

レーザー光

Ver. 2024 年 6 月 10 日

1. 半導体レーザー

我々が日頃使っている CD や DVD は、ディスクにデジタル化されて記録された音や映像をレーザー光を使って読み出す装置である。この読み出しのピックアップの部分に使われているのが小型の半導体レーザーである。CD に使われる半導体レーザーは波長が 780 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) 付近のものであり、可視の赤い光よりさらに長波長側にあるので色は見えにくい。DVD に用いられるレーザーは波長 650 nm 付近で赤色をしている。

半導体レーザーにはこのほかによく使われる波長として $1.3\text{ }\mu\text{m}$ (1300 nm), $1.55\text{ }\mu\text{m}$ (1550 nm) のあたりのものがあり、主として光通信に用いられている。光通信に用いる光ファイバーはガラスで出来ているが本来 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ のあたりにガラス特有の吸収があるので、用いられている半導体レーザーも $1.4\text{ }\mu\text{m}$ を避ける波長域で開発されてきた。

これらの半導体レーザーの他に 670 nm あたりの赤い色で発振するレーザー素子など作られるようになり、レーザーポインター等に使われている。現在では青色のような短波長で発振する半導体レーザーも実用になっている（例えばブルーレイディスク）。この学生実験では、赤色のものと近赤外のものの 2 種類を用いる。

2. 半導体レーザーの原理

レーザー(LASER)とは Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字をとったものである。レーザー発振の原理を図 1 (a)に示す。レーザー媒質には 2 つのエネルギー準位があるとする。このような 2 準位系は、準位間のエネルギー差に等しいエネルギーを持つ光子と、自然放出、吸収、誘導放出の 3 つの形で相互作用をする。この中で誘導放出(stimulated emission)は、媒質が高いエネルギー状態にあるところに光子が来ると、その光子と同じ状態（位相、周波数、進行方向が同じ）である光子を放出して低いエネルギー状態に落ちるプロセスである。レーザー媒質を常に低いエネルギー準位よりも高いエネルギー準位の方が占有数が多い反転分布の状態にすることで、媒質に入射する光子に対し、吸収よりも誘導放出の方が高い頻度で起こるようになり、光の増幅が起こる。レーザー媒質を 2 枚の高い反射率を持つミラーが構成する共振器の中に置くことで、光は何度もレーザー媒質を通過して誘導放出を繰り返し、巨視的な数の光子が同一状態にあるという状況が生まれる。こうして単色性、指向性の良いレーザー光が得られる。

半導体レーザーの原理を図 1 (b)に示す。半導体レーザーの場合、pn 接合のダイオードにおいて順方向に電流を流し、上のエネルギー準位である伝導帯にある電子が光子を放出して下のエネルギー準位に落ちて正孔を埋めるというプロセスを用いる。用いる材質によってエネルギーギャップの大きさが異なるので、様々な色の半導体レーザーが存在する。

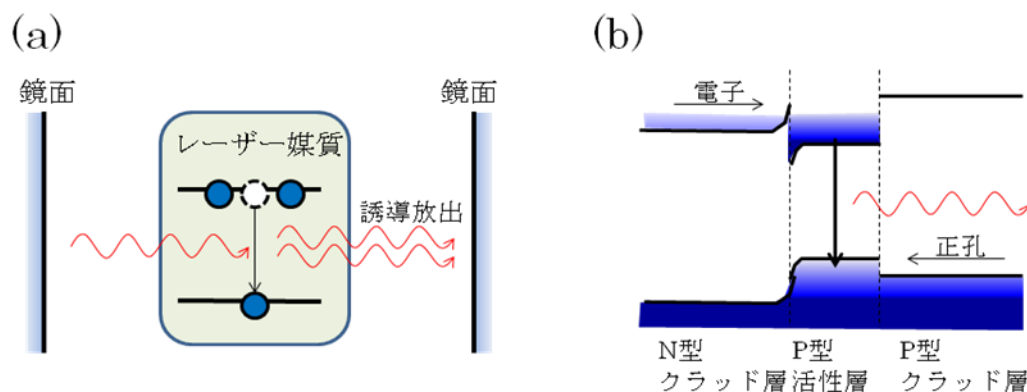


図 1 : (a)レーザー発振の原理。(b)半導体レーザーの原理。

3. レーザー光の安全性について

レーザー光の特性として、位相、波長が揃っていること、指向性が高いことが挙げられる。これらはレーザーが光源として非常に貴重となる特性であるが、同時に危険なものとなることを示している。

