

直接帶電法を用いたCO₂水の電荷制御による SiO₂/Si ウエハ表面電位制御

渡部 一哲*, 伊藤 康生*, 森 竜雄*, 一野 祐亮*, 田岡 紀之*, 清家 善之*, ***,¹

(2025年9月11日受付; 2025年12月16日受理)

Surface Potential Control of SiO₂/Si Wafers

Using Direct Charging Method for Charge Control of CO₂ Water

Ittetsu WATANABE*, Kousei ITO*, Tatsuo MORI*, Yusuke ICHINO*,

Noriyuki TAOKA* and Yoshiyuki SEIKE*, ***,¹

(Received September 11, 2025; Accepted December 16, 2025)

Two-fluid spray cleaning using deionized water is used in the semiconductor device manufacturing process. Cleaning with deionized water causes electrostatic discharge (ESD) due to charging of the wafer surface, which can destroy devices on the wafer. Currently, CO₂ water, in which CO₂ gas is injected into pure water, is used to suppress wafer surface charging. However, the mechanism of wafer surface charging has not been clarified. In this study, we focused on the effect of charged droplets on the wafer surface. The amount of charging of CO₂ water was controlled by the direct charging method, in which the liquid was charged by applying a high voltage directly to the flowing liquid. Using this direct charging method, the current generated by the two-fluid spray was measured. When a positive voltage of 10 kV was applied to CO₂ water, a current of about 600 nA was measured. The SiO₂/Si wafer surface potential was measured when the positively charged CO₂ water was sprayed, and the SiO₂/Si wafer surface potential increased by approximately 2 V in the positive direction. These results indicate that spraying charged CO₂ water onto the surface of SiO₂/Si wafers can control the potential of the SiO₂/Si wafer surface.

1. はじめに

半導体製造工程の洗浄工程では二流体スプレー洗浄が広く用いられている。二流体スプレー洗浄とは、窒素等の圧縮ガスと純水を混合し、霧状にしてウェハに噴射することで、パーティクルやレジスト残渣を除去する方法である^[4]。このように、比抵抗値の高い純水を使用した洗浄ではウェハ表面の帶電による静電気放電（ESD: Electrostatic Discharge）が、ウェハ上の素子を破壊することで歩留まりが低下することが問題になっている^[5-10]。現状では純水の比抵抗値を下げるために純水にCO₂ガスを注入したCO₂水や、純水にアンモニアを溶解させたアンモニア水が用いられている^[11, 12]。

キーワード: 静電気障害, 二流体スプレー, CO₂水, 帯電, SiO₂/Si ウエハ

* 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.2026.50.1.14>

しかし、洗浄時の熱酸化膜付き Si ウエハ (SiO₂/Si ウエハ) 表面の帶電メカニズムは明確にされていない。本研究では SiO₂/Si ウエハ表面における帶電メカニズムを明らかにするとともに、新たな帶電防止手法の確立を目的とする。これまでの研究でスプレーされた液滴が正極性になることを確認しているが、帶電液滴がウェハ表面に及ぼす影響は十分に解明されていない^[13]。そこで、帶電液滴がウェハ表面に及ぼす影響に着目した。

液滴の電荷制御の一つの方法に直接帶電法がある。直接帶電法とは、流れる液体に直接高電圧を印加することで、流体全体を帶電させる方式である。この方法はリーク電流を防止するため、タンク・配管・電極を含む装置全体を電気的に絶縁する必要がある。直接帶電法は塗装技術や静電農薬散布、粉塵捕集などの分野で研究されている^[14-17]。本報告では直接帶電法を用いてCO₂水の帶電量の制御を可能にした。さらに我々は帶電制御したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ表面にスプレーし、表面電位分布を測定した。その結果、帶電したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ表面にスプレーすることによりSiO₂/Si ウエハ表面の電位が制御可能であることを確認したので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 二流体ノズルの構造

二流体ノズルは内部混合型を採用した。内部混合型とは

ノズル内部で液体と気体を混合する方式である。純水またはCO₂水と圧縮エアをノズル内部の気液混合部へ搬送し、生成された液滴をノズル先端からスプレーした。スプレーは円錐形のパターンを形成する。ノズル先端から下方100 mm 地点のスプレー径は最大で35 mm程度であった。二流体ノズルの気液混合部の材質は石英製とし、それ以外の接液部はすべてフッ素樹脂（PFA）で構成した。吐出口の内径は3 mmである。

