

平成29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

「ミニマル水プラズマアッシング装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年4月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 一般社団法人ミニマルファブ推進機構

国立大学法人金沢大学

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

1-1-1 従来技術の課題と新技術

1-1-2 新技術を実現するために解決すべき研究課題

1-1-3 研究開発の背景、当該分野における研究開発動向

1-1-4 研究目的及び目標

I. 水プラズマアッシングプロセスの開発

II. ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

III. 半導体製造プロセスへの組み入れと実用化テスト

IV. 事業化のためのマーケティング活動

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 研究内容及び成果等

2-1 研究内容及び成果

2-1-1 水プラズマアッシングプロセスの開発

2-1-2 ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

2-1-3 半導体製造プロセスへの組み入れと実用化テスト

2-1-4 事業化のためのマーケティング活動

2-2 今後の対策

第3章 全体総括

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

1-1-1 従来技術の課題と新技術

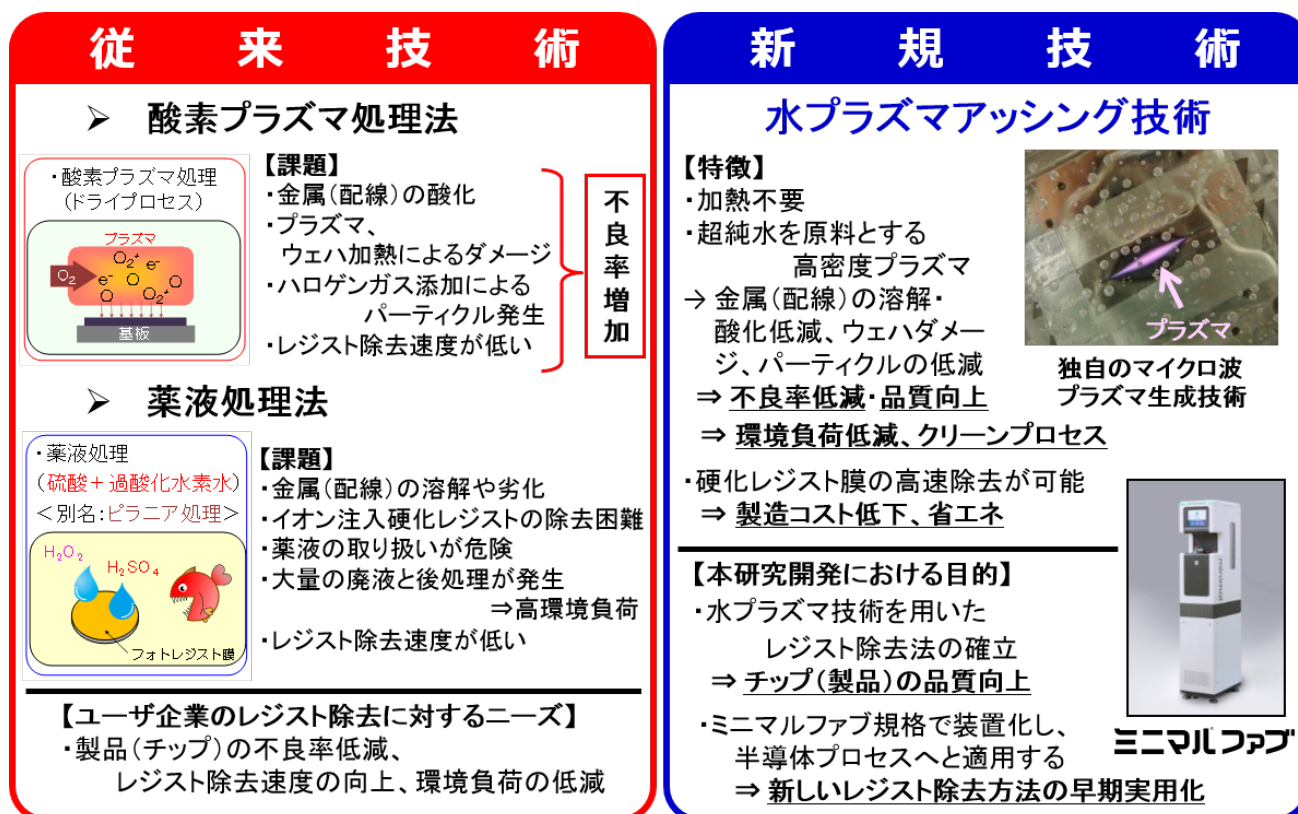


図1 従来技術と新規技術との比較、本研究開発の目的

従来、半導体デバイス製造工程におけるレジスト除去の方法として、酸素プラズマ処理法や薬液処理法が一般的に用いられている。これらの方法では、高速処理を実現するため高密度プラズマの利用やウェハの加熱が必要となる。そのため、配線・デバイスの酸化や熱ダメージ、パーティクル発生によりデバイスの品質が低下し、不良率増加の要因となる。川下企業（半導体デバイス製造メーカー）において、長年の大きな課題となっている。

