

# 物理実験Ⅳ 2011年度

## 色素レーザーの組み立ておよび レーザー特性の実験

### 実験テキスト

東海大学理学部物理学科

八木隆志

## テーマ：色素レーザーの組み立ておよびレーザー特性の実験

目的：色素レーザーの設計と組み立てを行うことでレーザー発振の原理を学ぶ。さらに、組み立てたレーザーを用いてレーザービームのコヒーレンスとスペクトルを測定し、自然光との違いを確認する。あわせて、このような光学的、および分光学的な実験を行うために必要な装置や部品などの装置知識、および分子のスペクトル線などの分光学に関する知識を得る。実験に入る前に**本実験専用のノート**を1冊用意して頂きたい。毎回、実験の実施中にデータやメモをノートに書き記し、実験終了時には実験装置、作業内容、結果、考察を5ページ程度にまとめること。5年後に再度ノートを見て同様の実験が出来ることを想定した記述内容にする。ノートは毎回チェックし、修正を指導する。この実験ノートを使って、最後にレポートにまとめる。

スケジュール：

分光器および、黒体輻射光源の原理、更にこれを用いた分光器のキャリブレーション

色素レーザーについて

色素の蛍光スペクトルと吸収スペクトルの測定

レーザーの構成と使用する光学部品の機能、およびアルミメッキ鏡の作成

色素レーザーの組み立てと発振実験

レーザービームと ASE, および蛍光のスペクトル測定

レーザービーム、ASE、および蛍光のコヒーレンス測定

蛍光、ASE、およびレーザーパルスのパルス幅測定

レーザー増幅

レーザー発振波長の制御

レーザーの分光応用

まとめ

## 1. 色素レーザー

### 1.1 レーザーとは何か

レーザーとは光を増幅する装置であり、増幅された光を閉じ込めることで電磁波としての光の発振を行う装置である。1960年にルビーレーザーが発振して以来、光の増幅メカニズムの詳細な研究と光を増幅する物質の探索が精力的に行われてきた。レーザーは**スペクトル輝度** (単位スペクトル幅に含まれる電磁波のパワー) が非常に大きいことを特徴とし、連続発振状態では特に、原子や分子の分光用光源として多用されてきた。レーザーの持つもう一つの特徴である**空間コヒーレンス** (可干渉性) の高さが、レーザー装置から出てくる光をきわめて指向性の高い光のビームとしている。この特徴を利用して高出力レーザー

ビームをレンズで小さなスポットに集光し、材料の切断などに用いられている。レーザー媒質を含む共振器の中に、増幅された光を閉じ込めておき、適当なタイミングで共振器から光をまとめて取り出す技術が 1960 年代に完成された。これを Q スイッチという。この方法では、共振器の中にレーザー発振を妨害するものを入れておき、きわめて短時間でこれを取り除くことが当初行われていた。その一つとして、機械的に開けられるシャッターやプリズムを共振器に入れて回転させる方法などであった。今日では、特殊な光学結晶に電圧を加えることで、そこを通過する光の偏光を回転させる性質を利用してレーザー発振の妨害とその解除を行っている。本実験では光を増幅する性質を持つローダミン 6 G と呼ばれる色素を用い、これをパルス的な励起で励起してレーザー発振を行う。このパルス的な励起は、実は他のレーザー（本実験では YAG レーザーを用いている）で行われるが、このレーザーは色素を励起するためのパルス光を放射し、このパルス光が実は Q スイッチと呼ばれる方式で生成しているのである。

以下に本実験で用いるレーザー装置について説明する。

## 1.2. レーザー発振

レーザー発振とは、図 1.1 に示すように 2 枚の鏡の間で光を往復させることで光の定在波を発生させ、光の減衰を補うように光を増幅を行うことで、定在波を継続させている状態のことである。2 枚の鏡のうち、1 枚の反射率を 100% とし他方を約 90% 程度にしておけば、反射率 90% の鏡からは 10% の光が透過する。この透過する光のパワーを補うようにレーザー内部で光を増幅すれば発振を持続できる。透過した 10% の光はレーザービームとして用いられる。つまり、

$$\text{光の増幅} - \text{光の吸収損失} = \text{トータルゲイン}$$

であり、トータルゲインを 1 以上にする工夫がレーザー発振技術である。

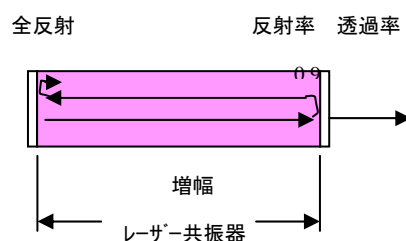


図 1.1 レーザー発信器の概念図

### 1.3 4準位レーザーとは

Nd<sup>3+</sup>:YAGのレーザー発振波長域近傍での原子スペクトル線群を図 1.2 に示す。ここで、多数の発光スペクトル線があるのは、レーザー発振を起こすエネルギー準位だけではなく、他にも多数のエネルギー準位からの遷移があるからである。

Nd<sup>3+</sup>:YAGレーザーは4準位系と呼ばれるレーザーの代表例で、図 1.3 に示すように準位 0 を基底状態とし、ポンピングにより準位 3 に励起する。準位 3 から 100psオーダーの速い遷移により準位 2 に移る。このとき差額のエネルギーは熱エネルギーとしてYAG結晶に与えられる。状態 2 から 1 への遷移はゆっくりしていてNd<sup>3+</sup>:YAGレーザーの場合では200μs程度である。更に、状態 1 から 0 への遷移は速い。

ポンピングが無く、原子が熱平衡になっているときはほとんどの原子が状態 0 に入るため、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、共にほとんどゼロである。したがってポンピングが始まれば状態 2 の原子数は状態 1 の原子数より大きくなる。実質的にはN<sub>1</sub>はN<sub>2</sub>に比べ非常に小さいので反転分布密度(N<sub>2</sub>-N<sub>1</sub>)はN<sub>2</sub>と考えると、ポンピングによりN<sub>2</sub>が

$$N_2 = N_t \quad 1.1$$

となったとき、利得（光を増幅させる能力）は発振閾値に達する。N<sub>t</sub>は 10<sup>16</sup>のオーダーであるのでN<sub>2</sub>もこのオーダーになる。

