

コロナ放電方式イオナイザーによる窒素雰囲気中のウェーハの帯電と除電

向川政治^{*1}, 大久保貴広^{*}, 大谷 勝^{*}, 高木浩一^{*}, 藤原民也^{*}, 伊藤 剛^{**}

(2007年10月22日受付; 2008年1月9日受理)

Electrification and Neutralization of Wafers in Nitrogen Ambient Using Corona Discharge Ionizer

Seiji MUKAIGAWA,^{*1} Takahiro OHKUBO,^{*} Masaru OHTANI,^{*} Koichi TAKAKI,^{*}

Tamiya FUJIWARA^{*} and Takeshi ITO^{**}

(Received October 22, 2007; Accepted January 9, 2008)

In this article, we investigated the electrification and neutralization of surface charge on silicon wafer(s) in nitrogen ambient using a corona discharge ionizer at atmospheric pressure. Measurement of surface potential uniformity, ion balance, and the time for surface charge neutralization was conducted. A type of AC and DC simultaneous application was proposed in order to decrease the ion balance (residual surface potential). Using the ACDC type ionizer, ion balance reduces to $-10\text{V} \sim -20\text{V}$. And the time for surface charge neutralization in the case of 1kV of positive and negative charging reduces to 0.8s and 2.0s, respectively.

1. はじめに

静電気によって発生する放電 (ESD) は, 電気・電子デバイス産業をはじめとする多くの産業で, 電子機器の誤作動, デバイスの破壊や, 帯電によるパーティクルの付着などの様々な障害を引き起こす。これを防ぐ対策として, イオナイザーを用いて帯電した物質を除電する方法がある。半導体製造においては, ウェーハの帯電防止や除電のためにイオナイザーが導入されており, クリーンルーム内でのウェーハの帯電・除電を主な目的として UV 光¹⁾ や軟 X 線等を用いた非放電型イオナイザーが用いられている。他方, イオナイザーには, 装置構成の簡単さや取り扱い・導入の容易さから, 放電方式イオナイザーが広く用いられている²⁾³⁾。半導体製造におけるプラズマプロセスではウェーハの帯電電荷量は非常に多く, プラズマプロセス直後のウェーハの帯電が, その後の工程の ESD やパーティクルの付着などの問題を引き起こす。この防止のためにプラズマ装置へ搭載するイオナイザーは, 狭い空間に多量に積載されたウェーハを短時間で除電

できるものでなければならない。この用途には, 構成が単純で, イオンバランスの制御性が高く, 除電速度の高いイオナイザーの実現が望まれる。イオンバランスの制御にはホロー電極を用いる方法⁴⁾ や, 大気圧グローを用いる方法⁵⁾, 交流電圧に直流電圧を重畳する方法⁵⁾ がある。本研究では, 2本の針電極からなるコロナ放電方式イオナイザーを作成し, N₂ 雰囲気中で直径 $\phi 300\text{mm}$ のシリコンウェーハの帯電と除電の基礎特性を測定した。除電時の針電極への電圧印加方式として, 両電極に正負それぞれの直流電圧を印加する方式 (DC 印加方式), 両電極に正弦波交流電圧を印加方式 (AC 印加方式), 両電極に交流・直流をそれぞれ同時に印加する方式 (ACDC 同時印加方式) を用いた。特に, イオンバランスの制御性の向上をめざして, ACDC 方式による除電を行い, 除電後のイオンバランスのウェーハ表面上分布, 及び除電時間を測定した。

本論文では, コロナ放電方式イオナイザーの構造と電圧電流特性を述べた後, 本イオナイザーが生成する電荷のウェーハ面上分布の均一性を示す。次に, DC 印加方式と AC 印加方式の帯電特性を示し, 特に, AC 印加方式ではウェーハは負に帯電することを示す。この結果を受けて, ACDC 同時印加方式を提案し, DC 印加方式と ACDC 同時印加方式による除電特性を比較する。最後に, 多数ウェーハ搭載時における ACDC 同時印加方式の除電を試みる。