本研究ではこれらの課題を解決するため、新たに水プラズマという手法を用いるレジスト除去方法＝水プラズマアッシング法を開発する。この新手法を半導体デバイス製造工程に適用・実用化するため、多品種少量生産プロセスに特化した半導体デバイス生産システム（ミニマルファブシステム^{※1}）の規格に適合させて装置化する。メガファブ規格に比べ、開発に要する期間と費用の圧縮が可能であり、早期

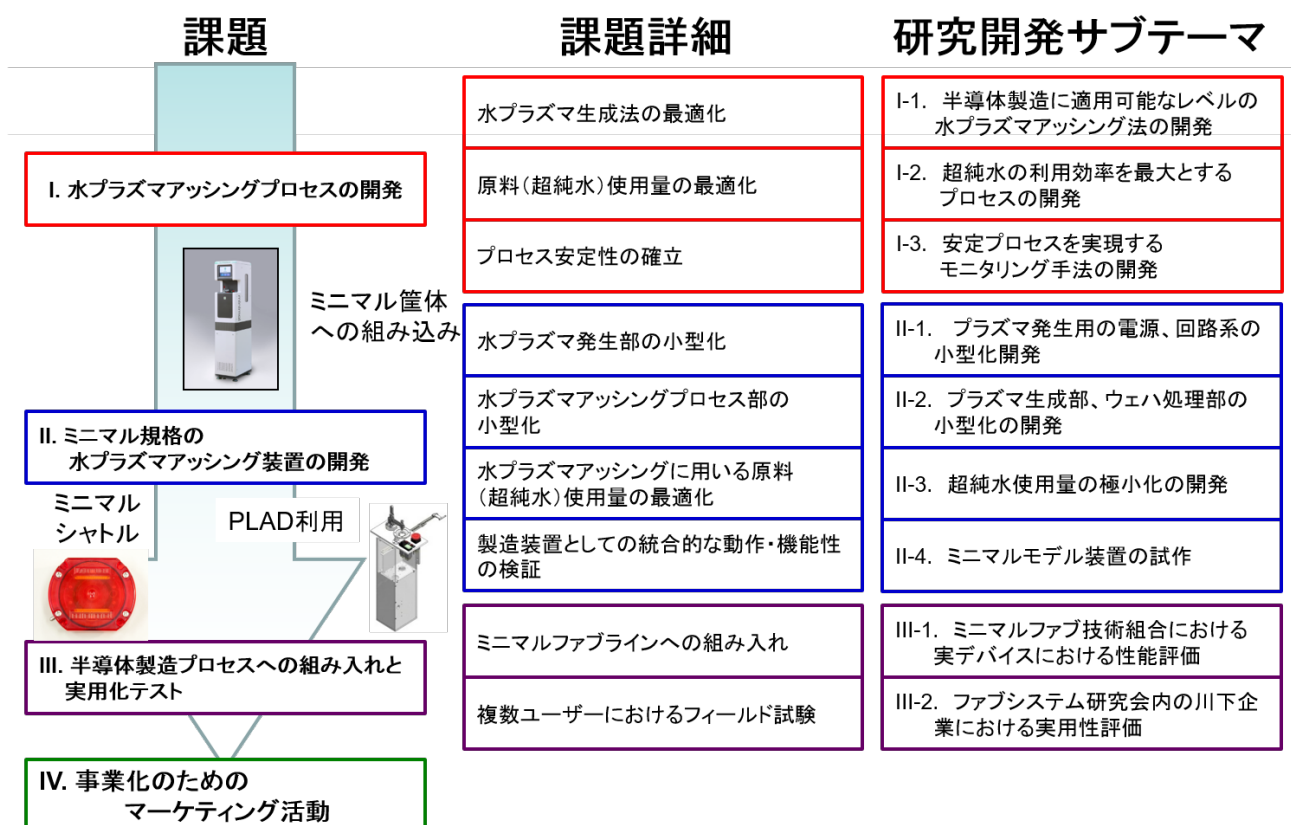
の実用化が図れる。これにより、従来のレジスト除去技術をユーザーニーズを満たす新たなレジスト除去方法へと高度に置き換える。

