絶縁物の二次電子放出比の一測定法

NHK 技術研究所 中村 統太郎
佐 藤 一 夫

零位法による二次電子放出比の測定法について紹介し、この方法の得失を考察した。また一次電子流により表面電位を復元する測定法について説明し、この方法への零位法の適用方法についてのべた。また測定上の一、二の問題について付記した。

撮像管や蓄積管では、その動作機構の主要部分に半導体や絶縁物の二次電子放出を利用しているものが多い。われわれは撮像管、蓄積管の基礎研究の一部として、半導体や絶縁物など比抵抗の高い物質の二次電子放出比測定装置の試作研究を行なった。このさい、零位法による測定法を知り、追試の結果すぐれていると思われたので、これの試作測定装置への適用を試みた。また、測定管と測定結果について記した。

1. 二次電子放出比測定法

二次電子放出比は、物質を電子で衝撃したとき発生する二次電子電流と一次電子電流の比であって、この電流測定には普通、第1図(a)または(b)の回路が用いられる。図で V_p は一次電子加速電圧、 V_c はターゲットから放出した二次電子をコレクタに捕集する電界を与える電圧、 V_c' は放出二次電子をターゲットに追返す減速

電界を与える電圧である。図に示した電流計で(a)図では一次電子流 i_p と二次電子流 i_s を、(b)図ではコレクタに加える電圧を切換えて、①の場合には i_p 、②の場合に $i_p - i_s$ を測定することができる。

第1図の測定法は i_p および i_s の直接的測定から二次電子放出比 (δ) を求めるものであるが、Dobretsov と Matskevich¹⁾ は第2図の回路を用いて、零位法による二次電子放出比の測定を行なった。図の AB 間の電圧を V_{AB} とすれば

$$V_{AB} = R(i_p - i_s) + R_0 i_p$$

となり、 R または R_0 を変えて $V_{AB} = 0$ とすれば

$$R(i_s - i_p) = R_0 i_p$$

したがって

$$\delta = \frac{i_s}{i_p} = 1 + \frac{R_0}{R}$$

となり、二次電子放出比は抵抗の比として求めることができる。抵抗 R および R_0 は正確に測定することができるから、精度は零点検出器の感度で支配されることになる。Dobretsov と Matskevich は零点検出器として前置増幅器を付加したシンクロスコープを用いて、アルカリ・ハライドの二次電子放出比を測定し、 $\Delta\delta/\delta = 1 \sim 2\%$ の精度を得た。これは従来の方法による精度が 10% 程度であったものを著しく改善したことになる。

この方法の得失を考察すると

1. 零位法であるから上に記したように増幅器の利得の変動や、直線性に左右されずに測定精度を高めることができる。

2. 同時刻における二次電子流と一次電子流の比を測定するから、一次電子流が漂動しても二次電子放出比への影響はほとんどない。また絶縁物の測定に対して、同一表面電位における二次電子流と一次電子流から二次電子放出比を求めることになる。

筆者紹介

なかむら どうたろう 昭和19年、東京物理
中村 統太郎 学校理化学科卒業。
昭和17年 NHK 勤務、技術部を経て技研電子管研究部で撮像管および受像管の試験研究に従事。正会員。

さとう かずお 昭和26年、東京理科大学理学科卒業。
佐藤 一夫 NHK 技研、電子管研究部勤務。撮像管、蓄積管の研究に従事。

"A Method for Measuring the Secondary Electron Emission Yield of Insulators" by Totaro Nakamura and Kazuo Sato.

3. 付随的なことになるが、二次電子放出比が1になる一次電子速度の検出は容易である ($R_0=0$ としておいて、 $V_{AB}=0$ となる電圧を求めればよい)。

4. 欠点としては、二次電子放出比が1以下の場合には測定できない。絶縁物の場合は一般に二次電子放出比が1よりかなり高いから、とくに低速度における放出比の値を知る必要がある場合のほかは問題はないと思われるが、金属では1.8をこえるものはないから、一般に適当でないと思われる (零位法による $0 \leq \delta \leq 2$, $0 \leq \delta \leq n$ の測定法については、付録1参照)。また一次電子流、二次電子流の単独の波形は現われないから、これらの観察をも必要とする場合には向かない。

