

令和2年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「反応性ヘリコン波プラズマプロセスを用いたミニマルファブ用
MEMS 向け高速エッチャーの開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 公益財団法人みやぎ産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 【1 パルス対応型の反応性ヘリコン波プラズマ源の開発】
- 【2 シリコンエッチングレートおよびエッチング形状評価】
- 【3 エッチャー装置のミニマル化】
- 【4 MEMSプロセス展開】

最終章 全体総括

- 1. 複数年の研究開発成果
- 2. 補助事業の成果に係る事業化展開について

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究開発の背景】

(社会的ニーズ・政策との関連性)

現在の社会では、利用者の個々の状況に応じたロボット介護機器や生活支援ロボットなどの多様化、自動車・交通・製造ラインから医療・農業などの広範な分野におけるIoTの普及によるセンサー搭載型デバイスの多様化など、※1 MEMS や LSI を用いた最先端のエレクトロニクス機器に対する社会的なニーズの多種多様化が進んでおり、第4次産業革命の変革期にある。特に、センサーデバイスはIoTを支える基幹技術であり、多品種少量製品の安定供給が必要となる。

(川下企業の課題)

その為川下企業では、従来技術では実現できない、MEMS センサーデバイスの高機能化に向けた、多品種開発のQTAT化(短納期・低コスト)と、多品種少量生産に対応した低コスト製造プロセスによる生産性の向上が求められている。

(川下企業のニーズ)

川下企業では、8インチMEMSおよびMEMS-CMOS製造ラインを構築し、フローセンサ、非接触温度センサ、圧力センサ、振動センサ等のMEMSデバイスを大量生産により安定供給している。一方で、これまでのメガファブによる大量生産方式では多品種少量生産に対する対応が開発・製造の両面において困難な状況であり、この課題を解決することにより、少品種大量生産から多品種少量生産を包括するセンサーデバイスの開発と安定供給が実現可能となる。

【研究目的及び目標】

研究開発の目標は下記の通りとした。

【1 パルス対応型の反応性ヘリコン波プラズマ源の開発】

【1-1】RFシステム開発(プラズマ源およびバイアス電源)

ミニマル筐体に収容可能な、最大出力電力200W及び50WのRF電源開発(DC-RF変換効率70%以上)とマッチャーレスインピーダンス整合(反射電力10%以内)

【1-2】 反応性ガスにおける高密度プラズマ生成とパルス制御

定常密度時間変動が 10%以内、パルス駆動時のパルス幅が msec 単位で制御可能

【2 シリコンエッチングレートおよびエッチング形状評価】

【2-1】 等方性・異方性エッチングレートの評価

等方性エッチングレート 10 μ m/min、異方性エッチングによる垂直エッチングが可能

【2-2】 ガス組成・圧力によるエッチング形状変化の評価

SF₆、O₂、Ar の組成・圧力により、垂直加工、傾斜加工(テーパ加工)のデータベース構築

【2-3】 パルス運転によるエッチング形状変化の評価

パルス制御による形状加工制御の原理実証およびミニマル試作機への搭載と動作試験

【3 エッチャー装置のミニマル化】

【3-1】 エッチャー装置のレイアウト最適化(設計)

各種電源系統、真空排気系、ガス導入系、制御系統の最適レイアウト実施

【3-2】 エッチャー装置のミニマル筐体への組込み

ミニマル規格に準ずるサイズ(装置サイズ約 29cm x 45cm x 144cm)での高速エッチャー装置の組込完了

【3-3】 エッチャー装置の制御ソフトウェア最適化

加工形状制御を実現するエッチングプロセスレシピ内蔵

【4 MEMSプロセス展開】

【4-1】 プロセスレシピ開発

ユーザーのニーズに関する情報収集と、対応するレシピ開発、およびライセンス形式によるソフトウェアへの内蔵機能

最終年度には、この自動制御型・小型高周波電源を構成する高周波コンポーネント（方向性結合器，高周波検波器，高周波アンプ）の選定をし直し、海外メーカー製部品等を導入することで電源の低コスト化を実現し、電源開発を実施している企業への技術移転を進めた。

また、バルスバルブ前段に供給するガスの圧力を、負圧領域を設定可能な高精度レギュレータを用いて制御することで、安定したパルスガス供給と高密度プラズマ生成をパルス制御することに成功した。

【2 シリコンエッチングレートおよびエッチング形状評価】

【2-1】 等方性・異方性エッチングレートの評価

【2-2】 ガス組成・圧力によるエッチング形状変化の評価

【2-3】 パルス運転によるエッチング形状変化の評価

SF₆ ガスを用いた等方性エッチングでは、上記【1】で開発した高周波プラズマ源を用いて、本開発の目標値である最大 10 μm/min 以上の高速エッチングを実現した。

異方性エッチングでは、エッチングガスとして SF₆、保護膜形成用ガスとして O₂ を導入し、それらの流量比によるエッチングレートと加工形状の評価を実施した。SF₆ の流量が多い際には等方性エッチングに相当する加工形状が得られ、O₂ の流量を増加させた際には傾斜が垂直に近づくことが示された。一方で、垂直加工時にはエッチングレートが劇的に減少することが明らかになり、高速で垂直加工するためには別の手法を用いる必要があることが分かり、下記のガスの切り替えパルスプラズマを組み合わせた手法を開発した。

高速で垂直加工を実現するために、SF₆ ガスを用いたエッチングと、C₄F₈ を用いたパッシベーションを、【1-1】で開発した高速自動制御プラズマ技術と【1-2】のパルスガス導入技術を用いた高速ガス切り替えによって実施し、垂直加工を実現できることを示した。また、パルス幅の短縮によってスキャロプ構造のサイズが無視できる状態で垂直加工が可能であることを示した。今回の開発で得られた最大エッチングレートは約 4.4 μm/min であり、これまでに開発された垂直加工が可能なエッチング装置に比べて 数倍のエッチングレートが得られた。またエッチングとパッシベーションのステップ回数の配列データを変更することで、テーパ形状および逆テーパ形状のエッチングを実施することに成功した。

【3 エッチャー装置のミニマル化】

【3-1】 エッチャー装置のレイアウト最適化(設計)

【3-2】 エッチャー装置のミニマル筐体への組み込み

【3-3】 エッチャー装置の制御ソフトウェア最適化

ミニマルファブ規格に準用した試作機を、メンテナンス性の観点と装置の性能面について各系統の最適なレイアウト検討を実施し、ミニマル筐体への組み込み作業を進め、動作確認、調整を行い試作機が完成した。また、形状加工制御プロセス等を柔軟に対応できるソフトウェアの最適化を行った。

