

電子デバイス検査工程の除電装置の特性に及ぼす動作電圧の効果

Effect of Operating Voltage on Performance of Air Ionizer Used in Inspection Processes for Electronic Devices

三井 修, 鈴木 誠也, 岡野 誠

Shu Mitsui, Seiya Suzuki, Makoto Okano

Corona discharge air ionizers have been used to neutralize the static electricity charged on the electronic devices in inspection process. The neutralization characteristics, that is the neutralizing current density (J_w) and the electric field (E_w) at work area depend on the operation conditions. The emitter voltage is one of the most important operating conditions of the corona discharge air ionizer. The effect of emitter voltage on the neutralization characteristics were investigated in a mini-environment in which laminar air flow of 0.3 m/s exists. The air ionizer was operated by a square-wave alternating voltage ranging from 12 to 18 kV_{PP}. The neutralizing current density (J_w) increased with increasing the emitter voltage. However, the electric field (E_w) acting as a noise in inspection process also increased with increasing the emitter voltage. The ratio of neutralizing current to electric field (J_w / E_w) increased and showed saturation tendency with increasing the emitter voltage.

Keywords: Electronic devices, Inspection processes, Electrostatic hazards, Air ionizer, Operating voltage

1. はじめに

電子デバイスの製造工程でデバイスが帯電すると、静電気放電や静電吸引に基づく静電気障害が発生する^[1]。特に検査工程においてデバイスが帯電していると、この帯電に基づく電界がノイズ源として作用する。この電界によってデバイスに誤動作が発生すると、良品であるデバイスが不良品と判定され製品の製造歩留まりが低下する^{[4]、[5]}。このような問題はデバイスの微細化が進むに従って顕著になる^{[6]、[9]}。

この問題を解決するために、検査工程用環境内に除電設備として AC コロナ放電型イオナイザを設置して除電する方法が広く採用されている^{[10]–[20]}。しかし、これらのイオナイザは、エミッタと呼ばれる針状の放電電極に高電圧を印加してコロナ放電を発生しているため、イオナイザの動作条件が不適切な場合には副作用が顕著に現れる。例えば、イオナイザが発生する電界、および空間に分布するイオンからの電界が電界ノイズとして作用し、電子デバイスに誤動作を発生させることがある。

したがって、検査工程で使用するイオナイザには、除電速度が速いことだけでなく、電界ノイズが低いことも要求される。そこで本研究では、イオナイザの除電特性を、

- 1) 作業領域のイオン電流密度 J_w ,
- 2) 作業領域の電界ノイズ E_w ,

3) JE 比 J_w/E_w

と定義した。また、これらの除電特性の内、電流密度 J_w は、

- 1) エミッタ電圧 V_E : エミッタに印加する電圧,
- 2) 周波数 f : エミッタ電圧の周波数,
- 3) 風速 U_A : 検査工程の風速,

4) 除電距離 D_{EW} : エミッタから作業領域までの距離などの動作条件に大きく依存するため^{[21]–[24]}、これらの除電特性と動作条件との関係を明確にすることが重要となる。本研究では、これらの動作条件の内、イオン生成特性に最も大きな影響を及ぼすと考えられるエミッタ電圧 V_E を選び、この電圧 V_E が除電特性に及ぼす効果を実験的に明らかにすることとした。

2. 実験装置と実験方法

電子デバイスの検査工程の環境を模擬した除電システムを試作し、このシステムを使って、イオナイザの除電特性、すなわち除電速度と電界ノイズを測定した。

2.1 除電システムの設計製作

本研究における除電システムは、ミニエンバイロメント、コロナ放電型イオナイザ、および除電特性測定装置としてのチャージドプレートモニタ (CPM: Charged Plate Monitor) で構成されている。

