

平成 29 年度中小企業経営支援等対策費補助金
戦略的基盤技術高度化支援事業

「準共鳴型電子サイクロトロン共鳴技術に基づく小型・高密度プラズマ
源の開発と、これをコア技術とする 3DIC 作製を目的とした高速ミニマ
ルエッチング装置の開発」

成果報告書

平成 30 年 3 月

公益財団法人 九州先端科学技術研究所

目 次

第 1 章	研究開発の概要	P3
1-1	研究開発の背景	P3
1-2	研究目的および目標	P5
1-3	研究体制	P7
1-4	研究開発の成果概要	P7
1-5	当該研究開発の連絡窓口	P8
第 2 章	本論	P8
2-1	高速エッチングシステム開発	P8
2-1-1	準共鳴型 ECR プラズマ源の構造最適化	P8
2-1-2	電圧・温度・磁場印加ステージの開発	P14
2-2	ミニマル装置化	P19
2-2-1	マッチングレス電源によるプラズマ生成	P19
2-2-2	システムレイアウトの最適化	P22
最終章	全体総括	P36

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景

3次元集積回路（3DIC）とは、異なる機能を持つ半導体層を積み重ね、層に垂直に配線してひとつの部品としたもので、大量の機能を小さな面積に詰め込める。センサや電力制御用半導体など大きな市場への展開が期待されており、現在精力的に開発が進んでいる。

多機能である 3DIC の用途においては、同一素子の必要数は必ずしも多くない。その点、大量生産を旨とする単機能 IC とは大きく異なる。従来の半導体製造では、スケールメリットを活用した大規模工場（メガファブ）での大量生産が主流であったが、多品種少量（変量）生産に適する 3DIC 製造には向いていない。この問題を解決するものが、ニーズの多様化に対応した多品種少量生産を目的とした新しい半導体デバイス生産システム（ミニマルファブ）である。



図1 メガファブシステムに対するミニマルファブシステムの利点

メガファブでは莫大な大型装置導入コストを量産効果によりカバーしてきた。一方ミニマルファブは 1/2 インチ基板を使用し、装置自体も大幅に小型化される（幅 30cm 筐体）。このため、半導体製造ライン一式を桁違いに少ない設備投資で実現できる。このような背景に基づき、3DIC 製造プロセスの各要素技術を実現するミニマル装置開発が現在活発に進められている。その中で、3DIC に必須の貫通電極を形成するための貫通穴形成技術のみ、ミニマル装置化が進んでいない現状があった。

貫通穴形成には“エッチング”と呼ばれる、材料の一部を削り取る構造加工技術を用いる。3DIC では複数半導体層を接続する垂直配線（シリコン貫通電極：TSV と呼ぶ）用のシリコン深掘りエッチングが必要になるが、ミニマルファブにおいて現在使用可能な深掘り可能なエッチング装置では TSV 用貫通穴形成に必要とされる仕様を満たすことが原理的に難しい。その理由を以下に示す。

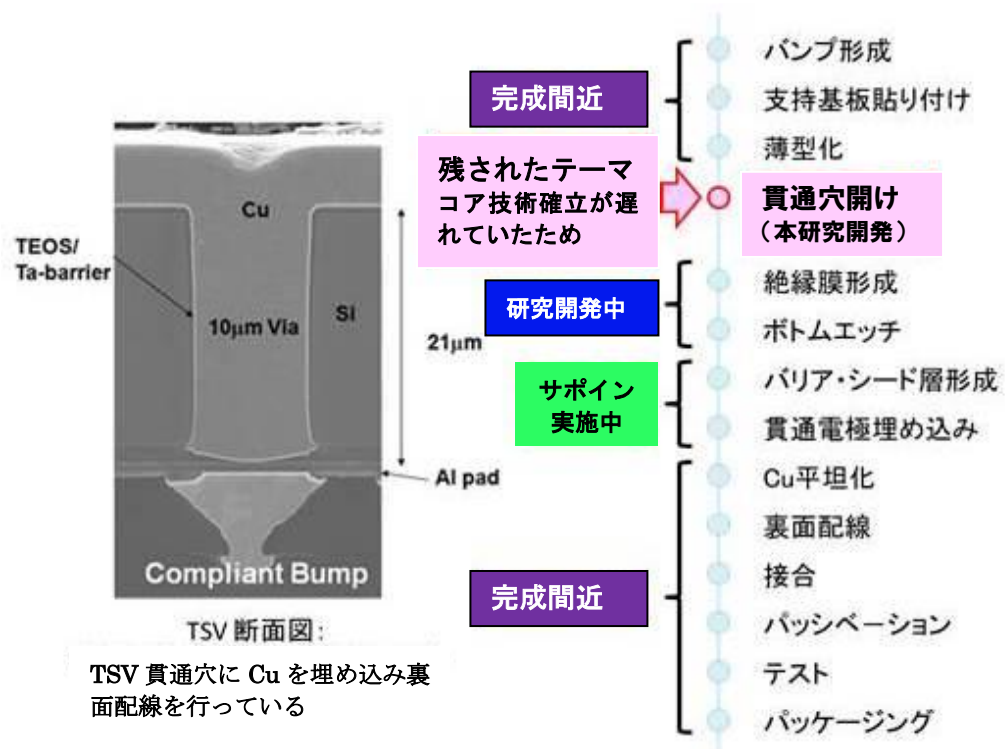


図2 ミニマル 3 次元半導体 IC・実装プロセスの現状

- ◆ 開発中のミニマルエッチング装置はボッシュプロセス（エッチングと側壁保護プロセスを交互に繰り返す）を用いている。
- ◆ ボッシュプロセスは形状制御性が高いが、高速エッチングを行うと原理的に側壁荒れが抑制できない。
- ◆ 側壁荒れがあると、電極埋込工程において不良が出るため TSV として使用できない。
- ◆ 側壁荒れを抑制するため細かく工程を繰り返した場合、トータルのエッチング速度低下が避けられない。現装置の実績値では $1.6\mu\text{m}/\text{min}$ 程度で、高速処理が必要なミニマルファブ用途では必要とされる速度がもう 1 桁高い。

以上の理由から、ミニマルにおける 3DIC 向け貫通穴加工には繰り返し工程ではないノンボッシュプロセスによる高速・高アスペクトエッチングシステムが必要とされる。形状制御性に優れたボッシュ法と側壁荒れの少ないノンボッシュ法は、ミニマルファブにおいても用途によって棲み分けるべき（両立すべき）技術と言える。

ノンボッシュプロセスによる高速ミニマルエッチングに対しては、これを可能とする基礎技術が確立されていなかった。これを実現するための重要な要素の 1 つは高速エッチングを可能とする高いプラズマ密度であり、メガファブにおける実績値から $10^{12}/\text{cm}^3$ の密度が必要と考えられる。メガファブでは高電力投入により高プラズマ密度生成が可能であるが、ミニマル装置では同等プラズマ密度 ($10^{12}/\text{cm}^3$) を小電力・小空間において実現しなければならない。これは従来技術の単なる延長では到達困難な目標値であった。

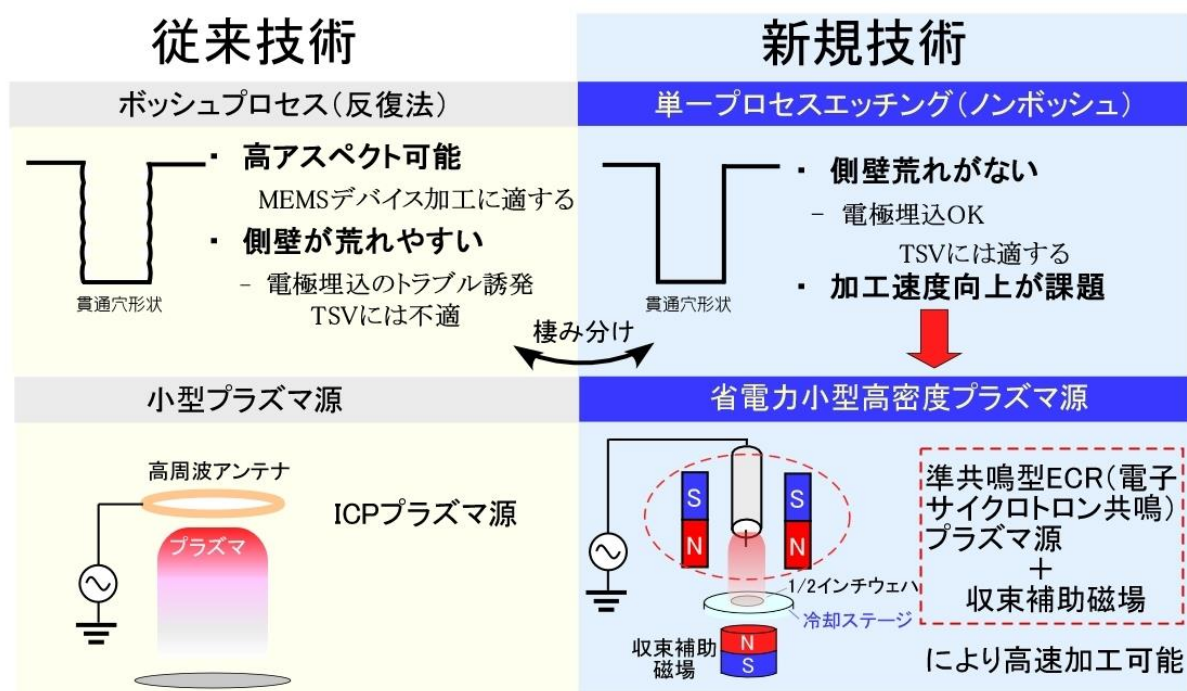


図3 3DIC 製造用高速ミニマルエッチング装置の構想

1-2 研究目的および目標

TSV 貫通孔形成用のノンボッシュ型エッチング装置をミニマルシステムとして完成させ、ミニマル 3DIC 製造ラインを実現することを目標に研究を進める。これを達成するため、微細空間でのプラズマ生成に適し低電力で高密度プラズマが形成できる新技術「準共鳴型電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマ」を長崎大学より導入し、ミニマル装置化を実施する。

この目標を実現するため、以下に特に重要とされるミニマル装置化に対するシステム面および研究面から課題を抽出し、研究開発項目(サブテーマ)を図4のように設定した。

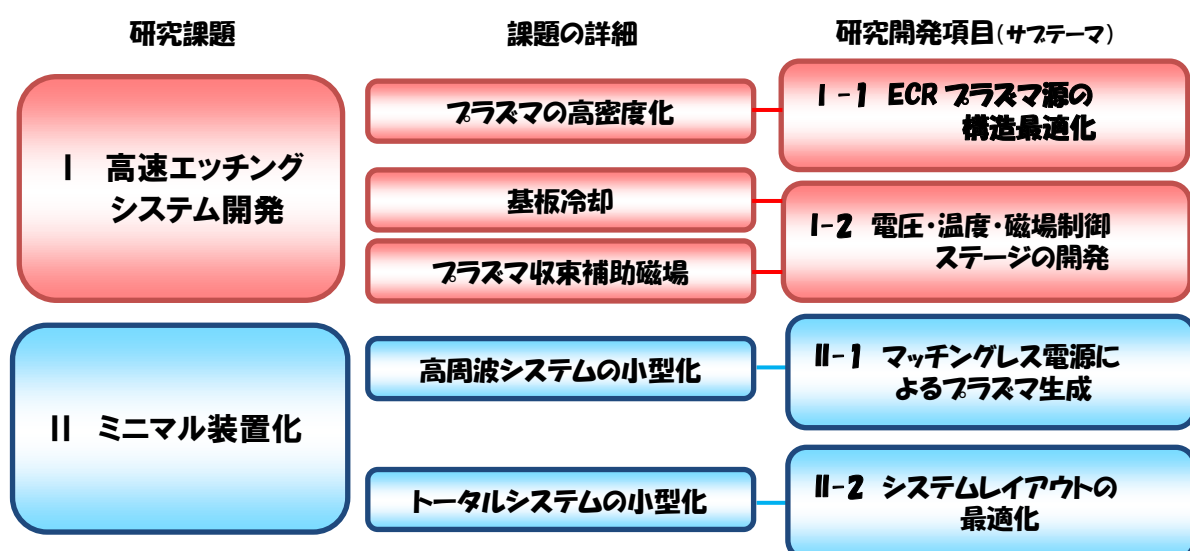


図4 3DIC 製造用高速ミニマルエッチング装置実現に向けた研究開発項目

また、目的の達成が可能なミニマル装置完成に必要なと考えられる最終目標（数値目標）と、それを実現するための開発方針をサブテーマごとに以下のように設定した。

【Ⅰ－１ 準共鳴型 ECR プラズマ源の構造最適化】

「準共鳴型 ECR プラズマ源」の生成するプラズマ密度については、本事業開始以前の平成 26 年研究実績（長崎大学における）において、すでに $10^{11}/\text{cm}^3$ 台とかなり高い値に到達していた。しかしながら、大型（メガファブ）エッチング装置における過去実績から判断すると、本研究の目標値であるエッチング速度を実現するには、この実績値のさらに 2~3 倍のプラズマ密度が必要であろうと予想された。そこでプラズマ源構造、特に磁石形状およびその配置最適化によりプラズマ密度増強を図る。目標値は「プラズマ密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ 」と設定した。

【Ⅰ－２ 電圧・温度・磁場制御ステージの開発】

基板冷却が不十分であるとレジスト膜の熱変形等の要因により、加工形状の精密制御が不可能になる。しかしながら、ミニマル装置のような小型機では大型機と同じ基板ステージ冷却技術を適応することが容易ではない。そこで数値シミュレーションを用いた構造最適化をすすめ、小型かつ基板冷却能力に優れた基板ステージを開発する。基板ステージにはエッチングを加速するためにバイアス印可が必要であるので、この機構もステージに組み込む。さらに本事業ではエッチングプロセス高速化を狙い、プラズマ収束補助磁場発生機構を同時に基板ステージに組み込み、電圧・温度磁場制御ステージを完成させることを目標とする。数値目標としては、エッチング速度の確保とプロセス時の基板温度が重要であるとの観点から