【4 MEMSプロセス展開】

パルスガスを用いた高速ガス切り替え法によるプロセスを実施し、側壁への凹凸がない、スキャロプフリーの垂直シリコン加工が実現できることを示した。また、川下企業であるアドバイザーのオムロン殿や産業技術総合研究所のアドバイザーより情報を頂きながら、事業化に向けた情報収集を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：株式会社和泉テック

氏名：田中 信明

電話：022-375-0410

FAX：022-375-6170

E-mail：tanaka@izumi-tec.co.jp

第2章 本論

【1 パルス対応型の反応性ヘリコン波プラズマ源の開発】

本項目では、本研究開発の基幹技術となる反応性小型ヘリコンプラズマ源の開発と小型化・高効率化・制御の高度化に関する開発を行った。これまでに、周波数インピーダンス整合方式を採用することによりプラズマ源の飛躍的な小型化を達成しており、今回の開発では、シリコンエッチングに必要な反応性ガス（SF₆、O₂）の安定したプラズマ生成および、後述するエッチング形状制御に有用と考えられるパルス制御化への対応に関する開発を実施した。

【1-1】 RF システム開発（プラズマ源およびバイアス電源）（平成 30 年度～令和 2 年度）

周波数インピーダンス整合方式では、高周波アンプ内部に搭載した電圧制御型発振器の周波数により整合の調整を行うため、従来の方式に比べて高速での整合が可能になる。そこで、プラズマ生成部および基板バイアスの両者に同様の方式を適用することを念頭に置き、パルス幅が msec 単位で任意の値に制御可能である RF システムの開発を実施した。ここでは、駆動周波数が 40±3MHz の帯域で動作可能であり、プラズマ生成部は最大電力 200W、基板バイアス部は最大電力 50W 級を開発し、ミニマル筐体に収納可能なサイズのものを実現した。また、プラズマのパルス時間幅に対して十分に短い時間でインピーダンス整合を実施し、かつプラズマの安定化を実現するために、制御ボードを組み込み、高速・自動インピーダンス整合および正味電力を一定とする RF システムを開発した。

【1-2】 反応性ガスにおける高密度プラズマ生成とパルス制御（平成 30 年度～令和 2 年度）

まずは、アルゴンプラズマにおいて動作ガス圧、外部印加磁場強度を変化させて、10¹² cm⁻³ 級の高密度プラズマを得られる条件を確定した。その後、等方性エッチング、エッチング保護膜形成、ガス切り替え法におけるパッシベーションに必要な SF₆、O₂、C₄F₈ ガスをプラズマ源へと導入し、安定に動作可能な領域を検証し、広範なパラメータ領域にわたる反応性高密度プラズマ生成技術を確立した。その後、プロセス開発への柔軟な対応を可能とするため、高周波電力のパルス化によりパルス制御プラズマ生成技術を確立した。

●パルス対応型の反応性ヘリコン波プラズマ源の開発の成果

下図 1 には今回開発した RF システムの(a)概略図, (b)制御機構, (c)写真を示している。電圧制御型発振器(VCO), 電圧可変減衰機(VVA), DC-RF 変換効率 70%以上かつ動作周波数 $40 \pm 3\text{MHz}$ で動作可能なパワーアンプ(AMP)、方向性結合器(Directional coupler), 高周波検波器(RF detector)で構成される RF システムを構築し、(c)に示すようにプラズマ生成用と基板バイアス用の 2 系統をミニマル装置に適用した筐体に収納している。内部には、FPGA, AD/DA 変換器を備えた制御ボードを内蔵し、下図(b)の機構で反射係数(Γ_r)が最小となるように周波数(f)を制御し、かつ入射電力(P_i)と反射電力(P_r)の差である正味電力(P_{net})が一定となるように VVA のゲインを制御している。

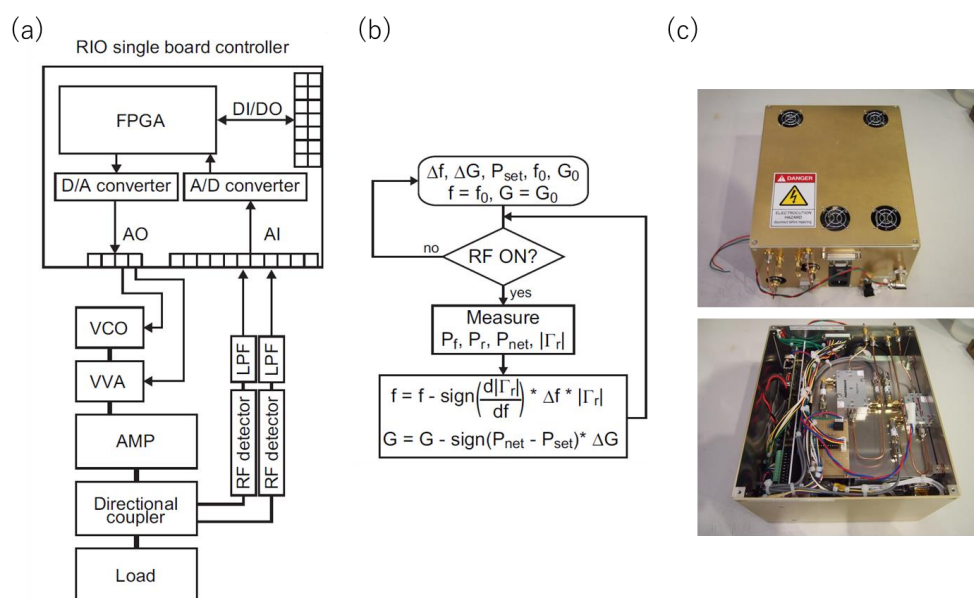


図 1:開発した RF システムの(a)概略図、(b)制御機構、および(c)外観写真

図 2 (a)には典型的なプラズマ生成時の周波数, プラズマ発光強度, 入射電力, 反射電力, 正味電力の計測結果を示している。ここでは正味電力設定値を 100W, パルス幅を 200ms に設定している。数 $10\mu\text{sec}$ で高周波電力が立ち上がると同時に、駆動周波数が自動的に変化し反射電力が減少していることが分かる。このことから、周波数自動制御によるインピーダンス整合が実現できていることが分かる。また、正味電力が設定値である 100W に漸近していることが分かり、高密度プラズマ生成時においても安定した電力供給が可能である。一方で、放電が不安定な場合が稀に観測されることがある。その場合の計測結果を図 2 (b)に示している。プラズマが不安定であることに起因して反射電力が増加した際に、反