2.2 直接帶電法を用いた液滴の帶電量制御

試作した液滴の帶電量制御装置を図1に示す。本装置では高電圧発生装置（松定プレシジョン製 HEOPS-10B2）を用いて金属の配管に高電圧を印加し、直接CO₂水に高電圧を印加することで、その帶電量を制御する。

液体経路は主に高密度ポリエチレンのタンク、ポンプ（Levitronix 製 BPS-i30）、金属配管（SUS316）、二流体ノズルで構成され、装置各部の接続にはPFAチューブを用いた。二流体ノズルと金属配管の間は長さ1 mのPFAチューブ（外径3.18 mm、内径2.18 mm）で接続した。これらの液体経路はすべて電気的にアースから絶縁されている。液体流量はクランプ式流量計（キーエンス製 FD-XA1）で計測され、エア流量はマスフローメータ（コフロック製 8550MC-0-MP）で制御される。タンク内のCO₂水はポンプで二流体ノズル内に圧送され、CO₂水と圧縮エアを気液混合部で混合させた後、ノズル先端よりスプレーされる。CO₂水はCO₂ガスを注入した溶解器（3M 製 Membrane Contactor G 800）に純水（比抵抗値17 MΩ·cm以上）を通して生成されている。溶解器に注入するCO₂ガスの流量はマスフロコントローラ（HORIBA 製 S48-32）で制御し、平均0.7 mL/minとした。CO₂水はデジタル指示調節計（Azbil 製 C25）で管理し、0.1 MΩ·cmに保っている。実験室の温度と湿度は制御せず、温度は25°C、湿度は50%程度であった。純水とCO₂水の水温は23°Cである。

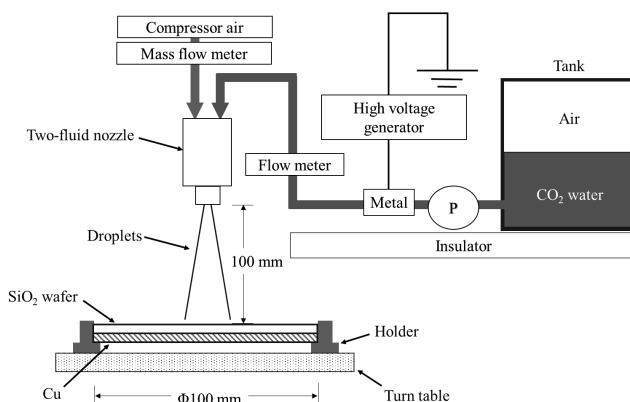


図1 直接帶電法を用いた液滴の帶電量制御装置
Fig.1 Droplet charge control device using direct charging method.

2.3 SiO₂/Siウェハ表面電位の測定

銅円板（直径：100 mm、厚さ：1 mm）の上にSiO₂/Siウェハ（直径：100 mm、厚さ：525 ± 25 μm、熱酸化膜厚：100 nm）を置き、帶電させたCO₂水をノズル先端から静止した状態のウェハ中心部に向けてスプレーした。スプレーする時間は60秒で、ノズル先端とウェハ表面との距離は100 mmとした。スプレー後、1500 rpmで200秒間スピンドル乾燥を行った。乾燥後、図2に示すように銅円板を接地し、表面電位計（Trek 製 323）に接続されたプローブ（Trek 製 6000B-8）でSiO₂/Siウェハ表面を0.5 mm間隔で169箇所スキャンし、電位分布を測定した。スキャンは、プローブを搭載した水平多関節ロボット（IAI 製 IXP-3N5520-WA-M-P3-B）で行った。プローブとSiO₂/Siウェハ表面間の距離は3 mmとした。測定範囲は、SiO₂/Siウェハ中心を基準とした縦60 mm × 横60 mmの正方形領域とした。表面電位分布の測定には20分を要し、測定時間中の電位増加率は2.6%であった。スプレー条件として液体流量を100 mL/min、エア流量を80 L/minとした。SiO₂/Siウェハ表面の接触角は62.1°であった。

