

卒業論文

オプトガルバニック効果を使った
高分解能分光装置の開発

平成13年2月

高知工科大学 知能機械システム工学科
木村・戸名グループ

日野聡一

(共同研究者：鈴木淳志)

目次

1章	序論	1
2章	オプトガルバニック効果の原理	4
2.1	オプトガルバニック効果の原理.....	4
2.2	ドップラー幅.....	6
3章	オプトガルバニック効果を使った高分解能測定の方法	9
3.1	機器の配置.....	9
3.2	測定機器の説明.....	9
4章	測定準備	14
4.1	ハード面.....	14
4.2	ソフト面.....	16
4.3	半導体レーザーの最適化.....	19
5章	測定結果	20
5.1	広範囲のオプトガルバニックスペクトル.....	20
5.2	Liの高分解能オプトガルバニックスペクトル.....	21
6章	考察	22
6.1	レーザー波長の校正.....	22
6.2	未知のスペクトルの決定.....	22
6.3	原子の温度の決定.....	23
7章	まとめ	24
	資料	25
	謝辞	31
	参考文献	32

1 章 序論

オプトガルバニック効果とは、原子又はイオンの遷移に相当する波長の光で放電媒質を照射した時に、原子の各準位の電子分布数変化が生じて、放電インピーダンスが変化し、結果として放電電流、放電電圧の変化として観測される現象である¹⁾。

Penning は 60 年以上も前に、ネオン放電管に別のネオン放電管を近づけた時に放電電圧が変化するという「新しい光電効果」を発明した。これがオプトガルバニック効果の発見であり、放電中の準安定ネオン原子が別の放電管からの光によって励起され、それが放電インピーダンスの変化につながるということが原因と考えられた。

オプトガルバニック効果の研究は Green らが 1976 年に波長可変のレーザを使い始めてから飛躍的に進展し、さまざまな応用が考えられてきた。チョッパーで変調した波長可変のレーザで放電空間を照射し、放電インピーダンスの変動を電圧の変動に変換してロックインアンプで検出するのである。

放電管としてはホローカソードランプが用いられることが多い。ホローカソードランプとは円筒状の陰極を持った放電管のことで、この中で負グローが発生し、陰極電流も変化する。その結果、冷陰極でありながらあたかも熱陰極のような電流密度が得られ、陰極面でもイオン衝撃によるスパッタリングで陰極材質の原子（イオン）スペクトルが高輝度で得られる。

今日ではオプトガルバニック検出技術は確立された分光手段として、吸収分光法、蛍光分光法、光音響分光法を補完する形で用いられている。特に放電でできるラジカルや原子、分子（イオン）の準安定状態からの励起遷移も観測できるという点、放電管自体が分光観測のサンプルであると同時に検出器となっていること、通常の蛍光実験や吸収分光の実験と違い、励起レーザ光によるバックグラウンドが入ってこないという数多くの長所を持つ。このように非常に簡単な装置で感度の高い実験ができるということがオプトガルバニック効果の大きな特徴となっている。

それと同時にオプトガルバニック分光法には短所もある。大きな短所としては、放電が安定していなければいけないということである。直流放電

ではノイズが約 10mV 以下であることが要求され、交流放電でもこれに対応する安定性が要求される。ノイズに規則性がある場合にはサンプリングを工夫することによってその影響を除くことも可能だが、分子ガスの放電では長時間にわたって安定に保つことが困難な場合が多い。この点が測定に際しては障害となることもあるが、このような短所は、数多くある長所によって十分補われている。

オプトガルバニック効果は、レーザで分光実験を行うようにあたってしばしば必要になる波長校正の手段として応用されている。レーザ光の一部をホローカソードランプに入れることによって得られるオプトガルバニックシグナルと未知のスペクトルとを同時に記録すればオプトガルバニックシグナルが波長のマーカーとなる。ホローカソードランプの電極に含まれている原子や封入されている気体のスペクトルのピーク時の波長は干渉計を使って高精度($\sim 0.001\text{cm}^{-1}$)で測定されていて遷移波長が数表の形で与えられている。

レーザではスペクトル幅として普通 $10^3\sim 10^6$ Hz のものが得られるのに対して、気体のスペクトルはそれよりもずっと広く十分に低圧にしても $10^8\sim 10^9$ Hz 程度もある。気体のスペクトルを決めるにはドップラー広がりの影響が大きい。よってドップラー広がりをいかに消すかということが高分解能分光を行うために必要なことになってくるのだが、ドップラー幅は原子の温度に依存しているため、ドップラー幅の半値幅を求めることによって、逆に原子の温度を決定することができる。

光の分光をするにあたって、普通、市販の機器を使っての測定が一般的だが、波長計の精度や校正度合いなどを考えると、精密な分光をするのは非常にやっかいである。高分解能分光装置を開発するにあたって、重要なことは、測定に線幅の狭いレーザを用いることと、高精度にレーザ波長の校正を決定することである。そこでオプトガルバニック効果を用い、簡便で高分解能の分光装置を開発することにした。

本実験では線幅の狭い半導体レーザを用いて、オプトガルバニック効果によって測定された共鳴波長と、既知の原子の共鳴波長からレーザ波長を校正し、さらにその校正によって定めたレーザ波長の基準を利用し、測定

によって得られたスペクトル線の形状 (line shape) から原子の温度を決定した。

2章 オプトガルバニック効果の原理

2.1) オプトガルバニック効果の原理

図1のように、放電中の原子、又はイオンの2つのエネルギー準位 E_k 、 E_i を考える。今、遷移 $E_k \rightarrow E_i$ を起こすような周波数を持ったレーザーが入射すると、光ポンピングにより各準位の電子分布数 n_k 、 n_i は変化させられる。この分布数の変化が放電気体のインピーダンスに寄与する。

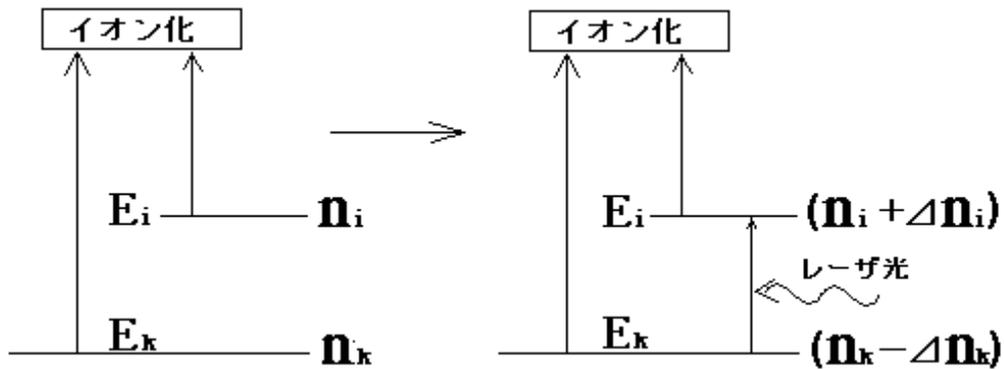
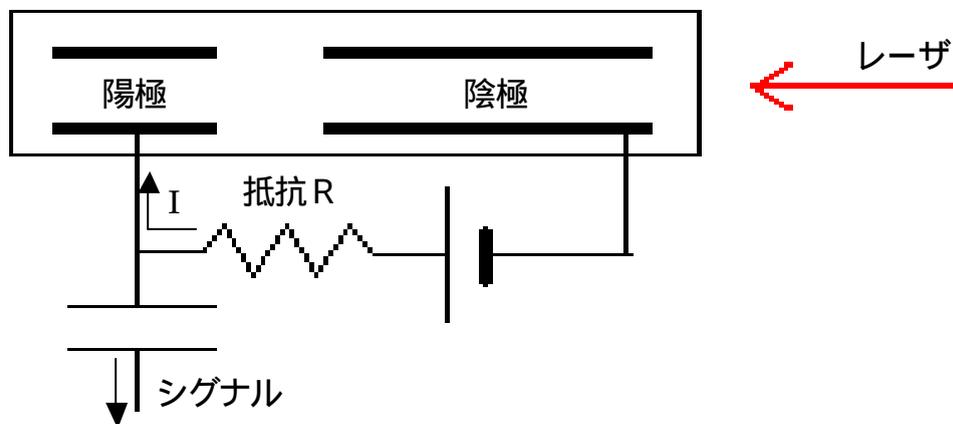


