

半導体レーザの動作とコヒーレント光の諸特性

1. 注意事項

- 1) レーザ光を絶対に直視しないこと。眼に障害が残る恐れがある。
- 2) 半導体レーザは逆電圧、過電流に大変弱く、容易に破損する。電気配線の誤りや緩みなどがないように注意する。また、接続変更など行う際は、半導体レーザ駆動電源が OFF になっていることを必ず確認する。
- 3) レンズ等の光学部品の取り扱いは、これらに直接触れないように注意すること。指紋がつくと特性劣化し、回復できない恐れもある。光ファイバコードを折り曲げると、内部で光ファイバが切断、破損することがある。
- 4) 光学部品の位置合わせはミクロンオーダー以下の精度が要求される。光学部品は常にマグネットベースで光学実験台に固定する。固定ねじも緩まないようにしっかりしめる。

2. 実験の目的

コヒーレンス（可干渉性）を持つ光波、すなわちコヒーレント光は、時間的にも空間的にも純粋な波である。それゆえ工学的応用に適しており、光ファイバ通信を始めとする光情報伝達、光ディスクメモリなどの光情報記録などの光エレクトロニクスのあらゆる分野で利用されている。コヒーレント光発生には専らレーザが用いられる。なかでも半導体レーザは①小型である、②電流注入による発光が可能、③電力から光パワーへの変換効率が高い、などの優れた特長を有しており、現在、最も重要なコヒーレント光源である。本実験では、半導体レーザの出射光モード、電流—光出力特性、直接変調特性などを観察・測定し、半導体レーザの基本動作、およびコヒーレントなレーザ光の回折、集光、干渉、偏光などの基本的性質について理解を深める。

3. 半導体レーザの構造

一般的な半導体レーザは、CAN パッケージの中に封入されて市販されている。図 1 のように、半導体レーザ本体であるレーザチップ、出力光パワーモニタ用フォトダイオード、放熱用ヒートシンクなどがパッケージに封入されており、ガラス窓を透過してレーザ光が出射する。

最も基本的な半導体レーザであるファブリペロ(Fabry-Perót:FP)型半導体レーザの構造を図 2(a)に示す。発光部である活性層を、それよりバンドギャップエネルギーの大きな材料のクラッド層で挟み込んでいる（ダブルヘテロ構造）。正電極側のクラッド層は p 型、負電極側クラッド層は n 型半導体である。半導体レーザにおいて、光はチャンネル状領域に閉じ込められて往復伝搬する。この光を閉じ込めるための構造を光導波路と呼ぶ。光出射面は半導体結晶の劈開により形成される。空気と半導体の屈折率境界である劈開面は部分反射鏡として働き、往復伝搬している光の一部を出射光として取り出すとともに、残りの光パワーを反射して光導波路内へ戻している。光導波路と 2 つの劈開鏡面で FP 型の光共振器を構成している。劈開面での光波の反射率は概ね半導体結晶の屈折率により決まり、約 30% である。ただし、活性層面に平行な方向に電界成分を持つ光波に対する反射率の方が、垂直な方向に電界成分を持つ光波に対する反射率よりも若干大きい。

共振器として、素子内部に形成した微細周期構造（グレーティング）を用いる半導体レーザもある。グレーティングが活性区間内部に設けられているものを分布帰還型(distributed feed back: DFB)半導体レーザ、活性区間外部に設けられているものを分布ブラッグ反射型(distributed Bragg reflector: DBR)半導体レーザと呼ぶ。DFB 半導体レーザの模式図を図 2(b)に示す。結晶劈開面における光反射に比べて、グレーティングによる光反射は大変鋭い波長選択性を示す。従って、DFB 型や DBR 型では FP 型に比べて単一波長特性が大きく向上する。グレーティングの周期は 100nm 程度であり、その作製には高度な微細