本実験において使用するレーザーは赤色の半導体レーザー（5 mW 以下、クラス 3R）と近赤外の半導体レーザー（25 mW 以下、クラス 3B）である。テキストの最後の資料（付録 1）を参考に使用の際には次の点に注意する。

- ・決してレーザー光を直接覗き込まないこと。
- ・他人の目に入らないように注意すること。
- ・ミラー、金属表面、ガラス表面などからの反射光にも注意すること。
- ・実験中は保護めがね（青色のものが備え付けてある）を着用すること。
- ・レーザー使用中は暗幕を用いること。
- ・レーザー光の向きを変える際には出力を低くして行うこと。
- ・レーザー光の光路は目の高さを避けること。

また、その他の注意として、

- ・ミラー等の光学素子に指紋などを付けてしまわないこと。

実験： 波長可変レーザーを用いた実験

物理学におけるレーザーの用途の一つに、例えば原子分子による光の吸収などのスペクトルを調べる分光研究がある。この用途のためにはレーザーの波長をコントロールする必要がある。本実験では波長可変の近赤外のレーザーと光共振器を用いて、波長掃引の原理や波長の変化の評価方法などを学ぶ。

(II)-1. 波長可変レーザーの原理

本実験では Littrow 式外部共振器型半導体レーザーを用いる。その原理を図 2 に示す。一般に半導体レーザーはそのレーザーチップの両端が光共振器を構成し、レーザーチップだけでレーザー発振をするが、その波長を制御するのは困難である。このため、レーザーチップから出た光を回折格子に当て、その 1 次回折光がレーザーチップに戻るようにする。このようにすることで、回折条件を満たす波長の光の誘導放出が優勢になり、その結果、その波長でレーザー発振することになる。

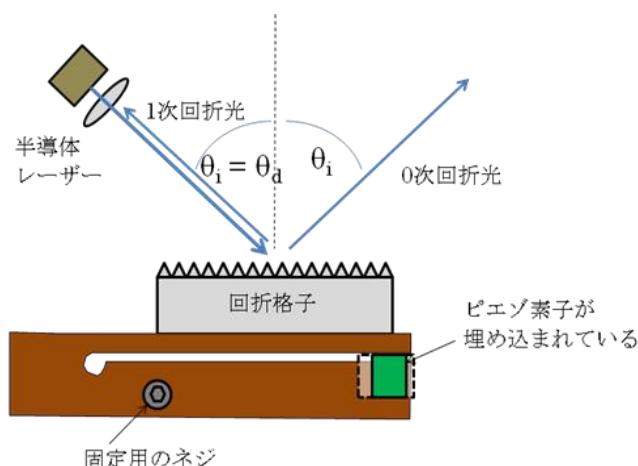


図 2：Littrow 式レーザーの原理図。

(問 1) 本実験では 780 nm の光を得たい。そのためには、レーザーチップから出る光と回折格子がなす角度 (図 2 の θ_i) は何度であるべきか。なお、回折格子の格子間隔は 1800 本/mm であり、回折が起こる条件は $m\lambda = a\{\sin \theta_i \pm \sin \theta_d\}$ である (m :回折の次数、 λ :波長、 a :回折格子の格子間隔)。

このレーザーは図 2 の圧電素子にかかる電圧を変えることで、回折格子の角度をわずかに変えることができ、それにより波長を変えることができる。安定した波長を得るためには、半導体レーザーの温度は一定に保たれる必要がある。このレーザーシステムでは温度によって抵抗が変わるサーミスタを用いて温度を計測し、下に敷いたペルチェ素子に流す電流を PID 制御によってコントロールして温度を安定化している。また、音などの振動からも隔離する必要があるため、防振用のゴムをかませている。