図1 2つのエネルギー準位間の遷移

さらに図2のようなホローカソードランプの回路図を考えると、本実験は電流一定の条件で測定しているので、インピーダンスの変化による電圧変化の式は

$$V = a(n_i P_i - n_k P_k) I \quad (a: \text{比例定数}) \quad (2.1)$$

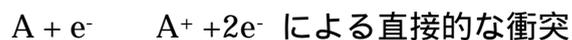
で表される。このときの P_m 、 n_m は、それぞれ準位 E_m からのイオン化確率、準位 E_m の電子分布数の変化を表す。



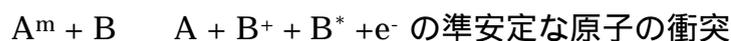
原子またはイオンがレーザによって電離確率の低い準位から電離確率の高い準位に励起されると放電管内のインピーダンスは減少して放電電圧は減少することになる。しかし、衝突によるイオン化確率の高い準安定状態から短寿命の共鳴準位にレーザで励起される場合には、高いレートで基底状態に励起してしまうため放電管内のインピーダンスは増加して放電電圧は減少することにもなる。レート方程式を立ててオプトガルバニックを角 しようとする試みもなされてきた。特に Lawler は放電の陽光柱でのオプトガルバニックについて定量的にも実験と一致する結果を得ている¹⁾。しかし、一般に放電現象は、ガス組成・圧力・放電電流・電極形状、電極材質など多くのパラメータが関与するために非常に複雑であり、オプトガルバニックシグナルの強度を定量的に予測できることはまれである。

放電空間内に自由電子を生成する機構が放電インピーダンス、すなわちオプトガルバニックシグナルを決定していることになるが、この自由電子の生成過程の1つを取ってみても次のような色々な過程が競合しているのである。

A) 電子衝撃電離：



B) ペニング電離：



C) 結合性電離：



これらの競合による n_i と n_k が原因となり、流れる電流が決定される²⁾。

2.2) ドップラー幅

レーザーではスペクトル幅として普通 $10^3 \sim 10^6 \text{ Hz}$ のものが得られるのに対して、気体のスペクトルはそれよりもずっと広く十分に低圧にしても $10^8 \sim 10^9 \text{ Hz}$ 程度もあるので、気体のスペクトルの幅を決める要素にはドップラー広がりの影響が高い。ドップラー広がり温度に依存しているので得られたスペクトルの半値幅から原子の温度が決定できるのである。

図3のように、放電中のホローカソードランプの中ではいくつかの原子が飛んでいる。速度分布は温度によって決まっている。

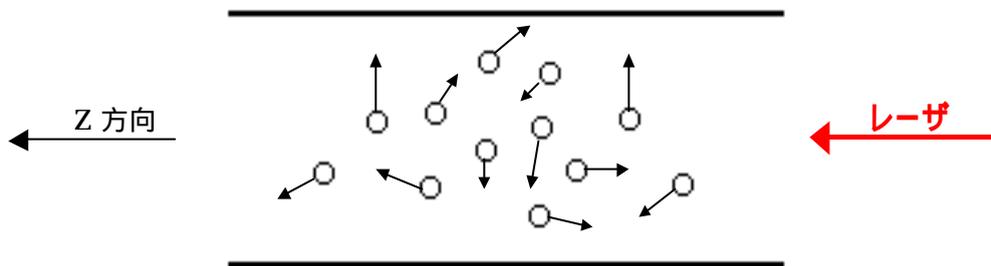


図3 放電中の原子の動き

そこに共鳴する波長のレーザーを照射し、オプトガルバニックスペクトルを測定すると、速度がちまちまなので、ドップラー効果により、測定されたスペクトルは図4のような広がりを持つことになる。

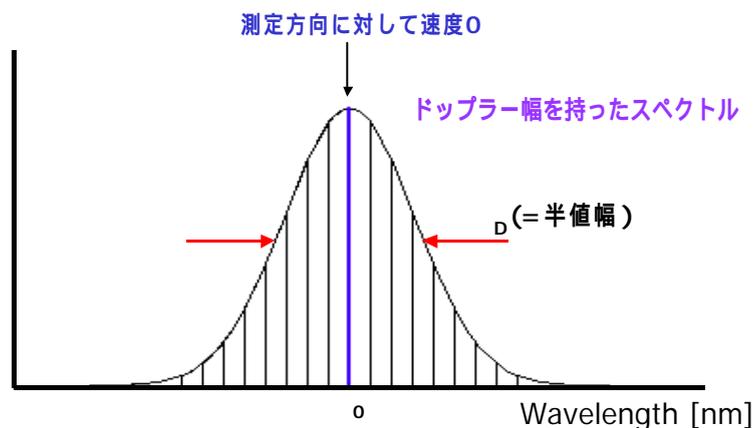


図4 ドップラー幅により広がりを持ったスペクトル

ドップラー幅について詳しく述べると、次のようになる。

速度 v で飛んでいる原子のレーザを照射している方向 (Z 軸方向) の成分を v_z とすると、 $v_z \sim (v_z + dv_z)$ の間に分布している原子の数は次の式で表される。

$$n(v_z)dv_z = \frac{N_i}{v_p \sqrt{\mathbf{P}}} \exp \left[- \left(\frac{v_z}{v_p} \right)^2 \right] dv_z \quad (2.2)$$

ただし、 $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ とする。ここで m は原子の質量、 k は Boltzman 定数で T はガス温度である。

一方、

$$v_z = \frac{c}{\mathbf{w}_0} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_0), \quad dv_z = \frac{c}{\mathbf{w}_0} d\mathbf{w} \quad (2.3)$$

の関係がある。ここで \mathbf{w}_0 は静止原子による共鳴周波数、 \mathbf{w} はドップラーシフトした周波数である。

(2.2) 式に (2.3) 式を代入すると

$$n(v_z)dv_z = \frac{cN_i}{\mathbf{w}_0 v_p \sqrt{\mathbf{P}}} \exp \left[- \left(\frac{c(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0)}{\mathbf{w}_0 v_p} \right)^2 \right] d\mathbf{w} \quad (2.4)$$

となる。よって強度 $I(\mathbf{w})$ は

$$I(\mathbf{w}) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{c(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0)}{\mathbf{w}_0 v_p} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

となる。これがドップラー幅を表す式であり、その半値幅 $d\mathbf{w}_D$ は、

$$d\mathbf{w}_D = 2\sqrt{\ln 2} \mathbf{w}_0 \frac{v_p}{c} = \left(\frac{\mathbf{w}_0}{c} \right) \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{m}} \quad (2.6)$$

となる。

原子量を $M = m N_A$ (N_A はアボガドロ定数) として (2.6) 式を波長の半値幅の式に変換すると、

$$\mathbf{d}l_D = 7.16 \cdot 10^{-7} \mathbf{I}_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.7)$$

となる。

この (2.7) 式から、得られたスペクトルの半値幅より原子の温度を決定することができる。

3章 オプトガルバニック効果を使った高分解能測定の方法

3.1) 機器の配置

図5のような光学系、および実験機器を使ってオプトガルバニック効果を用いた高分解能測定を行った。半導体レーザから出た光をハーフミラーで2つに分けホローカソードランプと光波長計に当てる。チョッパーからの参照信号と同期したシグナルをロックインアンプで増幅した出力と光波長計の出力をパソコンに取り込み、オプトガルバニックスペクトルを得た。

