三極管形電離真空計の電極変位と感度係数の関係*

杉沼 茂実*1・平田 正紘*1

(受理1999年12月15日, 掲載決定2000年2月5日)

Relationship between Asymmetrical Position of Electrode
and the Sensitivity Coefficient of a Triode Type Ionization Gauge

Shigemi SUGINUMA*1 and Masahiro HIRATA*1

*1 (Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan)

(Received December 15, 1999, Accepted February 5, 2000)

Secondary standard ionization vacuum gauge VS-1 is a triode gauge. Simulation of the electrical potential profile of the gauge, electron trajectory emitted from a hot filament, and ion current produced by ionization of gas by the electron assuming a simple electrode geometry was done. The increase in sensitivity coefficient depending on grid potential and the decrease in that depending on filament potential agreed with experimental results by 5%. The increase in sensitivity coefficient depending on filament displacement and ion collector tilting from its regular position was also explained by simulation.

1. はじめに

我々は、信頼性の高い真空圧力測定を目的に、電離真空計の感度係数の使用条件の差に伴う変化を検討している。前報で、ヌード型 B-A 真空計に於ける感度係数の管径依存性及びフィラメント-グリッド間距離の影響をシミュレーションにより説明できることを明らかにした^{1,2)}。今回は、同様のシミュレーションを一般の実用真空計を校正するために広く利用されてきた三極管形電離真空計の副標準電離真空計 (VS-1)³⁾へ適用し、輸送時等に生じる可能性のある電極の相対位置の変化の感度係数に及ぼす影響を調べ、実験結果⁴⁾と比較・検討した。

2. シミュレーション

VS-1 は、直径44 mm のガラス管内に厚さ0.2 mm, 直径, 高さとも30 mm の中空円筒ニッケル製イオンコレクタがあり、その内側に、タングステン線を4 mm の

ピッチで螺旋状に巻いた直径10 mm のグリッド, 更にその中心にヘアピン状タングステンフィラメントが配置された同軸円筒状の構造となっている。シミュレーションでは、Fig. 1 に示すように、構造を単純化した。イオンコレクタは径30 mm の円筒, グリッドは径10 mm, 厚さ0.1 mm の円筒, フィラメントは間隔4 mm の2本の径150 μm の円柱とし、全体を幅0.05 mm (=D) のメッシュでX, Y 方向に分割した。フィラメント, グリッド, イオンコレクタに相当するメッシュ点の電位は、VS-1 の電気的条件として定められている、それぞれ25 V, 150 V, 0 V とした。電極間の空間のメッシュ点 (x, y) の電位は、前報¹⁾のように、電子軌道上で生成される空間イオン電荷密度 ρ を考慮しないと、ラプラスの方程式から、

$$V_{x,y} = \frac{V_{x+1,y} + V_{x-1,y} + V_{x,y+1} + V_{x,y-1}}{4} \quad (1)$$

と表される。本報では、高圧でのシミュレーションも考えて、 ρ を追加した。 ρ も考慮すると、メッシュ点の電位は、

$$V_{x,y} = \frac{V_{x+1,y} + V_{x-1,y} + V_{x,y+1} + V_{x,y-1}}{4} + \frac{D^2 \rho}{4\epsilon_0} \quad (2)$$

* 平成11年11月11日 第40回真空に関する連合講演会で講演

*1 電子技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4)

Fig. 1 Simulation model of secondary standard ionization gauge VS-1.

Fig. 2 The electric potential distribution on a cross-sectional view of VS-1.

ϵ_0 : 真空中の誘電率

D : 単位メッシュ長

と表される。電位分布の計算の手順は以下の通りである。まず、空間イオン電荷密度 ρ の初期値を 0 とし、式(1)を用いた電位計算を収束するまで繰り返して電位分布を求めた。求められた電位分布に沿ってフィラメントからの電子の軌道を計算した。フィラメントからの電子軌道の計算方法はノード型 B-A 真空計に適用したのと同じである^{1,2)}。電子の放射角をフィラメントの周囲 360° について 5° おきにとり、電子軌道、及び、生成イオン量を計算する。次ぎ、生成イオンによる ρ を入れて(2)式により、電位分布、電子軌道、及び生成イオン量を計算する。この操作を繰り返して、すべてのメッシュ点の電位について、1 周前の電位との値の差が 0.0001 V 以下に、収束するまで行う。電子軌道に沿って生成される空間イオン電荷密度 ρ の計算方法を以下に示す。フィラメントの単位メッシュ長当たり 1 放射角から 1 秒間に放射される電子電流 $J_e \text{ (A)}$ は、