(※1) ミニマルファブシステム

国立研究開発法人産業技術総合研究所が提唱した多品種少量、及び変種変量生産のニーズに適応した画期的な半導体デバイス生産方式。①ハーフィンチウエハ、②統一した装置規格（フロアパネル1枚のフットプリント）、③ミニマルマニュファクチャリング技術による地球環境対応と産業力強化の同時実現、という3つの特徴を有する。ミニマルファブでは、1ラインの投資額がメガファブと比べて1/1000の約5億円程度となる。

1-1-2 新技術を実現するために解決すべき研究課題

上記の実現のため、プロセス、機構、実用化・事業化面から課題分析を行い、以下のように研究開発サブテーマを設定した。



1-1-3 研究開発の背景、当該分野における研究開発動向

背景

半導体集積回路（デバイス）の製造は、情報通信・エレクトロニクスを支える基幹産業である。半導

体デバイスは図2に示す種々の工程を経て作製されている。特に集積回路を形成するための一連の工程は、半導体リソグラフィプロセスと呼ばれ、半導体製造において欠かせない基本技術である。リソグラフィによる回路パターン形成は、レジストの塗布、露光現像、レジスト除去を繰り返して行うため、レジスト除去は重要工程の1つとなっている。

現在の半導体製造工程におけるレジスト除去方法には、①酸素プラズマ処理（酸素ガスによるレジストアッシング）、②薬液処理（硫酸過水によるレジスト溶解）が用いられている。

①の酸素ガスプラズマによるレジストアッシング法は、イオン注入工程を経たレジスト膜を除去するために欠かせない手法である。これはイオン注入によってレジスト膜が硬化・変性し、硫酸過水などの薬液によるレジスト除去法が適用できないためである。

しかし、酸素プラズマ処理法では、レジスト除去速度の増加やレジスト剥離性改善のために行う以下に示す手法が、ウェハや配線パターンの品質低下、不良率増加を引き起こし、歩留まりの低下を避けることができず、大きな課題となっている。

＜レジスト除去速度の増加やレジスト剥離性改善のために行う手法と問題点＞

- ・高密度プラズマの利用
 - ⇒ プラズマ中の荷電粒子によるデバイスへのダメージ
- ・ウェハ加熱
 - ⇒ 配線金属の酸化やデバイスへのダメージ、レジスト膜由来のパーティクル発生
- ・ハロゲンガス添加
 - ⇒ 真空装置の劣化によるパーティクル発生

一方、②の硫酸過水は硫酸と過酸化水素水の混合溶液であり、別名ピラニア溶液とも呼ばれ簡単に人体を溶解するほど強力な溶解力を持っているため、取扱が大変危険である。またこの硫酸過水は混合時に最大活性が得られるため処理ウェハ毎に新しい溶液を必要とし、再利用は不可能である。すなわち、レジスト除去の過程で大量の廃液が発生するためその後処理が必要となり、環境負荷が高いという欠点がある。また、前述の通りイオン注入により硬化したレジスト膜の除去は極めて困難であるという欠点を持つ。

川下製造業者からは、上記の課題を解決しデバイスの品質を高め不良率を大きく低減することで歩留まりを向上させることが可能な、さらにレジスト剥離性、高速処理、低環境負荷、安全性などに優れた性能を有する新しいレジスト除去方法が強く求められている。

半導体集積回路の製造工程

前工程 (繰り返しおこなう)

- | | |
|------------|------------|
| 1. 洗浄 | 6. エッチング |
| 2. 成膜 | 7. レジスト膜除去 |
| 3. レジスト膜塗布 | 8. イオン注入 |
| 4. 露光 | 9. スパッタリング |
| 5. 現像 | |

後工程

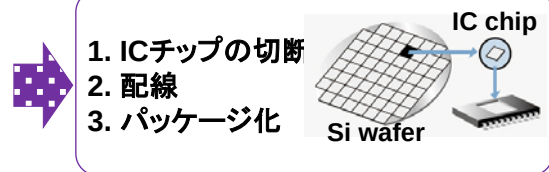


図2 半導体集積回路の各種製造工程

研究動向

近年、重相構造プラズマという新たな概念が提唱され、様々な分野において研究開発がされている。これは、例えば液体とプラズマのように異なる相を関与させて生じる新規の反応場を利用する技術であり、表面改質などへの応用の期待が高い。

本計画の協力者である金沢大学の石島教授は、水を原料とする独自のマイクロ波プラズマ生成技術（マイクロ波励起液中気泡内プラズマ法：MWBP）を考案し、水プラズマアッシング法と呼ぶ、レジスト除去への応用が期待できる新しい技術に関する基礎研究を行っている。

