

有機エレクトロニクスデバイス製造工程に向けた ACコロナ放電型イオナイザの減圧下での除電特性

松尾 武*, 根本 大輔*, 佐藤 直幸*, 池畑 隆^{*.1}

(2016年3月7日受付; 2016年9月2日受理)

Study on Static Neutralization of Corona Discharge Ionizer Under Reduced Pressure for Organic Electronic Devices Manufacturing Process

Takeshi MATSUO*, Daisuke NEMOTO*, Naoyuki SATO* and Takashi IKEHATA^{*.1}

(Received March 7, 2016; Accepted September 2, 2016)

Neutralization characteristics in a mixed N_2 - CF_3I gas are investigated with a squared-AC ionizer operated at the frequency of 1-100 Hz and the voltage of 1-6 kV at the pressure of 10^4 - 10^5 Pa. The purpose of this study is to investigate how the negative ions produced from CF_3I can modify the ion balance for oxygen-free atmospheres and to clarify the effect of the total pressure on the static elimination performance of the ionizer. The ratio of 0.1% for the partial pressure of CF_3I is found to be proper for the ion balance. We conclude that the static elimination at 100 Hz and 2 kV at 10^4 Pa is the best condition where it achieves a shorter static elimination time with a lower ripple voltage.

1. 研究背景

クリーンルーム内の電子デバイス製造工程では、しばしば静電気帯電による障害が問題となり、除電装置としてコロナ放電型イオナイザが広く使用されている¹⁻²⁾。コロナ放電型イオナイザは針状電極（エミッタ）に高電圧を印加して、コロナ放電を起こす。コロナ放電により作業雰囲気中の気体分子がイオン化され、その正負のイオンを用いて除電を行う。

一方、近年実用化が進展する有機EL等の製造工程では、空気中に含まれる酸素が化学的に活性で有機材料を劣化させるため、作業雰囲気に窒素などの不活性ガスか、もしくは減圧雰囲気を使用する必要がある³⁻⁴⁾。しかし、窒素雰囲気でコロナ放電を起こすと正負のイオンバランスが崩れる。これは窒素が電子親和力を持たず、負イオンを形成しないため、コロナ放電から正イオンと電子が発生するためである。正イオンと電子は移動度が大きく異なるため、正負のイオンバランスが崩れ、被除電物の電位は大きく負に帯電する。従って、除電を行うためには作業雰囲気中のイオンバランスを維持することが重要であり、窒素雰囲気では負イオンを形成する酸素以外の負

性ガスが必要となる。そのため筆者らは、はじめ化学的に安定かつ不活性で電子付着断面積の大きい SF_6 に着目し、大気圧において N_2 - SF_6 混合ガス中の除電特性を調査した。その結果、 SF_6 を0.01%~0.1%混入させると良好なイオンバランスが保たれることが分かった⁵⁾。しかし、 SF_6 は地球温暖化係数が CO_2 の23900倍あり、排出規制対象ガスとなっている。そこで、 SF_6 の代替ガスとして期待されているヨウ化トリフルオロメタン CF_3I ⁶⁻⁸⁾に着目した。 CF_3I は SF_6 と同様に化学的に安定かつ不活性で電子付着断面積が大きい負性ガスであるが、地球温暖化係数が CO_2 と同程度である。調査の結果、 CF_3I の除電特性は SF_6 とほぼ同様の結果を示した⁹⁾。

一方、LSI製造プロセスでは、減圧・高真空下での処理工程も増えてきている¹⁰⁾。しかし筆者らの知る限り、真空中あるいは減圧下で放電型イオナイザの除電特性を調査した例はない。そこで減圧下でのAC放電型イオナイザの挙動を調査することにした。その初期の成果は学会等で口頭発表されているが¹¹⁻¹²⁾、本論文では圧力、イオナイザ周波数、エミッタ電圧の三つのパラメータを変化させたときの除電特性の変化を詳しく検討した。

具体的には、まず大気圧 N_2 - CF_3I 混合ガスの除電特性を CF_3I 分圧比を変化させて調査し、イオンバランスに適した CF_3I 分圧比を求めた。そして、以後の減圧実験において、 CF_3I 分圧比をその最適値(0.1%)に固定した。次に圧力を変化させ、 N_2 - CF_3I 混合ガスにおけるDCでの電流電圧特性、コロナ開始電圧を測定した。ここで、圧力範囲を 10^4 ~ 10^5 Paに限定した。これは 10^4 ~ 10^5 Paの範