- ・ 基板上のプラズマ密度 $\geq$ プラズマ源の発生プラズマ密度の 80%
- ・ プロセス時の基板温度 $\leq 80^\circ\text{C}$

の 2 つを設定した。

【Ⅱ－１ マッチングレス電源によるプラズマ生成】

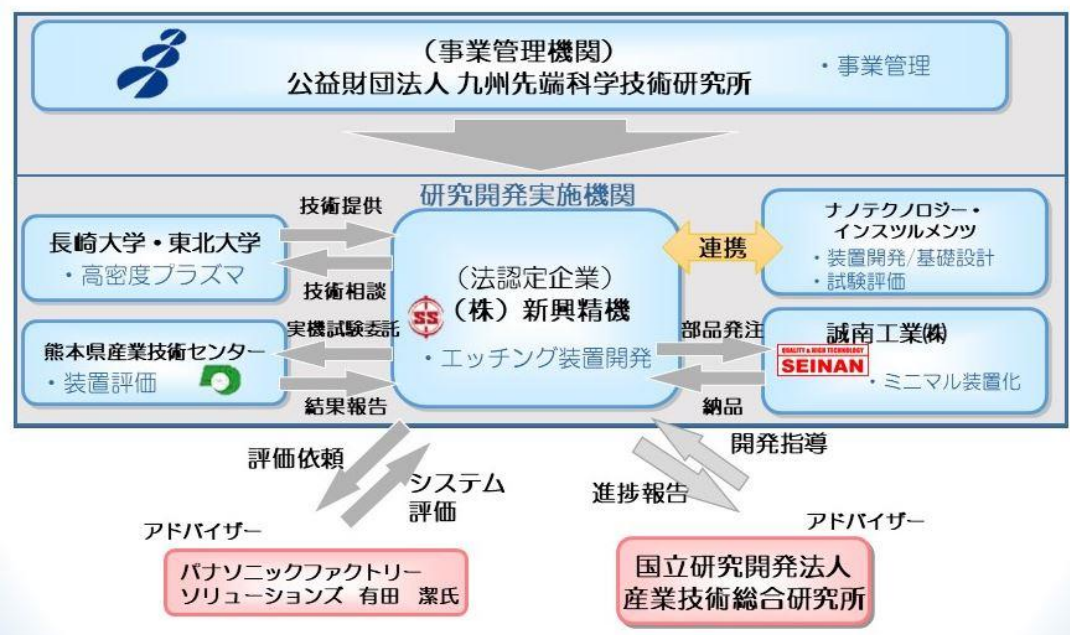
プラズマ生成に必要なマイクロ波電源システムは通常大型で、ミニマルファブ規格に対応できるサイズに収まらない。本事業では、通常はプラズマ源－電源間に通常設置されるインピーダンスマッチング機構（可変整合機構）を最終的に排除した設計とすることで小型化・省スペース化を図り、ミニマル装置化に対応する計画である。また基板バイアスに関しては、通常の RF 電源(13.56MHz)に代えて数百 kHz 電源を用いることでマッチング回路を排除できると考えられるため、この方向で開発を進めることで基板バイアス電源の小型化を試みる。両電源をミニマル筐体に組み込み、これらで運用可能な装置を実現することを目標とする。数値目標としては、「ミニマル筐体内に設置できるサイズ（ $\leq 340 \times 200 \times 150\text{mm}^3$ ）のマイクロ波電源を用いプラズマ密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ 達成」とした。

【Ⅱ－２ システムレイアウトの最適化】

プラズマ源以外の要素も含め、必要機能・機構を規格化されているミニマル筐体内に納めて、装置として運用可能にすることを一つ目の目標とする。ただし、特殊ガス使用のためガス供給源の筐体組み込みは本事業後の開発案件とする。また、排気ガス処理は外部に共通で設ける可能性が高いため組み入れない。二つめの目標は、本開発装置により実際にシリコンミニマルウェハをエッチングし、 $50\mu\text{m}$ 深さのエッチングが数分内に形成可能であることを示すこと

である。数値目標としてはエッチング速度 $>10\mu\text{m}/\text{min}$ と設定した。

1-3 研究体制



各メンバーの開発における担当範囲概略は以下の通りである。

- ・ 新興精機 (PL)：基板ステージの設計とミニマル装置の組み立て。開発結果の集約。
- ・ ナノテクノロジー・インスツルメンツ (SL)：温度制御構造の設計、エッチングプロセス解析、装置性能解析と性能向上方法の探索。
- ・ 東北大学：小型電源開発および長崎大より技術供与を受けた新型プラズマ源の改良設計。
- ・ 長崎大学：新型プラズマ源の開発および基礎特性評価。
- ・ 誠南工業：ミニマル装置化および装置改造・改良に必要な装置部品の製造。
- ・ 熊本産業技術センター：ミニマル装置性能評価、計測データ解析。

1-4 研究開発の成果概要

1. 高速エッチングシステム開発

サブテーマ	目標値	補足説明
I-1. 準共鳴型 ECR プラズマ源の構造最適化	プラズマ密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$	・ 150W 以下の電力で源の発生プラズマ密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ を達成した。
I-2. 電圧・温度・磁場印加ステージの開発	基板上プラズマ密度 $\geq$ 源の発生プラズマ密度の 80%	・ 実験機において、基板上プラズマ密度 $\geq$ 源の発生プラズマ密度の 80%を達成した。
	プロセス時の基板温度 $\leq 80^\circ\text{C}$	・ 改良ステージを実機に組み込み済み。 ・ サーモラベルで基板温度上昇を約 80°C に抑制できることを確認済み。

2. ミニマル装置化

サブテーマ	目標値	補足説明
II-1.マッチングレス電源によるプラズマ生成	サイズ $\leq$ $340 \times 200 \times 150 \text{ mm}^3$ の小型電源を用いプラズマ密度 $\sim 10^{12} / \text{cm}^3$	・ サイズ $\leq 340 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ のマイクロ波電源完成・搭載。 ・ この電源を用い 100W 投入で $10^{12} / \text{cm}^3$ に相当するイオン電流確認済み。
II-2.システムレイアウトの最適化	試作機完成	・ マイクロ波電源等、根幹となる機能・部品をミニマル筐体に収めた試作機を完成。
	エッチングガス供源・排ガス処理を除いた必要機能をミニマル筐体内に収納	・ ミニマルファブの統一規格により定められた筐体サイズに必要な機能を収納可能とした。
	エッチング速度 $> 10 \mu\text{m}/\text{分}$ ($50 \mu\text{m}$ 深さのエッチングが数分内に形成可能)	・ Si ウェハを用いた試験の結果、 $10 \mu\text{m}/\text{分}$ のエッチング速度を確認できた。

以上のとおり、設定目標に関しては全て達成できた。

1-5 当該研究開発の連絡窓口

装置全般に対して

所属：株式会社新興精機

氏名：大嶺 祐平

電話：093-603-5680

e-mail：o-mine@shinkouseiki.co.jp

技術内容に関して：

所属：ナノテクノロジー・インスツルメンツ株式会社

氏名：金井真樹（かないまさき）

電話：06-6682-6750

e-mail：kanai@ntechi.co.jp

第2章 本論

2-1 高速エッチングシステム開発

2-1-1 準共鳴型 ECR プラズマ源の構造最適化

ミニマル装置化を目指して、準共鳴型 ECR プラズマ源のさらなる小型化を目標とし、源構造を改良し、そのプラズマ特性を調べた。具体的には、発生磁場強度および電極-磁石の相対位置を最適化することで、より高いプラズマ密度が得られる条件を探索した。磁石材料としてフェライト磁石を用い、磁石形状の変更により磁場強度プロファイルを変えてデータを収集した。図 5 は、準共鳴型 ECR プラズマ源を使用したプラズマ密度評価装置の構造図である。

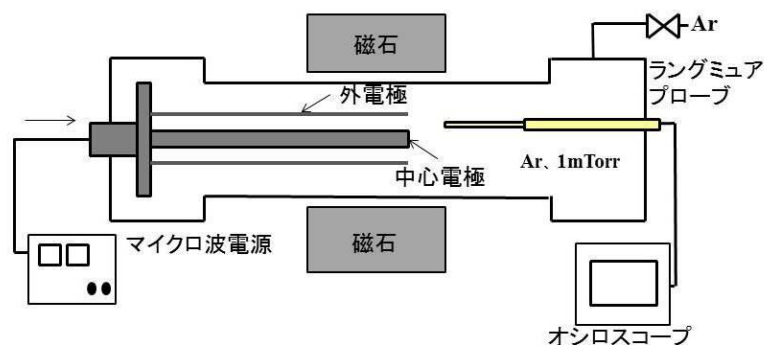


図5 プラズマ密度評価装置の構造図（長崎大学より）。右側のラングミュアプローブを使用して密度を評価する。

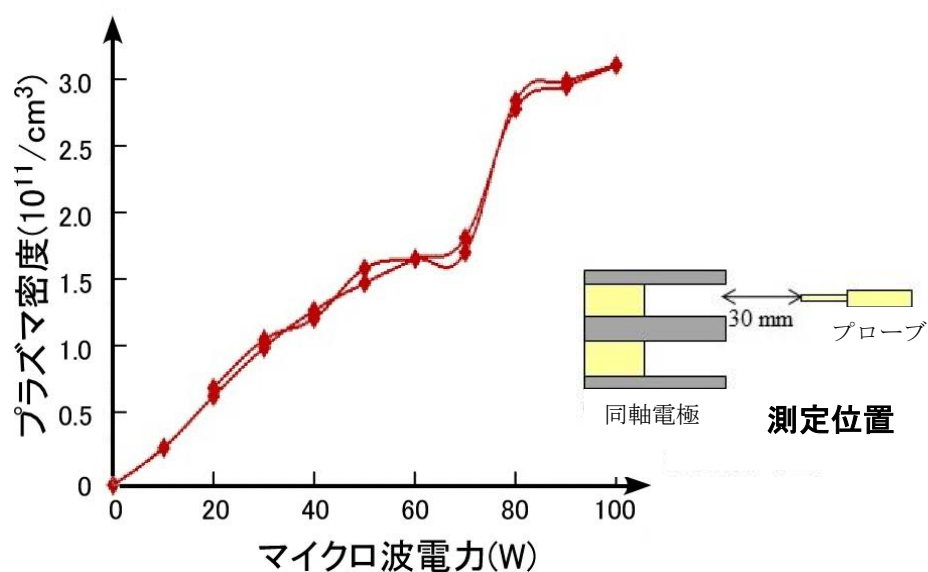


図6 準共鳴型 ECR プラズマ源における投入電力とプラズマ密度の相関。Ar : 1mTorr 下、プローブ電圧 : -20V、プローブ先端－プラズマ源出口間距離 : 30mm の条件での測定結果である。

図6に現在までに得られている最適条件における、投入電力とプラズマ密度の相関を示す。測定はArガス雰囲気、1mTorr下で行った。ただし、プラズマ密度が高くなるとプローブの破損等が生じやすいため計測が非常に困難になる。そこで図6では以下のような手法でデータをプロットしている。

- 低密度であれば、プローブに流れる電子電流の解析により、プラズマ密度（電子密度）が測定可能である。そこで低電力で発生するプラズマ密度をプローブによりまず測定した。実測では10Wの電力印加により $2.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ の数値が得られた。
- 投入電力を上げながら、飽和イオン電流をプローブ電圧 : -20V で測定した。プラズマの性質が大きく変化しないという仮定の下に、飽和イオン電流はプラズマ密度に比例すると考えられる。
- 上記仮定の下に、飽和イオン電流の計測値に10Wで計測されたプラズマ密度から得られた補正係数を掛け、イオン電流からプラズマ密度に変換した値を縦軸に用いた。

特長として、

1. 非常に低電力でプラズマが生成する。
2. 投入電力を 10W から 50 W にすることで、プラズマ密度が約 6 倍。
3. 80W 付近でプラズマ密度のジャンプ（増大）が見られる。
4. 投入電力 100W において、プローブの計測上限値に近づき、プラズマ密度は $3 \times 10^{11} [\text{cm}^{-3}]$ を越えていると推定された。
5. プラズマ密度は 100W 付近で右上がりの傾向を示しており、目標に設定した 150W にはまだ余裕がある。また搭載予定の電源は 180W 仕様であり、実際にはさらに余裕がある。

以上の結果より、150W のマイクロ波電力印加において 10^{11}cm^{-3} 台後半のプラズマ密度が達成されると期待できるとともに、外挿により 10^{12}cm^{-3} のプラズマ密度を確認できた。

次に、準共鳴型 ECR プラズマ源への希土類磁石搭載の検討結果について記載する。従来の準共鳴型 ECR プラズマ源実験機では磁場印加にフェライト製円筒磁石を利用している。フェライト磁石では、プラズマ源に必要な磁場強度を得るために円筒の内径が 60mm ϕ 以下である必要がある。円筒磁石の中に真空容器が設置されるため、真空容器の内径はおよそ 50mm ϕ 以下になる。さらに磁石長さも磁場強度・プロファイルを大きく変えるためあまり短くはできない。一方で基板ステージサイズは約 60mm ϕ を想定している。このような物理的な制約から当初の設計方針では、プラズマ源出口と基板の距離を 50mm 以上と考えていた（図 7 (a) 参照）。通常、源から 50mm 離れるとプラズマ密度はかなり低くなるため、この距離でプラズマ密度を減衰させずに基板に届ける手法を探すというのが当初の計画であった。

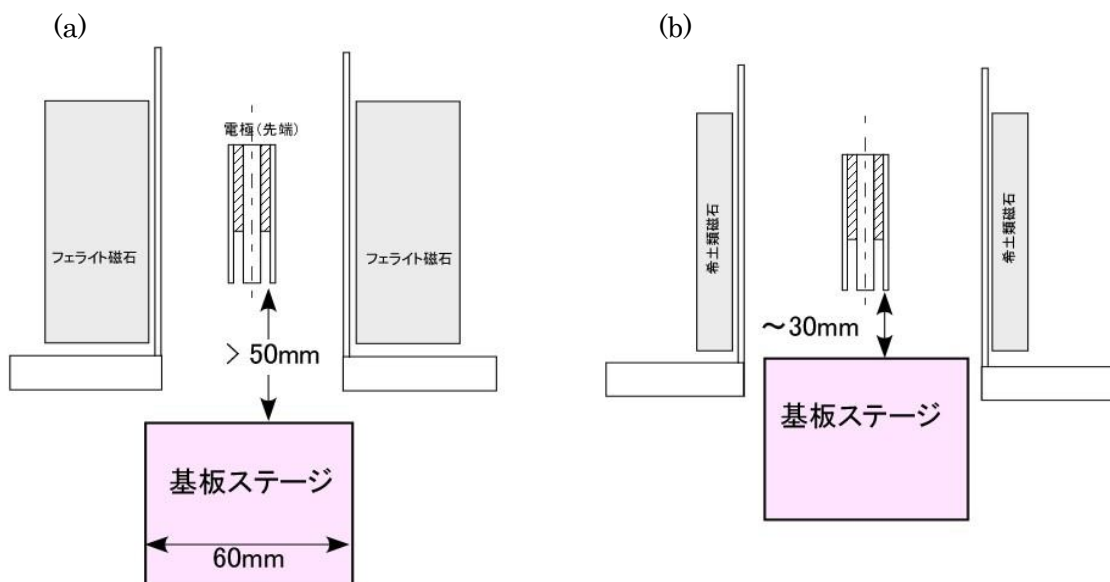


図 7 準共鳴型 ECR プラズマ源を搭載したミニマルエッチング装置。プラズマ源周辺の装置模式図。(a)初期構造。(b)円筒磁石内径を拡大した改良構造。

しかしながら、遠距離までプラズマ密度が高く保つことは技術的な困難が大きい。そのため、この点に関して討論を重ねた。その結果として得られた改良案が図 7 (b) である。フェライト磁石をより強い磁場を発生する希土類磁石に変更することで、磁石内径を広げてもフェライトとほぼ同じ磁場プロファイルを得ることが可能である。これを利用して真空容器の内径を広げれば、基板ステージをプラズマ源出口から 30mm 程度まで近づけて設置することができる。距離 30mm におけるプラズマ密度データは既に長崎大学において計測されている。結果を図 8 に示した。距離 10mm と 30mm ではプラズマ密度はほぼ変わらず、即ちプラズマ濃度の減衰がほとんど無く、密度分布に関してはむしろ 30mm の方が優れているという結果が得られた。

