直列静電レンズ型電離真空計における フィラメント位置の最適化*

谷川 立^{*1}・川井 望^{*1}・林 貴子^{*1}・三井 剛^{*1}
浦野 俊夫^{*1}・田中 誠^{*2}・金持 徹^{*2}

(受理2000年11月24日, 掲載決定2001年7月7日)

Optimization of the Filament Position in the Cascade Static Lens Gauge

Ryu TANIKAWA^{*1}, Nozomu KAWAI^{*1}, Takako HAYASHI^{*1}, Tsuyoshi MITSUI^{*1},
Toshio URANO^{*1}, Makoto TANAKA^{*2} and Toru KANAJI^{*2}

^{*1}Department of Electrical & Electronics Engineering, Faculty of Engineering,
Kobe University, Rokko-dai, Nada, Kobe 657-8501

^{*2}Department of Electronics, Faculty of Engineering, Hiroshima-Kokusai Gakuin University,
6-20-1 Nakano, Aki-ku, Hiroshima 739-0321)

(Received November 24, 2000, Accepted July 7, 2001)

Cascade Static Lens gauge (CSL gauge) is an ionization vacuum gauge that aims at a measurement of total pressure in extremely high vacuum region with high sensitivity by many repetition times of electrons. The experimental sensitivity of the CSL gauge depending on the filament position was investigated, and the optimum position was found. Computer simulation study of electron trajectories with the space charge has been carried out, and it was found that the repetition times of electrons had a same tendency to the experimental sensitivity.

1. はじめに

直列静電レンズ型電離真空計 (CSL L ゲージ) は静電レンズ系内部で電子を多数回往復させることでイオンの生成率を高め, 極高真空領域での圧力測定を可能にする事を目的とした真空計である^{1,2)}.

これまでの研究は電極からの放出カスや ESD イオンによる影響など, 電極構造に関わる問題の対策に重点を置いたものであったが, 最近の研究によりフィラメント位置が感度に大きな影響を与える事が分かってきた. 一方で, 電子軌道のコンピュータシミュレーションでは空間電荷を考慮する事により実際のゲージでの動作を再現する試みがなされてきた^{3,4)}.

電子を多数回往復させて感度係数を向上させるという CSL ゲージの原理より, 電子軌道を中心軸付近に収束させるレンズ作用のための各電極に与える電位と共に, 電子が多数回往復することによって蓄積される空間電荷の効果が感度係数に最も大きな影響を与える要因と考えられる.

そこで本研究では, 今までにいくつか試作された中でも比較的高い感度が得られた電極構造についてフィラメント位置による感度係数の変化を調べ, シミュレーションによる電子の往復回数と比較してフィラメント位置の最適化を試みた.

2. 実 験

Fig. 1 に CSL ゲージの概略図を示す. CSL ゲージは中心に穴の空いた円盤状電極とリング状針金電極からなる静電レンズ電極, フィラメント, イオンコレクタ等で形成され, 中心軸に軸対称の構造となっている. レンズ

* 平成12年10月26日 第41回真空に関する連合講演会で講演

^{*1} 神戸大学工学部電気電子工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町)

^{*2} 広島国際学院大学工学部電子工学科 (〒739-0321 広島市安芸区中野6丁目20-1)

Fig. 1 A Schematic drawing of CSL gauge.

Fig. 2 The definition of filament position in CSL gauge.