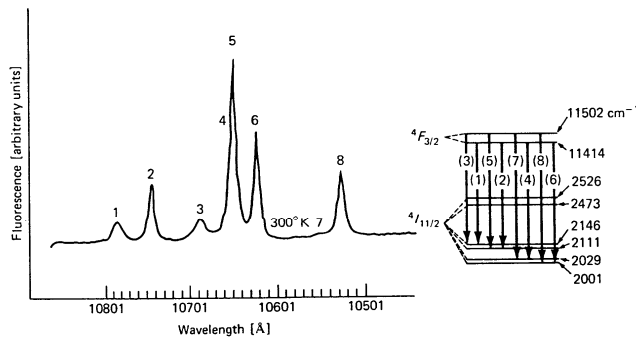


図 1.2 Nd<sup>3+</sup>:YAG結晶からの蛍光スペクト

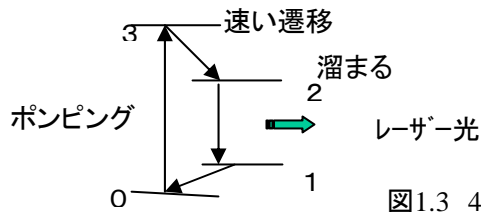


図 1.3 4準位系

## 1.4 色素レーザー

有機色素の大部分は可視光を吸収し、また効率よく蛍光を発する。色素が色を見せるのはこのためであり、色素を用いたレーザーの研究が 1960 年代の後半から活発に研究されてきた。その大きな理由は色素レーザーの発振波長が可変であり、いろいろな色素が選べるため、可視域の全ての波長がカバーできるからである。これは分光学にとって非常に都合の良いものであった。レーザーの出力が向上してくると色素レーザーを単に分光のための光源として考えるだけではなく、レーザーのパワーを利用する研究が始まった。レーザー同位体分離といわれる研究がその例である。これは、同位体原子が微妙に異なるエネルギー順位を持つことで、共鳴遷移を起す光の波長が微妙に異なることを利用する。原子のエネルギー順位間にちょうど合うフォトンエネルギーを持つ光ビームをこの原子に当てると、光が吸収される。このとき光の運動量が消滅するので運動量保存則により原子が動き出す。したがって、何種類かの同位体原子が混在する気体に選びたい同位体原子に同調させた光ビームを入れると、欲しい同位体だけが押されて出てくる。そのためには、光の波長をきわめて高い精度で同調させなければならない。これを可能としたのが色素レーザーであった。レーザーに用いられる色素の代表的な例と色素の構造を表 1.1 に示す。

今回の実験で用いるのはローダミン 6G という色素であり、橙色の蛍光を発する。ローダミン 6G のエネルギー順位を図 1.4 に示すが、 $S_0$  は基底状態で最もエネルギーが低い状態である。 $S_1$ ,  $S_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  などは最低エネルギー状態における原子の最外殻電子の一つが励起電子軌道に上がった状態である。 $S_0$  と  $S_1$  の間のエネルギー差は  $20,000\text{cm}^{-1}$  (この単位を波数といい、**カイザー**と呼ぶ) 程度である。 $S$  という名前はシングレット (Singlet) 状態と言われ、励起電子のスピンの残りの他の電子スピンと逆になっている状態である。 $T$  という名前はトリプレット (Triplet 三重項) 状態と言われ、励起電子スピンが他の電子スピンと平行になっている状態である。色素分子内の電子がシングレット状態からトリプレット状態、あるいはその逆の遷移を起こすことは確率的に非常に低い。これに比べ、シングレット状態間かトリプレット状態間での遷移が生じる確率が大きいので、もっぱらこの遷移が起こる。これを**スピン許容遷移**という。この遷移が色素からの蛍光や吸収の原因である。ほとんどの色素の発光は、光を吸収して  $S_0$  から  $S_1$  への遷移で励起された後の蛍光として現れる。

このシングレットとトリプレット状態は分子振動によるエネルギー順位へ細分化される。分子振動の量子状態間のエネルギー差は電子が遷移するときのエネルギー差に比べはるかに小さいので、エネルギー順位がバンドのように広がっているのが特徴である。この振動量子状態間のエネルギー差は  $1500\text{cm}^{-1}$  (カイザー) 程度である。分子の場合、原子と異なる量子状態として振動状態のみならず回転状態も存在し、そのエネルギー間隔は約  $15\text{cm}^{-1}$  程度である。

色素分子のポンピングでは基底状態の電子を光で  $S_1$  の状態のどれかの振動回転状態へ励起する。励起する光の波長 (周波数のほうが適当) で最終状態がきまるが、このエネルギー順位図からも明らかなように、励起波長の選択幅がかなり広い。このように励起された

色素分子の電子は $S_1$ 軌道にありながらも振動と回転エネルギーが最も低い順位に落ちる。この遷移はかなり速い。

表1.1 各種レーザー色素

Dye	Structure	Solvent	Wavelength Emitted (nm)
Acridine red		EtOH	Red 600–630
Puronic B		MeOH H2O	Yellow
Rhodamine 6G		EtOH MeOH H2O DMSO Polymethyl- methacrylate	Yellow 570–610
Rhodamine B		EtOH MeOH Polymethyl- methacrylate	Red 605–635
Na-fluorescein		EtOH H2O	Green 530–560
2,7-Dichloro- fluorescein		EtOH	Green 530–560
7-Hydroxycoumarin		H2O (pH ~ 9)	Blue 450–470

$S_1$ の最下順位になったとき、電子軌道が基底状態である順位 $S_0$ のいろいろな振動回転順位へ落ちる。このとき色素特有の蛍光を放射し、そのスペクトル幅は広い。 $S_1$ 順位内と $S_0$ 順位内での遷移に伴うエネルギーの放出は分子の熱運動として消費される。この色素で興味深いのは $S_1$ から $T_1$ への遷移が無視できないことである。この遷移確率が非常に小さいが、 $T_1$ より低い順位がトリプレット状態には無いので $S_0$ へ遷移することになるが、その確率はきわめて小さい。したがって、 $T_1$ 状態の分子が増え続けることになる。そこへ $T_1$ から $T_2$ への遷移を生じさせるような光を当てると効率良くこの光を吸収して $T_2$ へ遷移する。つまり、もしこの光がレーザー発振している光と同じ波長であれば、このレーザー発振光が色素の中で吸収されてしまう。これはレーザー発振の妨害となる。このため、色素レーザーは短い光パルスで励起されることがほとんどである。

