磁電管型電離真空計に就て

大阪市大理工学部 兼 松 太

On the Magnetron Type Ionization Gauge

Futoshi Kanematsu

(Institute of Polytechnics, Osaka City University)

Calculation and measurements on the characteristics of ion production in a high vacuum cylindrical magnetron were performed. The coincidence between measured and calculated results is fairly good. The magnetron type ionization gauge offers a good stability owing to the space-charge saturation effect. The experimental results indicate a different characteristic from that obtained by Conn and Daglish¹. In our results, the secondary electrons which are produced accompanying with the gas ionization exhibit a marked effect. It may be considered that this effect is related to the Philips gauge type discharge.

§ 1 緒 言

円筒磁電管の静的飽和空間電荷状態の下で行われる残留気体のイオン化について、それが陽極電圧や磁界の変化に対して如何なる特性を示すかを計算し、之を実験結果と比較してみた。之は磁電管型の電離真空計の研究上必要な事は勿論であるが、一般に磁界を用いて電子行程を長くしその気体電離の能率を増そうと云う試みに対する定量的な扱いとなり、或はその準備となる意味があるように思われる。計算に就いては此処では簡略に述べるに留めたい。

§ 2 計算及びその結果に就て

磁電管の空間電荷状態には、Brillouin State 及び Double Stream State と称される二つの型が可能であり、之等は夫々第1図の (a) 及び (b) に示される如き電子

第1図. (a) Brillouin State

(b) Double Stream State

(3)(4)

運動に対応して成立するものである。尚、電子がそのまま陽極に達する如き場合は Single Stream State である。夫々の場合に対して、電位及び電荷密度の分布が知られるならば、イオン発生量を計算する事が可能となる。

V volts に加速された電荷密度 ρ の電子ビームが、 $T^\circ K$, P mmHg の気体中にて作るイオンの数は、単位体積中に毎秒当り

$$\frac{\rho}{e} \sqrt{\frac{2eV}{m}} S(V) P \frac{T_0}{T} \quad \text{--- (1)}$$

である。茲に S は所謂イオン化確率であり、 e 及び m は夫々電子の電荷及び質量を表す。

又、 $T_0 = 273^\circ K$ である。故に、 $r \sim r + dr$ の間に生ずるイオンは、単位長さ当り毎秒

$$dN_i = 2\pi \sqrt{\frac{2}{em}} P_0 \rho(r) \sqrt{V(r)} S(V) r dr \quad \text{--- (2)}$$

但し、 $P_0 = P T_0 / T$ と表わされる。

磁界が加えられていない通常の円筒二極管の場合、陰極半径 r_c が陽極半径 r_p に比して充分小なれば、飽和空間電荷状態に於ける電位分布は次のよい近似式を持つ。

$$V_c(r) = V_p \left(\frac{r}{r_p} \right)^{\frac{4}{3}} \quad \text{--- (3)}$$

之に対する電荷密度分布は次の如く得られる。

$$\rho(r) = \frac{4}{9} \epsilon_0 \frac{V_p}{r_p^2} \left(\frac{r_p}{r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{--- (4)}$$

此の場合に於ける全イオン発生数は

$$N_i = \frac{1}{9} K P_0 V_p^{\frac{3}{2}} S^{\frac{1}{2}}(V) d \left(\frac{r}{r_p} \right) \quad \text{--- (5)}$$

$$\text{但し} \quad K = 8\pi \epsilon_0 \sqrt{\frac{2}{em}}$$

と得られ、数値計算に依つて V_p と I_i の関係が求められる。而して N_i は r_p には無関係である。 $I_i = e N_i$ として示された $V_p - I_i$ 曲線が第2図 (c) である。

