

課題7 光のスペクトルと太陽電池

No.

1. 実験の目的

光エネルギーのスペクトル分布を観察すること、半導体の光電効果を確認することで理解を深め、光の波動性と量子性に関する考察を行う。

2. 実験の原理

(1) 光のスペクトル

水素がスや希ガスを励起状態にすると、これらの物質は光(=電磁波)を放出してよりエネルギーの低い励起状態又は基底状態に遷移する。このとき放出された光を分光し、放出された光の強度を各波長に対して測定したものを発光スペクトルという。これを測定することで物質の電子エネルギー準位間隔を求めることができる。

(2) 太陽電池

金属に光(=電磁波)を当てると金属中の電子が光のエネルギーを吸収して外部に飛び出す。これが光電効果であり、

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2$$

(h : プランク定数, ν : 光の振動数, m : 電子の質量, v : 電子の速度) という関係が成り立っていることが知られている。 W はその金属固有の仕事関数と呼ばれる値であり、右辺の $\frac{1}{2}mv^2$ は電子の運動エネルギーである。これは半導体である太陽電池の発電に関係してくる。具体的にそのことを説明すると、ある元素がその集合体を作るとき、エネルギー準位が少しずつ重なり合っ**て**エネルギーバンド(エネルギー準位の帯)を形成する(模式図を下に示す)。この中の禁制帯(バンドギャップ: ΔE)には電子が存在することができず、物質の電気伝導性は価電子帯に存在する電子が禁制帯を飛び越えることによって生じる。太陽電池に使われている半導体は通常では電子が禁制帯を飛び越えられず絶縁体の性質を示すが、上記の光電効果によって禁制帯を飛び越えることが可能となり伝導性を示すようになる。このように太陽電池は光を得ることで物理的変化が起き、起電力を得ている。

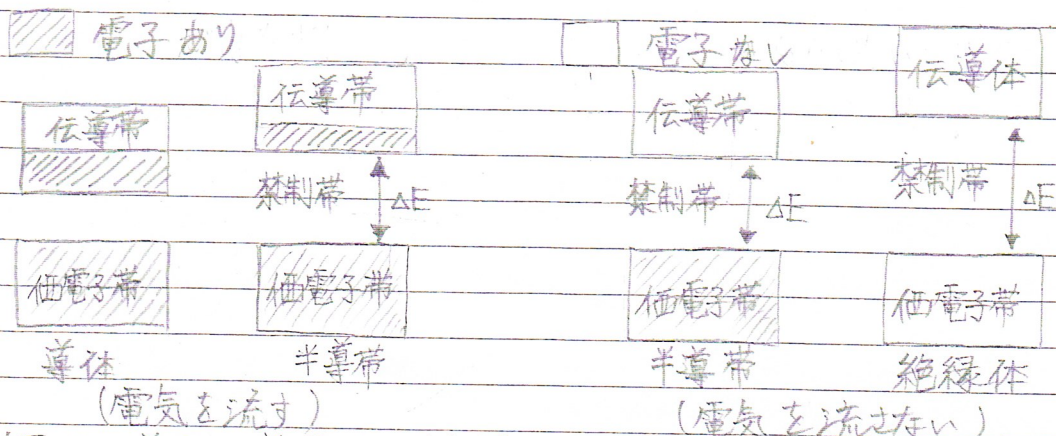


図1: 導体, 半導体, 絶縁体における電子エネルギーの模式図



3 実験1: 原子の放出スペクトル
(実験方法)

最初にテーブルにあるプリズム分光器のスリット調整をHg放電管で行う。次にHgとNaの線スペクトルを観察し、見えた線の色に対応する波長を教科書P126の表7.1から探し、目盛の値を縦軸に、波長の値を横軸にプロットする。このとき実験後に最小2乗法を用いて正確に校正曲線を作成する。次に水素放電管を点灯させ、水素の輝線(バルマー系列線)を観測し、校正曲線から波長を求め、Ryberg定数を計算できるようにしておく。最後に蛍光灯を点灯させて輝線スペクトルと帯状のスペクトルを観察し、スペクトルとして、蛍光灯に使われている元素を推測する。

(実験結果と考察)

