

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「超精密位置決めステージを搭載した半導体加工装置の
高度化技術開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 1月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社三友製作所

目次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 高精度、軽量でクリーンルーム及び真空環境下で使用可能な3次元ステージの開発	10
2-1-1 ステージ精密移動用アクチュエータ開発	10
2-1-2 アクチュエータ駆動用ドライバ基板の開発	12
2-1-3 ゼロバックラッシュ精密位置決めステージ開発	12
2-2 加工情報を抽出する技術の開発	14
2-2-1 加工時のプラズマ制御	14
2-2-2 加工終点検出技術	14
2-3 ステージ制御のためのソフトウェアの開発	18
2-4 高度化半導体加工装置プロトタイプ開発	18
2-4-1 半導体加工装置プロトタイプ開発	18
2-4-2 プロトタイプ用ソフトウェア開発	20
2-4-3 プロトタイプ評価機能による加工形価	20
第3章 全体総括	22
3-1 研究開発成果	22
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	22
3-3 事業化の可能性及び市場性について	22
3-4 知的財産戦略について	23

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) 研究の背景

「中小企業の特定制品づくり基盤技術の高度化に関する指針」（以下、高度化に関する指針と称する）によれば、「我が国製造業の国際競争力の強化及び新たな事業の創出を図るためには、位置決めに係る技術（以下単に「位置決め技術」という。）を有する川上中小企業者（以下「位置決め事業者」という。）は、川下製造業者等のニーズを的確に把握し、これまでに培ってきた技術力を最大限に活用するとともに、当該ニーズにこたえた研究開発に努めることが望まれる」とされている。さらに、高度化に関する指針の中では、半導体産業においては位置決め技術に関し、以下の課題と高度化目標が指摘されている。

①課題

- ア．高速化
- イ．高精度化
- ウ．静音化・低振動化
- エ．軽量化
- オ．低発塵化

②高度化目標

高速化、高精度化等のための位置決め技術の高度化目標は、以下のとおりである。

- ア．高精度化
- イ．静音化又は低振動化
- ウ．低発塵化
- エ．コンパクト化又は軽量化
- オ．高速化

①、②で示された課題と目標から、位置決め技術に求められる技術開発課題は、高精度化、静音化又は低振動化、低発塵化、コンパクト化又は軽量化、高効率化、安全性又は信頼性の向上、環境配慮の7つに集約される。

2) 研究の目的と目標

グリーンイノベーション分野、特にスマートグリッド向け半導体素子の早期開発が喫緊の課題となっており、開発期間の短縮と信頼性向上のためには故障解析能力の向上が必須である。故障解析には半導体の配線露出が必須工程であるが、現在は機械研磨・イオンビーム加工の複数工程からなり、1億円以上の装置コストと2日以上時間を要している。そのため、半導体産業では短時間かつ低コストで、半導体の絶縁膜を除去して配線を1層ずつ露出できる半導体加工装置の実現に対する要望が強い。それらの要望解決を図ることを目的に、以下を実施する。

本開発では吸引プラズマという新技術を活用し（特許出願済み）、集積回路の配線露出の全工程を1台の装置で1時間に短縮できる小型の半導体加工装置を開発する。さらに超高精度位置決めステージとプラズマの分析から加工情報をモニタする機構を開発することにより、半導体の絶縁膜を除去して配線を1層ずつ露出できる半導体加工装置の開発を目指す。

半導体製造装置はクリーンルーム内で使われるため、工作機器・サーボモータ等のオイルや発塵の対策が必要とされ、超高精度位置決めステージを圧電駆動と超音波モータの機能を一体化したハイブリッドな積層圧電素子とすることで、小型かつオイルフリーの特徴を活かして高精度化とともに低発塵化を目指す。

半導体故障解析の分野においては、位置決め機構のサイズが真空チャンバに入るだけの小型、軽量性を確保しなければならないため、同条件を満たす超精密位置決めステージを開発する。

一方、半導体故障解析用の加工装置は、移動して使用されることが多く可搬性を求められるが、通常のプラズマエッチング装置は有毒ガスを用いるため除害装置を必要とし、試料の搬送機構が大きく据え置き型になっている。そのため、小型の加工ガス用除害装置を開発し、半導体加工装置全体の大きさを抑え、可搬性も高める。

3) 研究の概要

本研究開発は、微細・多層化する半導体デバイスの製造・開発で重要とされている故障解析において、絶縁膜除去等の前処理加工の改善および多大な加工コストと時間を削減することを目的とする。具体的には、半導体産業から要望のある絶縁膜一層毎の除去が可能な半導体加工装置の開発を行う。

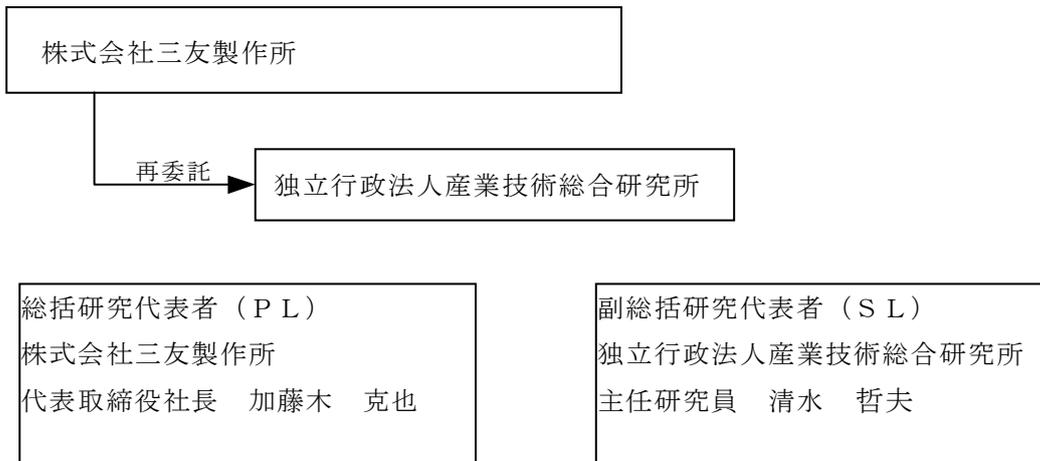
1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

高度化に関する指針で述べられているように、新たな技術の開発が求められる位置決め技術は、ソフトウェア、機器、材料等の複合的な開発が求められている。このため、位置決め事業者の単独での研究開発は困難であり、位置決め事業者は、大学、他の企業等と共同で研究開発に取り組むことも必要である。そこで本研究開発においては下記のように産官学の連携体制を取る。とくにアドバイザーとして川下産業であるところの半導体製造メーカーに参加していただき、ユーザの観点から意見をもらうとともに、プロト機を実際に使ってもらい、製造現場からの意見を研究開発に反映させる。

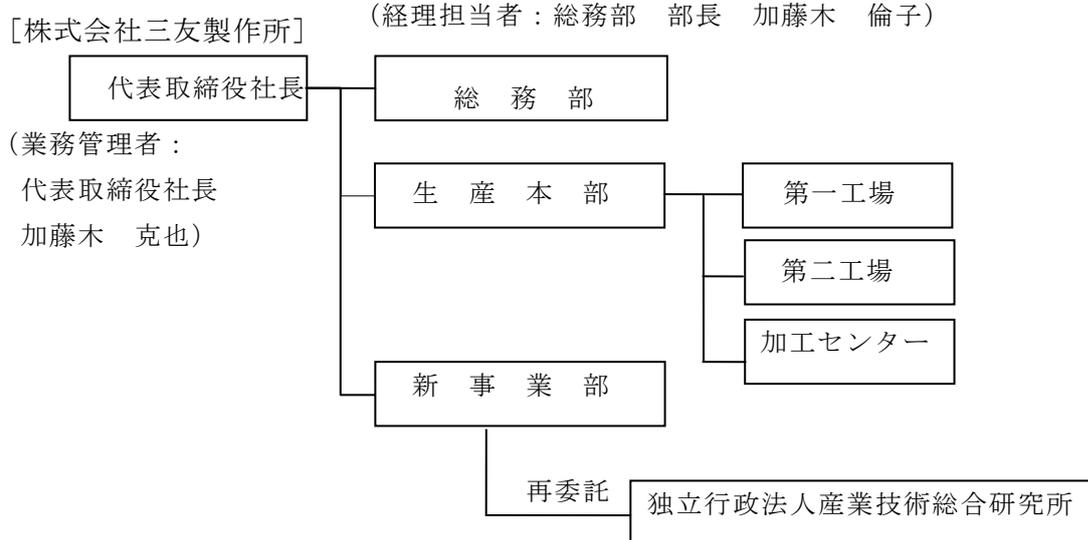
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)



