Schulz 型電離真空計の試作*

大槻 祐夫**・赤石 憲也**

(昭和47年6月16日受理)

Design and Characteristic Performance of Schulz Type Ionization Vacuum Gauge

Sukeo ÔTUKI, and Kenya AKAISHI

(Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan)

(Received June 16, 1972)

1. はじめに

気体の電離現象を利用する真空計として、熱陰極電離真空計がある。古くから種々の型の真空計が実用されてきているが、使用圧力範囲に応じて分類すると、それらは中真空用、高真空用そして超高真空用真空計となる。それらの代表的なものとしてそれぞれ Schulz ゲージ¹⁾、三極管型ゲージ²⁾、Bayard-Alpert³⁾ゲージがある。

通常プラズマ実験がおこなわれる圧力は数 Torr から 10^{-4} Torr であり、この圧力範囲を忠実に測定しうる真空計が重要である。Schulz ゲージは丁度この要請を満たす真空計であるが、同型の市販品はフィラメントの寿命が短いこと、電極ステム間の電氣的リークが無視できないことなどの欠点をもっている。市販品のあるものではフィラメント材料としてレニウム線が使用されていて数 10mTorr の圧力で連続使用した場合のフィラメントの寿命は約40時間といわれる。また集イオン電極とグリッド間に流れるリーク電流はガラスの表面抵抗（パイレックスガラス #7052相当、湿度70%、 $10^{11}\Omega$ ）から推定して約 $3 \times 10^{-9}A$ と計算される。Schulzゲージの感度は通常の三極管型ゲージの数10分の1であるから、 $3 \times 10^{-9}A$ のリーク電流は 10^{-4} Torr の圧力測定に影響を与える（真空度を高く読む）。

この報告では、上記の欠点を考慮して、フィラメントの材質を長寿命のものに選び、またステム間のリーク電流を $10^{-12}A$ 以下におさえる構造にした試作 Schulz ゲージの試験結果について述べる。

2. 試作 Schulzゲージと較正装置

試作球の構造を図1、図2に示す。電極寸法は Schulz

図1 試作球の構造図

図2 試作球の写真

の原論文¹⁾に従い、平行平板型の方を採用した。グリッドと集イオン電極は同形のニッケル平板 ($0.2\text{ mm} \times 12.7\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$) からなり、両方を 3.18 mm 隔して平行に配置し、この中間にイリジウム・フィラメント ($0.1\phi \times 15\text{ mm}$) がはってある。イリジウム・フィラメントにはトリア (ThO_2) を電着⁴⁾してある。これはイリジウム線の動作時の温度を下げて、フィラメントの蒸発による焼けぼそりや活性ガスとの反応などを減らすためである。

試作球の感度較正用装置の略図を図3に示す。真空系は高真空排気セット（日本真空技術KK, YB-2）と較

* 昭和47年3月31日 第19回応用物理関係連合会にて講演

** 名古屋大学プラズマ研究所（名古屋市千種区）

図 3 校正装置の図

正用マニホールドからなっている。マニホールドはステンレス製で拡散ポンプの排気速度測定用のテストドーム (JIS B 8371—1959) を模してつくった。マニホールド上部の中心に 18φ のゲージポートがつけられニードルバルブを通して校正用気体が導入されるがゲージポートの下におかれた邪魔板によってテストポート部で校正用気体が一様な流れとなる様にしてある。テストポートには試作球のほかに校正用真空計として回転型 McLeod 真空計 (木下理化工業 KK, A 型) と Biondi 型油マノメータ⁵⁾ (使用油 Octoil—S, 比重 0.912) がとりつけられている。また副標準的に使用するため三極管型電離真空計 (日本真空技術 KK, GIT 型) がつけられている。

校正用気体として窒素とヘリウムが用いられたが、いずれも $6\text{m}^3, 150\text{kg}/\text{cm}^2$ のボンベガスである。これらの気体の導入は特別純化することなく用いた。

試作球の動作に必要な電子電流制御回路を図 4 に示す。この回路は通常の電離真空計回路と同様にフィラメント加熱電源からなっている。加熱源はトランジスタで構成され、エミッション電流の安定化は初段に差動増幅回路を用い、一定のエミッション電流に対して最終段

図 4 電子電流制御回路

のパワートランジスタ (2SC-241) がフィラメントへの供給電流を制御するようにしておこなわれている。パワートランジスタのコレクタ損失を小さくするため 2.5Ω , $10W$ の巻線抵抗 (0.4ϕ カンタル線, これを真空排気したガラス管に封入した) がコレクタ側に挿入されている。この回路でエミッション電流は $0\sim 50\mu A$ まで可変設定できている。電離作用で生じたイオンの電流測定は最小感度 $10^{-14}A$ の直流メータ (タケダ理研 K K, TR-8651) でおこなっている。電子電流制御回路は $10^{-3}Torr$ 以下の真空度では充分安定に動作するが, $10^{-2}Torr$ 以上ではフィラメントの温度が気体の熱伝導作用によって低下させられるため, 真空度を読みとる時には常にエミッション調整を要した。現在 $1Torr$ までエミッションが一定となるような回路を検討している。

