

研究論文

ファラデーカップ機能付き 2 次電子増倍管の特性

名古屋工業大学 竹市嘉紀・後藤敬典
〒466 名古屋市昭和区御器所町

1. はじめに

2 次電子増倍管はオージェ電子分光法 (AES)、X 線光電子分光法 (XPS)、イオンなどの荷電粒子あるいは中性粒子検出器として広く用いられている。しかし、利得が電子の入射エネルギーや使用する環境や時間に伴い変化し、また増倍管内での増倍過程が確率過程であることなどの不確定要素を含み、それぞれ固有の特性を示す。検出信号を定量的に解析するためにはこれらの要素を明確にする必要があり、多くの研究者によってエネルギー依存性¹⁻¹⁴、経時変化^{2,3}、印加電圧依存性^{8,9,14,15}などが調べられ、理論的な解析^{14,15}及びシミュレーション^{16,17}なども行われている。パルスカウンタ法による電子の検出では、報告されている検出効率の最大値は 60 ~ 90% 程度^{1,2,4-10}とばらついており、またユーザーが各装置に用いられている増倍管の特性を把握するのは容易ではないため、表面分析研究会では自己較正が行える 2 次電子増倍管を提案し開発した¹⁸。これはファラデーカップとして用いることができ、これによって絶対的に計測したスペクトルと増倍管として使用したときのスペクトルとを比較することができ、利得のエネルギー依存性が求められるものである。我々は標準オージェ電子分光器取得のための分光器^{19,20}を製作しており、この増倍管を我々の分光器の検出器 (ファラデーカップ) に置き替えて特性を計測し、絶対的に計測したものと利得を比較することにより、開発したファラデーカップ機能付き 2 次電子増倍管の特性を調べた。

2. 実験

ファラデーカップ機能付き 2 次電子増倍管の写真と模式図を図 1, 2 に示す。本増倍管は表面分析研究会によって開発され米国ガリレオ社により試作された (4860 型をベース, No.59128)。3kV の印加電圧に対して $\sim 10^7$ の利得になるように設計されている。増倍管はステンレス製の外筒シールド (アース電位) に納められており、入射粒子 (電子) の入口は直径 5.5mm のアパーチャーになっている。増倍管本体は鉛ガラスで製作されており、高絶縁性のガラスでコレクター (Signal) につながれている。入射側の円錐部とアパーチャー間でファラデーカップが形成され、一旦入射した電子は外部に出にくい構造になっている。この部分をファラデーカップとして用い、このときには全ての端子の結線ははずして浮か

た状態にし、Ground 端子とアース電位との間にエレクトロメータを接続して、入射した電子を電流量で計測した。シールド部とアパーチャー部分はステンレス、前面のキャップはアルミナでできており、接着剤 (銀・エポキシと思われる) が露出している。このファラデーカップ状の入射部を除いては一般のチャンネルトロンと類似である。Ground 端子を接地し H.V. 端子に高電圧を印加すると抵抗皮膜はつながっているため自動的に入射口と出力コレクター (Signal 端子) にそれぞれ引込みと捕集バイアス電圧がかかるようになっている。Ground 端子から H.V. 電極までの抵抗値は 117.5M Ω であり、Ground と H.V. 間の高電圧は自動的に分割され、引込みと捕集バイアス電圧はそれぞれこの印加電圧の 18.5% と 8.1% になる。増幅された出力信号は 1 ~ 3kV の高電圧に浮

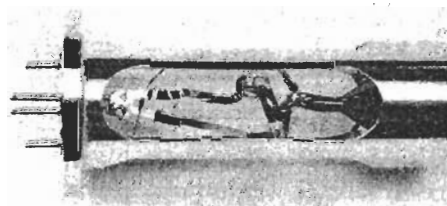


図 1: ファラデーカップ機能付き 2 次電子増倍管

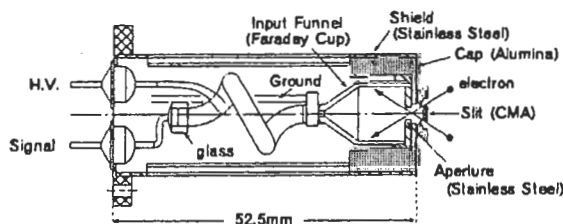


図 2: 実験に用いた増倍管の模式図

いた Signal 端子に出力されるため、トランス結合型アイソレーションアンプ (AD 210AN) を用いてグラウンドレベルに降ろして計測した。このファラデーカップ機能付き 2 次電子増倍管をファラデーカップとして使用して得られたスペクトル (ファラデーカップモード) と本来の増倍管として得られたスペクトル (増倍モード) をほぼ完全なファラデーカップ¹⁹で取得したスペクトル (標準スペクトル) と比較し、本増倍管の特性を調べた。試料は同一の Si(111) で、1 次電子の加速電圧は 5000V、1 次電子流は 1.00 μ A である。

