報 文

自己バイアス電流導入型高周波ヘリウムグロープラズマ励起源の分光特性

松田 秀幸^{®1}, Tariq Mahmood NAEEM¹, 我妻 和明¹

Emission characteristics of a radio-frequency powered helium glow-discharge plasma excitation source associated with bias current introduction

Hideyuki MATSUTA¹, Tariq Mahmood NAEEM¹ and Kazuaki WAGATSUMA¹

¹ Institute for Materials Research, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8577

(Received 24 January 2003, Accepted 24 February 2003)

In a radio-frequency (r.f.) powered He glow-discharge plasma excitation source, sputtering of the sample atoms scarcely occurs when the bias current is not conducting. However, when the bias current is conducting, the sputtering rate of the sample increases rapidly with increasing the bias current. The maximum sputtering rate of the He excitation source reaches about 1/10 of the sputtering rate of the usual 13.56 MHz Ar glow-discharge plasma excitation source. The emission yield of the r.f. He glow-discharge plasma is found to be over 10-times larger than that of the usual 13.56 MHz Ar glow-discharge plasma. Although a bias current conducting method with an r.f. Ar glow-discharge excitation source becomes ineffective to enhance the excitation of atomic lines having an energy higher than 6.2 eV, the method with r.f. He glow-discharge excitation source is effective for the excitation of emission lines having a high excitation energy. The atomic emission lines of fluorine having an excitation energy larger than 14 eV can be observed with an r.f.-powered He glow-discharge plasma excitation source.

Keywords : glow-discharge optical emission spectrometry; helium; glow-discharge plasma; radio-frequency; bias-current introduction.

1 緒 言

鉄鋼中の C, S, P, N, O などの非金属不純物濃度は、製鋼技術の進歩に伴い数十 $\mu\text{g g}^{-1}$ 程度となり、近い将来には 1 けたになるものと予想されている。現場で工程管理を行う場合、迅速に固体試料を分析する必要があるため、スパーク発光分光分析装置¹⁾が現在でも使われているが、C, S, P, N, O などの不純物濃度が 1 けたになると、スパーク発光分光分析装置では対応できず、他の分析手段を早急に開発する必要がある²⁾。グリムグロー放電発光分光法³⁾は非金属不純物に対して比較的感度がよく、分析感度を 1 けた程度上げてやれば上述の目的を達成することができる。分析感度を上昇させる手段として著者らのグル

ープでは、高周波グリムグロー放電管の試料電極に生じた直流バイアス電圧を駆動力として、プラズマを保持している金属容器中の電子を低速電子としてプラズマ中に注入する自己バイアス電流導入法を開発した⁴⁾。放電ガスにアルゴンを用いた場合のプラズマ励起源について自己バイアス電流導入法の効果を調べたところ、Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni の発光線を使った実験から、比較的励起エネルギーの小さい (3~4 eV) 原子線の発光強度が選択的に増加することが⁴⁾、また Cu の発光線を使った詳しい実験から、これに加え 5.6~5.8 eV の励起エネルギーを持つ原子線の発光強度が 3~4 eV の励起エネルギーを持つ発光線に比べ大きく増大し、励起エネルギーが 6.2 eV 以上になると自己バイアス電流導入法の効果がなくなることが分かった⁵⁾。この 5.6~5.8 eV 付近の励起エネルギーを持つ分析線はトランプエレメント (Cu, Sn, Zn, Pb, Bi など) に多く見

¹ 東北大学金属材料研究所: 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

られ、その検出感度の向上に応用されている⁶⁾⁷⁾。ところでC, S, P, N, Oなどの分析線の励起エネルギーは約7 eV以上であるので、アルゴングロープラズマを用いた自己バイアス電流導入法では分析感度の向上は期待できない。

ところで放電ガスをヘリウムに変更したところ、励起エネルギーが7 eVを超える原子線だけでなく、イオン線の発光強度も自己バイアス電流導入法により増大することが分かった。この特性は、C, S, P, N, Oなどの分析感度を向上させる手段として使える可能性がある。本報では、放電ガスにヘリウムを用い、自己バイアス電流導入法を併用した新しいプラズマ励起源の分光特性を報告する。