キーワード: 除電, コロナ放電, イオナイザー, 除電時間

* 岩手大学工学部 (020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020-8551, Japan

** 日立国際電気 (939-2393 富山県富山市八尾町保内 2-1)

Hitachi Kokusai Electric, 2-1, Yasuuchi, Yatsuo-machi, Toyama-shi, Toyama 939-2393, Japan

¹ mukaigaw@iwate-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

図 1(a) にイオナイザー概略図を示す. イオナイザーは 2 本のステンレス製針電極からなり, 長さは 33 mm, 直径 3 mm, 先端角は約 20° である. これらはアクリル板に固定されている. 2 本の針電極の間隔は 65 mm である. 図 1(b) に実験概略図を示す. 接地された金属性密閉容器内に, イオナイザー, ウェーハ固定台, ガス注入ノズル, 静電気センサ (KEYENCE SK-030/200 (1 枚測定時, 出力応答時間 0.6s), トレック・ジャパン Model344 (5 枚測定時, 出力応答時間 3.0ms)) が取り付けられている. ウェーハとイオナイザー電極の先端の水平距離は 30cm である. ウェーハと測定センサの距離は 1 枚測定時で 10mm, 5 枚測定時で 2mm である. 本実験では, 窒素パージされた装置内でのウェーハに対する除電効果を模擬するため, 帯電・除電を N₂ 雰囲気中で行なった. 実験中の O₂ 濃度は 20ppm 以下とし, N₂ 流量は 5 l/min である. 図 2 にウェーハ面上の表面電位の測定点 (O,A,B,C,D) を示す(図 1(b)を上側から見た図. 四角はウェーハ支柱を表している). ウェーハ面上の初期帯電分布, 各印加電圧で除電した後の表面電位分布, および表面電位の時間変化を測定する. また, 試作したイオナイザーと市販されているイオナイザーの除電の結果を比較する.

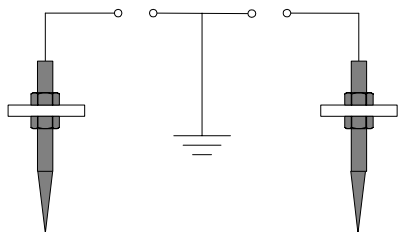


図 1(a) 試作イオナイザー電極

Fig. 1(a) Schematic diagram of ionizer electrodes.

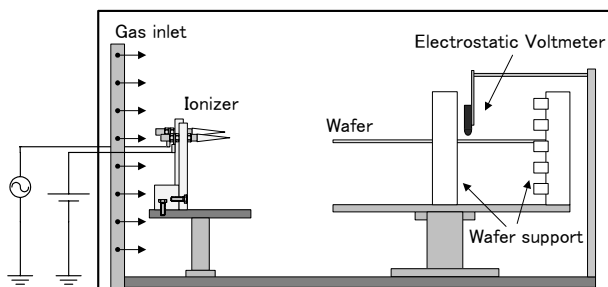


図 1(b) 実験概略図

Fig. 1(b) Schematic diagram of experiments.

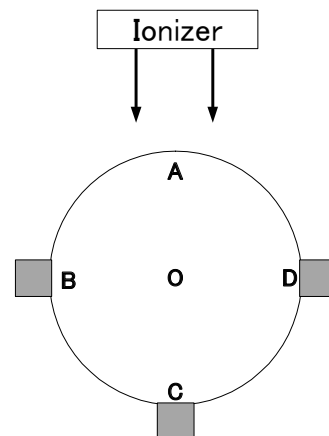


図 2 ウェーハ面上の測定点

Fig. 2 Measurement points on wafer surface.