2.4 液滴の帶電量測定

液滴の帶電量測定の概略図を図3に示す。測定にはステ

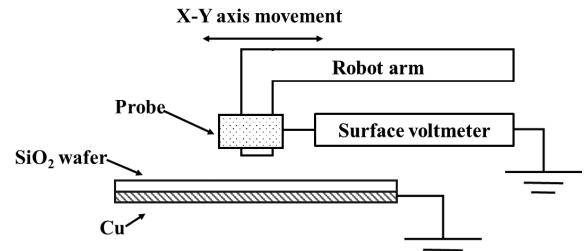


図2 SiO₂/Siウェハ表面電位測定の概略図
Fig.2 Schematic diagram of SiO₂/Si wafer surface potential measurement.

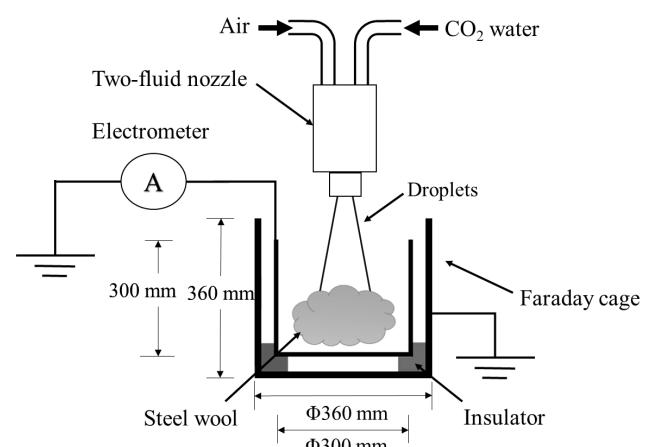
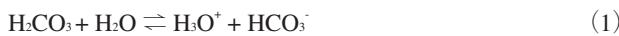


図3 液滴の帶電量測定の概略図
Fig.3 Schematic diagram of droplet charge measurement.

ンレス製のファラデーケージを用いた。ファラデーケージの内容器は直径 300 mm、高さ 300 mm、外容器は直径 360 mm、高さ 360 mm である。内容器と外容器は高密度ポリエチレンで電気的に絶縁している。水はねを防止するため内容器の底部にはスチールワールを設置した。このファラデーケージに向けてスプレーした際に発生する電流をエレクトロメータ (ADCMT 社 8252) で測定した。

3. CO₂水スプレー時の静電気特性

半導体製造における洗浄工程で使用されるCO₂水の静電気特性を確認した。二流体ノズルからファラデーケージに向かってスプレーし、アースに流れる電流を 0.05 秒間隔で 30 秒間測定した。実験条件は純水（比抵抗値 17 MΩ·cm 以上）もしくはCO₂水（比抵抗値 0.1 MΩ·cm）の流量を 100 mL/min で一定とし、エア流量は 40 L/min から 120 L/min の範囲とした。得られた結果を図 4 に示す。図中のデータ点は測定した電流の平均値、エラーバーは標準偏差を示す。CO₂水と純水の電流の極性はいずれも正極性を示し、エア流量が増加すると電流値は増加した。またCO₂水の電流値は純水の電流値と比べ、最大で 91.6% 小さい。CO₂ガスが純水に溶けることで、式(1), (2)のように解離することが知られている¹⁸⁾。



CO₂水をスプレーして生成した液滴には H₃O⁺イオンが多く存在しているため、正極性に帶電したと考える。また、鈴木らはエア流量が増えると、飛行液滴速度は比例して速