加工技術が必要である。単一縦モード発振が必須条件となる光通信用半導体レーザなどにDFBレーザやDBRレーザが用いられている。

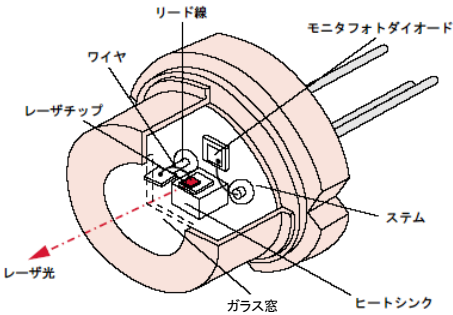
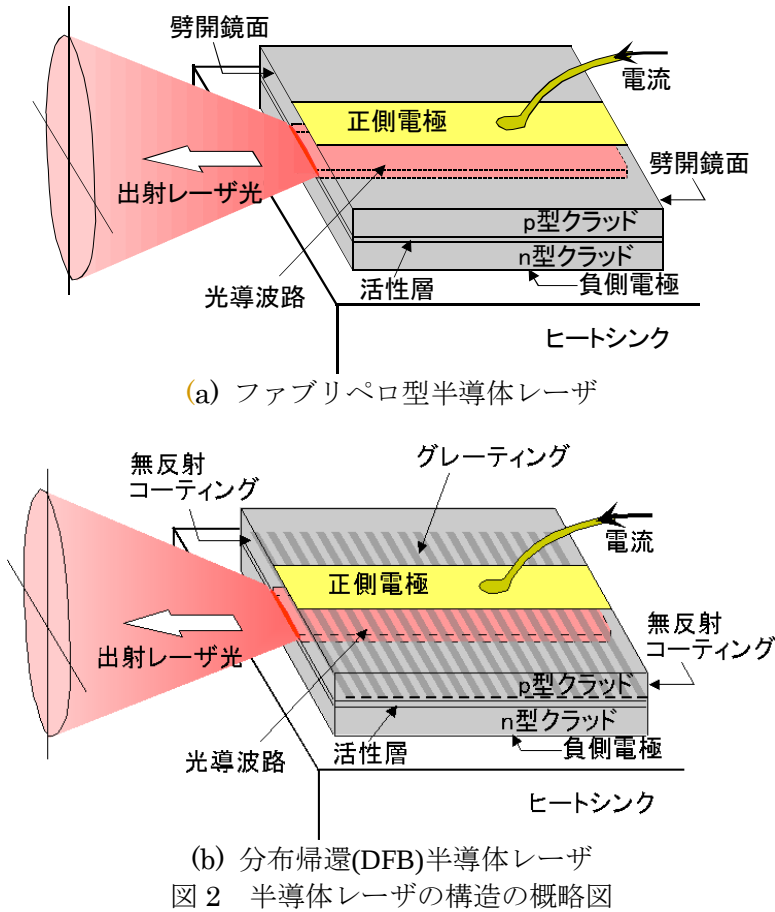


図1 半導体レーザ CAN パッケージ



(a) ファブリペロ型半導体レーザ
(b) 分布帰還(DFB)半導体レーザ
図2 半導体レーザの構造の概略図

4. 半導体レーザの動作原理

4.1 光増幅

順方向バイアスを加えたときのダブルヘテロ構造のエネルギーバンド図を図3に示す。活性層（バンドギャップエネルギー： E_g ）をp型とn型のクラッドで挟んである。p型クラッドと活性層の界面では伝導帯において電子に対するエネルギー障壁が、n型クラッドと活性層の界面では価電子帯において正孔に対するエネルギー障壁が存在する。正電極からp型クラッド層を介して正孔が、負電極からn型クラッド層を介して電子が、それぞれ活性層に注入される。注入された正孔・電子はエネルギー障壁により活性層内に閉じ込められるので活性

層内で大きなキャリア密度を得ることができる。

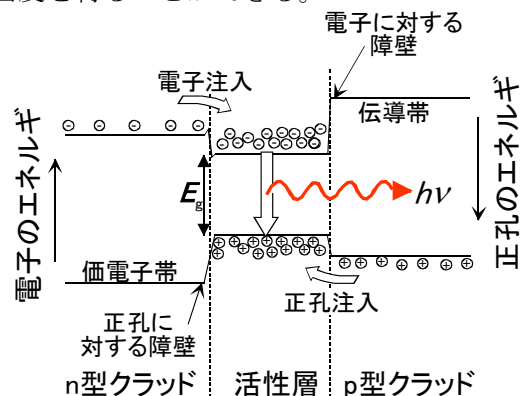


図3 順バイアス時ダブルヘテロ構造のエネルギーバンド

価電子帯にある下準位が電子に占有され、伝導帯にある上準位が占有されていないときに、両準位間のエネルギー差 E に等しいエネルギーを有する光子が活性層に入射すれば、その光子を吸収して価電子帯から伝導帯への電子遷移が生じる。一方、上準位が占有され、下準位が占有されていないときにエネルギー E の光子が入射すれば、伝導帯から価電子帯への電子の遷移が生じ、エネルギー E の光子が新たに放出される。この光子の放出を誘導放出 (Stimulated emission) とよぶ。準位間エネルギー差 E と吸収あるいは放出される光の周波数 ν および波長 λ には次の関係がある。

$$E_g \approx E = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は真空中の光速である。半導体レーザへの注入電流が十分に大きければ、エネルギーが低い価電子帯内の準位を電子が占有する確率よりもエネルギーが高い伝導帯内の準位を電子が占有する確率の方が大きくなり、反転分布状態が得られる。反転分布状態が実現されると、誘導放出による光子の放出分が吸収分を上回って正味の光エネルギーの増幅、すなわち、輻射の誘導放出による光増幅 (LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) が得られる。