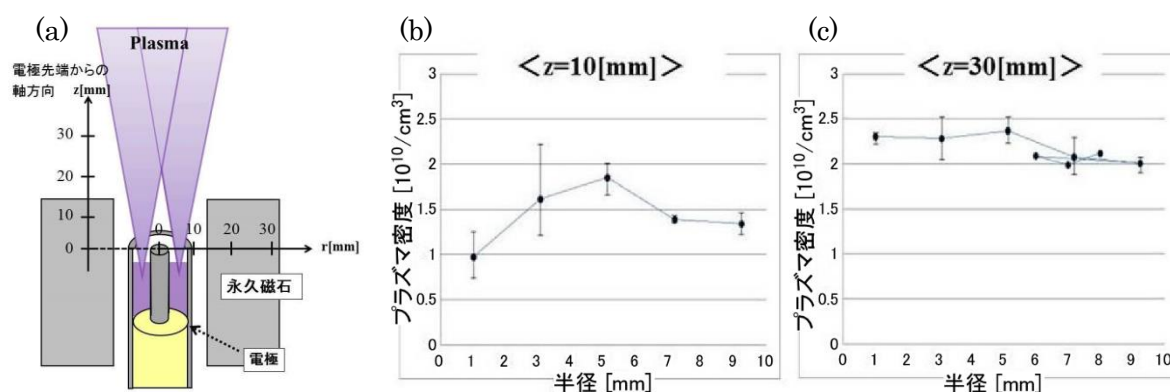


図 8 準共鳴型 ECR プラズマ源のプラズマ密度分布。(a) プラズマ拡散状況の模式図。(b) プラズマ源出口から 10mm の位置の密度分布。(c) 30mm の位置の密度分布。

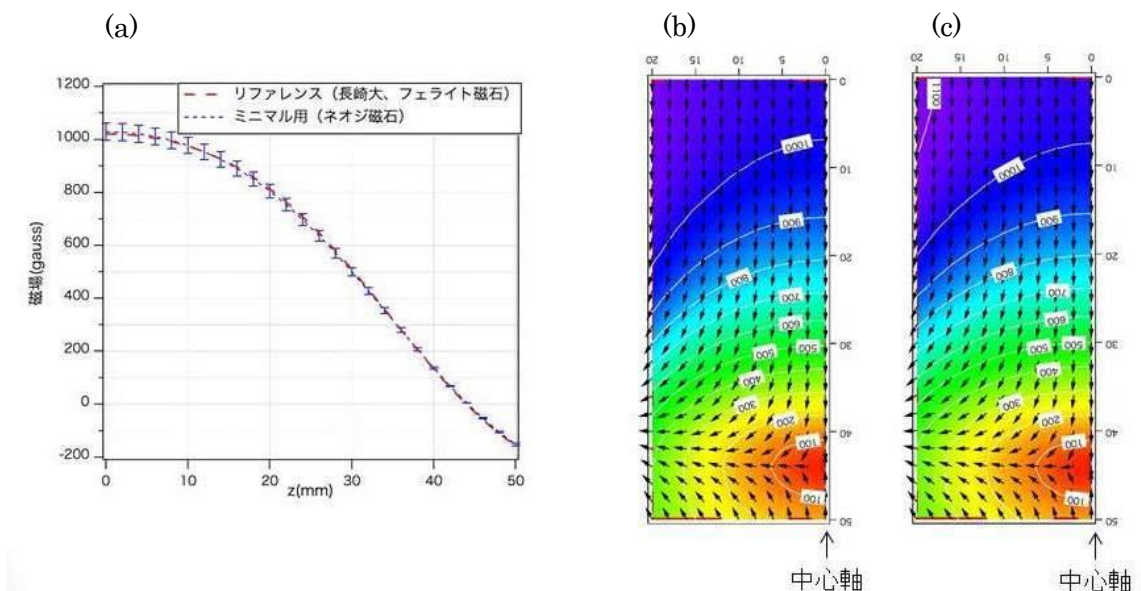


図 9 (a) フェライト円筒磁石と希土類 (ネオジウム) 円筒磁石の軸上における磁場強度分布。希土類磁石の寸法は、フェライト磁石とほぼ強度が同じになるよう設計した。(b) フェライト円筒磁石の作る 2 次元磁場プロファイル。(c) 希土類円筒磁石の磁場プロファイル。

この設計を成立させるためには、希土類磁石を用いて長崎大使用中のフェライト磁石と同じ磁場強度・磁場プロファイルをつくらなければならない。そこで、数値計算を用いて磁場プロファイルが同じになるよう希土類磁石（今回はネオジム磁石を使用した）のサイズ設計を行った。寸法をmm単位で調整し、最も近い結果が得られた時の計算値を図9に示した。図9(a)のネオジム磁石結果の縦方向にエラーバーがあるのは、希土類磁石の材質コードを指定しても、残留磁束密度にバッチごとのばらつきが出るためである。ネオジム磁石を正しくサイズ設計すれば、内径の大きな磁石ユニットでフェライトと同様の磁場が得られることが図よりわかる。今回の設計では、円筒磁石の外径についてはネオジム磁石の方がフェライトよりも小さくなったため、ネオジム磁石の採用はプラズマ源サイズの小型化にも有利という計算結果が得られた。

そこで設計サイズのネオジム磁石を購入し、実際にプラズマ源に搭載してその結果を確認した。使用するマイクロ波電源周波数は2.45GHzで、共鳴は875Gaussで生じる。これに近い磁場領域を利用するのが準共鳴 ECR である。また今回の円筒磁石の軸上磁場強度は磁石中心で最大強度になる放物線様分布を持つ（図10(a)参照）。この場合、高いプラズマ密度が得られる配置は2つあることがわかっている。一つは共鳴点（875Gauss）が源の出口よりも内側にあり、出口に向かって磁場が強くなる配置1であり、もう一つは875Gaussが源の出口付近にあり、内部に向かって磁場が強くなる配置2である。

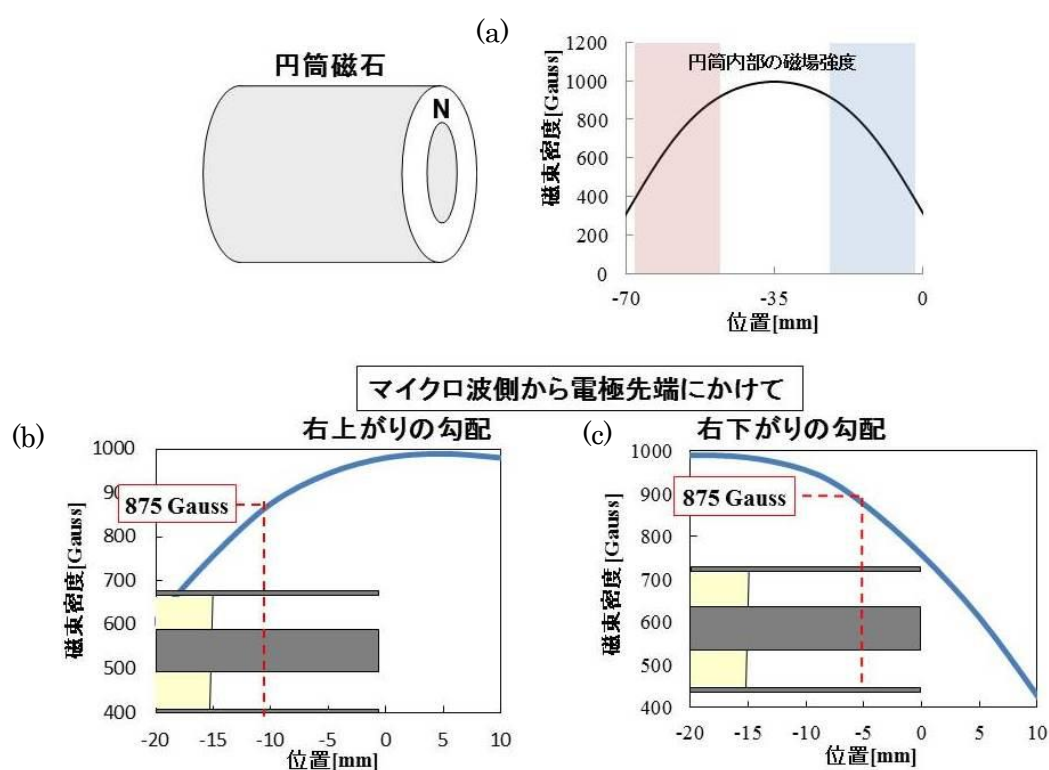


図10 (a) 円筒形磁石のつくる円筒軸上の磁場強度。(b)準共鳴型 ECR に適した磁場配置1。出口に向かって磁場強度が上昇。(c)準共鳴型 ECR に適した磁場配置2。出口に向かって磁場強度が下降。

配置 1 に対して、フェライト磁石、ネオジム磁石を使用して得られたイオン電流密度を計測した結果が図 1 1、配置 2 に対して計測した結果が図 1 2 である。同じ Ar ガス圧力中、印加電力条件で比較した。イオン電流密度はおよそプラズマ密度に比例するので、イオン電流密度に変化がなければプラズマ源の特性はほぼ同じと考えて良い。横軸はプラズマ源に対する磁石の相対位置を示す。配置 1 では磁石により少し挙動が違い、フェライト磁石ではプラズマ密度は磁石位置に鈍感であるが、ネオジム磁石は位置を変えるとイオン電流密度が大きく変化する（即ちプラズマ密度の変化も大きい）。ただし、最大密度で比較するとほぼ同じ密度が得られた。一方配置 2 では 2 種の磁石ともに電流の位置依存性が小さく、ほぼ同じ値の電流密度（プラズマ密度）になった。

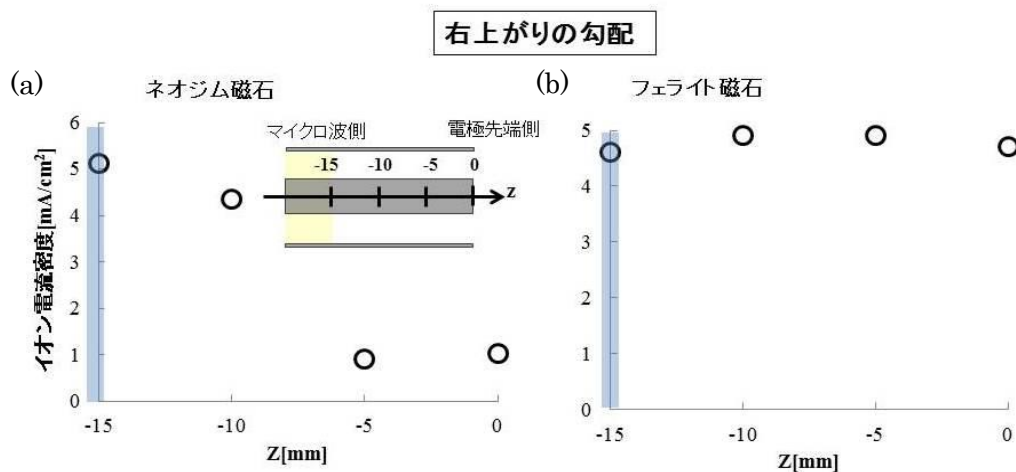


図 1 1 配置 1 におけるプラズマ源に対する円筒磁石の相対位置とイオン電流密度の相関。イオン電流密度はプラズマ密度にほぼ比例する。横軸が磁石相対位置を示す。(a) ネオジム円筒磁石の場合。(b) フェライト円筒磁石の場合。

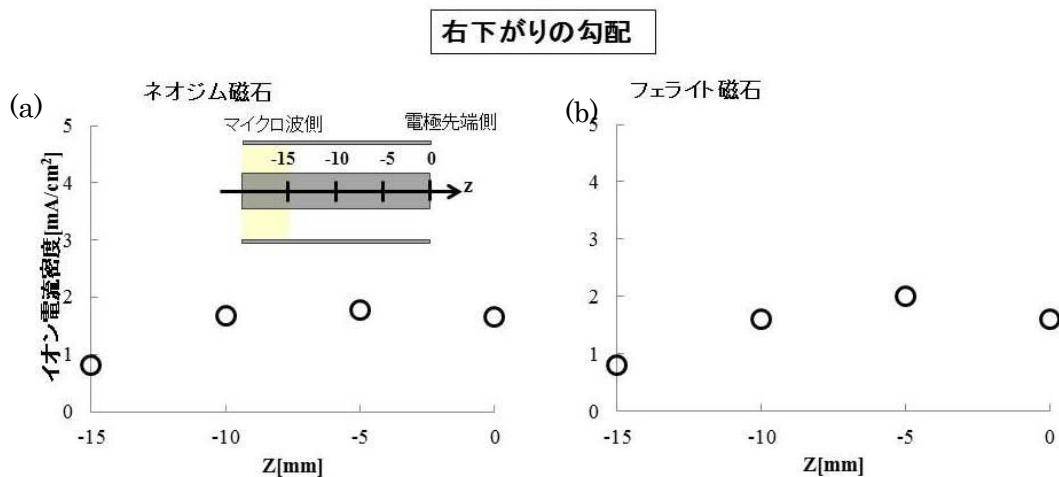


図 1 2 配置 2 におけるプラズマ源に対する円筒磁石の相対位置とプラズマ密度の相関。横軸が磁石相対位置を示す。(a) ネオジム円筒磁石の場合。(b) フェライト円筒磁石の場合。

さらに源から取り出せるイオン量を測定するために、源の正面に設置した金属プレートに流れる電流値（イオン電流にほぼ等しい）を測定した。Ar ガス 5mTorr、印加マイクロ波電力 10W での測定結果を図 1 3 に示す。ネオジム磁石とフェライト磁石でほぼ同じ電流密度が得られ、プラズマ源としての性能はほぼ同等であることが示された。以上の結果から、内径を広げたネオジム磁石を用いて、従来とほぼ同じプラズマ源性能を再現できることが明らかになった。

以上のとおり、ミニマル装置化を行うために、従来の準共鳴型 ECR プラズマ源に対して構成・サイズ変更を行い、プラズマ源能力を検証したところ、源としての性能がほぼ変わらないことが確かめられた。このため修正後の源構造を用いてミニマル装置化を進めることとした。

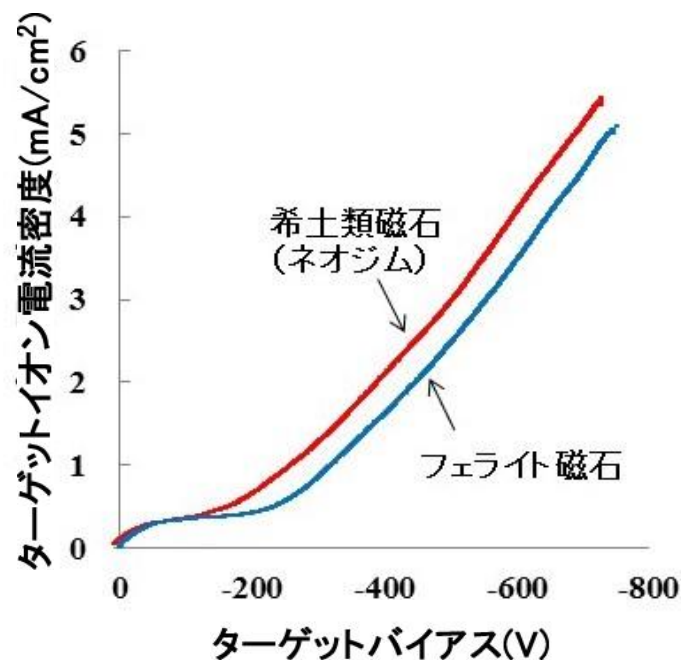


図 1 3 準共鳴型 ECR プラズマ源の正面に配置した金属プレートに流れ込む電流密度（～イオン電流密度）。ネオジム円筒磁石とフェライト円筒磁石で比較した結果、ほぼ同等の性能が得られた。

