

誘導帯電による純水スプレー時に発生する液滴中の帯電量制御

鈴木 洋陽*, 森 竜雄*, 一野 祐亮*, 清家 善之*, **, 1

(2022年9月15日受付; 2023年2月28日受理)

Control of the Amount of Charge in Droplets Generated during Deionized Water Spraying by Induction Charging

Hiroharu SUZUKI*, Tatsuo MORI*, Yusuke ICHINO* and Yoshiyuki SEIKE*, **, 1

(Received September 15, 2022; Accepted February 28, 2023)

A two-fluid deionized spray is used to resist stripping and particle removal. Two-fluid spraying of deionized water can cause electrostatic discharge (ESD). A method of induction charging in the continuous flow area of the two-fluid spray has been devised to prevent ESD. The induction charging element was designed by considering the continuous flow area of the deionized water sprayed and the concentric cylindrical capacitors of the induction charging element. Finding the applied electric field to the continuous flow area of the spray using electric field simulation enables calculating the slope of the applied voltage characteristic of the current, which is generated by the inductive charging. The prototype induction charging element was then used to measure the current produced by the two-fluid spray. The results showed that the generated current decreased between -11.7 and -14.5 nA/kV when a positive voltage in the order of kV was applied to the induction charging element. Comparing the calculated and experimental slope of the applied voltage characteristic of the generated current, the experimental value was approximately twice the calculated value. It was found that the induction charging element can be used to control the amount of charge on the droplets during two-fluid spraying of deionized water.

1. はじめに

近年、半導体デバイスの微細化が進み、台湾 TSMC 社はゲート長 3 nm の FinFET 構造の半導体デバイスの量産を実現した¹⁾。このような半導体デバイスの製造において、洗浄工程は製品の歩留まりを決定する重要なプロセスである²⁻⁴⁾。半導体洗浄には、25枚単位のウェハをフループにセットし、薬液に浸漬させて洗浄するバッチ洗浄^{5,6)}や、レジスト剥離やパーティクル除去にウェハを一枚ずつ処理する枚葉式洗浄が使われている^{7,8)}。枚葉式洗浄に使われるスプレーツールの一つとして、窒素ガス等の圧縮ガスの流れで純水をミスト化し、液滴をウェハ上に噴射させる二流体スプレーが広く使われている^{9,10)}。薬液ではなく純水を用いることで環境負荷を低減させることができる。しか

し、二流体スプレーでの洗浄は、純水を噴射すると、噴射された純水が帯電し、帯電した液滴がウェハ表面に着弾するために、ウェハ上の素子を電氣的に破損してしまう静電気障害 (ESD: Electrostatic Discharge) が生じるという問題がある¹¹⁻¹⁴⁾。我々のグループでは、純水の二流体スプレー時に発生する電流を、試作したファラデーケージを用いて測定し、さらに SDPA (Shadow Doppler Particle Analyzer) を用いて飛行液滴の速度とサイズを測定し、発生電流と飛行液滴特性の関係を明確にした¹⁵⁾。その結果、二流体スプレー時に発生する電流は正極性を示し、飛行液滴の速度が速いほど、液滴の帯電量が増加することを確認している。また、飛行液滴の速度が速ければ、洗浄力が高いことはすでに報告されている^{10,16,17)}。つまり、液滴の速度が速くなり、洗浄力が高くなれば、ESD も生じやすくなる。従来、二流体スプレー洗浄時の ESD を防止するために、純水に炭酸ガスを注入して純水の比抵抗を下げる方法や、純水に微量のアンモニアを溶解させた後、それに水素を溶解させたアンモニア水素水をスプレーするという手法が使われてきた^{10,16)}。しかし、純水に炭酸ガスを溶解させた場合、純水は酸性となり、純水にアンモニアを溶解させたアンモニア水素水はアルカリ性となる。このように、純水に炭酸ガスやアンモニアを溶解させて pH を変化させた場合、半導体デバイス上の膜種によっては、使用できないプロセスもある。また、炭酸ガスやアンモニアを純水に溶解させるために、多額のランニングコストが生じてしまう課題がある。

キーワード：静電気障害、二流体スプレー洗浄、純水、半導体、誘導帯電

* 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

Electrical and Electronics Engineering Course, Graduate School of Engineering, Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, Aichi, 470-0392, Japan

** la quaLab 合同会社

(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

la quaLab LLC., 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, Aichi, 470-0392, Japan