(問 2) 「圧電効果 (圧電効果)」「ペルチェ素子」について調べ、それぞれ簡潔に説明せよ。

(II)-2. 実験の手順

- 注意
- ・レーザーシステムの内部を触らないこと。
 - ・共振器のミラーは取れやすいので衝撃を与えないこと。

レーザーのつけ方

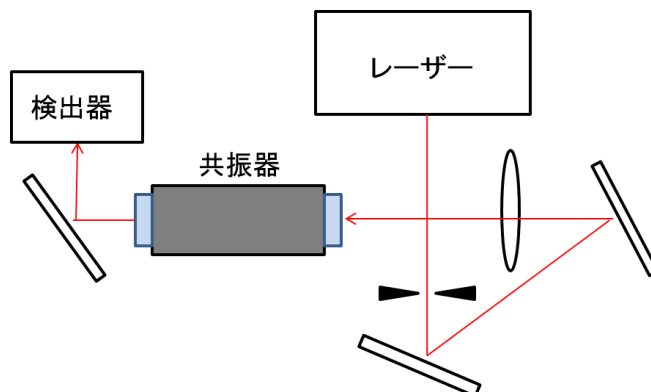


図3：実験装置の配置図

- [1] 図3のように実験装置が配置されていることを確認する。検出器以外の装置を移動させないこと。特に共振器の鏡に触れないこと。
- [2] 図4の温度・piezoコントローラのスイッチを、「メイン電源」「コントローラ電源」の順に入れる。緑のランプが点灯し、黄色のデジタル表示が点灯するはずである。
- [3] 設定つまみを回して、TACTとTSETの値を見る。これはサーミスタの抵抗値 ($k\Omega$) の現在の値と設定値を、それぞれ表している。両者の値が2.0以上違っていたら教員を呼ぶこと。
- [4] 温度コントロール (TE) のスイッチを on にする。左上の TE の黄色のランプが点灯するはずである。これにより温度制御が始まり、ペルチェ素子に電流が流れ、TACT の値は TSET の値に近づいていく。TACT の値と TSET の値が一致するまで待つ。
- [5] 次にレーザー電源 (LDC202C) の左下の主電源を入れ、右下のつまみが反時計回りに回し切っていることを確認する。DISPLAY のランプは「I_{LD}」が、MODE の CONST のランプは「I」が、MODE の LD POL のランプは「AG」が、それぞれ点灯していることを確認する。
- [6] レーザー電源の右上の LASER ON のボタンを押し、そのボタンを点灯させる。次に、右下のつまみをゆっくり回し、20~35 mA にする。絶対に 40 mA 以上には上げないこと！

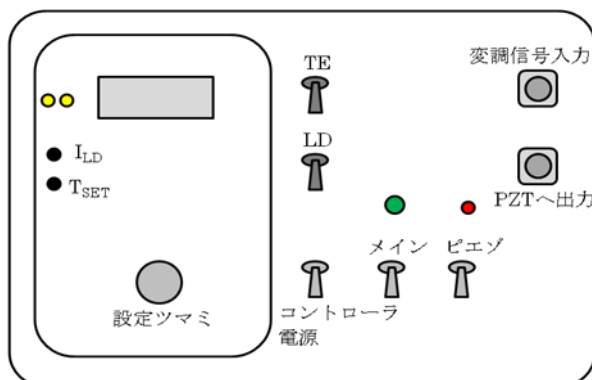


図4：温度・piezoコントローラの前面

レーザーの消し方： 7 ページを参照。

(II)-3. 近赤外光の観測

[1] レーザーシステムのアクリル板にあけた穴から出ているレーザー光を、ひもでくくつてある備え付けの IR(infrared)カードのオレンジ色の部分に当てて見る。(繰り返すが、絶対にレーザー光を直接覗きこまないこと！) このカードを用いて、図 3 と同じ経路で光が通っていることを確認する。

[2] 次に IR カードの代わりに白い紙に当ててみる。紙の上に微弱な赤い点が見えるはずである。

[3] 紙上の光点が携帯電話のカメラで見えるかどうか実験せよ。(カメラに直接レーザー光を入れないこと)

(II)-4. 光共振器

図 5 のように、反射率 r 、透過率 $1-r$ の 2 つの平行ミラーがあり、それらに垂直に光が入射するとする。ミラーの間隔を d 、光の波長を λ とする。このミラーの組から反射される光は、

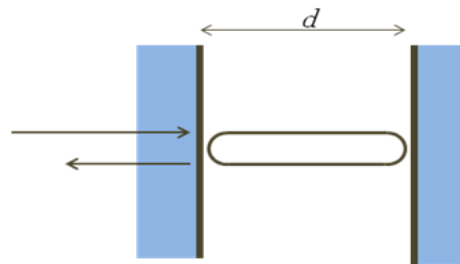


図 5：光共振器

反射光 = (1 枚目のミラーで反射した光)
+ (1 枚目のミラーを通過し、ミラー間を 1 往復して、1 枚目のミラーを通過した光)
+ (1 枚目のミラーを通過し、ミラー間を 2 往復して、1 枚目のミラーを通過した光)
+ ...