3. 実験結果及び考察

3.1 試作イオナイザーの電圧電流特性

図 3(a),(b)に試作イオナイザーの電極 1 本に直流電圧を印加した場合の電流測定結果を示す. この実験は N₂ 雰囲気中で行った. この実験では, 1 本のイオナイザー電極が放電するときの特性を知るために, 電極を流れる電流を測定しやすくするため, 針電極前方 16.5mm の位置に対向電極 (平板電極) を置き, 放電電流の測定を行なった. 正の印加電圧を徐々に大きくしていくと, 5kV から電流が流れ始め, 7kV で約 2 μ A 程度の放電電流が流れる. 負の印加電圧を徐々に下げていくと, -3kV から電流が流れ始めたが, その後は放電がストリーマ状に伸びて電流は急上昇し, -3.7kV では -700 μ A 程度の電流が流れた. 電流値 (生成電荷量) の極性依存性より, 窒素雰囲気中のイオナイザーでは正の荷電粒子より負の荷電粒子のほうが生成されやすいものと考えられる.

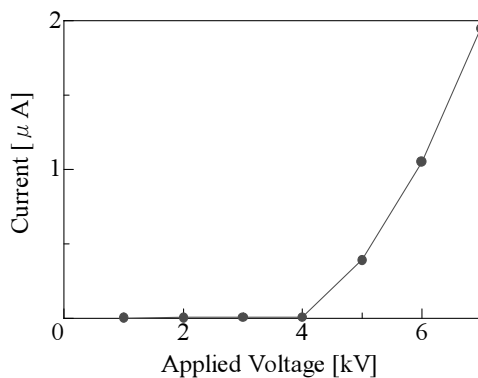


図 3(a) 印加電圧と放電電流の関係 (正)

Fig.3(a) Applied voltage vs Current (positive).

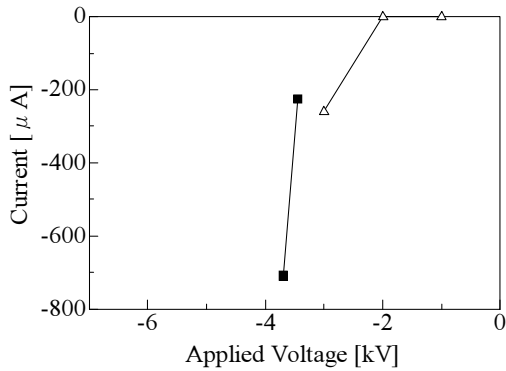


図 3(b) 印加電圧と放電電流の関係 (負)
Fig. 3(b) Applied voltage vs Current (negative).

3.2 イオナイザーによるウェーハの帯電特性

3.2.1 ウェーハの帯電分布

表 1 に、試作イオナイザーを用いてウェーハ(φ300mm)の表面電位を約±1kV程度に帯電させたときの表面電位の面内分布を示す。帯電は正極性および負極性の直流電圧を用いて行った。表面電位の値は、帯電開始から十分時間が経過して表面電位が一定値を示したときの値である(ウェーハは一旦帯電すると、表面電位は数分間ほとんど変化しない)。正極帯電および負極帯電のいずれの場合も、ウェーハ面上ほぼ均一に帯電していることが分かる。このことから、帯電ウェーハを除電する際には、除電に寄与する荷電粒子はウェーハ面上に均一に行き亘っているものと考えられる。また、後述の除電の議論では、初期の帯電電荷量の面内不均一性は無視できるものと考えられる。イオナイザーが生成した荷電粒子の移動の状態は、イオナイザー後方のガス注入ノズルによるガスの流れの状態と、イオナイザー電極から対向電極としての金属製密閉容器へ向かう電気力線の分散の様子に依存するが、これらが影響して様な帯電が実現しているのであろう。

表 1 帯電分布

Table 1 The distribution of charging.

Measurement point	Positive charging	Negative charging
	Surface potential [kV]	Surface potential [kV]
O	0.95	-1.03
A	1.02	-1.12
B	1.02	-1.11
C	1.02	-1.10
D	1.02	-1.11

3.2.2 イオナイザー印加電圧とウェーハ表面電位

図 4(a)にイオナイザーの電極 1 本に正の直流電圧を印加したときのウェーハの表面電位の時間的変化を示す。ウェーハの初期表面電位は-1kVとした。測定点は図 2 の O 点である。印加電圧が+2kV, +3kV では、表面電位の初期値からの変化は見られない。これは、図 3(a)において、4kV 未満で正の荷電粒子の生成がないものと解釈すると整合性がある。印加電圧が 4kV 以上になると表面電位が 0V を通過し、正に帯電することがわかる。印加電圧の増加につれて表面電位の最終値も増加し、6kV 印加時では表面電位は約 650V である。