¹ y_seike@aitech.ac.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2023.47.3.108>

本報告では、炭酸ガスの溶解水やアンモニア水素水などのように純水を改質することなく、かつ低価格で、二流体スプレー洗浄時に発生するESDを減らすために、純水の噴射直後に誘導帯電素子¹⁸⁾を設置し、強電界中にスプレーすることによって、純水液滴の帯電量を制御できることを確認したので報告する。

2. 誘導帯電による液滴中の帯電量制御理論

2.1 二流体スプレーノズルの構造

試作した二流体スプレーノズルの構造を図1に示す。この二流体スプレーノズルはノズルの内部で気液混合する内部混合型で、吐出口の内径は3 mmである。純水(DIW: deionized water)と圧縮空気は異なる流路でノズル中央部の気液混合部まで搬送される。この気液混合部の内部では、圧縮空気は気液混合部の中心部を流れ、その周りから純水が流れて、純水と圧縮空気が混合し、ノズル先端よりスプレーされる。また、この二流体スプレーノズルは半導体デバイスの製造工程で用いることを目的としており、純水に含まれる金属イオンを抑えるために、気液混合部の材質は石英で製作し、それ以外の純水経路の接液部の材質はフッ素樹脂とした。また、スプレーされた純水液滴の帯電量を制御するために、気液混合部から下の範囲で位置が調節できるように誘導帯電素子を設置した。図2に空気流量80 NL/min、純水流量100 mL/min時の二流体スプレーの様子を示す。(a)はスプレーされた純水の散乱光を撮影した画像で、(b)は高速度ビデオカメラ(Photron製FASTCAM Mini)を用いて、吐出口付近のスプレーされた純水の影を撮影した画像で、フレームレートは20,000 fpsである。二流体スプレーノズルからスプレーされた純水は、水噴流が連続的に存在する連続流領域、液滴が生成される液滴流領域、それが拡散されて独立した液滴に生成される拡散流領域に分けられる。純水の抵抗値は大気の抵抗値と比べ極めて小さく、純水の電荷緩和時間を求めると 1.2×10^{-4} sであるため、本論においては連続流領域では電荷の移動があるものと考えた。図2(b)の画像より、連続流領域をノズル噴射孔から7 mmで、流速の速い半径1.5 mmの領域とした。誘導帯電素子で生成された強電界による誘導帯電は連続流領域で起こり、独立した液滴が強電界中を通過しても、液滴内では静電誘導が生じるのみで、液滴内の電荷は保存される。

2.2 静電気の測定システム

二流体スプレー時に発生する電流を測定するためのシステムを図3に示す。電流測定に用いたファラデーケージの内容器の直径は300 mm、高さは300 mm、外容器の直径は360 mm、高さは360 mmで、ともにステンレス製である。

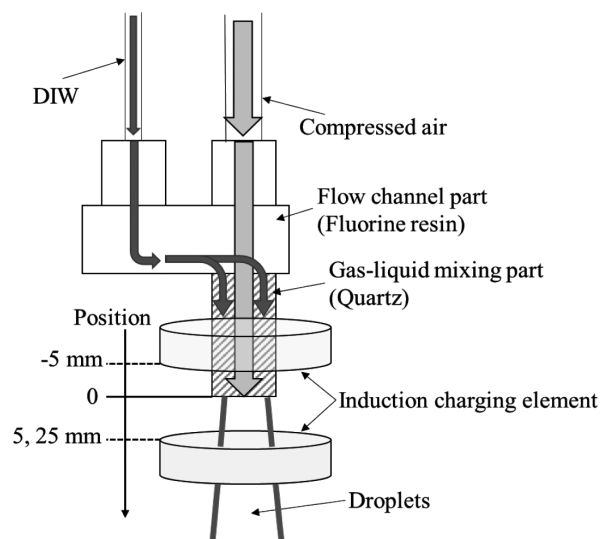


図1 誘導帯電素子を設置した二流体スプレーノズルの構造
Fig.1 Structure of two-fluid spray nozzle with induction charging elements.