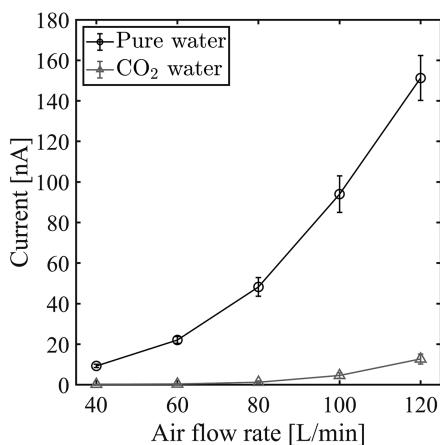


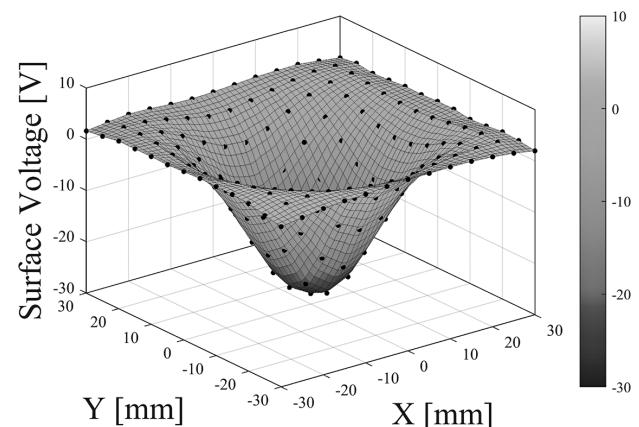
図 4 純水または CO₂水を用いた二流体スプレー時に発生する電流

Fig.4 Current generated during two-fluid spraying with pure water or CO₂ water.

くなり、発生電流は増加したと報告しており、エア流量が増加すると発生電流が大きくなるという結果と一致している¹³⁾。

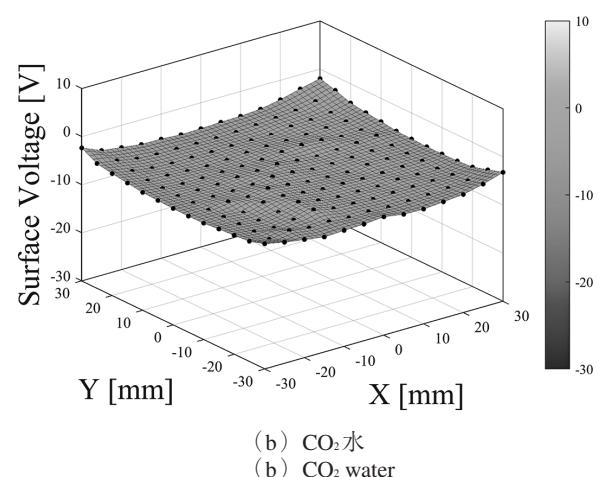
SiO₂/Si ウエハの中心部に向けて純水（比抵抗値 17 MΩ·cm 以上）もしくは CO₂水（比抵抗値 0.1 MΩ·cm）をスプレーした。その他の条件は、前述の 2.3 SiO₂/Si ウエハ表面電位の測定と同一とした。表面電位分布を図 5 および図 6 に示す。図 5 は表面電位の三次元分布を示し、図 6 は、図 5 の Y 軸 0 mm の位置の X 軸方向の中央断面図である。図 5 より、CO₂水もしくは純水で二流体スプレーした際の SiO₂/Si ウエハ表面電位は負極性に帶電していることが分かる。純水をスプレーした際の表面電位は図 6 に示すように SiO₂/Si ウエハの中央部が -28 V に帶電しているのに対し、CO₂水をスプレーした際の SiO₂/Si ウエハの中央部の電位は -5.4 V となり、純水スプレー時と比較して 80.7% 小さい。

以上の結果より、CO₂水を用いた場合、純水と比較して



(a) 純水

(a) Pure water



(b) CO₂水

(b) CO₂ water

図 5 純水または CO₂水を用いた二流体スプレー時の SiO₂/Si ウエハ表面電位分布

Fig.5 SiO₂/Si wafer surface potential distribution during two-fluid spray using pure water or CO₂ water.

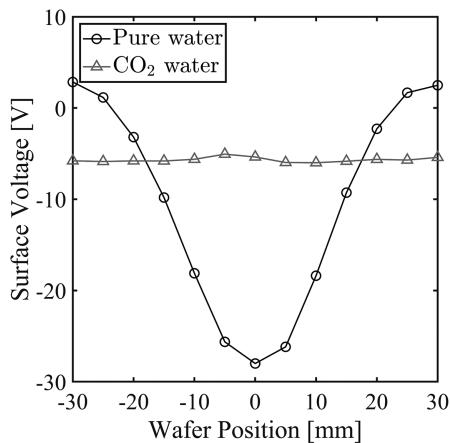


図6 純水またはCO₂水を用いた二流体スプレー時のSiO₂/Si ウエハ表面電位分布（中央断面）

Fig.6 SiO₂/Si wafer surface potential distribution during two-fluid spraying with pure water or CO₂ water (center cross section).