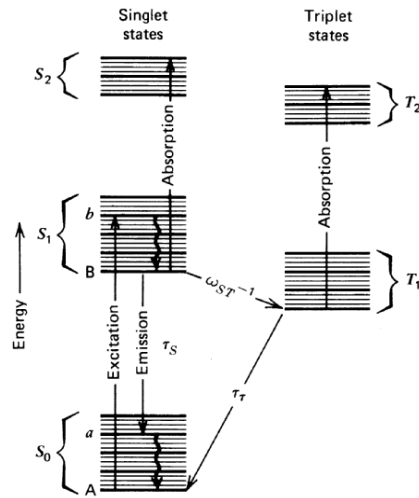


図1.4 ローダミン6Gのエネルギー順位図

短い光パルスで励起すればS<sub>1</sub>からT<sub>1</sub>への遷移が起こる前に色素レーザーの発振が終わってしまうので、吸収による問題が生じにくい。図 1.5 にローダミン6G の吸収と蛍光のスペクトル例を示す。このように、吸収スペクトルは蛍光スペクトルよりも短波長側にあり、一部蛍光スペクトルと重なっていて、これが原因で色素レーザー内で自己吸収を起す。

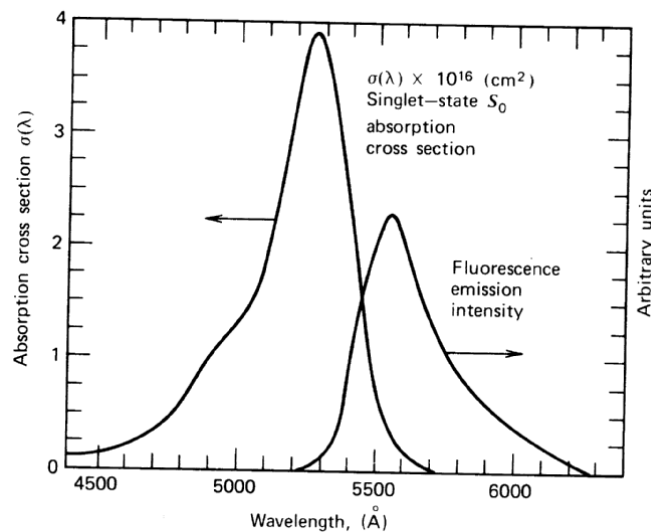


図1.5 ローダミン6Gの吸収および蛍光スペクトル

問 このように、レーザー発振のスペクトルが広い波長幅に渡っているとき、実際のレーザー発振はどの波長で生じるか、考察せよ。また、特定の波長を選んで発振させるにはどのような工夫が必要か。

問 S<sub>1</sub>からT<sub>1</sub>への遷移を確認する方法を検討せよ。

## 2. 実験

### 2.1 分光器の原理と黒体輻射光源の原理と、これを用いた分光器のキャリブレーション

目的：

分光器の原理を理解し、分光器を用いて得られたスペクトル強度分布を分光器および CCD の感度特性を考慮して校正する。これに必要な知識として分光器の標準光源によるキャリブレーション（校正）である。

用意するもの：分光器、標準光源、コンピューター

分光器：

グレーティング（回折格子）と呼ばれる光学素子を用いて光を波長ごとに分解する装置。グレーティングはミラー面に 1mm あたり 1000 本程度の溝を切ったものであり、ここに光が入射すると光の回折作用により、波長によって異なる方向へ反射される。グレーティングへの入射角を  $i$ 、グレーティングの法線から計った回折角を  $r$ 、波長を  $\lambda$ 、グレーティング溝間隔を  $d$  とすると、

$$\sin r = \sin i + \frac{m\lambda}{d} \quad 2.1$$

の関係がある。ここで、 $m$  は正負の整数であり、回折光の次数という。これをグレーティングの公式という。この原理を用いて光を波長ごとに分ける。波長ごとに分かれた光を検出するのが CCD という撮像素子である。この CCD から出力される画像データにスペクトル強度分布が入っていて、これをコンピュータで解析することでスペクトル強度分布を表示する。

標準光源：

標準光源とは、光源が放射する光のスペクトル強度分布がはっきりわかっている光源のことである。スペクトル強度分布は黒体輻射の原理に従っていて、光を放射している物体（黒体）の温度が決まれば、スペクトル分布が決まる。ここではプランク (M. Planck) の黒体輻射の公式を用いる。このスペクトル分布は次の式で与えられる。（プランクの黒体輻射の公式）

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad 2.2$$

これは、単位体積中に周波数  $\nu$  で周波数幅  $d\nu$  に含まれる光のエネルギー（エネルギー密度



のこと)は光の周波数と、光と相互作用している原子系の温度だけに依存することをしめす。エネルギー密度の周波数依存性つまりスペクトルを与える関数の形は温度が変わると変化する。このスペクトルの形は原子系と光の場が熱平衡になっているばあいに成り立つものであり、レーザー内部では全く異なるスペクトルを示す。白熱電球や太陽光の連続スペクトルは理想的な黒体輻射に近い。電球のフィラメントの温度は流れる電流で決まるので、通常は電球に流れる電流を指定してスペクトルを測定する。

(参考文献)

APL-84-22-4502-Generation of silicon nanoparticles via femtosecond laser ablation in vacuum

#### 方法：

標準光源から 1m の位置に分光器へ導入する光ファイバーの先端を置く。分光器をコンピュータの USB 端子に接続し、スペクトルを画面上に表示させる。標準光源の電流を所定の値にセットし、分光器からのスペクトルが飽和しないことを確認してデータを取り込む。もし、表示されているスペクトルが飽和するようであれば標準光源と分光器までの距離を調整する。データはメモリーに移す。実験としてはこれだけであるが、ここで標準光源を作っているメーカーが提供しているスペクトルデータを用いて、実験データを校正する。メーカーから提供されているスペクトルデータは米国の国立標準局 (National Bureau of Standard; NBS) の原器に照合して校正されている数値である。このスペクトルは電球が完全黒体であるとして、黒体の温度をプランクの黒体輻射の公式に与えることで求めることができる。

