半導体レーザ光学系の光軸測定法*

熊沢鉄雄** 米田奈柄*** 嶋岡 誠*** 佐々山 厚†

Optical Axis Determination of Semiconductor Laser Systems

Tetsuo KUMAZAWA, Nae YONEDA, Makoto SHIMAOKA and Atsushi SASAYAMA

An optical axis determination method for semiconductor laser systems of invisible wave length, e. g. 1.3, 1.5 μm , has been proposed. A semiconductor laser module with a microlens shaped by the surface tension of melted glass is discussed. The optical axis of the system is determined as follows. At first, the axis of the lens is searched from interference fringes made by reflecting He-Ne laser visible light. This axis is then used as the reference axis. Next, the electromotive current in the semiconductor laser is measured by illuminating the semiconductor laser with a He-Ne laser light from the opposite direction against the laser emission. At the same time, the angle of the illuminating laser light is continuously changed by means of an $f\cdot\theta$ lens. The illuminating laser light axis which corresponds to the desired optical axis is found when the maximum electromotive current is obtained. The spacial orientated axis is determined by independently measuring the maximum currents along two directions orthogonal to each other.

Key words: optical axis, semiconductor laser, microlens system, optical path, fringe formation

1. 緒 言

半導体レーザは寸法が小さく、発光が電流で制御しやすいことから光通信、光情報処理、計測の分野にと幅広く活用されている。この半導体レーザ素子を搭載した装置ではレンズ、ミラー、アイソレータ、ファイバ等の光学部品の設定、組立上光軸は重要な基準となっている。可視光領域では肉眼で光線の伝播が捉えられるため光軸の取扱いが容易であるが、1.3 μm 、1.5 μm 波長帯など光通信分野で多用される可視外域では光の伝播方向は肉眼ではとらえられないため、光学系の設定、組立、性能評価等が厄介である。

光軸を決める方法として光の伝播途中に受光素子においてスポット中心位置を二か所求めて光軸を決める方法がある。この方法では、レンズから離れた位置においてスポットの観察を行うが、離れたところではスポットサイズが大きくなっており、スポット周囲がぼやけていること、強度中心が求めにくいなどの理由からスポット中心を決めることが難しい。また、光軸測

定として焦点の位置を測定し、その焦点位置を用いて光軸を決めることも考えられるが半導体レーザに組み合わせて用いられたマイクロレンズ¹⁾²⁾の焦点はレンズから1~2 mmとレンズに近いので測定が困難である。

本報では可視外の長波長半導体レーザ素子を搭載したパッケージの光軸を測定する方法を提案し、検討した。測定方法は可視外のレーザ光とは逆の方向から可視光(He-Neレーザ光)を照射することにより光軸を決める方法である。

2. 干渉じまの形成

半導体レーザを搭載した光学装置の中で基本となる構成はレーザ素子とレンズの組合せである。この組合せを光学配置の代表例として取り上げ、光軸を決めるための干渉じま形成について述べる。半導体レーザと組み合わせるレンズにはマイクロレンズが使用される。ここではマイクロレンズとしてガラス材料を溶かし、表面張力によって球表面を形成した汎用レンズを取り上げる。

レンズの断面を図1(概略形状は図2参照)に示す。レンズはホルダ内に形成されており、口径は0.8 mmである。レンズ両表面は球面となっている。このレン

* 原稿受付 平成3年5月18日

** 正会員 (株)日立製作所機械研究所(土浦市神立町502)

*** (株)日立製作所機械研究所

† (株)日立製作所小諸工場(小諸市柏木190)

Fig. 1 Cross section of microlens made of melted glass

Fig. 2 Reflected and refracted light loci

ズに光線を照射したときの軌跡を図2を用いて検討する。レンズの光軸をZ軸にとり、レンズ表、裏球面の中心を $O_a(0, Z_a)$ 、 $O_b(0, Z_b)$ とする。Z軸に平行な入射光線I、およびIIでレンズを照射する。光線Iは前表面 P_1 で屈折し、裏面 P_2 で反射、前表面 P_3 でレンズから出射してスクリーン上(位置 S_L)に到達する。一方、光線IIは前表面 Q_4 で1回反射して、スクリーン上の同じ位置 S_L に到達する。ここではスクリーン上で同じ位置 S_L に到達し、干渉する光線に注目する。

