

# 分光測定のコツ Tips for spectroscopic measurements

佐藤 勝昭  
Katsuaki SATO

独立行政法人科学技術振興機構  
Japan Science and Technology Agency  
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ  
Science Plaza, 5-3, Yonbancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8666  
e-mail: katsuaki.sato@nifty.com  
分類番号: 6.8, 6.6

物性評価に最もよく使われる分光測定について、そのコツをやさしく解説します。前半は、市販のダブルビーム分光光度計を用いて半導体の光吸収スペクトルを測定するときに注意すべきこと、および、データ処理のノウハウについて述べます。後半では、光学コンポーネントを実験室レベルで組み合わせて測るスペクトルの例として、フォトルミネセンス測定のコツを紹介いたします。

Keywords: double-beam spectrophotometer, mask for small samples, stray light, correction for interference fringes, reflectance, photoluminescence, photomultiplier

## 1. まえがき

物性評価の手段として、最もよく使われるのが光スペクトルの測定です。光スペクトルと一口に言っても、光透過、光吸収、光反射、光散乱、発光、光音響、光熱偏向、光電子、逆光電子、オージェ電子、XAFS、磁気光学、光検出磁気共鳴など多岐にわたります。

今回は、このうち、前半では、ほとんどの研究機関にあるダブルビーム分光光度計の仕組み、および、これを用いて光吸収スペクトルを測定するときの注意事項について述べます。後半では、フォトルミネセンス (Photoluminescence: PL) スペクトルを測定するための各コンポーネントの要点を述べ、それらを組み合わせて測定系をセットアップするためのポイントを紹介いたします。

## 2. ダブルビーム分光光度計を用いた分光測定<sup>1~3)</sup>

ほとんどの研究機関には共同利用設備として紫外-可視-赤外分光光度計が設置されています。これを使えば、光吸収スペクトル、反射スペクトルなどが非常に簡単に測定できるので、材料研究者の多くが用いています。ここでは、分光光度計を用いてよいデータをとるための基本的な注意事項とコツを述べます。

まず、はじめに分光光度計の仕組みを理解しておきましょう。図1に示すように、分光光度計は、光源、分光器、測定室(ダブル

ビーム光学系)、光検出器から構成されています。

ダブルビーム光学系とは何でしょうか? 光源の強度・分光器の出力・検出器の光電変換特性のいずれも強い波長依存性をもっており、光源には時間的な変動もあるので、光を2つの光束(ビーム)に分け、回転するセクタ鏡によって交互に試料光と対照光に切り替え、対照光に切り替わったときの光強度を補正に用いることによって、光学系がもつ分光特性および変動を補正して試料のみの分光特性を求めています。試料光、対照光ともにビーム径は10 mm程度あります。

この補正メカニズムは、試料がビームをフルに使っていて、光のパスに折れ曲がりがない場合のみ正確に働くように調整されているということを知っておきましょう。

### 2.1 光ビームより小さな寸法の試料の測定

研究室で得られる試料はあまり大きくないことがしばしばです。例えば、気相化学輸送法で作った半導体の単結晶は1辺が2 mmの多面体なんてことが普通です。そんなときには、図2に示すように、穴のあいたマスクに試料を貼り付けて、試料室において測定します。同じ大きさの穴のあいたマスクを用意して対照光側に置きます。マスクは銅板やアルミ板に精密加工用のドリルで穴をあけ、つや消しスプレーなどで黒く塗っておきます。穴をあけた後、バリを丁寧に