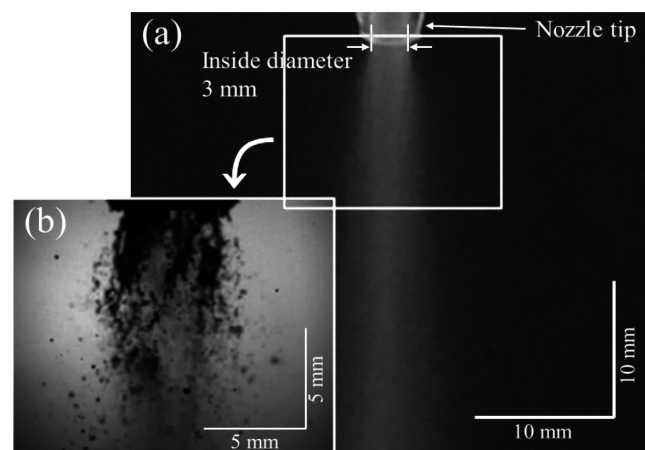


図2 二流体スプレーの様子
Fig.2 Appearance of two-fluid spraying.

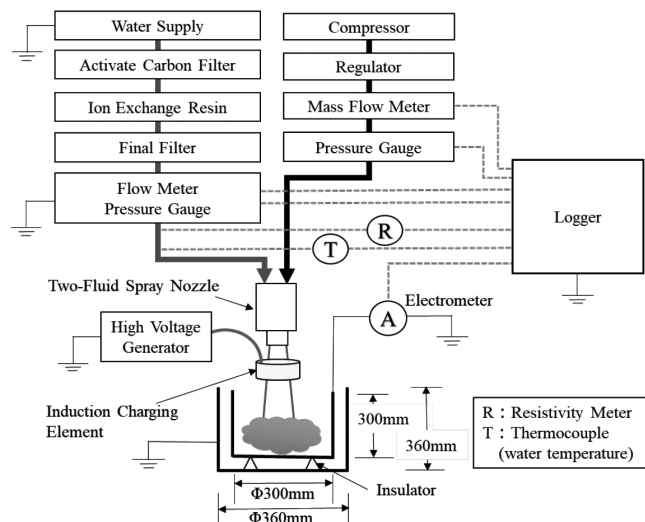


図3 測定システム
Fig.3 Measurement system.

ファラデーケージの内容器と外容器は、高密度ポリエチレンで絶縁されている。外容器は外部からのノイズを妨げる目的で設置されている。ファラデーケージの内容器の中には水撥ねを防止するためスチールウールを入れた。純水は水道水を活性炭フィルタ、イオン交換樹脂、ファイナルフィルタに通して生成している。この純水の比抵抗は比抵抗計（堀場製作所製 HE-480R）を用いて管理し、 $175 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ 以上に保っている。このとき、水道水は蛇口、純水は比抵抗計を通して接地されている。実験室内の温度や湿度は特に制御せず、温度は 20°C 、湿度は 35% 程度であった。二流体スプレーノズルからファラデーケージの内容器に向けて噴霧し、発生する電流をエレクトロメータ（ADCMT 製 8252）で測定する。このエレクトロメータは微小電流を積分方式で計測している。また、発生電流の測定と同時に純水流量をクランプ式流量計（キーエンス製 FD-XA1）、純水圧力を圧力計（ifm efector 製 PN2094）、純水の比抵抗を比抵抗計、水温を熱電対（K タイプ）、空気流量を流量計（コフロック製 8550MC-0-2-2）、空気圧力を圧力計（SMC 製 ISE30A-01-D-M）で測定した。また、それぞれの測定器の出力をロガー（NI 製 cDAQ-9208, 9210）で収集した。サンプリング時間は 0.5 秒とした。なお、二流体スプレーは液滴とエアの気液混合流としてスプレーしているため、全ての液滴をファラデーケージで捕集できていない。ファラデーケージでの液滴捕集率は 80% 程度であり、それ以外の液滴は空中に浮遊していると考えている。

2.3 誘導帯電素子の設計

我々は二流体スプレー時の純水液滴の帯電量を制御するために、誘導帯電素子でノズル近傍に強電界を作り出し、その強電界中に純水をスプレーすることによって液滴の帯電量を制御できると考え、誘導帯電素子の設計を行った。この設計は、二流体スプレー時の液滴の帯電を考慮せず、スプレーされた純水は接地状態とみなし、連続流領域での誘導帯電による電荷の移動のみを考慮して解析した。誘導帯電による液滴の帯電に関する研究は、農作物に対する静電農薬散布の分野などで研究されている^{19,21)}。我々は図4に示すように、外側に高電圧を印加する電極と内側にスプレーされた純水の連続流領域を円筒形の導電性液体とみなし、これらの電極間に内カバーとなる樹脂と空気の2種の誘電体とした同心円筒のキャパシタと見立て、連続流と空気の界面直近の電界の大きさを算出した¹⁹⁾。ただし、この計算では円筒中心の純水は、スプレーされ空気と触れることによって、比抵抗が小さくなり、導体となったとみなしている。実際にスプレーされた純水をビーカーに溜め、比抵抗を測定したところ、二流体スプレーノズル前の比抵抗値は $175 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ 以上あったが、純水をスプレーすること