図 4(b)に、イオナイザー電極 1 本に負の直流電圧を印加したときの表面電位の時間的変化を示す。ウェーハの初期表面電位を 1kV とした。測定点は図 2 の O 点である。印加電圧が-2kV のときは表面電位の初期値からの変化は見られないが、-4kV 以上になると表面電位が 0V を通過し負に帯電することがわかる。これは、図 3(b)において、-2kV 以上で負の荷電粒子の生成がないものと解釈すると整合性がある。印加電圧が大きくなるにつれて表面電位の最終値は減少している。正極印加のときと比較すると、表面電位の極性が反転するのに要する時間が短く、最終的に到達する表面電位の絶対値は増加しており、-6kV 印加時では表面電位が-2.15kV に達している。したがって、2 本の電極のそれぞれに正・負の電圧を印加する除電方式では、イオンバランスを取るためには正極より負極の電圧の絶対値を低く取る必要がある。イオナイザー電極の印加電圧が等しく極性のことなる場合と比較すると、負を印加する場合の方が正の場合より表面電位の絶対値は大きい。表面電位の電圧の違いは桁がずれるほどのものではない。正負の印加電圧の違いによる表面電位の相違は、正負それぞれの場合における荷電粒子の生成量の違いが起因すると同時に、ウェーハ表面の自然酸化膜の特性として表面が正に帯電しやすい傾向と、正負の荷電粒子の移動速度の違いがあることにも起因しているものと考えられる。

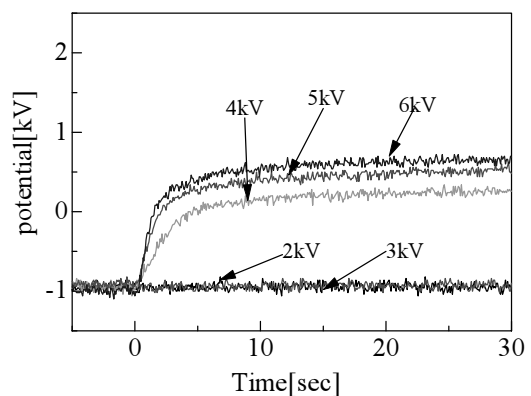


図 4(a) 正極直流電圧印加による表面電位変化
Fig. 4(a) Time variation on surface potential (positive DC voltage).

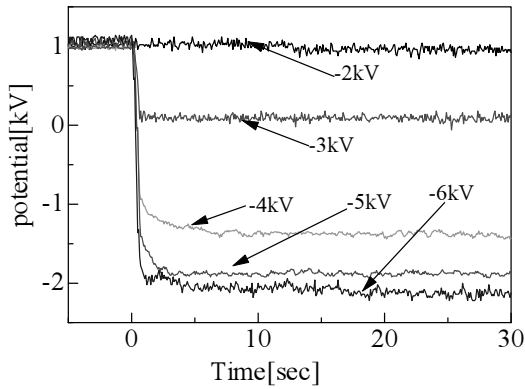


図 4(b) 負極直流電圧印加による表面電位変化

Fig. 4(b) Time variation on surface potential (negative DC voltage).

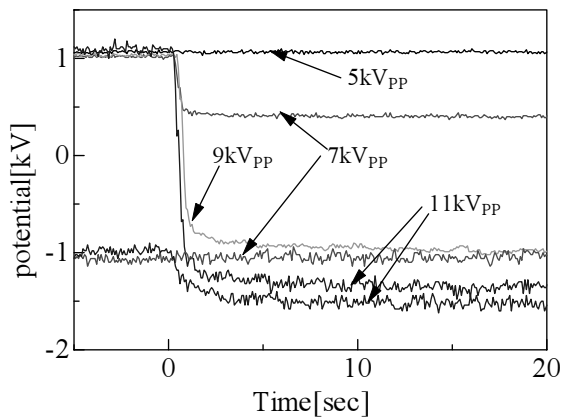


図 5 交流電圧印加による表面電位変化 (50Hz)

Fig.5 Time variation on surface potential (AC 50Hz).