となる。入射する光の電場を $A_0 \exp(i\omega t)$ (ω は角周波数、 t は時間) と書き、屈折率が低い側から入射した光が反射すると光の位相が π 変わることに注意すると、反射光の電場 E_r は

$$E_r = A_0 \sqrt{r} \exp(i\omega t) + \sum_{n=1} A_0 (1-r) r^{n-\frac{1}{2}} \exp\{i[\omega t + (2n-1)\pi + 4n\pi d / \lambda]\} \quad (\text{式 1})$$

となる。(式 1) から、この光共振器の反射率 $R = |E_r|^2 / |A_0|^2$ は

$$R = \frac{4r \sin^2(2\pi d / \lambda)}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(2\pi d / \lambda)} \quad (\text{式 2})$$

となる。この式から、ミラー間隔 d が波長 λ の半整数倍の時に反射率 R は 0 になり、透過率

$1-R$ は 1 になることがわかる。この状況を共振器に光が共鳴していると言う。2つの隣接する共鳴の間隔を、光の周波数の差 $\Delta\nu$ で表すと、 $\Delta\nu=c/2d$ (c は光速)となる。この周波数間隔 $\Delta\nu$ を FSR(free spectral range)と呼ぶ。

(問 3) (式 1) から (式 2) を導出せよ。

実験で扱う光共振器は上の説明と少し異なり、曲率半径 150 mm の凹面鏡 2 枚が $d = 150$ mm の間隔を隔てて向かい合っているものである。このような曲率半径と共振器長が等しい共振器は共焦点 (confocal) 共振器と呼ばれる。共焦点共振器では光が 2 往復すると元の位置に戻ってくるので、共焦点共振器の FSR は $\Delta\nu=c/4d$ になる。

(II)-5. 共振器からの透過の測定

[1] ファンクションジェネレータ (FG) の出力が T 字の同軸コネクタにより 2 つに分けられていることを確認する。その一方をオシロスコープに接続し、もう一方は外しておく。オシロスコープの表示を見ながら、FG から周波数 3.5 Hz で最大電圧が 2.5 V、最小電圧が 0.5 V の三角波が出るように設定する。TA または教員を呼び、設定を確認してもらおう。T 字コネクタで分けた先の外しておいた方を、図 4 の温度・ピエゾコントローラの「変調信号入力」に接続する。

[2] 温度・ピエゾコントローラの「ピエゾ駆動アンプ」のスイッチを入れる。これにより赤い LED が点灯する。これにより光の周波数が FG の出力に応じて変化する。

[3] IR カードを用いて、レーザー光の光路が図 3 のようになっていることを確認し、共振器の出口から出てくる光は FG からの三角波に同期して点滅していることを確認する。その出てきた光を光検出器の受光面に入れる。出てきた光が確認できない場合は、以下のように光路調整を行う。

- ・光共振器の入口側の凹面鏡の中央に光が当たるよう、IR カードを利用して光路の途中のミラーを調整する。

- ・5 mm×30 mm くらいの白い紙片を作り、光共振器の間に差し込み、紙片の上の微弱な赤い光点を見て (あるいは携帯電話のカメラで光点を見て)、共振器内の光が共振器の中心軸と一致するようにミラーを調整する。光共振器の凹面鏡に紙片が触れてしまわないように注意すること。

[4] 光検出器の出力をアナログオシロスコープのチャンネル 2 につなぎ、光検出器の電源を入れる。チャンネル 2 において図 6 のような信号が現れるのを確認する。これは各信号の所で共鳴的に透過率が上がっていることを表している。レーザー電流 I_{LD} を 20.0~35.0 mA

の範囲で変化させ、この共鳴信号が等間隔に4つ以上現れる状況にする。共鳴信号が等間隔に表れていることは、その範囲で連続的に周波数が変化していることを表している。逆に、等間隔に現れなくなった所は、レーザーの周波数が急に変わってしまった所（モードホップ）を表している。見やすいように FG の電圧、周波数を微調してもよいが、必ず 10 Hz 以下、0 V～+10 V の範囲に収めること。