第2図 陽極電圧対イオン電流 (10_m 当り) の計算曲線。

Double Stream State の場合、電位分布等に対する解は得られず、数値積分に依つてのみ知られる。電位分布については (3) 式に依つてよく近似される事が知られてい⁽³⁾るが、電荷密度分布は (4) 式の様なものではない。それ故数値積分の結果を参考として、⁽⁴⁾(5) 式に補正を施す事に依つて、臨界条件の下に於ける $V_p - I_i$ 特性を求める事が出来る。之は第 (2) 図 (b) に示されており又 $V_p = \text{一定}$ なる条件で磁束密度 B と I_i との関係を求めたものが第3図の曲線 (b) である。此の場合はいづれも近似的計算に依る。

Brillouin State に於ける電位等の分布式は次の如くである。

$$V(r) = \frac{e B^2}{8 m} r^2 \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} \right)^2 \text{----- (6)}$$

$$\rho(r) = \frac{\epsilon_0 e B^2}{2m} \left(r + \frac{r_c^2}{r^2} \right) \quad \text{-----} \quad (7)$$

之等を(2)式に入れ、Bを消去し、且つ $r_c = 0$ と見做す近似を取れば

$$N_i = K P_0 V_0^{3/2} \int_c^r S(V) \frac{r}{r_2} d\left(\frac{r}{r_2}\right) \quad \text{-----} \quad (8)$$

但し、 r_2 及び V_2 は電子集群表面の半径及び電位を表している。従つて臨界条件では $r_2 = r_p$ であり、その条件で $V_p - I_i$ 特性を求めると第2図(a)曲線となる。又、 V_p 一定の条件で $B - I_i$ 特性を求めれば第3図の曲線(a)を得る。

以上の計算式は MKS unit で表した。又、S-V curve は J. T. Tate 及び F. T. Smith⁽⁶⁾ に依つて得られた実験結果に依り、その酸素に対する場合を以て数値計算を遂行した。それ故、窒素或は一酸化炭素の場合に対しても極めてよい近似となるであらう。彼等の実験範囲外の高圧域に対しては近似的実験式 $S \propto 1/V$ を参考として外挿した。つづいて計算を行つた。

(5) $\sqrt{r}$ 及び (8) 式の被積分函数を r/r_p に対して図示すれば、イオン発生径方向分布が知られる。この曲線に依る図計算から N_i の値を求めたわけである。第2図の計算結果から、Brillouin State の場合には通常二極管 ($B=0$) の場合の1度3倍の I_i えられる事が見られる。

第3図 円筒の長さ l_{cm} 当りのイオン電流値対磁界強度

B_c は臨界値。(a) Brillouin State の場合、(b) Double Stream State の場合、(c) 実験曲線、第5図より換算。

第4図 電極構造。 原寸

§ 3 実験結果に就て

前節の計算結果を確かめる測定は第4図の如き電極構造の磁電管により行われた。中心に振られたW線がイオンコレクターであつて、磁界に依るイオン軌道の曲りを見積つて、その大部分がコレクターに収束される程度の太さが用いられている。之に並行にW線条を張つてあるが之に入るイオンは少いであらうし、又之による電位分布の乱れ、従つて磁電管型空間電荷状態の乱れは小さいものであると考えられた。又、コレクターに与える負電圧は $-\left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right)V_p$ 程度であるから、電子が反撥されて空の領域が出来るので、之が計算に於て用いられた条件と異なる状態を呈する事になる。前節に述べられた計算の如くコレクターの存在を考えず且つ $r_c = 0$ と見做した場合と、実験の如き条件の場合とでは、結果に於て生ずる差異は約10%程度のものである事が確かめられてある。

使用したソレノイドは、中心に於て $H = 193 I_H \text{ Gauss}$ 、中心より $3cm$ 離れた軸上の点で $180 I_H \text{ Gauss}$ と計算されるものであつた。 I_H は励磁電流でAmpere単位とする。