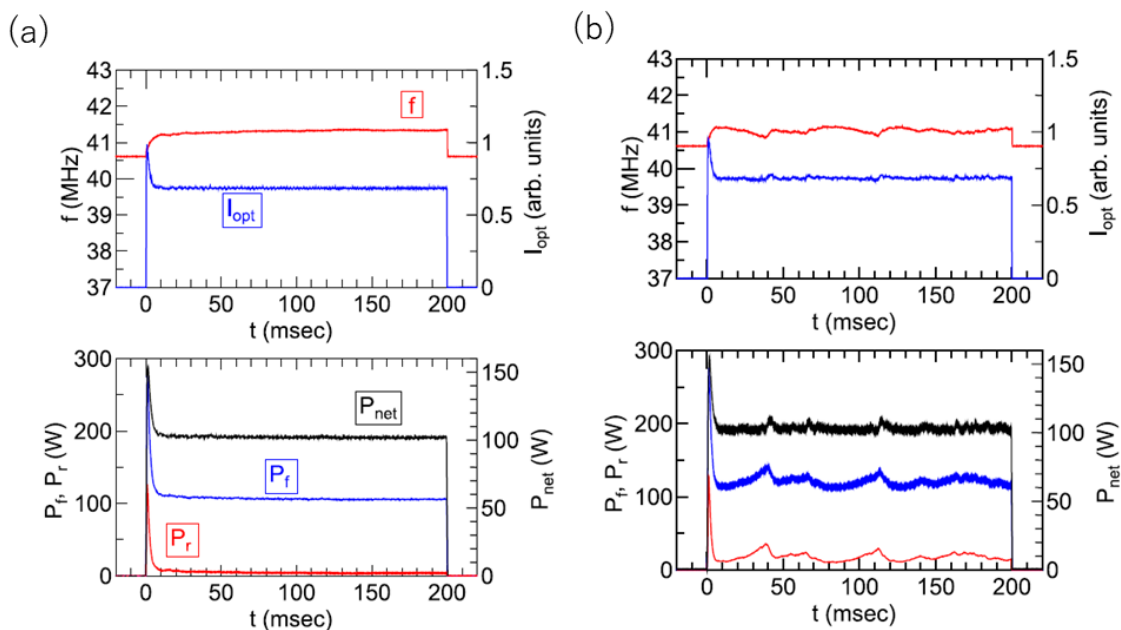


図2：(a) 典型的なプラズマ生成時の周波数(f)、プラズマ発光強度(I_{opt})、入射電力(P_i)、反射電力 (P_r)、および正味電力 (P_{net}) の時間発展波形。パルス幅は 200msec に設定。(b) 放電が不安定な場合の時間発展波形

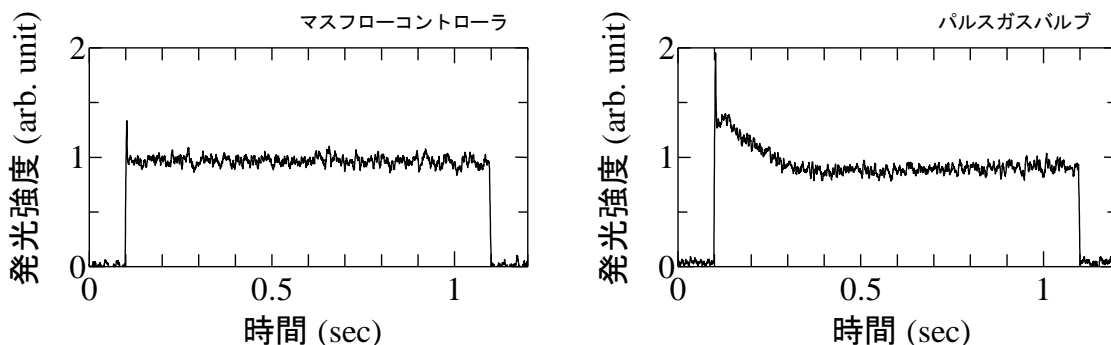


図3：マスフローコントローラまたはパルスガスバルブを用いて SF6 ガスを導入した際のプラズマ発光強度計測結果

射電力を最小化するように周波数が変動し、かつ正味電力を一定に保つように入射電力が増加している。この結果、正味電力を安定に供給することができ、プラズマの発光強度に大きな変動がみられないことが分かる。これらより、定常状態での密度時間変動が 10%以内、かつパルス幅が msec 単位で制御可能という目標値を達成できていることが分かる。

本開発では、定常的にマスフローコントローラで準定常的に反応性ガスを導入する場合と、パルスバルブによりガスを導入する二通りの動作モードがある。そこで、両者の動作モードにおいてプラズマ中のフッ素ラジカルの発光強度計測を実施し、プラズマ安定生成に関する評価を実施した。図3には、マスフローコントローラを用いて実際のプロセス条件に相当す

る 10sccm の SF6 ガスを導入した場合と、パルスガスバルブを用いて SF6 ガスを導入した際のフッ素ラジカルの発光強度を示している。パルスガスバルブの前段には、負圧を包括して精密に圧力を制御可能なレギュレータを搭載し、パルスガスバルブを開けた際のガス導入量を制御している。マスフローコントローラを用いた場合には安定した発光強度が得られており、パルスバルブを使用した際も同程度の発光強度が得られている。これより、マスフローコントローラおよびパルスガスバルブを用いた場合のいずれにおいても、今回開発した RF システムを用いることで、安定したプラズマ生成およびそのパルス制御手法が確立されたといえる。

【2 シリコンエッチングレートおよびエッチング形状評価】

本項目では、高速シリコンエッチングおよびエッチング形状制御のためのプロセスレシピ開発に向けて、上記項目【1】で開発したプラズマ源および RF システムを用いてエッチングレートと形状の評価を実施した。また必要に応じてプラズマ源の改良や基板位置の最適化等を図った。本事業では、ガス組成比による形状制御、または等方性・異方性エッチングの精密時間制御による形状制御に関するプロセス開発を実施するための基礎知見を本項目における実験で得た。また、ミニマル試作機の組み立ての状況に応じて、上述の知見を基に、ミニマル試作機において同様のプロセスが可能であることを検証した。これらの実験では、東北大学にて開発したラボ機を活用して、和泉テックの技術者が中心となり実験および加工形状の分析を実施し、ミニマル試作機が完成次第、和泉テックにて試作機を用いたプロセス検証を行った。

【2-1】等方性・異方性エッチングレートの評価（平成30年度～令和元年度）

プロセス開発の基幹データとなるヘリコン波プラズマ源による等方性・異方性エッチングレートに関して、SF6、O2、Ar、C4F8等のガス圧およびプラズマ源電力と基板バイアス電力の多岐にわたるパラメータを広範な領域に渡って変化させ、当事業で開発するミニマル装置におけるプロセス開発へ向けた基盤を構築した。これにより、等方性エッチングにて 10 μ m/min 以上のエッチングレートを達成可能な条件を、異方性エッチングに関しては、垂直加工が可能となるガス組成比を同定し、後述する項目【2-3】および【4 MEMS プロセス展開】の基礎データを構築した。

