

uGmniシリーズエッチングモジュール向け 新誘導結合プラズマ源「ISM-duo」

土居謙太^{*1}・中村敏幸^{*1}・浅川慶一郎^{*1}・梶林克明^{*2}・浅野光康^{*2}・上村隆一郎^{*2}

New Inductively Coupled Plasma Source for uGmni Etching Module - “ISM-duo”

Kenta DOI^{*1}, Toshiyuki NAKAMURA^{*1}, Keiichiro ASAKAWA^{*1}, Katsuaki TOCHIBAYASHI^{*2},
Mitsuyasu ASANO^{*2}, and Ryuichiro KAMIMURA^{*2}

^{*1}Institute of Advanced Technology, ULVAC, Inc., 1220-1 Suyama, Susono, Shizuoka 410-1231, Japan

^{*2}Advanced Electronics Equipment Division, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa 253-8543, Japan

Our new plasma source “ISM-duo” enables the controllability of in-wafer etching rate uniformity for uGmni etching module. ISM-duo consists of an RF current distribution unit and two separated ICP antennas placed coaxially so as to control the spatial distribution of a plasma generated in the process chamber. The RF current distribution to each antenna is performed at an arbitrary ratio without depending on process parameters such as gas type, and changing the distribution ratio does not disturb the impedance matching. These features allow a stable operation of the etching rate uniformity control via optimizing the RF current distribution ratio for various processes. ISM-duo delivers a new process tuning knob enlarging the process window in our etch module.

1. はじめに

uGmniエッチングモジュール販売開始前より、当社エッチング装置「NE-series」はGaAsやInP、GaN、SiC等の化合物半導体、SAW/BAWやパワーデバイス等のメタル配線、Piezo-MEMSに用いるPZTやSc添加AlN等の圧電膜といったエッチング用途に広く利用されている。昨今のICT/IoTを基礎とする未来社会 Society 5.0¹⁻³⁾の実現に向けては、これらの電子デバイス需要が拡大することを意味し、基板の大口径化と大量生産が見込まれる。また、通信周波数の広帯域化^{4, 5)}による高周波デバイスの加工寸法の微細化^{5, 6)}を例に、加工要求を満たすための難易度も増すことから、歩留まり向上のためにもプロセスウィンドウの拡大が強く求められている。

ドライエッチングプロセスにおけるウェーハ面内分布は、ガス種やプロセス圧力、投入電力をはじめとするプロセスパラメータに依存する。エッチングレートや選択比、加工形状もまたそれらのプロセスパラメータに依存するものであり、面内分布と上記の他のプロセス要求項目との間にはトレードオフが発生しやすい。

この問題に対処し、プロセスウィンドウを拡大させることを目的に、プロセスパラメータとは別にエッチング面内分布を制御可能な新たなプラズマ源ISM-duo (ISM: ICP with Static Magnetic field, duo: distribution uniformity optimizable) の開発に至った。

誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma, ICP) はコイルに高周波電流を流すことで発生させる。ICPの等価回路が変圧器として表されるように、ICPアンテナに高周波電流を流すことで発生する変動磁場によってプラズマには渦電流が流れる。その渦電流発生の結果として高周波電力がプラズマに伝達され、放電が維持される。つまり、プロセスチャンバー内の高周波変動磁場強度の空間分布を調整することでプラズマの空間分布を制御できる。ISM-duoは、プロセスチャンバー上部の内・外周に設置された2系統のICPアンテナと高周波電流分配器で構成されるプラズマ源である。内・外周のICPアンテナに高周波電流を任意の比率で分配し、高周波変動磁場強度の空間分布、ひいてはプラズマの空間分布を制御することが可能である。それにより、ガス種やプロセス圧力、投入電力をはじめとするプロセスパラメータは固定のまま、高周波電流分配比率の調整のみでエッチング面内分布の制御が可能となった。本稿では、ISM-duoのコア技術である高周波電流分配器⁷⁾の設計思想と電氣的動作について解説し、実際のエッチングプロセスにおける面内分布制御性についてデータをもとに紹介する。

^{*1} (株)アルバック 先進技術研究所
(〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-1)

^{*2} (株)アルバック 電子機器事業部
(〒253-8543 神奈川県茅ヶ崎市萩園2500)