3. 結果と考察

標準スペクトルとファラデーカップモードのスペクトルを図3に示す。また、これらの比を図4に示すが、これは本増倍管をファラデーカップとして使用したときの電子の補集効率を示している。補集効率はエネルギー

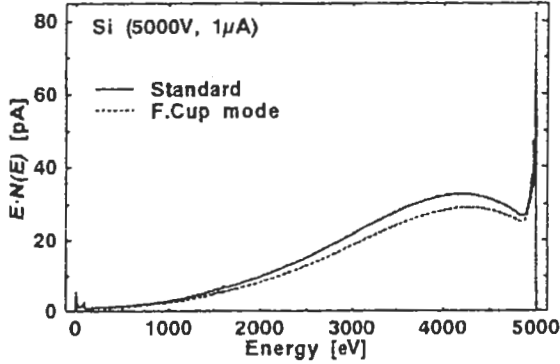


図3: 標準スペクトルとファラデーカップモードのスペクトル

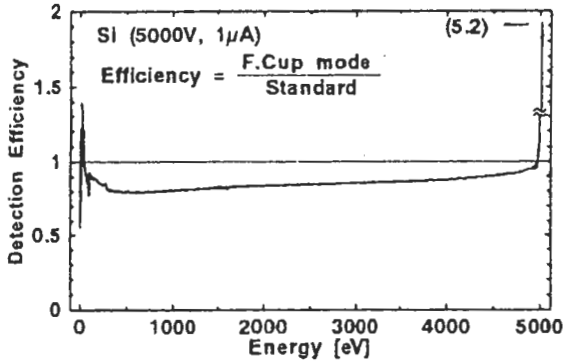


図4: 増倍管の補集効率

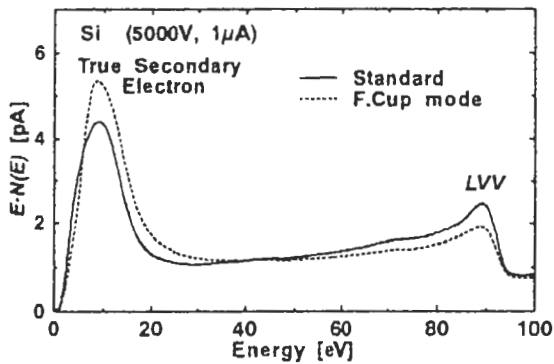


図5: 標準スペクトルとファラデーカップモードのスペクトル (2次電子 ~ Si LVV ピーク付近)

に依らず 100% であるのが理想的だが、数百 eV 付近では 80% 程度と最も低く、5000eV 付近では約 95% であり、この間の特性変化は緩やかである。これは入射した電子によって発生した 2 次電子が入射口から出てしまうため、2 次電子収率の高い数百 eV 付近で特に補集効率が低くなると考えられる。また、入射電子による入射口での電位降下は Ground に対して大きくても 2 mV 以下と見積もられ、これによる補集効率への影響は無視

できる。さらに、真の 2 次電子、及び弾性散乱電子付近は奇異な特性を示し、特に弾性散乱電子ピークの高エネルギー側 (試料からは放出されていないがゴーストとして現れる) では比が 5 倍近くになっている。これはスペクトルの形状が微妙に異なっていることが原因である (図 5, 6)。弾性散乱電子ピークの近傍ではゴースト電子

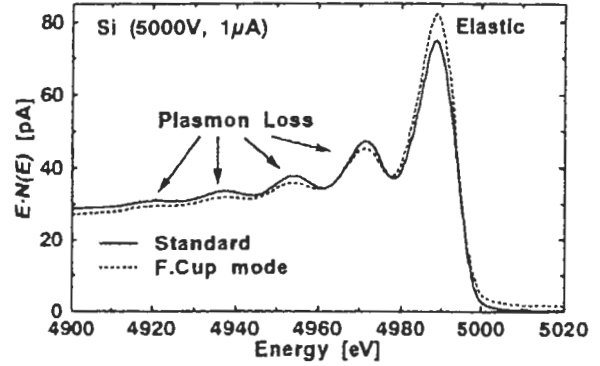


図6: 標準スペクトルとファラデーカップモードのスペクトル (弾性散乱ピーク付近)

