

平成14年5月5日

物理学実験 レポート

半導体レーザー

実験日 10月2日,3日,9日,10日,16日

1 実験の目的

半導体レーザーは日常のいたるところで使われるようになった。また、基礎研究の分野、特に原子物理学の分野において必須の装置となりつつある。今回の実験では、半導体レーザーの基本特性を学ぶことと同時に、同レーザーから発せられる光を用いて、Rb原子の吸収を観測し、原子分光を学ぶことを目的とする。

2 実験の概要

本実験では、光電流を変換するコンバータを実際に作り、その働きを理解する。また、半導体レーザーの特性を、電流 - 出力特性、偏光の特性、直線偏光から円偏光の変換を通じて学ぶ。半導体レーザーを利用した測定として、回折格子、CD-Rの間隔を計る。原子物理学への応用として、Rb原子の吸収分光について学ぶ。

3 道具立て

測定器具：オシロスコープ、デジタルマルチメーター、波長測定器

工具類：ハンダごて、ハンダ吸い取り器、ニッパー

消耗品：プリント基板、電子回路部品

その他：半導体レーザー 回折格子、CD-ROM、Rb原子

実験装置の概要 使用する半導体レーザーは日立製 HL7851G である。表にその特性を列挙する。

項目	典型値
発振波長	785nm
最大光出力	50mV
動作電流	140mA
しきい値電流	45mA
動作温度範囲	-10 ~ 60

先に述べたように、半導体レーザーから放出される光は我々がレーザー光という言葉から想像する細く絞られた光とはかけ離れており、広く拡

がっている。そこで使用の際にはコリメータ・レンズ付の専用ホルダに取り付けた。ホルダは更に真鍮のブロックに固定され、ペルティエ素子に接着されている。ペルティエ素子は、異なる導体間または異なる半導体間に電流を流した際に熱の発生、吸収が生じるペルティエ効果を利用した冷却装置である。ペルティエ素子の高温側を放熱フィン等に接着して、常温近くに保つことによって低温側を冷やすことができる。

半導体レーザーの温度は真鍮ブロックに接着された温度測定用 IC LM335 でモニタした。これらの装置を温度コントローラ LFI-335 で制御し、半導体レーザーの温度を一定に保つ。レーザーに電流を供給するのはレーザードライバ LFI - 4505 である。

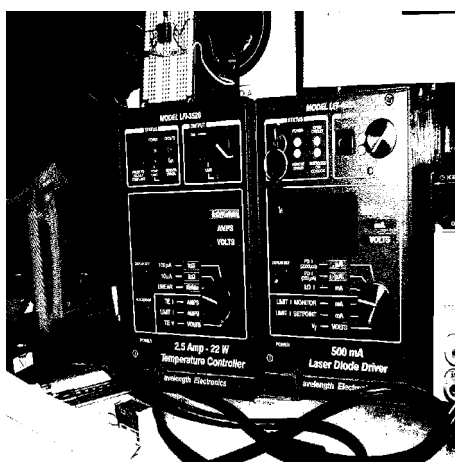


図 1: 向かって左、温度コントローラ、右、レーザードライバ

4 実験に関する注意事項

レーザー光の取り扱い レーザー光を目に入れると網膜細胞がやられてしまう可能性が高いため、覗き込まないように注意した。また、同じ部屋で実験をしている人の目にも入らないように、目の高さより十分低い位置で光を操作した。特にミラーを使った実験のときは気をつけた。

