

光学測定

2025 年 9 月 12 日

1 実験目的

ロックインアンプを用いた測定，輝線スペクトルの測定，光吸収係数の測定を行い，分光について学ぶ。

2 実験の原理

様々な異なる色（=波長，エネルギー）を持つ光の成分がどのような割合で混ざっているのかを表したものを光のスペクトルと呼び，光のスペクトルを得ることを分光と呼ぶ。特に，ある物質（ガラスなど）を透過した光の光スペクトルは光透過スペクトル，反射した光の光スペクトルは光反射スペクトルと呼ばれる。分光の手法には，回折格子を用いる方法，プリズムを用いる方法，干渉計を用いる方法などがあるが，以下では回折格子を用いた方法について説明する。

2.1 回折格子 (Grating)

回折格子は非常に幅の狭い多数の溝が刻まれた鏡で，例えば 1 mm 当たり 1200 本の溝が刻まれたようなものである。図 1 に回折格子の模式図を示す。入射光は個々の溝によって任意の方向に回折される。波長 λ ，格子間隔 d ，入射角 θ_{in} に対して，

$$d \cdot (\sin \theta_{out} - \sin \theta_{in}) = m \cdot \lambda \quad (m \text{ は整数}) \quad (1)$$

を満たす場合， θ_{out} の方向には異なる溝からの光が干渉して強め合い，強い回折光が観測される。逆に式 (1) を満たさないような場合は，光強度は小さくなる。 $m = 0$ のときは $\theta_{out} = \theta_{in}$ であり，これは波長に依存しない鏡面反射に等しい。分光において特に重要なのは $m = \pm 1$ に相当する回折光（1 次の回折光）である。いま $m = +1$ とすると，

$$d \cdot (\sin \theta_{out} - \sin \theta_{in}) = \lambda \quad (2)$$

であり， $\sin \theta_{out} - \sin \theta_{in}$ を変化させることによって異なる波長 λ を選択することができる。このことを利用した

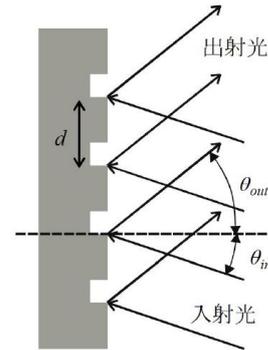


図 1: 回折格子

のが回折格子型分光器である。一般的には 1 次の回折光が最も強い回折強度を持つが，実際にはより高次の回折光 ($m = \pm 2, \pm 3, \dots$) も無視できない強度を持つことが多い。したがって，回折格子を用いた分光では高次回折光を除去する必要がある。そのためには，ある波長より長波長側の光しか通さないロングパスフィルターなどが用いられる。

2.2 回折格子型分光器

本実験では回折格子型分光器 (Acton SP2150i) を用いる。その構造および回折効率を図 2, 3 に示す。分光器 (スペクトルメーター) の性能を評価する際，最も重要なパラメータは分解能であり，分解能の良いものは単色光について光の広がり小さい。この広がりを示す指標としては半値全幅 (full width at half maximum : FWHM) があり，これは図 4 に示すようなピークの半分の値のところの幅 $\delta\lambda$ をいう。