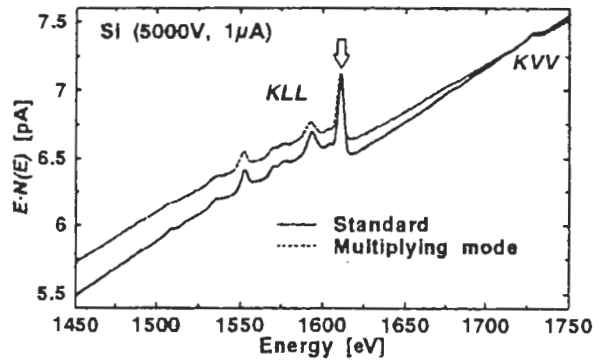


図7: 標準スペクトルと増倍モードのスペクトル (KLL オージェ電子付近)

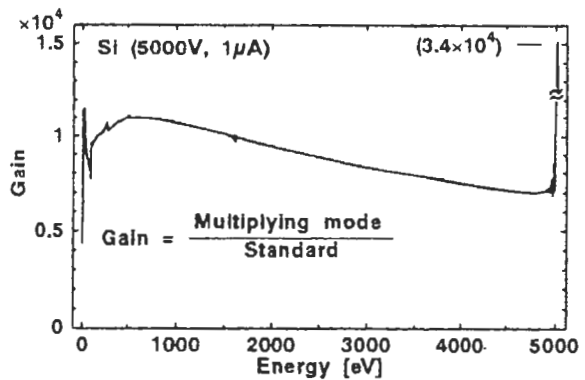


図8: 絶対利得のエネルギー依存性

による強度が、標準スペクトルでは 0.3pA に対しファラデーカップモードのスペクトルでは 1.6pA となっており、絶対値はともに小さいが比をとると大きくなる。

標準スペクトルと増倍モードのスペクトルの KLL オージェ電子付近を図7に示す。強度は標準スペクトルの $KL_{2,3}L_{2,3}$ ピークの位置 (矢印) に合わせてある。ファラデーカップとエレクトロメータによる絶対計測は

増倍管を用いた高感度な計測に劣ることはなく、むしろ構造がよりシャープに観測されることがわかる。増倍モードのスペクトルを標準スペクトルで割り算した結果を図8に示す。これは本増倍管の絶対的な利得を示す。前述と同じ理由により両端には奇異な特性が現れているが、全体的には先に報告されたもの¹⁸⁾とほぼ同じ特性を示しており、この特性は2次電子利得の一般的特性²¹⁾から推測できる。本増倍管では利得は500eV付近で最大となっている。この増倍モードのスペクトル取得時にはH.V.端子に2210V(適当な利得となる電圧)の高電圧を印加しており、増倍管の入口には約410Vの引込み電圧がかかっている。従って増倍管に入射した電子は低エネルギーの電子でも十分に加速されて増倍がなされる。しかし、ファラデーカップモードでは増倍管の入射口電圧降下が2mV程度でほとんど入力バイアスがかからないため、入射口に引込まれることのない入射口付近を迷走している散乱電子まで引込み電圧で引込んでしまうため、特性は更に複雑になっていると考えられる。

本増倍管からの出力の経時変化については詳細には調べていないが、未使用の状態からの使い始めに特に顕著で、使用開始から数分間で利得が半分程度まで減少した。また、電子を入射させないでも異常に多い暗電流が流れ続けることもあり、さらに印加電圧を“0”にしても1~10pA程度の電流が数時間以上にわたり流れ続けることもあったが、いずれも再現性はない。これらの原因としては、信号入力及び電圧印加時に増倍管に使用されている材質(特に絶縁体)に電荷が蓄積され、これらが放出されたためと考えられる。また、このような現象はファラデーカップモードのときでも起きており、弾性散乱ピークの高エネルギー側などのピークの形状の違いの原因の1つと考えられる。尚、増倍管とこれへのCMA内での結線はCMAの制約上、特にシールドが施されていないのでCMA内での色々な要因による迷走電子を拾い上げていることも十分考えられる。