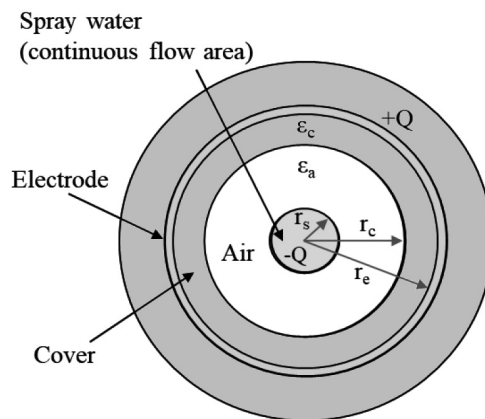


図4 スプレーされた純水の連続流領域と誘導帯電素子の概略図
Fig.4 Schematic of spray water and induction charging element.

によって、それは $3.2 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ まで低下したことを確認している。

次に、連続流と空気の界面直近の電界の大きさを算出する。連続流と空気の界面から誘導帯電素子のカバー表面までの電界の大きさを E とすると、 E は式1で与えられる¹⁹⁾。

$$E = \frac{V}{\epsilon_a r \left(\frac{1}{\epsilon_a} \ln \frac{r_c}{r_s} + \frac{1}{\epsilon_c} \ln \frac{r_e}{r_c} \right)} \quad (1)$$

ここで、 r は円筒形とみなしたスプレーされた純水の連続流の中心からの距離、 V は誘導帯電素子の電極に印加する電圧、 ϵ_a は空気の誘電率、 ϵ_c は電極内カバーの誘電率である。式1から連続流と空気の界面直近の電界の大きさ E_s は式2となる。

$$E_s = \frac{V}{\epsilon_a r_s \left(\frac{1}{\epsilon_a} \ln \frac{r_c}{r_s} + \frac{1}{\epsilon_c} \ln \frac{r_e}{r_c} \right)} \quad (2)$$

ガウスの法則より、スプレーされた純水の連続流領域での誘導表面電荷密度 ρ_s は式3で表すことができる。

$$\rho_s = \epsilon_a E_s \quad (3)$$

次に、発生電流 I は純水の流量 Q を用いて式4で表すことができる。

$$I_c = -2 \frac{Q}{r_s} \epsilon_a E_s = - \frac{2VQ}{r_s^2 \left(\frac{1}{\epsilon_a} \ln \frac{r_c}{r_s} + \frac{1}{\epsilon_c} \ln \frac{r_e}{r_c} \right)} \quad (4)$$

ここで、発生電流 I は、印加電圧 V に対して逆の極性の電荷が誘導されるためマイナスとした。式4より誘導帯電により発生する電流は、スプレーされた純水の連続流と空気の界面直近の電界の大きさに比例することが分かる。

次に、試作する誘導帯電素子のサイズを意識して、円筒と見た連続流の半径 r_s を 1.5 mm 、誘導帯電素子のカバーの内径 r_e を 19 mm 、円筒電極の外径 r_c を 24 mm 、印

加電圧を 10 kV, カバーの比誘電率 ϵ_c を 3.7, 空気の比誘電率 ϵ_a を 1.0 と仮定して, 式 1 を用いて計算した. 図 5 はその計算結果であり, 内カバー内部の電界の大きさは 46.2 kV/m であるが, 空気中では電界の大きさは大きくなり, 連続流と空気との界面直近の電界の大きさは 2.56 MV/m となる. また, 式 4 より, 誘導帯電素子に 10 kV 印加した際に, スプレーされた純水に誘導され生じる電流 I_c は -50.4 nA と算出できる. 我々が以前報告した純水を二流体スプレーした際に発生する電流は数十 nA 程度であるので¹⁵⁾, 誘導帯電素子の大きさや印加電圧はこの程度で大丈夫であると考え, 図 6 に示す誘導帯電素子を試作した. 試作した誘導帯電素子は外径 62 mm, 内径 48.5 mm, 外径 48 mm, 内径 38 mm のポリアセタール製の円筒を組み合わせ, その間に金属電極としてアルミテープをはさみ込んだ. 今回