2.3 光源

タングステンランプは，フィラメントにタングステン (W) が用いられたランプで，懐中電灯や白熱灯に用いら

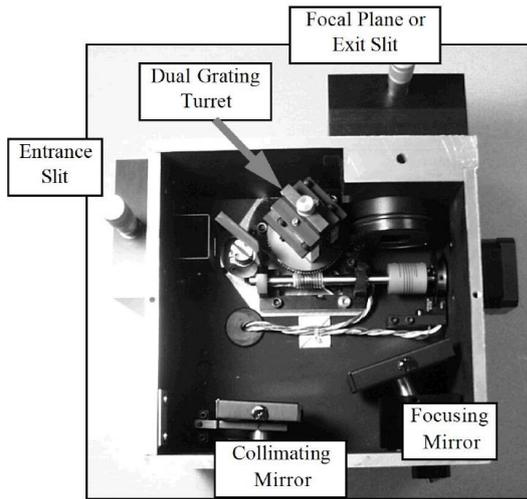


図 2: 分光器 SP2150i の構造

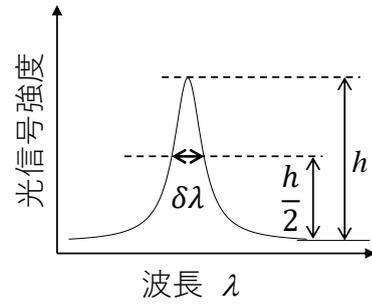


図 4: 半値全幅

λ_s (ストップバンド波長): 透過率 $T = 0.00001$ の時の波長

λ_c (カットオン波長): $T = 0.5$ の時の波長

λ_p (パスバンド波長): $T = 0.9$ 程度の時の波長

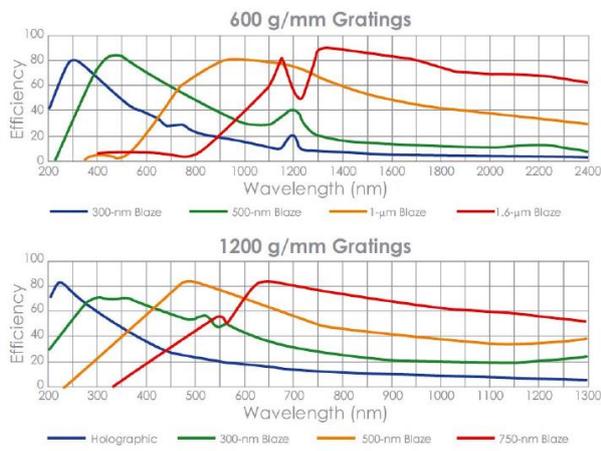


図 3: 回折格子の回折効率

れている身近な光源である。Edison による発明以来、その構造、仕組みは原理的にほとんど変わっていない。ここで用いるのは W ランプにハロゲンガスが微量封入されたもので、一般には「ハロゲンランプ」の名で市販されているものと同じである。

輝線ランプは、透明な管の中に Na, Cd などの気体を封入したもので、高圧放電によって励起された原子の電子緩和により原子に固有のエネルギー準位に相当する多くの線スペクトルをもつ。これら線スペクトルの波長は正確に知られているので、分光器の波長校正によく用いられる。

2.4 光学用ロングパスフィルター

本分光システムで用いるロングパスフィルター（エドモンド）の特性を表 1、図 5 に示す。

表 1: 光学用ロングパスフィルターの特性

	λ_s [nm]	λ_c [nm]	λ_p [nm]
L-38	353	380	430
RG665	580	665	750
RG1000	730	1000	1300

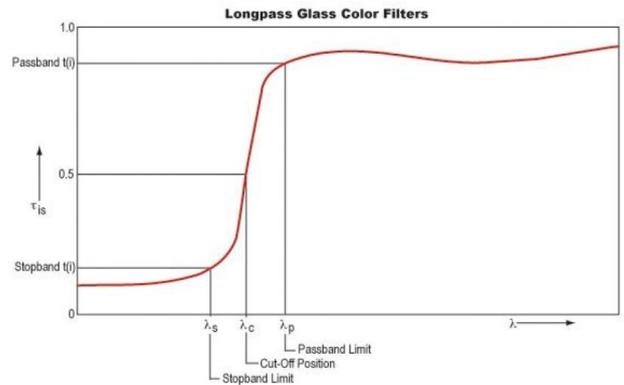


図 5: 光学用ロングパスフィルターの各種パラメータ

2.5 光検出器

光検出器には浜松フォトニクス製の複合素子 (K1713-01) を用いる。これは紫外～可視～近赤外光を検出する Si フォトダイオード (図 6) と、近赤外光を検出する PbS (図 7) を組み合わせた検出素子である。

