光電管の減速電圧特性と その分光測光への応用

専門会員 山口 昌一郎* 正会員 小林 富士男*

Retarding Potential Characteristics of a Photoelectric Tube and their Applications to Spectrophotometry

Shoichiro Yamaguchi (Fellow Member)

Fujio Kobayashi (Member)

(Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

ABSTRACT

Usually, photoelectric vacuum tubes are used for measuring light flux under the condition in which a positive high electric potential relative the cathode is applied to the anode to secure the linearity between the photoelectric current and the incident light flux.

As the anode potential goes down to zero and further to a negative value against the cathode, the photoelectric current decreases gradually and ceases at last even in the illumination of constant light flux. Such Those experiments are often called the retarding potential method and they have been used for measuring the initial velocities of photoelectrons and the work functions of photoelectric materials.

In this paper, first, the characteristics of photoelectric current versus retarding potential are considered concerning mainly the dependence of the stopping voltage of photoelectric current on the frequency of incident light and concerning the principle of superposition of photoelectric current under illumination of composite lights. Next, the retarding potential characteristic curves are formulated in terms of the incident radiant flux, the stopping voltage and the spectral response of a photoelectric tube with some approximations.

It is possible to get the spectral energy distributions of light sources or the spectral transmittances of optical filters by solving the matrices of which the elements are the moderate values of retarding potential characteristic curves of a photoelectric tube under illumination of tested lights or transmitted lights through tested filters. This method of spectral analysis does not need any monochrometer at all and is quite different from the conventional method. Finally, comparison is made between the spectral transmittances of an optical filter obtained by the matrix method mentioned above and the ordinary spectrophotometric method.

1. 緒 言

通常、測光に用いられる真空光電管は入射光束と光電流との間に良い比例性が成り立つことが望まれるので、その関係を満足させるため、陽極には陰極に対して高い正の電圧を印加して動作させる。

ところが、もしも光電管の陽極電圧を陰極に対して零か、または負にすると入射光束対光電流特性は、高い正

の電圧が加っていた場合と非常に異なった性質をもってくる。

陽極の電位を陰極に対して負にする実験は減速電圧法といわれ、それによって得られる減速電圧特性は、従来光電管の光電子の初速度や光電面の仕事関数を求めたり¹⁾、減速電圧特性を微分して分光測光に応用^{2)~4)}されてきた。

本論文では、この減速電圧特性の波長依存性や光束に

* 東京工業大学工学部

対する相加性を詳しく調べ、若干の近似のもとにその特性の数式的解析を行ない、それによって入射光の分光組成を分析することが可能であることを示し、最後に解析につごうのよい特性をもつように試作した光電管を用いて行なった実験結果を述べる。

2. 減速電圧対光電流特性

2.1 減速電圧特性の特徴

減速電圧対光電流特性曲線（以下、減速電圧曲線と略記する）に入射光束のレベルがいかなる影響を与えるかを実験によって調べてみると図 1 のようになる。この図は、入射光束 ϕ をパラメータ ($\phi_1 > \phi_2 > \phi_3$) として減速電圧曲線を示したものであるが、この場合の特徴として光電流が零となる電圧 V_0 （以下これを停止電圧という）は一定であり、かつ減速電圧に対しては入射光束と光電流の間に比例関係が成立する性質をもっている。

図 1 減速電圧曲線
(入射光束パラメータ)

図 2 減速電圧曲線 (入射光の振動数パラメータ)

図 1 の実験では入射光の分光組成は一定として、入射光束の値だけを変えたときの特性を求めたのであるが、次に入射光の分光組成の相違によって、減速電圧曲線がいかに変わるかを種々の単色光を用いて実験的に求めると図 2 のようになる。

この図は、入射単色光の振動数 ν をパラメータとして表わしたもので、図では $\nu_1 > \nu_2 > \nu_3$ の関係がある。また入射単色光の振動数 ν が大となるほど（いいかえれば単色光の波長が短くなるほど）、光電流が零となる停止電圧の絶対値が大となっている。