キーワード: 静電気除電, イオナイザ, AC コロナ放電, イオンバランス, オフセット電圧, 窒素, CF_3I , 気圧

* 茨城大学大学院理工学研究科応用粒子線科学専攻
(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

Institute of Applied Beam Science, Ibaraki University,
4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

¹ takashi.ikehata.eng@vc.ibaraki.ac.jp

囲ではコロナ放電を維持できるが、 10^3 Paまで減圧すると、放電の形態がコロナからグロー様に遷移したためである。グロー放電をベースにした真空除電は興味深い研究対象であるが、議論が拡散するため、本論文はコロナ放電領域のイオナイザの挙動を調査することに集中することとした。最後に N_2 - CF_3I 混合ガスの圧力、イオナイザ周波数、エミッタ電圧を変化させて除電特性を包括的に調査した。その結果、オフセット電圧、電圧リップル、除電時間と上記3パラメータの関係が明らかになった。

2. 実験装置および方法

実験装置を Fig.1 に示す。ステンレス製真空容器（直径 210 mm×高さ 300 mm）内にエミッタ（先端曲率半径 $50 \mu m$ 、タングステン製）および検出プレート（ $100 \times 100 \times 1$ mm、アルミニウム製）を設置し、検出プレートをチャージドプレートモニター（CPM、ヒューグルエレクトロニクス 700A 型）に接続する。CPM はオシロスコープ（テクトロニクス TDS2024B 型）に接続され、PC に取り込まれた検出プレート電位波形から除電特性が求められる。

容器内の雰囲気ガスを変化させるときには、はじめに油拡散ポンプを用いて容器内の空気を 9×10^{-3} Pa まで排気する。次に高純度の負性ガスを注入し、圧力を調整する。調整する方法として、負性ガスの分圧比が 0.0005% から 1% の範囲ではバロトロン圧力計（MKS 627A 型）を用いて圧力を調整し、1% より大きい圧力では半導体圧力計（YOKOGAWA FP101A 型）を用いる。最後に高純度（6N）の窒素ガスを注入し、任意の圧力まで全圧を調整する。

減圧下における直流でのコロナ放電電流測定およびコロナ放電開始電圧測定を行う場合、被除電物に見立てた検出プレートをデジタル電流計を介して接地する。電源は TREK610E 型を直流電源モードで動作させる。その後、圧力もしくは電源電圧を変化させ、測定を行う。

除電特性を測定する場合、被除電物に見立てた検出プレートを CPM に接続し、プレートの電位 V_p を CPM で初期帯電 $V_0 = \pm 550$ V まで帯電させる。これは減圧するとコロナ開始電圧が大きく下がるため 10^3 Pa- 10^5 Pa において安定に帯電を維持するため ± 550 V を選択したものである。電源は TREK610E 型を交流電源モードで動作させ、方形波をエミッタに印加し、正負の荷電粒子を生成する。そして、荷電粒子の流入によるプレート電位 V_p の時間変化（除電特性）を測定する。印加電圧は正弦波が一般的だが、方形波では半周期の電圧が一定であるため、過渡領域を除くとエミッタ電流が直流値に漸近する。これよ

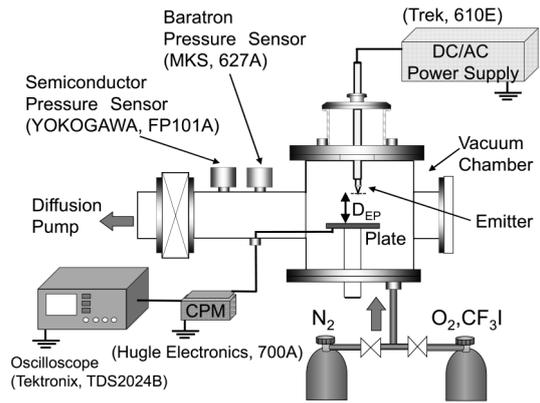


図1 実験装置
Fig.1 Experimental setup.