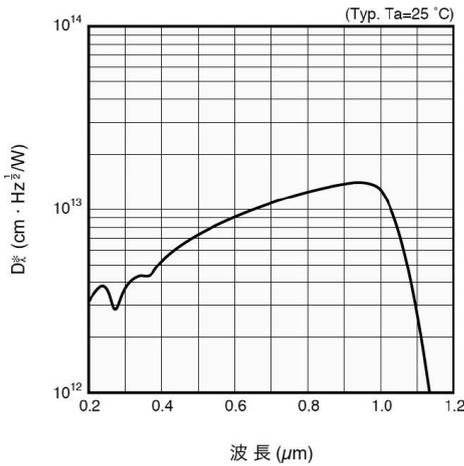


図 6: Si フォトダイオードの分光感度特性

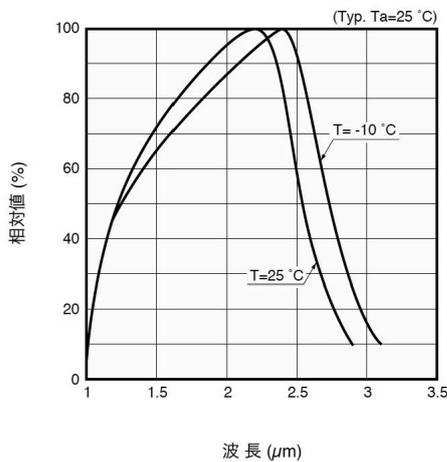


図 7: PbS の分光感度特性

2.6 ロックインアンプ (位相敏感検出法 (Phase Sensitive Detection, PSD))

2.6.1 ロックインアンプの原理

様々な物理実験において、微弱な電圧信号の検出が必要になる場合がある。信号が弱くてノイズに埋もれている場合、単にそれを増幅しても信号とともにノイズも増幅されてしまい、信号の測定ができない。こうした場合に威力を発揮するのがロックインアンプである。ロックインアンプは PSD (Phase Sensitive Detector) とも呼ばれ、物理実験の様々な分野で広く使われる測定器である。

ロックインアンプの主な機能は、入力信号の中からある特定の周波数成分だけを増幅して取り出すことであり、これを用いるとノイズの少ない信号測定を行うことがで

きる。例えば、電圧信号を A として、信号を何らかの方法で角周波数 ω で強度変調して、 $A \cos(\omega t + \phi)$ の形にできたとする。一般に、ノイズは低周波数のものが高周波数のものよりも大きいので、変調した信号 (と高周波数のノイズ) をその角周波数 ω の成分として検出する方が、元の信号 (と低周波数のノイズ) を直接検出するよりも、低いノイズレベルで信号測定ができる。

図 8 に示すように、ロックインアンプの基本的回路構成は 2 種類の入力信号 (入力信号と参照信号) と 1 つの出力信号である。入力信号を $A \cos(\omega_i t + \phi)$ 、参照信号を $B \cos \omega_r t$ とすると、ミキサで掛け合わせた後の出力 $V_o(t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} V_o(t) &= A \cos(\omega_i t + \phi) \cdot B \cos \omega_r t & (3) \\ &= \frac{AB}{2} \{ \cos[(\omega_i - \omega_r)t + \phi] \\ &\quad + \cos[(\omega_i + \omega_r)t + \phi] \} & (4) \end{aligned}$$