水プラズマアッシング法の特徴を図3に示す。本技術は、マイクロ波を用いて超純水を原料とした水蒸気ガスによるガス温度の低い気泡プラズマを生成し、プラズマ中に生じる高反応性の活性種(OH ラジカル等)を利用して、有機物であるレジストをアッシング、除去する新しいプロセスである。本技術を半導体製造のレジスト除去に応用した場合、

- 1) 熱や酸化ダメージの低減
- 2) チャージングによるダメージの低減
- 3) パーティクル発生の低減
- 4) イオン注入等により硬化したレジスト膜に対してもレジスト除去が可能
- 5) 配線等に用いられる金属を溶解することがない
- 6) 原料として水しか使用しないため、環境負荷の高い薬品廃液を排出しない

と考えられ、前述した従来のレジスト除去方法における課題を一挙に解決する、極めて革新性の高いプロセスとなる。

川下製造業者等の共通の課題及びニーズに対する、従来のレジスト除去方法と新技術との比較を、表1に示す。

新技術の特徴

●新技術：▶ 水プラズマアッシング法

- ・原料：超純水→気化しプラズマ化
- ・水による基板の直接冷却、ガス温度の低いプラズマ
- ・水由来の高反応性活性種(OH等)

■レジスト除去技術としての利点

- ▶熱や酸化ダメージの低減
- ▶チャージングダメージの低減
- ▶パーティクル発生の低減
- ▶イオン注入硬化レジスト膜を除去可能
- ▶金属の溶解が生じにくい
- ▶環境負荷の高い廃液が排出されない



図3 新技術の特徴

表1 川下製造業者等の共通の課題及びニーズに対する、従来のレジスト除去方法と新技術との比較

	従来法① —酸素プラズマ処理—	従来法② —薬液処理（硫酸過水）—	新技術 —水プラズマアッシング法—
熱および酸化の ダメージ	× ・酸素ガスを使用 ・ウェハ加熱が必要	△ ・薬液加温が必要	◎ ・ウェハを直接水冷 ⇒温度上昇低減
荷電粒子による ダメージ	× ・プラズマに直接曝露 ⇒チャージングダメージ	○	◎ ・気液混合系における プラズマ生成 ⇒低チャージングダメージ
パーティクル発生	×	○	○
イオン注入 硬化レジストの除去	○	×	○
除去速度	△ ・高速除去には ウェハ加熱が必要	△	◎ ・低基板温度環境の下で 高い除去速度
金属へのダメージ	○	× ・配線などを溶解	○
低環境負荷	○	× ・1ウェハ処理毎に大量の 廃液が発生し、後処理が必要。	◎ ・原料は超純水のみ

1-1-4 研究目的及び目標

本事業は、中小ものづくり高度化法及び中小モノづくり高度化指針の

（七）表面処理に係る技術に関する事項

オ. 品質の向上

を高度化目標とし、半導体製造プロセスにおけるレジスト除去工程に、水プラズマアッシング法の適用を図り、レジスト剥離性、高速処理などの基本性能を維持した上で、

- ・熱や酸化によるダメージ低減
- ・チャージングダメージ低減
- ・パーティクルの発生を低減

を達成し、従来のレジスト除去方法における課題を解決することとした。これにより、デバイスの品質を高め、低不良率・高歩留まりを実現する新規のレジスト除去プロセスを開発する。本計画により、ミニマル規格に対応する水プラズマアッシング装置の基本構造の設計・試作を行い、ミニマル規格ハーフインチウェハ用の革新的レジスト除去プロセス装置を研究開発する。

以下に各研究開発サブテーマにおける、技術的数値目標を掲げる。

I. 水プラズマアッシングプロセスの開発

I-1. 半導体製造に適用可能なレベルの水プラズマアッシング法の開発

- ① プロセス後のウェハ上に、0.3 mm以下のパーティクルが500個以下となることを実現する。

- ② 酸化に由来する金属薄膜の体積抵抗率の増加を 1 桁以内とする性能を実現する。
- ③ ハーフインチウェハに対し、面内均一：±5%以内を実現する。
- ④ ウォーターマークが、目視にて観測されないプロセスを実現する。
- ⑤ 次の工程に影響を及ぼすレジスト残渣がないプロセスを実現する。
- ⑥ 半導体産業で使用される高抵抗 (18 MWcm 以上)かつ低溶存酸素量(500 ppb 以下)の超純水を原料とする水プラズマアッシングプロセスを実現する。
- ⑦ ノボラック系ポジ型レジストにおいて 1 mm/min 以上のレジスト除去速度を実現する。
- ⑧ イオン注入硬化レジストにおいて 0.1 mm/min 以上のレジスト除去速度を実現する。