光線I, IIがスクリーンを出発点として再びスクリーンに戻るまでの光路長を δ_I, δ_{II} とすると、

$$\left. \begin{aligned} \delta_I &= z_L - z_1 + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (z_2 - z_3)^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_3 - x_L)^2 + (z_3 - z_L)^2} \\ \delta_{II} &= z_L - z_4 + \sqrt{(x_4 - x_L)^2 + (z_4 - z_L)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

と表される。レンズの球面を表す式、反射、屈折の法則を用いて式(1)から光路長差 δ

$$\delta = \delta_I - \delta_{II} \quad (2)$$

を求める。

実測したレンズの屈折率 $n=1.487$ 、球面半径 $R_a=0.64$ mm, $R_b=0.68$ mm, 球面中心 $Z_a=0.36$ mm, Z_b

Fig. 3

(a) optical path difference on the screen and
(b) relative intensity calculated from (a)

$=0.02$ mm, スクリーン位置 S_L を用いてスクリーン上における光路差 δ をコンピュータで計算した。計算では入射光線Iと光軸Zとの間隔 X_1 を0から開口半径 $r=0.4$ mmまでを200等分し、等分した間隔 X_1 を順次変化させて光路長差 δ を求めた。得られた光路長差 δ を光軸からの距離 X を横軸に図3(a)に示す。この光路長差 δ から

$$I = \cos(2\pi\delta/\lambda), \quad \lambda = \text{波長}(0.633 \mu\text{m}) \quad (3)$$

を用いて明るさ I に変換した。結果を図3(b)に示す。この結果は、コヒーレントな可干渉光でレンズを照射すると、明暗を示す干渉じまが形成されることを示している。図3(b)はスクリーン上のx軸方向に形成される干渉じまを示したものであるが、レンズはz軸を中心とする軸対称構造であることから干渉じまはx軸上のみならずy軸上にも形成される。すなわち、干渉じまはスクリーン面上(x, y面上)で二次元的に形成され、円環群となる。この円環じまの性質としては、干渉じま環の間隔が中心から離れるに従い漸減する。また、レンズの光軸であるZ軸は干渉じまの中心に位置し、照射光の中心(光軸)となっている。

3. 環状干渉じまの観察

前記計算で求めた干渉じまを実際に形成させ、観察

(a) Fringe formation apparatus

(b) Fringe pattern

Fig. 4 Fringe formation and pattern

を行った³⁾。観察方法は図4(a)に示すように紙製のスクリーンに直径2 mmの孔をあけ、この孔を通してマイクロレンズをレーザー光で照明し、反射光で形成された干渉じまを観察する方法である。干渉じまを形成させるコヒーレントな光源としてHe-Neレーザーを用いた。レーザー光のビーム径は1 mmである。スクリーンはレンズから120 mm離れた位置である。干渉じま環はレーザー光をレンズに照明するのみで容易に形成された。通過孔を通るレーザー光の軸と干渉じま環の中心とは一般に一致しない。これら両者を一致させることはレンズの向きを調整することで可能である。光軸を一致させた状態の干渉じまを図4(b)に示す。図4(b)から照明光の孔を中心として同心円状のきれいな環群が形成されていることがわかる。干渉じま環の間隔は中心から離れるに従い減少している。このような干渉じまの分布については前節で述べた計算結果と良く一致していた。計算と観察の結果が一致していることは図2から分かるように環状干渉じま群の中心を通る照明光の光軸がレンズの二つの球面中心を通る中心

軸と一致していることを示している。言い換えると、レンズの二つの球面中心を通る軸、すなわちレンズの光軸は干渉じま環を形成することによって把握できることが分かった。この光軸はレンズからスクリーンまでの距離を離すこと、受光素子を走査することで、合わせ精度を上げることができ、 0.01° の軸合わせが可能である。

4. 光軸の測定方法

半導体レーザーパッケージの組立ではレーザー素子から発振したレーザー光の伝播途中にレンズを設置し、固定する。しかし、レンズの固定ばらつきによりレンズを通過した光はレンズの光軸からずれて傾斜して伝播することが多い。すなわち、レンズの光軸（基準光軸と呼ぶ）と出射光が伝播する光軸とは一般に一致しないことが多い。このレンズ通過後の光が基準光軸から傾いて伝播するときの傾きを測定する方法について以下に検討した。但し、ここではレンズの固定ばらつきが小さく出射される光のほとんどがレンズから取り出され、出射光の中心光軸が存在する場合を扱う。