(4) 式の右辺の第 1 項は $\omega_i - \omega_r$ の周波数、第 2 項は $\omega_i + \omega_r$ の周波数をもつ信号である。この出力を次段のローパスフィルターで積分するため、 $\omega_i - \omega_r$ が 0 に近い場合だけ信号が生き残る。この時 $\omega_i + \omega_r$ の成分は周波数が高いためフィルターで落とされる。また $\omega_i - \omega_r = 0$ の時はフィルターの出力は $\cos \phi$ に比例する。これが同期検波と呼ばれるものであり、これによって入力信号の位相の情報を得ることができる。ここで、出力信号が入力信号と参照信号の位相差 ϕ に依存することを注意したい。そのため、この方法で正しい信号の大きさを得るためには、参照信号の位相を可変にして出力が最大になる点を探るか、90 度位相がずれた 2 つ参照信号 ($\cos \omega_r t$ と $\sin \omega_r t$) を用意して、2 つの位相で検出し信号の振幅と位相の情報を取り出す方式 (2 位相ロックインアンプ) を採用しなければならない (図 9 参照)。

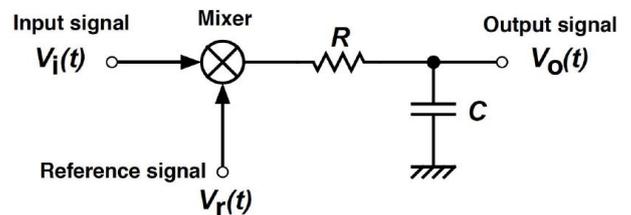


図 8: ロックインアンプの基本構成

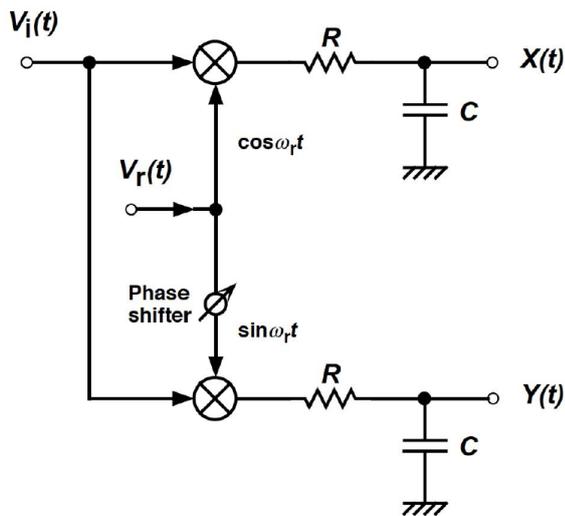


図 9: 2 位相ロックインアンプの基本構成

2.7 光の透過と吸収

入射光の強度 $I_0(\lambda)$ と透過光の強度 $I(\lambda)$ とすると、物質の光透過率 T は

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (5)$$

と表される。

強度 I_0 の光が厚さ d の均一な試料を透過したとき、透過光強度 I は、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)d) \quad (6)$$

で与えられる。これをランベルト (Lambert) の法則という。

ランベルトの法則に現れる係数 α を光吸収係数と呼び、式 (9) から

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln(I(\lambda)/I_0(\lambda)) \quad (7)$$

となる。

3 実験方法

本分光器システムは、光源、チョッパー、フィルター (図 10)、回折格子型分光器、検出器からなっている。それぞれは波長に対する特性があるので、波長域ごとに組み合わせを考慮する必要がある。表 2 はそれらを考慮して決めた設定であるが、一義的なものではない。

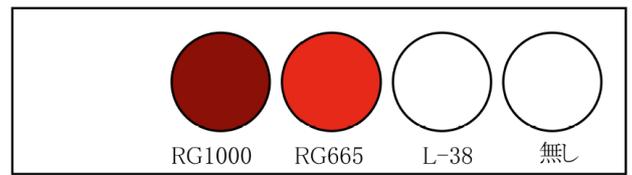


図 10: 光学フィルターの配置

表 2: 測定領域ごとの設定

ブロック	A	B	C	D
波長 nm	200~	380~	665~	1100-2000
回折格子	1200 G/mm, 300 nm		600 G/mm, 1 μm	
検出器	Si フォトダイオード			PbS
フィルタ	無し	L-38	RG665	RG1000

