極高真空測定子 (3BG)

有限会社真空実験室*1

Bent Belt-Beam Gauge Head (3BG)

Vaclab Inc.

(Received September 11, 2010, Accepted December 1, 2010)

1. はじめに

X線限界 10^{-12} Pa 台の熱陰極型電離真空計の測定子 (Bent Belt-Beam Gauge Head)¹⁾、製品名 3BG (スリービジー) を紹介する。3BG は、熱陰極電離真空計の測定子に存在する“軟 X 線効果”，“電子刺激脱離 (Electron-Stimulated Desorption, ESD) 効果”，そして“ガス放出”の 3 つの測定限界要因を総合的に改善することにより、現在市場に出ている極高真空計測定子よりも約 2 桁低い圧力測定が可能で、市販のコントローラで制御することができる。以下、3BG 測定子の開発コンセプトと性能を解説する。

2. 測定子の極高真空領域での特性と測定精度

電離真空計 (イオンゲージ) の原理を簡単に説明する。圧力 P の真空中に約 100 eV の運動エネルギーを持つ電子 (電流 I_e) を飛行させると、電子衝撃によりガス分子がイオン化され、これをイオン電流 I_i として捕らえると、

$$I_i = S P I_e \quad (1)$$

の関係式が成り立ち、この関係式から P を求めることができる。ここで S は感度係数と称される測定子によって決まる比例常数である。圧力が低い領域での測定では、式 (1) が成立すると仮定して測定する外挿法を用いるため、式 (1) が成立しなくなったところでは、正しい圧力が測定できなくなる。

図 1 に示した△印の圧力特性曲線は、現在市場に出ている極高真空計の 1 つであるエクストラクタ型電離真空計 (以下 EXG)²⁾ の測定子 IE514 に起こる軟 X 線効果 (解説は省略) による非直線状態を示したものである。曲線は、これまで発表された論文のデータ³⁾ から計算してプロットした。図 1 では、ESD (現象の説明は省略) とガス放出による非直線性は加えていないので、これらの影響が加わった場合は、非直線状態はさらに高い圧力領域から起こる。IE514 は、 10^{-9} Pa 以下の極高真空領域では完全に非直線であり、何らかの補正を行わなければ、式 (1) を用いて極高真空領域の圧力を求めることはできない。そのためこれまでのコントローラ IM520 では、次のような補正を行っている。

コレクタ電流 I_c には軟 X 線効果により発生する残留電流 I_x と、圧力に起因するイオン電流 I_i の両電流が含まれている。 I_x は圧力に無関係な電流であるから、オフセットとして

図 1 極高真空計測定子の X 線限界領域での非直線性

I_x を差し引いて真のイオン電流 $I_i = (I_c - I_x)$ を求め、式 (1) に従って変換して表示する。しかし、オフセットを差し引くこの方法は、図 1 から明らかのように、圧力が低くなり電流が $(I_c - I_x) < 1.0 \times 10^{-13}$ (A) になると、仮数部の小数点以下の数値変化を読むことになるから、仮数部の有効数字の桁が減り、測定精度が落ちる。実際には X 線限界値の 1/10 程度までしか測定できない。さらに、測定子の感度係数は $5 \sim 7 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$ 程度のバラツキがあり、測定子の取り付け条件によって、X 線残留電流も最大 70% まで変化する³⁾。そのため、オフセット値を差し引く場合、そのオフセット値が使用状態にある測定子の残留電流値に一致してなければ、正しい圧力を求めることは出来ない。また、オフセット値が大きいと、極高真空に達していないにもかかわらず、極高真空に達したと判断してしまうことも起こる。

極高真空の圧力測定には、上述した X 線限界の問題のほかに、もう一つ微小電流計測限界の問題がある。圧力が低くなるとそれに伴って計測しなければならないイオン電流 I_i が小さくなり、高精度のイオン電流測定が困難になる。現時点におけるエレクトロニクス技術では、 10^{-16} A 台の微小電流を計測しなければならないような実用極高真空計の設計は非現実的である。 10^{-15} A 台の微小電流計測を行う場合で

*1 〒305-0035 茨城県つくば市松代 2-10-2. SOHO 103

も、かなり高精度の微少電流計測回路を組み込んだコントローラを準備しなければならない。最近、エリコンライボルト社から出されたモデル IM540 のコントローラは、 10^{-15} A までの微少電流が高精度で測定できる回路が組み込まれている。