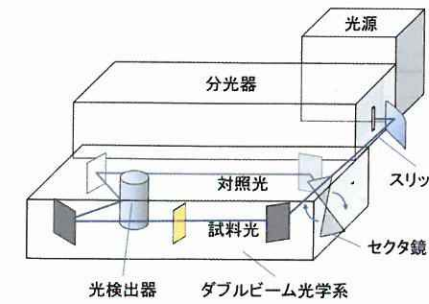


図1 ダブルビーム分光光度計の仕組み。



図2 小さな試料を測るためのマスク。

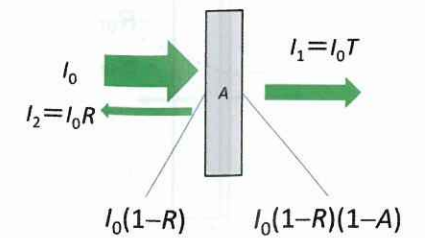


図3 反射と透過の説明図。

取り除いておきましょう。

試料をつける前に、穴の大きさが等しい2枚のマスクを試料光側と対照光側に置き、透過率がほぼ1で一定となっていることを確認しておきます。

### 2.2 バルク試料の研磨のしかた

分光光度計の通常の測定で正しく測れるのは直進透過光だけです。光が拡散する試料や、光路が曲がる試料は測定できません。したがって、測定する試料の表面・裏面は平行でかつ散乱を防ぐために、光学的に平坦になるよう研磨しなければなりません。

どの程度の平坦さが要求されるのでしょうか? 一般には、平均粗さRaが測定する波長の1/10程度、したがって、波長500nm付近の測定ではRa=0.05μm程度に研磨することが望ましいということです。

ダイヤモンドペーストで、予備研磨(#600~#1800)→精密研磨(#3000~#8000)→鏡面研磨(#14000~#60000)と順番に仕上げていきますが、市販されている研磨用ラッピングフィルムシートを何種類か用意して研磨する方法が簡単で、おすすめです。研磨用の治具に3個くらいの試料を貼り付けて研磨すると、表面と裏面が平行になります。

### 2.3 透過測定用試料の最適厚さは?

ある媒体の吸収係数を $a$ とすると、光が媒体中を $1/a$ だけ進んだときの光の強度は、入射した光の強度の $\frac{1}{e} \approx 0.37$  ( $e$ は自然対数の底)に減衰します。吸収率 $A$ と吸収係数の関係は、媒体の厚さを $d$ とすると、

$$1 - A = e^{-ad}$$

です。分光光度計で測定できる $1 - A = \frac{I}{I_0}$ の最小値は0.0001程度なので、吸収係数 $a$ を求めるには、

$$e^{-ad} = 10^{-4} \text{より、} d = \frac{4}{a \log_{10} e} \approx \frac{10}{a} \text{以下でなければなりません。}$$

半導体のバンドギャップを $(ah\nu)^2 - h\nu$ プロット(直接遷移)あるいは $(ah\nu)^{\frac{1}{2}} - h\nu$ プロット(間接遷移)を使って決めるには、 $a$ が $1 \sim 10^6 \text{ cm}^{-1}$ にわたる広い範囲の吸収スペクトルが必要ですが、1つの試料で全範囲を測定するのは無理です。例えば $a=1$ 付近は1 cm程度、 $a=100$ 付近は1 mm程度、 $a=10000$ 付近では0.01 mm程度と、いくつか厚さの試料を用意しなければなりません。0.01

mmの厚さになると研磨では難しいので薄膜試料についてのデータが必要ですが、薄膜の物性はバルクと異なることが多いので注意が必要です。

### 2.4 反射の補正

波長程度の厚さをもつ試料の透過率スペクトルには、多重反射と干渉のため、干渉縞が現れます。どうやれば、このスペクトルから干渉縞を取り除いて本来のスペクトルを求めることができるでしょうか?

図3において、試料の透過率を $T$ 、反射率を $R$ とし、散乱を無視すると、 $I_1 = I_0 T$ 、 $I_2 = I_0 R$ 、試料内部を通過する光量は、 $I_0 - I_2$ なので、吸収率を $A$ とすると、 $I_1 = (I_0 - I_2)(1 - A)$ 、これより $1 - A = \frac{T}{1 - R}$ となります。したがって、透過率 $T$ と反射率 $R$ のスペクトルがわかれば、 $T$ を $1 - R$ で割ることで、たとえ干渉縞があつたとしても補正できるのです。反射率スペクトルの求め方は2.6節で説明します。

媒体の厚さを $d$ 、吸収係数を $a$ とすると、 $A = 1 - e^{-ad}$ なので、吸収係数は、

$$a = \frac{\log_{10}(1 - R) - \log_{10} T}{d \log_{10} e}$$

の式で求めます。

### 2.5 薄膜試料測定<sup>4)</sup>

実際の薄膜は何らかの基板の上に成長させます。基板に薄膜が堆積した試料の透過率 $T$ を測定し、基板のみの透過率 $T_0$ で割れば薄膜の透過率が求められるでしょうか? 答えはNOです。