2. 絶縁物における二次電子放出比の測定

絶縁物 (半導体も含む) の二次電子放出比測定に対しては金属の場合と異なり、その表面電位を考慮しなければならない²⁾。絶縁物を電子ビームで衝撃すると、電荷の充電もしくは放電を生じて、その表面電位は一次電子速度 V_p (V_p は陰極に対する信号電極電圧)、コレクタ電圧 V_c (V_c は信号電極に対するコレクタ電圧)、二次電子放出比 δ などに関係する電圧で安定する。この電位を平衡電位という。

一次電子速度と二次電子放出比との間には、一般に第3図のような関係があって、一次電子速度が V_p^I 以下であれば平衡電位はほとんど陰極電位となり、 V_p^{II} 以上であれば V_p^{II} となる。二次電子放出比が1より高い $V_p^I < V_p < V_p^{II}$ の範囲の一次電子速度に対しては、平衡電位は陰極を基準として $V_p + V_c + \Delta V$ となる。 ΔV はコ

第1図 二次電子放出比の測定法

第2図 零位法による二次電子放出比の測定法

レクタ電圧や二次電子初速度などに関係する値である。表面電位が平衡電位に達すると、見かけの二次電子放出比が1となって、信号電極に電流をとりだすことができなくなる。

したがって絶縁物の測定にさいしては、平衡電位に達しないようにするか、または平衡電位を崩して信号電極に電流があらわれるようにする必要がある。加熱、薄膜化などにより試料の導電性を高めて、平衡電位に達しないようにして直流で測定する静的測定法は、試料の性質がもとの性質と変わるおそれがあるから、あまり行なわれず、動的測定法が普通用いられる³⁾。

第4図は Johnson⁴⁾ が行なった方法で、動的測定法の基となった。パルス幅 $1 \mu s$ の頂部の平坦なパルスを測定管に加えて、パルス電子流でターゲットを衝撃すると、絶縁物は荷電するが、導電率に対してパルスの繰返し周波数を適当にえらび、パルスの1周期の表面電位が信号電極電位に戻るようにすれば、絶縁物のインピーダ

第3図 一次電子速度と二次電子放出比の関係

第4図 Johnson による二次電子放出比測定回路

第5図 一次電子流で表面電位を復元する二次電子放出比の測定法

レンズを通して信号電極に $i_p - i_s$ を測定することができる。またスイッチを i_p の位置にすれば一次電流 i_p を測定することができる。この方法で周期を十分に長くした場合、単一パルス法という。

動的測定法にはこのほか、第二電子銃を設けて表面電位を第二電子銃の陰極電位にする方法、ターゲット、コレクタ、陰極などを変調する方法があるが、つぎにわれわれが行なった方法を説明する。

たとえば蓄積管に使用している CaF_2 ターゲットについてみると、保持時間は12分ないし80日に達し、単一パルス法による測定を行なえば、パルスの周期もこれだけの時間が必要となる。これを避けるために、原理的には Johnson によるパルス法と同様であるが、表面電位の安定化を絶縁物の導電率による自然放電によらないで、コレクタを信号電極に対して負としたときの一次電子流によったこと、また一次電子流と二次電子流とを交互に測定する点が異なる。

二次電子測定管のグリッドに第5図(a)のように広狭2種の繰返しパルス波形を加えて、これに対応した一次電子流でターゲットを衝撃する。コレクタには(b)のようなパルスを加えて、正電圧がパルスSを蔽うように、またパルスPに対しては負電圧であるようにする。(d)の出力抵抗にはPに対応して一次電子流 i_p 、Sに対応して一次電子流と二次電子流との差 $i_p - i_s$ が流れるから、これをオシロスコープで観測すると二次電子放出比 δ が求められる。

表面電位はコレクタ電圧が正のときは負電荷の放電によって上昇し、負のときは充電して下降する。定常状態においてターゲットの抵抗が高ければ、パルスPにより充電される電気量とパルスSにより放電される電気量とは等しい。パルスPの幅をパルスSの幅に比して十分広くして、 δ が高いときも充電電気量の不足による面電位の変動がないようにする。