2. 設計上考慮すべき要素

並列に接続された複数系統への高周波電流の分配比率の変更は、各系統のインピーダンス調整によって行われる。Fig.1 (a) のように、並列の各系統にインピーダンスを可変させる素子（可変容量コンデンサなど）を挿入し、各系統のインピーダンスの差に基づいて高周波電流の分配を行う。ここで、 L_A 、 L_B はそれぞれの ICP アンテナのインダクタンス、 R_A 、 R_B はそれぞれの ICP アンテナの抵抗成分である。Fig.1 (a) の回路の場合には、例えば、各 ICP アンテナに直列に接続した可変容量コンデンサ C_1 、 C_2 の容量を Fig.1 (b) のように負比例の関係とする。これにより、各系統のインピーダンスの関係は Fig.1 (c) のように C_1 を変数とした際に交わる形で変化する。その各系統のインピーダンスの関係に応じて、各系統に流れる高周波電流も分配されるため、 C_1 を変数とした際に Fig.1 (d) の特性を示す。上記が複数系統への高周波電流の可変分配の基本原則である。

実際に様々なプロセス条件下で放電を行うプラズマ処理装置では、プラズマとの結合によって各系統のインピーダンスが無負荷の状態から変化する。その結果、

分配比率が無負荷時の理論インピーダンスより設定した値から乖離する想定外の状態となり得る。以下には、プラズマ生成時のインピーダンス変化の現象について詳細を記す。

ICP 生成用高周波回路の電気回路図を考える場合、Fig.2 のように、ICP アンテナは抵抗成分 R_i とインダク

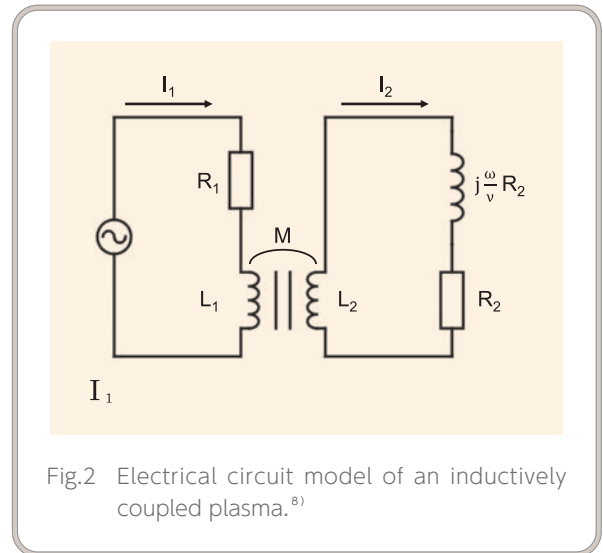


Fig.2 Electrical circuit model of an inductively coupled plasma.⁸⁾

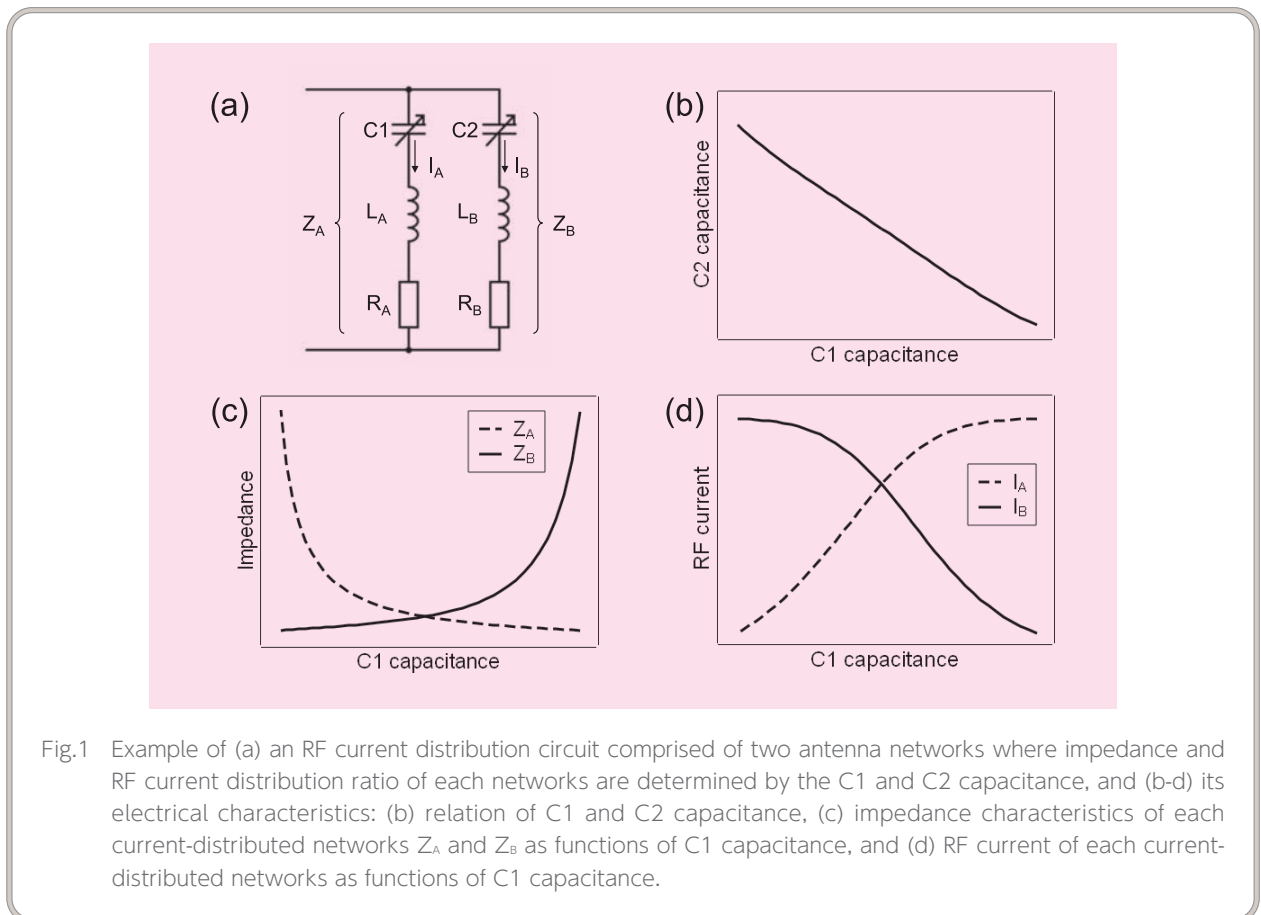


Fig.1 Example of (a) an RF current distribution circuit comprised of two antenna networks where impedance and RF current distribution ratio of each networks are determined by the C_1 and C_2 