光波が完全に活性領域内に閉じ込められて伝搬すると仮定したときの利得係数を g とする。 g は活性領域内のキャリアの密度の増加に対して単調に増加する。実際には、光導波路を伝搬する光波の電磁界分布 (導波モード) の一部はクラッド部にしみ出しているので実効的な利得係数は低減する。導波モードの活性層内への閉じ込め係数を Γ とおくと、実効的な利得係数は Γg となる。

4.2 レーザ発振の条件

レーザ発振は、レーザ共振器において一定の光エネルギーが維持されるとき、すなわち、共振器内を一往復した光波が元の光波と同じ振幅、同じ位相で重なるときに得られる。FP 型半導体レーザにおける、レーザ発振の条件を考察する。

共振器内を一往復した光が元の光と同位相で重なるための条件は、共振器長を L 、光の波長を λ 、光が感じる導波路の実効屈折率を N とすれば、任意の自然数 m を用いて式(2)で表される。

$$2L = m\lambda/N \quad (2)$$

式(2)が成り立つとき、共振器内に大きな光パワーを蓄積できる。これを共振と呼ぶ。共振状態では、光波は共振器内に定在波として存在している。

光散乱などによる導波路伝搬損失の係数を α 、共振器鏡のパワー反射率を R とすると、共振器内を一往復した光が元の光と同じ振幅となるための条件は、

$$R^2 \exp\{2(\Gamma g - \alpha)L\} = 1 \quad (3)$$

すなわち

$$\Gamma g = \alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (4)$$

で与えられる。この式は、レーザ発振時には導波路伝搬損失と共振器鏡での光損失を実効利得が丁度補っていることを示している。

式(2)および式(3)がともに成り立つとき、レーザ発振が得られる。FP 型レーザにおける、レーザ発振時の光波の伝搬の様子と光強度分布を図 4 に示す。

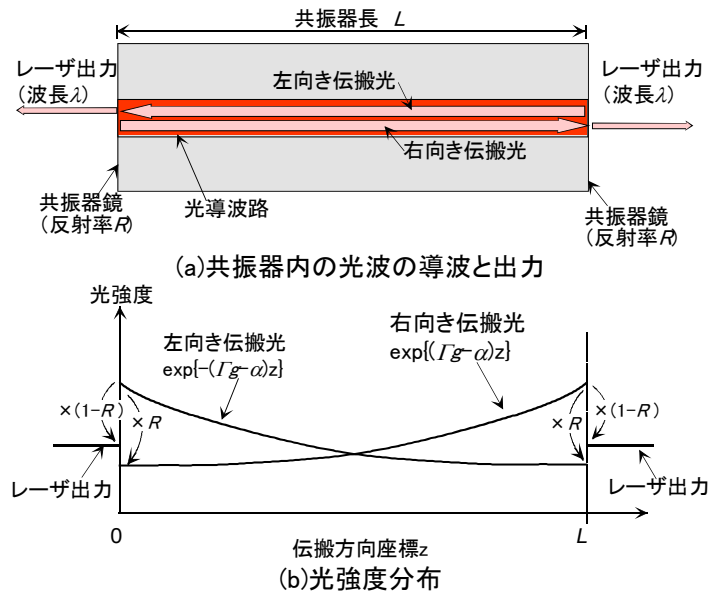


図 4 FP 型半導体レーザにおけるレーザ発振時の光波の様子

5. 半導体レーザの基本特性

5.1 モードとコヒーレンス（可干渉性）

レーザ光の形態は縦モードと横モードによって表される。縦モードは、共振器内の光の伝搬軸方向の光強度分布（定在波の強度分布）を表す。横モードは、伝搬軸方向に垂直な面内での光強度分布を表す。

【縦モードと時間的コヒーレンス】

共振器内の定在波は、式(2)を満たす波長の光波が共振器内を往復伝搬することで形成される。式(2)中の自然数 m の値が任意であるということは、ひとつの共振器において波長の異なる複数の光波が共振し得ることを意味する。各波長成分がそれぞれひとつの縦モードに対応する。隣り合う縦モードの間隔を周波数で表すと

$$\Delta \nu = c / 2N_g L \quad (5)$$

となる。 N_g は導波路の実効群屈折率であり、次式で定義される。

$$N_g = N + \omega \left[\frac{dN}{d\omega} \right] \quad (6)$$

ただし、 $\omega = 2\pi\nu$ である。レーザ発振には、いずれか一つの縦モードにおいて得られる単一縦モード発振の他、複数の縦モードにおいて同時に得られたりモード間での変動を伴って得られたりする縦多モード発振がある。

光波の単一周波数性（単一波長性）を時間的コヒーレンスという。単一縦モード発振しているレーザ光のスペクトル線幅は大変狭い。ファブリペロ型半導体レーザでは通常

100MHz 以下、DFB レーザではわずか 1MHz（発振中心周波数の 200 万分の 1）程度である。これらのような時間的コヒーレンスの高い光波を分岐し、分岐後の光波間に相対的な時間差を与えて再び合波すると有効な干渉が生じる。