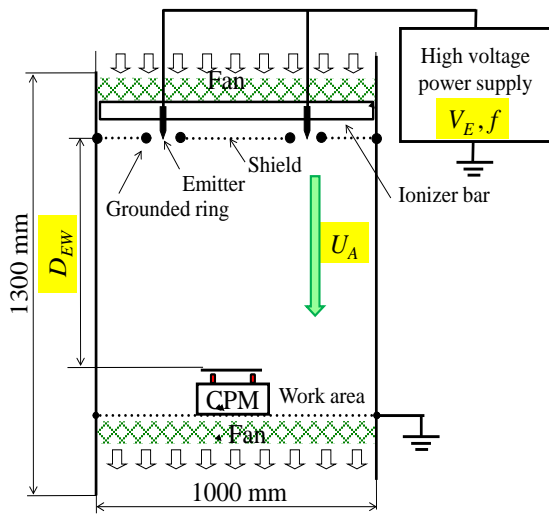


図1 除電システムの構成

2.1.1 ミニエンバイロメント

ミニエンバイロメントの寸法は、1000 mm×1000 mm×1300 mm であり、図1に示すように上部にイオナイザ、下部に作業領域を設けた。作業領域には、直径2.0 mm のステンレス棒を20 mm ピッチで配列した1000 mm×1000 mm の網状の作業台を設置した。ミニエンバイロメントの側壁には、アクリル板を使用した。ミニエンバイロメントの上部と下部には、送風用のファンを設け、風速はファンへの印加電圧を変化させることで制御できる構造になっている。また、上部ファンの下側と下部ファンの上側にフィルタを設けることで、ミニエンバイロメント内の風速の均一化を実現した。このミニエンバイロメント内の風速は風速計 (TSI 社 Model 8330) を用いて測定した。一般的に検査工程は風速0.3 m/s のクリーンルーム内に設置されているため、本研究ではミニエンバイロメント内の風速は0.3 m/s とした。

2.1.2 イオナイザ

コロナ放電型イオナイザは、エミッタ、イオナイザバー、グラウンドリング、および高電圧電源で構成されている。

本研究では、エミッタとして、先端の曲率半径が0.3 mm のシリコン製のエミッタを使用し、このエミッタをイオナイザバーに取り付けた。イオナイザがイオンを生成すると、エミッタ周辺のイオン濃度が高くなり、エミッタ先端部周辺の電位の絶対値が上昇するため、エミッタ先端の電界強度が低下する。この結果、イオナイザが生成するイオン量は著しく減少する。この問題を回避するために、エミッタ先端と同一平面上に、グラウンドリングを設けた。このグラウンドリングは、直径1.0 mm の銅線を半径10 mm のリング状に加工してある。

高電圧電源は、ファンクションジェネレータ (マイクロニクス株式会社 MH550)、高電圧増幅器 (トレック・ジャパン株式会社 MODEL 10/10B) で構成した。ファンクションジェネレータの出力電圧を高電圧増幅器に入力

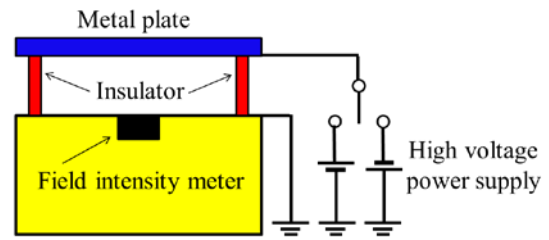


図2 チャージドプレートモニタの構造

し、1000 倍に増幅した電圧をエミッタに印加して AC コロナ放電型イオナイザを動作させた。なお、エミッタに印加した電圧はオシロスコープ (岩崎通信機株式会社 DS-8617) でモニタした。

2.1.3 チャージドプレートモニタ^[25]

除電特性の測定は CPM (トレック・ジャパン株式会社 Model 156) を用いて行った。CPM はイオナイザの除電速度を測定する装置であり、図2に示すように、金属プレート、電界センサ、および高電圧電源で構成されている。金属プレートの寸法は150 mm×150 mm、金属プレートの静電容量 C_P は20pF であり、高電圧電源から正または負の電荷を充電できる構造となっている。

CPM の金属プレートに電荷を充電すると、この電荷 Q_P が電界 E_P を発生する。この電界 E_P を電界センサが測定してプレートの電位 V_P に換算している。したがって、イオナイザが生成したイオンによって金属プレートの電荷 Q_P が除電されるとプレートの電位 V_P は低下する。この電位の時間的変化を測定することで、除電速度を測定する。

2.2 実験方法

イオナイザの除電特性の測定は、前述の除電システムを使用して行った。なお、イオナイザの動作条件は、一般的な検査工程での動作条件を参考にして^[26]、

- 1) エミッタ電圧 V_E : 12~18 kV_{PP} の方形波,
- 2) 周波数 f : 10 Hz,
- 3) 風速 U_A : 0.3 m/s,
- 4) 除電距離 D_{EW} : 0.5 m

とした。

2.2.1 イオン電流密度の測定

前述の除電速度は、作業領域のイオン電流密度 J_I で評価することができ、この測定は以下のような方法で行った。

CPM の金属プレートを +1100 V に充電し、イオナイザが発生した負イオンによってプレートが除電される際のプレート電位 V_P と時間との関係を測定した。図3に時間 t とプレート電位 V_P との関係の一例を示す。プレート電位 V_P は時間経過に伴って減衰している。この図において、プレート電位 V_P が低下し、+500 V になったときの傾き (dV_P/dt) を求めた^[27]。この傾き (dV_P/dt)