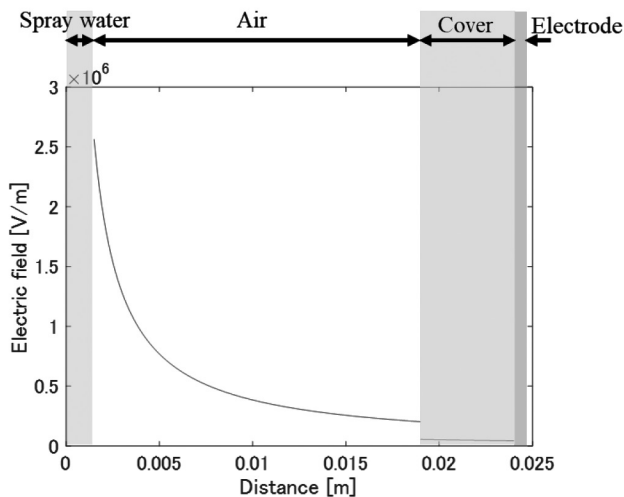


図 5 スプレーされた純水の連続流領域と電極との間の電界の大きさ

Fig.5 Electric field strength between the spray water and the electrode.

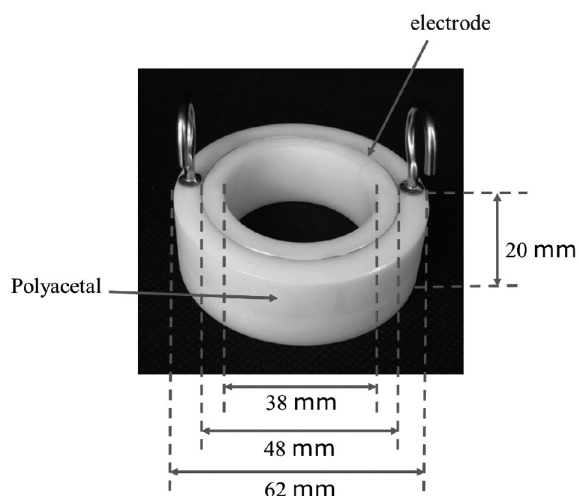


図 6 試作した誘導帯電素子

Fig.6 Prototype induction charging element.

用いた二流体スプレーノズルはスプレーの噴射形態が円筒形であるため, それに合わせて電極を円筒とした. この誘導帯電素子を吐出口近傍に取り付け, スプレーされた純水の連続流領域で誘導帯電させる. このシステムは半導体製造の洗浄プロセスでの使用することを目的としているため, 誘導帯電素子の内側のカバーの役割は, 一度電極に付着した液滴が半導体デバイスに落下し, 半導体への金属コンタミネーションを防ぐことである.

2.4 電界シミュレーションによる解析

スプレーされた純水の連続流に掛かる電界がわかれば, 誘導帯電により発生する電流は式 4 で求めることができる. そこで, 連続流に掛かる電界をより詳細に解析するために, 電界シミュレーションを行い, その結果の一例を図 7 に示す. この電界シミュレーションには二次元有限要素法静電場解析ソフト EStat (アドバンスト・サイエンス・ラボラトリー) を使用した. シミュレーションは連続流領域を半径 r_s が 1.5 mm, 長さがノズル先端から 7 mm の円筒形で, 先端が半球状とみなし, 連続流は接地状態として行った. 誘導帯電素子を二流体スプレーノズルの下 5 mm の位置に設置し, 10 kV の電圧を印加させる条件でシミュレーションすると, 円筒形とした連続流領域の側面に掛かる水平方向 (連続流領域の側面に垂直な方向) の電界の大きさを調べると, 3.42 MV/m となる. この電界の大きさは印加電圧 1 kV 当たり 0.342 MV/m 変化する. この解析ソフトでは, 連続流を一定の形状とみなし, 空気中の絶縁破壊電圧を考慮できない. また, 図 5 において, 誘導帯電素子に 10 kV を印加した場合, 連続流領域と空気の界面直近の電界の値は 2.56 MV/m であり, 電界シミュレーションによる結果の方が 1.3 倍大きい. これは, 図 5 では誘導帯電素子