2-1-2 電圧・温度・磁場印加ステージの開発

ハーフィンチ基板用のステージに、バイアス電圧印加機構・基板冷却機構・補助磁場発生機構を組み込み、試作ステージを完成させることを目標とする。本項目の第一目標は「基板上のプラズマ密度 > プラズマ源のプラズマ密度の 80%」であり、これに関してはステージだけでなく、プラズマ源・真空容器などもあわせて最適化を進めた。その結果、2-1-1 項に記載した設計変更により当初の計画よりも基板－プラズマ源距離を近づけることができ、プラズマ濃度の減衰がほとんどない配置での装置設計が可能になった。そこで本項では、それ以外のステージ開発関連項目について説明する。

電圧印加・基板冷却・補助磁場形成の内、電圧印加は基本的に配線接続をすれば動作可能であるので、設計自由度が高く比較的容易である。また補助磁場形成に関しては今回永久磁

石を採用することにしたため、冷却機構と空間的に干渉する可能性があるもののスペースを確保できさえすれば実現可能である。このような考えから、技術的に最も困難であるのは基板冷却機構であると判断し、これの検討から開始した。プラズマ源の能力が高いほど基板温度は上昇しやすく、基板の温度上昇を嫌うエッチングシステムとしては高い冷却能力が必要である。ここでは2つの冷却機構について検討した。1つは大型装置で用いられている手法で、基板裏面にヘリウムガスをフローし、ガスの熱伝導を利用して基板を冷却する。一般に基板サイズが大きくなると基板裏面とステージを均一に密着させるのが困難になり、冷却効果が大幅に低下する。これを補う手法がヘリウムフロー機構で、ガスの熱伝導を利用して、密着の悪い構造でも冷却能力を上げることができる。ただミニマル装置の場合、基板はハーフインチと規定されておりさほど大きくない。この大きさであれば基板周部を用いて基板をステージに押さえつければ、基板裏面と基板ステージ上面の熱接触を利用した冷却方法も成立しうる。このため2つめの方法として、水冷した金属製基板ステージと基板裏面の直接熱接触による冷却法を考えた。

冷却性能の優位性を明確にするため、数値計算により両機構の基板温度をシミュレートして比較した。図14に結果を示す。ハーフインチ基板を熱源として扱い、10Wの発熱があると仮定した。また、冷媒となるヘリウムガスおよび冷却水は導入口（ステージ下端）において20℃とした。基板ステージの下端の熱特性は構造に強く依存するため見積り困難だが、今回は断熱を仮定したため、計算結果の温度は実際よりも若干高めにしている可能性が高い。ただし、冷媒の導入口温度を20℃と規定しており、ステージ下端の温度はステージ自体の熱伝導によりそれほど上昇していない結果が得られているため、下端を断熱としたことで生じるずれはさほど大きくないと考えられた。

冷却機構以外はほぼ同条件と見なせる計算を両ステージ構造について実行し、定常状態での温度分布を求めた。最高でも百数十度程度の温度領域であるため、計算上輻射の効果は無視し、熱伝導によるエネルギー輸送のみを取り扱っている。

数値シミュレーションは、基板と水冷ステージを直接熱接触させた方が、冷却効率が良いことを示した。今回の条件では、ヘリウムフロー型では基板温度が100℃を超えるのに対し直接接触型では70℃以下となった。この結果に基づき、まず直接接触型水冷基板ステージを用いて試作機を構成することとした。この方式の方がヘリウムフロー式に比べ、冷媒のフロー構造の自由度が高いため、次節で述べる磁場発生用の磁石をステージに組み込む際の磁石設置スペースを確保しやすい。

次に、ステージに組み込んだ磁石による補助磁場に関する検討結果について述べる。これはプラズマ源で発生した高密度プラズマを、拡散させずに高密度を保った状態で基板ステージまで輸送するための補助磁場であり、プラズマ源から出た磁束線があまり広がらずに基板まで到達することが望まれる。図15にステージ側の磁石（補助磁場）がない場合(a)とステージ側磁石がある場合(b)の磁場強度と磁束線分布を示した。上部がプラズマ源で、基板は(b)に灰色で示した位置にある。源から基板へ至る経路において、基板近傍で磁束線が横方向に広がっていることがわかる。基板ステージに磁石を設置することで、基板近傍での磁束線の横方向への広がりが抑制でき、平行に近い磁束線分布が得られた（図15(b)）。計算結果を参考に磁石のサイズ・設置位置を決め、永久磁石を組み込んだ試作基板ステージを製作した。試作したステージ単体での冷却水循環を確認したところ、循環はスムーズであることが確認できた。

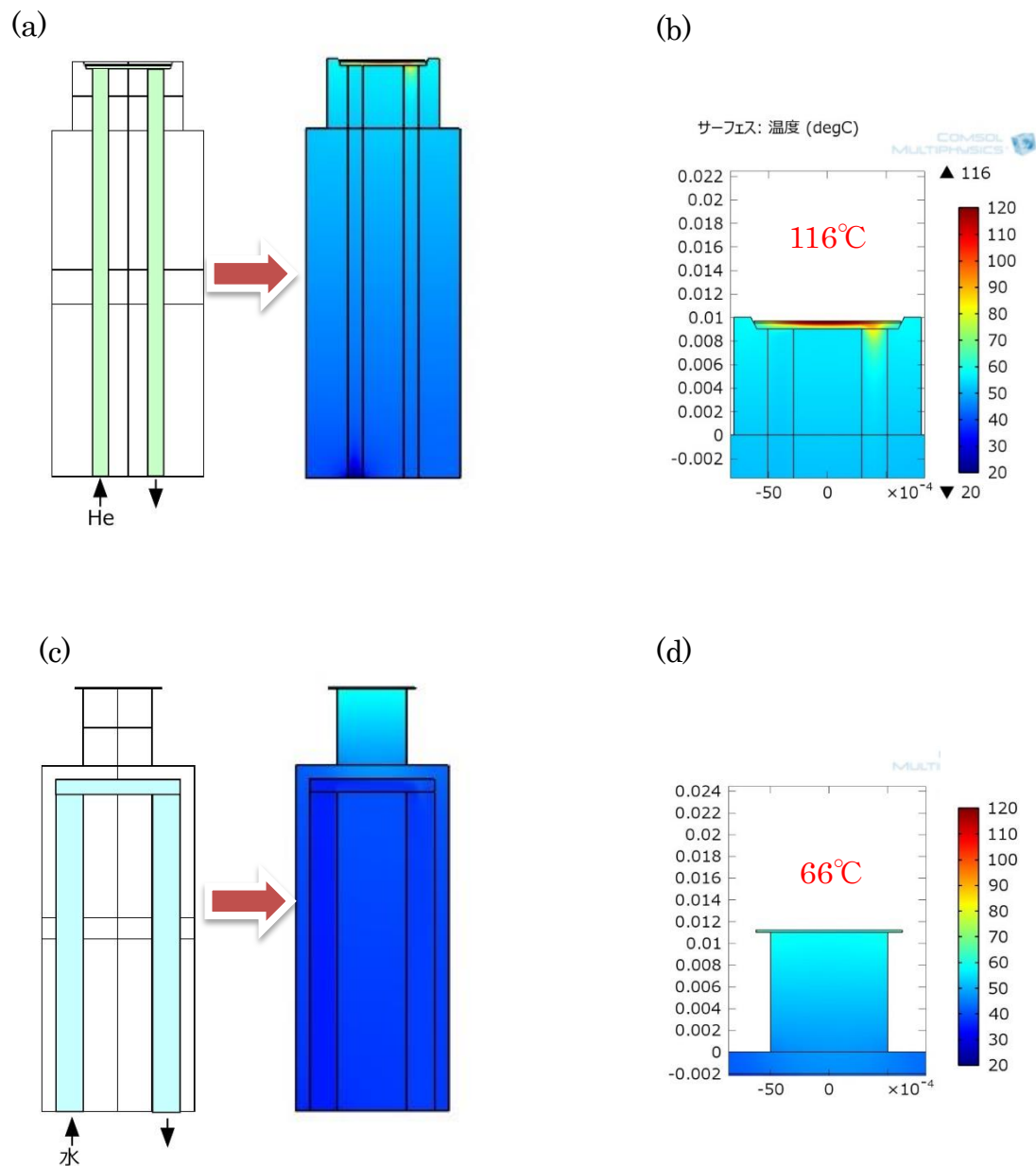


図 1 4 基板ステージの温度シミュレーション結果。(a) ヘリウムフロー型ステージの構造図。ヘリウムガスを基板裏面に導入し、ガスの熱伝導を利用して冷却する。(b) ヘリウムフロー型ステージの定常状態における温度分布。(c) 直接熱接触型水冷ステージの構造図。(d) 直接熱接触型水冷ステージの定常状態における温度分布。どちらもハーフィンチ基板を 10W 熱源として取り扱い、基板下端は断熱、冷媒であるヘリウムガスおよび冷却水温度がステージへの導入口で 20℃と仮定して、計算を行った。

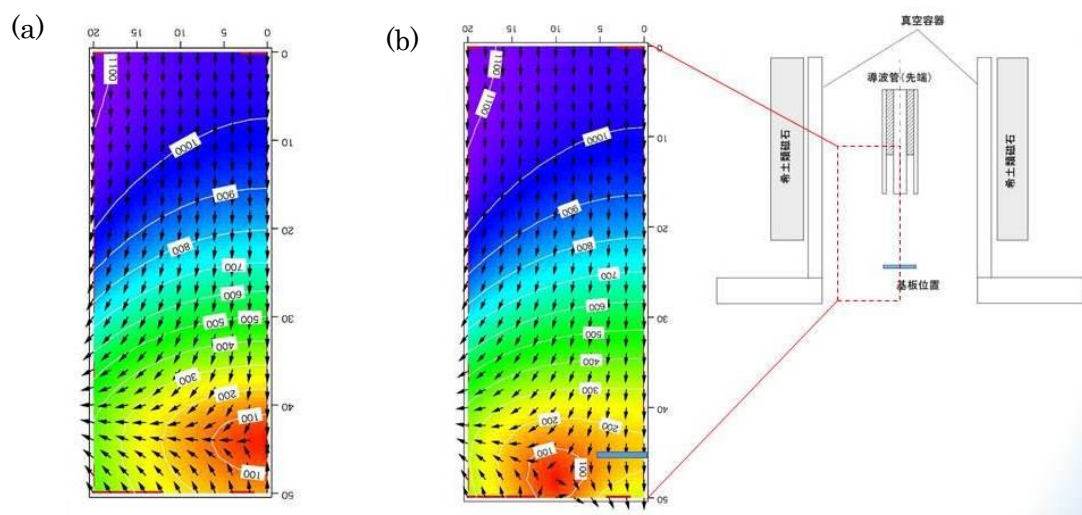


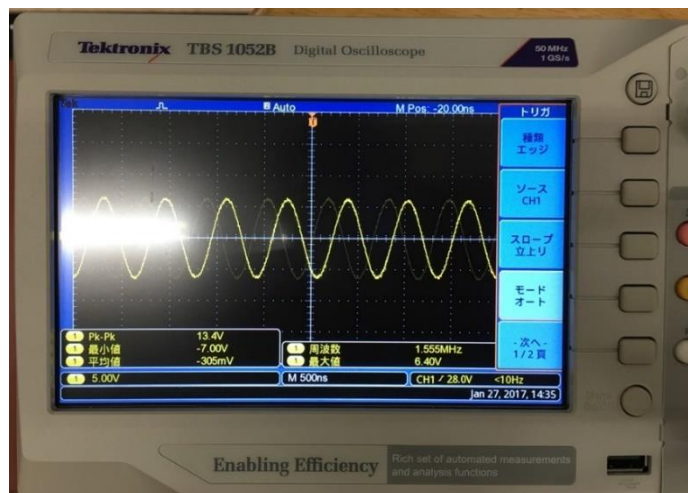
図 1 5 プラズマ源先端部から基板近傍領域の磁場強度及び磁束線方向分布。色が磁場強度、矢印が磁束線方向を示す。(a) 補助磁場（ステージ側磁石）無し、(b) 補助磁場（ステージ側磁石）有り。

次に実際のミニマル試作機に本ステージを組み込み、その性能評価を行った。要求される電圧印加・基板冷却・補助磁場印加機能の内、永久磁石内蔵による磁場印加に関しては、ほぼ計算通りの磁場強度が基板位置で得られ、特に問題は見つからなかった。一方、電圧印加に関しては初期においていくつかの問題が発生した。そこで、まずこの 2 点の解決に取り組んだ。

電圧印加における問題は、プラズマ点灯時に DC バイアス電圧がほとんど発生しないことである。検討の結果、電気回路の周波数特性が原因である可能性が示唆されたため、電気回路の追加により改善を試みた。図 1 6 にオシロスコープによるバイアス印加状態（プラズマ無しおよび有り）の実測結果（回路修正後）を示す。プラズマ無しでは DC バイアスはほぼゼロであるが、プラズマ有りの条件では、電圧カーブが大きく負側（下側）にずれていることがわかる。これが DC バイアスになり、正常動作が確認できた。この時の条件では DC バイアスは約-70V であった。

次に基板冷却能力について報告する。最初期には、プラズマ点灯により基板が非常に高温（推定で 300℃もしくはそれ以上）になってしまう現象が見られた。この温度では実際の Si ウェハを処理することは実質不可能である。しかしながら、この原因がウェハの押え板の破損にあることが既に特定されている。すなわちウェハがステージに密着しておらず、冷却効率が極端に低下したことによる現象と考えられる。押え板の交換後は同様のトラブルは起きておらず、破損はイレギュラーのものであったと結論されている。

(a)



(b)

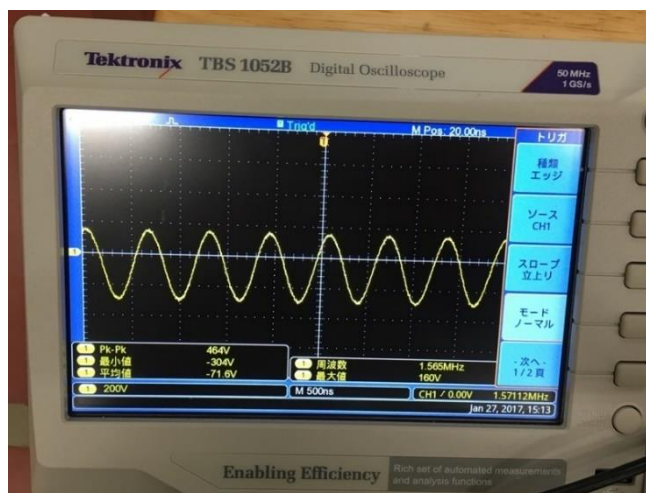


図 1 6 オシロスコープによる基板バイアス電圧の実測例、(a) プラズマ消灯時、(b) プラズマ点灯時。プラズマ照射がある場合、電圧のサインカーブが負側にシフトしていることがわかる。このシフト量がセルフバイアス電圧 (DC) に対応する。

ウェハ押え機構の修理後に改めて基板温度評価を行った。60W のマイクロ波電力投入によりプラズマ放電させたところ、サーモラベルによる評価でおよそ 125℃まで基板温度が上昇していた。押え板破損時の結果と比べれば大幅な冷却能力向上であるが、目標値は達していない。そこで押え板と基板ステージの調整などを行ったところ、60W プラズマ 60 秒照射後の基板温度がおよそ 80℃となるセットアップを見いだすことができた。