I-2. 超純水の利用効率を最大とするプロセスの開発

- ① 一定の超純水量に対してレジスト除去速度や性能が最大となるプロセス条件を明らかにする。

I-3. 安定プロセスを実現するモニタリング手法の開発

- ① 超純水の品質、プラズマ状態をモニタリングする手法を確立する。

II. ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

II-1. プラズマ発生用の電源、回路系の小型化開発

- ① 平均的なマイクロ波投入電力を 200 W 以下とする水プラズマ生成法を実現する。
- ② マイクロ波の電源サイズを 270×400×300 mm³以下とすることを実現する。

II-2. プラズマ生成部、ウェハ処理部の小型化の開発

- ① ミニマル規格の筐体 (高さ 1440 mm、幅 294 mm、奥行き 450 mm) 内に水プラズマアッシング機構を収め、ミニマル規格の搬送方式に適合する装置を実現する。

II-3. 超純水使用量の極小化の開発

- ① ハーフインチウェハに対し、1 度の処理の溶液（超純水）使用量を 20 cc 以下とするレジスト除去を実現する。

II-4. ミニマルモデル装置の試作評価

- ① 半導体デバイス製造ラインに組み入れ、実用性の評価を行うことが可能なミニマル規格の水プラズマアッシング装置の試作機を完成させる。

III. 半導体製造プロセスへの組み入れと実用化テスト

III-1. ミニマルファブ技術研究組合における実デバイスにおける性能評価

- ① ミニマルファブ技術研究組合におけるフィールドテストの実施により、水プラズマアッシング法およびミニマル水プラズマアッシング装置の利点・問題点を明らかにする。

III-2. ファブシステム研究会内の川下企業における実用性評価

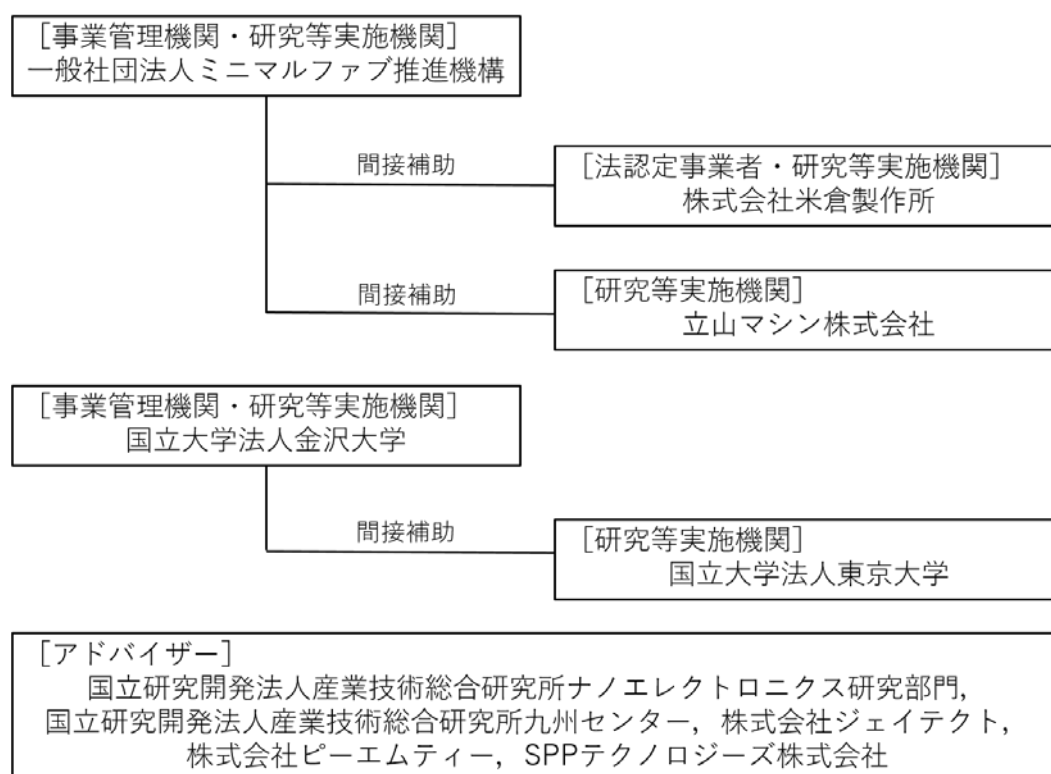
- ① 川下企業におけるフィールドテストの実施により、ニーズ（歩留まり・デバイス品質の向上）に対する評価を得る。

