特集 7

半 導 体 レ ー ザ ー の 特 性

小 林 功 郎 *

(1986年 8 月 22日 受理)

Characteristics of Semiconductor Lasers

Kohroh KOBAYASHI*

(Received August 22, 1986)

1. ま え が き

レーザーパラメータの測定法についての特集号の中で、半導体レーザーの特性に関する原稿執筆を依頼されたとき、かなり前に同様な題目で原稿を書いたことを思いだし、調べてみた。その結果、1977年に、半導体レーザーにおけるパラメータ測定と題して、小文を書いていることがわかった¹⁾。そこでは、半導体レーザーの特性に影響を与える主要なパラメータの測定方法や、各種のパラメータ間及び各パラメータと動作特性の関係等を述べている。すなわち、発振に関連するパラメータとして、内部量子効率や利得係数を、動作特性に関連するパラメータとして、キャリア寿命時間、光子寿命時間や自然放出光係数を、特性に関連するパラメータとして、屈折率のキャリア密度依存性を、そのほか、水平横モード、発振スペクトルに関連するいくつかのパラメータについて解説している。当時は、半導体レーザーが光通信用光源として使われ始めた時期にあたる。従って、半導体レーザーのパラメータに関する解説も、半導体レーザーの特性を改善していく側の、いわば研究開発側にとって重要な、内部のパラメータに重点を置いていた。現在では半導体レーザーは、幹線系を中心にした光ファイバ通信の外に、コ

ンパクトディスク、ビデオディスクなどの光ディスクを中心とする光情報処理分野に広く使われるようになっている。そこで本稿では、半導体レーザーの主要な特性/パラメータを応用分野と関連づけて解説することを試みる。特に、前回の解説以後、ここ9年ほどの間に新たに問題となってきた特性/パラメータに重点をおいて述べる事にする。

2. 応用分野と特性/パラメータの関係

半導体レーザーの主要な応用分野として、光通信と光情報処理を取り上げる。それらに特に関連する特性として光ビーム特性、スペクトル特性、変調特性、及び雑音特性などがある。

Table I に、そららの応用分野あるいは共通する応用分野に関連するパラメータの主要なものをまとめて示す。

両方の応用分野に共通する特性/パラメータの中で、横モードの単一性に関しては、横モードの安定性が半導体レーザー特性に大きな影響を与えることが明らかにされて以来、様々な横モード制御構造が提案、実現されてきている。横モードに直接関係するパラメータとしては、出力光ビームの形状に関するものがある。光通信用では、出射光ビームの垂直/水平放射角が光ファイバとの結合効率に影響を与えるが、光

* 日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 (〒213 川崎市 宮前区 宮崎 4-1-1)

* Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation

Table I Principal applications area for semiconductor laser diodes and related parameters.

応用分野	光ビーム特性	スペクトル特性	変調特性	その他
光通信	ファーマー・フィールド強度分布 垂直 / 水平放射角	多軸モード： 包絡線半値幅 単一軸モード： 副モード抑圧比 安定性 チャープピング 単一周波数： スペクトル線幅	強度変調帯域 周波数変調帯域	
共通	単一横モードの 安定性			光出力 しきい値 効率 反射戻り光 雑音
光情報処理	ファーマー・フィールド強度分布 垂直 / 水平放射角 放射角比 非点収差			

学系の改良などにより、現状ではそれほど大きな問題ではない。一方、光情報処理用では、光ビームの円形度、即ち垂直と水平放射角の比や、非点収差すなわち、両方向のビームウェイト位置の違い等が、光ディスク用ピックアップの光学系の構成に大きな影響を与える重要なパラメータになる。

スペクトル特性、変調特性は光通信用の半導体レーザーに関係する部分が多い、光ファイバ伝送系の進展にともない、半導体レーザーのスペクトル特性に対する要求も次第に厳しいものになりつつある。現在実用化されている多軸モード半導体レーザーでは、変調時の軸モードスペクトルの包絡線の半値幅が問題になるだけであるが、次世代の光伝送系用の半導体レーザーには、長距離大容量光伝送系を実現するため

に、単一軸モードスペクトルが要求される。ここでは、単一軸モードの安定性、単一性、波長チャープピング等が重要なパラメータになる。更に、将来の光通信システムとして期待されている光ヘテロダイン等のコヒーレント光通信用の光源として、単に単一の軸モード発振であるだけでなく、発振周波数の安定化や、発振周波数の電氣的制御などが問題になる。即ち、発振スペクトル線幅の狭化や、周波数同調などが大きな課題である。