この方法はオシロスコープ上に繰返し出力波形を見ることができ、単一パルス法よりも測定がはるかに容易である。一方、欠点としては絶縁物の表面電位がはっきりわからないことである。すなわち絶縁物の表面電位はコレクタ印加電圧の正負の間にあるが、それを定量的にいうことができない注)。パルスPを加えたときの表面電位を V_{Tp} とし、パルスSを加えたときの表面電位を V_{Ts} とすれば、 i_p 測定ときは $V_p + V_{Ts}$ の一次電子速度における電流を測定し、 $i_s - i_p$ 測定ときは $V_p + V_{Tp}$ の一次電子速度における電流を測定していることになり、 V_{Ts} 、 V_{Tp} の差が大きければ、電圧に対する二次電子放出比の変化の大きい低速度で誤差が増加する。それゆえ表面電位の差はできるだけ少ないことが望ましいから、パルスSとしてできるだけ幅の狭いパルスを用いている。

注) Karnaukhova と Upatov⁶⁾ によれば、信号電極に絶縁物を付着させたターゲットでは、コレクタに絶対値の同じ正負の電圧を加えても、絶縁物表面と信号電極とで作られる絶縁物の表面近傍の電界が、コレクタが負のときはコレクタの作用を助長するように働いて、ほぼコレクタ電圧に等しくなるが、コレクタが正のときは放出を抑制するように動作して、かなり低い電圧で飽和するといわれる。

3. 零位法による絶縁物の二次電子放出比の一測定法

ニッケル・ターゲットの二次電子放出比は、第1図(a)の方法で測定していたが、電流計の漂動が激しく測定が困難であったことがあり、このとき第2図の零位法で測定したところ、測定が容易となり精度も向上し

第6図 零位法による二次電子放出比の一測定法

た。そこで、われわれの行なっている上記の絶縁物の放出比測定法への適用を考えて第6図の回路を構成した。

コレクタに加える電圧はチョッパ（電磁振動形）を用い、商用周波で電池 E_0 , E_0' を切換えて正負の電圧を交互に加える。ビーム変調パルスは、図のような広狭2種のパルスでコレクタ電圧に対し図のような位相としてある。コレクタ電圧が正になった期間の一次電子流で測定し、負になった期間の一次電子流は表面電位復元化にのみ用い、測定には直接寄与しない。この狭幅パルスによる出力波形の前縁が0になる点で平衡したことになる、 $\delta=1+R_0/R$ として放出比を求めることができる。抵抗 R として $200\ \Omega$, R_0 として $10\ \Omega$ とびで $0\sim1100\ \Omega$ の抵抗器を用いたから、測定範囲は $\delta=1\sim6.5$ で、0.05 おきの値が測定される。

チョッパの接点、電池を二次電子流が通るから、漂遊容量による誤差がないように注意し、また電池、チョッパの接続方法でオシロ上の波形に重畳するノイズも変ったが、図の方法がよかった。

i_p , i_p-i_s について、それぞれの波形の尖頭値から算出する方法にくらべて、測定が容易であり、低加速電圧で電流の少ないときにも精度の向上が認められた。

写真1に測定装置の外観、第7図に測定回路のブロックダイアグラムを示した。なお、測定装置内部の一方で測定管の格子に数 10 V のパルスを加え、他方でこれによるパルス・ビームが絶縁物ターゲットを衝撃し、波形

写真 1 測定装置

が変換されて出力抵抗に現われる数 mV の波形を測定するのであるから、漏洩について、十分の注意が必要である。

測定装置について詳細は略すが、電子ビームの変調とパルスの立上り時間については付録2,3に記した。

4. 二次電子測定管

二次電子放出比測定管としては、つぎの諸条件に適合するものが望ましい。

(1) 一次電子ビームは一次電子速度やコレクタ電圧が変化しても、つねにターゲットを正しく衝撃（一定の位置、一様の大きさ、一定の形状）すること。

(2) 一次電子ビームは、ターゲット以外の電極を

第7図 測定回路のブロックダイアグラム

写真 2 測定管の外観

第 8 図 二次電子測定管の電極構造

衝撃しないこと。

(3) コレクタの二次電子捕集性能のよいこと。

(4) 測定の便宜上、一次電子流の内部抵抗が高いこと。

これらの諸条件を十分満足する管の設計はむずかしいが、これらを目指して試作した測定管の外観を写真 2 に、電極構造を第 8 図に示した。電子銃は使用条件において、ターゲット以外に流入する電子流は一次電子流の 10% 以下である。また一次電子ビームのターゲット衝