Ⅳ. 事業化のためのマーケティング活動

- ① 学会や展示会等における成果発表を年2件以上行う。半導体プロセスとして広く利用されるための具体的なポイント・課題を明らかにする。

1-2 研究体制

本事業の研究開発、管理の実施体制を以下に示す。



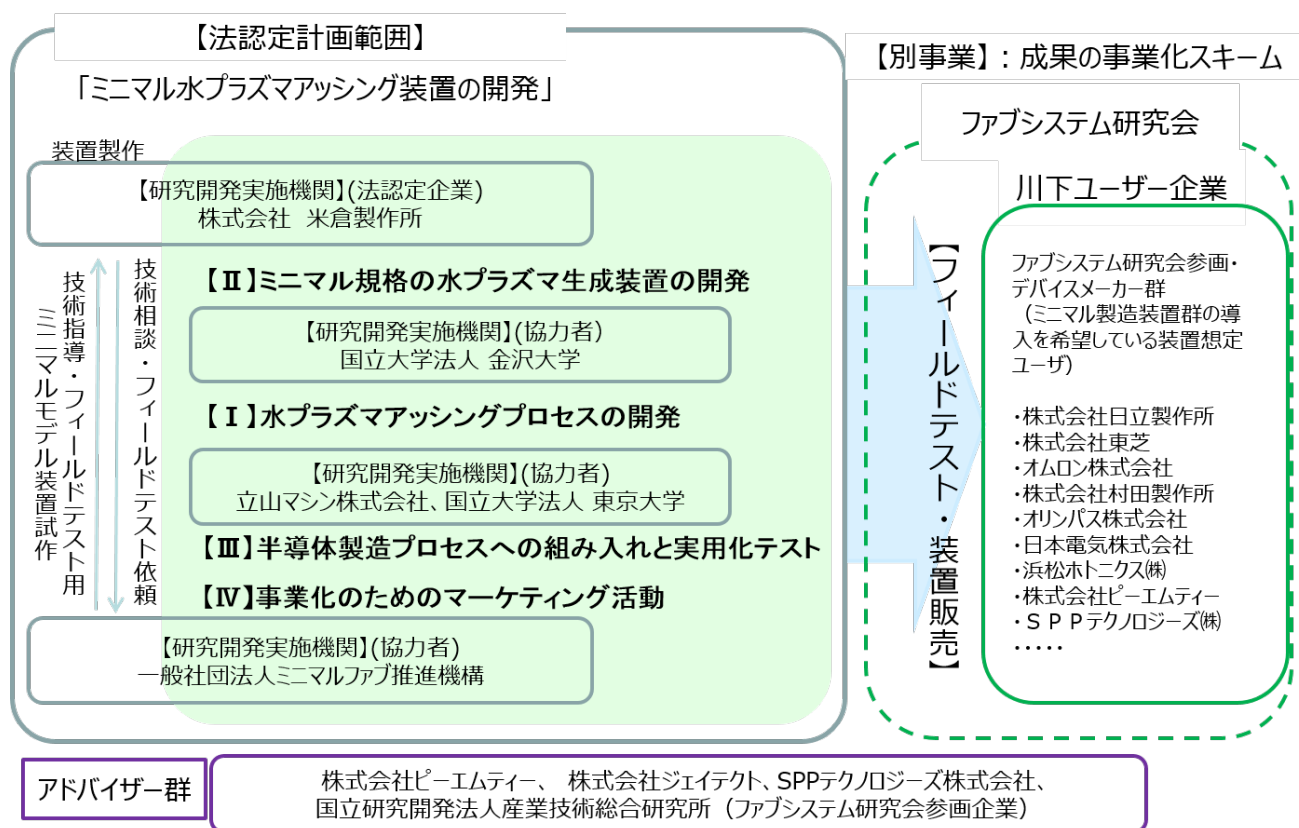
本事業の研究開発は、下記の総括研究代表者及び副総括研究代表者のもとで行った。

- ・総括研究代表者（PL）：株式会社米倉製作所 専務取締役 大西 康弘
- ・副総括研究代表者（SL）：国立大学法人金沢大学 理工研究域 教授 石島 達夫

また本事業に係る管理は、下記の事業管理機関が連名で行った。

- ・一般社団法人ミニマルファブ推進機構
- ※ 平成 29 年度にミニマルファブ技術研究組合から事業承継
- ・国立大学法人金沢大学

本事業を遂行した開発実施と事業化の体制図を以下に示す。



1-3 成果概要

各サブテーマについて、先述した体制で研究開発を実施し、設定した技術的目標値については概ね達成した。未達の項目についても解決手段は明確になっており、今後も研究開発を進めることで当初目標を達成できる見込みである。