[5] (II)-4 節の説明に基づいてこの共振器の FSR を計算しなさい。オシロスコープの表示を記録（スケッチあるいは撮影）し、計算で得られた FSR を利用して、この共振器の共鳴信号の半値全幅が何 MHz かを求めなさい。また、レーザーの周波数が連続的に何 GHz まで掃引できているか求めなさい。

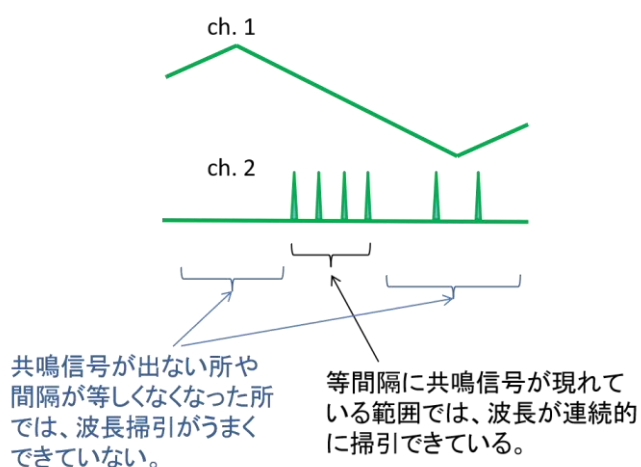


図 6：オシロスコープの画面の一例

実験終了時

- [1] レーザー電源の右下のツマミを反時計回りにゆっくり回し、電流を 0.1 mA 以下にする。
- [2] レーザー電源の LASER ON のボタンを押し、消灯させる。そして左下の主電源を切る。
- [3] 温度・ピエゾコントローラの「TE」のスイッチを切る。次に、「LD コントローラ」「ピエゾ駆動アンプ」のスイッチを切り、最後にメイン電源のスイッチを切る。
- [4] 各装置の電源を切る。

付録 1 レーザーの安全基準の概要

レーザー光は高い指向性のためパワー密度が高く、小さい出力であっても目や皮膚に障害を与える恐れがある。レーザー製品の使用者に障害が発生するのを防ぐ目的で、日本工業規格「レーザー製品の放射安全基準」JIS C 6802 が規定されている。レーザー製品

の危険度がクラス分けされており、クラスごとに必要な安全対策が規定されている。

表 1：レーザーのクラス分けの概要。

クラス	危険評価の概要
クラス1	設計上本質的に安全である。
クラス1M	低出力(302.5~4,000nmの波長)。ビーム内観察状態も含め、一定条件の下では安全である。ビーム内で光学的手段を用いて観察すると、危険となる場合がある。
クラス2	可視光で低出力(400~700nmの波長)。直接ビーム内観察状態も含め、通常目の嫌悪反応によって目の保護がなされる。
クラス2M	可視光で低出力(400~700nmの波長)。通常目の嫌悪反応によって目の保護がなされる。ビーム内で光学的手段を用いて観察すると、危険となる場合がある。
クラス3R	可視光ではクラス2の5倍以下(400~700nmの波長)、可視光以外ではクラス1の5倍以下(302.5nm以上の波長)の出力。直接ビーム内観察状態では、危険となる場合がある。
クラス3B	0.5W以下の出力。直接ビーム内観察をすると危険である。ただし拡散反射による焦点を結ばないパルスレーザー放射の観察は危険ではなく、ある条件下では安全に観察できる。
クラス4	高出力。危険な拡散反射を生じる可能性がある。これらは皮膚障害をもたらし、また、火災を発生させる危険がある。

付録2 ファンクションジェネレータ（波形発生器）の使い方

本実験では三角波の発振器としてファンクションジェネレータを使用する。フロントパネルの写真と簡単な使用方法を以下に示す。

- ・ FUNCTION が三角波のマークのボタンが押されていることを確認する。
- ・ FREQUENCY でおおまかなレンジを選び、細かい周波数の設定にはつまみを回す。
- ・ 信号の大きさ（振幅）と直流成分電圧（オフセット）はつまみで調節する。



図 7： ファンクションジェネレータの写真