この現象は、光電効果に関するアインシュタインの式

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 \dots\dots\dots (1)$$

によっても説明できることである。ただし、この式で e は電子の電荷、 h はプランクの定数、そして ϕ_0 は光電陰極の仕事関数を表わす。

減速電圧曲線を微分して分光測光を行なう方法^{2)~4)}においては、曲線の形状によって分解能が左右され、いかなる形の特性曲線が得られるかが重要になってくる。光電陰極面が単金属の場合には、減速電圧曲線は理論値とかなりよく一致するが、その量子効率は低く、また分光感度特性が短波長部分にかたよるなどの難点がある。それに対して、 Cs_2Sb のような半導体光電面は量子効率が高く、長い波長の光に対しても感度がよい長所をもつが、その減速電圧曲線に関する理論的解析は十分に行なわれていない。上記の微分法では、減速電圧曲線が温度の影響を受けるので、温度が上昇するに従って分解能が悪くなり、また微小電流値を 3 度微分するので、図式的にも電子回路的にも困難を伴う。

本方法は、微分電子回路に比較して分光測光値をうるための測定速度は劣るが、減速電圧曲線の物理的意義づけを必ずしも必要とせず、その形状だけを利用して精密な分光測光を可能ならしめようとするもので、分解能の向上も期待できる。

図 2 の個々の曲線の形状を厳密に物理的に解析することはなかなか困難な問題で、その詳細は別の機会に譲るが、著者らの実験⁵⁾によれば、1 本の減速電圧曲線の形は停止電圧の点から飽和点近くまでの範囲については、ほぼ二次曲線で近似することができる。

また、図 2 の各曲線はそれぞれの入射単色光の光束をある値に固定して求めたものであるが、もし各単色光の光束の値を変えるとすると、それぞれの光束値に対応して各曲線は、その停止電圧を一定としたままでその形が図 1 のように変わることになる。

次にこれら二つの実験の組み合わせとして、振動数および光束の互いに異なる二つの単色光を同時に光電管に照射して減速電圧曲線を求めると図 3 のようになる。

この図の曲線 I、II は振動数 ν_1 、 ν_2 の単色光をそれ

図 3 二つの単色光を入射させたときの減速電圧曲線

それぞれに光電管に入射させたとき、それに対して曲線Ⅲは、これら二つの単色光を同時に光電管に入射させたときの減速電圧曲線である。

この場合、曲線Ⅲは曲線ⅠとⅡを加え合わせたものとよく一致している。成分単色光の数が2以上のもっと多くの場合においても、合成光の光電流値が適当な範囲内ではこのような相加法則が成立する。

光電管の光電流が、その入射光の分光組成について相加性、すなわち重ねの理が成り立つ特性をもつことは、通常の使用条件（飽和領域での動作）では自明のことであるが、以上のような未飽和領域でも成立することがのちに述べる減速電圧特性の応用の重要な基礎となることである。

2.2 減速電圧曲線の数式表示

2.1 で述べた光電管の減速電圧特性を、数式で近似的に表示することを説明する。

それには、振動数 ν の単色光に対する減速電圧曲線を図 4 に示すように、停止電圧 $-V_\nu$ で立ち上がり二次曲線的に変化して、 $V=0$ で完全に飽和（横軸に平行となる）すると仮定すると、光電流 $I_\nu(V)$ は次のように表わすことができる。

図 4 減速電圧曲線の二次曲線近似

$$I_\nu(V) = \frac{K_\nu}{V_\nu^2} \left[(V+V_\nu)^2 \cdot u(V+V_\nu) + \left\{ V_\nu^2 - (V+V_\nu)^2 \right\} \cdot u(V) \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K_ν は比例定数であり、 $u(V)$ は変数 V についての単位関数を表わし、 $u(V)$ は次のような性質をもつ。

$$u(V) = \begin{cases} 1 & (V > 0) \\ 0 & (V < 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この単位関数 $u(V)$ の性質から、図 5 に示すように

図 5 単位関数 $u(V+V_\nu)$

$V = -V_\nu$ で立ち上がる単位関数を $u(V+V_\nu)$ で表わす。すなわち、

$$u(V+V_\nu) = \begin{cases} 1 & (V > -V_\nu) \\ 0 & (V < -V_\nu) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。