【横モードと空間的コヒーレンス】

光導波路における光波の伝搬軸方向を z 方向とし、無損失で z 方向に一様な光導波路（屈折率分布 $n(x,y)$ ）を考える。光導波路に閉じ込められて伝搬する導波光の電界複素振幅の分布（導波モード分布）は、 $\mathbf{E}(x,y)$ の形で表される。ただし、その分布は単一であるとは限らず、一般には複数個存在する。各々の $\mathbf{E}(x,y)$ が半導体レーザ光のそれぞれひとつの横モードに対応する。通常の半導体レーザは、単一横モード発振が得られるように $n(x,y)$ を設計し、作製されている。

単一横モード発振している半導体レーザからの出射光は、空間内の任意の 2 点間での位相差が常に一定である。すなわち、空間的に離れた 2 点から取り出した 2 光波を合波すると有効な干渉が生じる。この性質を空間コヒーレンスと呼ぶ。空間的コヒーレンスの高い光は、レンズなどの波面変換素子を用いて、波長オーダーの大きさのスポットに集光したり、平行ビームに変換（コリメート）したりできる。

5.2 近視野像と遠視野像

半導体レーザの出射端直近において観察した出射レーザ光の光強度分布を近視野像(Near Field Pattern : NFP)とよぶ。NFPは横モードの分布 $|\mathbf{E}(x,y)|^2$ に比例する。半導体レーザからの出射光は回折により伝搬とともに広がる。出射端から十分に離れた位置で観察したレーザ光の光強度分布を遠視野像(Far Field Pattern)とよぶ。一般に、近視野像のサイズが小さいほど、回折が顕著に生じて大きな広がり角をもって広がる。

5.3. 電流—光出力特性

半導体レーザの出力光パワー P の注入電流 I 依存性の例を図 5 に示す。 I が小さい場合には、活性領域において反転分布状態が形成されておらず、光のレーザ増幅が生じない。（自然放出に基づくインコヒーレント光が極く小さいパワーで得られる。） I が、ある電流値 I_{th} よりも大きくなるとレーザ発振が生じて、大きな出力光パワーが得られる。レーザ定常発振時には式(3)の条件が維持されるので、利得 g の値は固定される。 g はキャリア密度の関数であるから、レーザ発振時にはキャリア密度も変化しない。従って、閾値電流を超えた分の電流($I-I_{th}$)により注入されたキャリアは、そのほとんどが誘導放出によって消費される。注入キャリアが誘導放出に寄与する割合を η_{stm} で表し（ $\eta_{stm} \leq 1$ ）、誘導放出光の外部への取り出し効率を η_{out} とすれば、光出力パワー P は式(5)のようにかける。

$$P = \eta_{out} \eta_{stm} \frac{I - I_{th}}{e} h\nu \quad (I > I_{th}) \quad (7)$$

e は電気素量である。レーザ発振状態における誘導放出光パワーにくらべると自然放出による光のパワーは小さいので無視した。式(7)は、 $I > I_{th}$ の領域では P が直線的に増加することを示している。縦軸を単位時間当りの出力光子数で表した光パワー($P/h\nu$)、横軸を単位時間当りの注入キャリア数(I/e)に書き換えたときにも同様の特性が得られることは式(7)より明らかで、そのときの直線部分の傾きは外部微分量子効率と呼ばれる。

光出力が注入電流に線形に依存することを利用すれば、注入電流に信号を重畳して出力光パワー等を変調することができる。これを直接変調とよぶ。直接変調により、GHz オーダーの高速光パワー変調が簡便に実現できる。

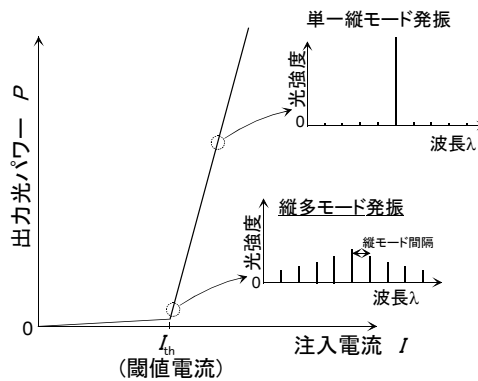


図 5 FP 半導体レーザの電流－光出力特性と出力光波長スペクトル

5.4.出力光波長スペクトル

ごく簡単なモデルでは、レーザ発振は利得スペクトルピークに最も近く、かつ、式(2)を満たす波長（縦モード）においてのみ得られる。実際には、自然放出光の存在などのため、レーザ発振光スペクトルは複雑な振る舞いを示す。