4. まとめ

絶対スペクトルとの比較により、ファラデーカップ機能付き2次電子増倍管の利得のエネルギー依存性を調べた。本増倍管を絶対計測に用いた場合、その誤差は約20%程度と見積もられるが、更にスペクトルの形状が微妙に変化することを考慮しなくてはならない。特に増倍管に使用されている材質での電荷の蓄積・放出の効果は大きいことに加えて再現性に乏しく、スペクトルの形状や利得は実験毎に影響を受けて変化していると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたりガリレオ社からは貴重な試作

品の提供を受けた。また、日本表面分析研究会(吉原一敏委員長)の各位には多大なご協力と助言を賜った。ここに記して深く謝意を表す。また、本研究は科学技術振興調整費の援助を受けて行なわれたものである。

参考文献

- 1) J.R.Sharber, J.D.Winningham, and W.R.Sheldon, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-15 (1968) 536.
- 2) A.Egidi, R.Marconero, G.Pizzella, and F.Sperli, Rev. Sci. Instrum. 40 (1969) 88.
- 3) B.Tatry, J.M.Bosqued, and H.Rerne, Nucl. Instrum. Methods, 69 (1969) 254.
- 4) G.Paschmann, E.G.Shelley, C.R.Chappell, R.D.Sharp, and L.F.Smith, Rev. Sci. Instrum. 41 (1970) 1706.
- 5) J.P.Macau, J.Jamar, and S.Gardier, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23 (1976) 2049.
- 6) F.Bordoni, Nucl. Instrum. Methods, 97 (1971) 405.
- 7) R.J.Archuleta and S.E.DeForest, Rev. Sci. Instrum. 42 (1971) 89.
- 8) L.A.Frank, N.K.Henderson, and R.L.Swisher, Rev. Sci. Instrum. 40 (1969) 685.
- 9) D.S.Evans, Rev. Sci. Instrum. 36 (1965) 375.
- 10) R.L.Arnoldy, P.O.Isaacson, D.F.Gats, and L.W.Choy, Rev. Sci. Instrum. 44 (1973) 172.
- 11) M.P.Seah and G.C.Smith, Surf. Interface Anal. 15 (1990) 751.
- 12) M.P.Seah and G.C.Smith, Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 62.
- 13) M.P.Seah and G.C.Smith, Surf. Interface Anal. 15 (1990) 701.
- 14) M.P.Seah, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 50 (1990) 137.
- 15) M.P.Seah, C.S.Lim, and K.L.Tong, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 48 (1989) 209.
- 16) S.Suzuki and T.Konno, Rev. Sci. Instrum. 64 (1993) 436.
- 17) S.Suzuki and T.Konno, Rev. Sci. Instrum. 66 (1995) 3483.
- 18) 藤田大介・吉原一敏・塩川善郎, 表面科学 15 (1994) 282.
- 19) K.Goto, N.Sakakibara, and Y.Sakai, Microbeam Analysis, 2 (1993) 123.
- 20) K.Goto, N.Sakakibara, Y.Takeichi, Y.Nurnata, and Y.Sakai, Surf. Interface Anal. 22 (1994) 75.
- 21) R.G.Lye and A.J.Dekker, Phys. Rev. 4 (1957) 977

Properties of the secondary electron multiplier having a Faraday - cup capability

Y.Takeichi and K.Goto, Nagoya Inst. Technol. Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan

Properties of the secondary electron multiplier which has a Faraday cup capability was investigated. We used this multiplier in our Auger electron spectrometer which has been constructed to obtain standard spectra. Efficiency of this multiplier in Faraday cup mode was 80% (minimum) at around the energy of entering electrons of a few hundred eV and slowly went up to 95% at around 5000eV. The dark currents and accumulation of charges from and into the materials used in the multiplier could change the spectra.

査読者との質疑応答

査読者：田中彰博（アフバックファイ）、大村卓一（松下テクノ）

1. 田中：「入射側の円錐部とアパーチャー間でファラデーカップが形成され、」

→この場合、電位はどのようなになっているのでしょうか？ 動作状態における電位分布など会議に報告されてはいましたが、まだ報告の形にまとめられていなかったように思いますが…。

著者：この点につきましては、標準スペクトルの強度の最大値（弾性散乱電子ピーク強度）が75pA程度であることと、入射口からGround電極までのバイアス抵抗が21.7MΩであることから、入射口付近の電位は高くてもGroundレベルから2mV以下と見積もられます。従いましてこれによる電子の引込み、あるいは押し戻しはないと考えられます。