変調特性に関しては、半導体レーザーの高速化がますます重要になっている。NTTの日本縦貫回線に代表されるように、現在実用化されている光通信の伝送速度は、400—600 Mb/sである。伝送系の効率化、経済化のために、Gb/s領域のシステムの検討が進められている。

それにともない、半導体レーザーの直接強度変調帯域の拡大が進められている。一方、前述の光ヘテロダイン方式の中の一方式のFSK方式用光源等には、周波数変調特性に対する要求も出ている。

光情報処理用光源としての半導体レーザーへのスペクトル特性の要求は、主としてその波長そのものにある。レーザープリンタの高速化、光ディスクの高密度化、等にとって、半導体レーザーの短波長化は極めて魅力的である。

以下の各節では、これらの特性/パラメータの測定法に注意しながら、技術の現状、今後の展望について述べることにする。

3. 光ビーム特性

光ディスク用のピックアップでは、半導体レーザーの出力光により、光ディスク盤面上のピットの有無や長さを検出したり、偏波面の回転を検出したりする。この様な応用では、出力光ビームを $1\mu\text{m}$ 程度の径に絞込む必要があり、半導体レーザーの光ビーム特性が十分に制御されている必要がある。

光ビーム特性の最も基本的なパラメータは、光ビームの形状を規定する、ニア・フィールド強度分布のスポットサイズとファー・フィールド強度分布の放射角である。これらは、小さな

開口面の光検出器を掃引したり、ビデオコンによるTV画像から測定できる。光ディスクのピックアップ用半導体レーザーには、特に接合面に平行、垂直方向の放射角の大きさと、両者の比が問題になる。後者は、光ビームの円形度に関係する。一般に半導体レーザーの出力光ビームは、接合面に垂直方向に長く延びた楕円形断面の形状をしている。これをほぼ円形の集束光ビームにするために、光学系の有限の開口数を利用して光ビームの一部を蹴ることが行われている。従って、出力光ビームが円形ビームからずれていると大きく削り取らなければならないために、光ビームの利用効率が悪くなる。ファー・フィールド強度分布の測定例として、 $0.83\mu\text{m}$ 帯のn-PCW-LD²⁾で測定された結果をFig.1に示す。垂直放射角と平行（或は水平）放射角の比は、一般には2:1から3:1程度に抑えられている。

光ビームを集束する上で重要なもう一つのパラメータに、非点収差(Astigmatism)と呼ばれるものがある。これは、半導体レーザーの接合面に垂直/平行な二方向で波面の曲率が異なっていることをあらわすパラメータであり、半導体レーザーの光導波機構に関係する。非点収差は半導体レーザーの射出端面での接合面に垂直な方向と平行な方向のビームウェスト位置

Fig.1 Far field intensity patterns of $0.83\mu\text{m}$ n-PCW laser diode.

の距離の差として定義される。一般に、半導体レーザーの接合面に垂直な方向は、二重ヘテロ構造による光導波路が形成されているため、半導体レーザー内で波面は平坦であり、出射光ビームのビームウェィストは、レーザー端面に一致する。一方、接合面に平行な方向には、様々な横モード制御構造が工夫されており、その光導波機構によって波面の曲がり方に差ができる。特に、導波機構として、屈折率差による光導波路によらず、利得の差や損失の差による光導波を利用するものは、波面の曲がりが大きく、ビームウェィストがレーザー端面に一致しないことになる。非点収差は、レンズにより集束された光ビームのビームウェィスト位置を、接合面に垂直/平行な二方向について測定し、その両者の位置の差から求められる。ビームウェィスト位置は、光ビームのスポットサイズを測定し、その最小位置から求められる。数 μm 以下の微小なスポットサイズの測定には、ナイフエッジ法が良く使われている。これは、Fig.2に示すように、ナイフエッジで光ビームを切るときの光量の変化からスポットサイズを求めるものである。ナイフエッジの移動を精密に測定でき、

Fig.2 Knife-edge method for small spot size measurement.