3. 試験結果

フィラメントの蒸発による消耗を低くおさえるためにエミッション電流は最初から $20\mu A$ に設定するようスタビライザを製作したので, ゲージの動作特性の試験はすべて $20\mu A$ のエミッション電流 I_e のもとでおこなわれた。

3.1 動作条件の決定

電離真空計では, フィラメントから放出された熱電子が集イオン電極に入ったり, あるいは熱電子の発振が起きたりすることを防止するため, フィラメントの電位 V_f は集イオン電極 ($V_i=0$) に対していくらか正の電位にとる。この試作球の場合は, 直流電源の都合で, とりあえず $V_f=+60V$ にとった。図 5 は, $I_e=20\mu A$, $V_f=60V$ で, 窒素ガス導入中圧力 $8\times 10^{-4}Torr$ で, グリット-フィラメント間の電位差 V_{gf} をかえたとき得られ

図 5 イオン電流と V_{gf} の関係; $(I^+/I_e) V_{gf}=2.08 \times 10^{-3}$.

図 6 イオン電流のエミッション電流に対する比例関係 ($I^+/I_e=8.6\times 10^{-4}$)

たイオン電流を示している。このときのタテ軸は, 得られたイオン電流を I_e で規格化し, さらに $V_{gf}=200V$ のときの規格化イオン電流 $(I^+/I_e)[V_{gf}=200V]=2.08\times 10^{-3}$ で除した値を表示してある。圧力一定のとき試作球のイオン電流は, V_{gf} の増加とともに単調増加しているのがわかる。しかし通常のゲージの直流電源を転用することを考えて V_{gf} としてとりあえず $V_{gf}=240V$ と決定した。またその意味で図 5 以後の測定においては, V_f の方も $40V$ にとっている。この動作条件は, 通常の三極管型電離真空計とはほぼ等しくなっている。(例えば, GIT で $V_{gf}=205V$, $V_f=45V$.)

3.2 I^+ と I_e との関係

イオン電流のエミッション電流に対する比例関係を図 6 に示す。 I^+ と I_e との比は

$$I^+/I_e = 8.6 \times 10^{-4}$$

となっている。

3.3 フィラメントの温度と寿命

$I_e=20\mu A$ におけるトリア被膜フィラメントの温度は光高温計 (千野製作所 760 型) で測定して $1340^\circ C$ であった。この温度はイリジウムの融点 $2454^\circ C$ に比して充分低く, イリジウムの蒸気圧は $10^{-10}Torr$ 以下となっている。フィラメントの寿命は通常真空装置に発生

したリークによってフィラメントが酸化し消耗することで短縮されるが、試験球を1気圧の空气中で点火してみた結果では(約20分間)、トリアがはがれ落ちるのみでイリジウム・フィラメントは何ら目にみえて損害をうけず耐酸化特性が著しくすぐれていることがみとめられた。Weinreich と Bleacher⁶⁾ はわれわれと似たような条件 ($0.1\phi \times 1\text{cm}$, $20\mu\text{A}$ エミッション $\sim 200\text{mA}/\text{cm}^2$) でトリア被膜イリジウムを用いてその寿命が1万時間であったと報告している。フィラメントの寿命をきめるもう一つの要因には、電離によって生じたイオンによりフィラメントがイオン衝撃され、スパッタすることである。試作球の場合 1 Torr で 10^{-5}A のイオン電流でありイオンのエネルギーが 200eV とすると、スパッタリング収率は 10^{-3} atoms/ion であるから、スパッタリングにより長さ 1 cm のイリジウム線が 0.1ϕ から 0.08ϕ まで細くなるには30万年を要すると計算される。通常の測定においてはイオン衝撃によるフィラメントの消耗は全く無理してよいことがわかる。しかし管球が油蒸気などで汚れたりすると、管球内で放電するのでこのようなときはフィラメントの断線が当然予想されよう。

3.4 感度の較正

試作球の絶対較正は 10^{-2}Torr の圧力で回転型McLeod真空計でおこなった。図7は窒素ガスとヘリウムガスの

図7 Schulz ゲージの N_2 gas と He gas の較正曲線
 $S_{\text{N}_2} = 2.5/\text{Torr}$, $S_{\text{He}} = 0.5/\text{Torr}$,
 $r = S_{\text{He}}/S_{\text{N}_2} = 0.2$

図8 GIT 管球 (N_2 , He の感度曲線)