capacitance, and (b-d) its electrical characteristics: (b) relation of C_1 and C_2 capacitance, (c) impedance characteristics of each current-distributed networks Z_A and Z_B as functions of C_1 capacitance, and (d) RF current of each current-distributed networks as functions of C_1 capacitance.

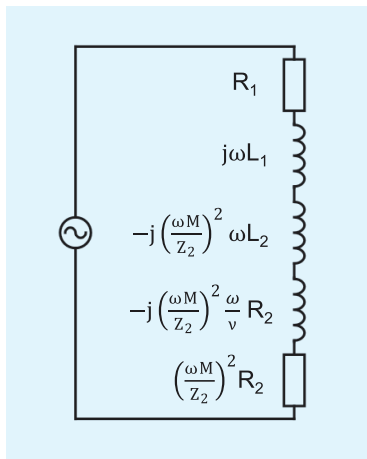


Fig.3 Equivalent circuit of an inductively coupled plasma.⁸⁾

タンス L_1 をもつ変圧器の1次側コイル、放電はインダクタンス L_2 をもつ2次側コイルであるとみなせる⁸⁾。ここで、 R_2 はプラズマ負荷インピーダンスの抵抗成分である。簡略化のため、整合器および高周波電流分配機構は回路図に含めていないことに注意されたい。角周波数 ω の高周波電流 I_1 がICPアンテナに流れることで放電空間に高周波磁場が生成される。これにより、2次側回路であるプラズマに渦電流 I_2 が流れ、高周波電力が伝わることでプラズマが生成維持されるという構図として理解が可能である。Fig.2の変圧器で表されるICPの回路モデルを直列等価回路で表すとFig.3となる⁸⁾。このように、ICPを含む高周波回路のインピーダンスにはプラズマとの結合による抵抗成分 R_2 、インダクタンス L_2 が定数として加わることがわかる。加えて、2系統のICPアンテナがそれぞれの近傍に配置される場合、相互誘導作用により見かけ上のリアクタンス変化が生じることに注意が必要である。放電時には、それらのインピーダンス変化によって、無負荷時のインピーダンス理論値より定めた分配比率設定が成立しないこととなる。また、上記インピーダンス変化はガス種をはじめとする放電条件に依存する。そのため、安定的な分配動作、すなわち多様な放電条件における同様な分配特性およびインピーダンス整合を保証するためには常時インピーダンス変化を相殺する動的な制御を取り入れた構造が望まれる。