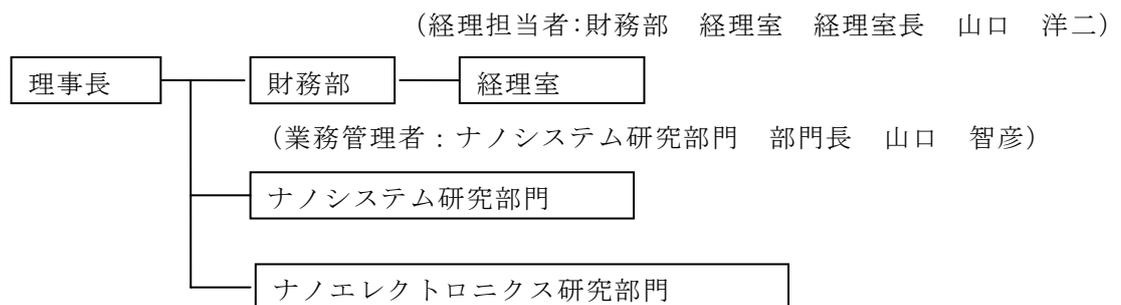
2) 管理体制

① 事業管理機関



② 再委託先

[独立行政法人産業技術総合研究所]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】株式会社三友製作所

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
加藤木 克也	代表取締役社長	⑤
柳橋 政博	生産本部 本部長	⑤
木下 広行	新事業部 部長	⑤
川上 辰男	新事業部 ユニット製作グループ 統括リーダー	⑤
加藤木 倫子	総務部 部長	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
加藤木 克也 (再)	代表取締役社長	①④
加藤木 工三	技師長	①
新堀 俊一郎	新事業部 MM設計グループリーダー	①④
横須賀 俊太郎	新事業部 MM設計グループ	③④
檜村 健太	新事業部 MM設計グループ	①④
白山 裕也	新事業部 MM設計グループ	①④
林 明宏	新事業部 LA設計グループ	①
岩瀬 千克	新事業部 MM設計グループ	④
高橋 賢		①④

【再委託先】独立行政法人産業技術総合研究所

研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
清水 哲夫	ナノシステム研究部門主任研究員	②
久保 利隆	ナノシステム研究部門 ナノ科学計測グループ長	②
宮脇 淳	ナノシステム研究部門 ナノ科学計測グループ主任研究員	②
安藤 淳	ナノエレクトロニクス研究部門 主幹研究員	②

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】株式会社三友製作所

(経理担当者) 総務部 部長 加藤木 倫子
(業務管理者) 代表取締役社長 加藤木 克也

【再委託先】独立行政法人産業技術総合研究所

(経理担当者) 財務部 経理室 経理室長 山口 洋二

(業務管理者) ナノシステム研究部門 部門長 山口 智彦

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
加藤木 克也	株式会社三友製作所 代表取締役社長	P L
清水 哲夫	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 主任研究員	S L
加藤木 工三	株式会社三友製作所 技師長	
新堀 俊一郎	株式会社三友製作所 新事業部 MM設計グループ リーダー	
横須賀 俊太郎	株式会社三友製作所 新事業部 MM設計グループ	
檜村 健太	株式会社三友製作所 新事業部 MM設計グループ	
白山 裕也	株式会社三友製作所 新事業部 MM設計グループ	
林 明宏	株式会社三友製作所 新事業部 L A設計グループ	
岩瀬 千克	株式会社三友製作所 新事業部 MM設計グループ	
高橋 賢	株式会社三友製作所	
久保 利隆	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノ科学計測グループ長	
宮脇 淳	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 ナノ科学計測グループ主任 研究員	
安藤 淳	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 主幹研究員	
アドバイザー	半導体メーカー	

1-3 成果概要

研究開発の成果の概要を実施計画内容ごとに述べる。数字は同計画書におけるサブテーマの番号である。

【①高精度、軽量でクリーンルーム及び真空環境下で使用可能な3次元ステージの開発】

においては、ナノメータオーダの微動から、センチメートルオーダの粗動を一つの素子で対応可能な精密移動用のアクチュエータを開発した（①-1）。同アクチュエータを適切に動作させるためのドライバ基板を開発した（①-2）。①-1で開発したアクチュエータを調整によりガタを除去したローラガイドのみの機構とした真空・クリーンルーム対応のステージ本体と組み合わせ、半導体加工装置用耐プラズマ真空ステージを開発した。同ステージはゼロバックラッシュで空間分解能2 nm以下を達成した。（①-3）

【②加工情報を抽出する技術の開発】

においては、フッ素系エッチングガスを用いた加工中のプラズマガスのガス中分子種について質量分析と分光分析のデータを蓄積し、どの材料をどれだけの速度で加工しているかを推定した。発光分光分析では、F、COなどの化学種が加工に関する情報を与えることを明らかにした。レーザー蛍光分光ではSiF₂の検出するとともに、プラズマ温度を見積もることに成功した（②-1）。質量分析では、SiとSiO₂において、それぞれを加工中のプラズマガスのマススペクトルにおいてSiF₃⁺由来のピーク高さが大きく異なることを見出し、同現象をエッチングの絶縁膜の終点検出に利用できることを示した（②-2）。

【③ステージ制御のためのソフトウェアの開発】

においては、②で得られた実験結果と、真空度と吸引管/試料間の間隔との関係に関するデータを参考に、超精密位置決めステージを用いて試料表面と加工装置の吸引管先端との間隔を一定に保つためのクローズループで制御可能な基本ソフトウェアを開発した。同ソフトウェアによりエッチング速度の再現性とエッチング終点精度±10%を達成した。

【④高度化半導体加工装置プロトタイプ開発】

においては装置設置床面積2 m²以下のプロトタイプを製作した。同装置は加工用ガスの小型プラズマガス除害装置を搭載し装置の移動を可能とした（④-1）。同装置は精密位置決めステージと排気制御装置及びサブテーマ②の情報をフィードバックしたプラズマ制御装置を組み合わせる事で、絶縁膜露出にかかる時間を一層あたり1分以内で実現し、絶縁膜を除去して配線を1層ずつ露出することに成功した。また、加工用ガスの小型プラズマガス除害装置を搭載し装置の移動を可能なものとした。さらに、加工した試料の形状解析を、真空環境から取り出さずに可能とする加工形状解析装置を開発し、装置と一体型の構成とした。（④-1）。

同装置の操作性を向上させるため、(3)で開発したステージ制御用ソフトウェアを含め、プロトタイプ全体を制御する自動加工用のインターフェースを取り入れたプロトタイプ用ソフトウェアを開発した。（④-2）。

本装置で配線露出を行う半導体デバイスは、半導体メーカーごとに材料と構成が変わる。今後それら加工実施例からなる加工レシピを積み重ねることが重要となる。サブテーマ②で得られた情報の取得方法や知見にて加工レシピの蓄積に努め、最先端の半導体デバイスの配線露出が可能な本装置の普及を目指す。（④-3）。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

氏名：新堀俊一郎

所属：株式会社三友製作所 新事業部

電話：0294-72-2245

FAX：0294-73-0459

Email: shinbori@sunyou-ss.co.jp

第2章 本論

本章におけるサブセクション2-x-yのx-yは1-3で述べた実施計画書のサブテーマ番号に対応する。例えば、2-1-3は実施計画書のサブテーマ【①-3】に対応する。

2-1 高精度、軽量でクリーンルーム及び真空環境下で使用可能な3次元ステージの開発

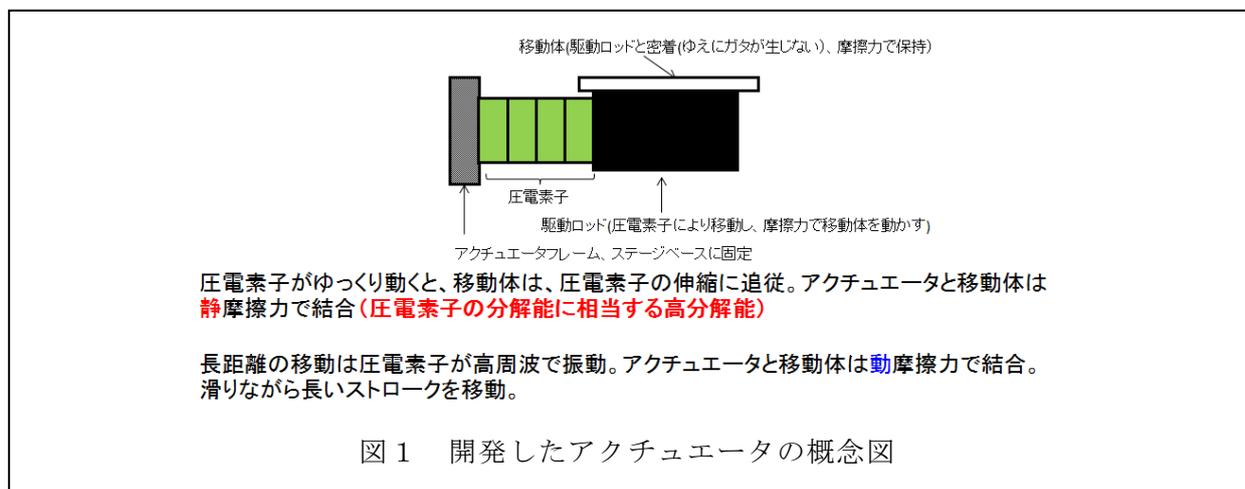
2-1-1 ステージ精密移動用アクチュエータ開発

ステージに搭載するアクチュエータはインパクト駆動を基にした駆動機構であり慣性駆動の一種である。図1試作したアクチュエータの原理図である。アクチュエータはベースに固定された圧電素子、圧電素子に一端を固定され、他端が開放されている駆動ロッド、駆動ロッドと密着している移動体からなる。駆動ロッドと移動体は摩擦力で保持されており、動摩擦力並びに静止摩擦力が、移動体の運動に大きく寄与する。