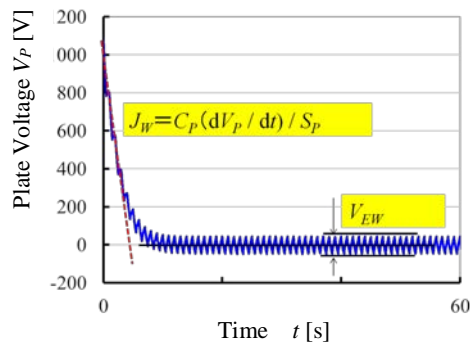


図3 チャージドプレートモニタのプレート電位の減衰特性

と CPM の金属プレートの静電容量 ($C_P = 20 \text{ pF}$) の関係から負イオンによるイオン電流 I_{WN} は,

$$I_{WN} = C_P \times \frac{dV_P}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

で算出した. 同様に, 金属プレートを -1100 V で充電し, プレート電位が -500 V のときの傾きから正イオンによる電流 I_{WP} を算出した. これらの電流 I_{WP} , I_{WN} と CPM の金属プレートの面積 S_P から電流密度 J_{WP} , J_{WN} を求めた. さらに J_{WP} と J_{WN} の絶対値の平均値から平均イオン電流密度 J_W を算出した.

2.2.2 電界ノイズの測定

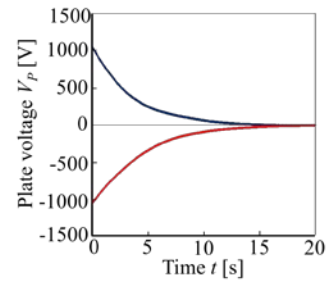
前述のように, CPM は電界センサで電界を測定してプレート電位 V_P に換算しているのので, エミッタからの電界 E_{WE} やイオンからの電界 E_{WI} も検出している. したがって, 図3に示す除電特性の測定結果において, プレート電位 V_P の測定結果には電界ノイズの影響が含まれていることになる. 測定中のプレート電位の振動は, この電界ノイズが原因であると考えられる. また, 除電が終了した時点でのプレート電位 V_P の振動は電界ノイズだけを測定していることになる. したがって, このときのプレート電位 V_{EW} の振動の大きさを測定し, 電界 E_W に変換することによって, 電界ノイズの測定が可能になる.

3. 測定結果

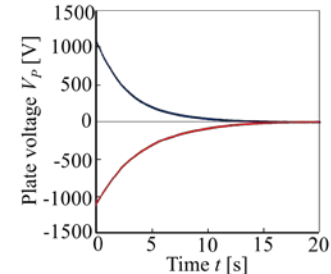
前章で述べた除電システム, 測定方法に従って, 作業領域のイオン電流密度 J_W , 電界ノイズ E_W を測定した.

3.1 イオン電流密度

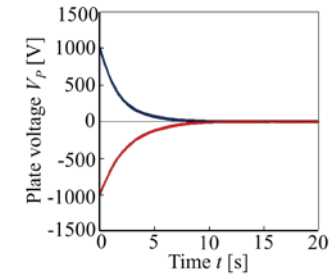
作業領域のイオン電流密度 J_W のエミッタ電圧依存性を測定するため, エミッタ電圧 V_E を 12 kV_{PP} , から 18 kV_{PP} の範囲で変化させてイオン電流密度を測定した. 図4はエミッタ電圧 V_E を 12 kV_{PP} , 15 kV_{PP} , 18 kV_{PP} の条件下でイオナイザを動作させた場合の CPM のプレート



(a) $V_E = 12 \text{ kV}_{PP}$



(b) $V_E = 15 \text{ kV}_{PP}$



(c) $V_E = 18 \text{ kV}_{PP}$

図4 エミッタ電圧を変化させた場合のプレート電位の減衰特性

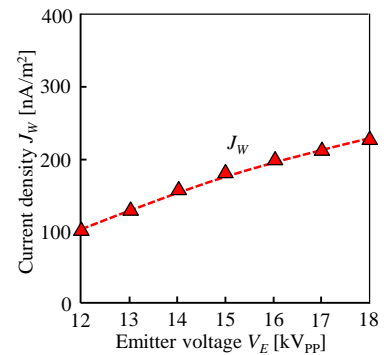


図5 作業領域のイオン電流密度のエミッタ電圧依存性

電位の減衰特性である. この図において, エミッタ電圧 V_E が高くなるに従って減衰が速くなっていることが分かる.