4.1 照射光による起電流発生

レーザー素子(InGaAsP)は電流注入を行うと誘導放出により発振する。この発振波長と同じ波長の光を発振用のレーザー素子に照射するとレーザー素子は受光素子の働きをして起電流が発生することが報告されている。この例が1枚の基板上に発光素子2個(波長 $1.3\ \mu\text{m}$, または $1.5\ \mu\text{m}$ 帯)を同構造で並べて形成し、片方を発光素子、他方を受光素子とした報告である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この場合、受光素子にとって照射されるレーザー光は材質、構造ともに同じ発光素子から照射された光であり、発光及び受光素子に共通した適合性のある光が両者の間に介在し、発光素子の構造で受光の機能も果たしている。この現象を参考にして、本研究で対象としている長波長のレーザー素子に波長が $1/2$ 以下と短い可視He-Neレーザー光(波長 $0.633\ \mu\text{m}$)を照射した。照射しながら電流計をつないでみたところ、起電流の発生することがわかった。さらに、この起電流は照射光の強度に比例することが確認できた(図5)。

4.2 光軸探索

前記の起電流発生を利用し、光軸を探索する方法を検討した。レーザー素子から出射した光の伝播方向とは逆の方向から細い光束を入射角度を連続的に変えながら照射する。丁度、入射光線の光軸が出射光線(軸)と一致したとき、最大の光強度が入射される。しかし、光軸に一致しないところでは高い光強度が得られない。この原理を使って光軸を探索する。この場合、

Fig. 5 Relationship between intensity and electromotive current

Fig. 6 Incident angle change by an f-θ lens

レーザ素子の発光領域である活性層端面が受光部となる。受光部に相当する発光領域の面積はほぼ $1 \mu\text{m}^2$ である⁹⁾。この狭領域に光軸の中心を精度良く一致させたとき最大の光強度が得られ、そのときの条件（光軸）をもって光学系の光軸と決めることができる。

光軸合わせのため、照射光の入射角度を連続的に変えながら照射する方法を図6に示す。この方法は光源として He-Ne レーザ (5 mW) を用い、この光源から射出された光を微動ステージ上に載せたミラーに入射角度 45° で入れる。ミラーから反射された光を f-θ レンズに通し、焦点位置 (295 mm) に置いたマイクロレンズに照射する。マイクロレンズの光軸を前述した干渉じまから決め、f-θ レンズの光軸と一致させる。次に、ステージを移動させてミラー位置を変え、照明光を平行に移動させる。この平行移動に伴い f-θ レンズを透過した入射光線と光軸との距離 H が変わる。この結果、

$$\tan \theta = H/f, \quad f: \text{焦点距離} \quad (4)$$

の関係から照射光の入射角度 θ を連続的に変えることができる。この方法を用いた場合の誤差要因として

Fig. 7 Optical axis determination by x, y direction scanning

パッケージの取付位置のばらつき ($\pm 0.5 \text{ mm}$)、入射光線の角度測定ばらつき (ステージ送り精度 $H = \pm 5 \mu\text{m}$)、およびレンズの非直線性 ($\pm 0.4\%$) がある。これらを合わせた測定精度のばらつきは角度にして $\pm 0.01^\circ$ である。

5. 光 軸 測 定

f-θ レンズを用いて光軸の方向を決める方法を示す (図7)。レンズの基準光軸を z 軸、出射光の光軸を z_0 軸とする。出射光 z_0 軸まわりの光強度分布 (ガウス分布) を同心円で示す。座標軸原点 O を通り、任意の方向に x 軸を決める。x 軸に沿い、光強度の探索をする。と前節4で述べたように起電流 A が最大となる位置 δ_x が求まる。同様に y 軸に沿って探索すると δ_y が測定される。原点 O とレンズとの間隔を L とすると z_0 軸と z 軸とのなす角度 θ は、

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta &= \delta_{xy}/L \\ \delta_{xy} &= \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。すなわち、x 軸、及びこの x 軸と直交する方向 (y 軸) について角度ずれを測定すれば求める基準光軸からの傾斜角度 θ が決定する。