り、静特性と交流特性の関係性をより考察しやすいと考えたため方形波を選択した。また、エミッタ先端から検出プレートまでの距離 D_{EP} を 100 mm で一定とした。

分圧比特性を測定する際は、全圧を 10^5 Pa に固定し、 CF_3I ガスの分圧比を 0.0005%~1% まで変化させた。減圧特性を測定する際は全圧を 10^5 Pa から 10^4 Pa まで変化させ、分圧比は $CF_3I : 0.1\%$ に固定した。

3. 実験結果

3.1 除電特性の評価方法

測定された除電特性の一例を Fig.2 に示す。Fig.2 から評価パラメータとして、オフセット電圧 V_{PF} 、電圧リップル V_R 、除電時間 T_s を算出する。

まずオフセット電圧 V_{PF} の求め方を説明する。初期帯電させたプレート電位 V_p がほぼ一定となる時間（ $t = 9$ s から 10 s の 1秒間）で電位を時間平均し、さらに正負バイアスでの値を相加平均した値をオフセット電圧 V_{PF} とする。

次に電圧リップル V_R の求め方を説明する。除電後のプ

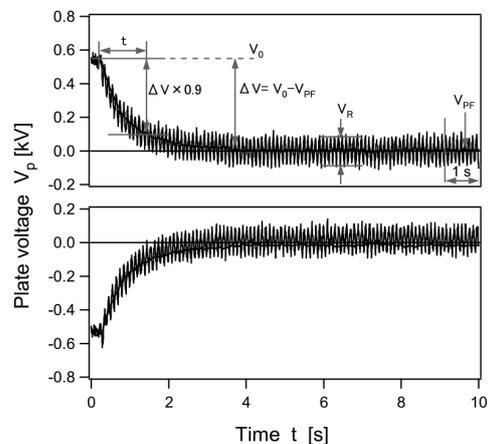


図2 オフセット電圧 V_{PF} 、電圧リップル V_R 、除電時間 T_s の定義
Fig.2 Determination of offset voltage V_{PF} , voltage ripple V_R and static elimination time T_s .

レート電位には振動成分 (電圧リップル) が残る. 初期帯電させたプレート電位 V_P がほぼ一定となる時間 ($t = 9$ s から 10 s) での振動振幅の標準偏差を電圧リップル V_R とする.

最後に除電時間 T_s の求め方を説明する. 初期電位 V_0 とオフセット電圧 V_{PF} の差を ΔV とすると $\Delta V = V_0 - V_{PF}$ となる. ΔV が V_0 の $1/10$ になるまでの時間を除電時間 T_s とする.

3.2 除電特性のCF₃Iガス分圧比依存性 (大気圧)

N₂-CF₃I および N₂-O₂ 混合ガス中におけるオフセット電圧 V_{PF} と負性ガス分圧比 $\delta \equiv p(n) / (p(n) + p(N_2))$ の関係⁹⁾ を Fig.3 に示す. ここで $p(n)$ は CF₃I または O₂ の分圧である. 測定は 10^5 Pa, 電圧振幅 6 kV, $f = 10$ Hz の条件で行った. Fig.3 より, CF₃I の分圧比を増加させることで V_{PF} は負の値から 0 V に近づいていき, 0.1% から 0.01% の分圧比で $V_{PF} \approx 0$ の良いイオンバランスが得られることが分かった. このことから, CF₃I を 0.1% から 0.01% 混入させると酸素を 20% 混入させたときとほぼ同数の負イオンが生成されると考えられる. これは CF₃I 分子と O₂ 分子の電子付着断面積の違いで説明できる⁹⁾. CF₃I は低電子エネルギー領域 ($10^{-2} \sim 10^{-1}$ eV) で, O₂ に比べ 3 桁から 4 桁大きい断面積を有する¹³⁻¹⁴⁾.

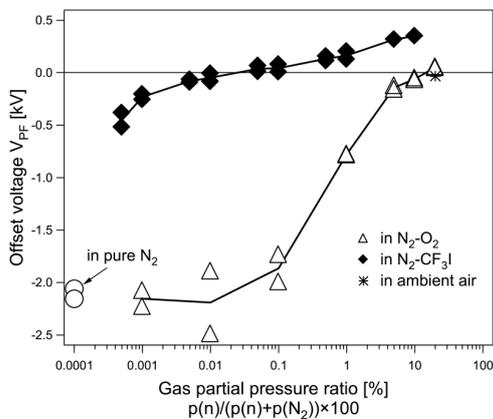


図3 N₂-CF₃I および N₂-O₂ 混合ガス中におけるオフセット電圧 V_{PF} と負性ガス分圧比の関係

Fig.3 Offset voltage V_{PF} as a function of the partial pressure ratio of electronegative gases in N₂-CF₃I and N₂-O₂ gases.