ファブリペロ型半導体レーザからの出力光波長スペクトルの模式図を図 5 に挿入図として示した。 $I \sim I_{th}$ では、縦多モード発振となる。自然放出光を種とした光の増幅が生じることにより、式(2)が厳密に満たされていなくてもレーザ発振が生じるためである。 $I \gg I_{th}$ では、利得ピークに最も近い中心縦モードのみの光強度が大きくなり、ほぼ単一縦モードでの発振が得られる。ただし、定常発振状態では単一縦モード発振が得られるレーザであっても、高速・大振幅の直接変調駆動時には多モード発振となりやすい。

鋭い波長選択性を持つグレーティング素子を共振器ミラーとして用いる DFB 型半導体レーザや DBR 型半導体レーザは FP 型に比べて単一波長特性が大きく向上する。変調時にも単一縦モード発振が得られる。

6. レーザ光の光ファイバへの結合

光ファイバは現在の光通信ネットワークの根本を支える低損失光伝送路であり、図 6 に示すように、中心部の高屈折率領域（コア）とそれを覆う円筒状の低屈折率領域（クラッド）からなる。例えば、クラッドには SiO_2 が、コアには屈折率を増加させるためにGeをドーピングした SiO_2 が用いられる。光ファイバ中を光はコア付近に閉じ込められて伝搬する。その導波モードサイズは約 $10\mu\text{m}$ である。伝搬損失は波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で最も小さくなり、わずか 0.2dB/km である。

光ファイバへの光入力、空間を伝搬する光をレンズで光ファイバ端面上に集光して行うことができる。効率良く入力するには、入射光の電磁界分布と光ファイバ内の導波モード分布が良く一致することが必要である。そのためには、入射光の集光スポット位置とファイバ端面との位置合わせ、光軸合わせ、スポットサイズと導波モードサイズの合致が必要である。

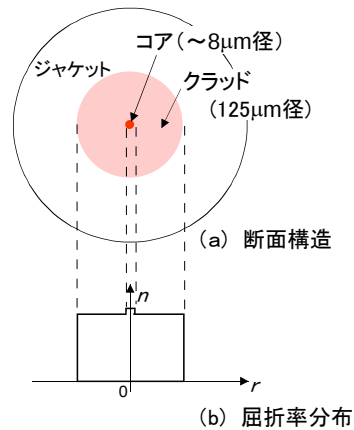


図 6 単一モード光ファイバ

7. 光波の回折とグレーティングによる分光

図 7 のように、 Z 軸に平行な方向に伝搬する平面波(波長 λ)で、 XY 平面に設置したスリット(スリット幅 d)を照明した場合を考える。スリットを透過することにより、光波には、 Z 軸に平行に直進する成分だけでなく、軸からずれた方向に伝搬する成分が生じる。そして、それゆえ、伝搬に伴いその波面や光強度分布が変化する。このような光波の現象を回折と呼ぶ。回折現象は、光波面上に微小な 2 次波源が存在しており、それらが発する微小な波動が新たな波面を形成するとともに互いに干渉して強度分布を変化させる、と、考えることで説明される。回折理論によれば、 $Z=L$ で表される面での相対光強度分布は次式で表される。

$$I(X) = d^2 \left(\text{sinc} \frac{\pi d X}{\lambda L} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、 $\text{sinc}(x)$ は $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ で定義される関数でシンク関数と呼ばれる。

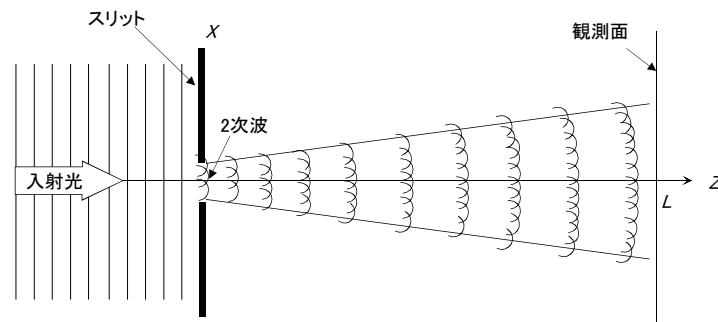


図 7 スリットによる光波の回折の様子

凹凸構造やスリットなどを微細な周期 A で繰り返して形成することで、屈折率や透過率の周期的な変化が与えられている光学素子を回折格子(グレーティング)と呼ぶ。例として、周期 A でスリットが形成されている透過型グレーティングに平面波が入射した場合の様子を図 8 に示す。透過光(0 次の回折波)に加えて、 ± 1 次の回折光が生じている(図 8 (a))。回折光が生じる様子を図 8 (b)で説明する。波長 λ の光の入射に対し、各スリットは 2 次的な光源として円筒波を発すると考える。2 次円筒波の、等位相面の包絡面として透過光波面が得られる。隣接 2 次円筒波との位相が $\pm 2m\pi$ (m は自然数)ずれた波面の包絡面として $\pm m$ 次光が得られる。それら以外の方向へ進行する光波については、2 次円筒波が弱めあう干渉を起こすので、ほとんど生じない。