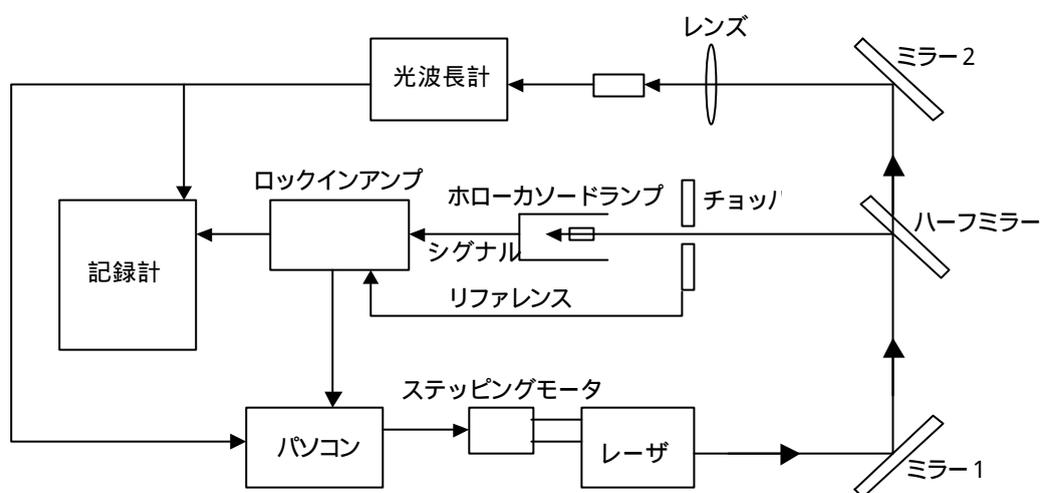


図5 測定機器の配置図

3.2) 測定機器の説明

1) 半導体レーザ

使用した半導体レーザはNewport社製,Model 2010であり、レーザの線幅が4 MHzの外部共振器を持った波長可変のレーザである。

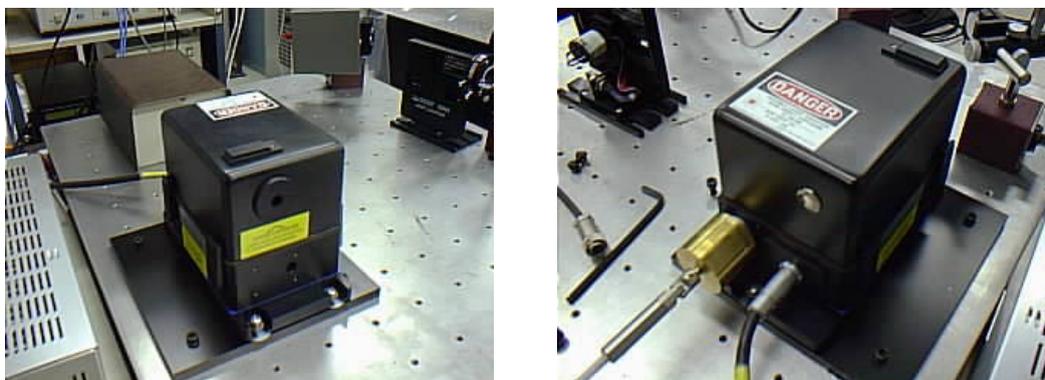
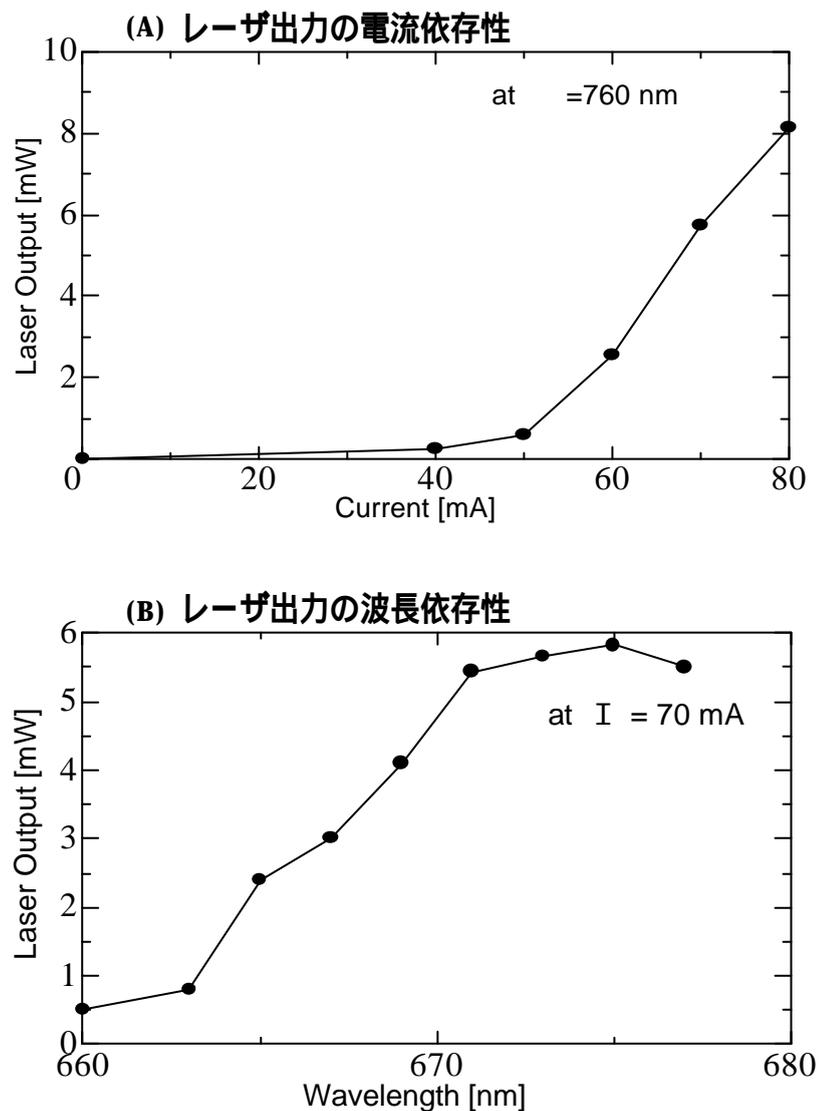


図6 半導体レーザ

実験を始める前に、この半導体レーザのグレーティング角度の最適化をし、出力の電流依存性と波長依存性を測定した。測定結果を図7に示す。レーザの最適化に関しては次章で詳しく述べる。



- (A) レーザのスレッシュホールド電流は約 50 mA であることがわかる。
- (B) 外部共振器による波長可変の範囲は 10 nm 以上であることがわかる。

図7 半導体レーザの出力

この半導体レーザはマイクロメータでの広範囲域の波長変化が可能で、さらに piezo 素子によって狭い範囲のさらに精密な波長変化も可能である。

piezo 素子とは、電圧をかけることによって微少な伸びちぢみをする素子であり、その変化量はかけた電圧にほぼ比例する。本実験で使用した半導体レーザは piezo 素子により、グレーティングの角度を変化させ、波長をより高精度で変化できるようになっている。しかし、piezo 素子の稼働範囲は小さく、広範囲の波長域での測定には有効ではない。付属している piezo 素子に ± 7 V の電圧をかけることによって、レーザ波長が 670 nm の時に 150 GHz (=0.18 nm) の波長変化が可能になっている。

) ホローカソードランプ

ホローカソードランプとは、陰極が筒状になっている放電管のことである。本実験で使用したホローカソードランプは浜松ホトニクス社製 (L2783-3NE-LI) を使用した。電極に Li 原子が含まれており、中には Ne ガスが封入されている。

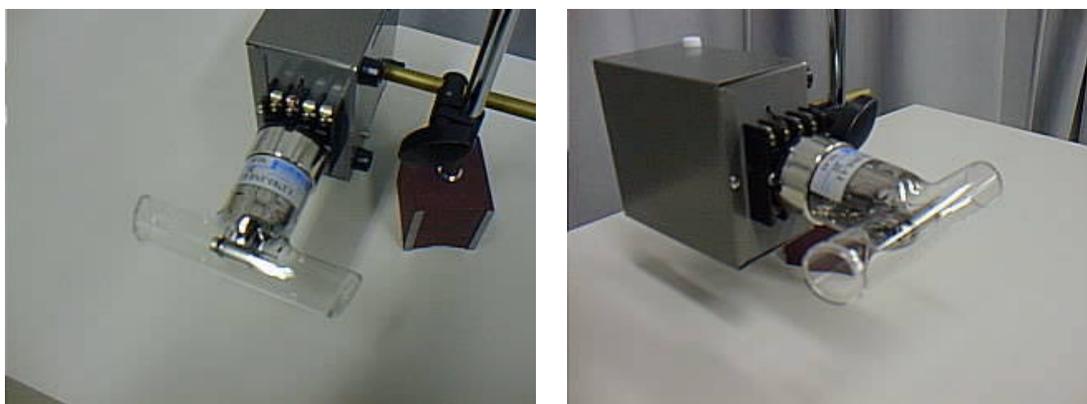


図 8 ホローカソードランプ

) ステッピングモータ

ステッピングモータは、パソコンにより回転速度、回転角度を制御できるモータで、動作はパルス単位である。今回使用したステッピングモータは ORIENTAL MOTOR 社製、MODEL PH566-B である。特徴を挙げると、4 相、4-5 相励磁で、動作速度は 40 kPPS まで可能である。そのため、高速かつ高精度な制御が行える。ドライブ方式にはバイポーラススタンダー