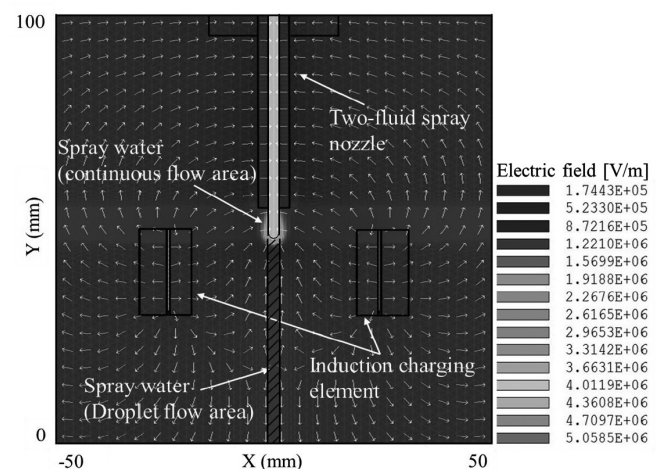


図 7 電界シミュレーション (印加電圧: +10 kV, 誘導帯電素子の位置: ノズル直下 5mm)

Fig.7 Electric field simulation (Applied voltage: +10 kV, position of the induction charging element: 5 mm below the nozzle).

と連続流領域が同心円筒となっている部分のみを考慮した計算であるのに対し、電界シミュレーションでは誘導帯電素子の長さ全体を考慮した計算であるため差が生じた。

連続流領域に掛かる電界を用いて、式4で電流 I_c の傾きを計算する。この時の純水の流量 Q は実測値で 100 mL/min とする。ノズル先端より 5 mm 上に設置した場合の傾きは、 -6.73 nA/kV、5 mm 下に設置の場合の傾きは -6.98 nA/kV、25 mm 下に設置した場合の傾きは -5.63 nA/kV となる。

3. 誘導帯電による液滴の帯電制御の検証実験

3.1 二流体スプレー時に発生する電流測定

二流体スプレー時の純水流量と空気流量に対する発生電流の関係を図8に示す。この図は純水流量、純水の圧力、比抵抗、水温、空気流量、空気の圧力、発生電流の7因子を測定したうち、純水流量、空気流量に対する発生電流を示している。図中の黒点は0.5秒ごとの測定点を示し、近似面は測定値から局所回帰平滑化したものを示している。ファラデーケージからアースに流れる電流を測定すると、極性は正極性で、空気流量が増加すると発生する電流は大きくなる傾向がある。空気流量が100 NL/min以上では純水流量が増えると、発生電流は大きくなり、ばらつきも大きくなる傾向であった。

3.2 誘導帯電素子による純水液滴の帯電制御効果

図1のように誘導帯電素子を二流体スプレーノズルの先端から下へ5 mm、25 mm および先端より上部へ5 mm の位置に取り付け、印加電圧と発生電流の関係を調査した。二流体スプレーの条件は、純水流量 100 mL/min、空気流量 80 NL/min であり、この時の平均飛行液滴速度は 87.8 m/s である。得られた結果を図9に示す。エラーバーは0.5秒間隔で測定した120点分のデータの標準偏差を示す。いずれの場合も印加電圧が -8 kV以下では発生電流のばらつきが大きかったが、発生電流は印加電圧に対して負の傾きで比例した。各取り付け位置における発生電流の印加電圧特性の近似直線の傾きに注目すると、ノズル先端より5 mm 上に設置したときの傾きは -11.7 nA/kV、5 mm 下に設置したときの傾きは -12.6 nA/kV、25 mm 下に設置したときの傾きは -14.5 nA/kV であり、いずれの条件でもマイナス十数 nA/kV の傾きで比例する。この発生電流の印加電圧特性の傾きについて、2.4節での電界シミュレーションで計算した結果と実験値を表1で比較すると、実験値は計算値の1.74倍から2.58倍となった。ここで差異が生じた原因は、この電界解析ソフトは、連続流領域が流体であることを加味していないためだと考える。