透過光と回折光の伝搬方向の成す角度（回折角）は入射光波長 λ に依存する。従って、回折角を測定することで、入射光の波長を知ることができる。この原理を用いたグレーティング型の分光器が実用化されている。本実験で用いる光スペクトルアナライザはグレーティング型分光器を内蔵しており、入射光の波長スペクトル分布を測定する装置である。

DFB レーザや DBR レーザにはグレーティングが共振器鏡として用いられている。この場合、特定の波長の入射光のみに対して強い反射が生じる。従って、DFB レーザや DBR レーザでは特定の縦モードのみが選択されて単一縦モード発振する。

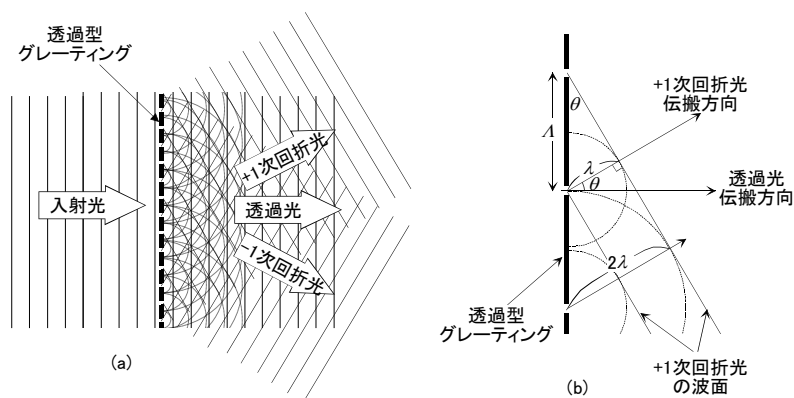


図8 透過型グレーティングによる光波の回折

8. 実験手順

1) AlGaInP 半導体レーザの構造の観察

5.6mmφの CAN パッケージ内にはファブリペロ型半導体レーザチップのほか、光パワーモニター用フォトダイオード、ヒートシンクがありワイヤー配線されている。それらをよく観察し、識別する。

2) 半導体レーザ出射光の遠視野像観察と平行化

半導体レーザ駆動電源が CURRENT モードになっており、電流調整つまみ(LEVEL)が反時計方向一杯になっているのを確認する。電圧モニター端子にはテストを、半導体レーザ接続端子には半導体レーザユニットを接続する（図9参照）。

駆動電源の電源スイッチ投入。LEVEL つまみを時計方向に徐々に回し、電流注入を開始する。注入電流がレーザ発振閾値を超えるとレーザ発振が生じ、出力光強度が急に強くなる。駆動電源の液晶ディスプレイに表示される電源出力電流を 40mA とする。

半導体レーザ発光点より 5cm の距離に設置したスクリーン上でレーザ光遠視野像を観察する。方眼紙の目盛を読み取って、遠視野像の垂直方向・水平方向幅を測定する。

スクリーンを取り去り、発光点直前に倍率 20 倍の顕微鏡対物レンズを配置する。レンズ位置の調整により半導体レーザからの発散レーザ光を平行ビーム（コリメート光：無限遠で焦点を結ぶ光ビーム）にする。さらに、光軸が実験台表面と平行になるようにレンズ位置を調整する。

3) 回折実験

スクリーン直前に（受光面にふたをしたままの）CCD イメージセンサを設置する。受光面から 10cm 前方に幅 0.2mm のスリットを挿入する。さらに、光量低減のために回転式アッテネータ（減光器）を全閉の状態でスリット前に挿入する。CCD イメージセンサのふたを開き、電源を入れる。（高光パワーのレーザ光を入射すると CCD イメージセンサが破損する恐れがあるので注意。）モニターで回折光の強度分布を観察する。

ビデオ信号をオシロスコープ CH1 に入力、走査線 1 本分の光強度分布をオシロスコープ上で観察する（オシロスコープトリガーはモード：ビデオ、ソース：CH1、同期：Line 番号）。①中心付近で CCD イメージセンサが飽和しない程度の光量で観察した光強度分布と②暗転間隔がはっきり確認できる程度の光量（中心付近は飽和する）で観察した光強度分布を USB メモリに記録する。（CCD イメージセンサ上の $1000\mu\text{m}$ はオシロスコープ横軸の $11\mu\text{s}$ に対応している。）CCD イメージセンサのふたを閉じ、パワーメータに取り換える。スリット、アッテネータを取り去る。

4) 偏光特性の測定

光パワーメータを用いてレーザ光パワーを測定する。

平行光ビームの光路内に検光子を挿入、検光子を目盛 -90 度から $+90$ 度まで回転させ、回転角度 10 度毎にパワーメータの読みを記録、検出光パワーの検光子角度依存性を測定する。