3. 高周波電流分配器の構造とその電氣的動作⁷⁾

ISM-duoの高周波電流分配器は、分配比率と総合インピーダンスが条件に大きく依存することなく安定し

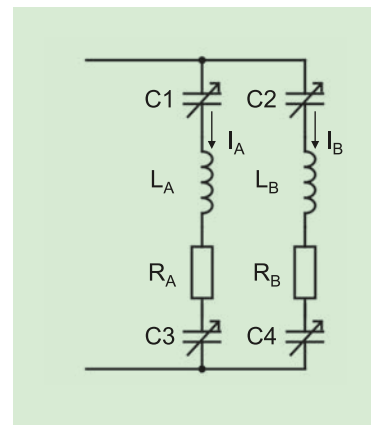


Fig.4 Electrical circuit diagram of RF current distribution unit of ISM-duo. The capacitance C1 and C2 determine the impedance and RF current distribution ratio of each networks while C3 and C4 are employed to minimize impedance change of each networks due to coupling to a plasma and mutual induction.

た動作が可能な設計となっている。いかなるプロセス条件においても同様の分配性能を保証するため、C(L)Cの直列接続による高周波電流分配器を開発した。Fig.4に回路構造を示す。各系統のインピーダンスを調整し分配比を決定するための可変容量コンデンサC1, C2が電力入力側（整合器側）に設けられ、リターン（GND）側にはプラズマとの結合時に発生するICPアンテナのインピーダンス変化を相殺するための可変容量コンデンサC3, C4が設けられる。C1およびC2は、Fig.1の回路と同様にその容量をFig.1(b)のように負比例の関係性を持たせてある。C3およびC4はそれぞれ同心円状に設けられた内側環状ICPアンテナ L_A および外側環状ICPアンテナ L_B とLC直列共振となるように動的にポジション（容量）を自動制御することで、各系統のICPアンテナとリターン側コンデンサ（C3またはC4）の直列部のインピーダンスが常に抵抗成分 R_A , R_B のみとなる。これにより、放電状態の違いによるインピーダンスの差異を最小限に抑えることが可能となる。この動的かつ自動のLC直列共振制御によって、回路全体を捉えた場合に分配比率を変化させてもインピーダンスの変化が最小限に抑えられ、インピーダンス整合の安定性が向上する利点がある。抵抗成分 R_A , R_B の値は大きくなく、回路は実質的にC1, C2の並列回路とみなせる状態となる。つまり、C1, C2のみが主な素子として総合インピーダンスに寄与する。C1, C2は負比例の関係性を与えられているため、合成容

量は常に一定値である。よって、分配比率を変化させても大きなインピーダンスの変化が発生しない。また、C2はC1に合わせて負比例の関係で自動動作、C3およびC4は上記のように自動制御されるため、C1の容量またはポジションのみを設定するだけで分配動作が可能な扱いやすいものとした。使用者は予め用意された分配特性グラフ（例えば、Fig.1-d）を参照しながらC1のポジション（容量）のみを設定することで所望の電流分配が行える。

ISM-duoの放電動作試験をuGmni-200Eエッチングモジュール（Fig.5）に搭載し実施した。Fig.6には放電時の内側環状ICPアンテナ（a）と外側環状ICPアンテナ（b）の高周波電流分配特性および総合インピーダンス（c）の試験結果を示している。Fig.6(c)にはスター電極への通電有無を比較するデータを示しているが、スター電極については本章では解説しておらず、次章を参照されたい。Fig.6(a)および(b)より、C1ポジション（容量）を入力（変数）として内外環状ICPアンテナに流れる高周波電流が任意の比率で分配される特性が確認でき、異なるガス種においても同等の特性で内外ICPアンテナへの電流分配が行えることを示す結果となった。また、Fig.6(c)より、総合インピーダンスは分配比率を変更しても大きく変化しておらず、ISM-duoの動作安定性が確認された。ここで、総合イ