Fig. 3 The trajectory of electrons emitted from filament at the emission angle of every 45° .

$$J_e = \frac{1}{m} I_e \frac{D}{l_F} \quad (3)$$

m : 全放射角数

I_e : エミッション電流

l_F : フィラメント長

である。1 メッシュ四方を通る間に 1 電子が生成するイオン量 N_i は、

$$N_i = \sum n \sigma \delta l \quad (4)$$

n : 中性粒子の粒子密度

σ : 電離断面積

δl : 軌道点間距離 ($\delta l < D$)

である。生成されたイオンが 1 メッシュ四方に留まる時間 $T \text{ (s)}$ は、生成される位置によって異なる力を電場から受けるが、長くても

$$T \sim D / v_{TH} \quad (5)$$

v_{TH} : イオンの熱速度

である。(3), (4), (5)から、 ρ は次のように表される。

$$\rho = J_e N_i T / D^3 \quad (6)$$

ここで、 ρ の単位は C/m^3 である。窒素中の電離断面積のデータから、電子が 125 eV の加速エネルギーでグリッドの外側を 2 cm 飛行し、生成されたイオンが全てイオンコレクタで収集されるとすると、感度係数は 0.15 Pa^{-1} と見積もられる。VS-1 は 258 本校正されており、それらの感度係数の平均値が 0.137 Pa^{-1} であった⁴⁾ことから、電子はグリッドを自由に通過しグリッドの外側を 2 回飛行した後グリッドにとらえられると仮定した。 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$ の範囲では、放射された電子の内、軌道の途中で電離衝突が起こるのは、数 10 個の電子の内 1 個以下の少ない確率であるため、電離衝突による電子のエネルギーの減少は考慮していない。また、放射角によっては電子軌道が、途中でフィラメントと衝突する場合が

Fig. 4.1 Dependence of sensitivity coefficient on grid potential.

Fig. 4.2 Dependence of sensitivity coefficient on filament potential.

生じる。このような時には、感度係数の計算結果が小さくなる。フィラメントと衝突するような軌道を描くかは、軌道点の第2点の電位の値に依存するので、この値を0.1 Vずつ細かくとって、どの放射角に於いてもフィラメントと衝突せずにグリッドに到達する場合の感度係数を求め、平均値を計算した。

3. シミュレーション結果

Fig. 2に電位分布の計算結果を示す。グリッドがリング状の山になっており、その内側に2カ所フィラメントにあたる部分に電位の窪みが存在することがわかる。

Fig. 3に5°おきに設定した72個の全放射角について計算された電子軌道のうち45度おきの8本の電子軌道の計算結果を示す。グリッドの外側の電子軌道の占める領域が広いほど感度係数は高くなる。シミュレーション結果では、フィラメントから毎秒 10^{16} ($=2 \text{ mA}/1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)の電子が放射されており、 $0.1 \mu\text{s}$ ($=$ 軌道点間の移動時間 $\times$ 軌道点数 $=40 \text{ ps} \times 2500$)でグリッドに流れ込み、電子が運動して占める体積が 10 cm^3 ($=\pi 2.5^2 \times 3 \text{ cm}^3$: 管球の大きさから)であるので、管球内には 10^8 cm^{-3} の電子雲が存在することになるが、この値は電子雲としてはそれ程大きくはないので、電位分布及び電子軌道に対する影響は考慮していない。

Fig. 4.1にグリッド電圧の変化に伴う感度係数変化の実験結果とシミュレーション結果を比較した。実験は $10^{-4} \text{ Pa} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$ の窒素ガス中で、エミッション電流2 mAとして行った。シミュレーションはガス圧を 10^{-3} Pa として計算した。グリッド電圧の上昇に伴って感度係数が上昇する傾向は両者とも5%以内の差で一致している。この上昇はグリッド電位の上昇により、フィラメントからの電子の加速エネルギーが上昇し、よりコレクタの近くまで電子が運動するためである。シミュレーション結果もグリッドの外側の電子軌道の占める領域が広くなり、この考え方を支持している。 $10^{-4} \text{ Pa} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$