（※検光子は目盛 0 度の時に水平偏光の光の透過率が最大となるようにしてある。）

5) 電流－光出力特性の測定

電源出力電流を 0mA から 40mA まで 2mA ステップで増加させ、その時の端子間電圧と出力光パワーを測定・記録する。

6) 光ファイバへの光入力

平行光を倍率 10 倍の対物レンズで集光する。集光スポット位置に光ファイバコアがくるように微動ステージの $xyz\theta\phi$ 軸を微調整し、光ファイバ内に光を入力する。光ファイバ出力端直近に光パワーメータを設置し、光ファイバ出射端からの出射光パワーを測定する。光ファイバへの入力結合効率を見積もる。

（※十分な光学系調整を行えば、数十パーセント以上の入力結合が可能である。）

7) 光パワー直接変調実験

光パワーメータヘッドに換え、Si フォトダイオードを光ファイバ出力端直近に設置する。半導体レーザ駆動電流モニタ出力($1\text{V}/1\text{A}$)の端子をオシロスコープの CH1 に接続する。フォトダイオードの電源を ON して、光電流出力端子からの信号をオシロスコープ(CH2)にて測定、光の検出を確認する。（光検出回路は図 10 参照。）駆動電源の LEVEL つまみを調整して、電源出力電流を 20mA とする。

ファンクションジェネレータの出力をオシロスコープ(CH1)に接続する。Amplitude を最小に、ATT を 20dB と設定し、正弦波信号(1MHz 、 $\pm 100\text{mV}$)を出力する。所望の波形が出力されていることをオシロスコープ(CH1)で確認する（オシロスコープトリガーソースは EXT）。次に、ファンクションジェネレータからの信号を、半導体レーザアルミシヤシの高周波入力端子に変調信号として入力する（図 11 参照）。（半導体レーザの位置が動かないように！）半導体レーザへの注入電流の変化をオシロスコープ(CH1)で観測する。

半導体レーザへの注入電流の最大値が 40mA を超えないように（すなわち、注入電流モニタの出力電圧が 40mV を超えないように）、ファンクションジェネレータの出力電圧を徐々に増加させ、直接変調を行う。半導体レーザ出力光パワー波形をフォトダイオードで検出し、オシロスコープ(CH2)上で観察する。CH1 の波形と CH2 の波形を比較する。CH1 と CH2 の波形データを USB メモリに記録する。フォトダイオードの電源を OFF にする。ファンクションジェネレータの出力を最小にしてから、その電源を切る。

8) 波長スペクトルの測定

光ファイバ出射端を光スペクトルアナライザに接続する。半導体レーザを定常発光（電源出力電流 42mA ）させ、光スペクトルアナライザで発光スペクトルを観察する。なお、光スペクトルアナライザの測定波長域は 674nm から 680nm とし、波長分解能は 0.1nm とする。注入電流を 1mA 刻みで閾値電流以下まで減じて行き、各注入電流に対する発振ピーク波長を記録する。縦軸はリニアスケールとし、そのスケールは詳細に

スペクトルを観察することができるように適宜調整する。単一縦モード発振時スペクトルと多縦モード発振時スペクトルの形状を1つずつ選んで撮影し、FDに記録する。電源出力電流を0mAとし、電源のスイッチを切る。

9) DFB 半導体レーザの波長スペクトル測定

半導体レーザ電源に DFB 半導体レーザを接続し、ファイバピグテール DFB 半導体レーザの出力ファイバを光スペクトルアナライザに接続する。光スペクトルアナライザの測定波長域は 1520nm から 1570nm とし、波長分解能は 0.1nm とする。注入電流 40 mA で DFB-半導体レーザを発光させる。8) と同様に発振波長の注入電流依存性を記録する。多モード発振するかどうか、波長ジャンプが生じるかどうかを注意深く観察して調べよ。単一縦モード発振時のスペクトルを撮影して FD に記録せよ。測定後、電源出力電流を 0mA とし、電源のスイッチを切る。

(DFB 半導体レーザは赤外域で発光するので眼に見えない。覗き込まないこと！)