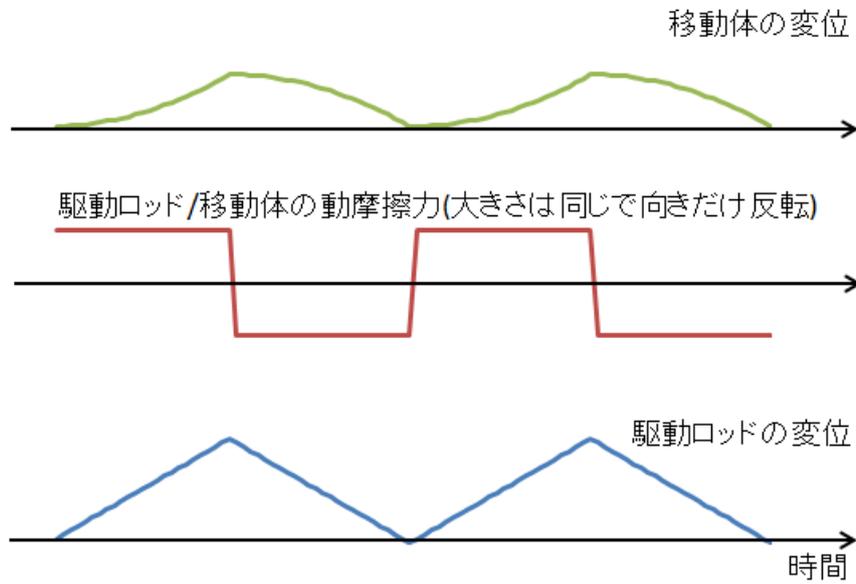
まず圧電素子がゆっくり動いた場合、駆動ロッドとレールとの間には静止摩擦力が働き、圧電素子と駆動ロッド、移動体は連動する。この動作は通常の圧電駆動型のステージを同じであり、動作のストロークと分解能は圧電素子のストロークと分解能で決まる。圧電素子の分解能は1nm以下であり、高い分解能による移動が可能であるが、ストロークは数 μm に限られる。

そこで、ストロークを大きく取るために粗動においてはインパクト駆動を採用する。インパクト駆動においては圧電素子に鋸歯的に電圧を印加し駆動ロッドを高速で振動させる。移動体に駆動ロッドから加わる力は摩擦力のみであるため移動体の質量を m 、最大静摩擦力を F 、駆動ロッドの最大加速度を α とする。このとき $|\alpha| > |F/m|$ の条件を満たすと、駆動ロッドに対して移動体がすべり出す。移動体が滑り出すと駆動ロッドから動摩擦力を受ける。動摩擦は駆動ロッドが移動体を追い越す場合には移動体を加速する向きに、駆動ロッドが移動体に対して逆向きに動く場合には移動体を減速する向きにかかるが、動摩擦力の大きさは一定であるため。振動のデューティ比を変えることによって移動体を一定方向に動かしていくことができる。

図2は駆動体振動のデューティ比を変えることによる並進運動の発生の様子を説明するために、駆動ロッドの変位の経時変化、駆動ロッドと移動体に働く力（動摩擦）の時間変化、移動体の変位の時間変化を図示したものである。話を簡単にするために、駆動ロッドは十分に速く振動しており、移動体を押す場合も引く場合も動摩擦が働いているものとする。駆動ロッドの振動が対称的である場合（図2、上側）は、押す力と引く力が1周期当たり同じ時間だけ働くため、移動体は前後に振動するだけである。ところが駆動ロッドの振動を非対称にした場合（図2、下側）押す力の働く時間が引く力の働く時間よりも大きい（この図の場合では4:1）であるため、移動体は押される方向に並進運動が発生し、これが可能なアクチュエータを開発した。



(1) 駆動ロッドが対称的に振動する場合(移動体は振動するだけ)



(2) 駆動ロッドが非対称的に振動する場合(並進運動開始)

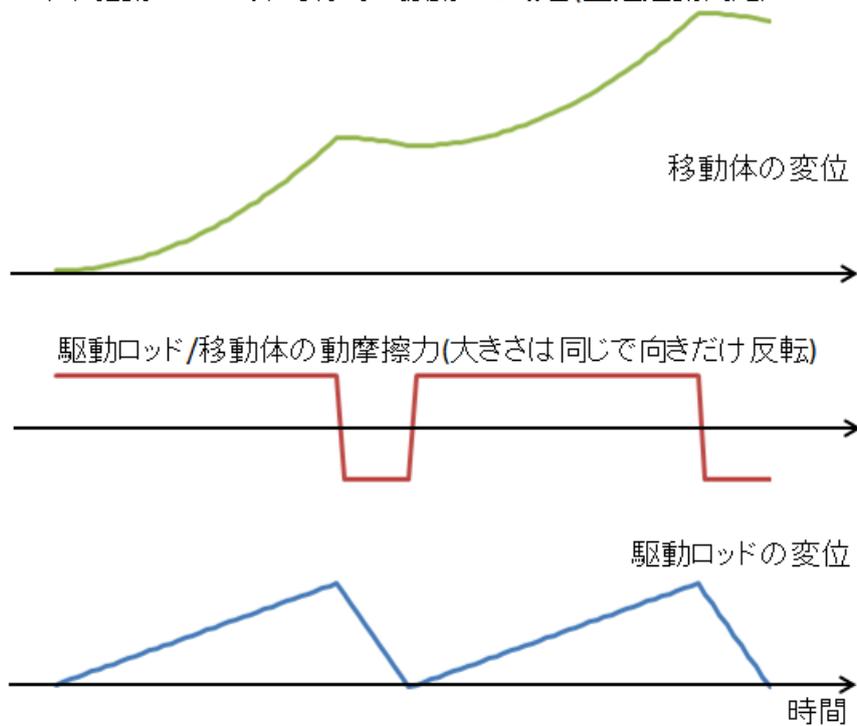


図2 駆動体振動のデューティ比による並進運動の発生

2-1-2 アクチュエータ駆動用ドライバ基板の開発

2-1-1 で述べたように、開発したアクチュエータは圧電駆動とインパクト駆動モードを同一の圧電素子によって実現する。圧電駆動モードでは直流電圧によってアクチュエータを伸縮させ、慣性駆動モードではアクチュエータに交流電圧を印加し、素子の振動によって駆動力を発生させる。これら二種類の動作信号を出力するために、専用のドライバ基板を開発した。アクチュエータの駆動ロッドを振動させる周波数、電圧、デューティ比はドライバ内部で設定し、装置外部からは移動距離に対応した制御信号だけを入力すれば済む仕様とし、制御性を向上させた。

2-1-3 ゼロバックラッシュ精密位置決めステージの開発

ガタやオイルミストを発生する機械部品（ギア等の部品）を排除し、【①-1】で述べたアクチュエータで駆動するガタなし、分解能 2 nm で真空及びクリーンルーム対応の精密位置決めステージを開発した。【①-2】で開発したドライバ基板でアクチュエータを動作させる事で精密位置決めを実現させた。特に今回の半導体加工装置は試料と加工用のプラズマを発生させるキャピラリとの間隔の制御が必須であるが、他の方向の精度については超高精度であることを要求する必要がないことが明らかとなったため、【①-1】で述べたアクチュエータは垂直方向と水平方向のみ使用し、キャピラリ下と半導体加工装置用加工形状解析装置との間の往復にはボールねじを利用した移動機構を採用した。

図 3 に試作したステージの写真を示す。ステージの垂直方向、および横方向の一方には今回【①-1】で開発したアクチュエータを用いている。ステージの移動部分は、これらアクチュエータを【①-2】で開発したドライバ基板を通じてPCにより制御される。ステージとベースとの間は各軸にクロスローラガイドによって固定されているが、開発したアクチュエータを用いた軸については駆動伝達のためのギヤを持たない。またアクチュエータとステージのレールとが一樣に密着しているためにアクチュエータ内部でバックラッシュが起きない。