第 1 日目：輝線スペクトルの測定

セッティングの状況によって、第 1 日目と第 2 日目の実験を逆に行ってもよい。装置はパソコン (PC)、蛍光灯、回折格子型分光器、検出器、デジタル・マルチメータ (sanwa) である。分光器の設定波長の操作はパソコンで行うので、備え付けのマニュアルに従うこと。光検出器からの信号は弱いので、レンズで蛍光灯の光ができるだけ分光器の入射スリットに強く入るように光路を調整すること。また、バックグラウンドノイズの少ないきれいなスペクトル信号を得るために、蛍光灯の光を入れたときと、ノート等で遮ったときの、信号強度の差をとる等の工夫をすること。

I. 蛍光灯の連続スペクトル

1. 蛍光灯のスペクトルを 400-1000 nm の波長域で 10 nm 波長間隔で測定する。表 2 に従って、B, C, D の各ブロックごとに回折格子とフィルタを交換して、波長を変化させスペクトル強度を測定せよ。波長の変化のさせ方はパソコン上、手動で行う方がよい。波長の変化のさせ方、回折格子の選択はマニュアルに従って行うこと。波長域ごとの設定は、表 2 に示してある。図 11 に示す光学フィルタはアルミニウム板に取り付けてある。フィルタは波長域に合わせて選択する。スペクトルの強度は Si または PbS ケーブルを波長域に合わせてデジタル・マルチメータに接続し、DC 電圧として測定する。

II. 蛍光灯の輝線スペクトル

蛍光灯には水銀などの原子が封入されており、それらの原子からの輝線スペクトルが観測される。水銀の輝線スペクトルのうち、404.7, 407.8, 434.8, 435.8, 546.1, 577.0, 579.1 nm は強い輝線として知られている。

1. 分光器の波長を校正するために、上記の輝線の中の4本の輝線スペクトル位置付近で、0.2 nm 波長間隔でスペクトルの強度を電圧として測定せよ。
2. 水銀以外の輝線の位置の前後を、0.5 nm 波長間隔程度の細かさでスペクトル強度を測定し、水銀以外の輝線の波長を求めよ。

レポートの課題

1. 得られた蛍光灯のスペクトルをプロットせよ。

第2日目：光吸収係数の測定

I. 光の波長と色の関係

1. 教員あるいはTAに頼んで、分光器につながっている検出器をはずしてもらおう。
2. ハロゲンランプの白色光をレンズを通して集光し、分光器の入射口に入射させる。
3. 出射口から出てくる光の色を、分光器の波長を動かしながら観察せよ。赤、橙（オレンジ）、黄、緑、青、藍、紫の7色が波長にしておよそ何 nm から何 nm の範囲に当たるかを記録せよ。ただし色の感じ方には個人差があるので、答えも人によって異なる。

II. 色ガラスフィルターの光吸収係数

備え付けの赤（46428）、橙（54655）の色ガラスフィルターのどれか一つの光透過率を求める。フィルターの厚さは2つとも4mmである。この実験では検出器を再度分光器に付けて行う。取り付けは教員あるいはTAに頼むこと。

1. サンプルホルダーに何も無い状態で、光強度 I_0 を400~1000 nm の波長領域で5 nm おきに測定する。光強度はデジタル・マルチメータ（sanwa）でDC電圧として測定する。
2. 色ガラスフィルターの試料の光強度 I を同じく測定する。