静電気 半導体レーザーも光ダイオードも静電気等で簡単に壊れてしまう。そこでそれらの装置やそこから出ているリード線に触れる際には、体を適当な場所で接地した。

5 半導体レーザーの原理

レーザー発信を起こすには反転分布を生じさせる必要がある。反転分布とはエネルギーの高い準位を占有する電子の数が、エネルギーの低い準位を占有する電子の数よりも大きくなることである。通常は、電子はボルツマン分布に従って必ずエネルギー準位の低い価電子帯に多数集まっており、エネルギー準位の高い伝導帯には少ししか存在しない。価電子帯の電子の数を n_1 、伝導帯の電子の数を n_2 で表すならば、通常の状態では $n_1 > n_2$ である。この状態では、外部から光を当てても光は吸収されて減衰してしまう。しかし、電流を流して電子を注入する方法などで外部からエネルギーを与えれば、 $n_2 > n_1$ 状態にすることができる。これを反転分布という。反転分布の状態では、誘導放出と吸収の発生する割合は誘導放出の方が勝る。誘導放出の際に電子は光のエネルギーを放出する。これを誘導放出光という。半導体レーザーは、反転分布媒質からのこうした誘導放出を利用したものである。半導体レーザーでは活性領域に電流を送る、つまり電子や正孔を注入することによって反転分布を実現している。電流量が小さいときには光は放出するが、反転分布に到達するまでに至らず、レーザー発振しない。

バンドギャップ間の遷移により放出された光は、結晶へき開面を反射免とした光共振器中で増幅され、放出される。

半導体レーザーの光特性は以下のように要約できる。

- 電流がしきい値電流を超えると光が放出され始め、それ以降は電流

の増加分に比例して光出力が増える。

- ビームは大きな広がりを持ち、その広がりには pn 接合面に垂直方向と垂直方向で異なっている。
- 放出光は直線偏光している。
- 光の波長は、レーザーの温度、および、注入電流によって可変である。

以下の実験でこれらの特性について調べる。

6 実験

6.1 IV コンバータの作成

レーザー光の検出には光ダイオード S3590 - 05(浜松ホトニクス製)を用いた。光ダイオードに光が入射すると、光の吸収により電子 - 正孔対が作成され、これが光電流となる。ただし、光電流に流れる電流には上限があり、1mA 近い電流が流れると光ダイオードの出力は飽和してしまう。すると、入射光の強度と光ダイオードの出力電流が比例しなくなるので、今回の実験では最大 100 μ A 程度の電流が生じる範囲で使用した。

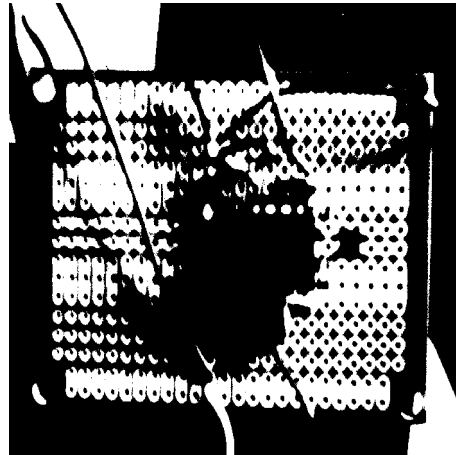
光ダイオードの出力電流そのままでは測定器内部のインピーダンス等によって測定結果が変わってしまう。そこで、電流電圧変換機 (IV コンバータ) を通して電圧に変換する。IV コンバータは演算アンプ (オペアンプ) を用いたもっとも簡単な回路の一つで下図に示される。オペアンプは単電源でかつ低電力、つまり電池で使える MC33171(モトローラ社)を使用した。

課題 1-2

上記の条件を満たすべく、実験では光ダイオードの最大出力電流を 100 μ A とし、10kHz より周波数の低い成分のみを取り出す IV コンバータを設計し、実際に作成した。また、IV コンバータに蛍光灯からの光により光電流を流し、コンデンサーを抵抗に平行につける前の電圧とつけた後の電圧を比較した。作った回路はデジタルマルチメーターを使って、結線チェックをした。

実験結果、考察、課題に対する解答

IV コンバータを下図の設計図を基に作った。右図はIV コンバータの写真である。



コンデンサーを抵抗に平行につける前の電圧 V_A 、つけた後の電圧 V_B の比 $\frac{V_B}{V_A}$ は $\frac{20mV}{500mV} = \frac{1}{25}$ となった。(試料 を巻末を参照)