2 実験

実験に用いた装置の概略図をFig. 1に示す。グロー放電管(GDL)はGrimm型³⁾の基本構造を持ち、絶縁部分以外は黄銅製である⁸⁾。接地した中空電極の内径は8 mmで、試料電極との間隔は約0.5 mmとした。試料はCu板(純度99.9%)を、プラズマガスには高純度ヘリウム(純度99.9999%以上)を使用し、チャンバーの排気口の後に取り付けられたピラニ真空計(ULVAC, WP-01)を用いてガス圧を測定した。

ヘリウムグロープラズマは、放電管を 3×10^{-2} Torr以下まで排気した後にヘリウムを3 Torrになるように導入し、試料電極に6.78 MHz又は13.56 MHz 80 Wの高周波を印加することにより発生させた。ここで高周波電源は自作のものを、整合器は大和無線電機のCL-65を使用した。

自己バイアス電流導入法⁴⁾を利用する場合には試料電極に生じた自己バイアス電圧の直流成分をLとCで構成さ

れたローパスフィルターを通して取り出し、電流安定化回路を通して放電管本体と接続し、その回路に直流電流を流すことにより行った。ここでLの値は253 μ H (FT-114-61 フェライトコアに $\phi 0.6$ mmのホルマル線50回巻き)、C及びカップリングコンデンサーの値は0.1 μ F (耐圧1 kV, 0.01 μ Fのセラミックコンデンサーを10個並列)とした。また、電流安定化回路⁹⁾は、パワー MOSFET (電界効果トランジスタ)に流れる電流(I_D)が、FETに印加される電圧(V_{DS})が変化しても、ゲート・ソース間電圧(V_{GS})によって決まる値の定電流となる性質を利用して作製した。

発光スペクトルは、島津製のGE100分光写真器に浜松ホトニクス製の光電子増倍管R955とプリアンプC1053-51を取り付け、プリアンプの出力はStanford Research SystemsのSR250ボックスカー積分器(ゲート幅: 15 μ s)を内部発振器を使用してゲートの繰り返し周波数12.5 kHzで動作させ、ゲートを通過した信号3000回分ごとに平均化した。ボックスカー積分器はここではローパスフィルター付の直流増幅器として使用している。分光器の測定波長は1/3.3秒ごとに0.01 nmずつ走査し、ボックスカー積分器の出力はAD変換器を通して3.3 Hz間隔でパソコンに記録した。

3 結果及び考察

3.1 放電管の自己バイアス電圧-電流特性

高周波ヘリウムグロープラズマ励起源の自己バイアス電圧・電流特性をFig. 2に示す。測定はヘリウム圧3 Torrで行った。ここで自己バイアス電圧は、直流成分を取り出すためのローパスフィルターのチョークコイル(Fig. 1の

Fig. 2 Self-bias voltage-current characteristics at the driving frequency of 6.78 MHz and 13.56 MHz

L) 直後 (*で示す) の電圧で, 自己バイアス電流は, 定電流回路を流れる電流である。

Fig. 2 より, 13.56 MHz の高周波を使用した場合に比べ 6.78 MHz の高周波を使用したほうが, 試料電極に生じる自己バイアス電圧が上昇し, より多くの自己バイアス電流を流すことができることが分かった。ここで, 6.78 MHz での自己バイアス電圧が 13.56 MHz の場合に比べ大きい理由は以下のように考えている¹⁰⁾。

放電管の試料電極に高周波を印加するとプラズマ内のヘリウムイオンや電子は, 高周波の交番電場により揺り動かされる。電子の移動度はヘリウムイオンに比べ大きいので, 交番電場の半サイクルごとに試料電極や接地された放電管本体に衝突し, プラズマ中から失われる電子の個数はヘリウムイオンに比べ大きい。その結果, 過剰のヘリウムイオンによる空間電荷 (イオンシース) のためプラズマ電位は試料電極に対し正となる。ここで試料電極の対極である放電管本体は接地してあるので, 試料電極には負の自己バイアス電圧が生じる。ここで, 電極に印加する高周波の周波数を下げると交番電場の半サイクルの期間が長くなり, プラズマ中から失われる電子の個数がより増えることになる。その結果, 正の空間電荷が増加して試料電極に生じる負の自己バイアス電圧が上昇する。