【2-2】 ガス組成・圧力によるエッチング形状変化の評価（令和元年度～令和2年度）

ここでは、エッチングを促進するSF6 およびエッチング保護膜である酸化膜を形成するO2をプラズマ源へと導入し、これらの組成比、および圧力を変化させた際の、断面エッチング形状の評価を行った。ガスの組成・圧力のみで制御可能なエッチング形状を同定し、プロセスレシピ化へ向けた基礎データを得た。このガス組成・圧力のみでは対応が難しい形状に関しては、次に述べるパルス制御による形状制御を試みた。

【2-3】 パルス運転によるエッチング形状変化の評価（令和元年度～令和2年度）

プラズマ源および基板バイアスのRFアンプのパルス化に加えて、マスフローコントローラによるガス流量の定常制御およびパルスバルブによるパルスガス導入機構を備えることで、等方性・異方性エッチングの精密時間制御が可能になった。これらの等方・異方性エッチングの時間を調整することで、図4のプロセス案に示すような形状制御が実現可能になると期待され、ラボ機でこれらの原理検証を実施するとともに、ミニマル装置にこれらのパルス機能を搭載することで、将来的にはユーザーが独自のプロセス開発が可能となるよう、装置開発を進めた。

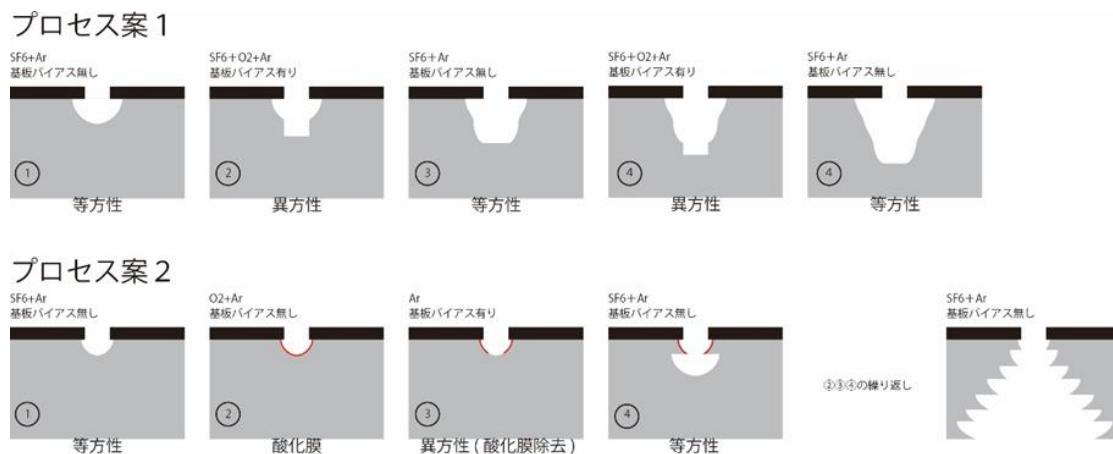


図4：パルスプラズマ制御によるエッチング形状制御の例（プロセス案）

●案1では、等方・異方性エッチング時間を同程度にすることで、テーパ加工が可能になると期待される。

●案2では、等方性エッチングの時間を徐々に増加させることで、逆テーパ加工が可能になると期待される。

*等方性エッチングや酸化膜形成・除去プロセスに要する時間を msec 単位で高速・精密制御することで、図中で見られる断面の凹凸を無くすることが可能になると期待される。

●シリコンエッチングレートおよびエッチング形状評価の成果

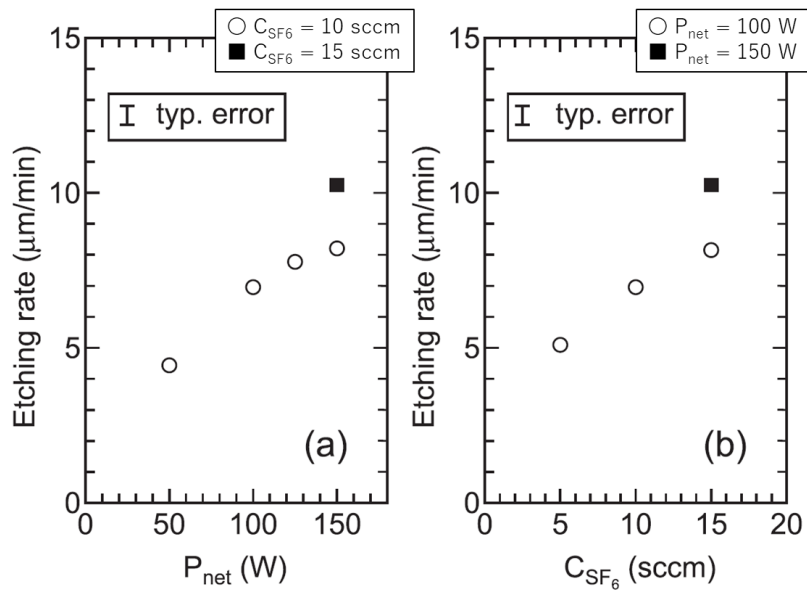


図 5: SF6 ガスを用いた等方性エッチングにおけるエッチングレートの測定結果。
 (左図) プラズマ生成用の高周波電力依存性。(右図) SF6 のガス流量依存性。

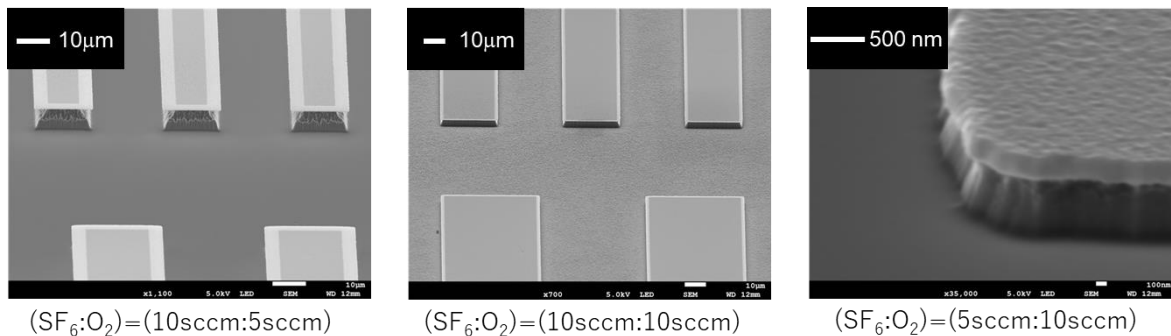


図 6: SF6+O2 混合プラズマによるエッチング後の SEM 像。

図5には、SF6 ガスを用いた等方性エッチングにおけるエッチングレートの測定結果を示している。エッチングレートの測定結果の評価には、エッチング後の段差を接触式段差系にて評価した。プラズマ生成用の高周波電力および SF6 ガス流量の増加によってエッチングレートが向上することが分かり、本開発の目標値である $10 \mu\text{m}/\text{min}$ を得ることに成功した。