コンデンサーを抵抗に平行につけることによって、この回路は積分回路となり、信号中の遅い成分のみを取り出すときにもちいられる。これは速い周波数成分がコンデンサーを通じて短絡してしまうからである。

積分回路のインピーダンスを実際に求めると

$$\begin{aligned} Z_F &= \frac{1}{1/R + \frac{1}{i\omega C}} \\ &= \frac{1}{1/R + i\omega C} \end{aligned} \tag{1}$$

分母を有利化すると

$$\text{与式} = \frac{R(1 - i\omega C)}{1 + R^2\omega^2 C^2} \quad (2)$$

また、入力電圧と出力電圧の比は

$$\begin{aligned} \frac{\text{出力電圧}}{\text{入力電圧}} &= \frac{R/i\omega C}{R} \\ &= \frac{1}{1 + i\omega C} \end{aligned} \quad (3)$$

分母を有利化すると

$$\frac{1 - i\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2} \quad (4)$$

実数成分のみを $R = 30k\Omega, \omega = 2\pi \times 100kHz, 330pF$ として計算すると

$$\begin{aligned} \text{与式} &= \frac{1}{1 + (30 \times 10^3 \times 2\pi \times 100 \times 10^3 \times 330 \times 10^{-12})^2} \\ &= \frac{1}{1 + 38.6} \\ &= \frac{1}{39.6} \end{aligned} \quad (5)$$

以上のように理論値では出力 - 入力電圧比は $\frac{1}{39.6}$ となり、実験値では試料より $\frac{1}{25}$ となった。良い精度で実験値と一致していると考えられる。理論値とのずれは、オシロスコープから読み取った電圧がぶれていたためだと思われる。

課題 1-1

1 mW の光が入射したときに光ダイオードに生じる電流量を概算せよ。

$$\begin{aligned} e &= 1.6 \times 10^{-19} [C] \\ h &= 6.62 \times 10^{-34} [Js] \\ \lambda &= 780 \times 10^{-9} [m] \end{aligned} \quad (6)$$

とする。1秒あたりの放出される光子のエネルギーは

$$\begin{aligned} E &= h \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{780 \times 10^{-9}} \\ &= 2.6 \times 10^{-19} [J] \end{aligned} \tag{7}$$

1mWの光中に含まれる光子の個数は(1秒あたり)

$$\frac{1 \times 10^{-3}}{2.6 \times 10^{-19}} = 3.8 \times 10^{15} [\text{個}] \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{1秒あたりの光子の数} [1/s] \times \text{電気素量} [c] &= \text{電流} [c/s] \\ 3.8 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} &= 6.1 \times 10^{-2} [A] \end{aligned} \tag{9}$$

よって1 mWの光が入射したときに光ダイオードに生じる電流量は $6.1 \times 10^{-2} [A]$ である。

6.2 電流 - 光出力特性

先に述べたように、半導体レーザーの光出力は電流がしきい値電流を超えると増え始め、それ以降は電流の増加分に比例して光出力が増える。

課題 2-1

レーザーに供給する電気量を増やしながらか光ダイオードで光出力を測定し、横軸に電気量、縦軸に光出力をとったグラフを描いた。また、得られたグラフからしきい値電流を推定した。ただし、測定する際には、全パワーを光ダイオードに入射すると光ダイオードが飽和してしまうので、光ダイオードの手前にフィルターを置いて光量を下げて測定した。

実験結果、考察、課題に対する解答

実験結果の資料 グラフを巻末に添付する。グラフから推定すると、しきい値電流は46mAであることがわかった。しきい値電流を超えると電流の増加分に比例して光出力が増えていることが確認できた。

6.3 偏光の測定

半導体レーザーから放出される光は pn 接合と平行に直線偏光している。この偏光度を測定するのにグラン - トンプソン - プリズムと呼ばれる変更プリズムを用いた。このプリズムは図に示されるように、二つの方解石が接着されただけの簡単な構造をもっている。接着面において光学軸に平行な偏光のみが透過しそれと直行する偏光は反射されたホルダ等で吸収される。