Hg スペクトル

色	尺度目盛	波長[nm]	相対強度
黄	5.46	579.1	大~中
黄	5.45	577	大~中
緑	5.2	546.1	大
青	4.25	435.8	中
紫	4.01	404.7	中~小

Na スペクトル

色	尺度目盛	波長[nm]	相対強度
橙	5.6	616.1	大
黄	5.5	589.3	大
緑	5.32	568.8	小
青	4.78	451.1	中
紫	4.1	415.9	中~小

表1: Hg原子とNa原子の放出スペクトル

分光器で観測した目盛の値、色、相対強度と教科書P126の表を用いて尺度目盛に対応する波長を左の表にまとめた。また*マークが付いている行の記録はArのスペクトルであることが推測できる。これをもちに校正曲線にプロットし、このデータをエクセルを用いて最小2乗法で計算し、正確な校正直線をつくった。グラフは1次関数の $y = ax + b$ で $a = 0.008$, $b = 0.785$ という結果が出た。グラフは次ページに見えた。このときNaスペクトルに出た青色の線のデータが読み取れてしまい、実験の計算には入れなかった。ミスか別の物質が混入していたか

か、なぜこういう値が出たかを考えると、測定ミスか別の物質が混入していたか

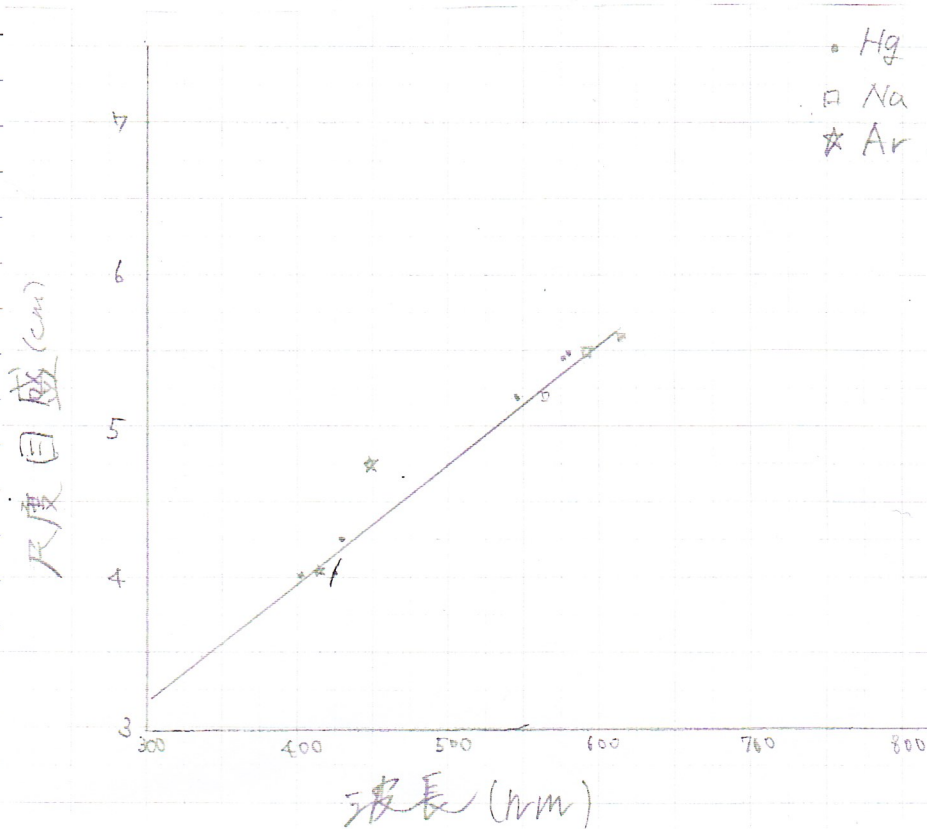


図2: 校正曲線

Hのバルマー系列線			次に水素原子のバルマー系列線の観察結果を左の表にまとめた。前の実験のHgやNaスペクトルとは違う西行列となった。なぜ違うのかを水素のバルマー系列をもとに考えてみる。水素のバルマー系列とは水素原子の線スペクトルのうち可視光線から近紫外の領域にあるものである。水素原子の線スペクトルのうち可視光線の領域に現われるものを以下4つが挙げられた。
色	尺度目盛	相対強度	
赤	6.01	大	• H _α 線 (赤): 波長 656.28nm • H _β 線 (黄緑): 波長 486.13nm • H _γ 線 (青): 波長 434.05nm • H _δ 線 (紫): 波長 410.17nm
青	4.68	大-中	
紫	4.34	小	