まず、メーカーから提供されているスペクトルデータをグラフ用紙にプロットする。次にプランクの黒体輻射の公式を探し出して適当な温度をセットしてプロットさせる。この作業に Excel を利用すると非常に便利である。メーカーから提供されているスペクトルを得るには温度を何度か設定すればよいか。これを求めるのにスペクトルの最大値を与える波長に注目する。この波長はやはり黒体の温度に依存しウィーンの変位則と呼ばれる。スペクトルのピークを与える波長がプランクの公式で計算されるスペクトルのピーク波長と一致するように温度を少しずつ変えてプロットしてみる。温度が求まったらプランク公式で得られる最大値を調整してメーカーから提供されているスペクトルと一致させることができる。

次に、分光器の感度の波長依存性を求める。今回測定したスペクトル分布は上述の方式で波長に対する関数として求まった。ところが、実際コンピュータ画面上に現れたスペクトルはこれとは異なる。その理由はグレーティングの回折効率が波長に依存することと、CCD 素子の感度が波長に依存するからである。したがって、分光器システムとして感度校正を行わなければならない。考え方としては、光源のもともとのスペクトルがわかっているから、実測されたスペクトルに波長ごとの適当なファクターを掛けて、実測さ

れたスペクトルを本来のスペクトルに直す。このときどのようなファクターを波長ごとに掛けたらよいだろうか。これが感度補正係数を与える。標準光源のスペクトルを  $f(\lambda)$ 、分光器の感度を  $g(\lambda)$ 、標準光源の実測スペクトルを  $h(\lambda)$  とすると分光器の分解能に比べてスペクトルが広い場合、

$$h(\lambda) = f(\lambda)g(\lambda)$$

が成り立つ。したがって、分光器の感度は

$$g(\lambda) = \frac{h(\lambda)}{f(\lambda)}$$

で求めることが出来る。この方式はしかしながら、 $f(\lambda)$  の値が小さく、相対的に誤差が大きいときは感度に大きな誤差を含むので注意しなければならない。これを使うと、ある実測されたスペクトルが  $h'(\lambda)$  であったとき、元のスペクトル  $f'(\lambda)$  は

$$h'(\lambda) = f'(\lambda)g(\lambda)$$

を用いて、

$$f'(\lambda) = \frac{h'(\lambda)}{g(\lambda)} = h'(\lambda) \frac{f(\lambda)}{h(\lambda)}$$

として求めることが出来る。

この方法を使って、ローダミン 6 G の吸収スペクトル、および蛍光スペクトルの本当の形を次に求める。

## 実験 2.2 ローダミン 6 G の吸収と蛍光スペクトルの測定

### 用意するもの：

分光器、標準光源、ローダミン 6 G、液体セル、YAG レーザーの 2 倍波、パソコン、メモリー

### ローダミン 6 G：

レーザー発振に用いる有機色素。緑色を吸収してオレンジ色で発光する。ローダミン 6 G は 1mg/l 程度の濃度でエタノールに溶かして利用する。少量ながら水にも溶け、エタノール雰囲気好ましくない環境では水が用いられる。(火災の危険性がある場合)

### 液体セル：

分光用の試薬を入れるガラス容器であり、今回は色素レーザー用のローダミン 6 G を入れる。レーザー共振器の中に入れてレーザー発振を生じさせるので、側面の平面性が良いも

のを使用する。

### YAG レーザーの 2 倍波：

YAGレーザーとは高出力レーザーの一種で、イットリウム・アルミニウム・ガーネットという結晶（透明なサファイヤに似た結晶）にネオジミウム(Nd)という原子をドーブしたものを光増幅媒体として用いるレーザーであり、最も使用頻度が高いレーザーの部類に属する。このレーザー媒質ではNd<sup>3+</sup>というイオンの原子エネルギー順位の一部がレーザーの反転分布の形成に使われる。色素の励起に使われるのは、YAGレーザーを**Qスイッチ**によりパルス発振させ、このとき発生する波長 1.06  $\mu$  m の光パルスの波長を半分にした 532nm の光（グリーン）を用いる。このように光の波長が半分となる新しい波長の光を **2 倍波** という。2 倍波とは文字どおり、光の周波数が 2 倍（波長は半分）となっている光のことである。レーザーからのビームをBBOとかKDPあるいはKTPと呼ばれる結晶を通すことで自動的に波長が半分の光を生成する。この効果を **2 次非線形効果** という。波長が 1.06  $\mu$  m (1060 nm) の光の 2 倍波は 532 nm のグリーンとなるが、波長 550 nm の色素レーザーの 2 倍波は 225 nm の紫外線となり、目に見えない。このような 2 倍波を得るためには、レーザービームと結晶軸との角度を的確にセットしなければならないが、この角度（**位相整合角**という）はレーザービームの波長に依存して決定される。また、2 次非線形効果を起すにはレーザービームの**パワー密度**が非常に大きくなければならない。たとえば、数 10 メガワット/cm<sup>2</sup> 程度が必要であり、レーザーをQスイッチによりパルス発振させることで**尖頭値**が非常に高いパルスが得られることから、このような非線形効果が可能となった。

問 パルスエネルギーが 10mJ でパルス時間幅が 10 ns (ナノ秒) である光パルスのビームの半径が 1mm ならば、この光パルスのパワー密度はどれだけか。

### 実験目的：

エタノール溶液に溶かしたローダミン 6 G の吸収スペクトルを測定する。さらに、蛍光スペクトルを測定する。

### 方法：

図 2.1 に示すように、標準光源からの光が色素セルを通して分光器に入るようにし、スペクトルを見る。標準光源と色素セルの距離を約 1m 程度にし、色素セルの後に分光器への入力用の光ファイバーを置く。

光ファイバーへの入力効率は光の入力方向に敏感なので、ファイバー端面を光軸と垂直にするように心がけること。分光器をパソコンの USB 端子に接続する。パソコン画面にスペクトルを表示する。ここで、標準光源の電球を流れる電流を所定の値にする。コンピュータ画面に現れるスペクトルを見て光の強度が適切かどうか判断し、標準光源とローダミ