3.3 減圧下でのコロナ放電電流

Fig.4 にコロナ放電電流 (DC) と気圧の関係を示す. この測定ではプレートをデジタル電流計を介して接地し, 電源の電流リミットを 1 mA に設定した. 測定は電源電圧 (DC) を ± 6 kV, CF₃I = 0.1% の条件で行った. なお, 10^4 Pa より減圧すると電流リミットが作動したため, 測定は 10^4 Pa まで行った. Fig.4 から, 概ね $I_e, I \propto 1/p^2$ の関係が認められる. 衝突性輸送によるキャリア電流密度 J は, キャリアの数密度を n_+ (例として正電荷を

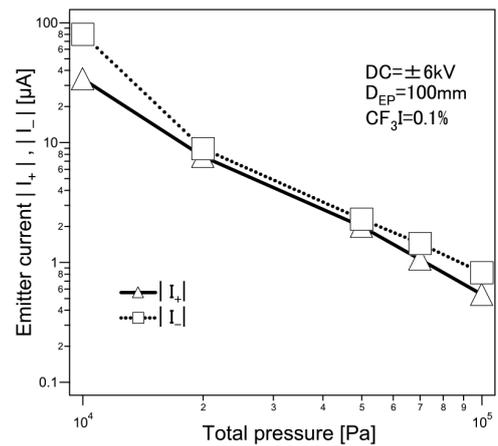


図4 コロナ放電電流 (DC) と気圧の関係
Fig.4 Emitter current as a function of total pressure.

考える), 移動度を μ_+ として, $J = en_+\mu_+E$ と表せる.

減圧すると移動度は大きくなり, $\mu_+ \propto 1/p$ であるので, Fig.4 から $n_+ \propto 1/p$ が示唆される.

しかしながら, キャリア生成の圧力依存性に関しては, 実験を含めて未検討であり, 今後の課題となろう. いずれにしても, Fig.4 より減圧すると電流が大きくなることが確認できた. よって, 減圧下でイオナイザを動作させると除電電流が大きくなるため迅速な除電が期待できる.

3.4 減圧下でのコロナ放電開始電圧

Fig.5 にコロナ放電開始電圧と気圧の関係を示す. 測定方法はプレートをデジタル電流計を介して接地し, 電源電圧を DC の 1 kV から 10 kV まで変化させ, 電流が流れはじめときの電圧をコロナ放電開始電圧 V_s とした. Fig.5 から減圧すると V_s が下がり, 10^4 Pa まで減圧すると 2 kV から 2.5 kV でコロナ放電が起こっていることが確認できた. しかし, 10^3 Pa 以下の低気圧にすると放電発光がエミッタ先端部からエミッタ電極全体に拡がり, コロナ放電からグロー放電へと遷移している様子が認められた. これより, 圧力の範囲を 10^4 Pa \sim 10^5 Pa に限定することにした.

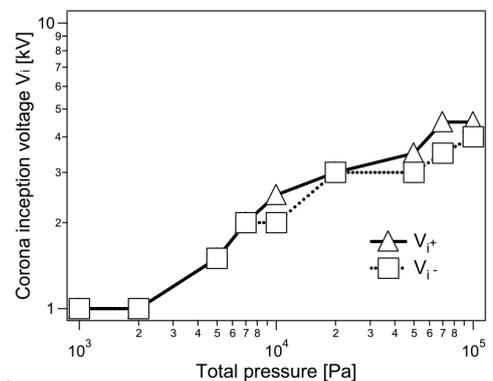


図5 コロナ放電開始電圧と気圧の関係
Fig.5 Corona inception voltage V_i as a function of total pressure.