本ステージは光学式のリニアスケールを内蔵し、クローズドループ制御している。従って、リニアスケールの分解能である 1.3nm で移動量を読み出す事が可能となっている。そのため、インパクト駆動モードで駆動させる場合で、スケール値で 1.3 nm を実現した。一方、圧電モードにおいてステージの動作を測定した結果が図 4 である。圧電モードにおける移動量は、制御 PC から 1bit 単位で命令を出す事が可能となっている。最小分解能としては、圧電素子の移動距離が 5.5 μm であったことから、1bit 時の移動距離は $5.5 \mu\text{m} / 65535$ となり 0.08 nm の性能を持っており、本事業の目標を達成する事ができた。

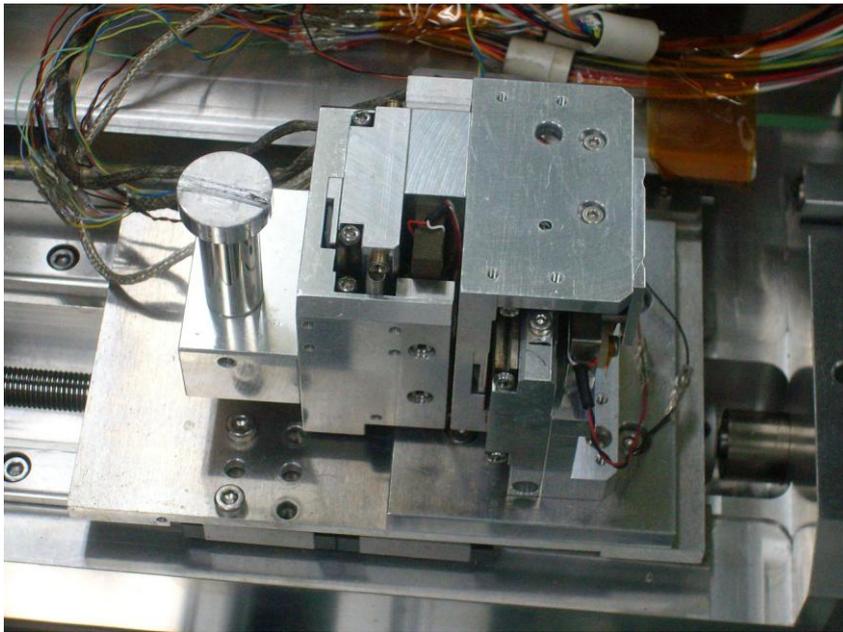


図3 試作した超精密ステージの写真

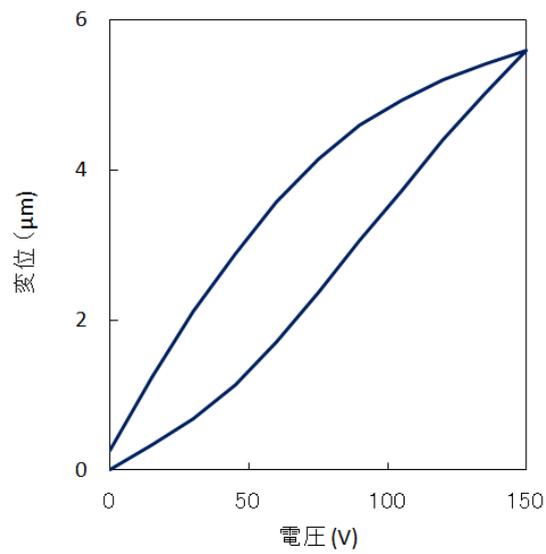


図4 試作した超精密ステージについて、圧電モードで動作させたときの変位量-電圧曲線。レーザー干渉計により測定。

2-2 加工情報を抽出する技術の開発

2-2-1 加工時のプラズマ制御

蛍光分光計測

本研究ではレーザーを用いた加工情報の抽出方法を検討した。レーザーは特定のエネルギー（波長）の光で分子を励起することが可能であるために、特定の分子の挙動だけを調べることが可能である。プラズマのように多数の化学種が混在している系において、特定の分子の情報だけを選択的に抽出できることは、バックグラウンドの影響を低減するために役に立つ。本研究開発においてはエッチング対象がシリコン系デバイスであり、シリコンまたはその酸化物のエッチング生成物であるところのシラン系化合物をモニタすればよい。そこで今回はプラズマ中に比較的多くあるのではないかと想定される SiF_2 に注目し、レーザー誘起蛍光 (LIF) 法によりプラズマエッチング中の SiF_2 からの蛍光スペクトルを測定した。

蛍光励起源として、パルスレーザーである XeCl エキシマーレーザー (308nm) により色素レーザーを励起し、440-450 nm のレーザー光を発生させた。さらに色素レーザー光は非線形光学結晶により周波数通倍し、220-225 nm の光第二高調波 (パルスの紫外レーザー光) を発生させた。同紫外レーザー光は SiF_2 の吸収波長 (226 nm) にほぼ一致するため同分子を励起することが可能である。紫外レーザー光はプラズマエッチングチャンバ内に導入され、吸引プラズマが励起されているキャピラリ・基板間の隙間に集束される。すなわち、本 LIF 測定においてはプラズマ全体をモニタしているのではなく、エッチングされている試料の上方 0.5 mm 程度の空間におけるエッチング生成物 SiF_2 の情報を収集している。また本計測で用いているレーザーがパルス幅 1-2 nm のパルスレーザーであることを利用した蛍光の時間ごとの強度変化もプラズマ情報の抽出に役に立つ。プラズマからの蛍光は、フィルターを用いて励起レーザーを遮断し、さらに分光器を介して光電子増倍管で電気信号に変換したのちにボックスカー積分器で積算される。ボックスカー積分器は時間ゲートを有し、エキシマーレーザーと同期させることにより、プラズマがレーザーに照射されている時間帯の信号だけを積算することができる。フィルター、分光器およびボックスカー積分器により、励起レーザー、プラズマ発光による蛍光発光への干渉を最小限に抑えることができる。図 5 は Si を CF_4 によりエッチングしている条件で励起波長 221.15 nm のパルス紫外レーザーを吸引プラズマに照射して測定した SiF_2 からの蛍光スペクトルである。同様の系について測定した蛍光スペクトル (文献値) を比較のために掲示するが、両者はほぼ一致しており、プラズマエッチング中のエッチング生成物であるところの SiF_2 の検出に成功していることがわかる。さらに、本装置の構成においても、蛍光の励起スペクトルと、文献値に基づいたスペクトルのシミュレーションとを比較し、 SiF_2 のガス温度が約 400 K であることが明らかとなった。真空プロセスであることを考慮すると 400 K という温度は十分に低温であり、吸引プラズマによるエッチングにおいてプラズマガスによる加熱の影響が小さいことの理由づけにつながった。

本サブテーマで蛍光分光計測により、加工面付近で加工のもととなる化学反応の機構につながる情報が得られるなど、想定を超える成果が得られた。これらの情報を今後実デバイス加工のレシピ蓄積に反映させていく。

2-2-2 加工終点検出技術

質量分析による終点検出

まず Si および Si 上の SiO_2 を CF_4 でエッチングしながら反応ガスのマススペクトルを測定した。それぞれの試料は同時にエッチングチャンバ内へ導入し、次の手順で実験した：(1) Si をキャピラリ入り口に設置 (2) プラズマ発生、マススペクトル測定、(3) プラ