3・2 高周波ヘリウムグロープラズマに与える自己バイアス電流の効果

Fig. 3 にヘリウムの原子線及びイオン線である He I 388.9 nm { $3p\ ^3P_{0,1,2}$ (23.01 eV) – $2s\ ^3S_1$ (19.82 eV)}, He II 468.56 nm { $4p\ ^2P_{1/2}$ (51.02 eV) – $3s\ ^2S_{1/2}$ (48.37 eV)} の発

Fig. 3 Changes in the normalized intensities of He I 388.86 nm and He II 468.56 nm as a function of the bias current

Both intensities are normalized as unity at the bias current of 0 mA. The values in parenthesis are the excitation energies of the emission lines. He pressure: 3 Torr; 6.78 MHz r.f. forward power: 80 W

光強度の自己バイアス電流依存性を示す。

He I 388.9 nm は下位準位が準安定状態のヘリウムであり, 励起状態のヘリウム原子が 388.9 nm の光を出すと準安定状態のヘリウム原子となる。自己バイアス電流を流すにつれて両発光線の強度が増大していることは, 自己バイアス電流を流すと準安定状態のヘリウム原子とヘリウムイオンの数が高周波ヘリウムグロープラズマ中で増えることを意味する。プラズマガスがアルゴンの場合には, アルゴンイオンの発光強度は, 自己バイアス電流を流すにつれて減少するか, 変化しない傾向にあることを以前に報告したが⁴⁾, ヘリウムの場合はアルゴンの場合とは様子が異なり, 自己バイアス電流という形でプラズマ中に導入された電子の挙動がアルゴンの場合と異なっているものと思われる。

3・3 Cu の原子線及びイオン線の発光強度に与える自己バイアス電流の効果

実験に用いた Cu の発光線の帰属を Table 1 に, 自己バイアス電流に対する Cu の発光線強度の変化を Fig. 4 に示

Table 1 Observed emission lines and their assignment

Wavelength/nm	Assignment ⁽¹⁾	
	Upper/eV	Lower/eV
Cu II 213.60	4p ³ F ₄ (8.52)	4s ³ D ₃ (2.72)
Cu I 213.85	4p ² P _{3/2} (7.18)	4s ² D _{5/2} (1.39)
Cu I 216.51	4p ² D _{3/2} (5.72)	4s ² S _{1/2} (0.00)
Cu I 217.90	4s4p ² P _{3/2} (5.69)	4s ² S _{1/2} (0.00)
Cu II 219.23	4p ³ F ₃ (8.49)	4s ³ D ₂ (2.83)
Cu I 219.96	4p ² D _{5/2} (7.02)	4s ² D _{5/2} (1.39)
Cu I 223.01	4p ² F _{7/2} (6.95)	4s ² D _{5/2} (1.39)
Cu II 224.26	4p ³ D ₃ (8.78)	4s ¹ D ₂ (3.26)
Cu II 224.70	4p ³ P ₂ (8.23)	4s ³ D ₃ (2.72)
Cu I 324.75	4p ² P _{3/2} (3.82)	4s ² S _{1/2} (0.00)

Fig. 4 Changes in the normalized intensities of Cu I and Cu II lines as a function of the bias current

Emission intensities of Cu I 324.75 nm (3.82 eV) and 213.85 nm (7.18 eV) are normalized as unity at the bias current of 0 and 20 mA, respectively. Other emission intensities of Cu I and Cu II lines are normalized as unity at the bias current of 10 mA. The values in parenthesis are the excitation energies of the emission lines. He pressure: 3 Torr; 13.56 MHz r.f. forward power: 80 W

す。ここで発光強度は、324.75 nm (3.82 eV) の場合には自己バイアス電流を流さないときの値を、213.85 nm (7.18 eV) の場合には自己バイアス電流を 20 mA 流した場合の値を 1 とした。それ以外の Cu の発光線は、自己バイアス電流を 10 mA 流した場合の発光強度を 1 としてプロットした。1 とする発光強度を測定するために 324.75 nm 以外の発光線以自己バイアス電流を流して測定した理由は、それぞれの発光線の発光強度が非常に弱く、自己バイアス電流を流さないと観測ができなかったためである。

高周波アルゴングロープラズマ中では励起エネルギーが 6.2 eV 以上の Cu の原子線に対して自己バイアス電流導入法は効果がなかったが⁵⁾、高周波ヘリウムグロープラズマ中では、励起エネルギーが 6.2 eV 以上の Cu の原子線だけでなく Cu のイオン線に対しても自己バイアス電流を流すことにより発光強度の増大が認められた。