誘導帯電素子に電圧を印加するとその周囲に電界が発生する。正の電圧を印加するとその電界により、スプレーさ

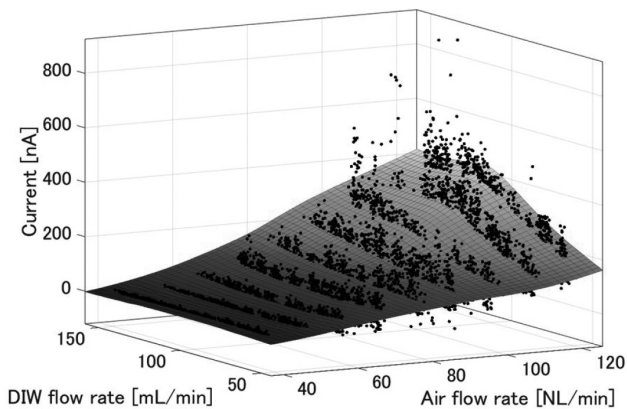


図8 純水流量と空気流量に対する発生電流の関係
Fig.8 Correlation of generated current to deionized water flow rate and airflow rate.

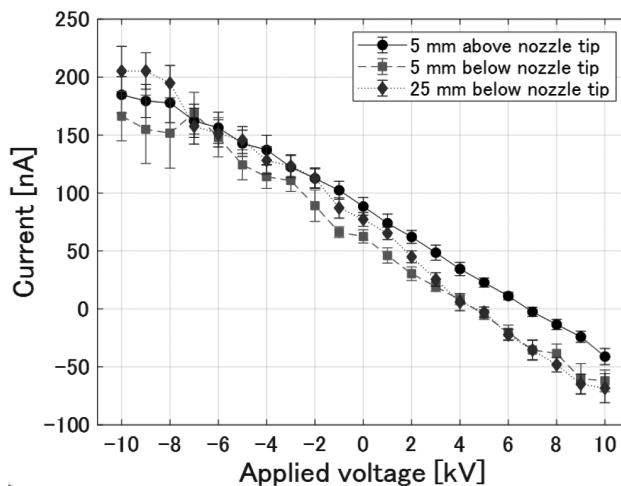


図9 誘導帯電素子への印加電圧と発生電流の関係
Fig.9 Correlation between the voltage applied to the induction charging element and the current generated.

表1 発生電流の印加電圧特性の傾きの計算値と実験値
Table 1 Calculated and experimental slope of the applied voltage characteristic of the generated current

Position	Calculated value [nA/kV]	Expenmental value [nA/kV]
5 mm above nozzle tip	-6.73	-11.7
5 mm below nozzle tip	-6.98	-12.6
25 mm below nozzle tip	-5.63	-14.5

れた純水の連続流領域には負の電荷が誘導される。逆に負の電圧を印加するとその電界により、スプレーされた純水の連続流領域には正の電荷が誘導される。液滴流領域に達すると、分裂が起こり、誘導電荷が切り離され、液滴はそれぞれの極性に帯電する。

誘導帯電素子に電圧を印加していない時には、数十 nA の電流が発生し、これが半導体素子上で起こる ESD の原因となる可能性がある。誘導帯電素子を二流体スプレーノズルの先端から下へ 5 mm の位置に設置し、4.7 kV 印加す

ると発生電流が零となった。この結果から、誘導帯電素子を用いることで、純水の二流体スプレー時の液滴の帯電量を制御することができ、ESDの抑制に誘導帯電素子は有効であることがわかる。

4. まとめ

本報告では、二流体スプレー洗浄時に発生するESDを防止するために誘導帯電素子を試作し、飛行液滴の帯電量を誘導帯電により制御できることを確認し、以下の結果が得られた。

- (1) スプレーされた純水の連続流領域と誘導帯電素子の同心円筒形のキャパシタとみなし、誘導帯電素子を設計した。
- (2) 電界シミュレーションを用いてスプレーされた純水の連続流に掛かる電界を確認し、誘導帯電により発生する電流を計算した。
- (3) 二流体スプレー時に発生する電流は正極性を示し、空気流量および純水の流量が増加すると発生する電流は大きくなることを確認した。
- (4) 試作した誘導帯電素子で作り出した強電界中に純水を二流体スプレーすると、発生電流は印加電圧に対して負の傾きで比例して減少した。
- (5) 発生電流の印加電圧特性の傾きは、連続流に掛かる電界を用いて計算した傾きの1.74倍から2.58倍となった。
- (6) 誘導帯電素子を用いることで、純水の二流体スプレー時の液滴の帯電量を制御することができ、ESDの抑制に誘導帯電素子は有効であることがわかった。