スプレー帶電量およびSiO₂/Si ウエハ表面の帶電量が顕著に低減することが確認された。静電気が発生するとそれに続いて電荷緩和が生じることが知られており¹⁹⁾、浅野は電荷の緩和時間が導電率に依存することを報告している²⁰⁾。純水にCO₂を溶解させることにより、導電率は増加するため、純水と比較してCO₂水は電荷緩和時間が短くなる。その結果、帶電量が低下したと考える。

4. 直接帶電法を用いたCO₂水の帶電量制御

直接帶電法を用いたCO₂水の帶電量制御効果を確認する。実験条件はCO₂水の流量を100 mL/min、エア流量を80 L/min、CO₂水に印加する電圧を-10 kVから10 kVとし、液滴の帶電量を測定した。CO₂水に印加する電圧と液滴の発生電流の関係を図7に示す。図中のデータ点は0.05秒間隔で測定した電流の平均値、エラーバーは標準偏差を示す。発生電流は印加電圧に対して57.9 nA/kVの傾きで比例した。この結果から直接帶電法を用いることで液滴の帶電量を制御できることが分かる。

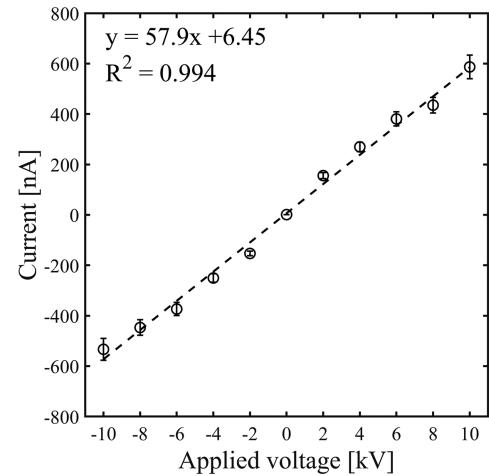


図7 CO₂水に印加する電圧と発生電流の関係

Fig.7 Correlation between applied voltage to CO₂ water and generated current.

次に帶電量を制御したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ中央部に向けてスプレーした。その他の条件は、前述の2.3 SiO₂/Si ウエハ表面電位の測定と同一とした。表面電位分布を図8および図9に示す。図8は表面電位の三次元分布を示し、図9は図8のY軸0 mmの位置のX軸方向の中央断面図である。CO₂水に電圧を印加しない場合は0 Vと表記する。図8よりSiO₂/Si ウエハ表面はすべての条件で中央部を中心に負極性に帶電した。特に表面電位の変化は中央部が最も大きくなかった。図9に示すように印加電圧0 Vの場合と比較し、10 kVの電圧を印加した場合では中心部の表面電位は約2 V増加し、-10 kVの電圧を印加した場合では中心部の表面電位は約3 V減少した。

次に液滴の電荷量とSiO₂/Si ウエハ表面の電荷量の関係について考察する。計算ではSiO₂/Si ウエハの局所的な帶電挙動については考慮せず、SiO₂/Si ウエハ表面全体にわたる大まかな総電荷量のみを比較対象とした。また、生成されたすべての液滴が図7の電荷量を保った状態でSiO₂/Si ウエハ表面全体に着弾するものと仮定した。ここでは