ド、定電流チョッピング方式を用いている。

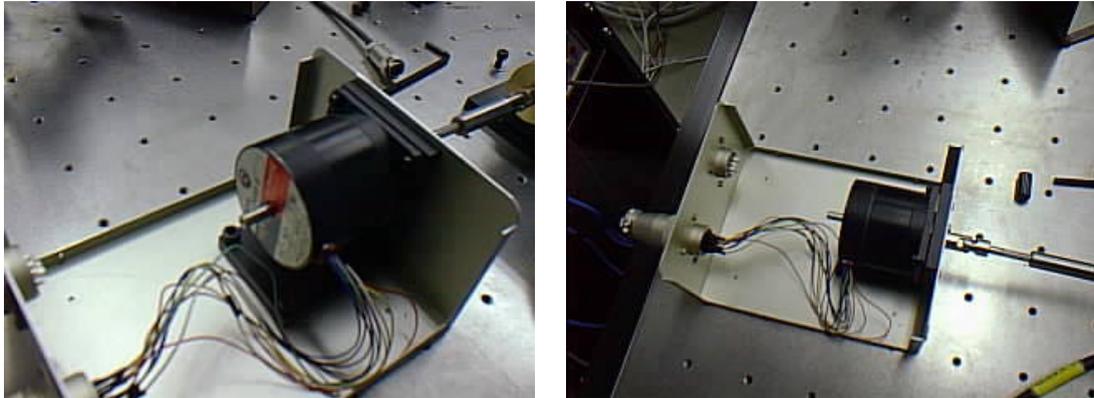


図9 ステッピングモータ

) ライトチョッパ

一定間隔で穴の開いた円盤を回転させることによって、レーザービームを連続的に ON、OFF することができる装置である。ライトチョッパ本体と制御コントローラに分かれており、制御部分で自由にチョッピング周波数を調整できる。今回使用したライトチョッパは NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 社の 5584A ライトチョッパである。



図10 ライトチョッパ

) ロックインアンプ

参照信号と同期したホローカソードランプからのシグナルを増幅させるため、ロックインアンプを使用した。今回使用したロックインアンプは、NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 社の LI-570A である。原理を簡単に説明すると、次のようになる。

ロックインアンプのブロックダイアグラムを図 11 に示す。

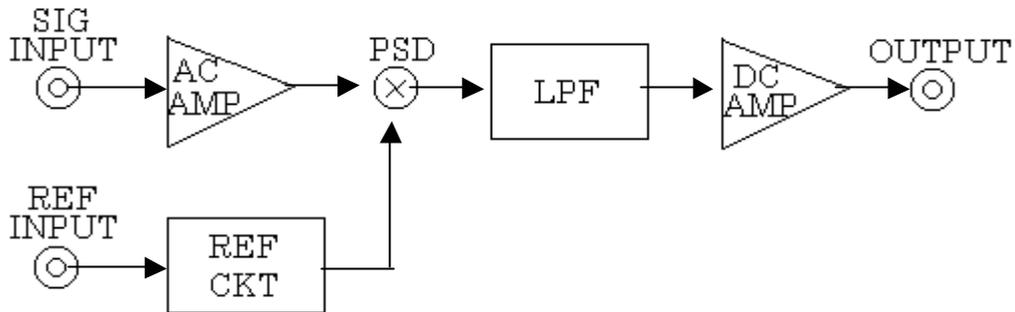


図 11 基本的なロックインアンプのブロックダイアグラム

入力信号(INPUT SIG)は、AC アンプ (AMP) によって増幅され、PSD (Phase Sensitive Detector)に加えられる。一方、参照信号(REF SIG)は、波形整形、位相調整されて、検出したい信号と同相の方形波となり PSD に加えられる。PSD はロックインアンプの心臓部であり、2 つの信号の掛け算器と考えることができる。

PSD 出力の周波数スペクトルは信号と参照信号の周波数スペクトルのたたみ込みとなり、和と差のスペクトルにシフトすることになる。よって、2 つの信号中同じ周波数で同位相成分は DC に、他の非同期成分 (雑音) は AC に変換される。AC 成分を次段のローパスフィルタ(LPF)で除去すれば、参照信号に同期した成分のみを検出することができる。雑音除去の能力を決める帯域幅は、LPF の帯域で決定される。LPF の帯域幅は安定度を損なうことなく狭くすることができるので、等価雑音帯域幅を極めて狭くでき、雑音除去の能力を無限にすることも可能になる³⁾。

) その他使用機器

その他にオシロスコープ、記録計、デジタルマルチメータ、ホローカソードランプに電流を一定に流す直流電源、光波長計などを使用した。

4章 測定準備

今回、広範囲の波長域を測定するためにステップングモータを使用した。半導体レーザのマイクロメータとステップングモータを接続し、モータでマイクロメータを動かすことによって、波長を精密に変化させた。そのために共同研究者の鈴木君とソフト面とハード面に分担してステップングモータによる半導体レーザの波長制御部を完成させた。

それぞれの分担した内容は次の通りである。

ハード面：ステップングモータと半導体レーザのマイクロメータの接続

ソフト面：ステップングモータを制御するためのプログラム作り

である。それぞれの説明を行う。

4.1) ハード面

ハード面では、ステップングモータの軸と半導体レーザのマイクロメータを接続するために「ユニバーサルジョイント」と呼ばれる垂直、水平方向のずれを吸収するジョイントを使用した。接続にあたって、ジョイントの直径とマイクロメータの直径が異なるため、真鍮の棒を加工し、ジョイントとマイクロメータを接続できるようにした。実際に使用したユニバーサルジョイントの設計図を下に示す。

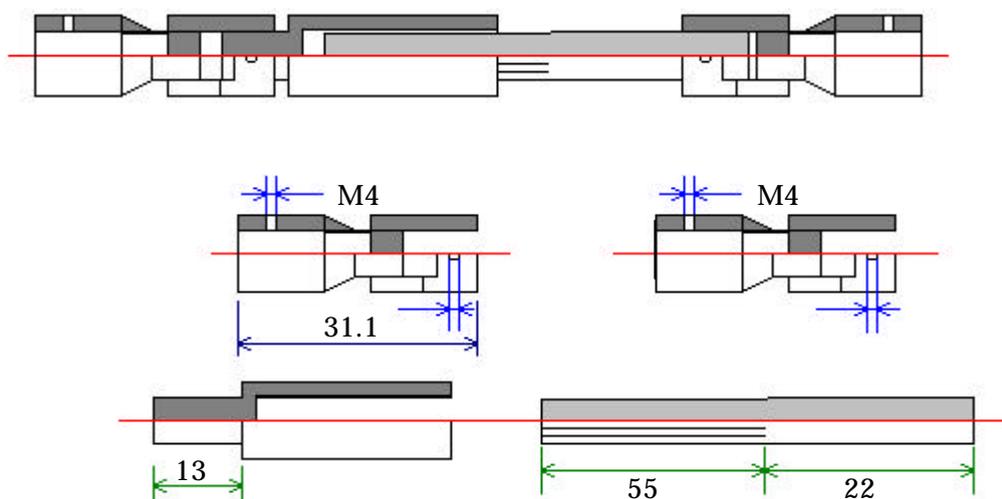


図 12 ユニバーサルジョイント設計図 (スケール 1:1)