課題 2-2

このグラン - トンプソン - プリズムをレーザーと光ダイオードの間においてプリズムの光学軸を回転させながら透過光の強度を測定した。(光電流の出力は 100mA に固定。) 測定結果は横軸を光学軸の角度、縦軸を透過光強度としてグラフにまとめた。

実験結果、考察、課題に対する解答

実験結果の資料 グラフを巻末に添付する。グラフから、透過光強度 (I) と光学軸の角度 (θ) との関係の曲線は $I = A \cos 2\theta + B$ (A, B は任意定数) であることが読み取れる。このことから半導体レーザーが直線偏光していることが確かめられた。なぜならば、もし半導体レーザーから発せられる光が直線偏光でなく偏りのない光ならば、プリズムを通して、観測される透過光強度 (I) は角度 (θ) に依存せず、一定の値を示すはずだからである。

透過光の振幅は入射光の振幅の $\cos \theta$ 倍になっているので、振幅の 2 乗に比例する光の強度は $\cos^2 \theta$ 倍に減少する。このことから、

$$\begin{aligned} I &= A \cos^2 \theta \\ &= A \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \end{aligned} \tag{10}$$

であることがわかる。これは観測された曲線の式と一致する。

6.4 直接偏光から円偏光への変換

直線偏光を円偏光に変換するには異方性結晶を用いる。光が異方性結晶に入射した場合、ある結晶軸に平行な直線偏光とそれに直行する直線偏光では伝播の位相速度が異なる。そこで異方性結晶の厚さを適当に選んでやれば、片方の直線変更ともう片方の変更の位相を $\pi/2$ (波長の $1/4$) だけ遅らせることができる。このような素子を”四分の一波長板”と呼ぶ。

課題 2-3

レーザーとگران-トンプソン-プリズムの間に四分の一波長板を置き、その光学軸を回転させながら透過光の強度を測定した。測定結果は横軸を光学軸の角度、縦軸を透過光強度としてグラフにまとめた。ただし、گران-トンプソン-プリズムの角度は偏光の測定の実験で、透過率が最大になった $\theta = 280(^{\circ})$ にあわせた。また光電流の出力は 100mA に固定した。

実験結果、考察、課題に対する解答

実験結果の資料 グラフを巻末に添付する。グラフから、透過光強度 (I) と光学軸の角度 (θ) との関係の曲線は $I = A \cos 4\theta + B$ (A,B は任意定数) であることが読み取れる。これは観測された曲線の式と一致する。

四分の一波長板も偏光板なのである。だからگران-トンプソン-プリズムを通過した $\cos^2 \theta$ 倍に減少した透過光の強度 (I) は、四分の一波長板を

通ると $\cos^2(\frac{\pi}{2} - \theta) = \cos^2 \theta \sin^2 \theta$ 倍になる。よって光の強度 (I) は

$$\begin{aligned} I &= A \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ &= 4A \sin^2 2\theta \\ &= 4A \left(\frac{1 - \cos 4\theta}{2} \right) \end{aligned} \tag{11}$$

であることがわかる。

光の進行方向を z 軸としたときの勅撰変更の電気ベクトルは以下のように書ける。

$$\mathbf{E}_i = E_0 \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{2}} \hat{x} e^{i(kz - \omega t)} + \frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} \hat{y} e^{i(kz - \omega t)} \right] \tag{12}$$

ここで θ は直線偏光の軸と四分の一波長板の光学軸とのなす角である。仮に x が位相の進む軸とする (y 軸方向は位相が遅れる) と、四分の一波長板を通過した後の電気ベクトルは

$$\mathbf{E}_i = E_0 \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{2}} \hat{x} e^{i(kz - \omega t)} + \frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} \hat{y} e^{i(kz - \omega t + \pi/2)} \right] \tag{13}$$

と書け、 $\theta = 45^\circ$ のときは

$$\mathbf{E}_i = \frac{E_0}{2} \left[\hat{x} e^{i(kz - \omega t)} + \hat{y} e^{i(kz - \omega t + \pi/2)} \right] \tag{14}$$