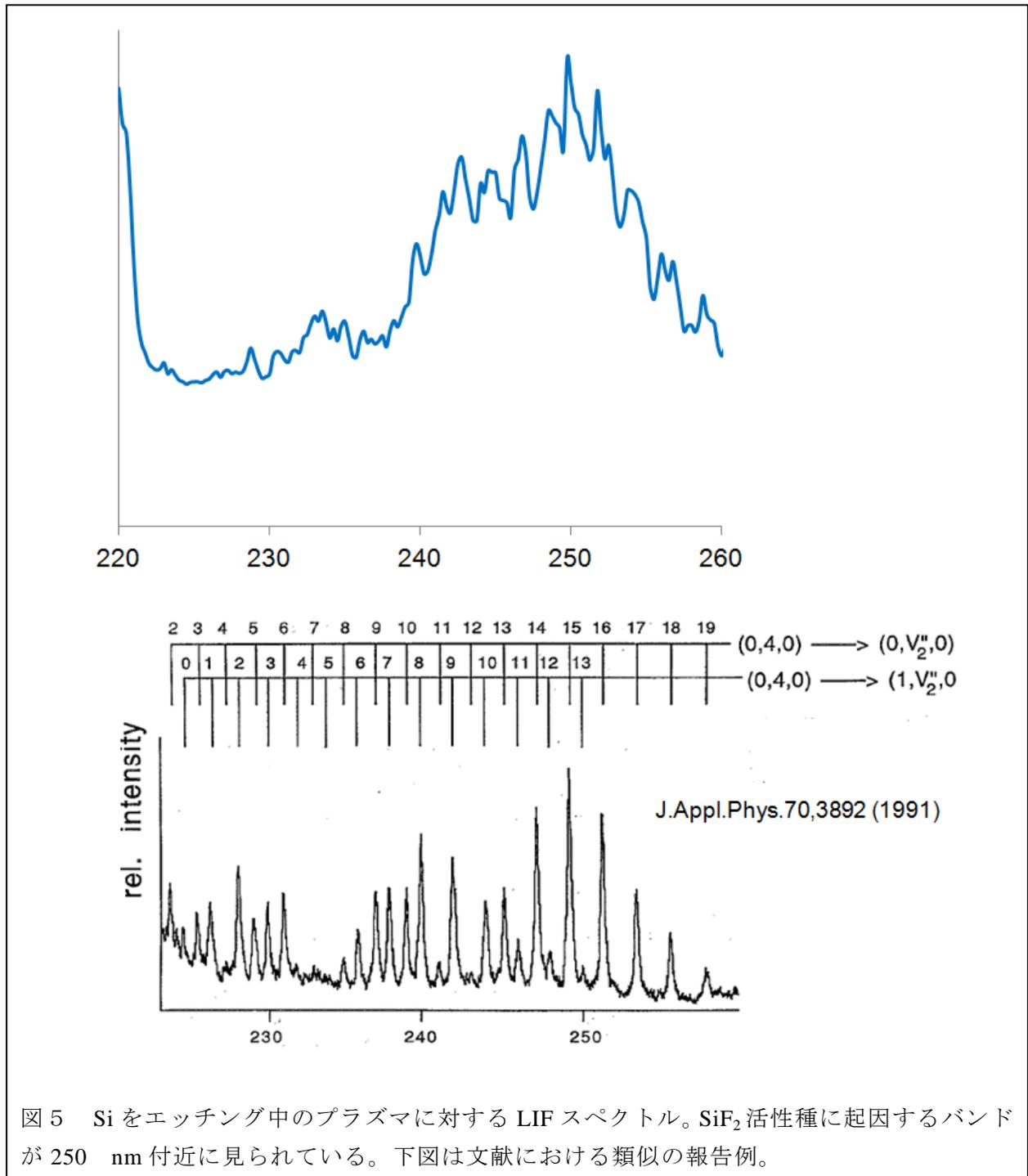


図5 Siをエッチング中のプラズマに対するLIFスペクトル。SiF₂活性種に起因するバンドが250 nm付近に見られている。下図は文献における類似の報告例。

プラズマ停止、(4)以下SiO₂付きSiについて(1)-(3)の手順で実験。これにより同一の反応容器圧力、投入電力その他のエッチング条件をそろえることができた図6 (上, Si; 下, SiO₂)に示されるように、測定たされたマスペクトルにはm/z = 60~100の範囲では、エッチングガスに由来するCF₃⁺(m/z = 69)のピークが見えるほか、エッチングガスとSiとの反応生成物SiF₄が解離して生成したSiF₃⁺(m/z = 85), SiF₂⁺(66)のピークが観察される。なお、SiF₂⁺のピークはそれぞれCOF₂⁺の可能性もある。二つの試料についてマスペクトルのピーク強度を比較してみると、エッチング条件をそろえていることから期待されるように、エッチングガス由来のピーク高さは等しい。さらに生成物由来のピーク高さを比較してみても、m/z = 66のピークは等しいのに対して、m/z = 85のピークはSiのものに比べてSiO₂のピークは小さいことがわかる。ピーク強度に差が出て

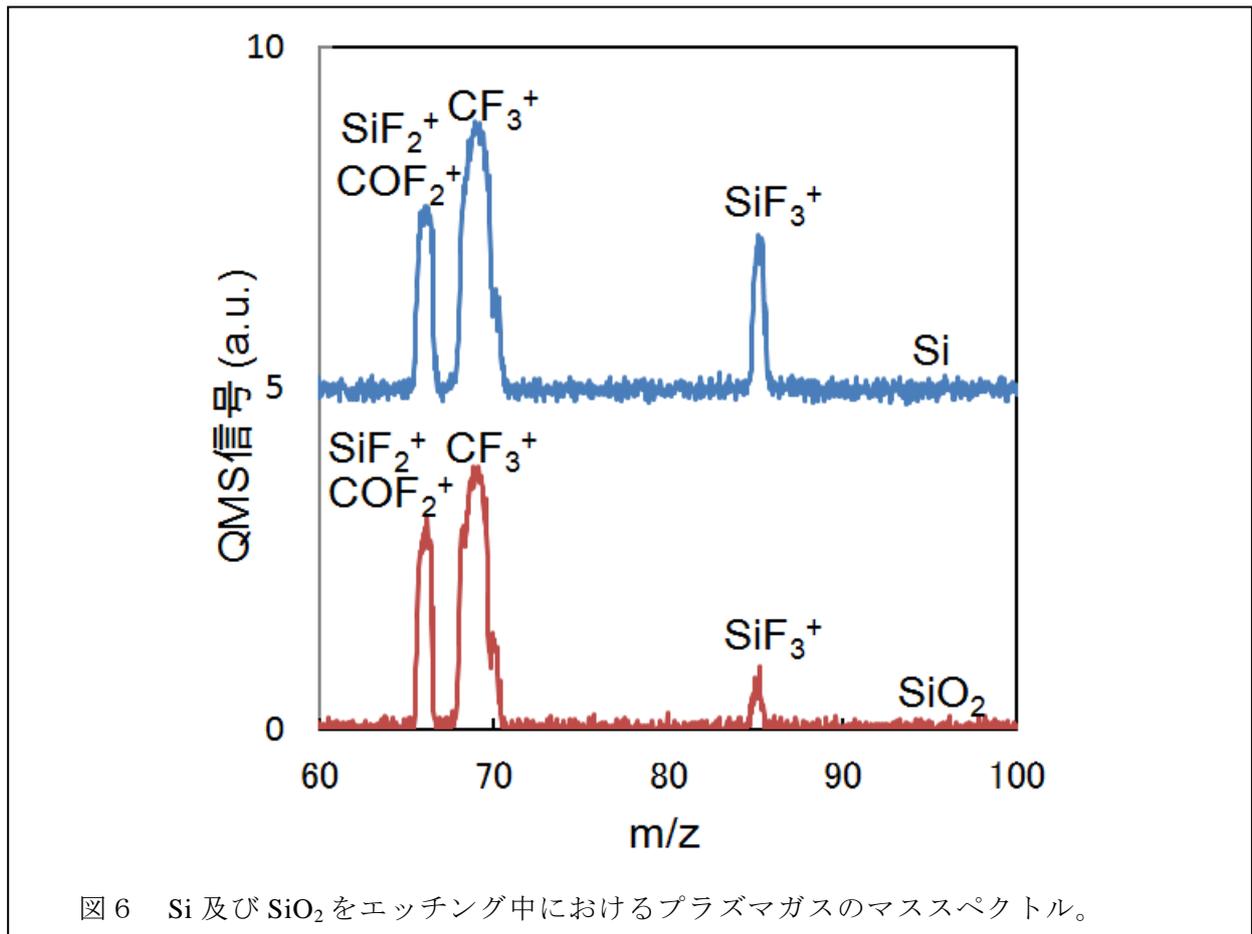


図6 Si及びSiO₂をエッチング中におけるプラズマガスのマススペクトル。

くる原因に関しては現在検討中であるが、エッチングの終点検出という観点から考えると $m/z = 85$ のピークの経時変化を追うことにより、熱酸化膜層のエッチングが終了した段階で $m/z = 85$ のピークが増加することが予想される。図7はSi上の熱酸化膜をエッチングしながら SiF_3^+ ($m/z = 85$) のピーク高さの経時変化をプロットしたものである。比較のためにエッチングガス由来の CF_3^+ ($m/z = 69$) のピーク高さについても経時変化をプロットした。 SiF_3^+ のピーク高さは $t = 100$ sのエッチング開始後、初期に緩やかに上昇したのちにほぼ一定値を取るが、エッチング時間約4200 sにおいて上昇したのち、エッチング時間約4800 sにおいて一定信号強度2.9に達した。一方 CF_3^+ のピークについてはエッチング開始後には同様の初期上昇を示すものの一旦信号強度3.8の一定値に達したのちは、大きな変動を示さなかった。さらに同様のエッチングを何度か行い SiF_3^+ のピーク高さが上昇する初期、後期、そして上昇したのち一定となった時刻にエッチングを終了し、試料を観察したところ、キャピラリの入り口とほぼ同じ形の円形の加工領域の内部に下地のSiの表面が徐々に広がり、上昇が一定になった段階では完全にSiの下地が露出していることがわかった。これらの実験結果から4200 sに見出された SiF_3^+ のピーク高さの上昇は SiO_2 のエッチングにおける終点であると結論した。