3. 製品 3BG の開発コンセプト

そこで弊社は、前節で述べた極高真空計の測定子上の問題を解決するために、次の 6 項目を目標に据えた新しい測定子の開発を行った。

- (1) 10^{-9} Pa 以下の極高真空圧力を高精度で測定するために、測定子の直線性を 10^{-11} Pa まで延長し、オフセット値の差し引き無しで圧力測定が出来るようにする。
- (2) 実用的微少電流の計測限界は 10^{-15} A までと考え、 10^{-11} Pa でのイオン電流値がこの値以下にならないように実効感度を出来るだけ大きくする。即ち、電子電流 I_e を大きくしても感度 S の低下が起こらない電極構造を工夫する。
- (3) 極高真空領域では前述の X 線限界に加えて、ESD の問題があり、この問題を解決しなければ極高真空測定の精度は上げられない。これまでの測定子はエネルギーフィルターを用いてイオン種だけを除去していたが、中性種も除去しなければ完全ではない。白金イリジウム合金グリッドを採用し、電子電流を大きくすれば ESD 種のグリッドへの吸着率を下げられるので、この方法で ESD を除去しながら実効感度も大きくする一石二鳥の方策を考える。
- (4) 電子電流を大きくするとガス放出の増大が起こるが、熱陰極イオン源を銅合金フランジに埋め込む方法⁴⁻⁶⁾を採れば、低ガス放出化を図ることができるので、この方法を積極的に活用する。
- (5) 測定子サイズを大きくすれば実効感度は大きくなるが、汎用性と既存のコントローラで制御できるようにすることを考え、IE514 と同じ ICF70 のコンフラットフランジサイズで測定子进行設計する。

上述(1)~(6)の目標を反映させた測定子が 3BG である。図 2 に測定子の原理図を、図 3 に製品の写真を示す。3BG のグリッドは、これまでのグリッドとは異なる独特の構造を持つ。形状は円筒状であるが、上下底面は同じ形状の網で完全に塞いだ閉塞型で、イオンはグリッドの側面に縦長に設けられたスリットから、帯状ビームとして引き出す。このような電極構造をとることにより、次のメリットが得られる。

- i) 円筒状グリッドを、同一円筒状の真空壁中に配置することにより、グリッドの内外に振動する電子の振動方向を、グリッド軸と平行にすることが可能になる。この振動方向の固定化により、上下底面で多く発生する軟 X 線と ESD イオンが、側面 (90°) 方向に引き出される帯状イオンビームに入りにくくなる。
- ii) 電子はグリッド軸と平行な方向 (等電位線上) で振動するため、得られるイオンビームのエネルギー分散が小さく、ビーム偏向時のビーム透過率を 90% 以上に高くすることができる。

図 2 3BG の原理図 (デフレクタ電極は表示していない)

図 3 新製品 3BG 測定子

- iii) 同じく、電子はグリッド軸と平行に振動するため、電子電流を増大させてもイオンビームのエネルギー分散が起こりにくい。このためイオンビームのイオン電流 I_i と、電子電流 I_e の比例関係を $I_e = 4$ mA 程度まで増大させることが可能となり、実効感度の増大を図ることができる。
- iv) 帯状イオンビームに対して、240°の大偏向角円筒状偏向電極を、円筒グリッドと軸平行に配置することにより、測定子のコンパクト化を図ることができる。また、ビームの偏向角が大きいので、コレクタに到達する軟 X 線と ESD イオンの量を少なくすることができる。
- v) ガス放出の原因となる熱輻射源の熱陰極フィラメントと、軟 X 線源のグリッドは、輻射率が低く、熱伝導率の高い 0.2% BeCu 合金製コンフラットフランジの円筒状のスペースに配置できる。その結果、偏向電極やコレクタ側への熱輻射と軟 X 線の侵入を防ぐことがで