以下に本事業の成果概要を示す。

I. 水プラズマアッシングプロセスの開発

- レジスト除去速度については、当初目標を大幅に上回る $6\mu\text{m}/\text{min}$ を達成した。（ノボラック系ポジ型レジスト、レジスト厚さ： $1\mu\text{m}$ ）
- 安定プロセスを実現するモニタリング手法の開発においては、発光分光計測法によるプラズマ状態のモニター機構を組入れ、レジスト除去プロセス前後の時分解計測を実施し、プラズマ発光状態とレジスト除去との相関を明らかにした。第三年度にはレーザー誘起蛍光法によるOHラジカル密度の計測評価を行い、OHラジカルの絶対密度およびラジカル密度の空間分布、面内分布とプラズマ生成条件との相関を明らかにした。

II. ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

- ミニマル規格（筐体サイズh1440×w294×d450）に適合する水プラズマアッシング装置の開発においては、マイクロ波電源の小型化、プロセスチャンバーやウェハ洗浄乾燥機構など各種構成機器の小型化に成功し、レイアウトの最適化により、ミニマル筐体内に水プラズマアッシングに必要なすべての機構を収めることに成功した。

またこの装置を用いて、マイクロ波投入電力 100W 以下でのプラズマ安定生成とレジスト除去を達成した。

- ミニマルモデル装置の試作評価においては、すべての機構、機能をミニマル規格内に収めた試作ミニマル装置（評価用 3 号機）を完成させ、半導体関連の大規模国際展示会（SEMICON Japan 2017）での実機展示、動作デモを実施した。
- 超純水使用量については、目標とした 20cc 以下/1 プロセスに対し、現在は 31cc/1 プロセスであり、目標値には到達することはできなかった。また供給方式は、装置内に設けられた原料供給ボトルに外部の超純水製造装置から直接、原料となる超純水を補充する形であり、完全なカートリッジボトル方式には到達しなかった。

Ⅲ. 半導体製造プロセスへの組み入れと実用化テスト

- （一社）ミニマルファブ推進機構のミニマルファブラインにて、MOS キャパシタ、pMOS トランジスタの製造工程に水プラズマアッシングを組み入れて試作を行い、デバイスの性能評価を実施した。一部の工程については、従来手法（酸素プラズマアッシング）と比較して同等以上の電気特性を得た。またアドバイザーを中心に、水プラズマアッシングの課題点や優位性、具体的な適用プロセスに対する議論、ヒアリング調査を行い、本事業に反映させた。

Ⅳ. 事業化のためのマーケティング活動

- 展示会（SEMICON Japan）へ実機を出展し、多くの川下ユーザーへの PR を行い、好意的な評価を得た。また応用物理学会をはじめとした国内学術会議、国際会議で成果発表を行い、多くの関心が寄せられた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

（装置開発、事業化）

株式会社米倉製作所 専務取締役 大西 康弘（総括研究代表者）

Tel：06-6464-6066 Fax：06-6462-2128

E-mail：onishi@caty-yonekura.co.jp

（技術シーズ）

国立研究開発法人金沢大学 理工研究域 教授 石島 達夫（副総括研究代表者）

TEL/FAX：076-264-6336

E-mail：ishijima@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

第2章 研究内容及び成果等

2-1 研究内容及び成果

以下に1-1-4項で掲げた、本事業における研究開発サブテーマと、個々の研究目標値(①、②、・・・)に対する、達成状況を記載する。

2-1-1. (I) 水プラズマアッシングプロセスの開発

I-1 半導体製造に適用可能なレベルの水プラズマアッシング法の開発

① <目標値>

- ・プロセス後のウェハ上に、0.3 mm 以下のパーティクルが 500 個以下となることを実現する。

【成果】

- ・プロセス後のウェハ上に残る 0.3 mm 以下のパーティクル数：50 個以下を達成。かつプロセス後にウェハ洗浄、乾燥機構を追加し、機構部品のレイアウト最適化を行うことにより、更なるパーティクル数の低減を達成した。