↑ 第 10 図 コレクタ電圧と一次電子流変化率

撃の状態をみるため、けい光面ターゲットを用いて G_2 , G_3 , G_4 の各電極電圧 E_2 , E_3 , E_4 をパラメータとして輝点の直径を測定した。第 9 図は陰極電圧 $E_K = -500$ V, ターゲット電圧 $E_T = 0$ V としたときの輝点特性で、輝点にコレクタの蔭を生じたり、はなはだしくひずんだ場合は×印で示した。これらの図から $E_2 < 0.6 E_K$, $E_3 = (0.8 \sim 1) E_K$, $E_4 = 0 \sim 0.7 E_K$ のときに集束がよいことがわかる。エミッションの点からは E_2 は高い方がよく、また輝点（ビーム）の大きさは試料の変質・破壊を防ぐために電流密度の低い方がよいから、直径を 6 mm とし、 $E_2 = 0.65 E_K$, $E_3 = 0.9 E_K$, $E_4 = 0.5 E_K$ を最良条

第 9 図(1) 測定管の輝点特性

第 9 図(2) 測定管の輝点特性

件とした。

この電圧配分で一次電子速度を変えたときの輝点直径を測定したが、ほとんど変化が認められなかったので、測定はすべてこの電圧関係で行なった。

コレクタ電圧を変えたときの一次電子流の変化を、第10図に示す。実際にはコレクタ電圧は $\pm 50\text{ V}$ 以下で用いるから、一次電子速度が 200 V で 5% くらい速度が高くなれば、ほとんど一次電子流へ影響しない。

ターゲット面は二次電子測定試料として十分再現性をもつことが望ましく、一般につき諸点に注意が必要である。

1. 面の一様性

一次電子ビームの衝撃範囲を十分に蔽う大きさに対して、平坦さ、均一性が必要である。そのためには材料の均質を要するほか、信号電極リードの構造、温度特性の必要な場合には加熱法、温度測定点の位置などにも考慮を払う必要がある。

2. 下地金属の影響

金属でも絶縁物でも薄膜としたとき、信号電極の下地金属となじんだり、反応をおこすことがあるから、信号電極材料の選択、表面処理などによって測定試料に影響のないようにする必要がある。また、きわめて薄い膜では、一次電子が膜を透過して信号電極を衝撃することを念頭におく必要がある。

3. 面の状態

面の汚れを避けることは当然であるが、製作工程に支

第9図(3) 測定管の輝点特性

第11図 Niの二次電子放出比

第12図 CaF_2 (10μ)の二次電子放出比

配される面の状態(たとえば高真空中における蒸着か、ガス中における蒸着かによって、ガラス状あるいはポーラスになることなど)や、工程の途中で状態の変化がないような注意が必要である。

これらの諸点を考慮して CaF_2 、 MgO などのターゲットを試作した。信号電極はニッケル板を使用し、測定範囲に溶接による凹凸が表われないように、支持兼リード用のニッケル線はできるだけ外側に付けた。ターゲット温度測定用の熱電対は Ni-W を用い、測定点には熱遮断蔽板をつけてヒータの輻射熱が直接当らぬようにし、加熱は後部からタングステン・ヒータにより行なう。この信号電極上に測定試料、たとえば CaF_2 をガス中で数 μ の厚さに蒸着すれば、蓄積管で使用しているターゲットと同様なポーラスな試料ができる。

膜厚は干渉顕微鏡または秤量法により測定した。

電子銃、コレクタはニッケルを使用し、ヒータはタングステンをを用いた。コレクタ内部はグラファイトを塗布して二次電子の反射を防ぎ、また信号板とコレクタの間にはセラミック板を入れて絶縁物表面と信号電極間の電位差による電子の動きを防止した。