の範囲では感度係数の絶対値は 0.11 Pa^{-1} で、シミュレーションの結果に及ぼすガス圧の影響は0.1%以下と小さかった。また、式(2)の空間イオン電荷の項を0とし、この効果を考慮せずに計算した感度係数の絶対値も同じ値となった。このことは、 $10^{-4} \text{ Pa} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$ に於いては空間イオン電荷密度の感度係数に及ぼす影響はほとんど見られないことを示す。また、実際の真空計ではフィラメントはヘアピン状になっていることを考慮して、フィラメント間距離を2.5~6 mmの範囲で変化させて計算を行ったが、フィラメント間距離が狭い程、感度係数の絶対値は低くなり、フィラメント間距離2.5 mmの感度係数は6 mmの場合に比べて、4%低い値となったが、電極電圧に伴う感度係数の変化率は同じ値となった。

Fig. 4.2にフィラメント電圧の変化に伴う感度係数変化の $10^{-4} \text{ Pa} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$ に於ける実験結果とシミュレーション結果を比較した。フィラメント電圧の上昇に伴って感度係数が低下する傾向は両者とも5%以内の差で一致している。これはフィラメント電位の上昇に伴いフィラメントからの電子の加速エネルギーが減少し、よりコレクタから離れた位置までしか電子が運動しなくなるためである。シミュレーションで求めた電子軌道もグリッドの外側の電子軌道の占める領域が狭くなり、この考え方を支持している。感度係数のフィラメント電圧依存性についても、空間イオン電荷密度を考慮しない場合のシミュレーション結果と考慮した場合の結果は差が見られなかった。以上の感度係数の変化率の一致からこのシミュレーションは三極管形電離真空計に適用しても妥当性があると判断される。

4. 電極変位と感度係数変化

フィラメントのFig. 1で示すY方向への変位に伴う感度係数変化の 10^{-2} Pa に於ける実験結果とシミュレーション結果をFig. 5に比較した。感度係数は、実験ではフィラメントの変位に伴い線形に、シミュレーション

Fig. 5 Dependence of sensitivity coefficient on filament position from regular position.

Fig. 6 Dependence of sensitivity coefficient on ion collector tilting from regular angle.

Fig. 7 Schematic of tilting of ion collector of VS-1.

では放物線的に増加しているが、増加傾向は一致している。シミュレーションで電子軌道を書いてみた結果、フィラメントが中心から4 mm ずれると、グリッドとの間隔が0.5 mm に狭まって電位分布の歪みが大きくなり、グリッド外側の電子軌道が長くなることがわかった。

Fig. 6 にコレクタの傾きに伴う感度係数変化の 10^{-2} Pa に於ける実験結果とシミュレーション結果を比較した。横軸の目盛りは、傾きに伴うコレクタの頭部の中心からのずれの長さを示す。コレクタを傾けた場合、Fig. 7 に於いて L で示される、コレクタの中心からのずれの長さが、高さ方向に見ると変化している。シミュレーションでは、実験結果と直接比較できないので、中心からのずれの長さが0.5 mm ずつ異なる輪切りにした断面に於いて感度係数を計算し、それらの平均値をシミュレーション結果とした。コレクタの傾きに伴い感度係数はやや上昇する傾向と横ばいの領域が存在するところが共通している。

5. ま と め

三極管形電離真空計の副標準電離真空計 (VS-1) に

ついて、感度係数のグリッド電圧依存性及びフィラメント電圧依存性は、実験結果とシミュレーション結果が5%の差で一致し、シミュレーションの妥当性が検証できた。シミュレーションでは、空間イオン電荷密度を考慮して感度係数を計算したが、 10^{-4} Pa $\sim$ 10^{-2} Pa に於いては空間イオン電荷密度の感度係数に及ぼす影響はほとんど見られなかった。さらに、フィラメント及びコレクタを中心からずらすと VS-1 の感度は上昇するが、この結果も電位分布の歪みでグリッドの外側での電子軌道の占める領域が広くなるためと説明できた。さらに、電子の通過するメッシュだけでなく、その周辺のメッシュの空間イオン電荷密度分布の与え方を工夫する等、シミュレーション手法を改良して、 10^{-2} Pa より高圧での感度係数変化の検討に役立てることは将来の課題である。

【文 献】

- 1) 杉沼茂実, 平田正紘: 真空, 41 (1998) 679-684.
- 2) S. Suginuma and M. Hirata: Vacuum, 53 (1999) 177-180.
- 3) JVIS-001 “副標準電離真空計用管球”
- 4) 平田正紘他: 真空, 25 (1982) 372-379.