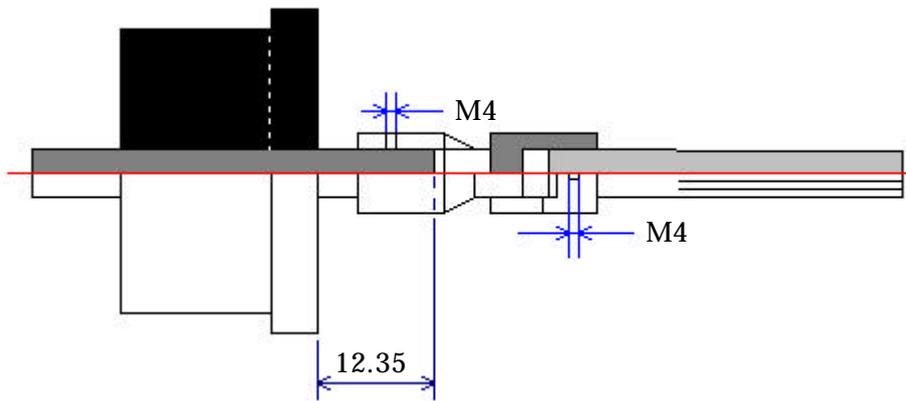


図 13 ステッピングモータとユニバーサルジョイントを接続した模式図

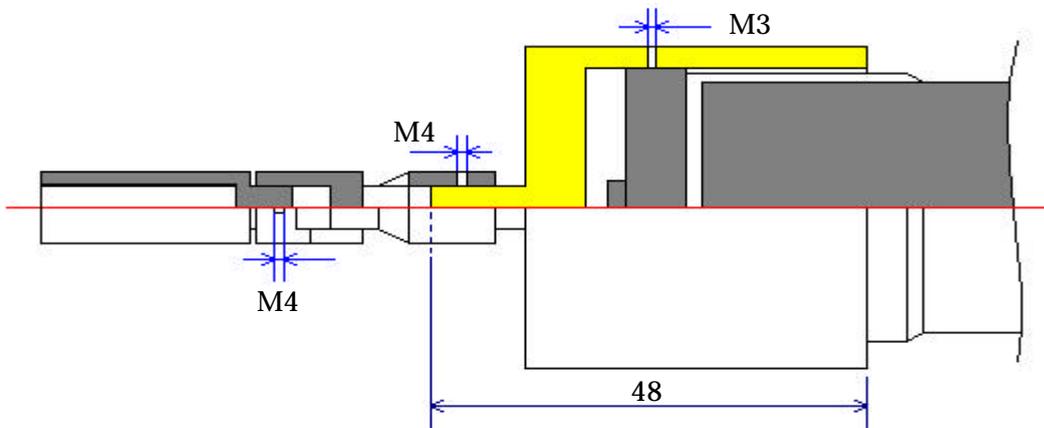


図 14 マイクロメータとユニバーサルジョイントを接続した模式図

上の図のように、真鍮の棒をステッピングモータのマイクロメータにうまく装着できるように中繰りをし、ジョイント側は外側を削って寸法を合わせた。実際に接続している写真が図 15 である。

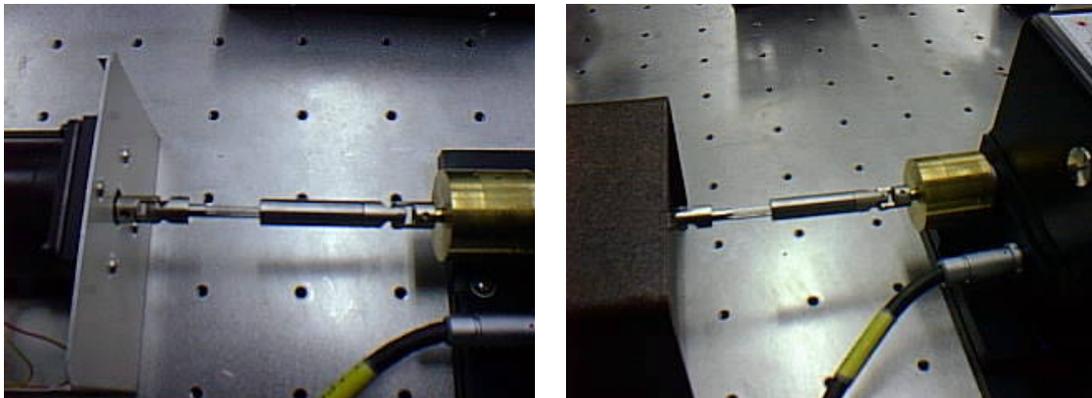


図 15 ステッピングモータとマイクロメータの接続

4.2) ソフト面

今回製作したプログラムを Microsoft Visual Basic で書いた。以下は実際に製作したプログラムである。

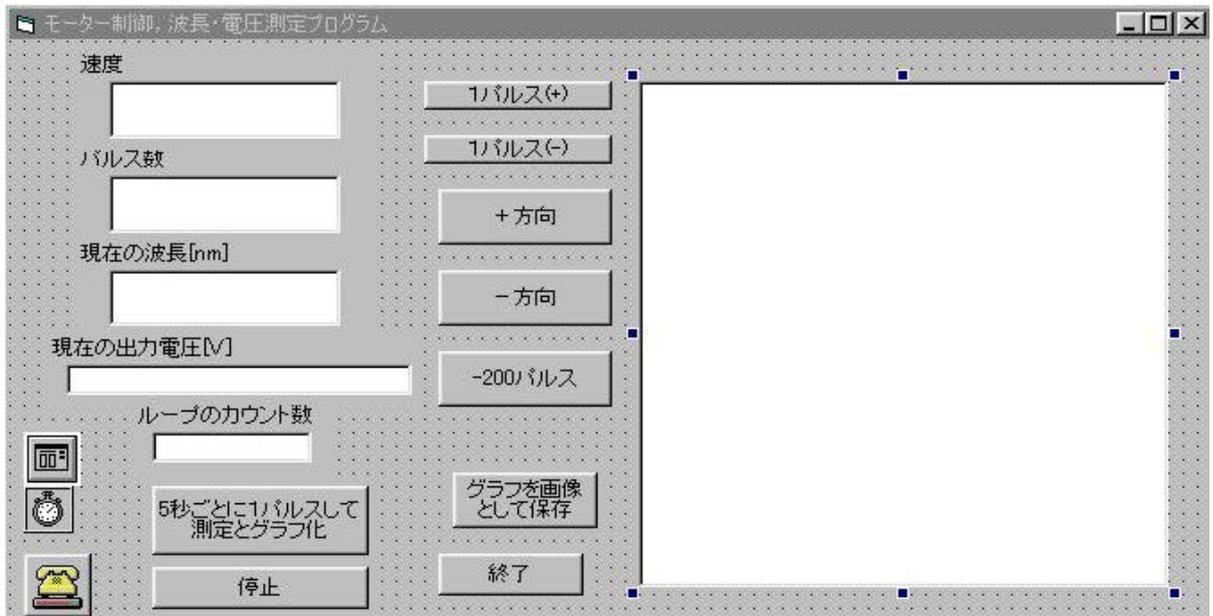


図 16 作成したプログラムの外見図

上に示すようにステッピングモータの動作速度、動作パルス数が自由に設定でき、測定して取り込んだ電圧と波長を表示し、右側のピクチャボックスにグラフを描くようになっている。

このプログラムはシリアル接続を使ったステッピングモータの制御を目的としているが、同時に、光波長計からのデータとデジタルマルチメータから出力のデータを GP-IB 接続で読み込むことも可能になっている⁴⁾。