また、(2)式の定数 K_ν は入射単色光の放射束を J_ν 、光電管の分光感度を R_ν とすると

$$K_\nu = J_\nu \cdot R_\nu \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる関係をもつ。この関係を(2)式に代入すると、

$$I_\nu(V) = \frac{J_\nu \cdot R_\nu}{V_\nu^2} \left[(V+V_\nu)^2 \cdot u(V+V_\nu) + \left\{ V_\nu^2 - (V+V_\nu)^2 \right\} \cdot u(V) \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

ゆえに、一般に n 個の単色光が同時に光電管に入射したときの光電流 $I_0(V)$ は

$$I_0(V) = \sum_{\nu=1}^n I_\nu(V) = \sum_{\nu=1}^n \frac{J_\nu \cdot R_\nu}{V_\nu^2} \left[(V+V_\nu)^2 \cdot u(V+V_\nu) + \left\{ V_\nu^2 - (V+V_\nu)^2 \right\} \cdot u(V) \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。

ところで、図 4 の飽和値 K_ν を入射単色光の放射束 J_ν に対して正規化するため、(6)式の両辺を J_ν で割り、その値を $\hat{I}_\nu(V)$ とおくと、

$$\hat{I}_\nu(V) = \frac{I_\nu(V)}{J_\nu} = \frac{R_\nu}{V_\nu^2} \left[(V+V_\nu)^2 \cdot u(V+V_\nu) + \left\{ V_\nu^2 - (V+V_\nu)^2 \right\} \cdot u(V) \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

あるいは

$$I_\nu(V) = J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、この関係を(7)式に代入すると

$$I_0(V) = \sum_{\nu=1}^n J_{\nu} \cdot \hat{I}_{\nu}(V) \dots\dots\dots (10)$$

となる。

このように正規化された減速電圧曲線 $\hat{I}_{\nu}(V)$ (以下、単に正規化曲線と略記する) は(8)式に示すように、入射単色光の強度に依存せず、もっぱら光電管の特性 R_{ν} , V_{ν} によって決まる。

しかし、これらの光電管自体の特性値が必ずしも個々に知られなくても、 $\hat{I}_{\nu}(V)$ は実験的に求めることができる。

すなわち、あらかじめ振動数 ν とその放射束 J_{ν} のわかかった単色光を用いて、その減速電圧曲線 ($I_{\nu}(V)$) を実測で求め、この実測値を J_{ν} で正規化して $\hat{I}_{\nu}(V)$ 曲線が得られる。

3. 減速電圧曲線の分光測光への応用

3.1 理 論

(1) 光源の分光エネルギー分布の測定

水銀、カドミウムなどの放電灯のように、複数個の輝線スペクトルを放射する光源の分光エネルギー分布を測定することを述べる。上述のように被測定光源の放射する n 本の各振動数の単色光に対する正規化曲線 $\hat{I}_{\nu}(V)$ をあらかじめ測定しておく。被測定光源の放射する単色光を単色光器、フィルタなどを通さずに直接光電管に入射させて $I_0(V)$ を実測する。次に、適当な電圧 n 点を選定し、その電圧 $V_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ に対する光電流値から(10)式により n 元連立一次方程式をつくれれば、次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} J_1 \cdot \hat{I}_1(V_1) + J_2 \cdot \hat{I}_2(V_1) + J_3 \cdot \hat{I}_3(V_1) + \dots \\ \dots \dots \dots + J_n \cdot \hat{I}_n(V_1) = I_0(V_1) \\ J_1 \cdot \hat{I}_1(V_2) + J_2 \cdot \hat{I}_2(V_2) + J_3 \cdot \hat{I}_3(V_2) + \dots \\ \dots \dots \dots + J_n \cdot \hat{I}_n(V_2) = I_0(V_2) \\ J_1 \cdot \hat{I}_1(V_3) + J_2 \cdot \hat{I}_2(V_3) + J_3 \cdot \hat{I}_3(V_3) + \dots \\ \dots \dots \dots + J_n \cdot \hat{I}_n(V_3) = I_0(V_3) \\ \dots \dots \dots \\ J_1 \cdot \hat{I}_1(V_n) + J_2 \cdot \hat{I}_2(V_n) + J_3 \cdot \hat{I}_3(V_n) + \dots \\ \dots \dots \dots + J_n \cdot \hat{I}_n(V_n) = I_0(V_n) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