一方高速エッチング試験の結果から、目標とするエッチング速度を得るためには 70W 以上の投入電力が必要と予想され、60W 投入時に基板温度 80℃では、わずかに冷却能力が足りない。そこで基板ステージと基板裏面の密着性向上を狙い、ステージの基板設置面を再研磨し、平坦度を向上させた。その結果、マイクロ波投入電力 70W において基板温度がおよそ 80℃ (80℃サーモラベルがわずかに変色、図 1 7 参照) となった。これにより目標値：プロセス時の基板温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ が達成された。



図 1 7 70Wのマイクロ波を投入し、1分間プラズマ処理した後の80℃のサーモラベルの写真。

2-2 ミニマル装置化

2-2-1 マッチングレス電源によるプラズマ生成

汎用のマッチング回路を排し、固定マッチング回路とすることで全体の電源体積を縮小する計画である。まず外部専門業者のエンジニアとの相談の結果、数個のユニットを組み合わせで電源構成することで、180W、2.45GHzのマイクロ波電源（マッチングレス）を筐体内に収めることができるとの感触を得た。そこで、ミニマル筐体内に収まるサイズの小型マイクロ波電源（180W、2.45GHz）を電源業者に発注した。部品配置の工夫により、完成品サイズは $\leq 340\text{mm} \times 200\text{mm} \times 150\text{mm}$ であり、ミニマル筐体に搭載可能なサイズの電源となっている。

以下、この小型マイクロ波電源での運用結果について記載する。当初設計ではプラズマ源と電源をセミリジッドケーブルで接続する設計であったが、実際に試験を行った結果、コネクタ部の発熱が激しく50W以上の投入電力でプラズマ源が熱破損する可能性が高いことが判明した。そこで、電源メーカーとも相談し、ケーブルを使わずN型コネクタで直結する構造配置に変更した。これに伴い、電源の出力端子位置、方向性結合器の設置位置を変更した。この変更の結果、発熱をかなり低減でき、およそ150Wまで電力投入が可能になった。

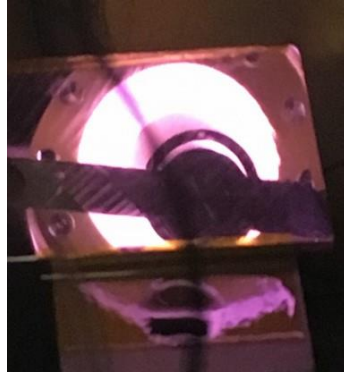
これにより電源部周辺の基本構成が確定したため、電源およびプラズマ源をミニマル装置に組み込んだ。筐体内設置した本電源で、ミニマル装置においてプラズマが生成できることも確認できた。

（図18(a)参照）

本項におけるもっとも大きな課題は、低圧・高電力動作の不安定性解消であり、最終的には放電電極のサイズ調整と磁石位置調整により安定動作点を見いだしたが、対応にかなりの時間を要した。

得られた安定動作点において、基板位置にステージの代わりに被覆電線を設置し、プラズマ密度計測を行った。プローブ電極として、断面1.2mmφ、露出部の長さ2mmのセラミック被覆電線を装置の内部、基板位置にセットし、プローブに流れる電流を検出抵抗にかかる電圧測定より算出する簡易な測定計を用いた。プラズマを発生させ、プローブ電圧をスキャンし、プローブ電流データを集め、電流－電圧特性を標準的な解析法で数値化することによりプラズマ特性を数値化できる。

(a)



(b)

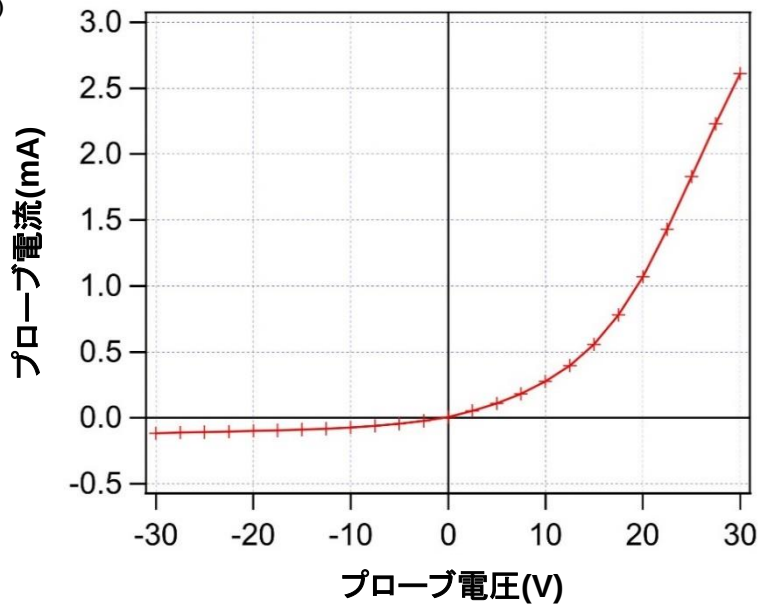


図 1 8 (a) プラズマ点灯時の写真と、(b) Ar 圧力 : 0.2Pa、マイクロ波電力 : 10W で計測したプローブ電流－電圧特性

Ar 圧力:0.2Pa、投入電力 10W (=進行波電力－反射波電力) において観測された電流－電圧曲線を図 1 8 (b)に示した。詳細は省くが下記計算式により電子温度が 5.7eV、イオン密度 (=プラズマ密度) は $5.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられた。

$$\text{電子温度} \quad T_e = \frac{dV}{d \ln(I)} \frac{e}{k} = 5.7 \text{ eV} \quad \text{電子電流方向きより計算}$$

$$\text{イオン密度} \quad n_e = \frac{I_{is}}{eS} \sqrt{\frac{m_i}{k T_e}} \exp\left(\frac{1}{2}\right) = 5.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

ここで e は電荷素量、 k はボルツマン定数、 S はプローブ面積、 m_i はイオン質量で Ar の質量になる。電子温度から、いわゆる低温プラズマであることがわかるが、これは従来から準共鳴型 ECR プラズマにおいて報告されてきた内容と一致する。

実際のエッチングプロセスはもっと高い投入電力で実施するものであるが、大電力ではプラズマ密度が上昇し過大なプローブ電流が発生することにより、プローブが熱損傷してしまう。このため、

大電力で図のような詳細な電流－電圧特性をとることができない。このためやむを得ず、低電力および高電力において、それぞれ低バイアス時のイオン電流を測定し、これがプラズマ密度と比例関係があるものとして、高電力でのプラズマ密度を見積もった。表 1 に 10W 投入時と 100W 投入時（ともに進行波電力－反射は電力の値である）のデータの比較結果を示した。

表 1 プローブ電圧 = -10V におけるイオン電流値およびプラズマ密度

投入電力(W)	イオン電流(μA)	プラズマ密度(cm^{-3})
10	74	5.1×10^{10}
100	1800	1.2×10^{12} (推定)

単純な比例関係を用いた推定値になるが、 10^{12}cm^{-3} 台のプラズマ密度(推定値)が得られている。また、別途測定した基礎データから、同電力ではガス圧力が高い方が、プラズマ密度が上昇することがわかっている。表 1 のデータは Ar 圧力: 0.2Pa において収集されたものであり、実際のエッチングは 10Pa 近い高いガス圧で行うことになるはずであるので、その時のプラズマ密度は表 1 にある数値よりもさらに高くなると期待できる。

マッチングレスの小型電源を用いた以上の結果より、数値目標（プラズマ密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ ）は達成された。

数値目標が達成できた一方で問題も発生した。高速エッチングレシピの探索において、エッチングガス濃度比および圧力は広い範囲で変化させる必要があったが、Ar ガス単体で行った予備実験結果とは異なり、条件によってマイクロ波の反射が非常に大きくなる現象が頻繁に観測された。Ar, O_2 , SF_6 ガスを混合して放電させた場合に、プラズマの電気特性が組成比・圧力によって大きく変化している事を示唆している。通常装置であればマッチング回路の調整により反射波を下げられるが、本事業の開発品はマッチング回路を省き装置を小型化することを目的の一つとしてあげており、実際にマッチングレス電源で運用していたため、十分な対応をとることが困難であった。反射波強度が 40W を超えるとマイクロ波電源が損傷するため、一時的にレシピ探索実験が滞った。



図 1 9 付加したマイクロ波用小型スリースタブチューナーの写真。

このような内容について推進委員会および中間評価時に報告したところ、アドバイザーおよび審査員の先生方から、「いったんマッチング回路を付加して実験を進めるべきであって、マッチングレスは結果が出た後に対応すれば良い」との意見を頂いた。このアドバイスに従い、実験装置には小型のマッチングチューナー（図 1 9）を組み込み、現在まで実験を継続している。

この組み込みにより電源部品の一部がミニマル筐体外に出ってしまったが、その代わりに広い条件範囲においてレシピ条件探索が可能になった。レシピ探索の詳細は次項 2-2-2 に述べるが、最終的に目標とするエッチング速度が得られるガス条件が定まっている。この条件で運用する限りチューナーを操作する必要はほとんどなく、電気特性の変動がないことがわかった。そこでこの条件に適合した小型電気回路を作製しマッチングチューナーに置き換えることで、再びマッチングレス電源回路に戻し、ミニマル筐体内に部品を納める予定である。

エッチング装置には、プラズマ源用電源の他に基板バイアス用の交流電源も必要である。こちらに関しても、汎用マッチング回路を無くした小型化電源を用いたい。そこで東北大学所有の回路技術を導入し、電源周波数が 1 ～ 2 MHz の基板バイアス用電源を完成させた（図 2 0 参照）。筐体内設置が可能なサイズまで小型化できており、400～500V_{pp} の電圧供給が可能である。本バイアス電源が正常動作することは、既に図 1 6 に示した通りである。



図 2 0 東北大学より技術提供を受けて試作した、基板バイアス用交流電源写真。

2-2-2 システムレイアウトの最適化

まず、全ての部品をいったん筐体内に納め、さらに装置として可動可能な状態にセットアップしミニマル TSV エッチング装置試作機を完成させた。TSV エッチングを行うために装置上で必要とされる全ての操作が、タッチパネルから自動および手動で行えるように PLC プログラムを作成し、インストール済みである。

その後、開発を推進するため一部の部品を筐体外に出したが、これらは部品の手配が完了すればすべて筐体内に再設置し直すことが可能なものである。構造図を図 2 9 に、試作機の全体および各部位の写真を図 2 1 ～ 2 5 に示す。