図9 Schulz ゲージのイオン電流とGITの読み

場合の較正曲線を示している。絶対較正が 10^{-2}Torr の桁でしか実施し得ないのは、McLeod真空計の気体の溜め込み容積が数10cc しかなく、 10^{-2}Torr 以下では精度があやしくなるためである。試作球の広い圧力範囲にわたる直線性を実証するために、同様にGIT管球もMcLeod真空計によって絶対較正したのち(図8), GITの圧力指示値に対して二個(#1, #2)のうち #1 についてイオン電流をプロットしたのが図9である。 $5 \times 10^{-2}\text{Torr}$ から上の圧力は電離真空計の読みではなく油マノ

メーターによる読みである。同様に校正した #2 の感度と #1 の感度のバラツキの相対誤差は約26%であった。バラツキの大きな理由は、フィラメントが点火後中央部でたわむため熱電子の走行距離が個々の試作球で変わってしまうと考えられる。標準動作条件のもとでは、窒素ガスでは直線性が 0.2 Torr の圧力までしか延長されていない。電離真空計で測定可能な圧力上限は感度を $S(\text{Torr}^{-1})$ 、圧力を $P \text{ Torr}$ とすると

$$I^+/I_e = SP \leq 1$$

なる関係で決まる。窒素ガスの場合、図7から $SN_2 = 25/\text{Torr}$ であり 1 Torr また直線性を延長するには $S = 1 \text{ Torr}^{-1}$ でなければならない。そこで図5で $V_{gf} = 90V$ にとれば、その条件は満されることがわかる。図6、図7から得られる比感度係数と他の測定者の得た結果とを比較すると表1になる。

4. まとめ

中高真空用電離真空計として Schulz ゲージを試作した。この真空計は形状が平行平板型であるため電極間隔を精度よく設定出来るが一本一本の感度のばらつきは26%と大きい。これは 0.1ϕ のフィラメントが点火後変形し（熱膨脹による）、電離電子の運動状態が変ることによる。試作3号からは、この点を考慮してフィラメントの一端を固定端とし、他端はバイメタル〔ニッケル板 ($0.2t \times 3mm \times 20mm$) とモリブデン板 ($0.15t \times 3mm \times 20mm$) のはり合せ〕ステムにしてフィラメントの熱膨脹による伸び分を吸収するようにした。設計では2mmの伸びを吸収するように作った。#2以後からはすべてこの構造にしたものを用いているが、フィラメント線の熱的たわみ、あるいはスポット時の加工歪などは完全に解決されている。

ゲージの圧力測定範囲は $V_{gf} = 200V$, $I_e = 20\mu A$ で動作したとき $0.4\text{Torr} \sim 10^{-6}\text{Torr}$, $V_{gf} = 90V$ にしたとき $1\text{Torr} \sim 10^{-6}\text{Torr}$ となる。測定下限を 10^{-6}Torr とした根拠は直流増巾器の感度を $10^{-10}A$ 程度と見積ったことによる。一方 10^{-7}Torr の圧力となると、真空計自身のもつ軟X線限界やガス放出が影響し、測定値があやしくなる事が予想される。

表1 比感度係数の比較

研究者	三極管型イオンゲージ			Schulz 型イオンゲージ	
	This Work	Langmuir	Dushman Young	This Work	Schulz
文 献	—	(1)	(2)	—	(3)
V_g	250V	—	150V	240V	140V
V_f	45V	—	22V	40V	30V
I_e	1~5mA	—	0.5~5mA	0.02mA	0.1mA
N_2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
He	0.15	0.15	0.158	0.2	0.208

- (1) I. Langmuir and H. A. Jones : Phys. Rev. 31 (1928) 357.
 (2) S. Dushman and A. H. Young : Phys. Rev. 68 (1945) 278.
 (3) G. J. Schulz : J. Appl. Phys. 28 (1957) 1149.

プラズマ研究所ではとくに水素ガスがプラズマの研究に用いられるが、本実験では水素ガスとイリジウム・フィラメントとの反応によるその劣化がとくに心配される。これについての試験は今後実際にプラズマ実験装置でこのゲージが使用されれば得られると思われるのでその時点であらためて報告したい。

この報告をまとめるにあたり、試作管球および測定装置の製作と、動作試験などはすべて本研究所材料ショップの大槻が担当し、赤石がまとめた。エミッションスタビライザー回路の製作にあたり松浦清剛教授より助言を頂き感謝致します。なおこの試作開発は当研究所の技術サービス委員会の指示により行れたものであります。

〔文 献〕

- (1) G. Schulz and A. V. Phelps : Rev. sci. Instr. 28 (1957) 1051.
 (2) 例えば CVC社 VG-1A 管球
 R. S. Moree and R. M. Bowie : Rev. sci. Instr. 11 (1940) 91.
 (3) R. T. Bayard and D. Alpert : Rev. sci. Instr. 21 (1950) 571.
 (4) P. A. Redhead : Can. J. Phys. 40 (1962) 184.
 (5) M. A. Biondi : Rev. sci. Instr. 24 (1953) 989.
 (6) O. A. Weinreich : Phys. Rev. 82 (1951) 573.
 O. A. Weinreich and H. Bleecher : Rev. sci. Instr. 23 (1952) 56.