図4に示すように、薄膜(厚さ $d$ 、屈折率 $n$ )がついてガラス基板(屈折率 $n_0$ )に光が垂直入射した場合の多重反射・干渉を考慮した反射率 $R$ 、透過率 $T$ は、

$$R = \frac{R_{01} + R_{12} + 2\sqrt{R_{01}R_{12}}\cos\varphi}{1 + R_{01}R_{12} + 2\sqrt{R_{01}R_{12}}\cos\varphi}$$

$$T = \frac{(1 - R_{01})(1 - R_{12})}{1 + R_{01}R_{12} + 2\sqrt{R_{01}R_{12}}\cos\varphi}$$

で表されます(膜の吸収は考慮していません)。ここに、

$$R_{01} = \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2, R_{12} = \left(\frac{n-n_0}{n+n_0}\right)^2, \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} nd$$

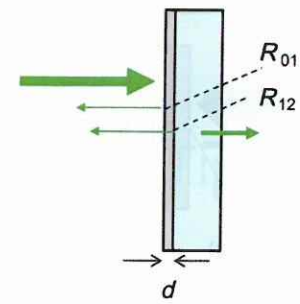


図4 基板上につけた薄膜の反射と透過。

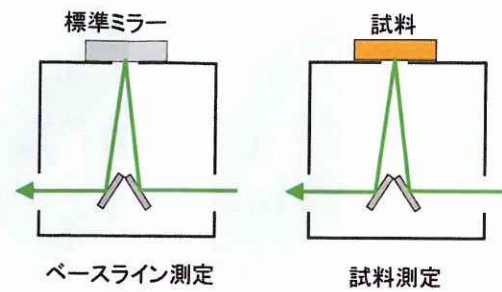


図5 反射率測定アタッチメントの概略図。

一方、基板だけの透過率 $T_0$ は、

$$T_0 = (1 - R_{02})^2 \quad \text{ここに、} R_{02} = \left( \frac{1 - n_0}{1 + n_0} \right)^2$$

なので、 $\frac{T}{T_0}$ を求めても、膜の透過率にはなりません。

上に述べた式では、薄膜の吸収を考慮していませんでした。膜の吸収係数を $a$ とすると、膜をつけた試料の透過率 $T'$ は近似的に次式で表されます。

$$T' = \frac{(1 - R_{01})(1 - R_{12})e^{-ad}}{1 + R_{01}R_{12}e^{-ad} + 2\sqrt{R_{01}R_{12}}\cos\phi e^{-2ad}}$$

膜が十分厚くて干渉を考えないときは、

$$T' = (1 - R_{01})(1 - R_{12})e^{-ad}$$

$R_{01}$ は試料の反射スペクトルを測定すればよいのですが、 $R_{12}$ は試料と基板の界面の反射率なので両方の屈折率が必要です。基板についてはデータベースが利用できますが、膜の屈折率については、分光エリプソメータなどを使って求めておく必要があります。

### 2.6 反射スペクトルの測定

分光光度計には、図5に示すような反射のアタッチメントが用意されています。ミラーで試料にほぼ垂直入射するように光ビームを導き、反射光ビームをミラーで検出部に導いています。

測定は、はじめに標準ミラーの反射スペクトルをとっておき、次にこれをベースラインとして、試料の反射率スペクトルを測定します。得られたデータは、あくまで標準ミラーに対する相対値です。通常、標準ミラーとしては、保護膜をつけたアルミが使われます。アルミミラーは800 nm付近に明瞭なディップがありますから、標準ミラーのスペクトルをデータベースから求め、これを使って補正しなくてはなりません。

### 3. 光学コンポーネントの組み合わせで測る分光測定

半導体中の不純物や真性欠陥の評価のために最もよく使われるのがPLスペクトルです。

PL測定系は、図6に示すように、励起光源、試料冷却系・集光系、分光器、光検出系から構成されます。

多くの研究室では、光学定盤の上に、光コンポーネントを並べたいわゆるバラックセットで、PL測定をしています。しかし、各光学コンポーネントの知識なしに使っている場合が多いかと存じます。以下では、コンポーネント別に、原理に立ち返りながら、注意すべきポイントを述べ、その後測定目的別にシステムについて述べます。