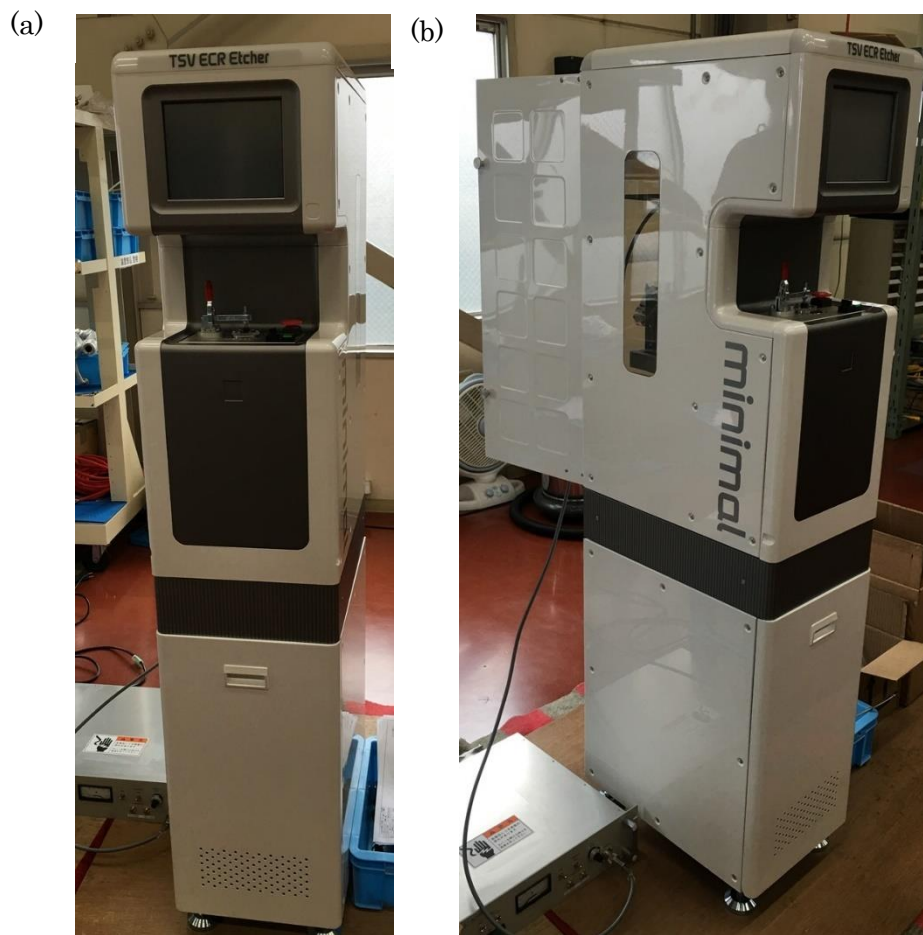


図 2 1 製作したミニマルTSVエッチング装置試作機の写真。
(a)正面、(b)側面

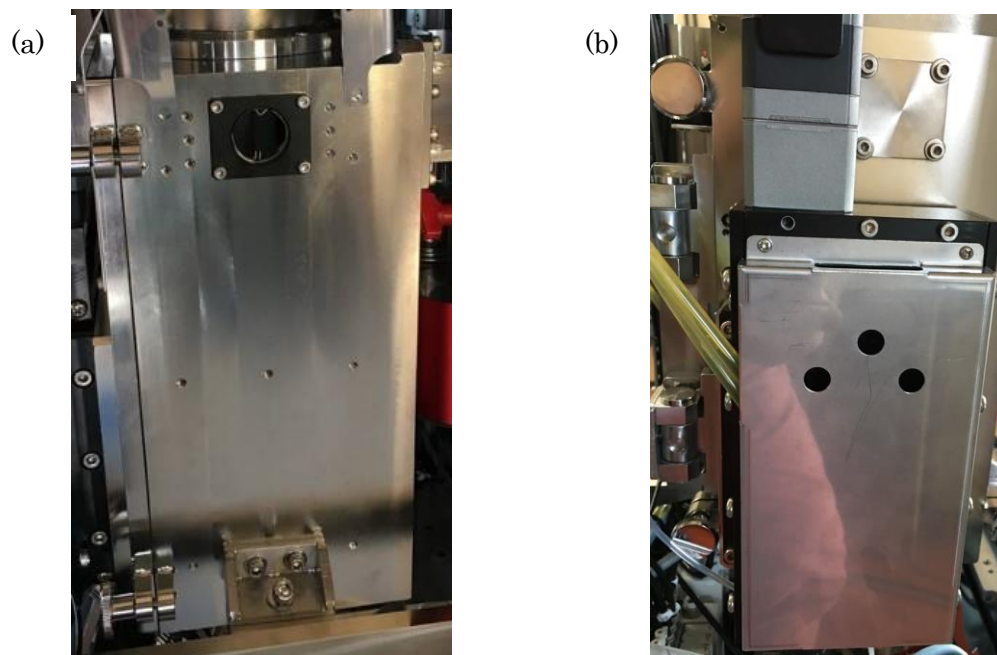


図 2 2 筐体内に組み込まれたパーツ（抜粋）。(a) 真空容器（処理室）、
(b) ステージ上下駆動機構



図 2 3 真空容器内に設置した基板ステージの写真。容器の覗き窓より撮影。



図 2 4 処理室（角形真空容器）下部に収納された制御システム一式。

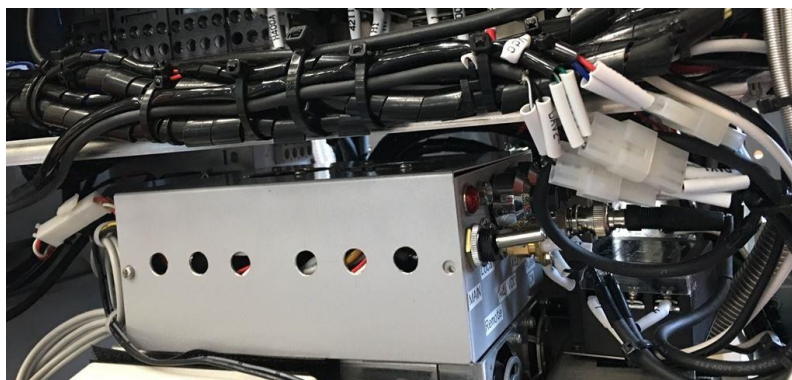


図 2 5 筐体内に組み込んだ基板バイアス電源。

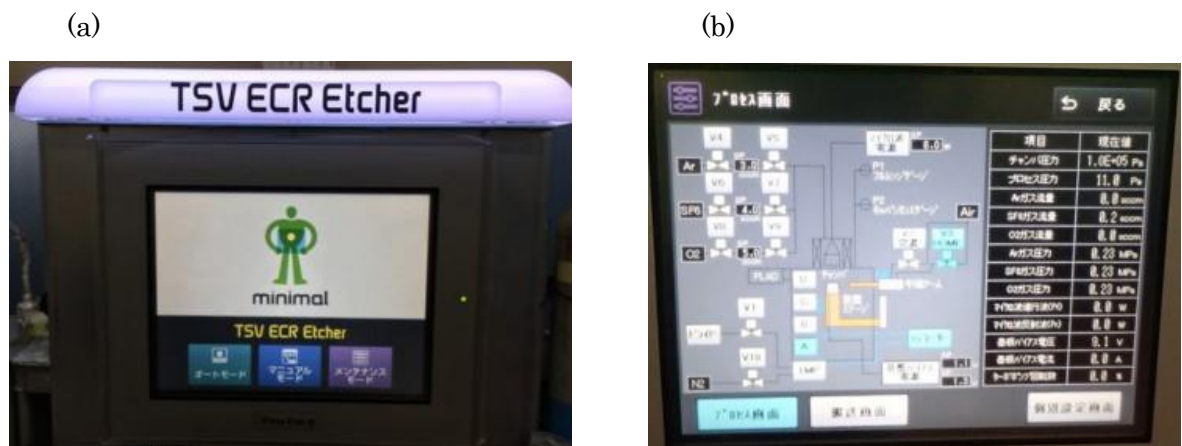


図 2 6 搭載したタッチパネル一体型 PLC のタッチパネル写真。(a) 起動時、(b) 通常運転時。

装置構成の概要について説明する。メインとなる処理室は角形真空容器であり、真空排気は 1 次ポンプとして小型ドライポンプ、2 次ポンプとして小型ターボ分子ポンプが搭載されており、後者は処理室にはほぼ直結する形で現在は搭載されている。処理室上部には開発した準共鳴型 ECR プラズマ源が設置されている。

基板ウェハ搬送用にミニマル真空装置の共通部品であるミニマル真空 PLAD が装置前面に設置されており、これを通して処理室へウェハの搬送を行える。さらに処理室背面側には基板ステージの昇降機構が取り付けられている。これによりステージを下げた位置で PLAD とウェハのやり取りを行い、上昇させてプラズマ源直下でエッチングを行う機構としている。本装置では金属ベローズを用いた長ストロークの昇降機構をモーター駆動により上下させる機構 (図 2 2 (b)) を採用しており、樹脂製の O リングを使用していないため、半導体プロセスにおいて嫌われるパーティクル発生などは大きく押さえ込めると期待している。

使用する 3 種類のガスはそれぞれのマスフロー 3 系統を通して流量コントロールされ、処理室上部プラズマ源の直近から処理室へ導入される。装置上部から導入されたガスは、処理室下部のポンプから排気されるため、ガスの流れは上から下のほぼ 1 方向に規定されている。

ミニマル装置最上部には、正面に装置制御および制御用インターフェースとなるタッチパネル一体型 PLC が取り付けられている (図 2 6)。その他、筐体内には既出のドライポンプの他、装置冷却用の空冷式ラジエーター装置の電力供給をまかなう共用電源、バルブ開閉を司る制御ユニット (図 2 4)、基板バイアス電源 (図 2 5) が搭載されている。

この段階で必要な機能は全てミニマル筐体内に収まっており、エッチング装置として稼働可能な状態とした。ただし前項にも記載したが、開発を加速するために現在は一部のパーツが筐体外へ出ている。しかしながらこれらの部品は、部品交換により筐体内へ再度納める事が可能 (設計は完了) な部品ばかりであるため、システムレイアウトの最適化は完成している。

次に実際のエッチング特性の評価を行った。まずは装置としての Si エッチング速度の確認実験

のみ行う目的で、メタルマスクを用いた簡易的なエッチング実験を行い、基礎データを収集した。使用したメタルマスクの外形図と写真を図 2 7 に示す。開口部比率が実際の TSV パターンに比べてかなり大きいが、開口部が大きいと計測が容易である。このマスクをハーフインチ Si ウェハに重ねて試作エッチング装置にセットし、実際にエッチング処理を施して評価サンプルとした。メタルマスクの開口部面積比率は約 32% である。

使用したメタルマスクは直線上のエッジを有しているため、エッチング試料に形成されるエッジ部の段差を測定し、これをエッチング時間で割ることでエッチング速度を得ている。段差測定には触針式段差計を用いた (図 2 8 参照)。まずはこのメタルマスクを用いた簡易実験により、エッチング速度データを蓄積し、条件に対するエッチング速度の依存性・傾向を把握する。評価方法は条件を変えてエッチング処理を行い、メタルマスクにより形成された段差部の高さを測定するという手順である。

図 2 9 (a) に、エッチング時の総ガス圧力に対するエッチング速度の依存性を示した。導入ガス流量は Ar:10sccm, SF₆:10sccm, O₂:6sccm で固定、排気速度を調整することで圧力を変えている。投入マイクロ波電力は 45~50W、基板バイアスは周波数が約 1.5MHz、電圧振幅は約 400V_{pp} である。総ガス圧が、およそ 15~20Pa の時に最も速度が高く、>5 μ m/min となった。

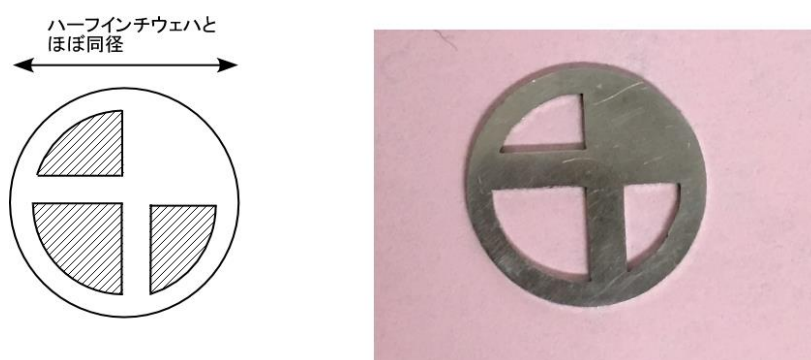


図 2 7 使用したメタルマスク形状。材質はステンレス(SUS304)

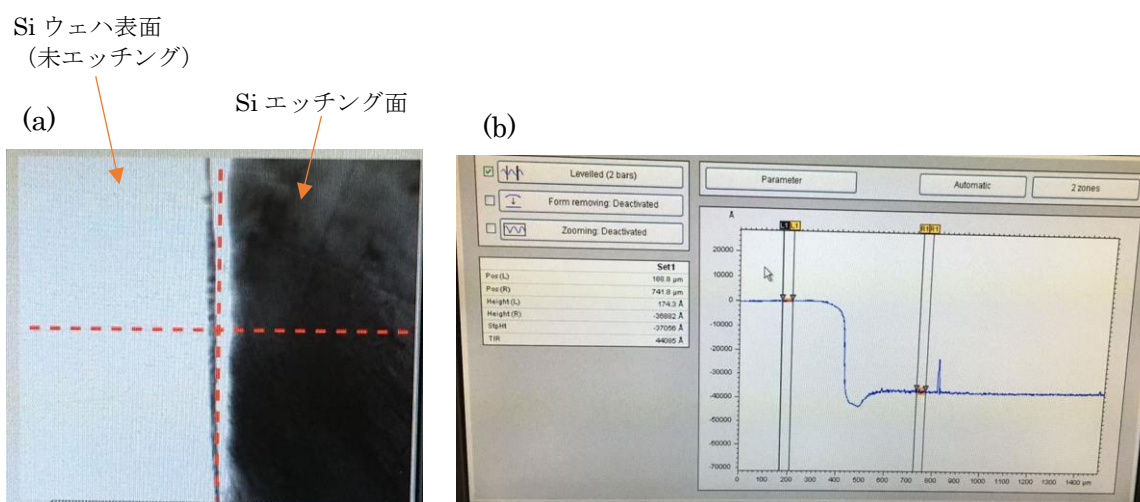


図 2 8 エッチングにより形成された段差 (高さ) 測定の一例。(a) 段差部の光学顕微鏡像、(b) 表面粗さ系による測定結果。測定プログラム画面表示。

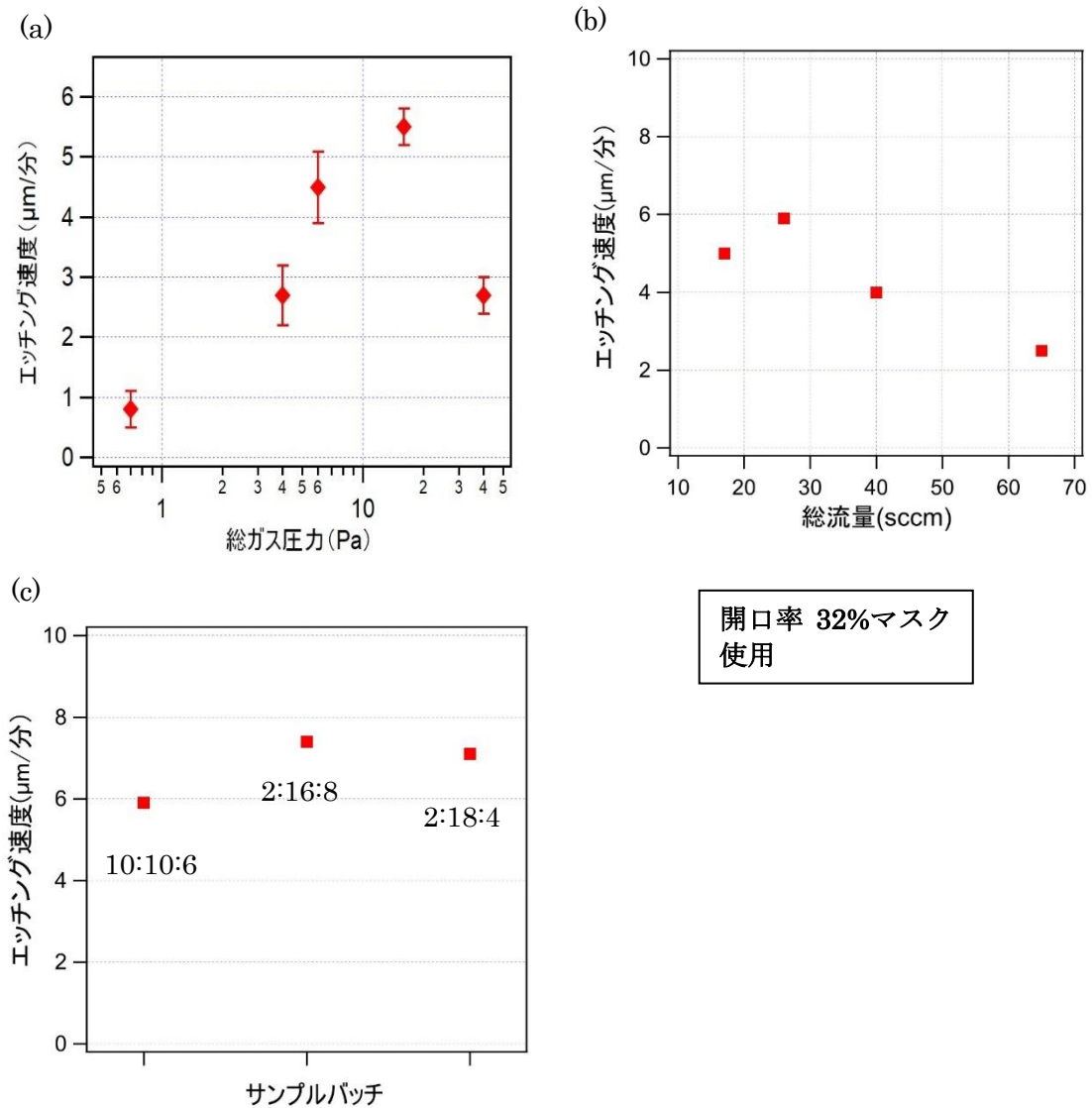


図 2 9 開口率 32%マスク使用時のエッチング速度評価結果。(a) ガス圧力依存性、(b) 流量依存性、(c) ガス組成依存性。図内の数値は導入した Ar, SF₆, O₂ のガス流量を示す (単位は sccm)。

次にエッチング時の総ガス圧力を 18~20Pa に固定し、導入ガス流量を変えた時のエッチング速度変化を調べた。ここではガス組成比を $\text{Ar}:\text{SF}_6:\text{O}_2 = 5:5:3$ とし、総流量を変えると同時に排気速度を調整して総ガス圧を一定としている。投入電力と基板バイアスは図 2 9 (a)の使用条件と同じである。結果を図 2 9 (b)に示した。25sccm 前後がもっとも高速で、およそ $>5\mu\text{m}/\text{min}$ の速度が得られた。一方、総流量が 30sccm を超えるとエッチング速度が低下する傾向が見られた。流量が多くなるとエッチング速度が上がるのではないかと期待していたが、反する結果となった。ガスの平均流速が上がりすぎたためではないかと考えているが、具体的な理由は現在のところ不明である。

図 2 9 (c)には、ガスの組成比を変えた時のいくつかの代表的な結果を示した。初期に使っていた $\text{Ar}:\text{SF}_6:\text{O}_2 = 5:5:3$ よりも SF_6 比率を上げる事でエッチング速度の向上が図れる事がわかる。 Ar 比率はかなり下げても、さほどエッチング速度は低下せず、放電が維持できれば Ar を使用しなくてもほぼ同じエッチング速度が得られた。 O_2 比率もエッチング速度への影響は比較的小さく、流量を変えても、あまり大きく速度は変化しなかった