以上、傾斜角度 θ を決める手順をまとめると次の通りである。

1: 干渉じまの形成と基準光軸の決定

図6に示した測定系においてミラーを移動させ、f-θ レンズの中心に光線を位置させる。この状態でレーザ素子付きマイクロレンズを焦点位置に設置する。次に微小孔付きスクリーン (図4参照) を設置して干渉じまを形成する。干渉じまを形成させた後、レンズ付きパッケージを微動調整して入射光線が干渉じま環の中心を通るように設定する。この状態で f-θ レンズの中

Fig. 8 Off-axis measured results

心を通る照射光線が基準光軸となる。

2: 起電流が最大となる位置 δ_x の測定

スクリーンを取り除いた後、レーザ素子の起電流をモニタしながらステージを移動させ、入射角度を順次変える。入射角度を変えるに従い起電流の分布はあるところでピークをもつ山形分布を示す(図7)。z軸上の一点(原点O)を通り、x軸に沿って探索し、基準光軸を基準にして起電流が最大となる位置 δ_x を求める。

3: 起電流が最大となる位置 δ_y の測定

レーザ素子付きマイクロレンズを90°回転し、同様に入射角度を順次変えて起電流が最大となる位置 δ_y を測定する。

4: 傾斜角度 θ の決定

測定した δ_x, δ_y に対応した θ_x, θ_y を求め、式(5)を用いて θ を決定する。

上記手順の下に角度 θ を実測した例を示す。x方向について最大の起電流が生じる場所はz軸から角度 θ_x にして0.71°であった。また、y方向について θ_y は0.77°であった。これらの角度からずれ角度 θ は1.05°である。繰り返し測定したときのばらつきは0.005°であった。

マイクロレンズの屈折率は波長に依存する⁷⁾。波長0.633 μm のHe-Neレーザ光を用いたときの屈折率(1.487)に対して波長1.5 μm になった場合の屈折率の増加は0.02である。この値は割合にして1.3%である。従って測定した傾斜角度を長波長域での値に補正するには1.3%増加修正する必要がある。

6. 結 言

可視外の半導体レーザ素子とこの素子に向かいあわせたマイクロレンズの組合せパッケージを取り上げ、その光軸を測定する方法を検討した。光軸測定方法に関し、次の結論を得た。

- (1) マイクロレンズにレーザ光を照射すると同心円環状の干渉じまが形成される。
- (2) 1.3 μm , 1.5 μm 波長帯のレーザ素子にHe-Neレーザ光(波長0.633 μm)を照射すると起電流が発生し、その大きさは光量に比例する。
- (3) f- θ レンズを用いてレーザ発光とは逆の方向からHe-Neレーザ光を照射することにより入射光角度を順次変えることができる。
- (4) 入射光角度を順次変えながらレーザ素子に生ずる起電流を測定し、最大値を求める。起電流の最大値が得られる位置を2方向(x,y方向)について探索し、これを処理することにより光軸が決定できる。

本報は可視外の長波長域で可視観察が困難な半導体型LDやLEDなどの発光素子にレンズを組み合わせたモジュールの光軸を可視光を用いて測定する方法を示した。本測定法はレーザ素子とレンズの組合せのみならず半導体素子に複数の光学部品を組み合わせた系についても適用できる方法である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、光技術活用ハンドブック、オプトロニクス社、(1985)。
- 2) 岸本了造、角田正豊：厚肉レンズを用いた単一モード光ファイバ用半導体レーザモジュール、電子情報通信学会論文誌C、J70-C、7(1987)1052。
- 3) 末田哲夫：光学部品の使い方と留意点、オプトロニクス社、(1985)。
- 4) K. Iga & B. I. Miller: GaInAsP/InP Laser with Monolithically Integrated Monitoring Detector, Electronics Letters, 16, 9, (1980) 342。
- 5) J. L. Mertz & R. A. Logan: Integrated GaAs-Al_xGa_{1-x}As Injection Lasers and Detectors with Etched Reflectors, Appl. Phys. Lett., 30, 10, (1977) 530。
- 6) レーザハンドブック、朝倉書店、(1973)。
- 7) 例えば、理科年表、物99(1989)519。