図6には、SF6 と O2 の混合ガスプラズマを用いてエッチングを行った後の、シリコン基板の SEM 像のガス流量比依存性を示している。SF6 ガス流量が多い場合には等方性エッチングが支配的となっており、O2 の流量比を増やすことで側面が垂直に近づいていることが分かった。

図7には、マスフローコントローラを用いてパッシベーション (C4F8 プラズマ) とエッチング (SF6 プラズマ) の切替を行いシリコンを垂直加工した際の SEM 像である。両

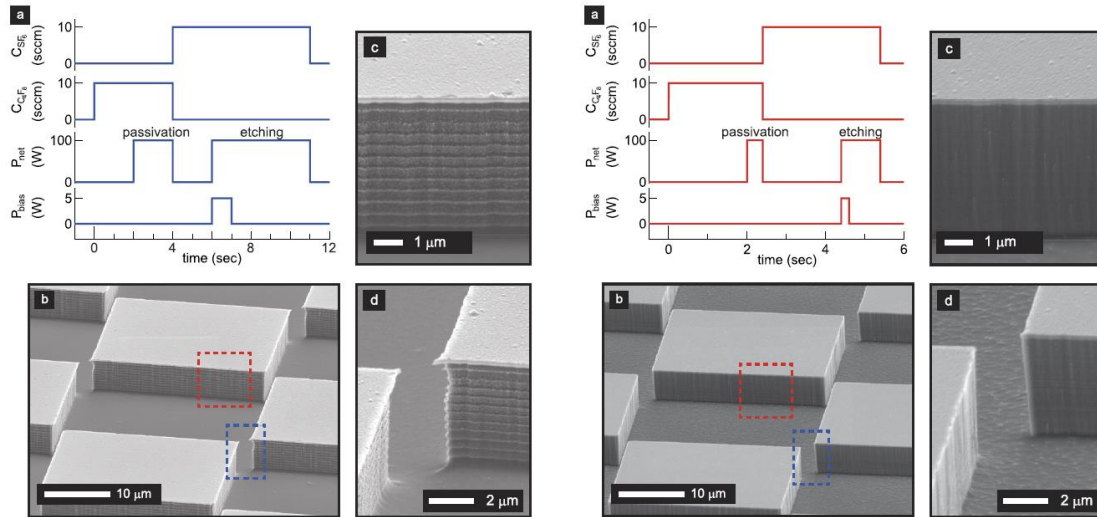


図 7: マスフローコントローラを用いてガス切替を行い、シリコンを垂直加工した際の SEM 像。(左図) パッシベーションステップ 2sec、エッチングステップ 5sec の場合。(右図) パッシベーションステップ 0.4sec、エッチングステップ 1sec の場合。

者ともに垂直加工が実現できている。左図のパルス幅が長い場合には側壁のスキヤロップ構造が顕著に形成されているのに対し、パルス幅を短くすることでスキヤロップサイズを低減し、スキヤロップフリーの垂直加工が実現できていることが分かる。一方で、マスフローコントローラを用いた場合には、ガスの安定化まで数秒要していることから、実効的なエッチングレートが低下し、左図の場合には $1.8 \mu\text{m}/\text{min}$ が得られるのに対し、パルス幅が短い右図の場合には $0.63 \mu\text{m}/\text{min}$ となることが分かった。したがって MEMS 加工に用いるためには、ガス切り替えに要する時間を短縮する必要がある。

そこで、図 3 において既述のように、高速パルスガスバルブを用いてガス切替を行う手法を開発した。また、ガス切り替えの際のガス排気に

要する時間を計算した結果を図 8 に示す。約 150msec 程度で容器内のガスの 99% を排気可能であることが明らかとなり、エッチングとパッシベーション間のガス排気を待機する時間を今回 150msec と設定した。