となる。このとき、 x 軸方向の振幅と y 軸方向の振幅が等しいので、 x 軸方向と y 軸方向の位相差が $\pi/2$ の円偏光となっている。 $\theta = 45^\circ$ 以外のときは楕円偏光となる。

6.5 レーザーを用いて格子定数 d 、CR-ROM の間隔を求める。

レーザー光を回折格子に当てると、レーザー光の反射光は干渉を起こし、干渉じまができる。このことを利用して回折格子の間隔 (格子定数) (d) を求める。

まず初めに、干渉じまの強めあう条件を考えよう。入射角を θ_0 、反射角を θ とすると、隣り合うスリットの光の光路差は $d(\sin \theta_0 - d \sin \theta)$ である。これが波長 λ の整数倍であると、隣り合うスリットからの光は互いに強めあう。したがって

$$d(\sin \theta_0 - d \sin \theta) = n\lambda \quad (15)$$

を満たす方向は明るくなる。このことを使って、いま隣り合う 2 つの強め合う光の条件を考える。もう一方の光の入射角を θ_0 (共通)、反射角を θ' とするとそれぞれの強め合う条件は

$$\begin{aligned} d(\sin \theta_0 - \sin \theta) &= n\lambda \\ d(\sin \theta_0 - \sin \theta') &= (n-1)\lambda \end{aligned} \quad (16)$$

辺々引くと

$$d(\sin \theta' - \sin \theta) = \lambda \quad (17)$$

となり、これより格子定数 d が求められる。

$$d = \frac{\lambda}{(\sin \theta' - \sin \theta)} \quad (18)$$

この式を基に格子定数 d を求める。

回折格子にレーザーを当て、干渉じまをつくる。あらかじめ、敷いておいた方眼紙上に反射面と隣り合う干渉じまの明るい点を基にレーザー光の

飛跡を書き移した。明るい点それぞれの反射角を分度器で計り、計算により格子定数 (d) を求めた。

また、普段私たちが目にする CD-ROM も円盤に同心円状にいくつもの溝があり、レーザー光をあてると回折格子と同じく干渉じまができる。そこで格子定数を求める手順と同じ実験をして CD-ROM の溝の間隔 (d') を求めた。

実験結果、考察、課題に対する解答

回折格子の反射角 θ' , θ を分度器により求めると、

$$\begin{aligned}\theta' &= 53^\circ; \theta = -41.5^\circ \text{より} \\ d &= \frac{780 \times 10^{-9}}{(\sin 53 - \sin(-41.5))} \\ &= 5.33 \times 10^{-7} [m]\end{aligned}\tag{19}$$

この結果は使用した回折格子の格子定数とよく一致した。

同様に CD-ROM の間隔 d' を求めると、

$$\begin{aligned}\theta' &= 56^\circ; \theta = 20^\circ \text{より} \\ d &= \frac{780 \times 10^{-9}}{(\sin 56 - \sin 20)} \\ &= 1.60 \times 10^{-7} [m]\end{aligned}\tag{20}$$

この結果は CD-ROM の間隔 d' とよく一致した。

7 Rb 原子の吸収分光

次に Rb 原子を使ったレーザーを使った原子分光を始める。Rb はアルカリ原子であり、価電子を一つ持っている。その基底状態は $5S_{1/2}$ 状態であり軌道角運動量がゼロなので、電子の全スピン J 固有スピンからの寄与のみからなり、 $J = 1/2$ である。また同位体としては、主に ^{85}Rb (核スピン $I = 5/2$) と ^{87}Rb (核スピン $I = 3/2$) からなり、同位対比は 72 % 対 28 % となっている。原子の全スピン F は、電子のスピンと核スピンのベクトル和