図 5 に、イオナイザー電極 1 本に交流電圧 (50Hz) を印加した場合の表面電位の時間的変化を示す。ウェーハの初期表面電位を $\pm 1\text{kV}$ とした。ウェーハを 1kV に帯電させた状態からイオナイザー電極に 5kV_{pp} を印加したときは表面電位に変化はないが、 7kV_{pp} を印加した場合は 500V 程度減少した。印加電圧を上げるにつれて表面電位は減少し、 0V を通過して負に帯電する傾向がある。ウェーハを -1kV に帯電させた状態で電極に交流電圧を印加した場合は、表面電位の極性は負のままであり、正に転ずることはない。これは、交流においても直流の場合と同様に、正の半周期で生成される正の荷電粒子の数よりも、負の半周期で生成される負の荷電粒子の方が多いためと考えられる。

3.3 イオナイザによるウェーハの除電特性

3.3.1 除電後のウェーハ表面電位分布

表 2 は、イオナイザーの 2 本の電極にそれぞれ正・負の直

流電圧を印加したとき (DC 印加方式) の表面電位の面内分布である。表面電位の値は、除電開始から十分時間が経過したときの最終値である。ウェーハの表面電位の初期値は $\pm 1\text{kV}$ とした。イオナイザーに印加する電圧は、表面電位ができるだけ小さくなるような条件を求め、2 本の針電極のうち的一方には $+5.5\text{kV}$ を、他方には -2.5kV を印加した。初期値 $+1\text{kV}$ に帯電したウェーハの除電では、測定点 O で表面電位は -10V に低減しており、他の測定点でも 3V の範囲内で表面電位は一致している。また、初期値 -1kV に帯電したウェーハの除電では、測定点 O で表面電位は -20V に増加 (絶対値は減少) し、他の測定点でも 5V の範囲内で一致している。

3.2.2 の実験結果より AC 電圧だけを印加すると、ウェーハの帯電が負極性に偏ることがわかったので、これを防ぐために、2 つのイオナイザー電極のうち、一方は交流電圧、他方に正の直流電圧を接続し、両者の組み合わせを試みた (ACDC 同時印加方式)。表 3 は、帯電したウェーハの交流電圧 (50Hz) と直流電圧の組み合わせによって除電を行った後の表面電位の面内分布である。表面電位の値は、除電開始から十分時間が経過したときの最終値である。ウェーハの表面電位の初期値は $\pm 1\text{kV}$ とした。

表 2 除電による電位分布 (DC)

Table 2 The potential distribution by neutralization (DC).

	Initial value : $+1\text{kV}$	Initial value : -1kV
Meas. Position	Surface potential [V]	Surface potential [V]
O	-10	-20
A	-13	-15
B	-13	-16
C	-10	-20
D	-10	-15

表 3 除電による電位分布 (ACDC 印加)

Table 3 The potential distribution by neutralization (ACDC).

	Initial value : $+1\text{kV}$	Initial value : -1kV
Meas. Position	Surface potential [V]	Surface potential [V]
O	-13	-12
A	-12	-10
B	-12	-10
C	-12	-12
D	-11	-13

イオナイザーに印加した電圧は、2本の針電極のうち、一方には AC7kV_{pp} (実効値 2.4kV) を印加し、他方には AC 印加単独におけるオフセットをできるだけ打ち消すように DC5kV を印加した。初期値+1kV に帯電したウェーハの除電では、測定点 O では-13V に低減しており、他の測定点でも 2V 以内の範囲で一致している。また、初期値-1kV の帯電ウェーハでは、除電によって測定点 O では-12V に低減し、他の測定点でも 3V 以内の範囲で一致している。