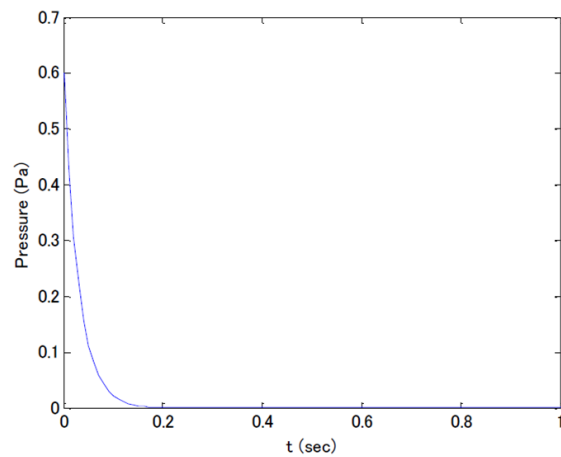


図 8: 今回用いた真空容器および計測した実行排気速度を用いて計算した容器内圧力の時間変化。

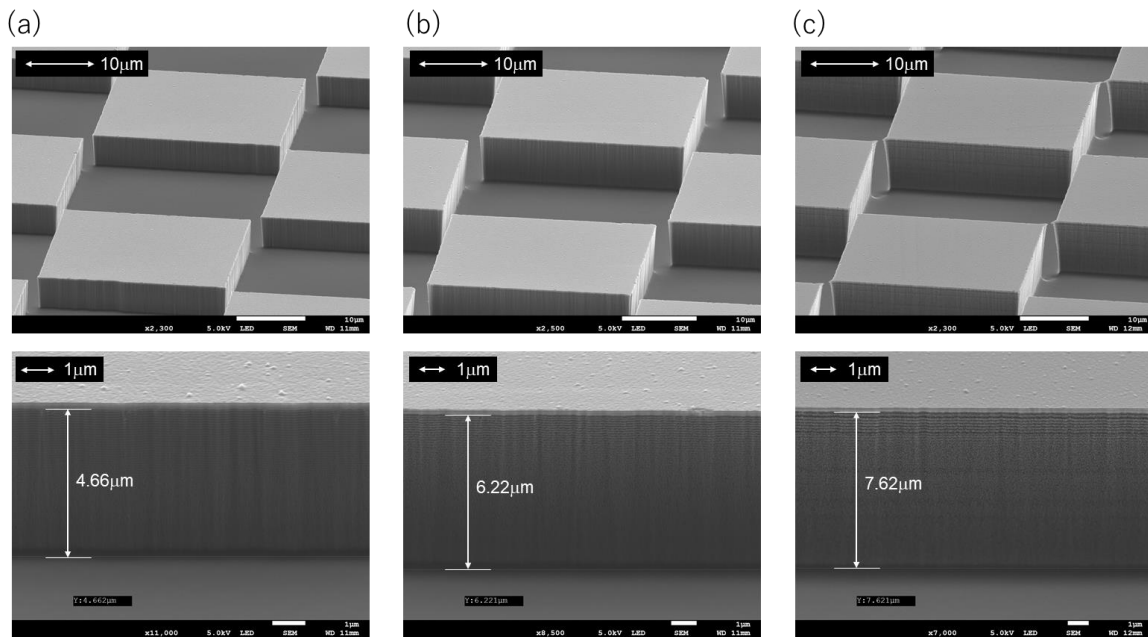


図 9: パルスガスバルブを用いてガス切替を行い、シリコンを垂直加工した際の SEM 像。(a) 高周波電力 100W, (b) 高周波電力 150W, (c) 高周波電力 200W.

図9に、パルスバルブを用いたガス切替とパルスプラズマによってシリコンを垂直加工した場合のSEM像を示す。スキャロプフリーで垂直加工が可能であることが分かる。また高周波電力の増加に伴いエッチング深さが増加していることが分かる。これらのエッチング深さとプロセス時間から求めたエッチングレートは、高周波電力 100W, 150W, 200W においてそれぞれ、 $2.7 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $3.6 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $4.4 \mu\text{m}/\text{min}$ であり、高速エッチングが可能であることが示された。

図 10 には、テーパ加工と逆テーパ加工の例を示している。ここでは、パッシベーションステップとエッチングステップの回数の配列のみを制御することで、テーパおよび逆テーパ加工を選択可能であることを示しており、さらに傾斜の角度も制御可能であることが実証された。これより、図4で提案していた加工形状制御法を確立したといえる。

これらの形状加工制御技術やパルスバルブを用いたエッチャー装置に関しては既に特許出願済みである（特願 2021-45738）。また後述するように、上述の技術を組み込んだミニマル試作機においても、シリコン垂直加工に関して同等の性能が得られている（図 11）。

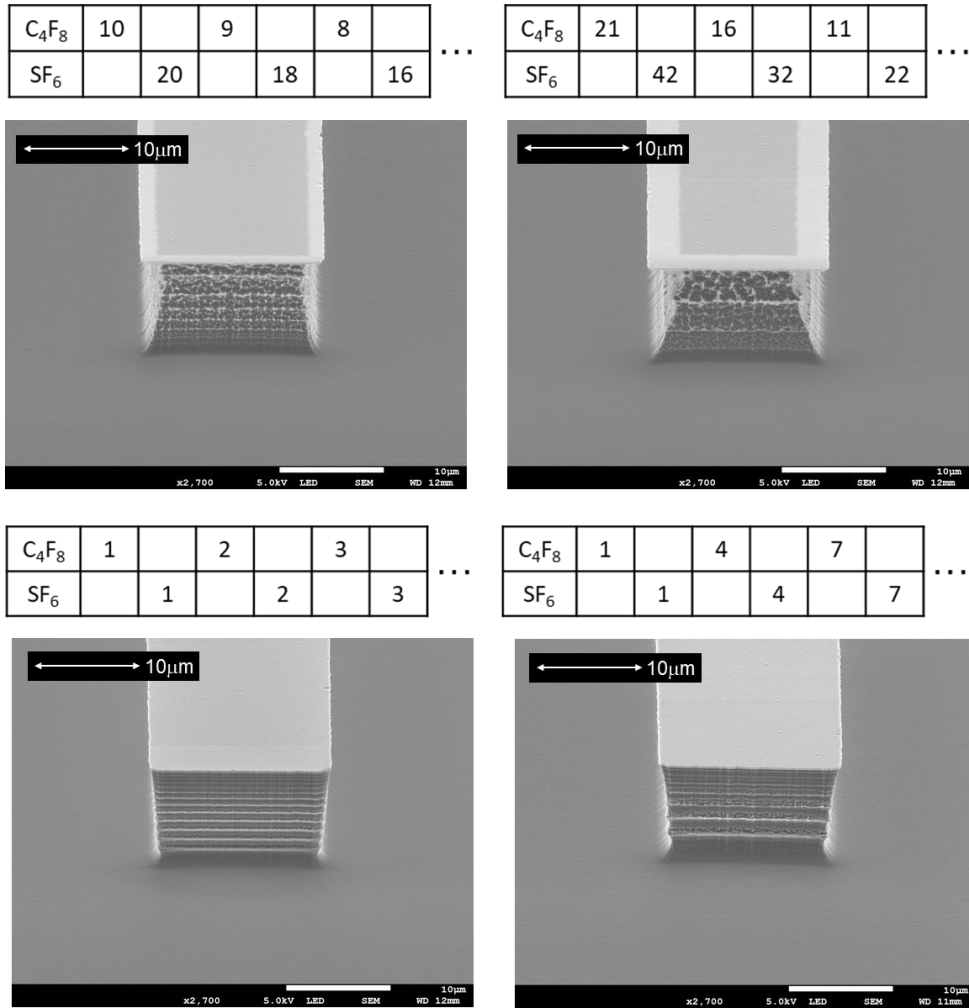


図 10: テーパー加工、逆テーパー加工の例。図中の表は、パッシベーション(C₄F₈)とエッチング(SF₆)ステップの回数配列

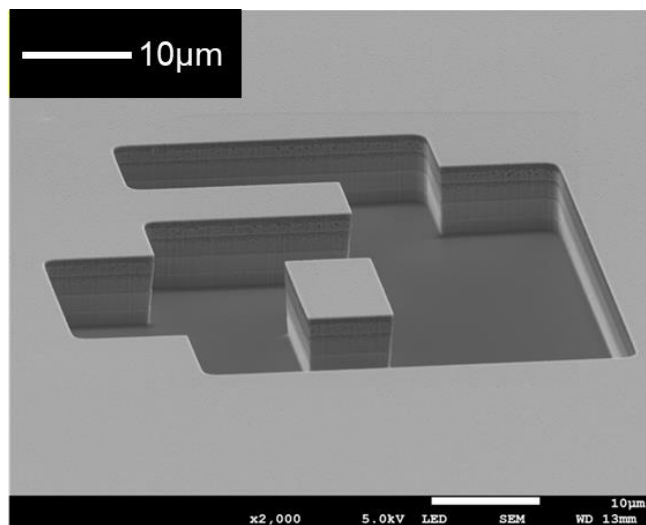


図 11: ミニマル試作機を用いて垂直加工を行ったシリコン基板の SEM 像

【3 エッチャー装置のミニマル化】

上記 1、2 の研究開発項目を踏まえた高速 MEMS エッチャー装置のミニマル化を実施した。ここでは、パルス対応高周波アンプを含むヘリコン波プラズマ源、基板バイアス電源、複数台のマスフローコントローラ・パルスガスバルブに加えて、周辺機器(ウエハ搬送ユニット PLAD、真空排気系、圧力制御弁、シーケンサや電源系統を含む電気制御系、冷却水ユニット)を含む、最終的な装置設計・試作を行うことで、事業期間終了後の装置販売と事業化を目指した。