C, S, P, N, O などの分析線の励起エネルギーは約 7 eV 以上であるが、この自己バイアス電流導入法を併用したヘリウムプラズマ励起源は、それらの元素の分析感度を上昇させる手段として使える可能性があることが分かった。

3.4 スパッタリング速度に与える自己バイアス電流の効果

6.78 及び 13.56 MHz 80 W の高周波で発生させたヘリウムグロープラズマによるスパッタリング速度の自己バイアス電流依存性を Fig. 5 に示す。試料としては Cu 板を用い、約 1 時間高周波スパッタリングを行った後に、試料板の重量変化とスパッター痕の大きさからスパッタリング速度を評価した。高周波ヘリウムグロープラズマ励起源は、自己バイアス電流を流さない場合には試料のスパッタリングがほとんど起こらず、分析用光源としては不適當であること¹²⁾、また自己バイアス電流を流すとスパッタリング速度が急激に上昇して分析用光源として使用可能になることが分かった。ここで 6.78 と 13.56 MHz の高周波を使った場合のヘリウムグロープラズマの最大スパッタリング速度は、アルゴングロープラズマ (自己バイアス電流を流さない場合) のスパッタリング速度と比較すると、6.78 MHz の場合は約 1/10、13.56 MHz の場合は約 1/30 であった。

高周波アルゴングロープラズマの場合は自己バイアス電流を流してもスパッタリング速度はほとんど変化しなかった⁴⁾のに対し、高周波ヘリウムグロープラズマの場合には自己バイアス電流がスパッタリング速度に大きな影響を与え、ある電流値でスパッタリング速度は最大となり、その後減少する傾向が認められた。この原因としては以下に述べるように考えている。

高周波アルゴングロープラズマの場合にはアルゴンイオンの数はプラズマ中に十分存在していて、自己バイアス電

Fig. 5 Dependence of the sputtering rate on the d.c

Bias current at 6.78 and 13.56 MHz r.f. power of 80 W; Sample: Cu plate; He pressure: 3 Torr

流を流してもスパッタリングにはほとんど影響を与えないが、高周波ヘリウムグロープラズマの場合にはヘリウムイオンの数が最初は非常に少なく、自己バイアス電流を流すことによりプラズマ中に注入された電子によってヘリウム原子がイオン化されてヘリウムイオンの数が増え、スパッタリング速度が上昇したものと考えられる。

このことは Fig. 3 で、自己バイアス電流を流すことによりヘリウムイオンの発光線 He II 468.56 nm の強度が増大することから分かる。これに対し、アルゴンイオンの発光線強度は、自己バイアス電流を流しても変化しないか又は減少する⁴⁾ので、アルゴンイオンの数はバイアス電流を流すことによってむしろ減少する。

自己バイアス電流値がある値を超えるとスパッタリング速度が減少するのは、自己バイアス電流を流すと自己バイアス電圧が減少し (Fig. 2 参照)、スパッタリングを起こすためのヘリウムイオンの加速も不十分になったためと考えている。

3・5 Cu 原子線の発光効率に与える自己バイアス電流の効果

原子線の発光効率 (emission yield) は発光強度をスパッタリング速度で割ったものに比例する¹³⁾。そこで 6.78 及び 13.56 MHz の高周波で発生させたヘリウムグロープラズマ中で、幾つかの励起エネルギーの異なる発光線の発光効率に与える自己バイアス電流の効果を調べた。ここで、通常の (自己バイアス電流を流さない場合の) 13.56 MHz の高周波アルゴングロープラズマとの比較も行いたいのので、以下に示す増倍係数 (enhancement factor) を用いてプロットした結果を Fig. 6 に示す。

$$\text{Enhancement factor} = \frac{\text{Emission yield of He r.f. plasma with self - bias current injection}}{\text{Emission yield of 13.56 MHz Ar r.f. plasma (no self - bias current)}}$$

Fig. 6 の破線は増倍係数が 1 を示し、この値以上であれば高周波ヘリウムプラズマ中での Cu の原子線の発光効率が通常の高周波アルゴンプラズマ中での発光効率を上回することを意味する。図より自己バイアス電流を流すことで、高周波ヘリウムグロープラズマ中での 3.79~7.02 eV の励起エネルギーを持つ原子線の励起効率は、自己バイアス電流を流さない 13.56 MHz の高周波アルゴングロープラズマに比べ 5~10 倍程度大きくなることが分かった。