エッチングの終点検出精度を、図7の終点検出実験における終点検出に伴う信号の変化の大きさと、ベースラインの変動との比から推定した。ベースラインの揺らぎが信号強度についておよそ0.2(任意単位)であるのに対して、エッチングの終点における信号変化はおよそ2(任意単位)である。このことは600 nmの絶縁膜に対するエッチングの終点位置を約10%で検出できるということを示唆しており、配線一層ごとの露出が可能な性能となっている。

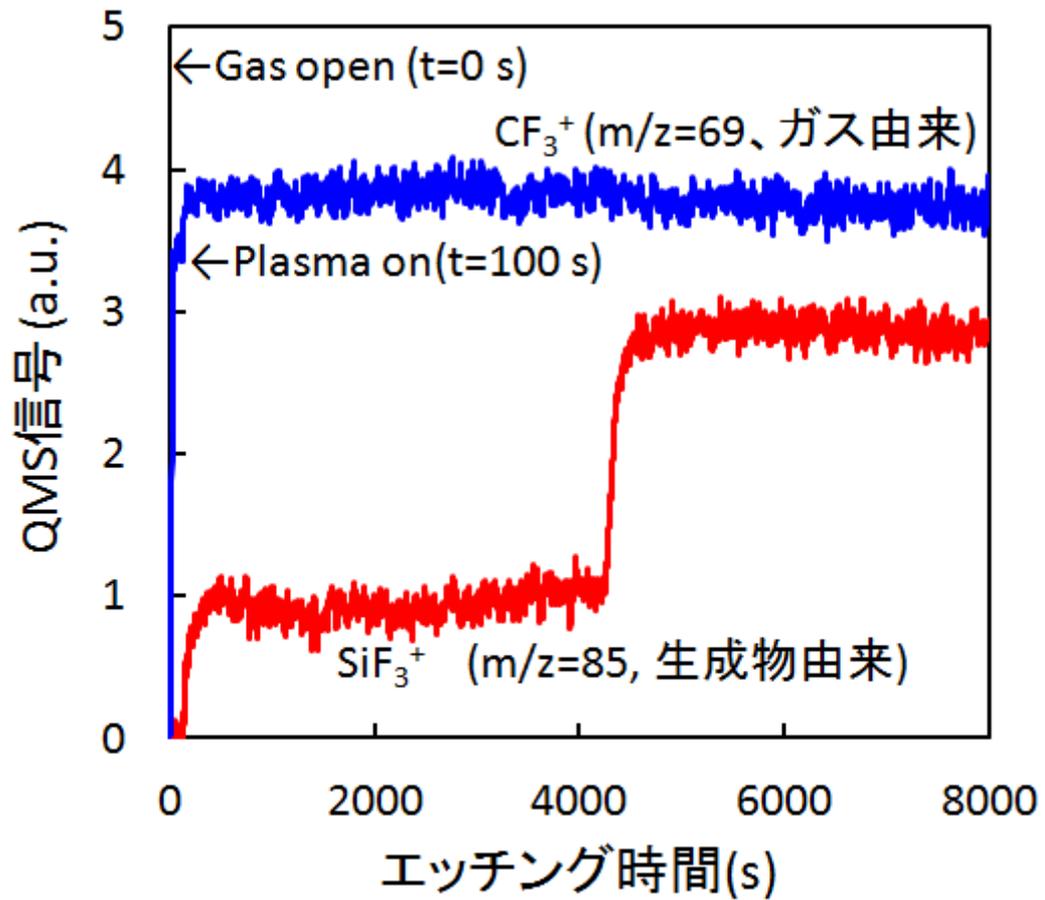


図7 吸引プラズマによるエッチングと四重極質量分析によるエッチング終点検出の実施例。Si ウェハに 600nm の熱酸化膜を成長させた試料をエッチング中における SiF_3^+ (m/z=85) および CF_3^+ (m/z=69) ピーク高さの時間変化。

2-3 ステージ制御のためのソフトウェアの開発

本研究開発で用いる半導体加工装置は、キャピラリと試料との間隔が加工に大きな影響を及ぼす。同間隔が変化する要因は、プラズマが試料表面をエッチングして掘り進めることによるギャップの拡大、プラズマの発生によって生じる温度上昇に伴うキャピラリの熱膨張によるギャップの縮小などである。これらを補正するためのステージ制御を試みた。ステージ制御の信号として、サブテーマ②の研究開発にて分光計測、質量分析を用いた加工情報を参考とした。

まずリニアステージ応用し、2-1-3で開発したステージ自身の絶対位置をクローズドループで制御可能な基本ソフトウェアを開発した。次に、クローズドループの応用として、同ソフトウェアに対してステージを移動させる信号を取り込むルーチンを付加し、ギャップの変動に伴う真空度の変化をフィードバック信号としステージの位置を上下させることが可能となった。

エッチングの終点検出精度は、図7の終点検出実験における終点検出に伴う信号の変化の大きさと、ベースラインの変動との比から推定した。ベースラインの揺らぎが信号強度についておよそ0.2(任意単位)であるのに対して、エッチングの終点における信号変化はおよそ2(任意単位)である。このことはエッチングの終点位置を約10%で検出できるということを示唆している。