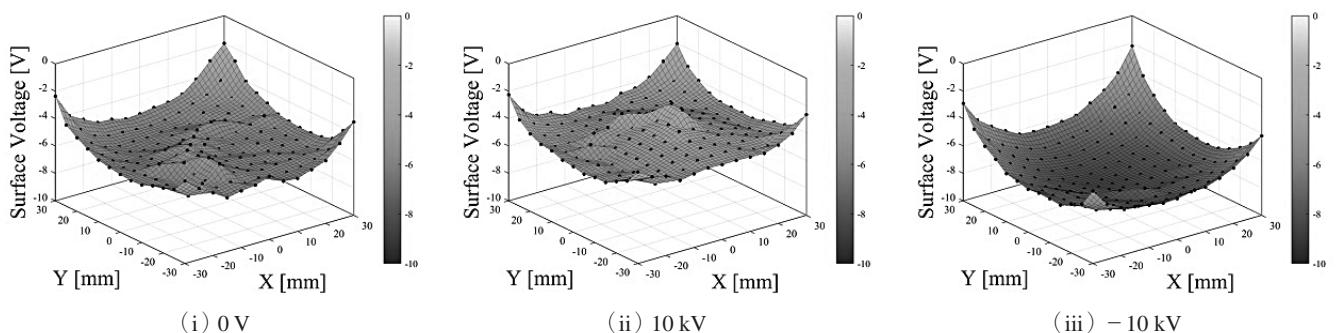


図8 電圧印加により帶電したCO₂水をスプレーした際のSiO₂/Si ウエハ表面電位分布
((i) CO₂水への印加電圧: 0 V, (ii) CO₂水への印加電圧: 10 kV, (iii) CO₂水への印加電圧: -10 kV)

Fig.8 SiO₂/Si wafer surface potential distribution when sprayed with CO₂ water charged by applying voltage.
((i) Voltage applied to CO₂ water: 0 V, (ii) Voltage applied to CO₂ water: 10 kV, (iii) Voltage applied to CO₂ water: -10 kV)

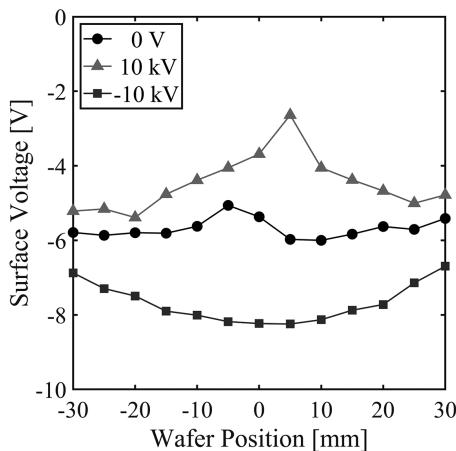


図9 電圧印加により帶電したCO₂水をスプレーした際のSiO₂/Si ウエハ表面電位分布（中央断面）

Fig.9 SiO₂/Si wafer surface potential distribution when sprayed with CO₂ water charged by applying voltage (center section).

SiO₂/Si ウエハの表面電位から総電荷を計算した。はじめに測定範囲の領域からSiO₂/Si ウエハ表面電位 V_{-30-30} を算出した。 V_{-30-30} は次式で与えられる。

$$V_{-30-30} = \frac{1}{S_{-30-30}} \int_{y=-30}^{y=30} \int_{x=-30}^{x=30} V(x,y) dx dy \quad (3)$$

ここで S_{-30-30} は測定範囲の面積である。酸化膜をコンデンサとみなすと、SiO₂/Si ウエハの総電荷 Q は式(4)で表すことができる。

$$Q = C_{ox} V_{-30-30} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_w}{d} V_{-30-30} \quad (4)$$

ここで、 C_{ox} は酸化膜の静電容量、 d は酸化膜の厚さ、 ϵ_r は酸化膜の比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率、 S_w はSiO₂/Si ウエハの面積を示す。酸化膜の厚さ d を100 nm、酸化膜の比誘電率 ϵ_r を3.9、真空の誘電率 ϵ_0 を 8.85×10^{-12} F/m、SiO₂/Si ウエハの面積 S_w を 78.5 cm^2 とした場合、式4より酸化膜の静電容量 C_{ox} は $2.71 \mu\text{F}$ と算出される。液滴の総電荷は図7の平均電流に60秒を乗じることで算出した。液滴の総電荷およびSiO₂/Si ウエハ表面の総電荷については、それぞれ表1に示す。表1より、CO₂水への印加電圧を10 kVおよび-10 kVに変化させた場合、SiO₂/Si ウエハ表面の総電荷は10 kV印加時で-12.4 μC、-10 kV印加時で-19.5 μCと変動した。これに対して、液滴の総電荷はそれぞれ35.2 μCおよび-32.0 μCとなった。