#### 3.1 分光器

図7はよく使われるツェルニ・ターナ型回折格子分光器の仕組みです。入射スリットS1から入射した光は、コリメータ鏡M1で平行光線とした光を平面回折格子Gに入射させ、回折した光のスペクトルを集光鏡M2で出射スリットに結像します。

以下に、分光器を使うときの注意点を述べます。

①分解能は焦点距離と回折格子の刻線数で決まる

まず分解能ですが、スペクトル幅 $\Delta\lambda$ と出射スリット幅 $s$ との関係は、次式で示されます。

$$\Delta\lambda = \frac{\cos\theta}{fm} s$$

ここで、 $\theta$ は入射角、 $f$ は集光鏡の焦点距離、 $m$ は単位長当たりの刻線数、 $i$ は回折次数です。例えば焦点距離 $F=500$  mmの分光器において刻線密度 $m=1200$ 本/mmの回折格子を1次で用いる回折角 $\theta=15^\circ$ の分光器においては、 $\Delta\lambda=1.61 \times 10^{-3}$  nmとなります。スリット幅が0.1 mmのとき、 $\Delta\lambda=0.161$  nmとなります。このように、分光器は、回折格子の刻線密度が大きく、焦点距離が長いほど高分解能です。回折格子を高次光で用いれば、分解能は高くなります。回折格子では一定次数の回折光のスペクトル幅とスリット幅との関係は波長に無関係で一定です。希土類などの鋭い線スペクトルを測定する場合は $f=500$  mm以上が必要ですが、半導体の発光などのブロードなスペクトルを測定する場合は $f=250$  mmで十分です。

②分光器のF値を知らないとおぼない

一方分光器の明るさを決めているのがF値です。分光器のF値は、コリメータ鏡の焦点距離を有効口径 $\phi$ で割った値です。Fが小さいほど明るい分光器です。ほとんどの物性評価には焦点距離 $f=25 \sim 50$  cm、F値が4.5 ~ 6程度のもので十分です。

分光器のF値を知っておくことは集光系を考えるときに非常に重

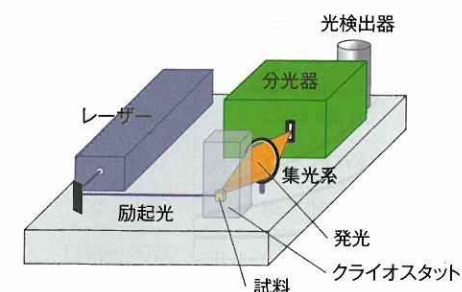


図6 PL測定系の模式図。

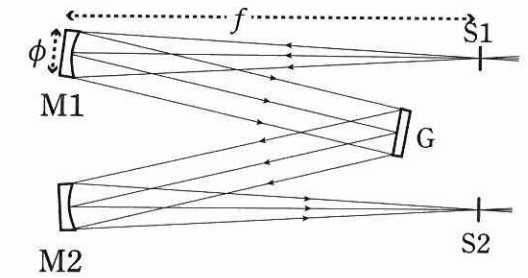


図7 ツェルニ・ターナ型回折格子分光器の仕組み。

要です。光量を稼ごうとして図8のように明るい集光系で光源の光を集めても、F値で決まる角度の外側の領域の光は迷光になってしまいます。

③回折格子全体に均一に光が当たっているか

回折格子は、全体に均一に光が当たって初めてその性能を発揮します。回折格子収納部分のフタをはずして、丸く切った白い厚紙を割り箸につけたツールで、光軸が合っているか、鏡で光が蹴られていないか、回折格子にまんべんなく光が当たっているかを見ながら、集光系の調整をしましょう。

④ブレイズ波長以下では回折効率が急落する

回折格子の回折効率は、図9に示すように波長依存性をもちます<sup>9)</sup>。最も明るい波長をブレイズ波長といいます。ブレイズ波長の長波長側の落ち方に比べ短波長側のほうが急峻に落ちているので、広帯域に測りたいときは、なるべくブレイズ波長の短いものを選ぶとよいでしょう。