作成したプログラムのフローチャートを図 17 に示す。

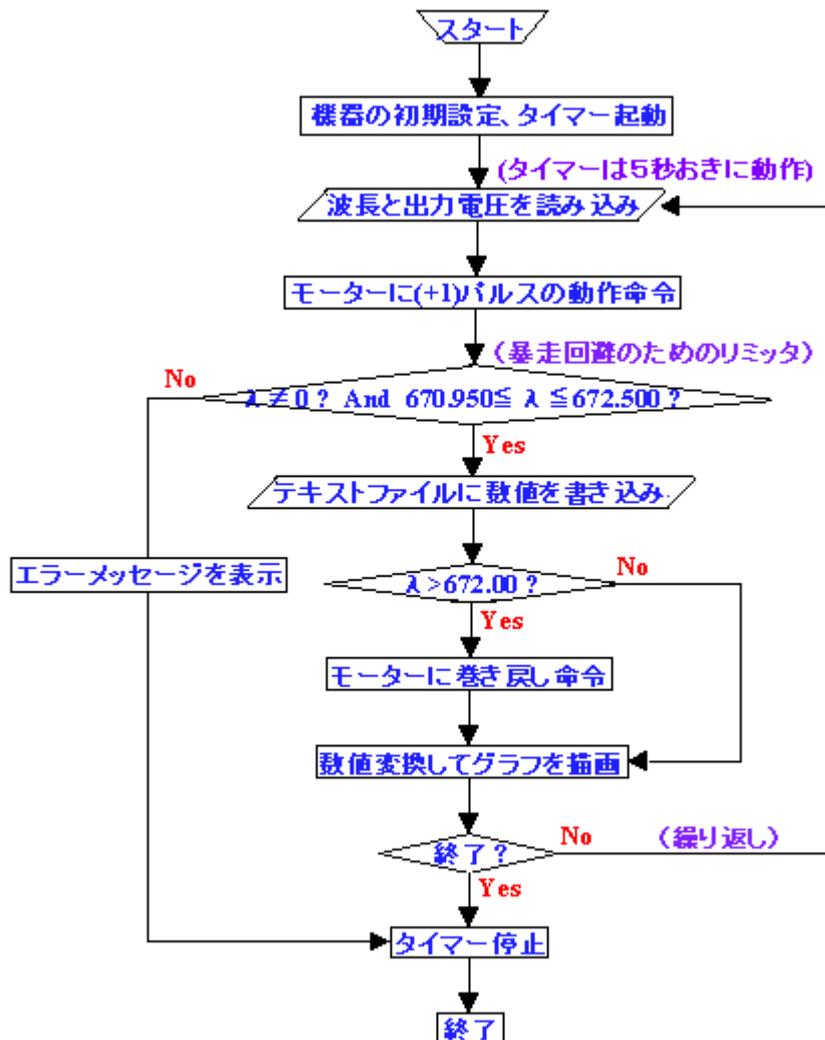


図 17 ステッピングモータ制御プログラムのフローチャート

フローチャートを解説すると次のようになる。

- ・ プログラムが起動し、接続している機器の初期設定
- ・ 5 秒ごとにプログラムをループさせるためタイマーが起動
- ・ 光波長計とロックインアンプからの出力信号を読み込み表示
- ・ モータに 1 パルスの動作命令を与えてマイクロメータを回転させ波長を
変化させる
- ・ 波長が正しく読み込まれているかどうか、読み込んだ波長の値が測定波
長範囲内かどうかをチェック

- ・ 条件を満たしていればテキストファイルに値を書き込み、座標化してグラフに点を描く。条件を満たしていなければエラーメッセージを表示して停止（リミッターの役目も果たす）
- ・ これらの動作を 5 秒おきに繰り返す
- ・ 測定波長範囲内で指定された波長を越えると、測定開始波長までモータを巻き戻す

このプログラムによって、ステッピングモータによる規則正しい波長変化とオプトガルバニックスpekトルの測定を同時に、自動的に行うことができる。ソースプログラムは資料として添付しておく。

作成したプログラムを用い、ステッピングモータを作動させた。その時のパルスステップ数と波長変化のグラフを図 18 に示す。

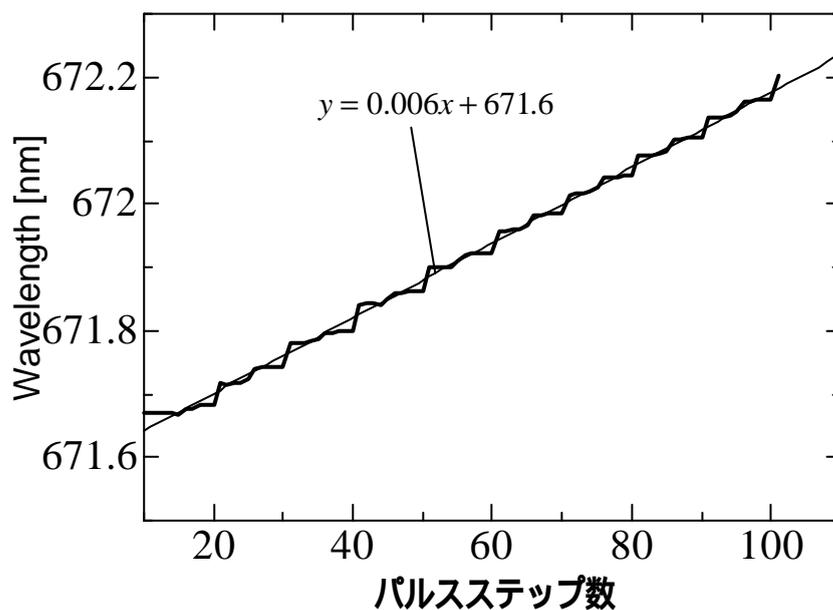


図 18 パルスステップ数と波長変化のグラフ

このグラフを最小二乗法により直線の式にすると、レーザ波長が 1 パルスにつき、平均 0.006 nm 変化することがわかる。

4.3) 半導体レーザーの最適化

今回、外部共振器を持った波長可変の半導体レーザーを使うにあたって、グレーティング角度の最適化の作業を次のような手順で行った。

-) 最初にあらかじめ調整済みの ECU(Electronic Control Unit)のパワーを ON にして 45 分放置し動作を安定させておく。そして、レーザーをオプティカルテーブルに乗せ、レーザーを ON にして最大許容量までレーザーの電流を上げていく。その最大電流はダイオードモジュールの限界抵抗によって決定される。
-) ECU のパネルから波長を読み取り、ダイオードモジュールのチューニングレンジの真ん中になるようにレーザーを調整する。
-) ファンクションジェネレータから ± 1 V、100 Hz のトライアングル波を出力しオシロスコープに接続する。
-) ECU の後面パネルにある「DETECTOR OUT」からのシグナルをオシロスコープに接続し、「volts/div」を調整する。その時、直流電流が最も敏感に反応するスケールが決定できる。
-) レーザ共振器用のミラーの仰角をアレンレンチで調節し、出力に対する電流曲線が最大の傾きになるようにする。

最適化後レーザー電流を 60 mA でレーザーの出力を測定すると、3.3 mW になった。マニュアルに添付されていた出力の電流依存性のグラフを見ると、レーザー電流 60 mA の時の出力は約 3 mW であったので、レーザーの最適化は成功したといえる。

5章 測定結果

5.1) 広範囲のオプトガルバニックスペクトル

ステッピングモータと半導体レーザのマイクロメータを接続し、作成したプログラムを用いて、広範囲の波長域の測定をした。その時に得られたオプトガルバニックスペクトルを図 19 に示す。