5. 測定例

第11図～第14図は零位法による二次電子放出比の測定結果である。第11図は参照用の Ni ターゲットを絶

第 13 図 CaF_2 (6.5μ) の二次電子放出比

縁物と同様に扱って測定したもので、測定点が曲線から若干離れているのは前記のように 0.05 おきの値しか測れないからである。なお絶縁物の場合は尖頭値の零点を検出しなければならないから、金属の場合より、いづれか測定しにくい。

6. む す び

二次電子放出現象は複雑であって、放出比の測定だけに限定しても、このほかいろいろの問題がある。精密な測定には、これらを考慮しなければならない。

終りに研究の機会を与えられた山下次長、小松部長、指導をいただいた吉永副部長、測定管の試作を担当した電子管試作研究室、討議をいただいた撮像管研究室の方に深く感謝する。

(昭和 37 年 3 月 26 日受付)

付 録

1. 零位法による $0 \leq \delta \leq 2$, $0 \leq \delta \leq n$ の測定法

Sashea と Dekker⁷⁾ はチタン単結晶の二次電子放出の研究にさいして、第 15 図の回路を用いて二次電子放出比の測定を行なった。ポテンシオメータを動かして、検流計の振れが 0 となれば次式が成立する。

←第 14 図 $\text{MgO}(\text{Smoke})$ の二次電子放出比

↑第 15 図 Sashea と Dekker による二次電子放出比測定法

$$\delta = \frac{I_c}{I_p} = \frac{r \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega}$$

$0 \leq r \leq 100 \text{ k}\Omega$ であるから、 $0 \leq \delta \leq 2$ の範囲の測定ができる。Dobretsov-Matskevich の方法による測定範囲が $1 \leq \delta$ であるのにくらべて、金属の二次電子放出比測定に有用であり、また零位法であるから精度が高い。

さらに第 16 図の回路を用いれば、ポテンシオメータの調整による検流計の振れ 0 の条件で $\delta = 0 \sim n$ の測定が可能になる。(a) の等価回路 (b) より、次式が成立する。

$$i_{p1} = \frac{2nR_0 - r}{2nR_0} i_p, \quad i_{p2} = \frac{r}{2nR_0} i_p$$

$$i_{s1} = \frac{R_0}{2nR_0} i_s, \quad i_{s2} = \frac{(2n-1)R_0}{2nR_0} i_s$$

これと平衡条件 $V_{AB} = V_{CB}$ から次式が成立する。

$$r(i_{p1} - i_{s1}) = (nR_0 - r)(i_{p2} - i_{s2})$$

したがって

$$\delta = \frac{i_s}{i_p} = \frac{r}{R_0}, \quad (0 \leq r \leq nR_0)$$

すなわち $0 \leq \delta \leq n$ の二次電子放出比を測定できる。

Sashea-Dekker 法は、これの $n=2$ の場合である。

この回路によって動的測定をする場合には、ブリッジの各辺を過渡電流が通過すること、また検流計の両端子とも接地できないことに注意する必要がある。

2. 電子ビームの変調法について

陽極を接地し、陰極に負電圧を加えて使用する電子管で、負電圧電源として商用周波の整流回路を用い、慣用の CR 結合で格子を駆動してビーム変調を行なう場合は、電子流に電源リップルがあらわれやすい。これは第 17 図のように陰極には電源リップルがそのまま加わるが、格子には C_g と R_g , R_L , r_p により形成される波回路を通して、平滑化した波形が加わる。したがって陰極格子間には、ほぼ電源リップルに等しい電圧が加わり、これが変調信号に重畳するためである。

これは第 18 図のように、格子接地間を変成器で隔離

第 16 図 零位法による $0 \leq \delta \leq r$ の測定法 →

第 17 図 リップルの
成因

第 18 図 リップルの除去
方法

第 19 図 絶縁物の表面電位
と電子流の波形 →

することにより避けることができる。

試作測定装置では、変成器として一次、二次間耐圧 7 kV、帯域幅 20 c/s~4.5 Mc (−1 dB, 0.28 Vp. p), インピーダンス比 150 Ω : 150 Ω のビデオ・トランスを使用し、トランジスタ 1 段の増幅器を通して格子を駆動している。この結果、電子流へのリップル重畳はなくなった。