表2: 水素の放出スペクトル

域に現われるものを以下4つが挙げられた。

- H_α線 (赤): 波長 656.28nm
- H_β線 (黄緑): 波長 486.13nm
- H_γ線 (青): 波長 434.05nm
- H_δ線 (紫): 波長 410.17nm

1885年にバルマーは上記の4つの線の波長λが

$$\lambda = f \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right) \quad (f = 364.56 \text{ nm}, n = 3, 4, 5, 6) \dots \textcircled{1}$$

の式に従うことに気が付いた。その後、近紫外の領域にn>7に一致する線スペクトルが確認されたのであった。

(参考文献 ウィキペディアの「バルマー系列」)



次にリードバリ定数について説明する。リードバリ定数とは、原子の発光および吸収スペクトルを説明する際に用いられる物理定数である。また①の式をリードバリによって波数 $\bar{\nu}$ ($=\frac{1}{\lambda}$) を与える式に改めるときに用いられ、

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{③} \quad (n=3, 4, 5, \dots)$$

このときの R がリードバリ定数で $R = 1.09737 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$ である

(参考文献: ウィキペディアの「リードバリ定数」)

また②より、赤(3)、黄緑(4)、青(5)、紫(6)のときのリードバリ定数の計算値はそれぞれ

赤: $1.09709 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$

黄緑: $1.09710 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$

青: $1.09708 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$

紫: $1.09710 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$

(波長の値は前ページの

(*)のマークの値を用いた)

文献値と計算値に誤差が生じるのは $n=3, 4, 5$ の全体のときのリードバリ定数の標準誤差を文献値はとっているからと考える。

蛍光灯の輝線スペクトル			
色	尺度目盛	波長 [nm]	相対強度
黄	5.46	591.2	中
黄	5.45	589.1	中
緑	5.2	562.3	大
青	4.25	437.5	小
紫	4.01	405.2	小

表3: 蛍光灯の放出スペクトル

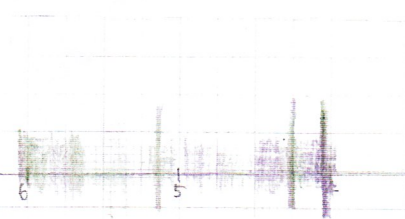


図3: 蛍光灯スペクトルの様子

最後に蛍光灯の輝線スペクトルについて考える。波長は前ページにある校正曲線から読みとったものである。またこの表をみると前のページにある Hg 原子とほぼ同じ線の色、波長を表しているため、蛍光灯に使われている物質は Hg 原子であることが推測できる。また観察するスケッチは左図の通りで、光輝線スペクトルと帯状のスペクトルがはまりと区別ができていて、まるで虹のようになった。

この蛍光灯の仕組みについて説明すると、放電で発生する紫外線を蛍光体において可視光線に変換する光源である。管内には放電しやすいためアルゴンガス (Ar) と放電で紫外線を発生させる少量の水銀 (Hg) が封入されている。

(参考文献: ウィキペディアの「蛍光灯」)



4. 実験2: 内部光電効果によるフォトダイオードの光起電力 (実験方法)

最初に用意された装置をセットし、プリズムの角度を変えることで分光された光が赤から紫まで明確に分光されて見えるようになる。またその白色光の分光の様子を入射から分光まで観察し、スケッチをする。次にフォトダイオードを電圧計を含む装置をセットし、赤外領域から紫外領域まで5mmずつ位置を変えて2つのフォトダイオードの起電力を測定する。そして最後にフォトダイオード1,2について最初に定めた原点からの距離と起電力の関係をグラフに図示する。

(実験方法・考察)