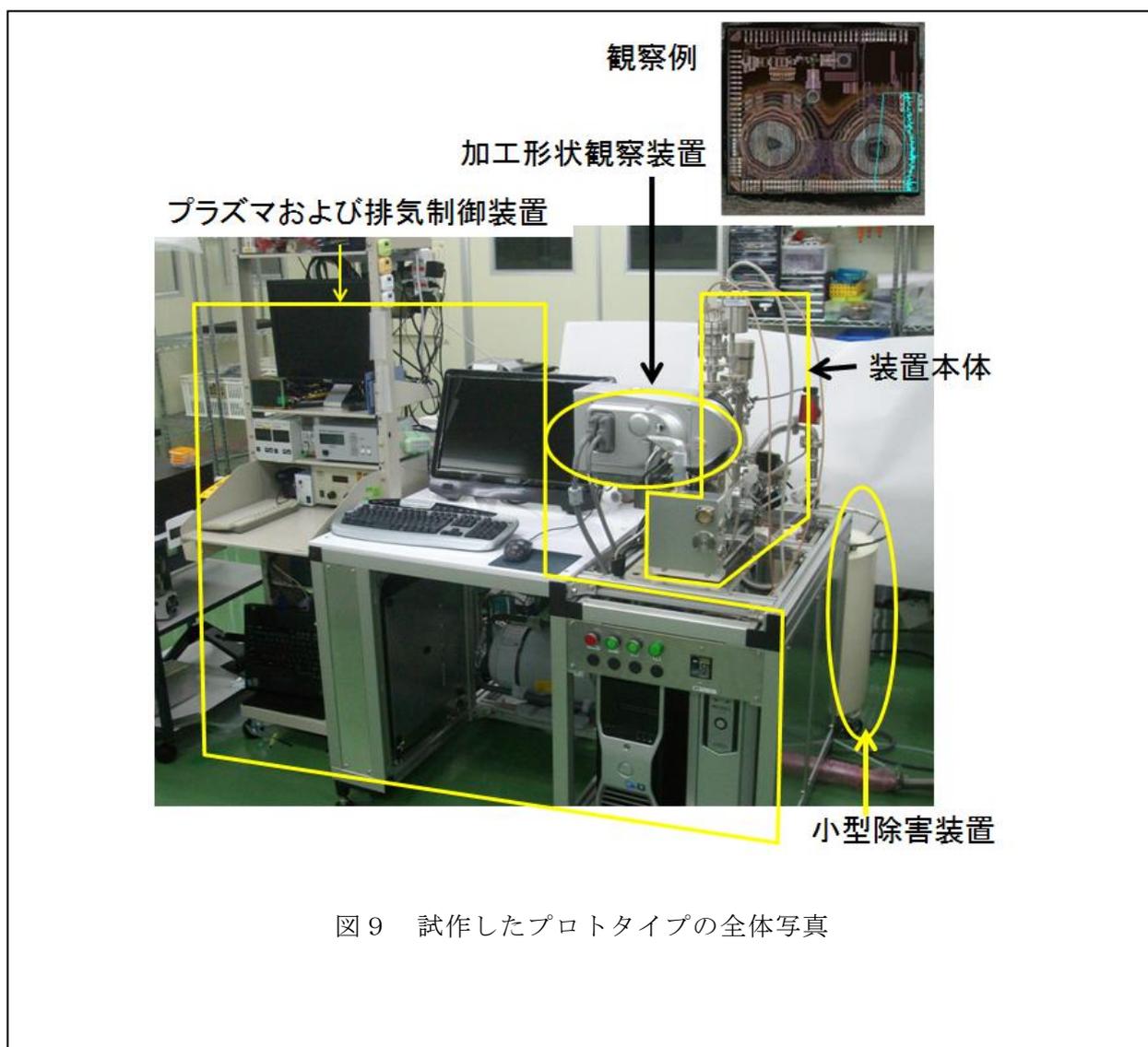
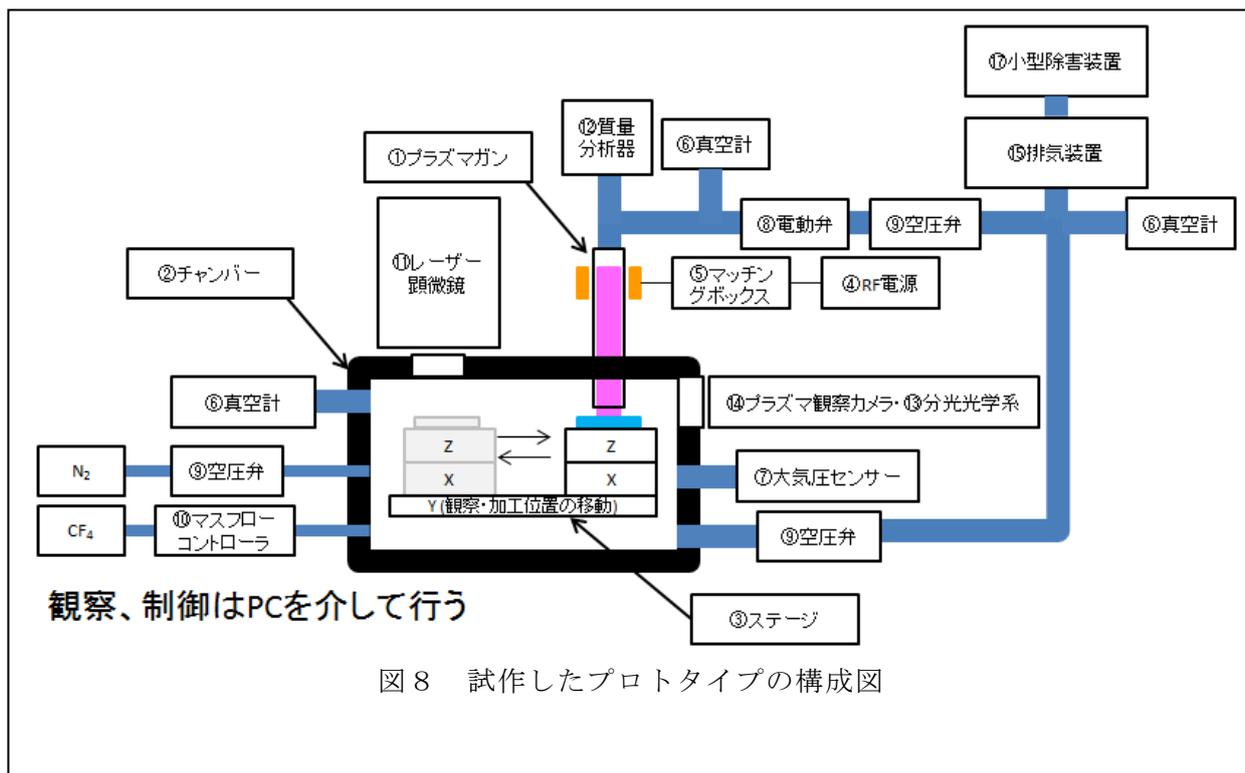
質量分析による終点検出の場合、試料と検出器の間に距離があるため、精度良い終点検出を実現するためには加工速度を抑制する必要がある。そこで実際の配線露出実験では、事前にガスの流量、吸引管/基板間隔の違いから、加工速度が何倍になるかを推定し、必要な加工時間を決定した。

2-4 高度化半導体加工装置プロトタイプ開発

2-4-1 半導体加工装置プロトタイプ開発

装置設置床面積 2 m² 以下のプロトタイプを製作した。また、絶縁膜露出にかかる時間を1時間以内にし、絶縁膜一層毎に除去して配線露出することが可能な半導体加工装置のプロトタイプを開発した。

図8に試作したプロトタイプの構成図を示す。プロトタイプは2-1-3で開発した超精密位置決めステージと、プラズマで試料を加工するためのプラズマガン、加工形状観察装置(レーザー顕微鏡)、プラズマガスの成分を分析するための質量分析装置(TOF-MS)並びに分光光学系と排気制御装置及びプラズマ制御装置等からなる。加工用ガス(地球温暖化ガス)の放出を避けるため、小型プラズマガス除害装置を搭載し装置の移動を可能なものとする。図9は試作したプロトタイプの全体写真である。装置本体、制御系電子回路、小型除害装置からなり、それぞれにキャスターが付いており可搬である。



2-4-2 プロトタイプ用ソフトウェア開発

装置の操作性を向上させるため、【③】で開発した制御ソフトに自動加工用のユーザインターフェース等のプログラムを取り入れたプロトタイプ用ソフトウェアを開発した。図10は開発した半導体加工装置用ソフトウェアのインターフェース画面の一例である。ソフトウェアは、試料導入、位置決め、等機能ごとに分かれたタブからなっており、各タブにおいては実行中の状態がわかるような表示窓があり、ユーザの便を図っている。また加工のレシピはテキスト形式で入力可能であり、加工対象ごとに蓄積されたノウハウが活用しやすくなっている。

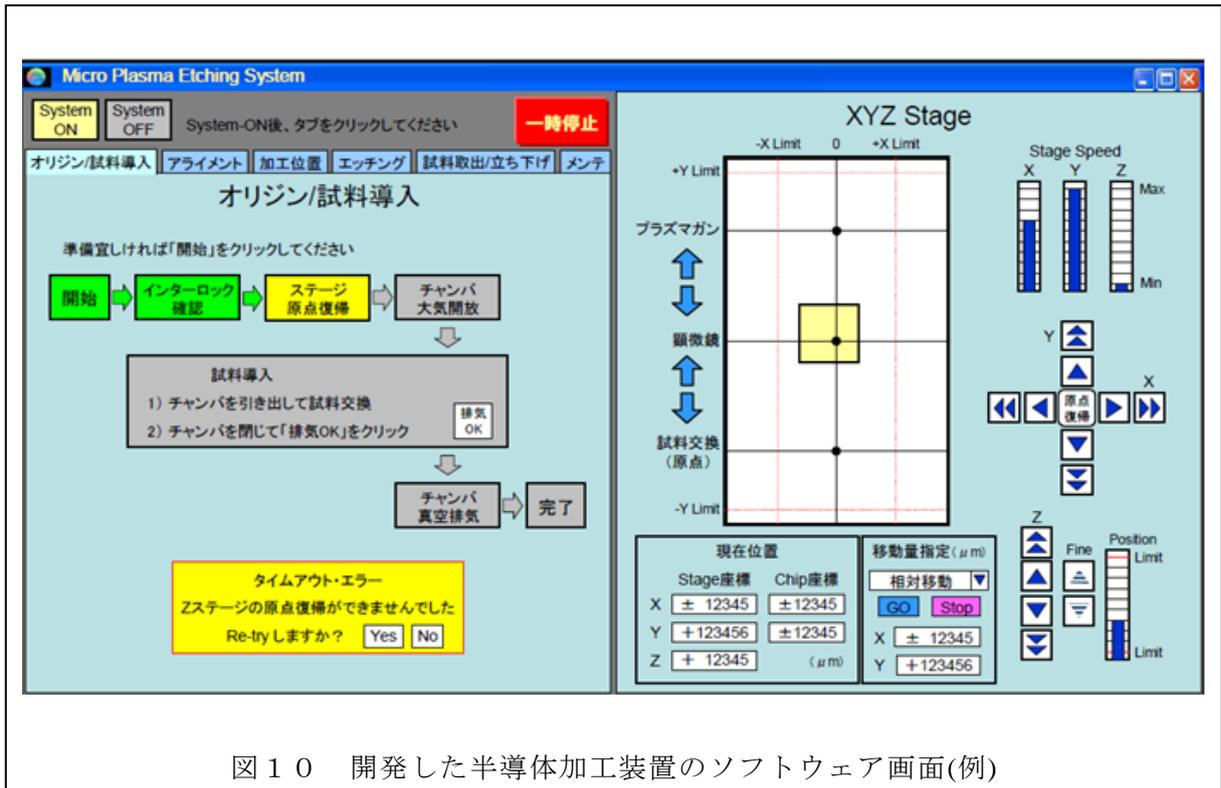


図10 開発した半導体加工装置のソフトウェア画面(例)