Fig.3 Observed astigmatism for two n-PCW laser diode with equivalent refractive index difference n between the active region and the surrounding region in the direction parallel to the junction plane, $n=1.2\times 10^{-2}$ (upper portion) and 4×10^{-3} (lower portion).

光ビームの形状が良く分かっていれば、かなり精密に測定できる。前述の n -PCW-LD の非点収差の測定例を Fig.3 に示す³⁾。この半導体レーザーは、活性層に隣接する光導波路層の厚さによる等価的な屈折率導波を主要な光導波機構に採用しているので、良好な非点収差特性が得られている。接合面に垂直/平行の二方向のスポットサイズの測定を同時に行い、より効率的に非点収差を測定する方法として、V字型のナイフエッジを用いる方法が開発されている⁴⁾。分解能として $1\mu\text{m}$ 以下が報告されている。

4. スペクトル特性

光通信用光源としての半導体レーザーに要求されてスペクトル特性を、主要な適用領域毎にまとめて Table II に示す。結晶のへきかい面を共振器として用いるファブリペロー型の半導体レーザーでは、高速直接変調時に多軸モード

Table II Spectral characteristics required for semiconductor laser diodes for optical communications use.

	信号速度	伝送距離	半導体レーザー	所要スペクトル特性
高速光伝送	数100 Mb/s 以下	10 } 100 km	ファブリ ペロー型 (多軸モード)	<ul style="list-style-type: none"> 変調時スペクトル包絡線の半値幅
超高速光伝送	数100 Mb/s 以上	10 } 100 km	単一軸モード型	<ul style="list-style-type: none"> 温度, 電流, 出力経時変化に対する安定性 変調時副モード抑圧比 波長チャーピング
コヒーレント光伝送	数10 Mb/s } 数 Gb/s	50 } 300 km	単一周波数型	<ul style="list-style-type: none"> スペクトル線幅 周波数安定度 周波数同調

化する。したがって、光ファイバの分散特性による波形劣化の影響を避けるために、半導体レーザーの発振波長を光ファイバの零分散波長にほぼ一致させ、多軸モードスペクトル包絡線の半値幅をある値以下に制限する必要がある。例えば、400Mb/s-20 ないし30km の光伝送系に対して、実用上大きな伝送品質劣化を生じさせないためには、シリカ系単一モード光ファイバの零分散波長 $1.31 \mu\text{m}$ に対して半導体レーザー中心波長を20nm 以内に一致させた上で、スペクトル半値幅を数 nm 以下にすれば良い。このような発振スペクトルは、通常の分光器で測定できるが、最近では、光ファイバ通信用専用に光ファイバ入力で比較的簡単にスペクトルが評価できる、光スペクトルアナライザーと称する分光器が市販されている。

Gb/s 領域の超高速光信号の伝送や、数10-100 kmに及ぶ長距離の光ファイバ伝送では、光ファイバの零分散波長域であっても、単一軸モード光源が要求される。半導体レーザーの単一軸モード化のためにいくつかのアプローチが試みられてきたが、現状では、活性層の近傍に回折格子を導入した分布帰還型 (DFB: Distri-

buted Feedback) 半導体レーザーがまず最初に実用化されつつある。DFB 半導体レーザーの一例として、DFB-DC-PBH レーザーの構造 Fig. 4 に示す⁵⁾。単一軸モード半導体レーザーで最も基本的な特性は、単一軸モードの安定性である。即ち、温度変化、電流変化 (= 光出力変化) に対して安定な単一軸モード発振を保てなくてはならない。Fig. 5 に、Fig. 4 に示したデバイスの発振スペクトルの温度依存性の一例を示す。活性層及び周囲の光導波層の半導体層の屈折率の温度依存性のために、発振波長は温度上昇と共に約 $1 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ で長波長側に移動しているが、広い温度範囲にわたって安定に単一軸モード発振をしている事が分かる。

超高速光伝送系用の単一軸モード光源にとつ

Fig. 4 A schematic of single frequency laser diode (DFB-DC-PBH structure).

Fig.5 Temperature dependence of spectra and light output versus current characteristics for a 1.5 μm DFB-DC-PBH laser diode.