3.3.2 ウェーハの除電時間

図 6 は、正負に帯電したウェーハが除電によって、その表面電位が初期値から時間とともに減衰してゆく様子を表している。表面電位の初期値として±1~±2kV 程度にウェーハを帯電させ、DC 印加方式で除電した場合である。イオナイザーの 2つの電極には、+5kV と-2kV の電圧を印加した。表面電位が放電開始から初期電圧の 5%に減少するまでの時間を除電時間と定義すると、正に帯電させたウェーハの除電では、除電時間は約 0.8 秒である。また、負に帯電させたウェーハの除電では、除電時間は約 3.3 秒である。

比較のために、DC 印加方式の市販イオナイザーで同様の実験を行った。この方式は 2つの電極に、大きさが同じ、正負の直流電圧をそれぞれ印加する方式である。このイオナイザーでは、表面電位の初期値を 2kV としたとき、除電開始から約 1 秒後に表面電位は約-200V に低減した。このことから、この場合も正の電荷に比べて負の電荷のほうがより多く生成されると考えられる。また、負に帯電したウェーハの除電では、正に帯電したウェーハの除電時間と比べて、どの条件でも除電時間が長くなるのがわかった。これは、本研究の試作器と同じ傾向を示すものである。

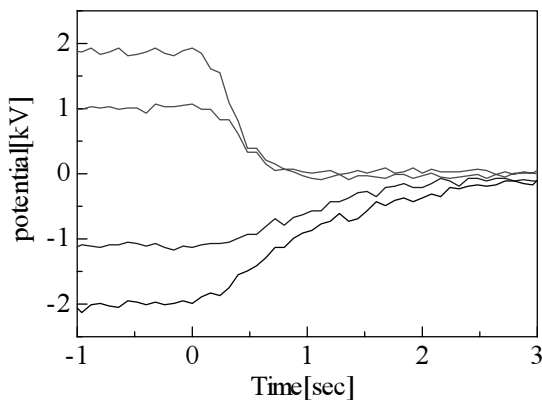


図 6 除電時の表面電位変化 (DC 印加方式)

Fig. 6 Time variation on surface potential (DC voltage).

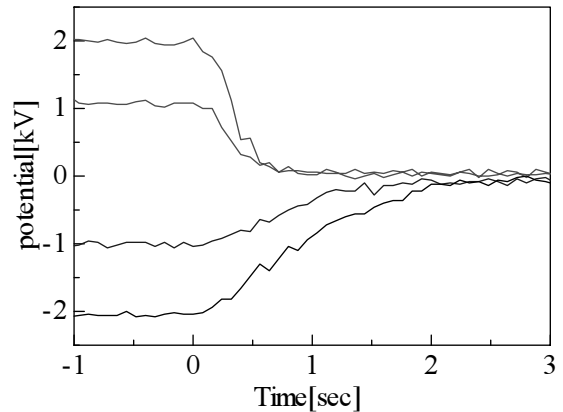


図 7 除電時の表面電位変化 (ACDC 印加方式)

Fig.7 Time variation on surface potential during neutralization (ACDC voltage).

図 7 は、表面電位を±1~±2kV 程度に帯電させたウェーハを、ACDC 印加方式で除電した場合である。AC 電圧は 50Hz, 7kV_{pp} (実効値 2.4kV), DC 電圧は+5kV である。試作イオナイザーは、正に帯電したウェーハの除電時間は約 0.8 秒である。負に帯電したウェーハの除電時間は、表面電位の初期値が-1kV のときは約 2 秒、-2kV では約 2.8 秒となる。また、表面電位の最終値は約-10V である。DC 印加方式による除電の場合と同様に、負に帯電したウェーハの除電は正に帯電したときの除電時間と比較して除電時間が長くなる。

3.3.3 多数ウェーハ積載時の除電時間

図 8(a)(b)は、除電に用いる密閉容器に 5 枚のウェーハを積載し、表面電位を±1kV に帯電させた状態から ACDC 方式で除電したときの除電時間である。ウェーハの間隔は 11mm とした。ウェーハは上段のものから No.1, No.2, ..., No.5 と番号付けし、No.2, No.3 のウェーハを測定した。