2. 田中：「スペクトルの強度は1次電子流に規格化してある。」→小生もこのような言葉の使い方を良くするのですが、この様に述べると一次電子流に対してどのように規格化したのかが分かり難いと思います。一次電子流1Aあたりの電流（dimension: Ampere）の形に規格化したものなのか、一次電子流に対する割合（dimension 無次元）で示したものかというような細かい点も含めて、どのように演算を行なってこの値を得たものが明確に分かるような表現をお願いしたいと存じます。

著者：ここで示したスペクトルは加速電圧5000V、1次電子流1μAのものだけですので、混乱を避けるために絶対値（Ampere）でのみの表記に統一しました。

3. 田中：「この特性は二次電子利得の一般的特性[21]から推測できる」→この動作モードでは、利得が1であるという状況を元々期待しており、チャンネルトロン内部でのcurrent divergenceが0で、かつ入口の穴から抜け出さないとすれば、等しい電流がSignal端子から計測されることを期待していたものでした。増倍電圧をかけて電流増幅を行わないモードでの計測ですので、「特性の一般的特性」として増幅を前提とした特性によって説明することは、論旨に合わないのではないのでしょうか？ 従って、増幅を前提としない動作モードではあるが、ファラデーカップのように振舞うわけではなく、実は利得がある状況を考慮して解析せねばならないということであれば、一般的な場合として押し込めてしまうことは不適切と感じます。この点、もう少し分かりやすい記述をお願いいたします。

著者：この点につきましては御指摘のように修正しました。一般的特性として

推測できるのは増倍モードの特性に関してであります。この増倍管では“ファラデーカップ”の内部も増倍部同様、2次電子収率の高い材質が使用されていますので、入射した電子によって“ファラデーカップ”内で発生した2次電子が入射口から出て行ってしまい、このため2次電子効率の高い数百eV付近で捕集効率ももっとも低くなっていると考えられます。尚、“ファラデーカップ”に+20~+50Vの捕集バイアスを印加すればこの特性は少しは改善できますが、電氣的絶縁など、計測上の困難さが生じます。

4. 田中：「5000eV付近で」→このままの表記ですと、まず弾性散乱ピークの上下両方でかと思いましたが。その後読み進んだ後に、初めて弾性散乱ピークよりもエネルギーの高いところ側のことであろうと推論いたしました。

確かに、後に「弾性散乱ピークの高エネルギー側では…」と記述してその意味になってはいます。しかしながら、「両方かも知れぬ」と感じてから後にこの部分を読みますと「高エネルギー側では」としての記述は、まだ「低エネルギー側が記述されていない」という感覚を残します。記述に工夫をお願いします。

著者：御指摘のように全ての領域で同様の現象は発生しているのですが、弾性散乱ピークの高エネルギー側は本来の信号がなくなるために迷走電子のみが目立ってくるわけで、分かりやすくするために一部修正しました。

5. 田中：ここで同じ疑問を再び抱きました。即ち、ファラデーカップが他からの電流を拾わない限りは発生しないはずの電流を弾性散乱ピークの高エネルギー側では観測していることになるからです。また、グラフは入射電流で規格化して入射電流1Aあたりで記述しているのですが、本文では突然に電流1μAにおける計測電流値に変わり、読んでいてどちらだろうかという不安を感じました。また、どこからこの余分な電流が湧き出てきたかという点は、説明が要るのではないのでしょうか？ チャンネルトロンの内部に入ってからだとすれば、二次電子の発生に伴って外部からその分を供給する回路があったことにはならないのでしょうか？

もしそうだとすれば、外部への接続を行なったことに問題があると言わねばならぬこととなります。その回路を切断できるようにして、チャンネルトロンへの電荷の流入を防いでもなおかつこの様になるものなのか否かといった検討が明示される必要を感じました。

著者：表記に関しては絶対値での表記に統一しました。本増倍管をファラデーカップとして用いたときには、全ての結線をはずして浮かせた

状態にしていますので、外部回路から電荷が供給されることはないはずですが、CMA内を迷走している電子を拾い上げてしまうことが考えられます。特に結線の1~2cm上のところに高圧の電子銃の配線が布設されており、ここからの電界放射(FE)電子には注意が必要です。従いまして、弾性散乱ピークの高エネルギー側で観測している(標準スペクトルと比較して)高い電流は、御指摘により本文で説明しましたが、スリット周辺で発生した低速2次電子を増倍管の入射口にかかっている捕集(加速)バイアス電圧により増倍管に引込んでしまうのが主要因と考えます。

6. 大村：図8中のFaraday CupはStandardの方がよろしいのではないのでしょうか、本文はStandardとなっています。

著者：御指摘のとおり修正いたしました。