上式で未知数を J_{ν} , 未知数の係数を $\hat{I}_{\nu}(V_{\nu})$ として行列で表わし

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1(V_1) & \hat{I}_2(V_1) & \hat{I}_3(V_1) & \dots & \hat{I}_n(V_1) \\ \hat{I}_1(V_2) & \hat{I}_2(V_2) & \hat{I}_3(V_2) & \dots & \hat{I}_n(V_2) \\ \hat{I}_1(V_3) & \hat{I}_2(V_3) & \hat{I}_3(V_3) & \dots & \hat{I}_n(V_3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{I}_1(V_n) & \hat{I}_2(V_n) & \hat{I}_3(V_n) & \dots & \hat{I}_n(V_n) \end{bmatrix} = [A],$$

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = [X], \quad \begin{bmatrix} I_0(V_1) \\ I_0(V_2) \\ I_0(V_3) \\ \vdots \\ I_0(V_n) \end{bmatrix} = [B]$$

と置けば、(11)式は次式のようになる。

$$[A] \cdot [X] = [B] \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $[A]$ の行列式 $|A| \neq 0$ であれば、(12)式を解き

$$[X] = [A]^{-1} \cdot [B] \dots\dots\dots (13)$$

となる。ただし、 $[A]^{-1}$ は $[A]$ の逆行列である。

ゆえに、被測定光源の放射する各振動数の単色光に対する正規化曲線 $\hat{I}_{\nu}(V)$ をあらかじめ求めておけば、単色光器、フィルタなどを使用しないで、光源の放射光を直接光電管へ同時に入射させたときの減速電圧曲線 $I_0(V)$ を測定し、その特性曲線から(11)式の n 元連立方程式をつくり、それを解くことによって光源の分光エネルギー分布を求めることができる。

(2) 光学フィルタなどの分光透過率の測定

適当な方法によって、光源の各振動数 ν の単色光をそれぞれ単独に光電管に入射させた場合の減速電圧曲線 $I_{\nu}(V)$ をあらかじめ測定しておく。次に光学フィルタなどの試料をそう入し、各振動数の単色光を同時に光電管に入射させて光電流 $I_0(V)$ を測定する。(1)のときと同様に適当な電圧 V_i を選定し、 n 元の連立一次方程式をつくれれば、(12)式の行列 $[A]$, $[X]$ は次のようになる。

$$[A] = \begin{bmatrix} I_1(V_1) & I_2(V_1) & I_3(V_1) & \dots & I_n(V_1) \\ I_1(V_2) & I_2(V_2) & I_3(V_2) & \dots & I_n(V_2) \\ I_1(V_3) & I_2(V_3) & I_3(V_3) & \dots & I_n(V_3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1(V_n) & I_2(V_n) & I_3(V_n) & \dots & I_n(V_n) \end{bmatrix}, \quad [X] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}$$

ただし、 T_{ν} は各振動数 ν の単色光に対する試料の分光透過率である。

分光透過率の測定では光源のエネルギー分布、光電管の分光感度はわからなくてもよい。

光電管に入射する単色光の放射束 J_{ν} と、光電管の分光感度 R_{ν} の積 $J_{\nu} \cdot R_{\nu}$ に対応する光電流 $I_{\nu}(V)$ がわかればよい。したがって、各振動数 ν (波長 λ) についての分光透過率 T_{ν} は

それらの値は

$$[X] = [A]^{-1} \cdot [B]$$

の計算から求められる。

3.2 適用条件

2.2では減速電圧曲線 $I_{\nu}(V)$ を入射単色光の放射束 J_{ν} で正規化した、そのほか

(1) 光電管の分光感度 R_ν で正規化する方法

(2) $K_\nu = J_\nu \cdot R_\nu$ で正規化する方法

があげられる。

(1)の方法では正規化曲線は J_ν , V_ν によって決まり、光電管の分光感度 R_ν を測定するのに好つごうである。それに対して(2)の方法では、正規化曲線は図 6 のよう