これらの減衰特性の測定結果から, イオン電流密度 J_W を算出し, そのエミッタ電圧依存性を求めた. この結果を図5に示す. この図において, エミッタ電圧 V_E が高くなるに従ってイオン電流密度 J_W は高くなっている

3.2 電界ノイズ

作業領域の電界ノイズ E_W のエミッタ電圧依存性を測定するため, エミッタ電圧 V_E を変化させて電界ノイズ

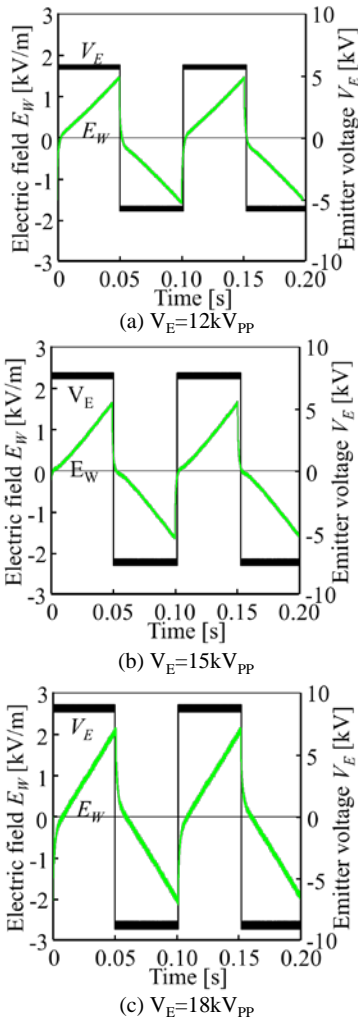


図6 エミッタ電圧を変化させた場合の作業領域の電界ノイズ波形

を観察した. 図6 はエミッタ電圧 V_E を 12 kV_{pp}, 15 kV_{pp}, 18 kV_{pp} でイオナイザを動作させ, 除電が終了した後の電界を CPM で観察した結果である. これらの図において, エミッタ電圧 V_E が高くなるに従って電界ノイズが大きくなっていることが分かる.

これらの電界波形のピークピーク値から作業領域の電界ノイズ E_w を求め, 電界ノイズ E_w のエミッタ電圧依存性を求めた. この結果を図7 に示す. この図において, エミッタ電圧 V_E が高くなるに従って電界ノイズ E_w は大きくなっている.

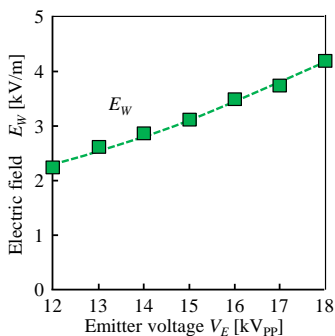


図7 作業領域の電界ノイズのエミッタ電圧依存性

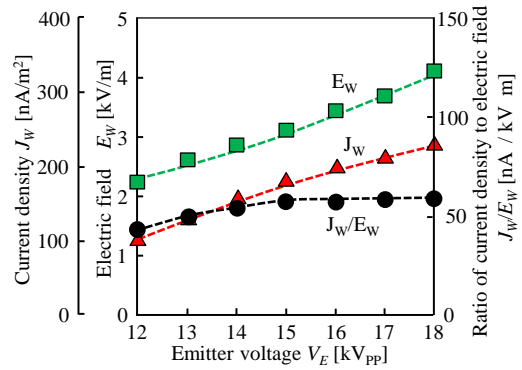


図8 作業領域のイオン電流密度, 電界ノイズ, JE比のエミッタ電圧依存性

3.3 JE比^{[28], [29]}

上述のようにして求めたイオン電流密度 J_w と電界ノイズ E_w から, JE比 J_w/E_w を算出した. この結果を図8 に示す. なお, この図にはイオン電流密度 J_w と電界ノイズ E_w を併記してある. この図において, エミッタ電圧 V_E を上昇させると JE比は若干上昇し, さらに電圧を上昇させると飽和する傾向を示している.

4. 考察

図8の実験結果に示したように, エミッタ電圧 V_E が高くなるに従って,

- 1) イオン電流密度 J_w は高くなり,
- 2) 電界ノイズ E_w は高くなり,
- 3) JE比は若干高くなり飽和する傾向を示した.

このような結果が得られた理由, および最適エミッタ電圧について考察を加える.