て重要な特性/パラメータは、副モード抑圧比と波長チャープングである。Fig.6 に、4 Gb/s 直接変調時の光出力波形と、前述の光スペアナによるそのときのスペクトル波形を示す⁶⁾。このスペクトル波形の観測から、発振軸モードと非発振軸モードとの強度比、つまり副モード抑圧比として、30 dB(1000:1) 以上とれていること、及び、発振軸モードの平均的なスペクトル広がり、つまり波長チャープング量が5~10 Åになっていることが分かる。副モード抑圧比が小さいと、受信器への入力光レベルを増してもビット誤り率が減少しない、いわゆるビット誤り率 vs. 光入力特性におけるフロアが生じる。一方、波長チャープングは、所望のビット誤り率に必要な入力光レベルの上昇を招く。副モード抑圧比の問題は、発振軸モードと非発振軸モードとの所要発振しきい値利得の差を大きく取ることによって解決できそうである。波長チャープングに関しては、今の所余り有効な解決手段が見つからない。光パルス出力波形の消光比劣化を覚悟の上で、バイアス電流を発振しきい値以上にかなり上げ、変調時におけるキャリア密度の変動を極力抑える方法はある程度有効である。

コヒーレント光伝送用の光源にはより厳しいスペクトル特性が要求される。その第一は、発

4 Gb/s RZ Mod.

$I_b = I_{th}$
50ps/div.

Spectrum
under 4 Gb/s Mod.
 v : 10 dB/div.
 h : 2 nm/div.

Fig.6 Modulated waveform and spectrum under 4 Gb/s direct modulation for a 1.5 μm DFB-DC-PBH laser diode.

振スペクトル線幅であろう。必要とされるスペクトル線幅は、信号ビットレート、変調方式によって異なるが、ASK (Amplitude Shift Keying) FSK (Frequency Shift Keying) 方式では数10~数100 MHz、PSK (Phase Shift Keying) 方式では数10~数100 kHz 程度であろう。スペクトル線幅の測定には、数 GHz (0.数 Å) 以上では、通常分光器が、100 MHz 以下の領域では、光ファイバによる遅延と光変

Fig. 7 Experimental diagram for linewidth measurement by delayed self-heterodyne method.

調器による周波数偏移を組み合わせた遅延自己ヘテロダイン法 (Fig. 7) ⁷⁾ が最も良く使われている。この時の分解能は遅延用の光ファイバの長さで決まり、数10 kHz 程度は容易に実現できる。これらの途中の領域については、掃引型のファブリペロー干渉計による測定が簡便である。遅延自己ヘテロダイン法による $1.3 \mu\text{m}$ 帯の DFB-LD の測定結果の一例を Fig. 8 に示す。この例では 6 MHz という値が得られているが、これまでのところ、単体の DFB / DBR-LD での最小スペクトル線幅は 3 MHz である。より小さいスペクトル線幅の光源として、ファブリペロー LD や DFB / DBR-LD に外部反射鏡を組み合わせた外部鏡半導体レーザーや、光導波路と反射鏡を DFB-LD にモノリシックに集積化した半導体レーザーが研究されている。

5. 変調特性

半導体レーザーの変調特性の評価法としては、

Fig. 8 Observed spectral lineshape. Open circles indicate the best fit calculated result with Lorentzian lineshape.

周波数軸上での応答を見る周波数特性による方法と、時間軸上での応答を見る変調された光出力波形による方法とがある。主な変調方式には、直接電流を変調する直接強度変調と直接周波数変調がある。

強度変調の周波数応答特性は、ネットワークアナライザにより容易に測定できる。測定結果には、受光器の周波数特性が含まれるので、半導体レーザーの特性を正確に把握するためには、測定範囲よりも十二分に広い帯域の受光器を用いる必要がある。一般には、長波長系の測定には、InGaAs-PIN フォトダイオードが用いられる。特に良く注意して作られたフォトダイオードは 60 GHz という広帯域特性が得られている⁸⁾。

半導体レーザーの強度変調周波数特性は、共振振動あるいは緩和振動と言われるレーザー固有の現象で決まる特性と、半導体レーザーの活性層回りの寄生容量と抵抗で決まる CR ロールオフ特性とで決まる (Fig. 9)。緩和振動周波数より高い周波数領域で変調効率は急激に低下するので、広帯域な応答特性を実現するためには、CR ロールオフを極力小さくすると共に、緩和振動周波数を高くする必要がある。寄生容量低減による半導体レーザーの広帯域構造の代表例を Fig. 10 に示す。埋め込み型半導体レー

Fig. 9 Fundamental factors which governs intensity modulation characteristics in semiconductor laser diodes.