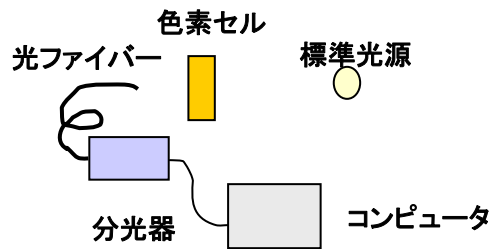


図2.1 色素の吸収・蛍光スペクトル測定

ン6 G の距離を調整する。スペクトル強度分布をコンピュータに取り込み、データをメモリーに移す。標準光源はスペクトルを測定するときだけ点灯し、つけっ放しは絶対行わないようにすること。

次に、ローダミン6 G の蛍光スペクトルを測定する。上述の配置において、今度は分光器への入力用ファイバーを色素セルの側面に近づけ、標準光源とセルを結ぶ線と垂直にファイバーを置く。標準光源からの光がファイバーに入らないようにし、色素からの蛍光を測定する。蛍光スペクトルが弱すぎるようであれば、標準光源を近づける。このようにして得られたスペクトルは標準光源の光（連続スペクトル）で励起されたローダミン6 G が放射する蛍光である。比較のために、今度は YAG レーザーの第2高調波（グリーン）でローダミン6 G を励起し、そこからの蛍光スペクトルを測定する。各実験サイトへグリーンビームが届いているので、このビームを色素セルに通す。グリーンビームと垂直の方向から分光器で色素の蛍光を測定する。色素を標準光源あるいは YAG レーザーの2倍波で励起したときの蛍光スペクトルは異なるか確認する。

問 蛍光スペクトルと吸収スペクトルをテキストの図と比較しなさい。

問 標準光源と YAG 2倍波で色素を励起したとき、蛍光スペクトルに相違があるか。あるならばその理由は何か。

### 2.3 レーザーの構成と使用する光学部品の機能の理解およびアルミメッキ鏡の作成

#### 実験の目的：

この実験コースでは、ローダミン6 G を用いたレーザーを組み立てる。そのために必要な部品についての機能を学ぶ。その一環としてアルミメッキミラーを作成する。

#### 必要な部品：

ローダミン6 G のエタノール溶液、レーザー用ミラー、ビームスプリッター、ミラーマウン

ト、シリンドリカルレンズ（円柱レンズ）、アルミメッキ鏡、ガラス板

#### ローダミン6Gのエタノール溶液：

粉末のローダミン6Gをエタノールに溶かした溶液で、最大濃度が  $X\text{mg/l}$  であり、今回はこの濃度のものを使用する。

#### レーザー用ミラー：

Nd：YAG レーザーの2倍波（グリーンビーム）を90度の方向へ折り返すためのミラーであり、屈折率の異なる複数の誘電体膜を交互につけてある（誘電体多層膜）。ある波長の光がミラーに入射したとき、この多層膜による多重反射が90度方向の反射光に対して強め合う干渉をするとき、90度方向へ高い反射率を示す。

#### ビームスプリッター：

誘電体多層膜で形成されるミラーであるが、90度方向への反射率が50パーセントになるように設計されているもの。残りの光は透過する。反射率をいろいろな値に取れるように設計することが出来る。

#### ミラーマウント：

ミラーを乗せるマウントであり、方位角や伏角が微調整できるものもあり、微妙な角度調整を必要とする場合に用いる。

#### シリンドリカルレンズ：

丸い球面レンズと異なり、一方向だけに曲率を持つレンズであり、レーザービームを直線状に集光するのに用いる。乱視用の眼鏡にも用いられる。

#### アルミメッキ鏡：

ガラス表面にアルミニウムを  $1\ \mu\text{m}$  程度の厚さに蒸着して作ったミラーで、本実験ではレーザーの共振器を構成する。

#### 実験方法：

まず、色素レーザーの共振器を作るために薄いガラス板（プレパラートガラス）の表面にアルミニウム薄膜をつけて全反射ミラーを作成する。そのためには、真空蒸着装置を用いる。真空蒸着装置とは、真空チェンバーの中でアルミニウムなどの金属を溶かし、蒸発させることでガラスなどの基板表面に金属薄膜を形成する装置である。真空チェンバーを真空にするための真空ポンプが装備されている。金属を溶かすためのヒーターとして

通常は小さなタングステンのボートを使い、ボートの中に金属片をいれて 50A 程度の電流を流す。このとき、**タングステンボート**は赤熱し金属が短時間で溶融沸騰するのが見える。この溶融金属の上方に薄膜を**蒸着**する基盤を置く。蒸着は 1~2 分程度で完了する。真空チェンバーの内部はこの加熱によりかなりの高温になっているので、数 10 分ほど冷やしてから真空チェンバーをあけ、蒸着されたミラーを取り出す。

次に色素レーザーの組み立てに入る (図 2.2 参照)。まず、グリーンビームが実験サイトに届いていることを確認する。このグリーンビームをシリンドリカルレンズを通し、焦点の位置を調べる。このとき、5cm 角の白紙を用いるとよい。レーザーの実験ではこのような白紙を多用するので準備して欲しい。色素セルに色素溶液を注射器で注入し、直径 12mm のアルミ丸棒に両面接着テープでしっかり貼り付ける。色素セルの側面からグリーンビームを入射するが、セル側面がレンズの焦点から約 5cm ほどのところに来るように配置する。レンズとセルの距離はあとで調整する。次にグリーンビームと垂直方向で色素セルを中間に置く形で共振器を構成する。共振器の一つのミラーは反射率 99 パーセント以上のアルミ蒸着ミラーであり、もう一つのミラーは反射率 50 パーセント程度のものを用いる。

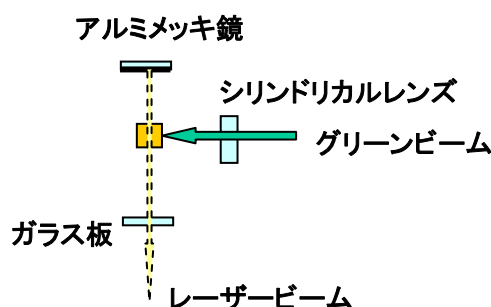


図2.2 色素レーザーの組み立

この構成をレーザーとしての観点から眺めてみよう。まず、色素セルの中でグリーンビームが当たっている部分は直線状であり、色素が励起されていて反転分布が生じている。したがって、この部分が利得媒質となる。共振器ミラーで囲むと共振器の光軸方向で光が往復し、この増幅部分を通過するたびに光の強度が増大する。その結果レーザーが発振する。レーザーとして発振させるためにはこの 2 枚の共振器ミラーをうまく調整しなければならない。うまく調整するという事は、ミラーで反射した光が利得媒質を通ってもう一方のミラーで反射し、正確に元に戻ることである。