これは実験をコロナ放電領域に限定するためである。

以上の観測結果より、減圧下ではコロナ放電型イオナイザの低電圧駆動が可能であり、実用上のメリットが大きいと考えられる。

3.5 減圧下でのACコロナ放電イオナイザにおける除電特性

3.5.1 除電特性

Fig.6 に圧力 p およびイオナイザ周波数 f を変化した場合の除電特性を示す。測定は電源電圧 (AC) を 6 kV, $CF_3I = 0.1\%$ の条件で行った。

Fig.6 から減圧下において、オフセット電圧 V_{PF} に大幅な変化は見られないが電圧リップル V_R が大きくなっていることが分かる。しかし、 f を大きくすると V_R が小さくなり、低リップル、迅速な除電が可能だと分かった。そこで、最適な除電パラメータを求めるため、圧力依存性、周波数依存性、電源電圧依存性を調査した。

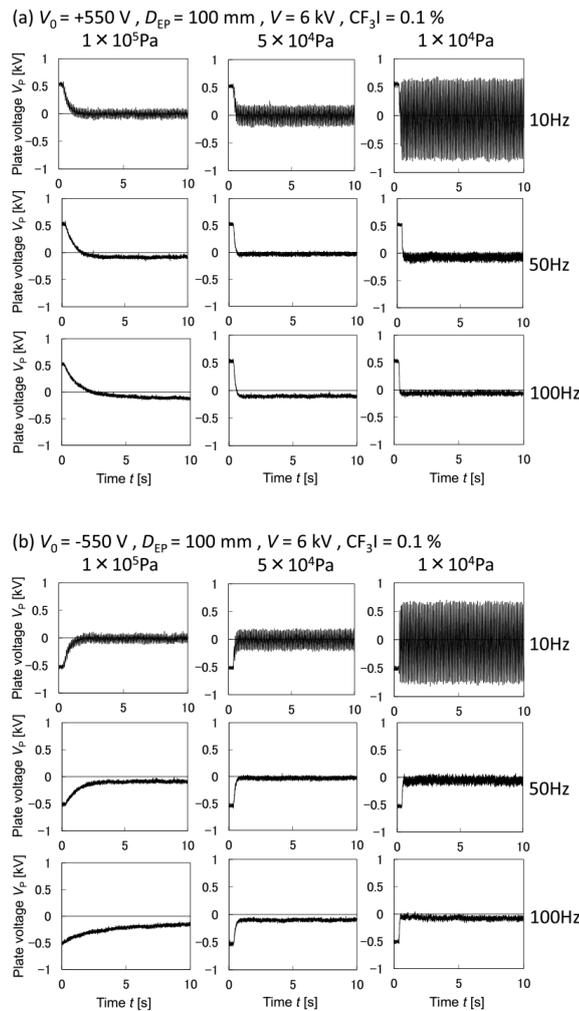


図6 圧力 p およびイオナイザ周波数 f を変化した場合の除電特性. $V_0 = +550$ V (a), $V_0 = -550$ V (b)
 Fig.6 Neutralization characteristics as a function of pressure and ionizer frequency for $V_0 = +550$ V (a) and $V_0 = -550$ V (b).

3.5.2 圧力依存性

Fig.7 に圧力を変化させた際のオフセット電圧 V_{PF} , 電圧リップル V_R , 除電時間 T_S を示す. 測定は電源電圧 (AC) を 6 kV, $f = 50$ Hz, $CF_3I = 0.1\%$ の条件で行った. オフセット電圧 V_{PF} においては減圧しても V_{PF} に大幅な変化がないことが分かった. それでも, 10^4 Pa で -80 V 程度の電圧が観測されている. 筆者らは MOS ゲート絶縁膜 (SiO_2) の絶縁耐圧¹⁵⁾ をもとに静電気除電の目標値を ± 20 V に置いている. 実測値は目標値を超えており, 今後, イオナイザ動作条件 (例えば, 方形波デューティー比, 直流バイアスなど) の調整によってオフセット電圧をゼロに近づける努力が必要である.

電圧リップル V_R においては, 減圧するほど V_R が大きくなり, 10^4 Pa では 10^5 Pa のおおよそ 2.5 倍である. これは Fig.4 より減圧するとイオン電流の値が増えることが原因ではないかと考えた.