第5図に示すのは、 V_p をパラメーターとして得られた $I_H - I_c$ 特性である。この場合、 $V_R = -\frac{4}{9} V_p$ なる条件が保たれている。この測定結果を計算された $B - I_c$ 曲線と比較するには次の諸点が考慮されねばならない。即ち $P = 1 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$ とあるのは管内温度 $(400 \sim 500^\circ \text{K})$ と見られるに於ける気圧である事、有効な空間電荷領域の長さは約 $5cm$ 程度と考えられる事、及び発生したイオンの中、コレクターに入る以外にend plateやcathode及びガラス管壁に逃げるものが相当ある事等である。第7図の構造の試作管で検討された所では、コレクターに入るのは全発生量の略々半分であるので、第4図の試作管についても全程度と考えておく事にする尚、end plateに入るものは10%程度である。又、測定上の種々の原因による誤差は10%以内と見積られており相対誤差は之よりずっと

小さい。

第 5 図 $I_H - I_c$ 曲線群

点線で示すのは磁界とエミシヨンの関係。 V_i 及び V_R は略々 $\frac{4}{9} V_P$ に保たれた。
真空度 $1.5 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ の範囲で測定。

之等の考慮から、計算と比較すべく換算する事が出来、第5図の $V_P = 900 \text{ volts}$ の場合につき換算された結果を第3図の曲線 (c) に示してある。

曲線 (c) の第一の山は計算結果と大体良好な一致を示しており、従つて磁電管型イオンゲーンの感度が確認されるわけであるが併し、残留ガスの分析がなされていない。測定曲線は計算曲線の如く鋭いピークは示しておらず、従つて Brillouin 或は Double Stream のいつれの型の空間電荷状態が成立していたかの判定は下し得ない。之は工作精度や磁界の一様性の不足等からして止むを得ない所である。

第3図に於ける比較から分るように、それらの曲線のピークの値を以て計算結果との定量的な比較を行う事は適當ではない。それ故単に定性的な比較の意味で、第5図の曲線群の第一のピーク値を第2図に重ねて点示した。又、第7図の試作管による値をも全時に示した。之によれば Brillouin State の方に近い実験結果が表れている如くに見られるが、精度不足の故に未だ結論を下すには尙早な様である。

第5図の曲線に現れる第二、第三の山は、イオン発生に際して生ずる二次電子による効果であると考えられる。マイクロアンペア程度の二次電子発生が、我々の試作管に於て、気体

第6図 $I_H=0$ の時の放射電流 I_{c0} をパラメーターとした $I_L - I_L$ 曲線群。
 $1.5 \sim 5.5 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ の真空度にて測定。

分子の電離に対して呈する奇与の程度は第6図の実験結果が之を示している。又、電子放射量を次第に少くして行く場合の特性は Philips Gauge の場合に通ずるものと見られる。Philips Gauge は実用上は簡単でよいが、動作機構を研究するには不便な点が多い様に思われる。冷電子放射を制御する事は困難であるし、或程度以上の高電圧を要するし、振動現象の起り易い構造の様であり、陰極にはイオンのみならず電子も相当に流入する等と思われるからである。此の実験に用いた磁電管は、特殊な Philips Gauge と見做す事も出来るので、その基本的なデータを求めるには却つて便利ではあるまいか。

測定上の誤差の原因としては、実験されるタマからのガス放出、或はその呈するクリーニング作用が考えられる。ガス抜処理の後も尚、陰極加熱による周囲からのガス放出が観察されたが、標準のイオンゲージとの間のコンダクタンスを大きくして、その為の誤差は5%程度と算定された。クリーニング作用については、測定に際しては既に飽和していたものゝ様で、観察にかゝらなかつた。第7図のタマによる実験に関しても全様であるが、此の方の誤差は約10%に到る部分も存する。

第7図 電極構造 $\times 3/4$ Point source emitter

第8図以下は、点状の電子放射源を用いた磁電管（第7図）に依る実験結果である。第8図は第6図と全様のもので、比較してみても、遮断特性の緩やかな事及び微量の電子放射の場合の特性が異なる点が知られる。

