のレーザーは温度が変化したり外部から少しでも戻り光がある

と、シングルモードが保てなくなる。

4.1 雑音特性

ここでは上で述べたシングルモードが保てないことで生じる雑音特性とその対策について述べる。

4.1.1 モードホッピング雑音

図9はシングルモードレーザー(屈折率導波型)とマルチモードレーザー(利得導波型)の温度が変化したときの雑音特性を示している。シングルモードレーザーでは雑音の基底レベルは低いものの、特定の温度で鋭い鋸歯状雑音が測定される。一方マルチモードレーザーでは全体の雑音レベルは約1桁高いもののそのレベルは安定している。

雑音レベルは、相対強度雑音(relative intensity noise: RIN)<sup>7)</sup>で持って表され、次の式で示される。

$$RIN = \frac{(\text{レーザー雑音強度})^2}{(\text{レーザー平均出力})^2} \Delta f \text{ (Hz}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

( $\Delta f$ : 測定帯域幅)

図10はさらにシングルモードレーザーの雑音特性とモードの変化の具合を調べたものである。シングルモードレーザーでは約3度温度が上昇すると縦モードが1本長波長側にステップ的に変化している。この鋸波状雑音はそのモードが変化する温度で生じていることがわかる。このモードが変化する現象をモードホップと呼び、それに伴う雑音をモードホッピング雑音と呼んでいる。

このモードが変化するときには2本のモードがお互いに主導的な発振を行おうと競合しているためである。

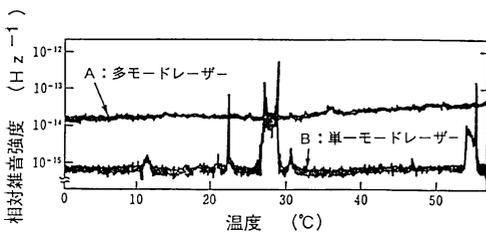


図9 半導体レーザーのノイズ特性

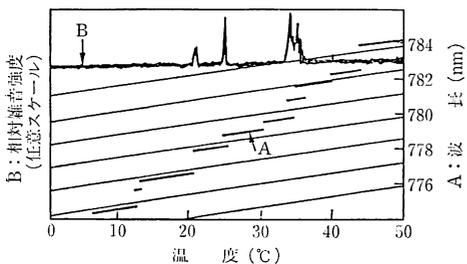


図10 レーザー波長の温度依存性<sup>5)</sup>

モードが変化しても必ずしも雑音が生じない時があるのは、モードの移行がスムーズに行われたときと考えられる。

モードホップの原因は半導体レーザーの媒質の利得特性が温度変化に敏感で、その最大利得が得られる波長が温度変化とともに急激に変化するためである。

一方マルチモードレーザーでは常に5~10本の縦モードが存在しており、モードの競合が行われないので特定の温度で急激な雑音の上昇は生じない。

4.1.2 戻り光雑音

半導体レーザーは共振器が1mm弱と短くても数十mWの出力がでるほど利得が高い。したがって気体レーザーでは端面の反射鏡の反射率が90%以上と高いものが使われているのに対し、半導体レーザーでは結晶の壁界面の反射率が30%程度でも発振する。

したがって外部との結合効率が高く、レーザー光の一部が再びレーザー共振器の中に容易に戻ってくる。また、光源の幾何光学的な性質から点光源に近い形状をしているため、光ディスクのような光を微小スポットに絞るような応用では、光源の発光点と絞り込みスポットには幾何光学的に共役的な関係が生じ、必ず一部の光が再びレーザー共振器の中に戻ってくる配置となっている。このように自分が発したレーザー光が再び共振器の中に戻ってくることでレーザーの発振状態がみだされて生じる雑音を戻り光雑音と呼ぶ。