問 共振器をうまく調整するにはどのような方法があるか独自に思考錯誤しなさい。

## 2.4 色素レーザーの組み立てと発振実験

### 目的：

レーザー発振に挑戦する

### 方法：

色素レーザーの組み立てが終わったら、発振実験に入る。まず、グリーンビームのパワーを少しずつ増大し色素から放射されるオレンジ色の蛍光を確認する。共振器ミラーを目測で平行にし、鏡面に対し垂直な直線上に色素の励起された部分が位置するようにする。つぎに、高反射率ミラーの角度を調整して色素からの蛍光が発光部分に戻るよう調整する。ここで、もう一方の共振器ミラーである部分反射ミラーの角度を調整して反射光が利得媒質へ戻るようにする。次に、高反射率ミラーで反射された光が反対側の部分反射ミラーへ正確に戻るよう調整する。部分反射ミラーを透過するオレンジ色の蛍光を白紙に当てて見ながらこのような調整作業を根気良く続けると、運がよければ比較的短時間で蛍光の中にオレンジ色の輝点が現れる。これがレーザービームであり、このときレーザーが発振したといえる。なかなか発振まで到達しなければ、グリーンビームのパワーを少しずつ上げながら共振器を調整する。

発振が確認されたなら、共振器の高反射ミラーと色素セルの間に紙を差し込んで発振を止め、共振器の部分反射ミラーから透過してくる光を白紙に当てて目視する。このとき見えるぼんやりした光は色素が放出する蛍光である。ここで、差し込んだ紙を取り去ると明るい輝点が現れることを確認する。

**注意** 絶対に蛍光やレーザーの光を直接目に入れないように注意すること。

## 2.5 レーザービームと ASE,および蛍光のスペクトル測定

### 目的：

光を増幅する機能を持つ色素が放射する蛍光を測定し、励起パワーを増大すると**反転分布**が生じ、誘導放射による光の増幅機能が出ることを確認する。また、光が増幅効果を多数回受けることでレーザービームのスペクトルが狭くなることを確認する。

### 実験方法：

色素レーザーをグリーンビームで励起し、レーザー発振が可能な状態にする。次に、2枚の共振器ミラーと色素の間に紙を差し込み、レーザー発振が行われないようにする。分光器の入力用光ファイバーを色素セルと共振器ミラーの間に置き、グリーンビームのパワーをゼロまで落とし、少しずつパワーを上げながら蛍光スペクトルを測定する。

グリーンビームのパワーを上げていくと、広い蛍光スペクトルに細く鋭いスペクトルが現れる。グリーンパワーを上げていくと、この細いスペクトルが強くなり、ほとんどがこのスペクトルとなる。この状態は光が誘導放射により増幅されていることを示す。誘導放

射は色素が持つ広いスペクトルのある波長で生じ、一度その波長で誘導放射が行われれば、もっぱらその波長でだけ誘導放射が進行する。どの波長で誘導放射が始まるかは、レーザー共振器内部の損失、および増幅率（利得）のバランスできまり、トータルとしての利得が最も高い波長で誘導放射が始まる。一度、ある波長で誘導放射が始まったら、励起パワーを上げてその波長だけで誘導放射が生じるのは、色素が持つ広いスペクトルが“均一広がり”というメカニズムの基づくからである。このように、レーザー媒質の中で自然に生じた光（蛍光）がレーザー媒質の中で増幅されて出てくる光を **ASE (Amplified Spontaneous Emission)** という。

次に、共振器を用いて色素レーザーを発振させ、レーザービームのスペクトルを測定する。このときのスペクトルは更に狭くなっていることを確認する。この、**スペクトルの狭帯域化**は、光が共振器内を何度も往復することで増幅が繰り返されることによる。

実験データのまとめ方としては、励起パワーを変えて色素からの蛍光スペクトル群を一枚の紙に描き、励起パワーの変化に対してスペクトルがどのように変化するかが見えるようにする。それに、レーザーのスペクトルを付け加える。

## 2.6 レーザービーム、ASE、および蛍光のコヒーレンス測定

### 目的：

光は波なので干渉すると言われているが、厳密に考えると干渉効果が時間的にゆっくり変化する場合と非常に早く変化する場合がある。光が干渉していると言われるのは、この干渉効果が非常にゆっくりと変化し、人の目や計測機器で十分認識できる場合のことである。たとえば、2つの平面波が少し違う角度で進んでいて、お互いに干渉している場合を考える。ここで、互いに強めあうところには干渉による明るい線が、また弱めあっているところでは暗い線（節）が出来るのはおなじみのことであろう。ところで、もしこの2つの波の位相がめまぐるしく変化し、2つの波の位相変化に相関が無いとする。この場合はどのような干渉が人の目に見えるだろうか。単純に考えると明るい線の位置と暗い節の位置が目まぐるしく変化し、人の目ではこの縞模様が認識できないと考えられる。これが、干渉していない状態である。この干渉する能力と言う意味で、自然光（蛍光）とASEやレーザービームが著しく異なる性質を有する。

レーザービームでは波としての位相変調が自然光に比べ、非常にゆっくりしている。その理由は、自然光は原子や分子などが独立に光子（振幅の小さな局在した光の波）を放出し、これらが重なりあって目に見える光波となる。光子同士に相関がないので、位相がまちまちであり、したがってこれらの光子を重ねた波の位相が目まぐるしく変化している。この位相の時間的あるいは空間的な不規則な変動（つまり、位置を固定して波の位相の時間的変化を見たときの不規則さ、および時間を固定した場合での位相変化の空間分布の不規則さ）が大きいとき Yang の干渉実験ではどのように見えるであろうか。