次に投入マイクロ波電力に対するエッチング速度の変化を調べた。結果を図 3 0 に示した。導入ガス流量は $\text{Ar}:\text{SF}_6:\text{O}_2 = 2:16:6$ sccm で、ガスの総圧力は 18~20Pa、基板バイアスは上と同じである。 $\geq 70\text{W}$ 以上の投入マイクロ波電力では挙動は素直で、投入電力を上げる事によりエッチング速度が上昇し、100W 投入する事で $>10\mu\text{m}/\text{min}$ のエッチング速度が得られた。

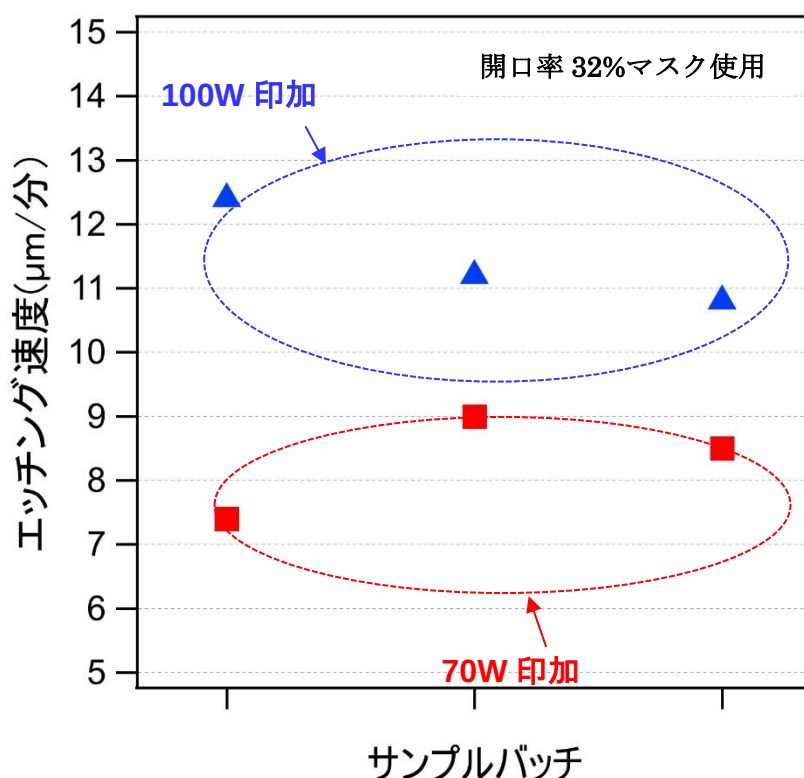


図 3 0 開口率 32%マスク使用時のエッチング速度評価結果。投入マイクロ波電力依存性。
70W 印加ではおよそ $7\sim 9\mu\text{m}/\text{min}$ 、100W 印加では $>10\mu\text{m}/\text{min}$ の速度が得られた。

さらに参考データとして、基板バイアスの有無に対するエッチング速度の変化を図 3 1 に示した。ガス流量は Ar:2sccm, SF₆:16sccm, O₂:6sccm で、ガスの総圧力は 18~20Pa、投入電力は 100W である。基板バイアス (1.5MHz、電圧振幅は約 400V_{pp}) を切った場合、エッチング速度が急激に低下し、電荷を持つイオン種がエッチングに大きく寄与している事を示している。

図 3 2 に、エッチング速度>10 μm/min が得られたサンプルの段差形状計測結果を写真で示した。サンプルは、導入ガス流量は Ar:2sccm, SF₆:16sccm, O₂:6sccm で、ガスの総圧力は 18~20Pa、投入マイクロ波電力は 100W、基板バイアス印加の条件で 60 秒エッチングを行ったメタルマスク付き Si ウェハである。同条件で行った 2 枚の別ウェハの表面段差形状を、表面粗さ計 α-STEP で計測した。それぞれ左右両側に見える平らな部分がマスクで隠れたエッチングされていないウェハの表面部で中央部がエッチング部になる。中央部の最も深い部分は深さが 10 μm 以上あることがわかる。

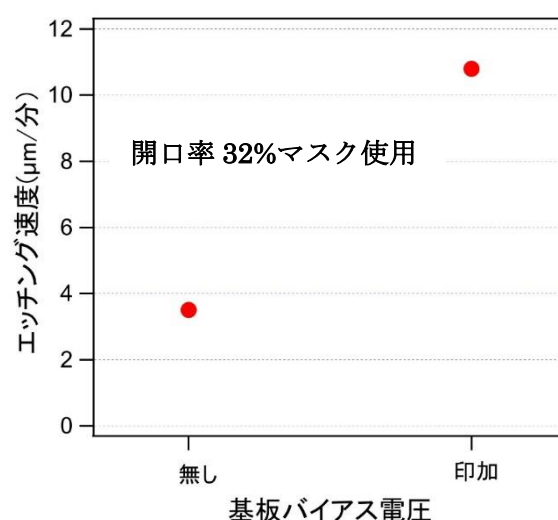


図 3 1 基板バイアスの有無によるエッチング速度の変化。Ar:2sccm, SF₆:16sccm, O₂:6sccm で、ガスの総圧力は 18~20Pa、投入電力は 100W における結果。開口率 32%マスク使用時。

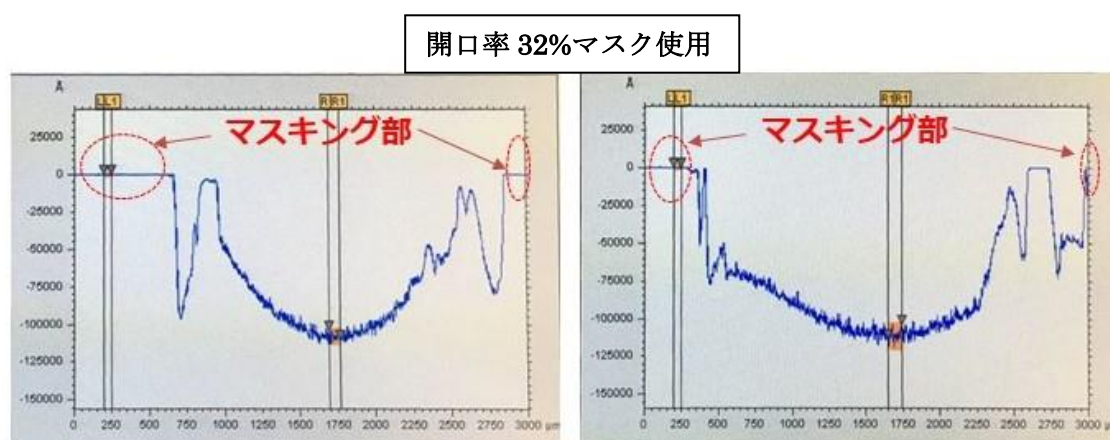


図 3 2 開口率 32%のメタルマスクを用いたエッチング試験において、10 μm/min 以上のエッチング速度が得られたウェハの、表面粗さ計による段差形状計測結果。投入電力は 100W、エッチング時間は 60 秒。それぞれ別ウェハの計測結果である。

図 3 2 の結果でもわかるように、メタルマスクを用いた試験では、エッジ部にスパイク的な形状が頻繁に観測されること、エッチング部の底面が平らでない事など判断が難しい点が残っている。メタルマスクをウェハに重ねているだけなので、ウェハとマスクの密着性が悪い事、測定の用意さを優先したためマスクの開口サイズが実際のスルーホールの開口径にくらべ 2 桁大きいこと、ウェハ全体に対するマスク開口部の面積比率（開口率、使用したメタルマスクでは約 32%）が実際のスルーホールマスクの一般的な開口比率 1~2% に対して極端に大きい事などが影響していると思われる。そこで次のステップとして、樹脂テープを用いたエッチング試験を行った。樹脂テープであるため、メタルマスクよりはウェハに対する密着性がかなり向上している。これをウェハの貼り付け、図 3 3 のようにスリットを形成してマスクとした。開口率が 1.6% になる設計値であり、実際のスルーホールマスクのそれとほぼ同等である。開口部形状がスリット状なのは、実際のスルーホールマスクパターン（10 ミクロン~数十ミクロン径のホールが多数）に比べ、深さの計測が容易であるためである。

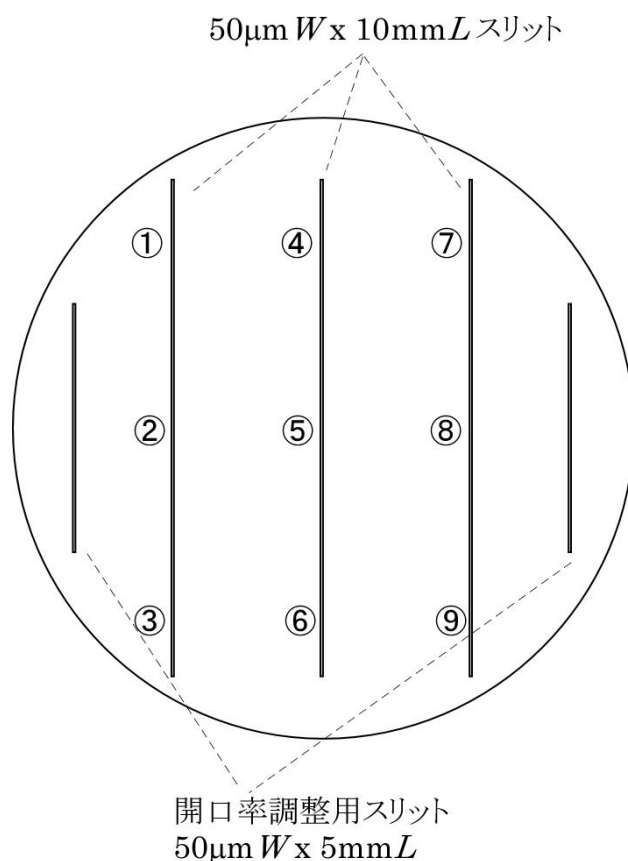


図 3 3 樹脂テープを用いて作製したテスト用パターンの形状および深さ計測位置

図 3 4 に 2 つの投入電力条件でエッチング処理を施した複数の Si ウェハに対する、エッチング速度ばらつきを示す。後で示す図 3 6、3 7 のデータに加え、同条件での別の計測結果も加えて図示している。図中データは、レーザー顕微鏡によるウェハ中心部の深さ計測値に基づいており、これをエッチング時間で割って速度とした。90W 印加時のエッチング速度が平均値 $23.6\mu\text{m}/\text{min}$ 、標準偏差(σ)が $1.4\mu\text{m}/\text{min}$ 、70W 印加時のエッチング深さが平均値 $17.9\mu\text{m}/\text{min}$ 、標準偏差(σ)が $1.8\mu\text{m}/\text{min}$ となった。図 3 4 には、開口率 32% のメタルマスクでのデータを合わせて示している。開口率が下がる事でエッチング速度が上昇する傾向が明確に読み取れる。

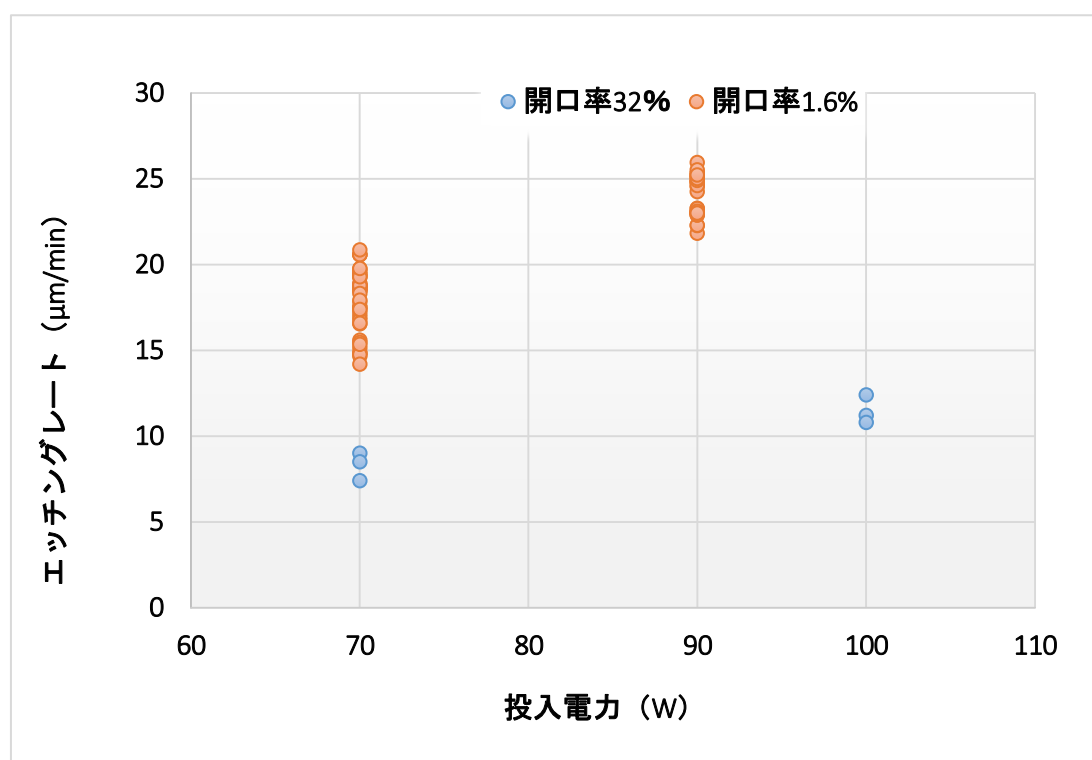


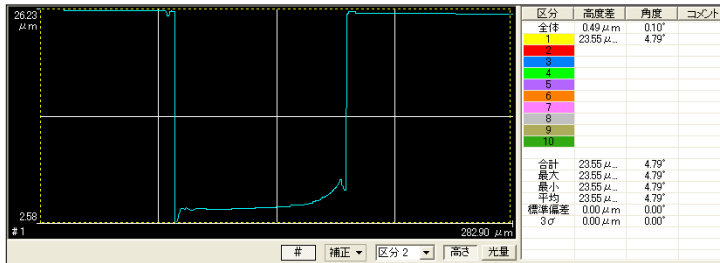
図 3 4 樹脂テープ型マスクを用いてエッチングしたウェハのエッチング速度ばらつき。Ar:2sccm, SF₆:16sccm, O₂:6sccm をフローし、ガスの総圧力を 18~20Pa、基板バイアス印加で処理した複数試料のデータをまとめた。

以下に計測データを示す。エッチングはメタルマスクを用いた実験で高速が得られた条件 (Ar:2sccm, SF₆:16sccm, O₂:6sccm をフローし、ガスの総圧力を 18~20Pa、基板バイアス印加) で 60 秒エッチングを行った。評価にはレーザー顕微鏡 (キーエンス VK9500)、触針式段差計 (DEKTAK 150)、およびマイクロスコブ (HIROX KH-7700) を用いた。

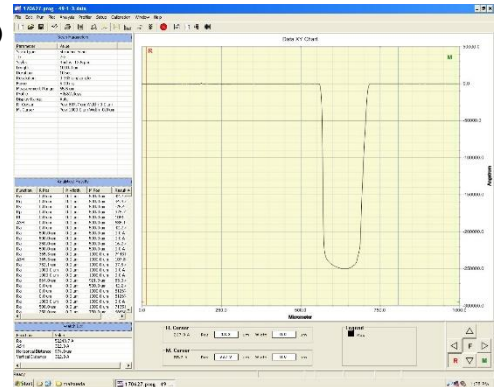
図 35 に、一つの試料の段差についてレーザー顕微鏡と触針式段差計で測定したデータを示す。ほぼ同じ深さが計測されており矛盾はない。