Fig.10 Various laser diode configurations for wide modulation bandwidth by parasitic capacitance reduction.

ザーにおけるストライプ電極による抵抗成分の導入及びメサ構造による電流ブロック用PN接合の切り離し(a), 半絶縁半導体層による埋め込み(b), ポリイミド等の非半導体による埋め込み(c)等により, 寄生容量の大幅な低減が実現されている。一方, 緩和振動周波数は, 微分利得, 光子密度, 光子寿命時間などに依存する。これらのパラメータは, 発振しきい値や素子信頼性とトレードオフの関係にあり単純に一つだけを独立に制御するわけにはいかないことが多い。微分利得係数, 即ち, キャリア数の増加に対する利得の増加する割合は, 量子井戸構造の採用や, 利得ピークよりも短波長でのレーザー発振などにより大きく出来る。後者は, 発振波長を利得ピークとはある程度独立に制御できるDFB/DBR型の半導体レーザーで実現可能で

ある。利得ピーク波長よりも 100Å 以上短波長側に発振波長を意図的に設定した $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯のDFB-DC-PBH LDで, バイアス電流がしきい値の14倍のとき, 21GHz という高い緩和振動周波数が得られている⁹⁾。なお, この様な高い緩和振動周波数を直接測定するのは, フォトダイオードの帯域から考えて困難なことが多い。かわりに, 光帰還により強調された雑音スペクトルを測定する光フィードバック法が有効である¹⁸⁾。

直接周波数変調特性は周波数変化をファブリペロー干渉計などで強度変化に変換して測定する。Fig.11に通常のDFB-LD(a)と, 周波数変調用の位相制御領域付のDFB-LD(b)¹¹⁾の周波数変調特性の測定結果を示す。通常DFB-LDでは, 周波数変調特性に大きなディップが生じている。これは, 通常のDFB-LDでは, 低周波領域では活性領域の熱的效果で, 高周波領域ではキャリア密度の変動による屈折率変化の効果で, それぞれ周波数が変化していることによる。この様な周波数特性のディップは変調された光出力波形の劣化を引き起こす。(b)の位相制御領域付DFB-LDは, 低周波領域から高周波領域まで, キャリア密度の変調による屈折率変化の効果を利用しているので, 平坦な周波数特性を示す。このデバイスはFSK光ヘテロダイン伝送実験に用いられ, その有効性が確認されている。一例として, 最近, 34Mb/s で 301 km の無中継伝送実験が報告されている¹²⁾。

Fig.11 Frequency modulation response for a phase tunable DFB laser diode and a conventional DFB laser diode.

6. あとがき

光通信, 光情報処理の分野で本格的な実用化時期を迎えた半導体レーザーの特性のうち, 最近の応用に特に関係の深い特性として, 光ビーム特性, スペクトル特性, 及び変調特性について, 主要なパラメータの測定法に注意しながら解説した。半導体レーザーは, 成熟期を迎えたマイクロエレクトロニクスと共に, 基盤技術としてますます重要性を増しつつある光エレクトロニクスのキーエレメントとして, 今後も更に広い分野への応用が図られていくことが期待される。適切なパラメータの評価は, デバイスの開発及びその応用の両面でこれから一層要求されよう。

日頃ご指導頂く阪口所長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小林: 応物量子エレクトロニクス研究会資料 (1977).
- 2) 川野他: 昭61信学総全大, 920.
- 3) 石川他: 昭61信学光電波部門全大発表予定
- 4) 伊藤他: 昭58秋応物講演会, 13p-E-10.
- 5) M.Kitamura et al.: J. Lightwave Tech. **LT-2** (1984) 363.
- 6) I.Mito et al.: ECOC '86 MB 2 (1986).
- 7) T.Ookoshi et al.: Electron. Lett. **16** (1980) 630.
- 8) J.E.Bowers et al.: Electron. Lett. **22** (1986) 633.
- 9) H.Nishimoto et al.: Int. Conf. Solid-State & Materials, D-3-2 (1986)
- 10) G.P.Agrawal et al.: Appl. Phys. Lett. **45** (1984).
- 11) S.Yamazaki et al.: Electron. Lett. **22** (1985) 5.
- 12) K.Emura et al.: OEC '86 (1986) CI-1.