謝辞

本研究は愛知工業大学プロジェクト共同研究で行ったものであり、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社の日永康博様、渡邊久倫様、川畑隆広様、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の岩元勇人様、萩本賢哉様、齋藤卓様には研究支援をして頂き深く感謝する。

参考文献

- 1) Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited : <https://www.tsmc.com> (2022-07-31).
- 2) S. Wolf, Micro Manufacturing (Lattice Press, Sunset Beach, CA, 2004), 136
- 3) W. Kern : Handbook of semiconductor wafer cleaning technology (Noyes Publication, NJ 1993)
- 4) D. Braha, A. Shmilovici: Data mining for improving a cleaning process in the semiconductor industry. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, **15** (2002) 91
- 5) F. Chen, D. W. Zhang, X. Wei, X. Zhang, F. Liu, S. A. Henry, H. Hu, L. Yao, W. Chen, X. Shou: Research on Single Wafer RCA Clean in High Aspect Ratio Trenches. ECS Trans, **108** (2022) 137
- 6) W. Kern: The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology. Journal of The Electrochemical Society, **137** (1990) 1887
- 7) 株式会社 SCREEN ホールディングス : <https://www.screen.co.jp>, (2022-07-31).
- 8) 東京エレクトロン株式会社 : <https://www.tel.co.jp/> (2022-07-31).
- 9) M. Sato, K. Sotoku, K. Yamaguchi, T. Tanaka, M. Kobayashi, S. Nadahara : Analysis on Threshold Energy of Particle Removal in Spray Cleaning Technology. ECS Transactions, **41** (2011) 75
- 10) 菅野 至, 横井直樹, 佐藤一直, 黒田 健 : 新しい物理洗浄技術“M ジェットスクラバ”. 三菱電機技報, **71** (1997) 75
- 11) Y. Hagimoto, H. Ugajin, D. Miyakoshi, H. Iwamoto, Y. Muraki, T. Orii : Evaluation of the Plasmaless Gaseous Etching Process. UCPSS, **134** (2006) 7
- 12) 清家善之 ; 電子デバイスのスプレー洗浄工程における静電気対策. 静電気学会誌, **36** (2012) 338.
- 13) 浅野一明, 下川博文 : 純水の高速噴出時に発生する帯電霧. 静電気学会誌, **22** (1998) 204
- 14) Y. Seike, Y. Fukuoka, T. Mori, T. Segawa, Y. Kobayashi, K. Miyachi : Clarification and Countermeasures of Electrostatic Discharge in High-Pressure Spray Cleaning During Flat-Panel Display Manufacturing. Electrical Overstress / Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, **42** (2020) 215
- 15) 鈴木洋陽, 福岡靖晃, 森竜雄, 一野祐亮, 清家善之 : 純水の二流体スプレー時に発生する静電気と液滴特性の関係性. 静電気学会誌, **46** (2022) 38
- 16) Y. Seike, K. Miyachi, T. Shibata, Y. Kobayashi, S. Kurokawa, T. Doi : Silicon Wafer Cleaning Using New Liquid Aerosol with Controlled Droplets Velocity and Size by Rotary Atomizer Method. Japanese Journal of Applied Physics, **49** (2010) 066701
- 17) 宮地計二, 黒河周平, 清家善之, 山本浩之, 小林義典, 土肥俊郎 : スプレー式洗浄の粒子解析と洗浄力に関する考察—二流体スプレーと高圧マイクロジェットの洗浄力比較—. 精密工学会誌, **75** (2009) 536
- 18) 清家善之, 小林義典, 宮地計二, 甘利昌彦, 愛知工業大学. 旭サナック(株) : 洗浄装置及び洗浄方法. 特許第 6952302号 (2018)
- 19) S. Edward Law : Embedded-Electrode Electrostatic-Induction Spray-Charging Nozzle. Theoretical and Engineering Design. Trans. ASAE. **21** (1978) 1096
- 20) 吉永慶太, 山根 俊, 宮崎昌宏, 中山夏希, 窪田陽介, 小林 研 : エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性に関する研究. 農業食料工学会誌, **76** (2014) 261
- 21) 吉田哲雄, 辻 利秀, 大山龍一郎 : 静電誘導帯電における水噴霧の比電荷量と液膜分離点に関する実験. 静電気学会誌, **43** (2019) 177