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J} \quad (21)$$

このように電子スピンと核スピンの結合によってエネルギー準位が分裂して生じる構造を超微細構造と呼ぶ。

一方、第一励起状態は $5P$ 状態であるが、これは電子の軌道角運動量と固有スピンの結合によってエネルギー準位が分裂しており (微細構造)、より励起エネルギーの低い状態が $5P_{1/2}$ 状態、高い状態が $5P_{3/2}$ である。今回は $5P_{3/2}$ 状態への遷移である、D2 遷移 (波長 780nm) を調べることにする。

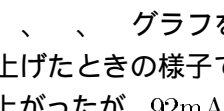
レーザー光が原子によって吸収されるのを観測するには、レーザー光の波長を変化させる必要がある。半導体レーザーが原子分光に用いられる上

で有利な点として、周波数を変えるのが容易であることが挙げられる。具体的には先に述べたように、レーザーの温度を変化させることによって温度を変えることができる。レーザー光の温度を変化させると、活性領域の屈折率や大きさが変わり、共振器で増幅される周波数が変化し発振周波数が変化する。その変化は約 150GHz/K である。通常、超微細準位の間隔は数 10MHz から数 GHz なので、それを温度変化で制御しようとするとは 0.01K 以下に調整しなければならない。これは通常不可能な精度なので、レーザーへの注入電流を変化させて、それによるジュール熱(半導体レーザーへ注入する電流のうちレーザー発振に用いられるのは約 1/3 でそれ以外は熱になる。)で温度を微小変化させる方法をとった。ただし、この場合周波数変調とともに強度変調もかかるので注意した。

課題 3-1

半導体レーザーと光ダイオードの間に Rb の封入されたセルを設置し、レーザーの発振周波数を温度と注入電流の両方を用いて変化させ、Rb による吸収を観測した。x 軸を注入電流、y 軸を光出力をとったグラフを描いた。ただし、十分な吸収を観測するには、Rb の密度(セルの温度によって制御する)を調整することも注意した。また、あらかじめ波長測定器を用い、温度と注入電流を変化させ、780 nm 付近の波長との関係を調べた。

実験結果、考察、課題に対する解答

実験結果の資料、 グラフを巻末に添付する。は温度 250K で注入電流を徐々に上げたときの様子である。注入電流を上げると、それに比例して光出力も上がったが、92mA で急激に光出力が下がった。の 285K における注入電流と波長の関係のグラフより、確かに 780nm 付近で Rb による吸収が起こったことがわかった。予想では光出力が滑らかに下がるはずであった。これは、のグラフが示すとおり、半導体レーザーの特性により、ちょうど 780nm 付近の値で波長がジャンプするためだと思われる。

次にこの半導体レーザーによる波長のジャンプを防ぐために、注入電流を徐々に下げながら同じ条件で観測したグラフを考察する。光出力は 60mA まで電流に比例して上がり、60mA をすぎると、緩やかに下がり始め光出力はほぼ一定となり、95mA あたりからまた上がっている。これにより、780nm 付近で Rb による吸収があったことが確かめられた。のグラフに比べなだらかな曲線が得られたが、70mA ~ 90mA までの範囲が一定になってしまっている。これは、Rb の封入されたセルの温度を高く設定したため、Rb の密度が高すぎたためだと思われる。一般に Rb の密度が高すぎると、広い周波数領域でレーザー光が完全に吸収されてしまう。

そのため、70mA ~ 90mA までの範囲ではレーザー光は完全に吸収され、光出力は0になる。(観測された光出力が0でないのはレーザー光以外の実験室内の自然光による光出力を観測したため)

また、オシロスコープで観測した吸収スペクトルは、Rb 蒸気の熱運動によるドップラー効果による広がりが観測された。

8 まとめ

全体的に実験は成功し、目的であった、半導体レーザーの基本特性、Rb 原子の吸収について学ぶことができた。最後の Rb 原子の吸収分光の実験では、うまく吸収分光が起こる様子を観測できなかった。しかし、レーザーの温度、Rb の密度を調整する。半導体レーザーの特性によるジャンプが 780nm 以外のところで起こる別の半導体レーザーを用いる、等の対処で、もっと良い観測ができたと思われる。