図 6 K_ν で正規化した二次曲線近似

に飽和値が1となり、もっぱら光電管の特性 V_ν によって決まり、 J_ν , R_ν のいずれか一方を未知数、他方を既知数として未知数を決定することになる。

$\hat{I}_\nu(V)$ の測定は、単色光器などを使用して行なってもよいが、分光エネルギー分布を決定しようとする光源の放射する単色光純度と、まえて $\hat{I}_\nu(V)$ を求めるときに、光電管に入射する単色光純度とは同じでなければならない。光電管に入射する単色光に振動数の幅があり、その幅が振動数 ν_p から ν_q までであれば、その単色光を入射したときに求まる $\hat{I}_\nu(V)$ は ν_p から ν_q まで積分したものとなり

$$\hat{I}_\nu(V) = \int_{\nu_p}^{\nu_q} \frac{R_\nu}{V^2} \left\{ (V + V_\nu)^2 \cdot u(V + V_\nu) + \left\{ V^2 - (V + V_\nu)^2 \right\} \cdot u(V) \right\} d\nu \cdots (14)$$

となる。ゆえに、被測定光源の放射する単色光純度と、まえて $\hat{I}_\nu(V)$ を測定するとき使用する単色光純度とが異なれば、 $\hat{I}_\nu(V)$ の値が異なり誤差の原因となる。また、(11)式の右边 $I_0(V)$ は(10)式で与えられるので、あらかじめ測定されている $\hat{I}_\nu(V)$ としては、被測定光源の放射する単色光に対するものが、必ず含まれておらなくてはならない。たとえば、 $\nu = t$ の $\hat{I}_\nu(V)$ が測定されていないならば、(11)式において

$$\text{左辺} = \sum_{\nu=1}^{t-1} J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V) + \sum_{\nu=t+1}^n J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V)$$

$$\text{右辺} = \sum_{\nu=1}^n J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V)$$

$$\text{左辺} \neq \text{右辺}$$

となり、連立方程式が成立しない。しかし、まえて測定されている $\hat{I}_\nu(V)$ が、被測定光源の放射する単色光数より多いのはさしつかえない。すなわち、被測定光

源の放射しない振動数の単色光に対して、正規化した値を $\hat{I}_g(V)$ で表わし、その振動数に対する光源の放射束を J_g とすれば、

$$\text{左辺} = \sum_{\nu=1}^n J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V) + \sum_{g=1}^h J_g \cdot \hat{I}_g(V)$$

$$(g=1, 2, 3, \dots, h)$$

となるが、 $J_g = 0$ であるから

$$\text{左辺} = \sum_{\nu=1}^n J_\nu \cdot \hat{I}_\nu(V) = \text{右辺}$$

となり、(11)式の連立方程式が成立する。

すでに 2.1 で述べたように、減速電圧曲線において光電流値が入射光の光束に比例することは、減速電圧特性の応用の基礎的なことである。未飽和領域では飽和領域の使用と異なり、入射光束が非常に大きくなると電子の空間電荷効果の影響が現われ、入射光束と光電流値の比例性は悪くなる。したがって、本実験ではそのような範囲はさけなければならない。

(11)式の n 元連立一次方程式を解くには、クラメルの公式、消去法、反復法、共役傾斜法など⁵⁾の方法があるが、元数が多くなると、多数回の計算を行なうために小さな誤差が上位に昇ってくるので、多数の桁数が必要になってくる。

元数 n が増せば行列の計算はたいへん困難であるが、[A]の逆行列を桁数の多い電子計算機で一度求めておけば、あとは卓上計算機によっても容易に解は得られる。

誤差の原因としては、物理的問題を数学的表現によって近似する際の誤差、計算する際の丸めの誤差、各値をすべて実測によって得るが、その際の測定誤差などがあげられる。この測定誤差は極力減少するよう努めなければならない。これらの誤差が最終結果に大きく影響することがある。

4. 実験および結果

図 7 は、実験に使用した試作真空光電管の構造図であるが、低電圧で光電流が飽和に達するようにするため、陰極、陽極ともに平面としその距離を短くした。光電陰

図 7 試作光電管の構造図

極は可視部において感度の高い Cs_3Sb を、陽極は透明電極を使用し、陽極を通して光を入射させた。本実験では単色光の数 $n=4$ の場合について行なった。図 8 は、単色光を得るために使った干渉フィルタの分光透過率である。