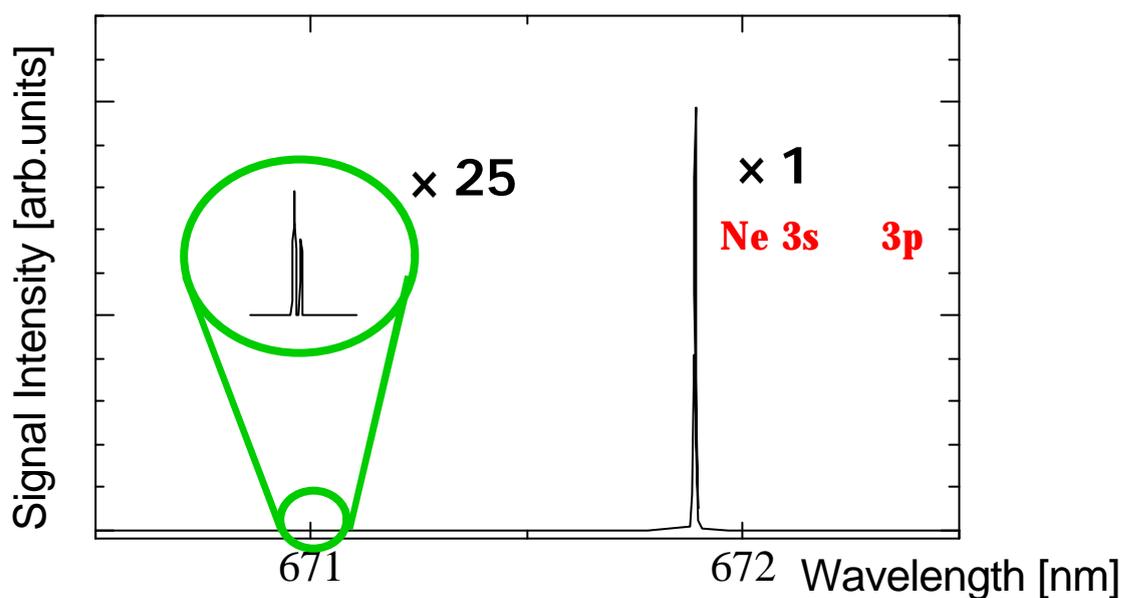


図 19 広範囲の波長域のオプトガルバニックスペクトル

右側のシグナルは、Ne 原子の 3s 3p 遷移時のオプトガルバニックスペクトルである。左側にはスペクトルが何も出ていないように見えるが、感度を 25 倍にすると Li 原子のオプトガルバニックスペクトルが 2 重線となって出ていることが分かる。

そこでこの 2 重線のスペクトルになっている部分の波長域を piezo 素子を用い、さらに精密に測定することにした。

5.2) Li の高分解能オプトガルバニックスペクトル

piezo 素子によって Li 原子のオプトガルバニックスペクトルが出ている範囲の波長域を測定すると、図 20 のようなスペクトルを得た。

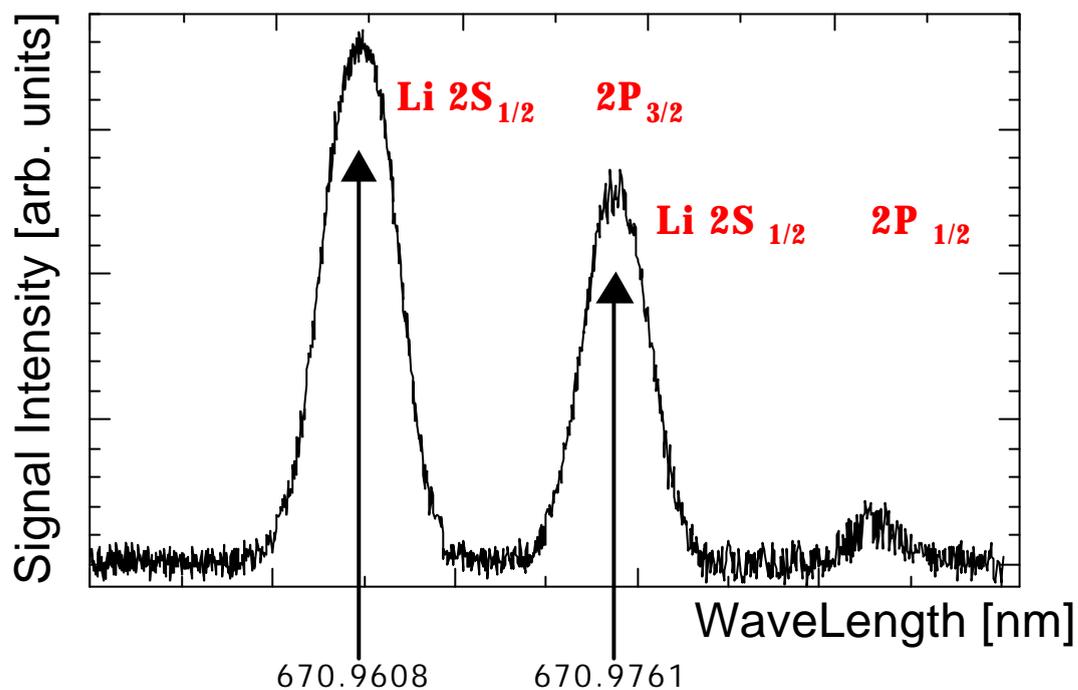


図 20 piezo 素子による高分解能のオプトガルバニックスペクトル

この図を見ると、Li のオプトガルバニックスペクトルは狭い波長域に 2 つ出ていることが分かる。 は Li の $2S_{1/2}$ $2P_{3/2}$ の遷移時のスペクトル、 は $2S_{1/2}$ $2P_{1/2}$ の遷移時のスペクトルである。この 2 つスペクトルのピーク時の波長は文献 ⁵⁾によりそれぞれ 670.9608 nm、670.9761nm と分かっているため、この 2 つの共鳴波長の値の差と、その間隔によりレーザ波長の校正をすることができる。

6章 考察

6.1) レーザ波長の校正

今回得られたオプトガルバニックスペクトルは、すべて符号がプラスになっているが、厳密に言えば本当にプラスのスペクトルが出ているかどうかは判別できない。同じ放電管（ホローカソードランプ）を使っている、放電電流を変えたり、レーザを当てる場所を変えたりするだけでオプトガルバニックスペクトルシグナルは大きさだけでなく符号まで変わってしまうことがあるからである¹⁾。しかし、オプトガルバニックスペクトル効果を応用した実験を行う場合はオプトガルバニックスペクトル効果の機構をほとんど問題にしなくてもよいことが多い。すなわち入射レーザの波長が原子またはイオンの準位間の遷移波長に一致した時に電氣的なシグナルがアウトプットとして得られれば良く放電はブラックボックスとして扱うことにすればいいのである²⁾。

そのことから、今回測定して得られたオプトガルバニックスペクトルの符号がプラスであってもマイナスであっても、レーザ波長の校正は十分に可能であるといえる。よって、Li 原子の2つの共鳴波長とその間隔からレーザ波長の校正をそれに基づき基準を決定することができた。

6.2) 未知のスペクトルの決定

ここで改めて図 20 を見てみると、右端に小さいスペクトルのピーク が出ていているのがわかる。これは Li のオプトガルバニックスペクトルではなく、別の原子のスペクトルが出ているものと考えられる。

そこで、本実験で校正したレーザ波長を用い、このスペクトルのピーク時の波長を計算で求めた。その結果 670.9921 nm という計算結果になった。この波長を文献⁵⁾で調べてみると、W (タングステン) の共鳴波長であることがわかった。このことより、ホローカソードランプの電極中に不純物として含まれているタングステンのオプトガルバニックスペクトルが微量ではあるが出ていると推測される。

6.3) 原子の温度の決定

図 20 で見られるスペクトル線の幅はレーザの線幅 (4 MHz または 6×10^{-6} nm) に比べて非常費広く、ドップラー幅に起因するものと考えられる。計算によって得られた (2.7) 式にオプトガルバニックスペクトルの半値幅 $\mathbf{d}l_D$ と Li の質量数 M 、スペクトルのピーク時に波長 \mathbf{l}_0 の数値を代入して計算すると、

$$T = 450 \text{ K}$$

という結果になった。

7章 まとめ

本実験ではオプトガルバニック効果を用い、高分解能の分光装置を開発した。そのための準備として、ステッピングモータと半導体レーザのマイクロメータを接続し、ステッピングモータを制御するプログラムも作成した。光源として、外部共振器を持った線幅の狭い半導体レーザを用い、電極に Li 原子が含まれたホローカソードランプに照射し、Li 原子のオプトガルバニックスペクトルを測定した。得られたオプトガルバニックスペクトルに表れる Li 原子の 2 本の共鳴線からレーザ波長の校正を行った。さらに校正されたレーザ波長を用い、ドップラー広がりを持ったスペクトルの半値幅を求め、その半値幅と原子の温度の関係式から原子の温度を決定した。

以上の結果から、本実験の目的である「オプトガルバニック効果を使った高分解能分光装置の開発」は十分に達成できたと言える。

今後は、本実験のレーザ波長の校正によって決定された基準を用いて、未知の物質のオプトガルバニックスペクトルを測定し、その物質の原子、分子の構造や種類を決定していきたい。