Yang の干渉実験では近接した複スリットに光を当て、複スリットを抜けてくる光を白紙に当てて、そこに形成されるパターンを見る。もし、複スリットの各々から出てくる光が、きちんとした波（位相が一定の割合で変化する波、たとえば  $\sin \omega t$  のようなもの）なら、白紙上には干渉縞が形成される。つまり、強め合う場所と弱めあう場所が時間的に変化しない。ところが、位相が不規則にしかも高速で変化する場合、複スリットの各々から出てくる波の位相には相関が無い。このような波が白紙上で重なると、強め合う位置、あるいは弱めあう位置が目まぐるしく変化し、目には干渉縞は認識されない。これが干渉していないといういい訳である。この場合、もし、光をあらかじめ一つのスリットを通し、さらにそれに続いて複スリットを通したとする。最初のシングルスリットを通った波は球面波として出て行くが、位相の時間変動は不規則である。しかしながら、空間的には位相の分布（山や谷の位置）は球面の形をしているので空間的な位相分布ははっきりしている（相関が高い）この波が、複スリットに当たると、複スリットの各々から出てくる波の位相はお互いに強い相関がある。したがって、複スリットの後に置かれた白紙上に干渉縞が現れる。ここで、仮に、シングルスリットから複スリットの各々までの距離が等しいとする。そうすると、片一方のスリットに到達する波が山するとき、もう一方のスリットへも山が到達している。そうすれば、二つのスリットから出てくる波は位相がそろっている。ただしこの場合、穴を光が通ると光の位相が変化するので、この瞬間に山が両スリットから出るとは限らない。波の位相は谷になっているかもしれない。ただし二つのスリットでの位相は同一であるはずである。さらに、もしシングルスリットから複スリットの各々までの距離が少し違って、片一方に山が来たとき他方に谷がきたとしよう。このとき、両スリットから出てくる波は位相が  $\pi$  の奇数倍だけ異なっている。ところが、この位相の差は時間が経過しても変わらないので白紙上にはやはり干渉縞ができるが、前回（等距離の場合）とは微妙に異なる位置に出来る。ここで、さらに考察を進めよう。シングルスリットと複スリットの各々までの距離の違いを更に大きくしたらどうなるだろうか。このとき、ある瞬間に複スリットの一方に山がきて、他方にも山がきたとする。それから時間が経過し一方に山が来たとき、かならずしも他方にも山がくるとは限らない。その理由は、シングルスリットから出てくる波は、波の進行方向からみると位相が不規則に変化している。ところで、単スリットから複スリットの各々までの距離が異なれば、各々のスリットに到達する波の位相について互いに相関が無くなるからである。したがって、位相のそろっていない自然の光をシングルスリットを通したあとで複スリットをとおしても、シングルスリットと複スリットの各々までの距離の差が大きくなると干渉縞がぼけてくる。

話を複スリットだけの場合に戻そう。複スリットのスリット間隔を狭めた場合、自然の光でも白紙上で干渉縞が見え始める。自然光の位相は空間的に相関が無いと説明したが、厳密にはきわめて近い距離では相関があり、無限に近い距離では相関が 100 パーセントになる。その理由は、光は波であり、波動方程式にしたがって空間を伝わることに起因する。波である以上、波長程度に離れた空間の 2 点で位相がはっきり相関されていなければなら

ない。そうでなければ、波として伝わらないというのである。光のコヒーレンスに関しては参考文献 (2) に詳しい説明が載っている。

いままで、自然光の話をしてきたが、ASE の場合はどうであろうか。ASE とはレーザー媒質のどこかで生じた蛍光光子が誘導放射で増幅されたものである。誘導放射で新たに生成される光子は、これを引き起こした光子の特性をすべて継承している。それは、波長、偏光、位相などである。したがって、誘導放射された光子は同じ波長、偏光、および位相を持っている。光子が次々と誘導放射で増幅されると、その結果である ASE は単一の波長、偏光、位相を持つ。したがって、高い位相相関を持つ光波が生成される。同様に、レーザーは何回も増幅媒質を通過し、また共振器のミラー間で反射されるにつれて最適な波面の波だけが生き残るので、空間的な位相の相関は向上する。

ここまで述べてきた、光波の位相の空間的相関を空間コヒーレンスと呼ぶ。また、空間の一点で光波の位相を測定したとき、ある時間間隔を置いた位相の相関を時間コヒーレンスと呼ぶ。空間コヒーレンスは相関を求める二つの点の位置と間隔の関数であり、時間コヒーレンスは相関を取る時間間隔の関数である。更に付け加えるならば、コヒーレンスというのは波動場の 2 つの時空 (空間座標と時間) 点で計測した波動の相関である。

#### 実験方法：

近接した 2 つのスリットからなる複スリットを作成し、色素の蛍光を発する部位から少し離れた場所に置き、スリットを通ってくる光を白紙に当てて、どのようなパターンが出来るか目視する。次に、白紙の位置に CCD カメラを置いて画像を計測する。同様に、複スリットに ASE およびレーザービームを当てて、透過する光のパターンを白紙上に形成し、目視で観察した後、CCD カメラで画像として測定する。干渉縞が記録できたら、干渉縞の化視度を測定する。干渉縞の強度が極大となっているところの明るさを  $I_{\max}$ 、極小となっているところの明るさを  $I_{\min}$  としたとき、可視度 (Visibility) を

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2.1$$

で定義する。V が大きいとき、空間コヒーレンスが高い、つまり、干渉性が高い光といえる。各測定について可視度を求めよ。

## 2.7 蛍光、ASE、およびレーザーパルスのパルス幅測定

### 目的：

グリーンレーザーパルスで励起された色素分子が放出する蛍光と、色素がレーザー発振したときのレーザーパルス時間波形を比較し、レーザー共振器内で光が蓄積される過程を計測する。

### 使用する装置：

色素レーザー一式とフォトダイオード

**フォトダイオード：**半導体の PN 接合を利用し、フォトンが当たると自由電子とホールが生成し、その結果電流が流れることで光強度を計測する素子。詳しくは半導体の教科書を参考にすること。

### 実験の方法：

パルス時間幅の測定のために、フォトダイオードで光強度を測定する装置を作る。フォトダイオードは電池で駆動する事とする。簡単な回路図が支給されるのでそれに基づき、回路を構成する。まず、アルミニウムの板で出来た箱（回路の分野ではシャーシという）にフォトダイオードをつける穴を開ける。さらにスイッチと **BNC コネクタ**をつける穴を開ける。穴は**電気ドリル（卓状ボール盤**という）であけ、フォトダイオードは箱の内側から接着剤で貼り付ける。このとき、フォトダイオードの光を受けるガラス面を汚さないようにする。フォトダイオードのピンを適当な長さに切り、電池、**負荷抵抗（ふかていこう）**、BNC 端子を導線で結合する（配線するという）フォトダイオードの足と BNC コネクタは **BNC ケーブル**でつなぐと良い。アルミニウムシャーシの中でも非常に短い電気パルスの伝送には BNC ケーブルを用いると周波数特性が良くなる。