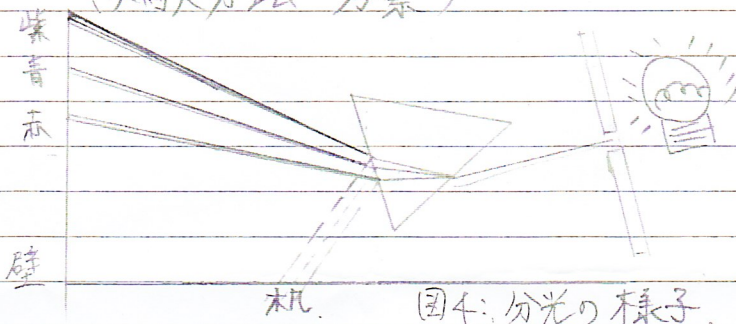


図4: 分光の様子

分光の様子を観察した結果、左の図のようになった。このとき屈折率が紫、青、赤の順に大きいのので左図のような入射、反射になるのは予想済みである。

次にフォトダイオード1,2の距離、そのときにかかる光線の色と波長、起電力を測定した結果、下の表のようになった。

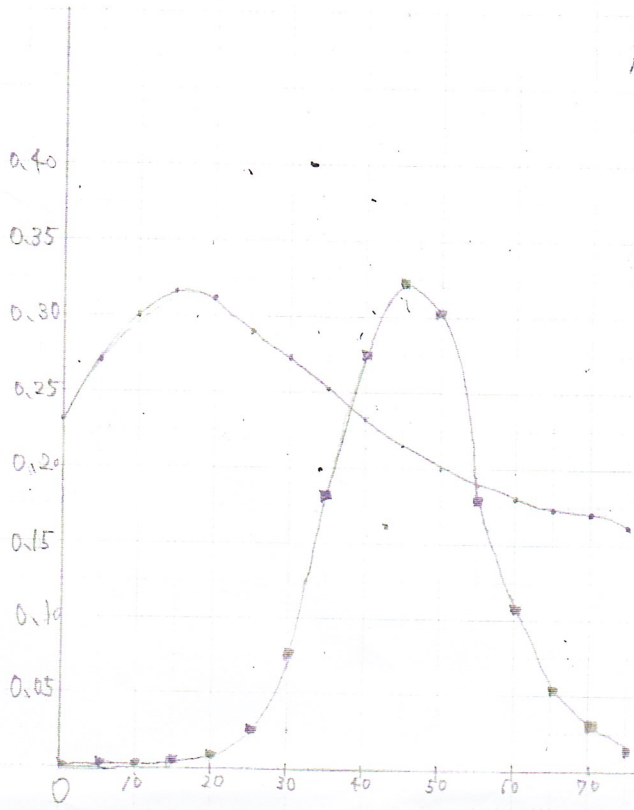
距離 (mm)	色	波長 (nm)	フォトダイオード1の起電力	フォトダイオード2の起電力
0	赤外	870	0.231	0.002
5	赤外	850	0.27	0.002
10	赤外	780	0.3	0.002
15	赤	760	0.318	0.005
20	赤	680	0.313	0.009
25	橙	620	0.29	0.026
30	黄	570	0.272	0.076
35	緑	520	0.251	0.184
40	青	490	0.233	0.275
45	青	450	0.216	0.322
50	紫	400	0.2	0.302
55	紫	380	0.19	0.180
60	紫外	360	0.18	0.107
65	紫外	330	0.174	0.058
70	紫外	290	0.17	0.031
75	紫外	260	0.16	0.015