光源としては白熱ランプを点灯し、干渉フィルタを透過した光束を光電管に入射させた。実験方法は図 9 の

図 8 干渉フィルタの分光透過率

図 9 測定回路

測定回路で波長をパラメータとし、各波長の単色光を光電管に入射しながら、主として減速電圧により陽極電圧対光電流特性を測定した。

ランプ用の電源には、光束の変動をできるだけ少なくするため、電圧変動率 0.1(%) 以下の直流安定化電源を使い、電流の測定は 10^{-12} (A) まで測定できる電流計を用いて行なった。なお減速電圧は直流電圧標準器から供給し、実験装置が振動しないよう細心の注意をはらいながら測定を行なった。減速電圧法の実験では飽和領域で使用する場合と異なり、入射光束が非常に大きく、放出電子が多くなると、電子の空間電荷効果の影響が現われ、入射光束と光電流の関係は、比例性が成り立たなくなるので、光束に注意し比例性の成立する範囲で行なった。

実験結果を示したのが図 10 で、各波長の単色光を単独に入射させた場合の減速電圧と光電流の関係である。図 10 の実測値は、光源の各単色光に対する光電流であるから前述の $I_p(V)$ に相当する。図 11 は各波長の単色光を同時に入射し、光学フィルタ V-B3A をそう入した場合の特性曲線である。

図 10 各単色光に対する減速電圧曲線

図 11 光学フィルタ V-B3A をそう入したときの減速電圧曲線

以上の測定結果より、 $V = -0.05$ (V) から 0.2 (V) 間隔に電圧を選定し、すなわち $V = -0.05$ (V), -0.25 (V) — 0.45 (V), -0.65 (V) の各値に対する光電流から行列を作ると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} 21.0 & 18.9 & 14.9 & 14.2 \\ 12.3 & 7.58 & 2.88 & 1.28 \\ 5.77 & 1.62 & 0.053 & -0.0383 \\ 1.68 & -0.219 & -0.236 & -0.121 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 21.5 \\ 7.62 \\ 2.03 \\ 0.141 \end{pmatrix}$$

ただし、 T_1, T_2, T_3, T_4 はおのおの中心波長 395 nm 447 nm, 495 nm, 551 nm の干渉フィルタに対する透過率である。

上式を有効数字 10 桁の電子計算機で解き、表 1 #1 の答えが得られた。図 12 は、光学フィルタ V-B3A の

表 1 光学フィルタ V-B3A の分光透過率

測定方法 波長 (nm)	減 速 電 圧 法						従来の方法
	#1	#2	#3	#4	#5	平均値	
395	0.213	0.215	0.211	0.212	0.211	0.212	0.213
447	0.484	0.475	0.495	0.491	0.495	0.488	0.485
495	0.404	0.439	0.363	0.386	0.392	0.397	0.401
551	0.131	0.103	0.165	0.143	0.113	0.131	0.133

図 12 光学フィルタ V-B3A の分光透過率

分光透過率を分光光度計を使い測定したものである。測定は 5 nm ごとに、単色光波長幅は 0.5 nm 以下で行なった。なお、光束がフィルタに垂直に入射するようにし、測定の際の 100 % 合わせは各波長ごとに調節し、十分な精度が得られるよう注意をはらった。上述の計算結果を図 12 に示すと同図の×印のとおりとなる。その誤差の原因としては次の点があげられる。計算に使用する実測値を得るために、図 8 に示した透過率の干渉フィルタを使用したのであるが、その単色光純度が悪い。光源の分光エネルギー分布 S_λ 、光電管の分光感度 R_λ 、干渉フィルタの透過率 t_λ の積 $S_\lambda \cdot R_\lambda \cdot t_\lambda$ が、中心波長に対して左右対称でないにもかかわらず、近似的に中心波長の分光透過率としている。

一方、干渉フィルタを用いて従来の方法から、光学フィルタ V-B3A の分光透過率を求めると、表 1 のとおりとなる。計算結果は電圧の選定により変動するが、その平均値と、従来の方法から求めた値はかなりよく一致している。