ンピーダンスとは整合器出力端子から見た分配器とICPアンテナ、プラズマを含む実負荷のインピーダンスである。つまり、50Ωに整合制御するインピーダンスそのものであり、ガス種や分配比率に大きく依存することなく整合安定性が高いことを示す結果となった。先述の通り、C3、C4の各ICPアンテナとのLC直列共振制御によって、放電条件依存性のあるアンテナのリア



Fig.5 uGmni-200 system with a single etch module.

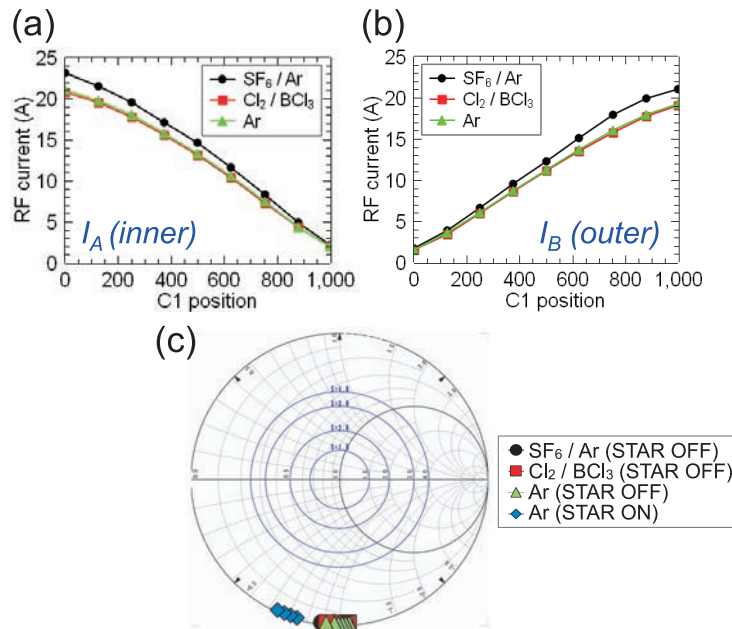


Fig.6 Electrical characteristics of our RF current distribution unit: RF current distributed to the (a) inner and (b) outer annular antennas, respectively, as functions of C1 position for discharges of several process gases, and (c) a corresponding impedance chart of the entire load including the RF current distribution circuit, and both inner and outer antennas.

クタンス成分を常に相殺しているため、総合インピーダンスの変化が抑えられている。

4. ISM-duo専用設計ICPアンテナ

ISM-duo専用設計ICPアンテナは従来のISMプラズマ源⁹⁾が持つ有磁場ICPの特徴を踏襲した上でエッチング面内分布の制御を可能とする設計となっている(Fig.7)。プラズマの空間分布制御のため、同心円状に配置された内側環状ICPアンテナと外側環状ICPアンテナをプロセスチャンバー上部大気側に有する。それら2つの独立したICPアンテナをFig.4の L_A および L_B のように高周波電流分配と接続し、高周波電流分配比率を変更することでプラズマの空間分布制御が実現する。磁場アシストにより、他のICP方式より低圧、低電子温度、高密度のプラズマが発生でき、イオン性エッチングからラジカル性エッチングまで幅広いプラズマ制御が可能である。

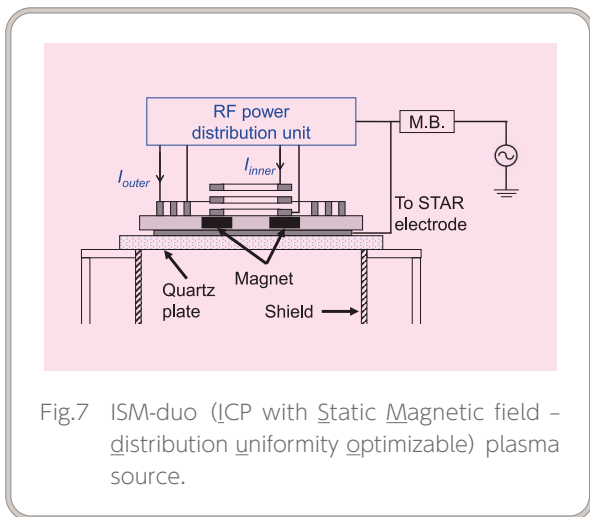


Fig.7 ISM-duo (ICP with Static Magnetic field - distribution uniformity optimizable) plasma source.