図 12：高速 MEMS エッチャー装置

【3-1】 エッチャー装置のレイアウト最適化(設計) (平成30年度～令和2年度)

高速 MEMS エッチャーに必要な全コンポーネントをミニマル規格に準ずる筐体 (29cm x 45cm x 144cm)内に収納可能であり、ミニマル規格で定められたウエハ搬送機構である PLAD との接続、およびウエハ搬送メカトロニクスと搭載した装置設計を実施した。

【3-2】 エッチャー装置のミニマル筐体への組込み(平成30年度～令和2年度)

ミニマル規格で定められた部材 (筐体、タッチパネル、PLAD 等)のミニマル筐体への各コンポーネントの組込み作業を進め、真空チャンバーのリークチェック、メカトロニクスの動作チェック、プラズマ源の動作チェック等を確実に行った。

【3-3】 エッチャー装置の制御ソフトウェア最適化 (令和2年度)

ミニマル規格で定められた制御システムに適合する規格で、【3-2】にて組み込むハードウェアを制御するため、プロセスを柔軟に変更できるソフトウェアを組み込んだ。

●エッチャー装置のミニマル化の成果

東北大学にてプラズマ源等の構成に必要な寸法を確定し、和泉テックにてラボ機を用いて得られた実験結果を構成に反映させ、誠南工業にて装置のメンテナンス性も含めたレイアウト検討を行った。その設計に基づいてミニマル筐体への組込み、動作チェック、調整を行っ

た。また、マスフローコントローラを用いたプロセス、パルスバルブを用いた高速ガス切り替えプロセスを実現可能とするソフトウェアの組込みを完了し、本装置を完成させた。

これにより、最終目標に対し100%達成することができた。

【4 MEMSプロセス展開】（令和元年度～令和2年度）

本項目では、上記【1】【2】【3】における研究成果を踏まえて、ミニマル試作機におけるMEMSプロセスのレシピ開発を実施した。ユーザーのニーズに関する情報収集と、対応するレシピ開発(エッチングレートおよび加工形状)に応じてプロセスレシピを開発し、最終的にはミニマル装置に実装するソフトウェアにその条件を組み込むことで、事業化へ向けたレシピを装置に付与した形(ライセンス形式によるソフトウェアへの内蔵機能)で事業展開を行った。

●MEMSプロセス展開の成果

ユーザーのニーズに関する情報収集の結果、最も要望の声が多かった加工が、MEMSセンサ作成や3D-IC作成のためのシリコン深堀技術である。そこで、エッチングとパッシベーションのサイクル数を増やしてシリコンの深堀・垂直加工を試みた。図13には、深さ約70 μm のエッチング加工を行ったシリコン基板のSEM像である。今回のサンプルでは200nm厚のアルミマスクを用いており、シリコンとアルミマスクの選択比は350以上が

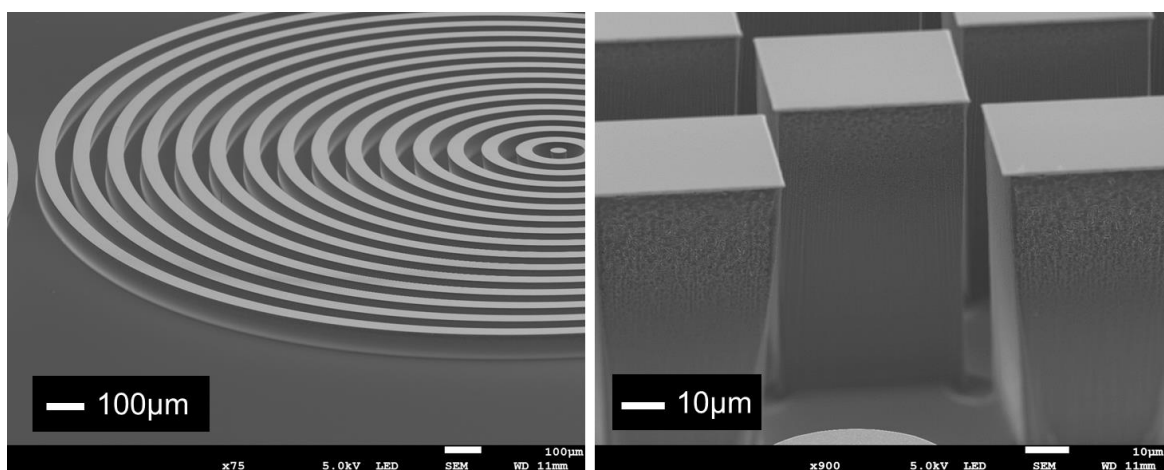


図13: シリコン深堀加工の例。エッチング深さは約70 μm 。

得られており、深堀加工も可能であることが示されたといえる。

最終章 全体総括

1. 複数年の研究開発成果

本事業では、多品種少量生産を可能とするミニマルファブにおいて、MEMS デバイス用のシリコンエッチング装置の開発を行った。

パルス対応型の反応性ヘリコン波プラズマ源の開発においては、最終目標値である 200 W と 50W 級の RF アンプを搭載した RF システムを開発し、高速で動作可能な制御ボードを内蔵することで、自動周波数可変方式によるインピーダンス整合と正味電力の安定供給を実現した。その結果、反応性ガスにおける高密度プラズマ生成とパルス制御に関して、パルスガスバルブを用いて高速でガスの切り替えを行った際でも、10msec 以内でのインピーダンス整合が可能となり、定常状態での密度変動が 10%以内、かつ 10msec 以上のパルス幅において msec 単位でのパルス幅精密制御が可能なシステムを構築し、目標値を達成した。

エッチングプロセスにおいては、目標値である等方性エッチングレート $10\mu\text{m}/\text{min}$ 以上を達成し、パルスガスを用いたガス切替と RF システムを組み合わせることで、最大 $4.4\mu\text{m}/\text{min}$ のエッチングレートでスキャロプフリーのシリコン垂直エッチングを実現した。また、パッシベーションステップとエッチングステップの回数の配列を制御することで、テーパー加工・逆テーパー加工の選択や、エッチング側壁の傾斜角度制御技術を開発した。