また、印加電圧0 Vの場合(SiO₂/Si ウエハ表面の総電荷:-15.1 μC、液滴の総電荷:0.06 μC)を基準とし、それぞれの印加電圧条件における液滴の総電荷およびSiO₂/Si ウエハ表面の総電荷の変化量を算出した。その結果を表2に示す。10 kV印加時には液滴の総電荷の変化量 ΔQ_d は35.1 μC、SiO₂/Si ウエハ表面の総電荷の変化量 ΔQ_w は2.70 μCとなった。-10 kV印加時には液滴の総電荷の変化量 ΔQ_d

表1 液滴の総電荷とSiO₂/Si ウエハ表面の総電荷

Table 1 Total charge of droplets and total charge on SiO₂/Si wafer surface.

Applied voltage [kV]	Charge of droplets [μC]	Charge on wafer surface [μC]
10	35.2	-12.4
0	0.06	-15.1
-10	-32.0	-19.5

表2 液滴の総電荷変化量 ΔQ_d に対するSiO₂/Si ウエハ表面の総電荷変化量 ΔQ_w の割合

Table 2 Ratio of change in total surface charge on SiO₂/Si wafer to change in total droplet charge.

Applied voltage [kV]	Change in charge of droplets ΔQ_d [μC]	Change in charge on wafer surface ΔQ_w [μC]	Ratio $(\Delta Q_w / \Delta Q_d) \cdot 100$ [%]
10	35.1	2.70	7.68
-10	-32.1	-4.40	13.7

は-32.1 μC、SiO₂/Si ウエハ表面の総電荷の変化量 ΔQ_w は-4.40 μC となった。これらの値をもとに、液滴の総電荷の変化量 ΔQ_d に対するSiO₂/Si ウエハ表面の総電荷の変化量 ΔQ_w の割合を算出したところ、10 kV印加時で7.68%、-10 kV印加時で13.7%であった。八塚らは純水がある程度以上の過剰電荷を得ると、流動する液滴と高分子表面との界面で、液滴の接触による電荷交換と同時に、過剰電荷が高分子表面に移行するモデルを報告している²¹⁾。そのため、正極性に過剰に帶電したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ表面にスプレーすると、SiO₂/Si ウエハ表面に負のイオンが吸着すると同時に、過剰に帶電した正のイオンがSiO₂/Si ウエハ表面に吸着する。その結果、CO₂水の帶電量を制御しない(CO₂水への印加電圧0 V)場合と比べ、SiO₂/Si ウエハ表面全体で正方向に表面電位が増加したと考える。また、スプレーが当たるSiO₂/Si ウエハ中央部は他の領域に比べて接觸するCO₂水の量が多い。そのため、SiO₂/Si ウエハ中央部ではイオン吸着が促進され、表面電位の変化が大きくなつたと思われる。

以上の結果から、帶電したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ表面にスプレーすることによりウエハ表面の電位を制御できることが分かった。

5.まとめ

本報告では直接帶電法を用いてCO₂水の帶電量を制御した。帶電したCO₂水をSiO₂/Si ウエハ表面にスプレーし、表面電位計により表面電位分布を測定した結果、以下のことが明らかになった。

(1)二流体スプレー時に発生する電流値は正極性を示し、

- 純水と比べ、CO₂水の電流値は最大で91.6%小さい。
- (2) CO₂水をスプレーした際のSiO₂/Siウェハ中央部の表面電位は純水スプレー時と比較して80.7%小さい。
 - (3) 直接帶電法を用いたCO₂水の帶電量制御では発生電流が電圧に対して57.9 nA/kVの傾きで比例した。
 - (4) 直接帶電法を用いてCO₂水の帶電量の制御が可能であることが分かった。
 - (5) 帯電させたCO₂水を静止状態のSiO₂/Siウェハに向けてスプレーした際の表面電位は、印加電圧0 Vの場合と比較して、印加電圧10 kVでは中心部の表面電位が約2 V増加し、印加電圧-10 kVでは中心部の表面電位が約3 V減少した。
 - (6) CO₂水に10 kVを印加した場合、液滴の総電荷変化量に対するSiO₂/Siウェハ表面の総電荷変化量の割合は7.68%であり、-10 kV印加した場合は13.7%であった。
 - (7) 帯電したCO₂水をSiO₂/Siウェハ表面にスプレーすることによりSiO₂/Siウェハ表面の電位を制御できることが分かった。