4.1 イオン電流密度

イオナイザが生成した正負のイオンは, ミニエンパイロメント内に注入され, 一部のイオンは輸送中に再結合によって消滅し, 残部が作業領域に到達する. このミニエンパイロメント内のイオン輸送速度は風速 U_A であり, 一定であるから, イオン電流 I_w は作業領域の正イオンと負イオンの濃度や分布状態だけに依存することになる. そこで, イオナイザが生成したイオンの輸送領域における濃度分布状態を考える.

図9 はイオナイザが生成したイオンの濃度の時間的, 空間的分布モデルである. この図には, 正イオンの濃度 ρ_p , 負イオンの濃度 ρ_n , エミッタからの距離 r , 時間 t の関係が示してある. エミッタ電流 I_E は方形波であるから, エミッタ近傍では, 正イオン濃度および負イオン濃度の空間的な分布は層状の方形波になっていると考えられる. しかし, イオンが輸送される際の飛行時間が経過するに従って, イオン間のクーロン力によって濃度分布は均一化するのので, 輸送の中間領域ではイオン分布はブロード化する. さらに, 作業領域近傍ではブロード化が進み, 正負イオンは準中性状態に近づき, 正負のイオン濃度も

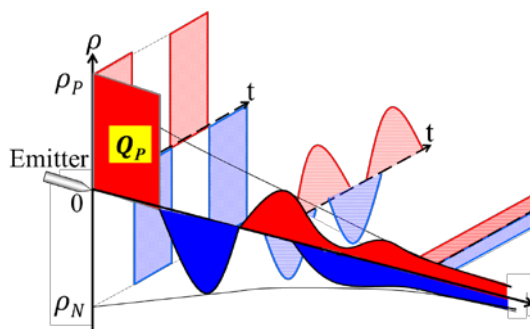


図9 イオナイザが生成したイオンの濃度の時間的,空間的分布モデル

同程度になると考えられる. このようにイオン濃度が分布している作業領域に被除電物が存在する場合, 被除電物は帯電電荷の極性と反対極性のイオンを選択的に吸引し, 除電が進むことになる.

イオナイザのエミッタ電圧 V_E を徐々に上昇させ, エミッタ電圧 V_E がコロナ開始電圧 V_{Cl} を超えるとイオン生成が始まり, さらにエミッタ電圧 V_E を上昇させると, 単位時間あたりに生成されるイオン量は急激に増加する^[30]. したがって, コロナ開始電圧 V_{Cl} を超えると輸送領域のイオン濃度は急激に高くなり, イオン電流 I_w も急激に増加することになる.

4.2 電界ノイズ

作業領域に発生する電界ノイズは,

- (1) E_{WE} : エミッタからの電界,
- (2) E_{WI} : 空間に存在するイオンからの電界に分類できる.

(1) エミッタからの電界

電界 E_{WE} は各イオナイザがもつ固有の特性であり, エミッタ電圧に比例する. したがって, 電界 E_{WE} の波形は, 方形波になると考えられる.

(2) 空間に存在するイオンからの電界

電界 E_{WI} はミニエンバイロメント内のイオンの総電気量 Q_0 に依存するので, イオナイザの動作条件に大きく依存する.

除電システムのミニエンバイロメント内を閉空間と考えると, この閉空間に流入, 流出する電流は,

- 1) イオナイザのエミッタがイオンを生成することに基づくエミッタ電流 I_E ,
- 2) 輸送過程で再結合によって消滅するイオンに基づく電流 I_R ,
- 3) 作業領域に到達し, 被除電物や作業台に吸収される作業領域の電流 I_w

に分類できる. これらのうち, エミッタ電流 I_E は閉空間に流入する電流であり, 再結合電流 I_R と作業領域の電流 I_w は流出する電流である.

この閉空間内のイオンの総電気量 Q_0 は電流 I_E, I_R, I_w によって決定され, 閉空間内の正イオンの総電気量を Q_P ,

負イオンの総電気量を Q_N をとすると,

$$Q_0 = Q_P + Q_N = \int (I_E + I_R + I_w) dt \dots\dots (2)$$

となる.

ここで, 再結合電流 I_R は正イオンと同数の負イオンの消滅によって生じる電流であるから, 0 A となる. したがって, 電流 I_R は閉空間中のイオンの総電気量 Q_0 には影響を及ぼさない. また, 作業領域では, 図9に示したように, 正負イオンは混合状態になっており, 濃度も同程度であるから準中性状態になっていると考えられる. したがって, 作業領域の電流 I_w が接地された作業台に吸収される際, 単位時間に吸収される正イオンと負イオンは同数となっていると考えられる. したがって, この電流 I_w も 0 A となり, 総電気量 Q_0 には影響を及ぼさないと考えられる.