AC 電圧の半周期 $T/2$ におけるプレートの電圧は以下で与えられる.

$$V_p = \frac{Q_p}{C_p} = \frac{1}{C_p} \int_0^{T/2} Idt \approx \frac{I}{2C_p f} \tag{1}$$

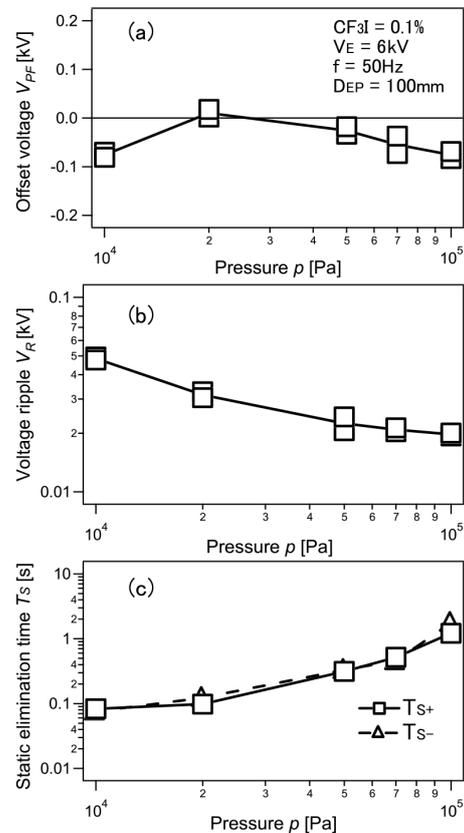


図7 圧力 p を変化した場合のオフセット電圧 V_{PF} (a), 電圧リップル V_R (b), 除電時間 T_S (c)
 Fig.7 Offset voltage V_{PF} (a), voltage ripple V_R (b) and static elimination time T_S (c) as a function of pressure p .

ここで、 V_p はプレートの電圧、 Q_p はプレートに流れ込む電荷量、 C_p はプレートの静電容量、 I はプレートに流れ込むイオン電流を表す。プレートの静電容量 C_p は定数であるため V_p はプレートに流れ込む電荷によって決まる。従って、減圧によりプレートに流れ込む電流が増えると、エミッタ電極に +6 kV が印加されているときは正イオンが多く流れ込み、プレートは正に再帯電し、-6 kV が印加されているときは、負イオンが多く流れ込み、負に再帯電を起こして、結果として大きな電圧リップルを生じていると考えられる。

除電時間 T_s に関しては、減圧すると T_s が短くなり、 10^4 Pa では 10^5 Pa のおおよそ 1/10 になる。

これは Fig.6 より、減圧によってイオン電流が増え、半周期当たりの電荷量が増えたため、除電時間が早くなったと考えた。

以上より圧力特性から減圧すると電圧リップルが増え、除電時間が短くなることが分かった。

3.5.3 周波数依存性

Fig.8 にイオナイザ周波数 f を変化させた際のオフセット電圧 V_{PF} 、電圧リップル V_R 、除電時間 T_s を示す。測定

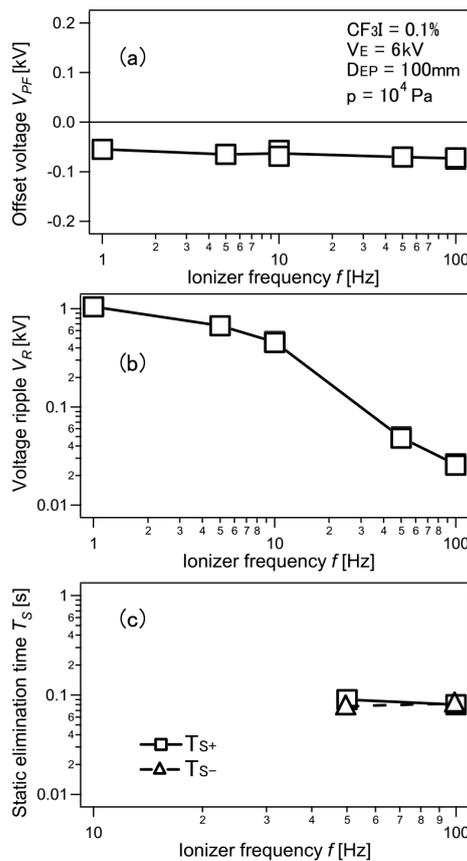


図8 イオナイザ周波数 f を変化させた場合のオフセット電圧 V_{PF} (a)、電圧リップル V_R (b)、除電時間 T_s (c)
Fig.8 Offset voltage V_{PF} (a), voltage ripple V_R (b) and static elimination time T_s (c) as a function of ionizer frequency f .