また、RF投入窓への導電性堆積物の付着は、RF電力透過率を低下させ、その結果としてエッチングレート低下などのプロセスシフトを引き起こす。ISM-duoは、従来通りRF投入窓の堆積膜付着防止用「スター電極¹⁰⁾」も搭載しており、RF投入窓への堆積物付着が懸念されるPZTやPtなどのチャンバー内に残留物が多く生じるエッチングプロセスにも引き続き対応する。Fig.6(c)には、スター電極通電時に分配比率を変化させた際の総合インピーダンスも示している。STAR電極への通電有無によるインピーダンス変化は小さく、通電時においても分配比率に大きく依存することなく整合安定性が高いことを示す結果となった。このように、ISMやスター電極を代表とする従来技術はそのままに、エッチング面内分布の制御機能を追加した。

5. プロセス事例 エッチング面内分布制御について

ISM-duoをuGmni-200Eエッチングモジュールに搭載し、エッチングレート面内分布の制御性を評価した。高周波電流分配比率を変化させた際のポリシリコンエッチング面内分布をFig.8に示す。塩素プラズマによる $\phi 200$ mmウェーハのエッチングの結果である。分配比率を変更することでエッチングレート面内分布の凹凸制御が可能なが確認できる。圧力や投入電力などのプロセスパラメータを調整することなく、分配比率の変更のみでエッチングレート面内分布の最適化が可能である。例えば、今回のポリシリコンエッチングの場合、外側環状ICPアンテナへの高周波電流分配比率を高めると凹形状、反対に内側環状ICPアンテナへの分配比率を高めると凸形状のエッチング面内分布が得られる。分配比率の最適化によってエッジカット

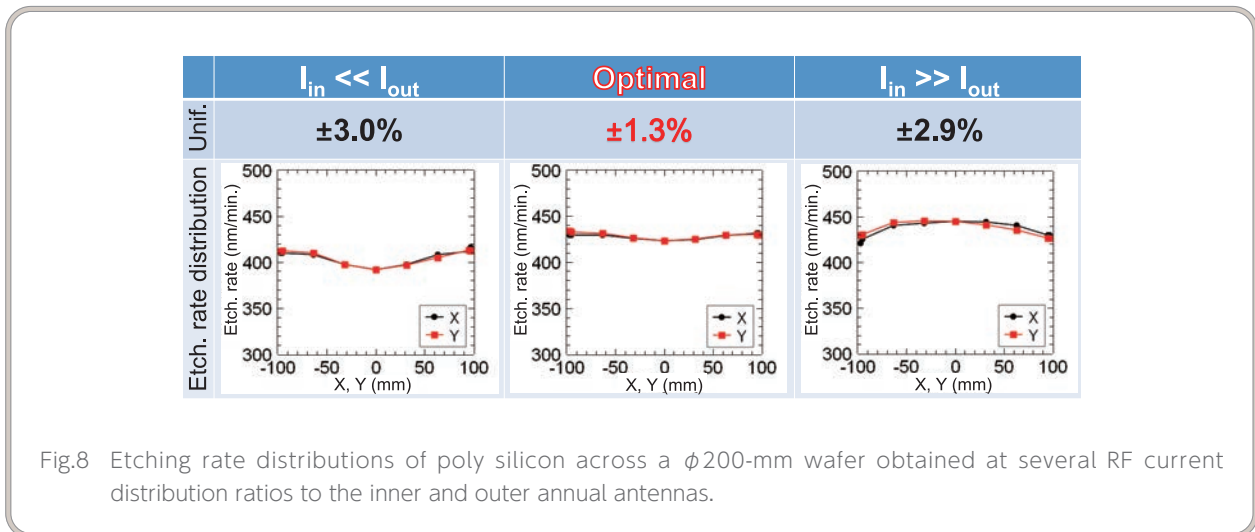


Fig.8 Etching rate distributions of poly silicon across a $\phi 200$ -mm wafer obtained at several RF current distribution ratios to the inner and outer annual antennas.