上記の議論の結果, 閉空間内の総電気量 Q_0 は, エミッタ電流 I_E だけに依存することになり,

$$Q_0 = Q_P + Q_N = \int I_E dt \dots\dots (3)$$

となる. この Q_0 の最大値はエミッタ電流 I_E の半周期の積分値であり, エミッタに最も近いイオン層の電気量, すなわち図9に示した電気量 Q_P である. また, 閉空間内の総電気量 Q_0 の時間的変化が作業領域に発生する電界を決定することになる.

この総電気量 Q_0 が発生する電気力線 Φ は, 真空中の誘電率を ϵ_0 とすると,

$$\Phi = \frac{Q_0}{\epsilon_0} = \frac{\int I_E dt}{\epsilon_0} \dots\dots (4)$$

となる. この電気力線 Φ の一部はミニエンバイロメント内の下方の作業領域に向かい, 残部は上方のシールドに向かうが, 作業領域に発生する電界は総電気量 Q_0 に比例する. したがって, エミッタ電流 I_E が方形波の場合, 電気力線 Φ の波形は三角波となる.

以上のように, エミッタ電圧 V_E とエミッタ電流 I_E が方形波の場合, 電界 E_{WE} の波形は図10 (a) に示すように方形波になると考えられる. また, 電界 E_{WI} の波形は, 図10 (b) に示すように三角波になると考えられる. さらに, 作業領域に発生する電界 E_w は, エミッタが発生する電界 E_{WE} とイオンが発生する電界 E_{WI} の和であるから, 図10 (c) に示す波形になると考えられる.

作業領域の電界 E_w のエミッタ電圧依存性について考察する. 電界 E_{WE} はエミッタ電圧 V_E に比例する. 一方,

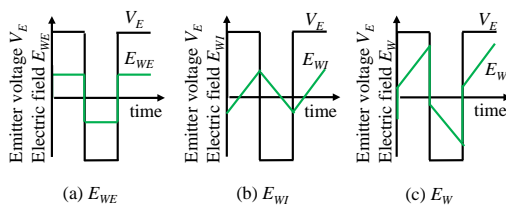


図10 電界ノイズの波形 (a) エミッタからの電界の波形 E_{WE} , (b) イオンからの電界の波形 E_{WI} , (c) 作業領域の電界の波形 E_W

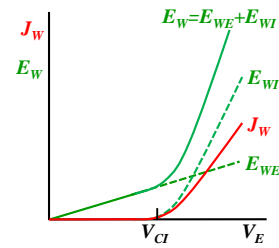


図11 イオン電流密度 J_W , エミッタからの電界 E_{WE} , イオンからの電界 E_{WI} のエミッタ電圧依存性

電界 E_{WI} はエミッタのイオン生成量に依存するので、コロナ開始電圧 V_{CI} を越えると急激に上昇する。したがって、エミッタ電圧 V_E がコロナ開始電圧 V_{CI} より十分低い領域では、電界 E_W はエミッタ電圧 V_E に比例して上昇する。一方、エミッタ電圧 V_E がコロナ開始電圧 V_{CI} より十分高い領域では、電界 E_W は急激に上昇する。

今回の実験において、図7に示した結果では、エミッタ電圧 V_E を増加させた場合、電界 E_W は一定の傾きで増加している。これは、エミッタ電圧 V_E の範囲が 12-18 kV_{PP} であり、すべて V_{CI} 以上の範囲に限定されているためであると考えられる。

4.3 JE比

電流密度 J_W と電界ノイズ E_W の比、すなわち JE 比は、

$$J_W/E_W = \frac{J_W}{E_{WE} + E_{WI}} \dots\dots (5)$$

で表される。電界 E_W は電界 E_{WE} と電界 E_{WI} の和であるから、図11に示すように、低電圧領域では電界 E_{WE} が支配的となり、高電圧領域では電界 E_{WI} が支配的になる。高電圧領域での電界 E_{WI} は電流密度 J_W に比例するため、電界 E_W もイオン電流密度 J_W に比例する。したがって、高電圧領域における JE 比は飽和する傾向を示したと考えられる。

以上の考察に基づいて最適エミッタ電圧を考える。エミッタ電圧 V_E を高くするに従って JE 比は高くなるので、電圧 V_E が高い領域でイオナイザを使用すればよいことになる。しかし、エミッタ電圧が高い状態でイオナイザを使用すると、イオナイザの耐久性が低下すること、エミッタからの発塵量が増加すること等の問題が発生する[31]。したがって、 JE 比が飽和する領域内の最低電圧で使用することが最適条件になると考えられる。