図11はレーザー光が戻った場合の反射点の位置を若干動かしたときのレーザー光の主力が変化している様子を示したものである<sup>8)</sup>。主力変動の周期が反射点が1/2波長ずつ移動したときに生じていることがわかる。これはレーザーの反射点とレーザー共振器の発射点で構成される外部共振器と、レーザー自体の共振器のモードが反射点を1/2波長動かすごとに一致、不一致をくりかえしそのたびにレーザーの発振状態が影響を受け変化しているためである。

図12は、図13のような干渉計を用いて、レーザー光

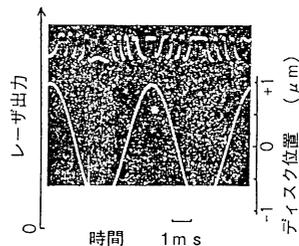


図11 光帰還による出力変動



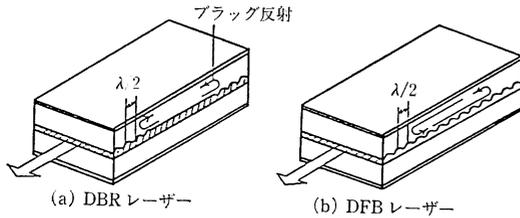


図 15 DBR, DFB レーザーの構造

と必ずしも雑音の抑制ができない。

戻り光を抑制する方法としては偏光ビームスプリッターやファラデーローターによるアイソレータが考えられている。ただし前者は完全には戻り光を撲滅できない。また後者は高価であるという問題があり、光通信のような高価格の製品には適用できても、光ディスクのような大量生産低価格商品には適用できない。

5.2 マルチモードレーザーによる方法

5.2.1 レーザー自体による方法

マルチモードしたレーザーはモードホッピングなどの雑音が少ないことは前に述べた。その方法は利得誘導波型レーザーを用いる方法である。雑音の基底レベルは  $10^{-13} \sim 10^{-12}/\text{Hz}$  である。これは CD では十分な雑音レベルであるが、レーザーディスク再生では不十分である。もう一つはパルセーションレーザーを用いることである。構造は屈折率導波路型レーザーに近いが導波路と周囲の屈折率の差を少なくすると、2~3 GHz の高周波でパルス自励発振しかつ同時に 10 本程度のマルチモード発振をする。雑音のレベルは  $10^{-13} \text{ Hz}^{-1}$  以下であり、レーザーディスクの再生に使われている<sup>9)</sup>。ただし、これらのレーザーは 10 mW 以上ではシングルモード発振をするので注意を要する。

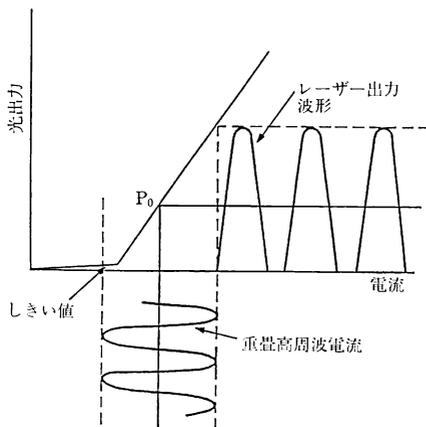


図 16 高周波電流重畳の方法

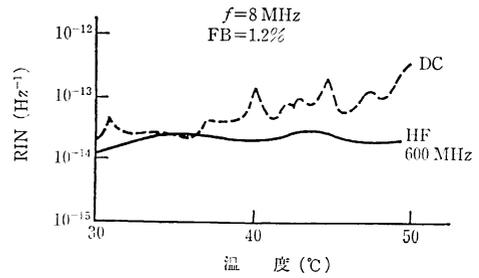


図 17 高周波変調時のレーザーノイズ特性 (実線は DC 電流駆動)

5.2.2 高周波変調によるマルチモード化<sup>10)</sup>

マルチモードレーザーは横モード制御性が不完全で、遠視野像の非対称性や、非点収差が大きという点があり、回折限界を要求される光ディスク等では使いにくい。そこでシングルモードレーザーの良さを使いながらマルチモード化する方法が考えられた。半導体レーザーに図 16 で示すように、閾値を切り込むように数百 MHz の高周波でレーザーを高速変調すると、シングルモード半導体レーザーでもマルチモード発振する。