電極のうち、Electron Reflector (K1~K4) から L7 電極付近までを電子の往復部、L7 電極付近から Ion Reflector までをイオンの収集部とする。L2, 3 電極はアノードの役目をし、Electron Reflector と Ion Collector はアース電位である。

Fig. 2 は CSL ゲージ内におけるフィラメントとその周辺の電極の断面を表したものである。フィラメント位置は K1 電極からフィラメント先端部までの垂直距離 F によって表し、その移動範囲を A-A' に示される中心軸上の K2 電極から K4 電極までとした。実験ではフィラメント位置を設定する度に感度測定を行うが、その際フィラメントのバイアス電位と各電極電位は最も感度係数が高くなる値に調節する。電極電位の調節は感度係数に変動が見られなくなるまで繰り返し、フィラメント位置ごとの最高感度を求める。

3. 空間電荷を考慮したシミュレーション

シミュレーションにおいては、CSL ゲージがフィラメントを除き中心軸に軸対称な構造であることから、中心軸を含む断面を想定しその平面上での動作を考える。

Fig. 3 はシミュレーションで使用する CSL ゲージの断面図で、中心軸方向に 1000、半径方向に 300 の格子点に分割して計算を行った。この格子点の間隔は実際のゲ

Fig. 3 The cross section including the central axis of the CSL gauge for the computer simulation.

ージにおける 0.1 mm に相当する。

Fig. 4 にシミュレーションのフローチャートを示す。まず実験によって求めた電極電位配分をもとに各格子点の電位・電界計算を行う。本研究では棒状フィラメントの先端部を電子の射出位置と考え、中心軸に対して 1° から 90° の方向に 1° 刻みにつづつ射出し、 10^{-13} sec 毎の運動方程式を解いて軌道を計算する。電子の往復回数は 1 つにつき 100 回を上限とした。次にゲージ内の総空間電荷量を設定して、電子が軌道計算において格子点を中心とする各メッシュに滞在した積算時間に比例して電荷量を振り分ける。再度、空間電荷を含む電位・電界計算を行い、新たに形成された電界上に電子を射出する。この行程を電子軌道が収束するまで続け、最終行程では射出した 90 個の電子が電極に衝突するまでの軌道と総往復回数を結果として記録する。

フィラメント位置をパラメータとして求めた総空間電荷量に対する電子の往復回数の例を Fig. 5 に示す。ゲージ内では自分自身が空間電荷となった電界の中を電子が往復しているが、フィラメント位置や電極電位等の設定を変えない限り感度は変動しないので、電子の往復に適した電界を形成する一定の電荷量が蓄積されていると考えられる。従って、総空間電荷量を変えて最多往復回数が得られた時のシミュレーション結果が実際の電子の往復回数を反映していると仮定する。

ゲージ内に蓄積される電荷量を想定する一つの目安として、フィラメント周辺の電位分布の様子に着目した。

Fig. 6 はフィラメント位置 $F=5.5$ mm の場合のシミュレーション結果から総空間電荷量の異なる 3 つを選び、フィラメント近傍の電位分布を比較したものである。電位分布はアース電位の Electron Reflector から 5 V 毎の等電位線で表している。最多往復回数を得た Fig. 6(b) を見ると、電子の折り返し点である 49 V の等電位線がちょうどフィラメントの先端付近を通過し、滑らかなおわん型の等電位線を形成している。これに対して総電荷

Fig. 4 Flowchart of the computer simulation with a space charge.

量の少ない(a)及び多すぎると思われる(c)では49 Vの等電位線がフィラメントの近傍で山や谷を形成する。電子の折り返しは射出電位と同じ電位線近傍で行われるため、電子の往復条件としてはフィラメント電位の等電位線が滑らかな曲線を描く場合が最適であると予想され

Fig. 5 The relationship between total space charge and total repetition times of 90 electrons for three different filament positions.

る。あるフィラメント位置に対し、最高感度を示す電極電位を設定した場合には上述の条件に近い等電位線を形成すると思われる、Fig. 6では実際の往復条件を反映していると仮定した(b)の状態が該当する事が分かる。他のフィラメント位置においても最高往復回数を示す電荷量を設定した時、フィラメント電位の等電位線がフィラメント先端部付近を通る滑らかな曲線となる事が確認された。以上の事から、ゲージ内では最多往復回数を示す総空間電荷量を蓄積していると予想され、前段落で述べた仮定が妥当であると考えられる。

4. 結果及び考察

Fig. 7にフィラメント位置に対する感度係数と電子の往復回数を示す。丸印は実験によって求めた最高感度係数であり、三角印はシミュレーションによる電子の最高往復回数を表している。図から、フィラメント位置をK3電極からK4側へ約1 mm ($F=5\sim6$ mm)の範囲に設定した場合に最も高い感度係数が得られることが分か

Fig. 6 Examples of equi-potential line with different total space charge. ($F=5.5$ mm, $V_b=49$ V)

Fig. 7 The experimental sensitivity factor and the repetition times in computer simulation for different filament position.