⑤注意：回折格子分光器からは高次の光が出る

回折格子で分散したスペクトルには高次光が含まれます。高次光カットフィルタを使って高次光を除去しなければなりません。表1のように適切な色ガラスフィルタを波長範囲に応じて選択することが重要です。

例えば、波長ダイヤルを1000 nmに合わせたとすると、出射光には、1000 nmのほか、2次光の500 nm、3次光の333 nmも含まれます。表に示すように、670 nmより短波長の光をカットするフィルタを使えば2次光も3次光も遮断できます。

⑥注意：UVのはずが迷光で白い光が出る

キセノンランプを通常の分光器（シングルモノクロメータ）に入射し、波長ダイヤルを350 nmに合わせて、出射スリットからのぞいてみましょう。350 nmは紫外光なので人間の目には見えるはずがないのに、白く見えます。これは回折格子や鏡で散乱された可視光成分が回り込んで白く見えるのです。これが迷光です。2つの分光器を直列につなぎ合わせたダブルモノクロメータを用いると2桁程度下げることができ、350 nmの光は、肉眼では何も見えなくなります。

⑦注意：分光器から出る光は偏光している！

回折格子の偏光特性は単純ではありません。s-偏光とp-偏光

とで回折効率が変わります。非偏光入力を入れたとしても、出射単色光は部分的に偏光しており、その偏光度に波長依存性があります。偏光依存スペクトルを測定する場合は、偏光解消素子を使うなどの注意が必要になります。

⑧注意：波長ダイヤルの数字を信用するな

分光器の波長ダイヤルは選択される波長を示すよう出荷時には校正されています。しかし、回折格子を交換するとき、回折格子台のピンを分光器のピン孔に合わせてはめ、六角ねじで締め付けますが、このときのちょっとした締め付け具合で、波長ダイヤルの数値が真の波長と異なってしまいます。

したがって、回折格子を交換したときは必ず校正しなければなりません。簡易的には、He-Neレーザーの632.8 nmなど、波長が正確にわかった光源を使います。輝線スペクトルのように正確な値が必要な場合には、ペン型低圧水銀ランプのスペクトル線を使って、各波長のダイヤル値と正確な値の対応表を作りましょう。

### 3.2 励起光源

物質のPLの励起光源として、かつては超高圧水銀灯が使われました。253.7 nm, 365.0 nm, 404.7 nm, 435.8 nm, 546.1 nm, 577.0 nm, 579.1 nmの輝線スペクトルをフィルタで選んで使われました。その後、Arイオンレーザー（488.0 nm, 514.5 nm）、He-Neレーザー（543 nm, 594 nm, 612 nm, 632.8 nm, 1150 nm, 1520 nm）、He-Cdレーザー（325.0 nm, 441.6 nm）などがPL励起光源としてよく用いられました。最近では、半導体レーザー励起固体レーザーが大出力・長寿命なので励起光源として用いることが多くなっています。レーザー使用時の注意事項は、直接光はもちろん、散乱光も目に入らないようにすることです。

レーザーには、望みの発光線以外にも、プラズマラインなど余分の発光線が多く含まれており、試料からの発光線と区別するために、試料の代わりに金属板などを使ってスペクトルをとっておく必要があります。

PLスペクトルは、ドナー・アクセプタ対発光に見られるように、低励起の場合と強励起の場合では発光波長が異なることがあり、励起強度依存性を使って発光の起源を同定することが行われています。励起強度を変化させるには、ND（減光）フィルタを何枚か

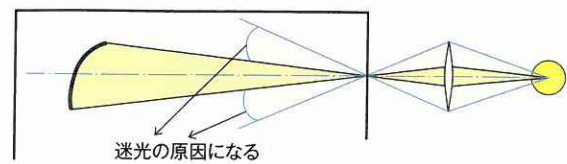


図8 分光器のF値より明るい集光系は危険。

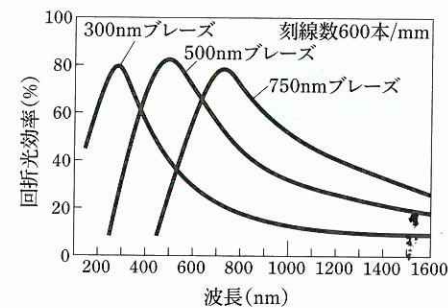


図9 回折格子のブレード波長と回折効率のスペクトル。

組み合わせて行います。

励起スペクトルを測定する場合は、輝度の高い白色光源を分光した光を励起光源に使います。あらかじめ真空熱電対などを使ってスペクトル強度を測定しておき、得られたスペクトルを補正します。