図5: フォトダイオードの測定値

FD 1 .
FD 2 ▣

図5の測定値をもとに起電力と距離、起電力と波長の関係をグラフに書いた結果、図6、図7のようになった。

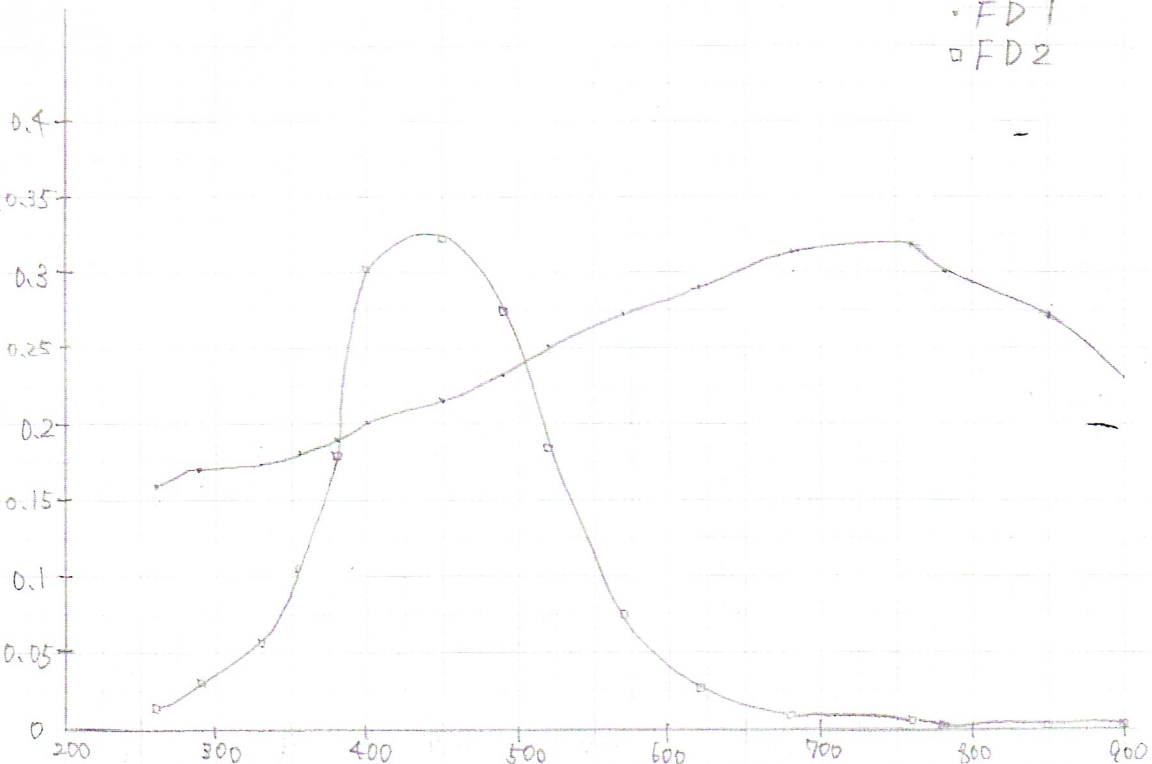
起電力 (V)



距離 (mm)

← 図6: 位置と起電力の関係のグラフ

起電力 (V)



波長 (nm)

• FD 1
□ FD 2

図7: 波長と起電力の関係のグラフ。



次にシリコン(Si)とガリウムリン(GaP)の同定を行う。SiとGaPのバンドギャップ ΔE はそれぞれ $\Delta E_{Si} = 1.12 \text{ eV}$; $\Delta E_{GaP} = 2.25 \text{ eV}$ よりエネルギー[J]に変換して

$$\Delta E_{Si} [\text{J}] = 1.12 \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.792 \times 10^{-19} [\text{J}]$$

$$\Delta E_{GaP} [\text{J}] = 2.25 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.6 \times 10^{-19} [\text{J}]$$

となる。同定を行うには限界波長 λ を求めればよく、その式は

$$\lambda = h \frac{c}{\Delta E} \quad (h = 6.63 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}] \text{ プランク定数}, c = 3.0 \times 10^8 [\text{m/s}] \text{ : 光速})$$

となるのでこれを用いると

$$\lambda_{Si} = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3.0 \times 10^8}{1.792 \times 10^{-19}} = 1110 \text{ nm}$$

$$\lambda_{GaP} = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3.0 \times 10^8}{3.6 \times 10^{-19}} = 555 \text{ nm}$$

となり、図7よりフォトダイオード1がSi、フォトダイオード2がGaPと同定できた。また波長と起電力の関係を見ると、フォトダイオード1は750nm付近に、フォトダイオード2は440nm付近にピークをもつ。これはバンドギャップの違いであると考えられる。また、最初の方は起電力が低いが、これは光量と起電力は比例関係にあって最初の位置では光量が少ないと考えられる。