ヘリウムグロープラズマを発生させるために使用した高周波の周波数が原子線の発光効率に与える影響も調べたが、6.78 と 13.56 MHz で比較した限りでは差は認められず、どちらも同等であることが分かった。

ところで、ここで用いた Grimm 型高周波ヘリウムグロープラズマ励起源の場合、自己バイアス電流を流しすぎると、接地中空電極の中に閉じ込められていたプラズマが中空電極の外にまで漏れ出し、試料と励起源本体両方で高周波スパッタリングが起こる現象が認められた。本実験の場合、励起源本体は黄銅製で Cu が含まれているため、Cu を使った実験を行い、大きな自己バイアス電流を流す場合には、結果の解釈に注意が必要である。

3・6 フッ素の発光スペクトル及びその発光強度に対するアルゴンガス混合の効果

フッ素原子の発光スペクトルは、その励起エネルギーが大きいため、アルゴングロープラズマでは励起できず¹⁴⁾、観測することができない。自己バイアス導入法を併用した

Fig. 6 Changes in an enhancement factor of Cu I emission yield as a function of a bias current

A dashed line shows that an enhancement factor is unity. The values in parenthesis are the excitation energies of the emission lines. 6.78 and 13.56 MHz r.f. forward power: 80 W; He pressure: 3 Torr

高周波ヘリウムグロー放電励起源の場合には、これまで述べてきたように大きな励起能力を持つため、フッ素の発光スペクトルが測定できる可能性がある。

そこでCuの粉末に2 mass%のNaF粉末を混ぜ合わせ、圧縮して円盤状にした試料を高周波ヘリウムグロープラズマ励起源に装着してフッ素のスペクトルを測定した。ヘリウムプラズマは6.78 MHz 100 Wの高周波で発生させ、自己バイアス電流を200 mA流した。ヘリウムガスの圧力は3 Torrとした。測定したスペクトルをFig. 7に示す。ここで、フッ素の発光線 F I 685.602 nmの帰属は、 $\{3p^4D_{7/2} (14.50 \text{ eV}) - 3s^4P_{5/2} (12.70 \text{ eV})\}$ である。プラズマガスがヘリウムのみの場合、フッ素の発光スペクトル強度はあまり大きくなかった。この原因として、3・4で述べたように、6.78 MHzの高周波で発生させたヘリウムプラズマのスパッタリング速度は、自己バイアス電流を流しても

Fig. 7 Upper figure: Emission spectra of pressed disc sample (Cu powder + 2 mass% NaF). He: 3 Torr; He + Ar: (partial pressure of Ar: 0.4 Torr; total pressure: 3 Torr). Lower figure: Intensity variation of F I 685.6 nm with changing the partial pressure of Ar, where total pressure of He-Ar mixed gas is 3 Torr. 6.78 MHz r.f. forward power: 100 W; Self-bias current: 200 mA

13.56 MHzの高周波で発生させたアルゴンプラズマのスパッタリング速度の1/10程度であるため、今度も場合も同様にヘリウムプラズマへの試料導入量が不足したためと考えることができる。そこでヘリウムにアルゴンを少量混ぜてスパッタリング速度を上げ、プラズマへの試料導入量を増やすことを試みた。Fig. 7の下半分に結果を示す。アルゴンガスの分圧が0.4 Torrのときフッ素の原子線685.602 nmの強度が5倍程度に増大した。アルゴンプラズマはフッ素の原子線を励起する能力はないため、この発光強度の増加は混合したアルゴンガスによるスパッタリング速度の増加によるものと考えられる。アルゴンの分圧が0.4 Torrを超えるとF I 685.602 nmの発光強度が落ちていくのは、アルゴンを混合することによりヘリウムグロープラズマの励起特性が変化したものと考えている。

4 結 論

高周波ヘリウムグロープラズマ励起源そのままでは試料のスパッタリングはほとんど起こらず、自己バイアス電流を流すとスパッタリング速度は急激に大きくなり、その最

大値は, 13.56 MHz での高周波アルゴングロープラズマの値と比較して約 1/10 (6.78 MHz) から 1/30 (13.56 MHz) であった.