### 3.3 集光系

試料からの発光は空間に広がって出ます。これをレンズや鏡で集光し、分光器スリットに入射します。

3.1節に述べたように、集光系を設計するとき、分光器のF値より明るい光学系を作ってはなりません。

レンズを使うときは、色収差に注意が必要です。特に、測定波長範囲が広い場合結像位置が大きくなります。単レンズの色収差  $\delta f$  は、焦点距離  $f$ 、レンズの屈折率  $n$ 、屈折率分散  $\delta n$  を用いて、 $\frac{\delta f}{f} = \frac{-\delta n}{n-1}$  と表されます。石英ガラスのレンズで400~2000 nmの波長範囲で測定すると、 $\frac{\delta f}{f} = -0.067$  となり、 $f=150$  mmとすると  $\delta f=10$  mmも結像位置がシフトする結果、光の一部がスリットで蹴られたり、回折格子の一部しか利用できなかったりなど、光の有効利用ができなくなります。レンズ位置をアクチュエータで前後に移動することによって最適位置に配置する方法もありますが、仕掛けが面倒です。

色収差の問題を避けることができるのが、非球面鏡の利用です。色収差の問題がなく、レンズと違って媒質中を光が通過しないので近赤外-可視-近紫外の広い波長範囲で用いることができます。非球面鏡のうち、像のひずみが小さい楕円面鏡が最もよく使われます。楕円面鏡には2つの焦点があり、一方の焦点においた光源をもう1つの焦点の位置に結像します。鏡面の金属にはアルミニウムが使われますが、酸化しやすいので、表面にMgF<sub>2</sub>などの保護膜をコートしたものを使う必要があります。適切な膜厚の保護膜を使わないと、反射防止膜として働き反射光が出ないことがありますから、購入時は注意が必要です。

### 3.4 光検出器

光検出器としては、可視から近赤外域では、光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)が最もよく使われます。中赤外域では半導体フォトダイオードが使われます。

#### ① PMT

PMTは、紫外から近赤外までの範囲で用いられます。分光感度特性がなるべく広いものをおすすめします。PMTは光電面の違いにより、いくつかのタイプに分けられます。近紫外から可視域にかけてはマルチアルカリ型が、可視から近赤外域ではIII-V族半導体型が使われます。

マルチアルカリ型は高感度で暗電流も小さく微弱光の検出に適しており、普及型のPMTの感度波長範囲は185~600 nmですが、近赤外の感度を増強して185~900 nmに感度をもつものもあります。

III-V族半導体型は、Cs(セシウム)を薄く蒸着して電子親和力を下げたIII-V族半導体(GaAs, GaInAsなど)の光電面を用いています。GaAs光電面のPMTの感度波長範囲は160~930 nmです。InGaAs光電面では185~1010 nm、現在では電子冷却型で950~1700 nmの近赤外域で使えるPMTが市販されています。

光電子増倍管は磁界の影響を受けやすいので、磁気シールドをする必要があります。

#### ② 半導体フォトダイオード

赤外域の光検出器としては半導体フォトダイオードを用いるのが普通です。液体窒素冷却型Ge pinフォトダイオードは800~1800 nmの波長範囲で、光電子増倍管並みの感度を有します。2500 nmより長波長に感度をもつものとしては、液体窒素冷却型InSbやCdHgTeなどが使われます。

#### ③ 赤外線検出器使用上の注意

赤外線検出器は、熱放射を非常に拾いやすく、これが暗電流による直流成分の大きな原因となります。

赤外線検出器は光断続用チョップで光を断続してロックインアンプで検出するのですが、チョップのセクタからの熱放射を受け、切っているはずの時間帯に信号(逆位相の信号)をもたらしことがあります。したがって、赤外線検出器のすぐ前にチョップを置いてはなりません。