謝辞

本研究はJSPS科研費23K03627および愛知工業大学プロジェクト共同研究の支援を受けたものである。また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、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社には研究の支援をしていただき感謝する。

参考文献

- 1) 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
- 2) M. Sato, K. Sotoku, K. Yamaguchi, T. Tanaka, M. Kobayashi and S. Nadahara: Analysis on Threshold Energy of Particle Removal in Spray Cleaning Technology. ECS Transactions, **41** (2011) 75
- 3) 真田俊之、渡部正夫：二流体ジェット法における気体種の影響。エアロゾル研究, **29** (2014) 236
- 4) 菅野至：ジェット洗浄技術の最前線 半導体製造における2流体ジェット洗浄とその応用。砥粒加工学会誌, **55** (2011) 636
- 5) 鈴木政典、川上雅之、矢野大作、山中弘次、荒木浩之、宮勝彦、川瀬信雄：枚葉洗浄におけるシリコンウェハの帶電現象の観察。空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, p.179, 日本空気清浄協会 (2016)
- 6) 鈴木政典、川上雅之、矢野大作、荒木浩之、佐藤雅伸、川瀬信雄：枚葉洗浄におけるシリコンウェハの帶電現象の観察その2。静電気学会講演論文集, p.141, 静電気学会 (2018)
- 7) 金沢誠司、江口栄司、大久保利一、野本幸治、足立宜良：帶電したウェハの表面電位分布の測定。電気学会放電研究会資料, ED-93-18, p.39, 電気学会 (1993)
- 8) Y. Hagimoto, H. Iwamoto, Y. Honbe, T. Fukunaga and H. Abe: Defects of silicon substrates caused by electro-static discharge in single wafer cleaning process. Solid State Phenomena, **145-146** (2009) 185
- 9) K. K. Ng, K. P. Yan, R. Gaertner and S. Seidl: Influence of machine configuration on EOS damage during wafer cleaning process. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2016, Article No. 7592545, IEEE, USA (2016)
- 10) 浅野一明、下川博文：純水の高速噴出時に発生する帶電霧。静電気学会誌, **22** (1998) 204
- 11) 矢野大作：半導体製造に用いられる超純水と機能水の最新動向。表面技術, **69** (2018) 425
- 12) Y. Hayashi, M. Kawakami, D. Yano and K. Yamanaka: Effects of Diluted-NH₄OH as Conductive Rinse Water in Single Wafer Cleaning Processes. ECS Transactions, **69** (2015) 37
- 13) 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
- 14) 山辺秀敏：静電塗装。色材協会誌, **73** (2000) 512
- 15) A. Carrasco Munoz, E. Barbero Colmenar, E. Bodnár, J. Grifoll and J. Rosell Llompart: Monodisperse droplets and particles by efficient neutralization of electrosprays. Journal of Aerosol Science, **160** (2022) 105909
- 16) D. Zhao, S. Cooper, P. Chima, G. Wang, L. Zhang, B. Sun, X. Zhang and Y. Lan: Development and Characterization of a Contact-Charging Electrostatic Spray UAV System. Agriculture, **14** (2024) 467
- 17) 松尾昌樹、内野敏剛、飯本光雄：エレクトロダイインの静電散布特性について（第1報）。農業機械学会誌, **48** (1986) 25
- 18) 小野里勇太、朴鍾湜、柳田保子、初澤毅、中野善之、三輪哲也：マイクロ流路式海洋二酸化炭素センサーの特性評価。精密工学会学術講演会講演論文集, p.81, 精密工学会 (2016)
- 19) 佐藤政次：コンパクト版 静電気ハンドブック, p.132, 静電気学会, オーム社 (2006)
- 20) 浅野和俊：純水・超純水の噴霧・接触・流動帶電とその制御。電気学会論文誌D, **108** (1988) 362
- 21) 八塚京子、水野幸夫、浅野和俊：純水の滴下・流動による高分子表面の帶電。静電気学会誌, **16** (1992) 401