このようにして作ったパルス波形測定器を、フォトダイオードの受光面が測定対象の方を向くようにして固定し、BNC 端子をオシロスコープに接続してパルス波形を計測する。パルス波形をオシロスコープで測定する際、オシロスコープの**入力インピーダンスを 50Ω**にし、**パルスの最大電圧が 5V を超えない**ようにフォトダイオードの位置を調整する。

レーザー共振器に紙を差込んでレーザー発振を止め、グリーンビームのパワーを最小から徐々に上げていき、蛍光のパルス波形を測定する。同様のことを ASE およびレーザーパルスに対しても行う。レーザー共振器ミラーの間隔を変えてレーザーパルス波形とパルス時間幅の計測を行い、共振器長とパルス幅の関係をグラフに書く。オシロスコープのデータはコンピュータに取り込み、最終的にフロッピーディスクに記録する。コンピュータを介して得られるすべてのデータを、インターネットを通して各実験者のアカウントへ収納するのが理想的である。

問 励起パワーを増大すると蛍光のパルス波形はどのように変化するか。レーザー共振器長とレーザーパルス時間幅の関係についてグラフが意味するものは何か。その理由を考えよ。

## 2.8 レーザー波長の可変性について

### 目的：

レーザー増幅媒質の利得スペクトル幅内で、任意の波長でレーザー発振が可能であることを体験し、発振波長は共振器内での総合利得 (total gain) が最大である波長で発振することを納得する。

### 用意するもの：

レーザーシステム一式、回折格子またはプリズム

### 実験方法：

レーザーシステムを組み上げ、レーザー発振状態にする。その後、部分反射ミラーをはずし、回折格子をミラーの位地に置く。回折格子に入射する光の入射角を  $i$ 、回折角を  $r$ 、光の波長を  $\lambda$ 、格子定数 (格子の間隔) を  $d$  とすると、光が回折する角度は

$$\sin r = \sin i + \frac{m\lambda}{d} \quad 2.1'$$

で規定される。ここで  $m$  は整数であり、 $m=0$  で与えられる回折角  $r$  は入射角  $i$  と等しく、鏡面での反射と同じ方向へ光は進む。つまり、鏡面反射での反射の法則である。この回折光を 0 次回折光という。また、 $m=1$  に対応する光 (1 次回折光という) は 0 次回折光より大きな回折角  $r$  で出ていく。他方、 $m=-1$  に対応する光 (-1 次回折光という) は 0 次回折光より小さな回折角  $r$  で出て行く。ところで、入射角  $i$  は  $0 < i < \pi/2$  の任意の角度に取れるので、ある入射角  $i$  で -1 次回折光がマイナスの回折角  $r$  で出て行くことになる。マイナスの回折角というのは回折格子面に立てた法線に対し、入射光線の側へ回折する角度のことである。このように考えると、 $r=-i$  であるような入射角  $i$  を見つけることができる。実際、 $\sin r = \sin(-i) = -\sin i$  として、上式に代入すると、

$$\sin i = \lambda/2d \quad 2.3$$

で与えられる入射角  $i$  の時に  $r=-i$  となり、-1 次回折光は入射光と全く逆方向へ進む。このような入射角をリトロー角 (Littrow's Angle) という。リトロー角は波長に依存する。したがって、レーザー共振器の一つのミラーを回折格子として、リトロー角で回折された光が共振器内を往復するようにすれば、レーザーの発振波長を選択的に固定できる。この波長をリトロー波長という。回折格子とミラーで共振器を構成できたなら、回折格子を少しずつ回転させて入射角を変化させると、リトロー条件を満たす光の波長が変化し、レーザー発振波長が変化する。このようにして、レーザー発振波長を選択する方法をレーザーの波長チューニングという。このようなレーザーを波長可変レーザーという。レーザーの利得媒質はかならず増幅可能な波長幅を持っている。レーザー色素はそのなかで特にひろ

いスペクトルバンド幅を持つ。

本実験では、入射角をいろいろ変えてレーザーの発振波長を測定し、グラフを書いてみる。また、スペクトル線の強さから、チューニング波長に対するレーザー光の強度をプロットし、最大のレーザー出力を得る波長を見つける。その波長はレーザーの利得スペクトルのピークを与える。このプロットは色素の蛍光スペクトルと類似しているが、それ以外のファクターである共振器内部損失などが重なっている。

## 2.9 レーザー増幅について

### 目的：

レーザー媒質が持っている光増幅機能を体験する。

### 用意するもの：

波長チューナブルレーザー発振器、レーザー増幅器、分光器

### 実験方法：

波長チューナブルにしたレーザーから出力されるレーザービームを、2枚のミラーで反射させて、もう一台のレーザー増幅器へ注入する。このとき、レーザー増幅器の色素を YAG2 倍波で直線状に励起して、利得部分を直線状に形成し、この直線に沿ってレーザービームを入力する。注入するレーザービームをうまくレーザー増幅部分を通すために、2枚のミラーが必要であること理由を考えて、実施する。

この実験では、波長チューナブルレーザーの発振波長を何種類かに変え、増幅されたビームのスペクトルを計測する。手順としては、まずレーザーの波長を固定して、レーザー出力光のスペクトルを計測する。つぎに、レーザービームを注入して、増幅されたビームのスペクトルを計測する。分光器をそのままにして、注入ビームを遮断し、増幅器からの ASE のスペクトルを計測する。両者の間に明確な違いがある。この作業を注入ビームの波長をいくつかに変えて行う。注入するビームの波長と増幅されたビームの波長を比べ、相違点を確認し、その理由を考察すること。

### 参考文献

- [1] A. V. Yariv, 光エレクトロニクスの基礎、丸善
- [2] J. W. Goodman, Statistical Optics, John Wiley & Sons 1985  
(日本語訳 統計光学)