単位スパッタリング速度当たりの発光強度 (発光効率) は, 13.56 MHz 高周波アルゴングロープラズマそのままの場合に比べて, 自己バイアス電流を流した高周波ヘリウムグロープラズマのほうが 1 けた程度大きいことが分かった.

分析線の励起エネルギーが 6.2 eV を超えると, 高周波アルゴングロープラズマ励起源では自己バイアス電流導入法は効果がなくなるが⁵⁾, 今回紹介した高周波ヘリウムグロープラズマ励起源では 6.2 eV 以上の発光線に対しても自己バイアス電流導入法が有効であり, C, S, P, N, O などの分析感度を上昇させる手段として使える可能性があることが分かった. この励起源は励起能力が高く, 励起エネルギーが 14 eV 以上のフッ素の発光スペクトルも観測することができた.

高周波ヘリウムグロープラズマ励起源の欠点としては, スパッタリング速度が小さく, プラズマ中への試料導入手量が不十分であることが挙げられるが, これは, レーザーアブレーションなどの手段¹⁵⁾を併用して試料導入手量を補ってやれば解決できるものと考えられる. また, 自己バイアス電流を流しすぎると, 試料以外にグローランプ本体のスパッタリングも起こることが分かり, 分析元素によっては自己バイアス電流値を制限する必要があることが分かった.

Cu-NaF 混合試料を作製していただいた理学電気工業(株)山下昇氏に感謝します.

文 献

- 1) JIS G 1253, 鉄及び鋼のスパーク放電発光分光分析方法 (1995).
- 2) 石橋耀一: 第 40 回白石記念講座, 1 (1999).
- 3) W. Grimm: *Spectrochim. Acta, Part B*, **23**, 443 (1968).
- 4) K. Wagatsuma, H. Matsuta: *Spectrochim. Acta, Part B*, **54**, 527 (1999).
- 5) K. Wagatsuma, H. Matsuta: *ISIJ Int.*, **41**, 1488 (2001).
- 6) K. Wagatsuma: *Tetsu-to-Hagané*, **85**, 34 (1999).
- 7) K. Wagatsuma: *Tetsu-to-Hagané*, **88**, 108 (2002).
- 8) K. Wagatsuma, K. Hirokawa: *Surf. Interface Anal.*, **6**, 167 (1984).
- 9) H. Matsuta, K. Hirokawa: *Spectrochim. Acta, Part B*, **48**, 1101 (1993).
- 10) H. Matsuta, K. Kitagawa, K. Wagatsuma: *Spectrochim. Acta, Part B*, **54**, 1783 (1999).
- 11) C. E. Moore: "Atomic Energy Levels", Vol. I, Vol. II, (1949 and 1952), (Circular of the National Bureau of Standards 467, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.).
- 12) H. Matsuta, K. Wagatsuma: *Anal. Sci.*, **15**, 319 (1999).
- 13) M. Parker, M. L. Hartenstein, R. K. Marcus: *Spectrochim. Acta, Part B*, **52**, 567 (1997).
- 14) K. Wagatsuma, K. Hirokawa, N. Yamashita: *Anal. Chim. Acta*, **324**, 147 (1996).
- 15) 松田秀幸, 我妻和明, 北川邦行: 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **49**, 849 (2000).

要 旨

高周波ヘリウムグロープラズマ励起源では, 自己バイアス電流を流さないと試料のスパッタリングはほとんど起こらず, 自己バイアス電流を流すとスパッタリング速度は急激に大きくなり, その最大値は通常の 13.56 MHz の高周波アルゴングロープラズマの場合の約 1/10 であった. 単位スパッタリング速度当たりの発光強度 (発光効率) は, 通常の 13.56 MHz の高周波アルゴングロープラズマの場合に比べて, 100 mA の自己バイアス電流を流した高周波ヘリウムグロープラズマのほうが 1 けた程度大きかった. 分析線の励起エネルギーが 6.2 eV を超えると, 高周波アルゴングロープラズマ励起源では自己バイアス電流導入法は効果がなくなるが, 高周波ヘリウムグロープラズマ励起源では励起エネルギーが 6.2 eV 以上の発光線に対しても自己バイアス電流導入法は有効であり, この励起源により励起エネルギーが 14 eV 以上のフッ素の原子発光スペクトルも観測することができた.