第8図 放射電流 I_{p0} をパラメーターとして測定された $I_H - I_L$ 及び $I_L - I_p$ 特性。
 $P = 2 \sim 6 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ にて測定。
 $V_p = 450 \text{ V}$, $V_L = V_R = -150 \text{ V}$

第9図は放射電子量に対するイオン電流の変化であり、飽和特性が示される。之は即ち空間電荷飽和状態の成立を示すものである。 I_{p0} を大きくすると I_L が増す気味に見えるのは本質的な事ではなく、副次的な事情によると思われる。この測定は $I_H - I_L$ 曲線のピークを与える条件で為されたものである。

第10図はコレクター電圧の変化に対するイオン電流の変化を測定したもの。負電圧が不足すると過剰なエネルギーを持つ電子が流入してイオン電流を打消すけれども、イオン電流そのものゝ変化は割合小さい様である。

第11図は気圧に対する直線性の成立範囲を示す。之はイオン電流が増した時に負荷抵抗の為に電極間の電圧が降下すると云う通常の条件でなく、 V_p を一定に保つて測定した。従つて、Philips Gauge に於ける多くのデータとは、その曲り方が逆である。

第12図に依れば、 V_p の変化に対しては I_L はクリチカルな変化を表さない。

第 9 図 飽和特性。 $0.5 \sim 1 \times 10^{-6} \text{ mm Hg}$ にて測定

第 10 図 $V_i - I_i$ 特性。 $V_p = 600V$, $I_H = 1.1 A$, $P \approx 2 \times 10^{-6} \text{ mm Hg}$ にて測定。 I_{p0} は $I_H = 0$, $V_i = -200V$ の時の I_p を示す。

第 11 図 気圧 対 イオン電流

第 12 図 '陽極電圧 対 イオン電流

§ 4 結 び

計算と実験との一致は、気体が残留ガスである事と実験精度を考慮すれば、大体良好と思われる。それ故、此の様な型のイオンゲージの感度の上限が認知される。又、その飽和特性はエミッションの変動に対して自然の安定化作用を持つ事を示し、その他の電圧変動に対しても比較的安定性のある事も認められた。併し乍ら、実用するとすれば如何なる型が最良かと云う結論は未だ得られていない。超高真空に用いて有利な点も色々考えられるが、之も問題の多い事である。尙、計算は陽極の半径には無関係な結果を与えるものであつた。

最後に、此の報告は、極めて粗雑な前報告^⑦に対する訂正及び補足の意味を含んでいる事を附言させて頂く。

文 献

- 1 G. K. T. Conn and H. N. Daglish, "A Thermionic Ionization Gauge of High Sensitivity Employing a Magnetic Field" J.S.I., Vol. 31, No. 11 (1954)
- 2 S. Mito and F. Kanematsu, "On the Characteristics of Ion Production in High Vacuum Cylindrical Magnetron," Journal of the Inst. of Polytech., Osaka City Univ., Vol. 3, Series E, (1956)
- 3 A. W. Hull, "The Effect of a Uniform Magnetic Field on the Motion of the Electron Beam between Coaxial Cylinders," Phys. Rev. Vol. 18, pp. 31~57 (1921)
- 4 J. L. Delcroix, "Études des Propriétés Statiques des Charges d'Espace du Type Magnétron," Ann. de Phys., Mai-Juin (1954)
- 5 E. G. Linder, "Excess Energy Electron and Electron Motion in High Vacuum Tubes," I. R. E., Vol. 26, pp. 346-371, (1938)
- 6 J. T. Tate and P. T. Smith, "The Efficiencies of Ionization and Ionization Potentials of Various gases under Electron Impact," Phys. Rev., Vol. 39, pp. 270-277 (1932)
- 7 兼 松 太, "熱陰極フィリップス型電離真空計に就て。" 真空技術, Vol. 5, No. 4 (1955)