開口率 1.6%マスク使用

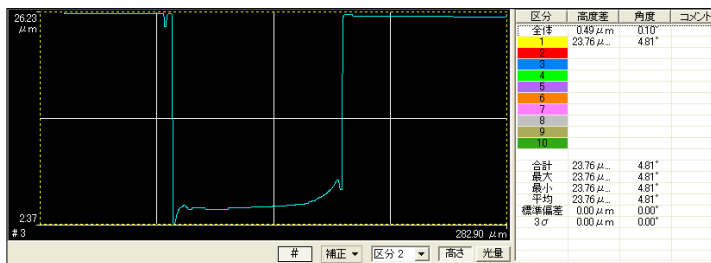
(a)



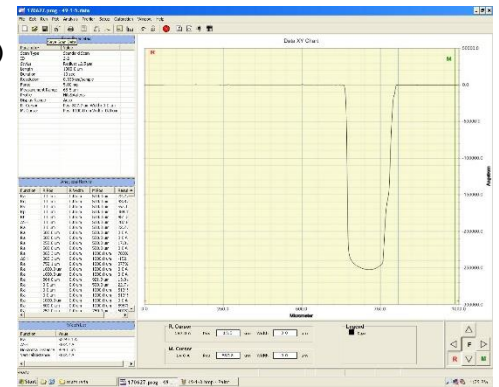
(b)



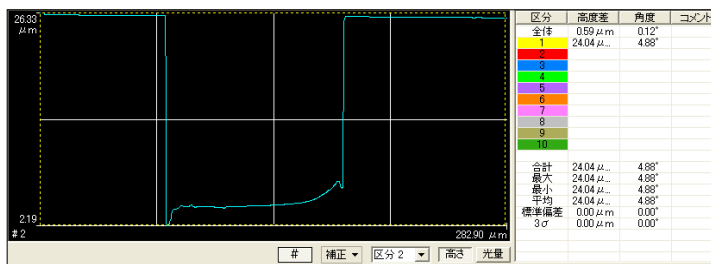
(c)



(d)



(e)



(f)

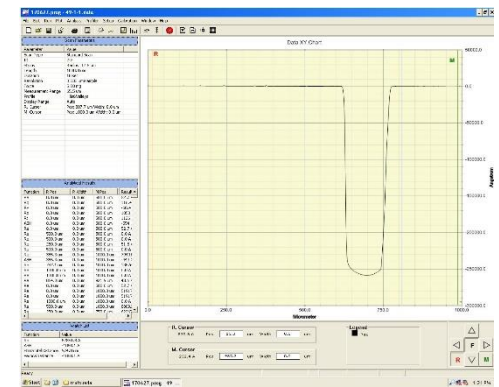


図 3 5 開口率 1.6%の樹脂テープ型マスクを用いて作製したエッチングウェハ（1 ウェハ内）の計測手法による深さ計測値ばらつき。投入マイクロ波電力は 90W、エッチング時間は 60 秒である。詳細条件は本文参照。(a, c, e) レーザー顕微鏡、(b, d, f) 触針式段差計。左右にほぼ同一位置で計測したそれぞれの計測結果を示す。

そこで、いくつかの試料に対し、同一箇所の計測を、異なる手法で測定した場合の深さばらつきを調査した。表2に開口率 1.6%マスク使用時の結果を示す。同一手法の測定値のばらつきを見るとレーザー顕微鏡が最も小さく $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 程度、触針式段差計が $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 程度、マイクロスコープが $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 程度で、いずれの手法も結論に影響を与えるような大きなばらつきがない事を示している。一方、測定手法間ばらつきを見ると系統的な差が見られる。レーザー顕微鏡は最も小さい値を示し、触針式段差計はレーザーよりも $+2.4 \mu\text{m}$ 、マイクロスコープは $+2.0 \mu\text{m}$ 程度大きな値が出る傾向にある。ただしこれも結論に変更を生じるような差異ではない。本報告書では主に（計測値が小さめに出る）レーザー顕微鏡データを用いて議論しており、エッチング速度を過大評価している可能性は低いと考える。

表 2 同一箇所を評価した時の測定値ばらつきおよび測定手法間ばらつき。
開口率 1.6%マスク使用時の結果。

測定手法	レーザー顕微鏡					触針式段差計				
深さ(μm)	23.06	22.89	23.11	22.99	23.00	25.21	25.34	25.01	25.51	25.22
測定手法	マイクロスコープ									
深さ(μm)	24.8	25.1	24.6	25.3	24.9					

表 3 には、同じく開口率 1.6%マスク使用時の 1 枚のウェハ内のエッチング深さばらつき（レーザー顕微鏡データに基づく）を示した。サンプル処理条件は図 3 5 と同じである。平均深さは $23.7 \mu\text{m}$ 、標準偏差(σ)は $1.1 \mu\text{m}$ となった。

表 3 同一ウェハの場所によるエッチング深さばらつき。開口率 1.6%マスク使用時の結果。
(レーザー顕微鏡計測結果による)

場所	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
深さ(μm)	23.06	22.28	22.96	24.78	24.24	25.95	22.88	23.28	23.25

次にエッチング部分の代表的な段差形状を示す。エッチング条件は図 3 5 と同じで、マスクの開口率は 1.6%である。投入したマイクロ波電力が 90W 時のレーザー顕微鏡データが図 3 6、70W 時の同データが図 3 7 である。それぞれ、4 枚の異なるウェハに対するデータを示している。

開口率 1.6%マスク使用

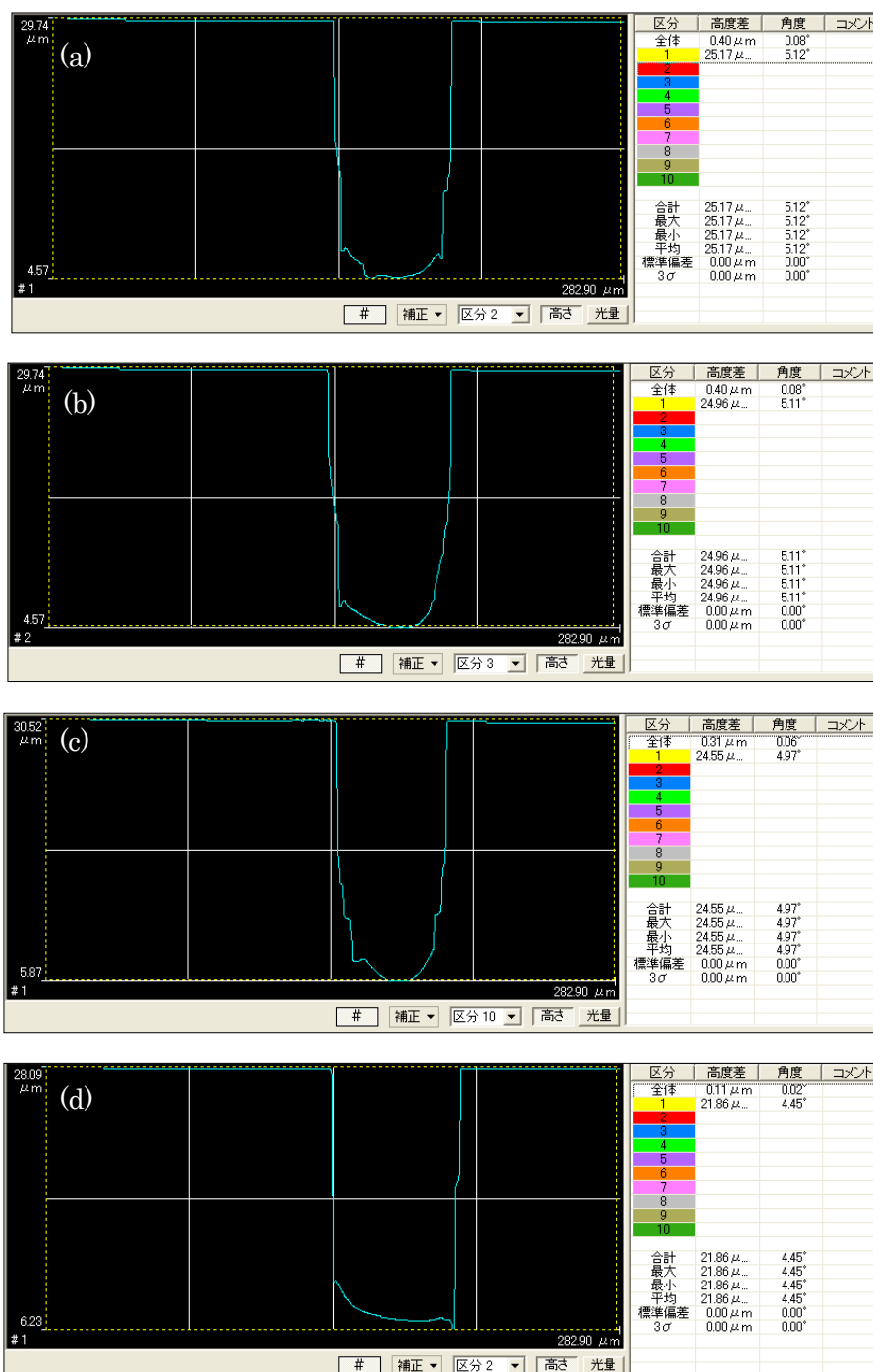


図 3 6 開口率 1.6%の樹脂テープ型マスクを用いて作製したエッチングウェハのレーザー顕微鏡によるエッチング形状計測結果。投入マイクロ波電力は 90W、エッチング時間は 60 秒である。詳細条件は本文参照。異なる 4 つのウェハに対する観察結果を示した。

開口率 1.6%マスク使用

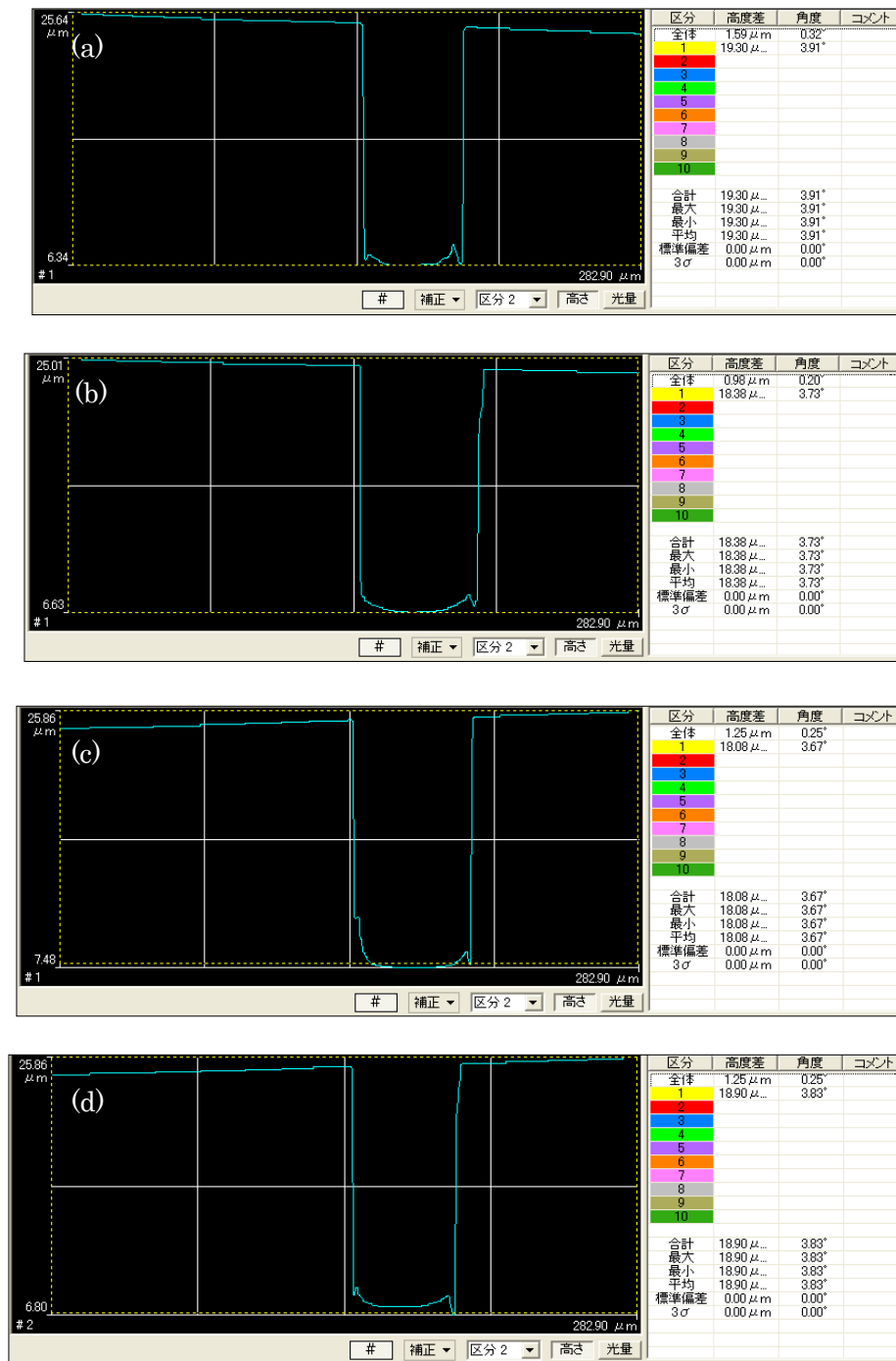


図 3 7 開口率 1.6%の樹脂テープ型マスクを用いて作製したエッチングウェハのレーザー顕微鏡によるエッチング形状計測結果。投入マイクロ波電力は 70W、エッチング時間は 60 秒である。詳細条件は本文参照。異なる 4 つのウェハに対する観察結果を示した。

以上の結果から、開口率 1.6%のテープ型マスクを用いた場合に 70W 以上のマイクロ波を投入する事で、数値目標である「エッチング速度 > 10 μ m/min」を達成できた。

最終章 全体総括

本事業では、ミニマル 3DIC 製造ラインの実現に必要とされている、TSV 貫通孔形成用の高速ミニマルエッチング装置を開発し、これを完成させた。

これを達成するため、低電力で狭い空間に高密度プラズマを形成できる「準共鳴型電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマ」を導入し、性能を落とすことなくミニマル装置に搭載可能な形状・サイズに修正することに成功した。

また、基板へのバイアス印加、基板の冷却、基板へのプラズマ引き込み磁場発生 の 3 つに機能を小型基板ステージに組み込んだ電圧・温度・磁場印加ステージを完成させた。

これらの要素技術を集めたミニマルエッチング装置を製作し、運用しつつ順次装置改良を施し、最適な運用条件を探索した。その結果、最終的には目標とするエッチング速度 > 10 μ m/min を得ることに成功した。

本事業の計画に上げた数値目標については達成できている状態であるが、実際のスルーホールパターンを用いたエッチング速度、形状評価が残っている。これに関しては、追加研究として実施する。

本装置は、現在のミニマル 3DIC ラインに欠けた機能を埋めるために開発されたものであり、事業化に向けて第一に行うべき事は、完成装置を既設のミニマル装置群と並べて設置し運用する事である。ミニマルファブに興味を持っている企業は既に多数あるため、性能を示せば自ずと装置販売/事業化につながる。上記の追加研究を完了させ、H30 年内に産総研に完成装置を持ち込む事を目標としている。