5. まとめ

電子デバイスの検査工程における除電装置としてのACコロナ放電型イオナイザの除電特性のエミッタ電圧依存性を実験的に検討した。この結果は以下のようにまとめられる。

- 1) イオナイザのエミッタ電圧 V_E を高くするに従って、電流密度 J_W は高くなる。これは、エミッタ電圧 V_E を高くしたことによってイオナイザが単位時間に生成するイオン量が増加したためと考えられる。
- 2) イオナイザのエミッタ電圧 V_E を高くするに従って、電界ノイズ E_W は大きくなる。これは、エミッタ電圧 V_E を高くしたことによって、エミッタからの電界 E_{WE} とイオンが発生する電界 E_{WI} の両者が増加したためと考えられる。
- 3) イオナイザのエミッタ電圧 V_E を高くするに従って、 JE 比は若干高くなり、さらに電圧を高くすると JE 比は飽和する傾向を示す。これは、高電圧領域において、電界 E_{WI} が支配的になったためと考えられる。
- 4) エミッタ電圧の最適値は、 JE 比が飽和した領域での最低電圧である。

参考文献

- [1] O. J. McAteer, "Electrostatic discharge control", McGraw-Hill., U.S.A., pp. 203-255 (1990).
- [2] D. Krakauer, "ESD protection in a 3.3 V sub-micron silicided CMOS technology," Journal of Electrostatics, Vol. 31, pp. 111-129 (1993).
- [3] S. U. Kim, "ESD induced gate oxide damage during wafer fabrication process," Journal of Electrostatics, Vol. 31, pp. 323-337 (1993).
- [4] T. Terashige, D. Ohashi and K. Okano, "Noise reduction of corona discharge air ionizer," EOS/ESD Symposium, Charlotte, NC, U.S.A., pp. 243-247 (2002).
- [5] S. Nagao, T. Terashige and K. Okano, "Effect of space charge generated by air ionizer on noise in electric devices and/or electric circuit," ECS Int'l Semiconductor Technology Conference, Shanghai, China, pp. 57-63 (2004).
- [6] R. H. Dennard, F. H. Haensslen, H. N. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous, and A. R. LeBlanc, "Design of ion-implanted MOS-FETs with very small physical dimensions," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. SC-9, No.10, pp.256-268 (1974).
- [7] H. Maejima, M. Kainaga, and Kuchiyama, "Design and architecture low-power/high-speed RISC microprocessor: SuperH," ICICE Trans. Electron., No. 12, Vol. E80-C, pp.1539-1545 (1997).
- [8] M. Matsuo "Silicon Interposer Technology for High-density