なお、行列の各元素の値はすべて解に影響するので、実測値から行列を作る場合の電圧の選定には、十分注意する必要がある。

5. 考 察

2. では光電管の減速電圧曲線が、近似的に二次曲線で表示できると仮定して理論を展開したが、試作光電管について減速電圧曲線を実測すると図 10 のようになり、ほぼその仮定が満足されていることがわかる。しかし光電管の減速電圧曲線が二次曲線で表示できるということは必ずしも必要条件ではなく、もし他の関数形で表示することが適当な光電管があった場合には、その関数を二次

曲線表示の代わりに使用すればよい。

次に、図 10 の減速電圧曲線において負の電流値、すなわち逆方向電流が存在するのは、光電管の製作過程において陰極以外の部分に光電物質が付着し、光を入射させたとき、それらの部分からの光電子放出によって逆方向電流が生ずるためである。

この逆方向電流は、できるだけ少なくすることが望ましいが、もしそれが若干存在しても、停止電圧が入射単色光の波長だけに依存して、入射光の放射束には無関係であるという条件は満足されるので、2. の理論はそのまま適用してさしつかえない。

次に、光電管の空間電荷効果の減速電圧曲線に及ぼす影響について考えると、入射光の強度が特に大きい場合は光電子流密度も大となって、空間電荷効果が顕著になり、減速電圧特性における入射光束対光電流の間の比例性が失われることになる。したがって、減速電圧特性を応用する場合には、特に入射光強度を適当な値以下に調整することが必要である。

3. および 4. 述べた行列計算において、用いられる各元素の数値の精度が、最終の解の値に重大な影響を与えることがある。特にその影響は逆マトリックスの計算において顕著に現われる。したがって減速電圧曲線自体が十分再現性のよいことと同時に、その曲線の計測では有効桁数の多い十分精度の高い測定値を求め、その後の数値計算においても、誤差の伝播を十分注意する必要がある。

6. 結 言

従来、一般に行なわれている応用とは別に、減速電圧曲線を他の方面に応用することを目的に、減速電圧曲線が入射光の分光組成に関して固有であり、光電流と入射光束の間には比例関係が成立するなどの基礎となる重要な性質を調べその応用を述べた。本論文ではその応用として、光源の分光エネルギー分布の測定、光学フィルタの分光透過率の測定などの分光測光について述べた。その方法としては、被測定光源の放射する各振動数の単色光に対する減速電圧曲線を、入射単色光の放射束に対して正規化しておく。次に光源の放射光を直接光電管へ各単色光を同時に入射させたときの特性曲線を実測する。適当な電圧 n 点を選定し、それぞれの電圧に対する実測値から n 元連立方程式を作り、それを解くことによって光源の分光エネルギー分布を求めることができる。

本論文では、実測例として 4 元の連立一次方程式を作り、それから光学フィルタの分光透過率を求めた。その方法は次のとおりである。光源の各振動数の単色光をそれぞれ単独に光電管に入射させた場合の減速電圧特性をあらかじめ測定しておく。次に光学フィルタなどの試料

をそうし、各振動数の単色光を同時に光電管に入射させて光電流を測定する。適当な電圧を選定し n 元の連立一次方程式を作りその解を求める。この方法で求めた解と従来の方法で求めた結果はかなりよく一致し、減速電圧特性が、このような方面にも利用できることが明らかとなった。

参 考 文 献

- (1) たとえば、L. A. Du Bridge : Phys. Rev. 43 (1933) 727
L. Apker, E. Taft, J. Dickey : Phys. Rev. 74 (1948) 1462

L. Apker, E. Taft, J. Dickey : J. Opt. Soc. Amer. 43 (1953) 78

宮沢・福原：東芝レビュー 8 (1953) 46, 110

佐方：研究実用化報告 4 (1955) 418

山口・小林：昭 39 電学東京支部大会 79

- (2) G. C. Sziklai, A. C. Schroeder : J. appl. phys. 17 (1946) 763

- (3) 加藤・鈴木・篠田：応物 21 (1952) 20

- (4) 山口・小林：昭 42 電四学連大 853

- (5) 森口・高田：数値計算法(現代応用数学岩波講座) 1958

(受付 1967 年 11 月 14 日)