これらの技術をミニマル試作機に組み込み、試作機においても同等のエッチング加工が可能であることを示した。ミニマル試作機には、熟練した設計・製作技術を駆使して、パルスバルブを用いたガス導入システムと、マスフローコントローラ複数台を用いたガス導入システムの両者が搭載されており、幅広いユーザーの要望に応えるべく、複数種のプロセスの実施が可能な装置として完成することが出来た。

MEMS デバイスへと今後適用し事業化していくために、シリコンの深堀加工を実施し、現時点では $70\mu\text{m}$ 程度の深堀加工を達成しており、MEMS デバイス製作へと適用可能な性能を有している装置開発を行った。

2. 補助事業の成果に係る事業化展開について

【想定する市場】

【想定する国内、海外市場（現状、今後の動向）】

図 14 は、ミニマルファブ技術組合およびファブシステム研究会によるミニマルデバイスの市場予測であり、多品種少量製品だけで 10 兆円を超える市場が創出されると考えられている。今回の製品は、これらの製造装置群の中心的役割を果たすものと期待され、その波及効果は大きい。

また図 15 は、MEMS デバイスの市場予測結果を示しており、2021 年には MEMS デバイスの市場は約 200 億ドル（約 2 兆円）を超えると考えられているが、その中で多品種少量製品に相当するものが半数(1 兆円)ほどある。

この市場の内一般的に装置：デバイスの売上比が 1：5 と言われており、MEMS に必要な装置は 30 種類程度有ることから、本装置の市場はおよそ 50 億円程度であると推測される。従って、MEMS デバイスの多品種少量化に対応する本装置は、大きな経済効果をもたらす可能性があるといえる。

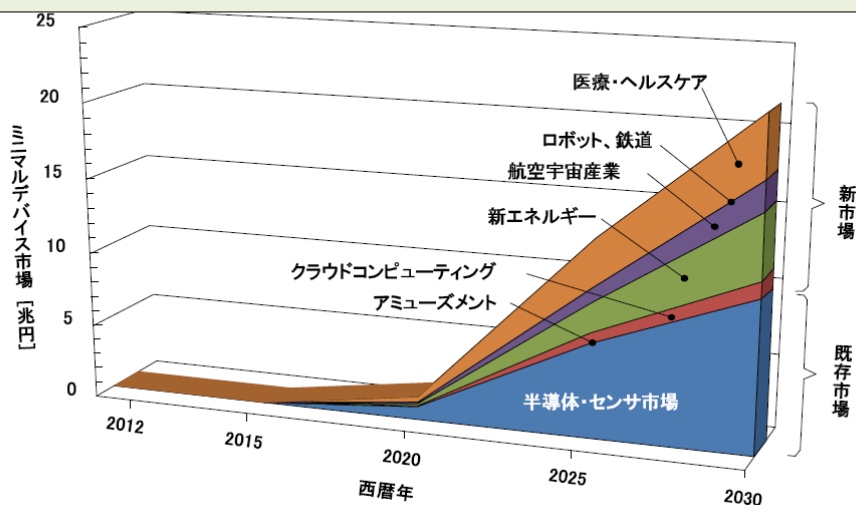
ミニマルファブは、公的研究機関（国公立・私立大学、高専、各都道府県の公設研、産総研、JAXA、物質材料研究所、理研等）における研究開発にも大きな力を発揮することが出来、ファブシステム研究会の調査によれば、1 機関 1 ラインを想定した場合に、最大 282 ラインの導入が期待される（図 16）。1 ライン当たりにシリコンエッチング装置が複数台導入されると仮定すると、公的研究機関のみを想定しても多くの装置を販売できる可能性があり、その結果国内における新規デバイス開発の国際競争力増加につながり、その経済効果は大きいと考えられる。

本エッチャー装置を用いて、事業期間終了後に、トライアルプロセス事業を開始することで、その信頼性や性能を社会に向けて発信し、顧客拡大を着実に進める。

ミニマル新市場



ミニマルファブの出現により、2025年にはおよそ6.5兆円/年の新市場が創造される。これに加えて、既存の3”~5”ウェハを使うデバイス市場のほとんどと、6”~12”市場のおよそ2割、合わせて約6.2兆円のデバイス市場がミニマルファブで製造される市場になると予想される。



ミニマルファブ技術研究組合とファブシステム研究会による市場予測 (2014.11)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

3

図 14: ミニマルファブによるデバイスの市場予測

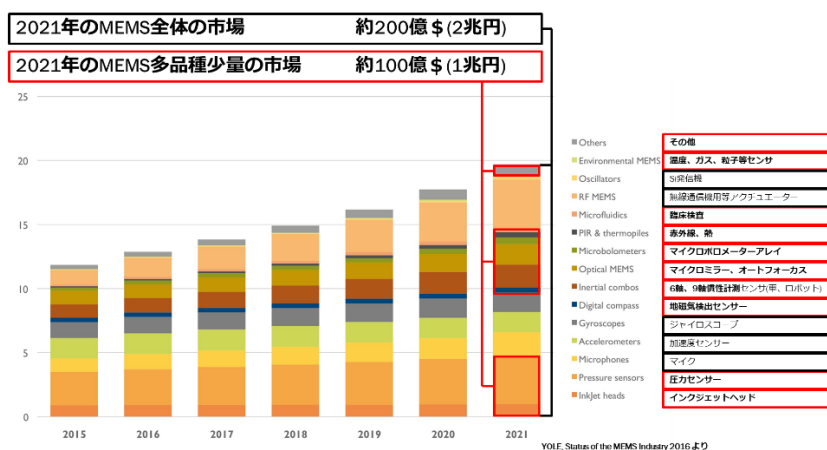


図 15: MEMS デバイスの市場予測結果

■ 大学	257ライン
□ 国立大学	120ライン
□ 私立大学	74ライン
□ 公立大学	6ライン
□ 高等専門学校	57ライン
■ 都道府県の公設研	15ライン
■ 産総研	7ライン
■ 物材機構、理研	3ライン
合計282ライン	

図 16: 公的機関を対象としたミニマルファブ市場 (出所: 産総研ファブシステム研究会調査データ)

【特許出願】

発明の名称：微細立体構造形成方法、微細立体構造、プラズマエッチング装置およびガス供給システム

出願番号：特願 2021-45738

発明者：高橋和貴、原史朗、石田夕起、亀井龍一郎、藪田勇氣、大滝英司、田中信明

出願日：令和3年3月19日