3. 二次電子放出比と駆動パルスの立上り時間について

絶縁面は巨視的に考えると、高抵抗 R と容量 C の並列回路と考えることができるから、 $t > 0$ で電流 $i(\tau)$ が絶縁物を流れれば、絶縁物の両面間電圧 $V(t)$ は

$$V(t) = \int_0^t \frac{i(\tau)}{C} \exp\left[-\frac{(t-\tau)}{RC}\right] d\tau$$

で表わすことができる。いま一次電子流も二次電子流も定電流源とし、絶縁物の二次電子放出比は、2 つの平衡電位の間では δ 、平衡電位で 0 とする。

第 19 図 (A) は一次電子流の立上り時間が 0 のとき、(B) は立上り時間が表面電位の変化時間に対して短かいとき、(C) は長い場合である。(A) の場合、いまターゲットの表面電位が $E_{T(+)}$ にあるとき、コレクタを負にして一次電子流で衝撃すると、表面電位は (b) のように低下して $E_{T(-)}$ で平衡電位に達し、一次電子流 i_p (a) が信号電極からとりだせる。つぎにコレクタ電圧を正として衝撃すれば、二次電子流 δi_p を放出し、 $(\delta-1)i_p$ で電荷を放電して (d) のように表面電位が上昇し、平衡電位に達して (c) のように $i_s' = i_s - i_p$ が信号電極からとりだせる。

(B) の場合は、一次電子流の立上り時間が τ_B であるときは $E_{T(+)}$ から $E_{T(-)}$ に移る時間も、 $E_{T(-)}$ から $E_{T(+)}$ に移る時間も (A) の場合より増加し、また二次電子流 i_s も i_s' も立上り時間は τ_B となる。 i_p にも i_s' にも (a), (c) のように平坦部が現われ、二次電子放出

比は平坦部の振幅比から求められる。

(C) の場合は、一次電子流測定の場合については、立上りの途中の τ_{cp} で表面電位は平衡電位に達し、 i_p の一部しか観測できず平坦部を生じない。 i_s' についても同様で、 $\delta > 1$ であれば $\tau_{cs} < \tau_{cp}$ で平衡電位に達する。したがって二次電子放出比は $i_s'(\text{peak})/i_p(\text{peak})$ から求めることはできず、 τ_{cs} における i_s' の値と i_p' から求めなければならない。これは (B) の場合に平坦部の振幅比から求めることができるのにくらべて測定が面倒になる。この考察よりパルスの立上り時間は表面電位の変化時間に対して短かいことが必要である。

さらに二次電子初速度やコレクタの捕集性能を考慮すると、一定電子流に対しても表面電位の変化は平衡電位の近くで彎曲するから、立上り時間は彎曲点に達するまでの時間より短いことが必要になる。

〔参考文献〕

- 1) L.N. Dobretsov and T.L. Matskevich: The Role of Reflected Electrons in Secondary Electron Emission. J. Tech. Phys. (U.S.S.R.) 27, 734 (1957). Soviet Physics-Technical Physics. p. 667.
- 2) K. Knoll and B. Kazan: Storage Tubes and Their Basic Principles. John Wiley & Sons Inc., 1~18.
- 3) K.G. McKay: Secondary Electron Emission. Advances in Electronics Vol. 1 Academic Press Inc., 97~120.
- 4) J.B. Johnson: Secondary Electron Emission from Targets of Barium-Strontium Oxide, Phys. Rev. Vol. 73 No. 9, May 1, (1948), p. 1058.
- 5) 山戸利美, 佐藤一夫: 蓄積管における絶縁物の蒸着について, テレビ電子管研究委員会資料, 97 号, 35.7.22, 5~9.
- 6) N.M. Karnaukhova and V. Ia Upatov: Experimental Investigation of Charge Formation on the Surface of a Dielectric under the Influence of Electron Bombardment. Part II, Radiotekhnika i. elektronika, 4, No. 3 (1959) 521~526.
- 7) R.W. Sashea and A.J. Dekker: Fine Structure of Secondary Emission vs Angle of Incidence of the Primary Beam on Titanium Single Crystals, Phys. Rev., Vol. 121, No. 5, May (1961), 1362.