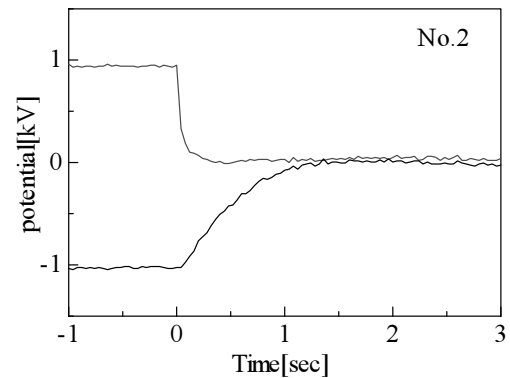


図 8(a) 除電時の表面電位変化 (多段積載, No.2)

Fig. 8(a) Time variation on surface potential during neutralization (multi-wafer, No.2).

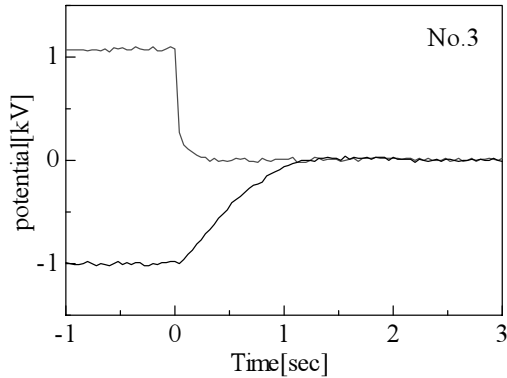


図 8(b) 除電時の表面電位変化 (多段積載, No.3)

Fig. 8(b) Time variation on surface potential during neutralization (multi-wafer, No.3).

ウェーハ上の測定点は図 2 の O 点とした。積載したウェーハ同士の間隔が 11mm のときは、イオナイザーで生成された電荷が到達し、除電が可能である。この場合の除電時間は、表面電位の初期値を +1kV とした場合は約 0.3 秒、-1kV では約 1.2 秒である。ウェーハを負に帯電したときの除電時間は、正に帯電した場合と比較して長くなっているが、この傾向は、ウェーハを 1 枚だけ除電する場合と同様である。

4. まとめ

大気圧下の窒素雰囲気中において、コロナ放電型イオナイザーを用いてシリコンウェーハの帯電と除電を行い、帯電・

除電の面内均一性、イオンバランス、除電時間の測定を行った。DC 印加方式コロナ放電型イオナイザーを用いてシリコンウェーハ表面を帯電させると、正極、負極の両方においてウェーハ面上の表面電位分布は均一になる。帯電したシリコンウェーハを AC 印加方式イオナイザーで除電すると、ウェーハの表面電位は負に帯電する傾向がある。ACDC 同時印加方式イオナイザーを用いて除電を行うと、表面電位は -10V ~ -20V 程度まで低減し、目標値 ±50V を達成した。除電時間 (減衰時間) は、ウェーハ表面が正に帯電するときと比べて負に帯電したときのほうが長くなる。DC 印加方式における除電時間は、ウェーハを表面電位 +1kV に帯電したときは 0.8 秒、-1kV に帯電したときは 3.3 秒である。ACDC 印加方式における除電時間は、ウェーハを表面電位 +1kV に帯電したときは 0.8 秒、-1kV に帯電したときは 2 秒である。また、ウェーハを複数枚積載した状態での除電が可能である。

参考文献

- 1) H. Inaba, T. Ohmi, M. Morita, M. Nakamura, T. Yoshida, T. Okada: IEEE Trans. Semiconduct. Manufactur., **5** (1992) 359
- 2) 二澤正行: 静電気管理入門, 工業調査会 (2004)
- 3) 村田雄司: 静電気の基礎と帯電防止技術, 日刊工業新聞社 (1998)
- 4) J.S.Chang, A.A.Berezin: J. Electrostat., **51** (2001) 64
- 5) A. Ohsawa: J. Electrostat., **63** (2005) 45; *ibid.* **63** (2005) 767; *ibid.* **65** (2007) 598