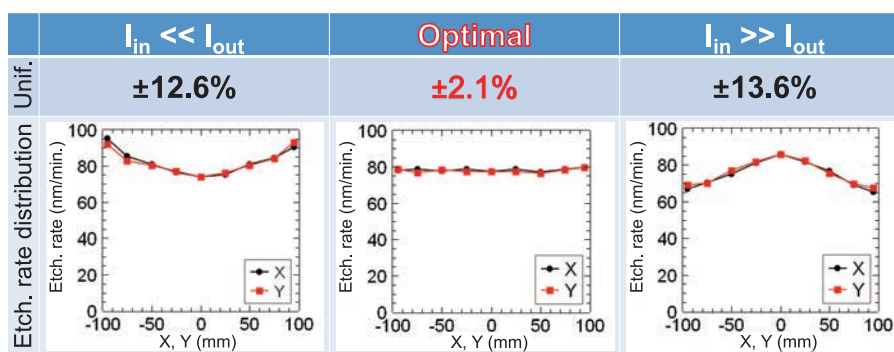


Fig.9 Etching rate distributions of aluminum across a $\phi 200$ -mm wafer obtained at several RF current distribution ratios to the inner and outer annular antennas.

3 mmで $\pm 1.3\%$ の面内均一性が得られる結果となった。

次に、様々なプロセスにおける面内分布制御性の検証のため、Alエッチングの実プロセス試験を実施した。エッチング面内分布をFig.9に示す。Alにおいてもポリシリコンの場合と同様に、圧力や投入電力などのプロセスパラメータは変更することなく、分配比率の調整のみで面内均一性の最適化が行える結果となった。この結果はパターンの都合上エッジカット5 mmのものである。

6. むすび

エッチング面内分布の調整を行うための機構を備えた新プラズマ源「ISM-duo」の特徴とその面内分布制御性について報告した。ISM-duoは、ガス種をはじめとするプロセス条件に依存することなく、高いインピーダンス整合安定性をもって、高周波電流を2系統のICPアンテナに分配可能な高周波電流分配器を備えている。分配器と専用設計ICPアンテナの組み合わせによって、あらゆるプロセス条件下でプラズマの空間分布を制御することができる。それにより、幅広いプロセスでのエッチング面内分布制御性を実現することが確認された。ISM-duoの導入により得られたエッチング面内分布制御性は、デバイスの加工寸法の縮小や基板の大口径化によるプロセスの複雑化に対応して、プロセスウィンドウの拡大に貢献するものである。我々の技術によりエレクトロニクス産業を支えることで、より豊かで安心・安全な未来の実現の力になりたいと考えている。

文献

- 1) 内閣府 (2016) 「第5期科学技術基本計画」内閣府, URL: <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkei kaku/index5.html>.
- 2) 文部科学省 (2021) 「令和3年版 科学技術・イノベーション白書 Society 5.0の実現に向けて」文部科学省, URL: https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa202101/1421221_00023.html.
- 3) A. Deguchi, C. Hirai, H. Matsuoka, T. Nakano, K. Oshima, M. Tai and S. Tani: "What Is Society 5.0? In: Hitachi-UTokyo Laboratory (H-UTokyo Lab.) (eds) Society 5.0" (Springer, Singapore, 2020).
- 4) H.-J Song and T. Nagatsuma: IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **1**, 256 (2011).
- 5) 加々見修, "テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発" (総務省電波資源拡大のための研究開発第9回成果発表会資料, 2016).
- 6) A. K. Sarin Kumar, P. Paruch, J.-M. Triscone, W. Daniau, S. Ballandras, L. Pellegrino, D. Marré and T. Tybell: Appl. Phys. Lett., **85**, 1757 (2004).
- 7) 土居謙太, 中村敏幸: 特許7052162 (2022).
- 8) R.B. Piejak, V.A. Godyak and B.M. Alexandrovich: Plasma Sources Sci. Technol., **1**, 179 (1992).
- 9) 渡辺一弘, 生田美植, 遠藤光広: 特開平07-161488 (1995).
- 10) 渡辺一弘, 生田美植, 遠藤光広: 特開平08-316210 (1996).