図4 3BGをIM540で制御した場合の圧力特性

き、ガス放出を小さくすることができる。

4. 製品3BGの性能

製品3BGは、エリコンライボルト社のコントローラIM540を用いて 1.00×10^{-11} Paまで、オフセットの差し引き無しの無調整で、高精度な圧力測定が可能である。ただし、3BGには偏向電極電位を155 Vに固定する直流バイアス電源が必要である。この電圧はIM540に付いているリフレクタバイアス出力（205 V）から発生させることが可能であるが（別売デフレクタ変換アダプタを使用）、これとは別の可変電圧直流電源を準備すると、X線残留電流 I_x を確認しながら圧力を計測することができる。IM540で制御した場合、3BGの感度は、 $S = 5 \sim 7 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$ 程度が得られる。実際にIM540で制御した3BGの出力を、EXG（測定子IE514使用のIM540）の出力（純窒素ガス圧）に対してプロットしてみると、図3に示したように 2.00×10^{-9} Paから 9.99×10^{-3} Paの間で完全に一致する。これ以下の圧力における3BGの直線性は、到達真空 10^{-12} Pa程度の極高真空排気装置を準備して調べなければ分からない。本テストに用いた排気装置の到達真空は 2×10^{-9} Pa程度なので、この確認は出来なかった。そこで3BGの残留電流から計算した理論上の圧力特性曲線を求め、仮想値を図1上にプロットしてみたので参考にしてほしい。3BGをコントローラIM540で制御した場合（ $I_e = 1.6 \text{ mA}$ ）のイオン電流特性は●印のようになるはずである。本製品の最適条件は、電子電流4 mAで働かせた場合であり、この条件でのX線限界は約 5×10^{-12} Pa、実効感度は $2.4 \times 10^{-4} \text{ A/Pa}$ 程度になる。この時のイオン電流特性曲線を同じく図1上に○印で示しておく。

IM540には使用者がパラメータを選べる“User Mode”が用意されているので、実効感度を大きくした場合の試験も行

表1 製品3BGの制御パラメータ

〈一般的動作条件〉	
電子エネルギー	100～150 eV
フィラメント電位	10～100 V
電子電流	0.1～10 mA
フィラメント加熱電力	約1.5 A×2.8 V
電子衝撃脱ガス電力	約480 V×30 mA
電子衝撃時のフィラメント加熱電力	約1.7 A×3 V
〈IM540を用いた場合〉	
電子エネルギー	120 V
フィラメント電位	100 V
電子電流	1.6 mA
	10 mA も可能
電子衝撃脱ガス電力	約470 V×10 mA
デフレクタ電位	155 V
	145 V（10 mA 時）
感度	$5 \sim 7 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$
	$4 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$ （10 mA 時）
X線限界	約 $5 \times 10^{-12} \text{ Pa}$

った（3BGに最適な4 mAのパラメータは選べない）。フィラメント電位80 V、電子電流10 mAを選択すると、実効感度 $4.2 \times 10^{-4} \text{ A/Pa}$ が得られる。この条件では 1.00×10^{-11} Paでのイオン電流は $4.20 \times 10^{-15} \text{ A}$ まで大きくなり、微小電流計測の信頼性は格段に向上する。ただ、3BGの最適条件から外れるため（電子電流に比例しない領域）、X線限界の悪化とガス放出の増大が20%程度起こる（ICF70サイズ測定子の限界である）。

このように、3BGは、 10^{-11} Paから 10^{-2} Paまで9桁の圧力を単体の測定子で計測可能である。このような広帯域な測定範囲を持つ測定子3BGの開発に成功したのは、帯状イオンビームを発生する構造のイオン源を開発できたこと、真空壁構造材として0.2%BeCu製フランジを開発できたことが大きい。また、3BGはユーザ自身がフィラメントを交換できることはもちろん、構成部品のを全てを分解、掃除、再生することが可能であるため、省資源を考慮した構造になっている。

〔文 献〕

- 1) F. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A28, (2010) 486.
- 2) Oerlikon Leybold Vacuum GmbH, IM540 with IE514.
- 3) F. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A9, (1991) 2744.
- 4) F. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A13, (1995) 497.
- 5) F. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A22, (2004) 181 with 739.
- 6) F. Watanabe, Shinku 49 (2006) 349.

新製品問い合わせ先

有限会社 真空実験室

渡辺文夫

〒305-0035 茨城県つくば市松代2-10-2, SOHO 103

TEL : 029-861-8833 FAX : 029-861-8859

E-mail : info@vaculab.co.jp