は電源電圧 (AC) を 6 kV、 10^4 Pa、 $CF_3I = 0.1\%$ の条件で行った。オフセット電圧 V_{PF} において、 V_{PF} は f による変化がほとんどないことがわかる。電圧リップル V_R においては、 f を大きくしていくと V_R が小さくなり、100 Hz を 10 Hz と比較するとおおよそ 1/20 になっていることが分かった。 V_R が f に依存する原因は、eq.(1) から、プレートに流れ込む電荷量 Q_p が周波数 f に反比例することとイオン電流が f に依存する¹⁶⁾ ことの相乗効果と考えられる。以上の実験結果より、減圧で大きくなる電圧リップルは、周波数を高くすることで抑えられることが分かった。

3.5.4 エミッタ電圧依存性

Fig.9 にエミッタ電圧 V_E を変化した際のオフセット電圧 V_{PF} 、電圧リップル V_R 、除電時間 T_s を示す。測定は $f = 50\text{ Hz}$ 、 10^4 Pa 、 $CF_3I = 0.1\%$ の条件で行った。オフセット電圧 V_{PF} は、エミッタ電圧を低くしても大幅な変化がないことが分かった。

電圧リップル V_R においては、低電圧にすると V_R が小さくなり、6 kV と 2 kV を比較すると 2 kV は 6 kV のおおよそ 1/4 になっていることがわかる。これは V_E を下

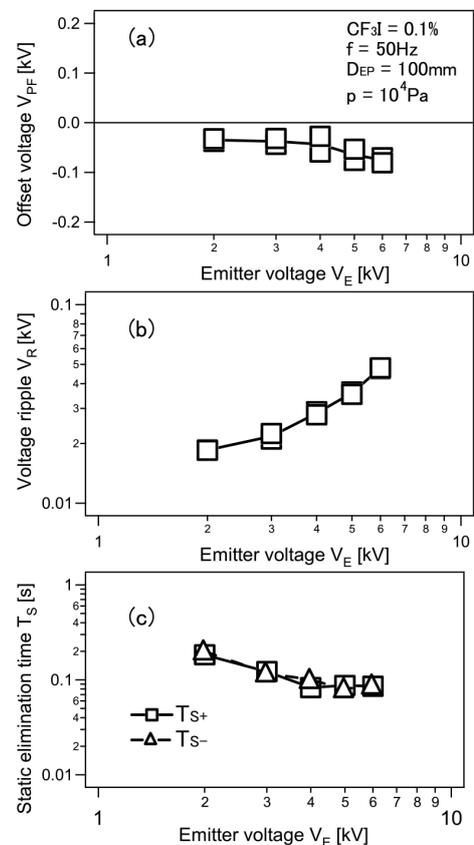


図9 エミッタ電圧 V_E を変化した場合のオフセット電圧 V_{PF} (a)、電圧リップル V_R (b)、除電時間 T_s (c)
Fig.9 Offset voltage V_{PF} (a), voltage ripple V_R (b) and static elimination time T_s (c) as a function of emitter voltage V_E .

げるとイオン電流が小さくなり、プレートに流入する電荷量 Q_p が小さくなるためと考えられる。除電時間 T_s においては、低電圧にすると T_s が長くなり、2 kV では6 kV の約2倍になることが分かった。これは上の V_R と同様に、 V_E を下げるとイオン電流が小さくなり、プレートに流入する電荷量 Q_p が小さくなるためと考えられる。

2 kV における除電時間 T_s はおよそ 0.2 s であり、十分迅速な除電と言える。以上の結果から、減圧するとイオナイザを低電圧で運転することが可能である。

3.5.5 まとめ

3.3 減圧下でのコロナ放電電流および 3.4 減圧下でのコロナ放電開始電圧より、コロナ放電を維持するという条件下で 10^4 Pa まで減圧が可能であった。また、 10^4 Pa では Fig.5,9 より、エミッタ電圧を 2 kV まで下げることができた。低電圧動作は装置のコンパクト化および省エネルギー化につながるため、実用的観点から望ましい。一方、Fig.7 より減圧下では電圧リップルが大きくなる。もとより低リップルが望ましい。Fig.8,9 より圧力が 10^4 Pa, エミッタ電圧が 2 kV, イオナイザ周波数が 100 Hz での条件下が最も低リップルになることがわかった。Fig.9 (c) から、エミッタ電圧 2 kV の除電時間は大気圧と比べておよそ一桁短く十分迅速な除電であると言える。まとめると、本実験では圧力が 10^4 Pa, エミッタ電圧が 2kV, イオナイザ周波数が 100 Hz での条件下において、低電圧、低リップルで迅速な除電が可能であった。