その時のモード数は 10 本前後になる。雑音レベルもマルチモード半導体レーザーに比べ桁低い。同じレーザーを DC 駆動した場合と高周波変調駆動した場合の雑音レベルを図 17 に示す。

この方法は戻り光に影響は受けにくくなるがさらにその影響をなくするにはレーザーが発振していない時間に戻

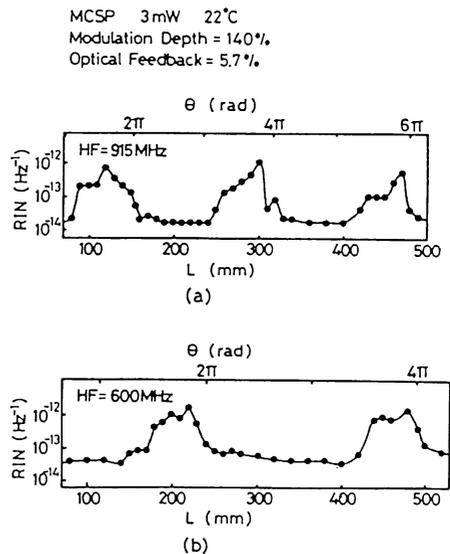


図 18 高周波重畳時の雑音と光路長 (反射点までの距離) との関係

り光がレーザー共振器に戻ってくるように光路長と高周波変調周波数との関係を調整することが必要である。

図 18 は光路長を変えた時の雑音レベルを示す。特定の光路長で雑音が低減化されているのがわかる。光磁気ディスクのように多量の戻り光が避けられないシステムの場合には2往復した戻り光に対する考慮も必要<sup>11)</sup>となってくる。

## 6. 終わりに

2回にわたりレーザー共振器とレーザービームの伝搬について述べてきた。レーザーは現在でも面発光レーザーなど新しい種類が開発されている。新しい応用の可能性ができるにつれて今後も新しいレーザーが現れ、それに対する解析が必要となるだろう。

## 文 献

半導体レーザーおよび光導波路の基本特性に関しては容易に手にはいる次の3編を参考にした。

- 1) 伊藤良一, 中村道治編: 半導体レーザー (培風館, 1989).
- 2) 末田 正: 光エレクトロニクス (昭晃堂, 1985).

- 3) 川上正二郎: 光導波路 (朝倉書店, 1980).
- 4) 有本 昭: “フレッシュマンのための現代光学—Ⅲ. レーザー共振器とレーザービームの伝搬 (1)”, 光学, **21** (1992) 629-634
- 5) 有本 昭: “半導体レーザーの光学的使用法”, 光学, **13** (1984) 125-130.
- 6) K. Tatsuno and A. Arimoto: “Measurement and analysis of diode laser wavefront,” Appl. Opt., **20** (1981) 3520-3527.
- 7) M. Ojima, A. Arimoto, N. Chinone, T. Gotoh and K. Aiki: “Diode laser noise at video frequencies in optical video disc players,” Appl. Opt., **25** (1986) 1404-1410.
- 8) A. Arimoto and M. Ojima: “Diode laser noise at control frequencies in optical disc players,” Appl. Opt., **23** (1984) 2913-2920.
- 9) 稲田順史, 村田和久, ほか: 第44回応用物理学会学術講演会予稿集, 27-aP3 (1983) p. 110.
- 10) A. Arimoto, M. Ojima, N. Chinone, A. Oishi, T. Gotoh and N. Ohnuki: “Optimum conditions for the high frequency noise reduction in optical videodisc players,” Appl. Opt., **25** (1986) 1398-1403.
- 11) A.G. Dewey, R.N. Payne and W. Lenth: “Noise and spectral behaviour of an optical storage laser with feedback and high frequency modulation,” Technical Digest of ISOM '91, 2E-13 (1991) pp. 73-76.