- Package,” Proc. 50th Electronic Components & Technology Conference, pp. 1456–1459 (2000).
- [9] W. H. Lee, “MOS device structure development for ULSI: Low power/high speed operation,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 37, No.9, pp. 1309–1314 (1997).
- [10] A. Steinman, “Static Control Issues for Disk Drive Production Using MR Heads,” *Proceedings of 18 EOS/ESD Association Symposium*, pp. 22–27 (1996).
- [11] K. Asano, Y. Fukada, and T. Yasukawa, “Measurement of AC Ion current from a corona ionizer using a Faraday cage,” *J. Electrostat.*, Vol. 66, pp. 275–282 (2008).
- [12] T. Sugimoto, S. Kato, K. Furutachi, and Y. Higashiyama, “DC Ionizer with opposed ϕ -type corona electrodes for high-speed charge elimination,” *IEEE trans. on Ind. App.*, Vol. 50, No. 3, pp. 2207–2212 (2014).
- [13] S. Sato, T. Ikehata, T. Terashige and K. Okano, “Basic Characteristics of Self-control Discharge Air Ionizer,” *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 11, No. S1 pp. S19–S23 (2016).
- [14] H. Imazono, T. Terashige and K. Okano, “The Double Jet Ionizer for ULSI Manufacturing Process,” *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, Vol. 15, No. 2, pp. 189–193 (2002).
- [15] H. Inaba, S. Sakata, T. Yoshida, and T. Okada, T. Ohmi, “Neutralization of wafer charging in nitrogen gas,” *IEEE Trans Semicond Manuf*, Vol. 5, No. 4, pp. 359–367 (1992).
- [16] S. Mukaigawa, T. Ohkubo, M. Ohtani, K. Takaki, T. Fujiwara, and T. Ito, “Electrification and neutralization of wafers in nitrogen ambient using corona discharge ionizer,” *J Inst Electrostat Jpn*, Vol. 32, No. 2, pp. 84–89 (2008).
- [17] D. Kim, “Characteristics of VUV ionizer in a vacuum chamber of flat panel displays,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 90, pp. 54–60 (2017).
- [18] B. Pushpawela, “Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 90, pp. 79–84 (2017).
- [19] S.Cooray, T.Sato, and K.Okano, “Basic Characteristics of the Field Assisted Air Ionizer,” *EOS/ESD Symposium*, 1B.2 (2013).
- [20] H.Inaba, T.Ohmi, T.Yoshida, and T.Okada, “Neutralization of Static Electricity by Soft X-Ray and Vacuum Ultraviolet-Ray Irradiation,” *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E79-C, No. 3, pp.328–335 (1996).
- [21] H. Snyder, and A. Wallash, “Effects of Unbalanced Ionizers on Magnetoresistive Recording Heads,” *Proceedings of 19 EOS/ESD Association Symposium*, pp. 412–415 (1997).
- [22] T. Mogami, T. Suzuki, K. S. Choi, and M. Yamaguma, “Influence of Frequency of AC voltage Applied to Flange-type Electrostatic Eliminator on Its Elimination Performance,” *J. Institute of Electrostatics Japan*, Vol. 37, No. 5, pp. 221–226 (2013).
- [23] M. Sakuyama, M. Takeuchi, T. Terashige, S. Yoshioka and K. Okano, “Basic Characteristics of a Space Charge Balance Sensor using a MOSFET,” *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, No.3, pp. 278–283 (2007).
- [24] S. Yoshioka, T. Ikehata, T. Terashige and K. Okano, “Comparison of Ion Balance Sensors for Static Control Systems of Air Ionizer,” *IEEJ Trans. Sensors and Micromachines*, Vol. 135, No. 3, pp. 108–111 (2015).
- [25] L. Levit, W. Vosteen, G. Weil, “Analysis of Pulsed DC Ionizer Measurement Procedures with a CPM Using ESDA RP 3.11-2006,” *2015 37th EOS/ESD Symposium Proceedings*, 27 Sept.-2 Oct. (2015).
- [26] M. Okano, T. Ikehata, T. Terashige, “Effects of Operating Frequency on Electric Field and Neutralizing Current Density of a Corona Discharge Air Ionizer,” *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, Vol. 12, No. 2, pp.120-124, (2019).
- [27] R. W. Welker, R. Nagarajan, C. E. Newberg, “Contamination and ESD Control in High-Technology Manufacturing,” *John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.*, pp. 87–88 (2005).
- [28] M. Okano, “Effects of an electric field shield on the neutralizing characteristics of a corona discharge air ionizer,” *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 147–148 (2017).
- [29] M. Okano, T. Ikehata, S. Suzuki, T. Terashige “An Equivalent Circuit Simulation on Neutralization Performance of a Corona Discharge Air Ionizer.” *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp1732-1738 (2019).
- [30] チャングジェンシー “大気圧プラズマの物理と化学” *J. Plasma Fusion Res.* Vol. 82, No. 10, pp. 682–692 (2006).
- [31] 今園浩之, 竹内学, 岡野一雄 “コロナ放電式イオナイザの低コンタミネーション化” *静電気学会誌*, Vol. 31, No. 3, pp. 125-130 (2007).

(原稿受付 2020/03/25, 受理 2020/06/02)

*三井 修,
静岡県立清水技術専門学校, 〒424-0881 静岡県静岡市清水区楠
160
Shu Mitsui, Shizuoka Prefectural Shimizu Vocational Training
School, 160 Kusunoki Shimizu-ku Shizuoka-shi Shizuoka 424-0881
Email:shu1_mitsui@pref.shizuoka.lg.jp

*鈴木 誠也,
株式会社ヒップ, 〒220-0003 神奈川県横浜市西区楠町 8-8
Seiya Suzuki, A corporation Hip, 8-8Kusunoki-machi, Nishi-ku,
Yokohama-shi, Kanagawa
Email: 1993windfish@gmail.com

*岡野 誠, 博士 (工学)
応用電機株式会社 開発グループ, 〒861-1201 熊本県菊池市泗
水町吉富 100-29
Makoto Okano, Department of development, OYO ELECTRIC CO.,
LTD., 100-29 Yoshitomi, Shisui-machi, Kikuchi, Kumamoto,
861-1201, Japan
Email: mokano@oyoe.jp