光検出器のプリアンプとしてはオペアンプを用いた電流電圧変換回路を使いますが、入力バイアス電流が小さく(10<sup>-12</sup>A程度)、

表1 波長域に合わせて高次光カットフィルタを選ぶ。

波長域(nm)	フィルタ	カットオフ(nm)	2次光	3次光	4次光
350~600	UV34 (HOYA)	340	175~300		
500~900	Y50 (HOYA)	500	250~450	167~200	
700~1200	R67 (HOYA)	670	350~600	223~400	175~300
1100~2000	Si	1050	550~1000	367~667	275~500
1900~2600	Ge	1800	950~1300	633~867	475~650

入力換算雑音の低いオペアンプを選ばなければなりません。

### 3.5 スペクトルの波長表示と光子エネルギー表示

PLスペクトルは、波長を一定間隔で変化させて測定し、波長(nm単位)を横軸としてグラフ表示されます。この横軸を光子エネルギー表示(eV単位)に変換するにあたり、単純に、

$$E = \frac{hc}{e\lambda} = \frac{1239.8}{\lambda}$$

によって横軸を換算するだけではなりません。なぜでしょうか? 1本のスペクトル線の積分強度はλプロットとEプロットでは等しくないからです。波長を横軸としたスペクトル強度  $I(\lambda)$  の積分強度  $S$  は、

$$dE = d \frac{hc}{e\lambda} = -\frac{hc}{e\lambda^2} d\lambda \text{ なので}$$

$$S = \int_{E_1}^{E_2} I(E) dE = \frac{hc}{e} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{I(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda) d\lambda$$

ここに  $\lambda_1 = \frac{hc}{eE_1}$ ,  $\lambda_2 = \frac{hc}{eE_2}$  . これより、

$$I(E) = \frac{e}{hc} \lambda^2 I(\lambda)$$

$I(E)$  を求めるには  $I(\lambda)$  に  $\frac{e}{hc} \lambda^2$  をかけなければなりません。

このような変換をしなければならぬのは、縦軸に意味のある場合のみです。なお、反射率や透過率など、比率に関するスペクトルの場合はこのような変換の必要はありません。

### 3.6 光軸調整

光軸調整するには、はじめにレンズ、フィルタ、偏光子などを全部はずして、発光を測定したい試料の位置に発光ダイオードなどの点光源を置き、その光が分光器の中の鏡や回折格子の中心にくるように、分光器の高さや、傾きを調整しておきます。ついで、光学素子を入れて、鏡や回折格子の全体に一樣に照射されているかをチェックします。今度は、試料をしかるべき位置に置き、分光器の出口側(検出器側)からレーザー光を入れて、試料位置に光が来ることを確認しましょう。特に、赤外発光のときは試料からの発光を目視で観測できませんから、このような念入りのチェックが大切です。試料を冷却のためクライオスタットの冷却フィン部分に取り付

けるときは、温度を変えたときに、位置が変わることがありますから、注意が必要です。

### 4. むすび

以上、物性評価の実験室でよく遭遇する分光測定についての注意事項やちょっとしたコツを紹介しました。分光測定をこれから始める初心者にとって参考になれば幸いです。本稿を書くにあたり、日本分光(株)の赤尾賢一様には貴重な資料の提供を受けました。ここに感謝します。

(2014年9月29日 受理)

### 文献

- 1) 眞砂央ほか著, 星埜由典編集: 色材と高分子材料のための最新機器分析法, 第8章, 紫外可視分光法(ソフトサイエンス社, 2007).
- 2) 南茂夫, 合志陽一編: 分光技術ハンドブック(朝倉書店, 1990).
- 3) 日本分光株式会社: <http://www.jasco.co.jp/jpn/technique/jasis2014/semi02.pdf>
- 4) 藤原史郎編: 光学薄膜, 第1章 1.4項(共立出版, 1986).
- 5) 佐藤勝昭: 光と磁気(改訂版), p.103(朝倉書店, 2001).

#### さとう かつあき

1966年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。66年日本放送協会。84年東京農工大学。07年科学技術振興機構。工学博士。主な著書「光と磁気」(朝倉書店, 1988), 「応用物性」(オーム社, 1991), 「半導体物性なんでもQ&A」(講談社, 2010), 「太陽電池」のキホン」(SoftBank Creative, 2011), 「磁性工学超入門」(共立出版, 2014), 応用物理学会フェロー, 功労会員。