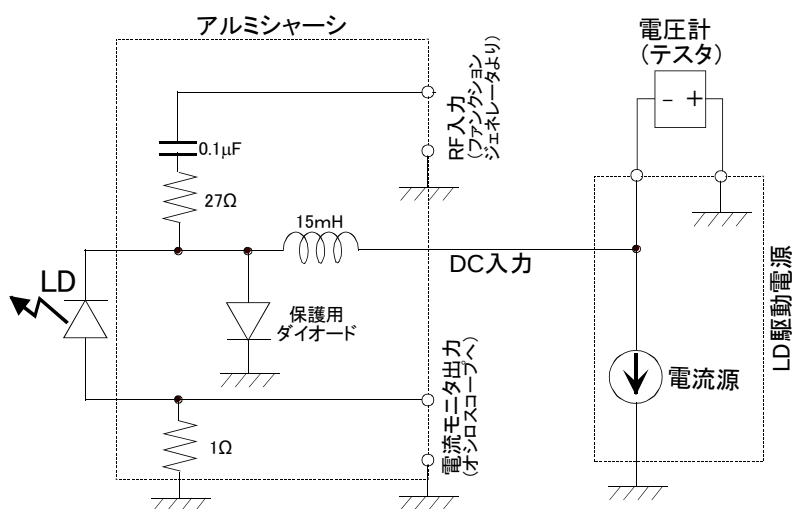


図 9 半導体レーザと駆動電源の結線

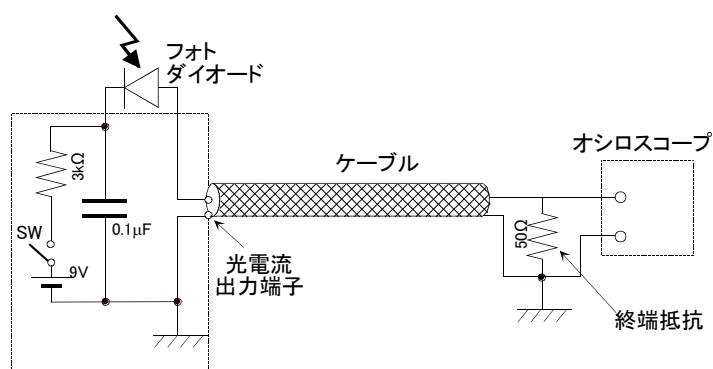


図 10 フォトダイオードを用いた光検出回路

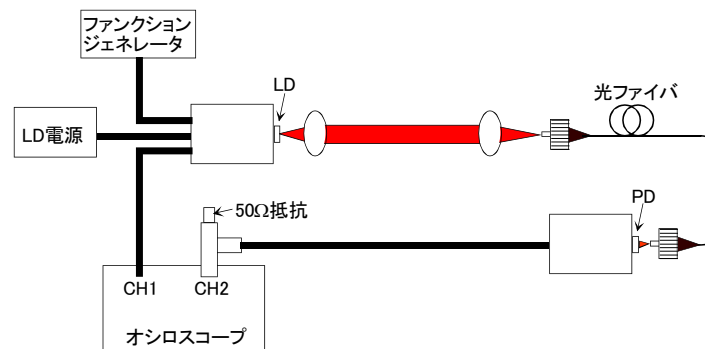


図 11 半導体レーザ光パワー直接変調実験系

9. 検討課題

- 課題 1 : 遠視野像の垂直方向幅と水平方向幅が異なる理由を考察せよ。
- 課題 2 : 式(8)は、 $X=m\lambda L/d$ ($m=\pm 1, \pm 2, \dots$)の位置で光強度が極小となることを示している。実験 3) の結果と比較してそれを確かめよ。また、そうなる理由を、2 次波の干渉を考慮することにより簡単に説明せよ。
- 課題 3 : 実験 4) の結果を表とグラフにまとめよ。半導体レーザ出射光の偏光方向を明らかにせよ。また、その理由を考察せよ。
- 課題 4 : 実験 5) の結果を表とグラフにまとめよ。閾値電流と外部微分量子効率を求めよ。ただし、平行化に用いた対物レンズの透過率は 90%であると仮定する。
- 課題 5 : 光ファイバへの入力結合効率が 100%にならない理由を考察せよ。
- 課題 6 : 半導体レーザ光の光パワー直接変調の原理を説明せよ。
- 課題 7 : 実験 8) で測定した多モード発振時スペクトルより縦モード間隔を読み取り、共振器長 (半導体レーザチップの長さ) を求めよ。ただし、導波路の実効群屈折率は $N_g=4.0$ であるとする。発振ピーク波長の注入電流依存性をグラフにまとめよ。また、注入電流増加により発振波長のシフト・ジャンプが現れる原因を、バンドギャップエネルギーの温度依存性および屈折率の温度依存性に関連付けて考察せよ。
- 課題 8 : 実験 9) で得られた DFB 型半導体レーザでの定常発振ピーク波長の注入電流依存性を図示せよ。その結果をファブリペロ型半導体レーザと比較せよ。

10. 参考図書

- 1) 「光波工学」 栖原敏明著 コロナ社
- 2) 「半導体レーザの基礎」 栖原敏明著 共立出版
- 3) 「光エレクトロニクスの基礎」 A.Yariv 著 多田邦雄、神谷武志訳 丸善
- 4) 「Fundamentals of PHOTONICS」 B.E.A.Saleh, M.C.Teich 著 Wiley & Sons, Inc.