資料

資料) ステッピングモータ制御ソースプログラム

'初期設定

```
Dim n As Integer
Dim c As Integer
Dim addr As Integer
Dim dmm As Integer
Dim wm As Integer
Dim rd As String
Dim rd2 As String
```

Private Sub Command1_Click()

' - 200 パルス動作

```
MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0K" + Text2.Text + ",-200" + vbCr
```

End Sub

Private Sub Command2_Click()

'速度, 動作パルス数, 方向指定

```
MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0K" + Text2.Text + "," + Text1.Text + vbCr
```

End Sub

Private Sub Command3_Click()

'速度, 動作パルス数, 方向指定

```
MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0K" + Text2.Text + "," + Text1.Text + vbCr
```

End Sub

Private Sub Command4_Click()

'終了ボタン

'ポートが閉じていればそのまま終了, 閉じていなければ閉じて終了

```
If MSComm1.PortOpen = True Then
    MSComm1.PortOpen = False
End If
```

'終了

End

End Sub

```

Private Sub Command5_Click()
'タイマーのリセット
    n = 0
'停止コマンド
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + Chr$(&H80) + vbCr
End Sub
Private Sub Command6_Click()
'プラス方向へのシングルステップ
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0S+" + vbCr
End Sub
Private Sub Command7_Click()
'マイナス方向へのシングルステップ
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0S-" + vbCr
End Sub
Private Sub Command8_Click()
'タイマー起動
    n = 1
'グラフの枠
    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim cx As Integer
    Dim cy As Integer
    Dim lx As Integer
    Dim ly As Integer
    cx = 50
    cy = 50
    lx = 300
    ly = 200
    Picture1.DrawStyle = 0
    Picture1.Line (cx, cy)-(cx + lx, cy + ly), , B
'目盛り
    Picture1.DrawStyle = 2
    For i = 0 To 3
        Picture1.Line (cx, cy + 50 * i)-(cx + lx, cy + 50 * i)
    Next i
    For j = 0 To 3
        Picture1.Line (cx + 75 * j, cy)-(cx + 75 * j, cy + ly)
    Next j

```

'Text4 の色を黒に・・・

```
Text4.ForeColor = QBColor(0)
```

End Sub

Private Sub Command9_Click()

描かれたグラフの保存ボタン

```
On Error GoTo Err_Handle
```

```
CommonDialog1.ShowSave  
SavePicture Picture1.Image, CommonDialog1.filename
```

Err_Handle:

End Sub

Private Sub Form_Load()

通信ポートの選択

```
MSComm1.CommPort = 1
```

通信条件の設定

```
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
```

Input プロパティ使用時に、バッファ全体を読み取るように設定

```
MSComm1.InputLen = 0
```

ポートの開放

```
MSComm1.PortOpen = True
```

初期設定

```
MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0I51N,2000,40000,2000" + vbCr
```

'タイマーのリセット

```
n = 0
```

```
c = 1
```

Bring the digital multimeter on-line

```
Call ibdev(0, 22, 0, T10s, 1, 0, dmm%)
```

```
If (dmm% < 0) Then
```

```
Call ReportError(dmm%, "Could not open device DMM")
```

```
End If
```

'initialize DMM

```
Call ibwrt(dmm%, "*rst")
```

```
Call ibwrt(dmm%, "*cls")
```

'Set up dmm to measure VDC, autorange

```
Call ibwrt(dmm%, "CONF:VOLT:dc AUTO")
If (ibsta% And EERR) Then
    Call ReportError(dmm%, "Could not initialize DMM")
End If
```

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

```
Dim sx As Single
Dim sy As Single
Dim ex As Single
Dim ey As Single
```

```
If n = 0 Then
    Exit Sub
End If
```

'光波長計から信号を読み込み

```
Call ibdev(0, 2, 0, T10s, 1, 0, wm%)
Call ibclr(wm%)
Call ibwrt(wm%, "K0 F1 W0 R1 S1")
```

```
rd2 = Space$(1000)
```

```
Call ibrd(wm%, rd2)
```

'Request voltage reading from dmm

```
Call ibwrt(dmm%, "read?")
If (ibsta% And EERR) Then
    Call ReportError(dmm%, "Could not trigger multimeter")
End If
```

'Read data from dmm

```
Reading$ = Space$(1000)
```

```
Call ibrd(dmm%, Reading$)
If (ibsta% And EERR) Then
    Call ReportError(dmm%, "Could not read data from multimeter")
End If
```

'Remove blank spaces in READINGS\$ and assign resulting buffer to RDS.

```
rd$ = Left$(Reading$, ibcnt%)
```

'グラフに描点するために数値変換

```
sx = Val(Text3.Text) - 671.75
ex = sx * 1200 + 50
sy = 100 - (Val(rd) * 10 * 5)
ey = sy + 50
```

'テキストボックスに表示

```
Text3.Text = Val(rd2) * 1000000000
Text4.Text = Val(rd$)
```

暴走防止のためのリミッタ

```
If Val(Text3.Text) >= 672.5 Then  
    n = 0  
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + Chr$(&H80) + vbCr  
    Text4.ForeColor = QBColor(12)  
    Text4.Text = Hour(Time) & ":" & Minute(Time) & ":" & Second(Time) & "暴走しました・・・"  
  
End If
```

```
If Val(Text3.Text) <= 671 Then  
    n = 0  
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + Chr$(&H80) + vbCr  
    Text4.ForeColor = QBColor(12)  
    Text4.Text = Hour(Time) & ":" & Minute(Time) & ":" & Second(Time) & "暴走しました・・・"  
  
End If
```

'グラフに描点するときの条件の設定と書き込み

```
If Val(Text3.Text) >= 671.75 And Val(Text3.Text) <= 672 Then  
    Picture1.Circle (ex, ey), 1, QBColor(12)  
  
End If
```

'計測時間と読み込みデータをファイルに書き込み

```
Open "data.txt" For Append As #1  
    Write #1, c, Hour(Time) & ":" & Minute(Time) & ":" & Second(Time), Val(Text3.Text),  
    Val(Text4.Text)  
    Close #1
```

'一定の波長を越えたら，モーターを巻き戻してカウンタを出力

```
If Val(Text3.Text) >= 672 Then  
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "OK" + Text2.Text + ",-50" + vbCr  
    c = c + 1  
    Open "count.txt" For Append As #1  
    Write #1, c, Hour(Time) & ":" & Minute(Time) & ":" & Second(Time)  
    Close #1
```

'一定の波長を越えたら，モーターを巻き戻してカウンタを出力

```
If Val(Text3.Text) >= 672 Then  
    MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "OK" + Text2.Text + ",-50" + vbCr  
    c = c + 1  
    Open "count.txt" For Append As #1  
    Write #1, c, Hour(Time) & ":" & Minute(Time) & ":" & Second(Time)  
    Close #1
```

```
Text5.Text = c
```

```
End If
```

計測続行

```
MSComm1.Output = Chr$(&H2) + "0S+" + vbCr プラス方向へのシングルステップ
```

End Sub

```
Static Sub ReportError(fd%, errmsg$)
```

'エラーが出たとき別のフォームに表示

```
Form2.Show
```

```
Form2.Print "Error = ", iberr%; errmsg$
```

```
If (fd% <> -1) Then
```

```
Print ("Cleanup: taking board off-line")
```

```
Call ibonl(fd%, 0)
```

```
End If
```

以上 308 行である。

謝辞

終わりにのぞみ、終始懇篤な御指導を賜り論文校閲の労をとられた木村正廣先生（現高知工科大学知能機械システム工学科教授）に心から感謝致します。また、戸名正英先生（現高知工科大学知能機械システム工学科実験講師）に貴重な助言と御指導をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 関根重幸、和田昭英、廣瀬千秋：レーザー研究、第 17 巻、(1989)
P558-567 .
- 2) Wolfgang Demtroder : Laser Spectroscopy , (Springer , 1998)
p67-69 , p114-141 , p298-304 , p405-408 .
- 3) 日本化学会：実験化学講座、9 巻、(丸善株式会社，1991) p66-67 .
- 4) 金藤仁：自動計測システムのための VB6 入門 (技術評論社，2000) .
- 5) NIST (National Institute of Standards and Technology)
Physical Reference Data
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html> .