3. 色ガラスフィルターの光透過率をプロットせよ。
4. 色ガラスフィルターの光吸収係数をプロットせよ。

レポートの課題

蛍光灯の発光原理を調べよ。

第3日目：ロックインアンプを用いた蛍光灯のスペクトルの測定

蛍光灯からの光を高速で回転するチョッパーによって強度変調し、ロックインアンプ（FEMTO製、LIA-MV-200-L）を用いて、1日目に行った蛍光灯のスペクトルの取得を再度行う。そして、ロックイン検出を行わなかった第1日目とのデータの比較を行う。実験用PCソフト及び、各波長の分光器の回折格子と光学フィルターの設定は、1日目と同様に、表2を参照すること。図11のように実験装置を配置し、以下の手順で測定を行う。

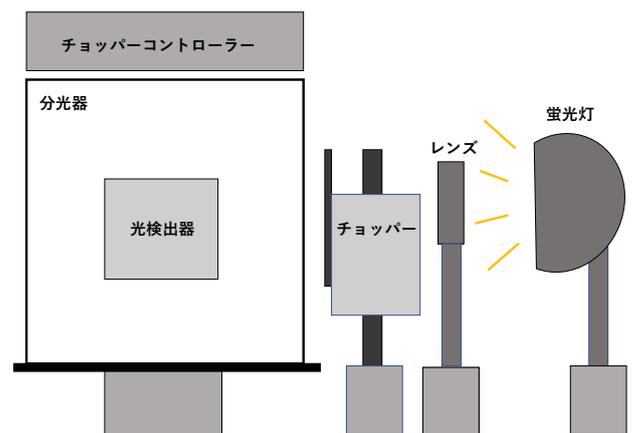


図 11: 3日目の実験の配置図

1. 蛍光灯、レンズ、チョッパー、分光器を一系列に配置する。ここで蛍光灯の光がレンズによって分光器入り口にしっかり集光されている事を確認する。
2. 図12のように、各装置を同軸ケーブルで配線する。
3. ロックインアンプの設定が、TC(3), sensitivity(2)になっていることを確認する。
4. チョッパーの羽根に何か触れていないか等、羽根が回転しても問題ないか確認する。

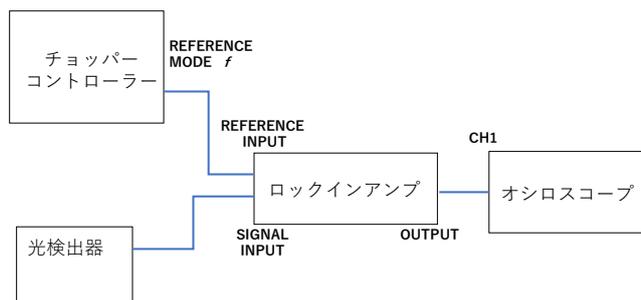


図 12: 実験装置の配線図

5. チョッパーコントローラー (MODEL SR540), ロックインアンプ, 分光器, オシロスコープの電源を入れる。チョッパーの羽根が高速回転するので気を付けること。
6. チョッパーコントローラーの設定が, MAX FREQ/SLOTS(4 kHz), CHOPPER FREQUENCY(260 Hz) になっている事を確認する。
7. 分光器の波長を水銀の輝線の波長に合わせ, 蛍光灯を照射し, ロックインアンプからの信号をオシロスコープで確認せよ。入力信号と参照信号の位相差はロックインアンプの phase coarse や phase fine で調整できるので, これらを調整して信号強度を最大化せよ。
8. 1日目と同様の測定を行う。1日目よりも明瞭なスペクトルが見えるはずである。スペクトル強度の強い箇所に関しては, 細かい波長間隔でスペクトル強度を測定すること。

レポートの課題

1. 得られた蛍光灯のスペクトルをプロットせよ。1日目と3日目の結果のうち, 明瞭なスペクトルが得られた方について, 以下の解析を行うこと。
2. 分光器の分解能を求めよ。
3. 水銀の輝線を用いて, 分光器の波長を校正せよ。
4. 上記の校正結果に基づいて, 水銀以外の輝線の波長を求めよ。
5. 実験室に備え付けの資料などを参考にして, 蛍光灯に含まれる水銀以外の元素を同定せよ。