2-4-3 プロトタイプ評価機能による加工形状評価

プロトタイプの性能を評価するために、実デバイスの配線露出を試みた。今回は質量分析による終点検出の実験結果と、形状解析装置による観察結果、さらにアドバイザーから提供されたデバイスの絶縁膜に関する情報から、試料の第1層の露出にかかる時間はおよそ80秒、その後の1層ごとのエッチング時間をおよそ60秒であると思込んだ。次に実デバイスを以下の手順で3回エッチングした。まず76秒エッチングしてから真空容器から取り出して電子顕微鏡観察した。次いで観察後に再び真空容器に戻してさらに58秒エッチングし、取り出して電子顕微鏡観察した。最後にもう一度真空容器にもどしてさらに60秒エッチングし、試料表面を電子顕微鏡観察した。図11はその電子顕微鏡写真である。76秒後のエッチングでは画面左上から右下にかけて伸びている4本の配線が映っているのみであるが、次いで58秒エッチングしたところ、画面の右上から左下にかけて伸びる細いいくつもの配線が露出している。さらに60秒エッチングすると、最初のエッチング(76秒)で見えている幅の広い配線に結合している幅の広い下層側の配線や、それに挟まれている細い配線が画面の右下に現れている。このように本

プロトタイプにより、実デバイスを一層ごとに配線露出することが可能であることが示された。

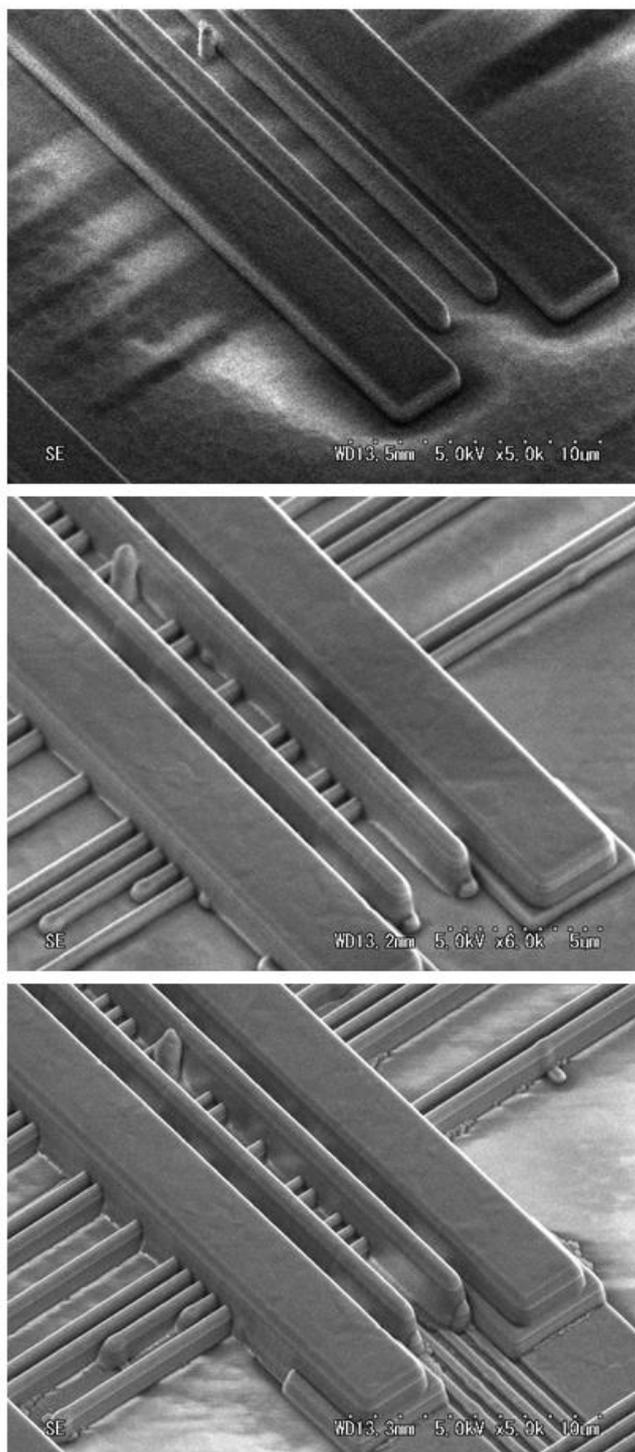


図 1 1 実デバイスの 1 層ごとのエッチング例。エッチング時間は上から順に 76 秒、58 秒、60 秒。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

(1)粗微動両方の位置決めを単一素子で実現するアクチュエータと、それを駆動するドライバ基板を開発した。これらを調整によりガタを除去したローラガイドのみの機構とした真空・クリーンルーム対応のステージ本体と組み合わせ、半導体加工装置用耐プラズマ真空ステージを開発した。同ステージはゼロバックラッシュで空間分解能 2 nm を達成した。

(2)フッ素系エッチングガスを用いた加工中のプラズマガスのガス中分子種について質量分析と分光分析のデータを蓄積し、加工材料とその速度に対するかを推定した。発光分光分析では、F、CO などの化学種が加工に関する情報を与えることを明らかにした。レーザー蛍光分光では SiF₂ の検出するとともに、プラズマ温度を見積もることに成功した。質量分析では Si 上の SiO₂ 層膜のエッチング終点を検出した。終点検出の精度からエッチング終点精度 10 % を達成した。

(3)質量分析と分光分析のデータをもとに(1)で開発した超精密位置決めステージを制御するためのソフトウェアを開発した。

(4)(1)で開発した超精密位置決めステージと排気制御装置およびプラズマ制御装置、小型プラズマガス除害装置、加工形状解析装置を組み合わせることで、可搬で設置床面積 2m² 以下の高度化半導体加工装置のプロトタイプを開発した。(3)で開発したステージ制御用ソフトウェアを含め、プロトタイプ全体を制御する自動加工用のインターフェースを取り入れたプロトタイプ用ソフトウェアを開発した。同プロトタイプにより、配線露出にかかる時間を一層あたり約 1 分で行うことに成功した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(1)加工レシピをユーザの要望を予測しつつ開発し川下企業である半導体産業にとって使いやすい装置にブラッシュアップしていく。

(2)国内の半導体製造メーカー、半導体開発に関連する公的研究機関、大学への販路を拡大する他、海外販売の体制も整える。

3-3 事業化の可能性及び市場性について

本研究開発装置の事業化および生産企業は三友製作所である。事業化の可能性としては、現在本国の半導体分野は厳しい状況に立たされているが、それゆえに独自技術・性能・品質の優位性と開発期間の大幅短縮が他国に打ち勝つための必須項目となっている。

それに対し、今回開発した半導体加工装置は、従来にない絶縁膜一層ごとの除去や加工速度の速さを有しており、その後の故障解析でも従来にない手法で解析出来る事が新たにアドバイザーからの情報で分かった。その解析は、露出した配線へ直接針当てして電気特性を取得する手法で、従来よりも低ノイズかつ低パワーで実施出来るため、試料に対するダメージを少なく確かな結果が得られる。このことから、本装置が半導体分野において優位な装置となり、市場性を確立できると考えている。

販売については、アドバイザーとなっている半導体メーカーは、装置開発の中で機能およびソフトウェアの仕様についてユーザーフィードバックをしていたため、最初の販売先になる可能性が高い。しかし、販売順序については、事業化後で受注がある物から開始する予定でいる。

現在の市場調査状況としては、アライナーの各事業所への導入を予定している。また、現段階でも国内企業1社、韓国企業2社、台湾企業2社、中国企業1社からの引き合いも受けており、平成25年4月をめどに販売を開始する予定でいる。

その他の応用分野としては、自社製品のマニピュレータの位置決め精度向上に直ぐにでも採用可能であり、新製品として販売を予定している。また、超精密位置決めステージは、半導体分野以外での販売の可能性も高く、すでに国内メーカーからの引き合いもある。電子顕微鏡等の分析装置への搭載や、高精度な位置決めを要する医用装置への転用販売できる販路を開拓していく。

3-4 知的財産戦略について

チャンバ内から吸い出されたエッチングガスをプラズマ化することにより、ガス流の上流にあるチャンバ内の試料をプラズマエッチングする本技術は類例がない。また本技術に関しては後述の3件の特許を出願しており、装置、およびエッチング方法に関する技術の特許防衛は十分である。

半導体加工装置として想定される競合製品は、大気圧プラズマの細かいジェットをワークに対して噴出する方式のプラズマ処理装置を挙げることができる。同方式の製品は各社から発売されているが、いずれの装置もその性格上ワークにプラズマジェットを吹き付けた際にガスがワーク面にそって広がってしまう。従って、本開発に置いて採用した吸引プラズマのように、マスクなしで特定の領域を深掘りしていくことは難しい。つまり今回開発した局所プラズマ加工装置は、半導体用不良解析用試料作製装置としては競合製品と明確な差別化を図ることができる。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。