る．空間電荷を考慮したシミュレーションの結果についても最高往復回数を示す位置が K3 電極付近にあり，電子の往復回数が多いほどイオンの生成率が高いと考えれば，実験結果を定性的に説明できる．

次に，フィラメント位置を最高感度係数が得られる範囲からずらした時に感度が低下する原因について考察する．まず K4 側へ寄せすぎた場合の例として $F=7.0$ mm と最適位置の一つである $F=5.5$ mm の電子軌道シミュレーションの結果を Fig. 8 に示す．黒く塗りつぶされている部分が見える部分がフィラメントから射出された 90 個の電子の軌跡である．その他の線は等電位線で 20 V 毎に表示している．フィラメント側での電子が折り返す点を見ると， $F=7.0$ mm では $F=5.5$ mm の場合より電子が中心軸から外れる方向に膨らみながら折り返していることが分かる．これはフィラメントがアノードに近づくほどバイアス電位が高くなって電子の折り返し点付近での等電位線の曲率が小さくなるためであり，外側に向かおうとする電子を内側に戻しきれずに往復回数が減少し，感度低下に繋がると予想される．また F を大きくした場合，電子のコレクター側の折り返し点がコレクターから遠くなるためにイオン収集効率が低下する事も考えられる．

一方，フィラメント位置を K2 側に移動させた場合にはフィラメントのバイアス電位が低くなって電子の折り返し点がアース電位の Electron Reflector に近くなり，リング電極からなる Electron Reflector の周辺に生じる電界の歪によって，電子が中心軸方向に折り返されなくなる事が考えられる．更にフィラメントがアノードから遠いほど電位勾配が小さくなって電界が弱くなるために，電子の速度が遅い反射面付近での空間電荷の影響が

Fig. 8 Examples of electron trajectory with different filament position.

大きくなって軌道が拡がる事などが考えられ，いずれも感度低下の原因になると思われる．以上の理由により最適なフィラメント位置が存在する事が理解できる．

$F=2\sim 4$ mm の範囲ではシミュレーション中に空間電荷によって電子が射出されなくなり計算結果が得られなかった．しかし実験ではある程度の感度が得られており，シミュレーションでも空間電荷を考慮しなければ電子は射出されるので，今回想定した総空間電荷量の範囲外に適切な値があると予想され，更に広い範囲で計算を行う予定である．

5. ま と め

CSL ゲージのフィラメント位置を変えて感度係数を測定した．その結果，フィラメント位置に対して感度係数の明らかな変化が確認でき，最適なフィラメント位置がある事が分かった．

又，空間電荷を考慮したシミュレーションによりゲージ内での電子の往復回数のフィラメント位置依存性を求め，実測の感度係数と比較したところ同様の傾向が得られた．イオンの生成率が電子の往復回数に比例する事を前提にすれば，このシミュレーション法によって実験結果を定性的に説明できると考えられる．

〔文 献〕

- 1) T. Kanaji, T. Urano and S. Hongo: Vacuum, 44 (1993) 581.
- 2) T. Kanaji, S. Nakamura, T. Urano and S. Hongo: J. Vac. Soc. Japan, 37 (1994) 692.
- 3) 鈴木和彦, 寺谷雄一, 浦野俊夫, 本郷昭三: 真空, 41 (1998) 206.
- 4) T. Mitsui, T. Urano, M. Tanaka and T. Kanaji: Appl. Surf. Sci., 169-170 (2001) 749.