4. 結論

N_2 -CF₃I 混合ガス雰囲気における AC コロナ放電型イオナイザの除電特性を減圧下で測定した。圧力特性から、減圧すると除電電流が増え、電圧リップルが大きくなり、除電時間が短くなることが分かった。周波数特性から、周波数を上げると半周期当たりの供給電荷量が減るため電圧リップルが小さくなることが分かった。エミッタ電圧特性から、2 kV 程度の低電圧でも除電が可能であることが分かった。以上の結果から、減圧下では、低電圧、低リップルで迅速な除電が可能であることが明らかになった。

謝辞

CF₃I をご提供いただいた(株)東ソー・エフテック様に感謝します。

参考文献

- 1) A. Ohsawa: 2-D electrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionisers. *J. Electrostat.*, **71** [2] (2013) 116-124
- 2) 静電気学会編：静電気ハンドブック, pp. 383-384, オーム社 (2006)
- 3) J. S. Chang and A. A. Berezin: Neutralisation of static surface charges by a stabilized corona discharge ionizer in a nitrogen environment. *J. Electrostat.*, **51-52** (2001) 64-70
- 4) 向川政治, 大久保貴広, 大谷 勝, 高木浩一, 藤原民也, 伊藤 剛：コロナ放電方式イオナイザによる窒素雰囲気中のウェーハの帯電と除電. *静電気学会誌*, **32** [2] (2008) 84-89
- 5) 根本大輔, Y. Kristanto, 賀 婉婷, 松尾 武, 佐藤直幸, 岡野一雄, 池畑 隆：N₂-O₂, N₂-SF₆混合ガス雰囲気での AC コロナ放電イオナイザの静電気除電特性. *電気学会論文誌 A*, **136** [1] (2016) 33-40
- 6) T. Hayashi, Y. Morikawa, K. Suu, M. Ishikawa: ArF resist-friendly etching technology. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26** [5] (2008) 1775-1781
- 7) M. K. M. Jamil, S. Ohtsuka, M. Hikita, H. Saitoh, M. Sakaki: Gas by-products of CF₃I under AC partial discharge. *J. Electrostatics*, **69** (2011) 611-617
- 8) 熊田亜希子, 今井克樹, 松岡成居, 日高邦彦：CF₃I ガス及びその混合ガスの放電特性と絶縁媒体としての適性. *電気学会論文誌 A*, **134** [12] (2014) 635-641
- 9) 根本大輔, 賀 婉婷, 松尾 武, 佐藤直幸, 岡野一雄, 池畑 隆：有機エレクトロニクス製造工程向け除電システムの研究 - N₂-CF₃I 混合ガス雰囲気における除電 - . 平成 27 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会講演文集, **17** (2015) 6
- 10) 服部信美, 福本隼明, 加藤忠雄：クリーンテクノロジー大気中から真空中へ. *真空*, **33** [12] (1990) 895-899
- 11) 松尾 武, 根本大輔, 賀 婉婷, 佐藤直幸, 岡野一雄, 池畑 隆：有機エレクトロニクス製造工程向け除電システムの研究 - 減圧雰囲気下での除電 - . 平成 27 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会講演文集, **17** (2015) 10
- 12) 池畑 隆, 根本大輔, 賀 婉婷, 松尾 武, 佐藤直幸, 岡野一雄：減圧雰囲気下におけるイオナイザ除電器の挙動. 平成 27 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会講演文集, **17-E** (2015) 2
- 13) V. Vahedi and M. Surendra: A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges. *Comp. Phys. Com.*, **87** [1-2] (1995) 179-198
- 14) L. G. Christophorou and J. K. Olthoff: Electron Interactions with CF₃I. *J. phys. Chem. Ref. Data*, **29** (2000) 553-569
- 15) 渡辺行彦：破壊電圧分布からの MOS トランジスタゲート酸化膜寿命予想. *豊田中央研究所 R&D レビュー*, **34** [4] (1999) 19-24
- 16) 吉水 健剛, 池畑 隆, 岩本葉夏, 岡野一雄：AC イオナイザの周波数が除電能力に及ぼす影響. *静電気学会誌*, **36** [5] (2012) 297-302