② <目標値>

- ・酸化に由来する金属薄膜の体積抵抗率の増加を 1 桁以内とする性能を実現する。

【成果】

- ・Al 薄膜のシート抵抗を評価し、増加が一桁未満であることを確認。

③ <目標値>

- ・ハーフィンチウェハに対し、面内均一：±5%以内を実現する。

【成果】

- ・面内均一性の数値評価については未実施となった。今後の対策については後述する。

④ <目標値>

- ・ウォーターマークが、目視にて観測されないプロセスを実現する。

【成果】

- ・①で設けた洗浄、乾燥機構を用いることにより、プロセス後のウェハ上のウォーターマークレスを達成。

⑤ <目標値>

- ・次の工程に影響を及ぼすレジスト残渣がないプロセスを実現する。

【成果】

- ・プロセス後のレジスト残渣が無いことを確認（デバイス試作評価にて確認）。

⑥ <目標値>

・半導体産業で使用する高抵抗（18 MWcm 以上）かつ低溶存酸素量（500 ppb 以下）の超純水を原料とする水プラズマアッシングプロセスを実現する。

【成果】

・超純水中の溶存酸素量のモニタリングを行い、溶存酸素量が増加するとレジスト除去性能が低下することを確認した。
・また一般的な品質（溶存酸素量：7～8 ppm）の超純水であれば、レジスト除去性能には影響を及ぼさないことを確認した。

⑦ <目標値>

・ノボラック系ポジ型レジストにおいて 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上のレジスト除去速度を実現する。

【成果】

・小型化マイクロ波電源を搭載した試作ミニマル装置を用いて、マイクロ波電力 100 W 以下の条件において、レジスト除去速度：6 $\mu\text{m}/\text{min}$ を達成した（ノボラック系ポジ型レジスト [東京応化工業(株)製、OFPR-5000]、膜厚：1 μm ）。

⑧ <目標値>

・イオン注入硬化レジストにおいて 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上のレジスト除去速度を実現する。

【成果】

・同じく試作ミニマル装置を用いて、イオン注入硬化レジストに対してレジスト除去速度：1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上を達成した。

I-2 超純水の利用効率を最大とするプロセスの開発

① <目標値>

・一定の超純水量に対してレジスト除去速度や性能が最大となるプロセス条件を明らかにする。

【成果】

・超純水使用量は目標とした 20 cc 以下/1 プロセスに対し、現在は 31 cc/プロセスであり目標値には達しなかった。今後の対策については後述する。

I-3 安定プロセスを実現するモニタリング手法の開発

① <目標値>

・超純水の品質、プラズマ状態をモニタリングする手法を確立する。

【成果】

・発光分光計測法によるプラズマ状態のモニター機構（図4）を組入れ、レジスト除去プロセス前後の時分解計測を実施し、プラズマ発光状態（図5）とレジスト除去との相関を明らかにした。

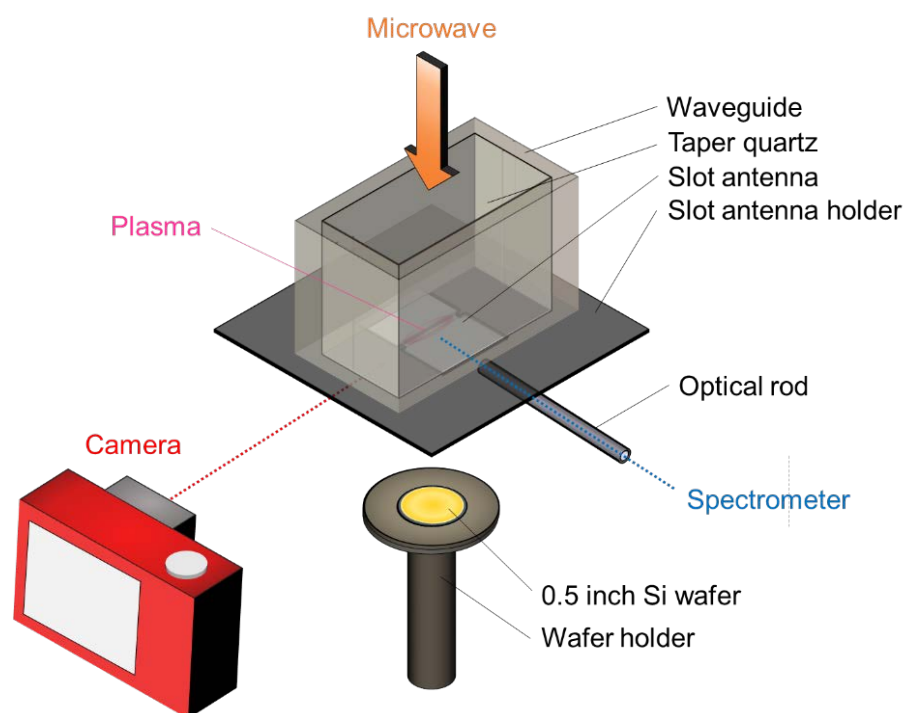


図4 発光分光計測時の実験系

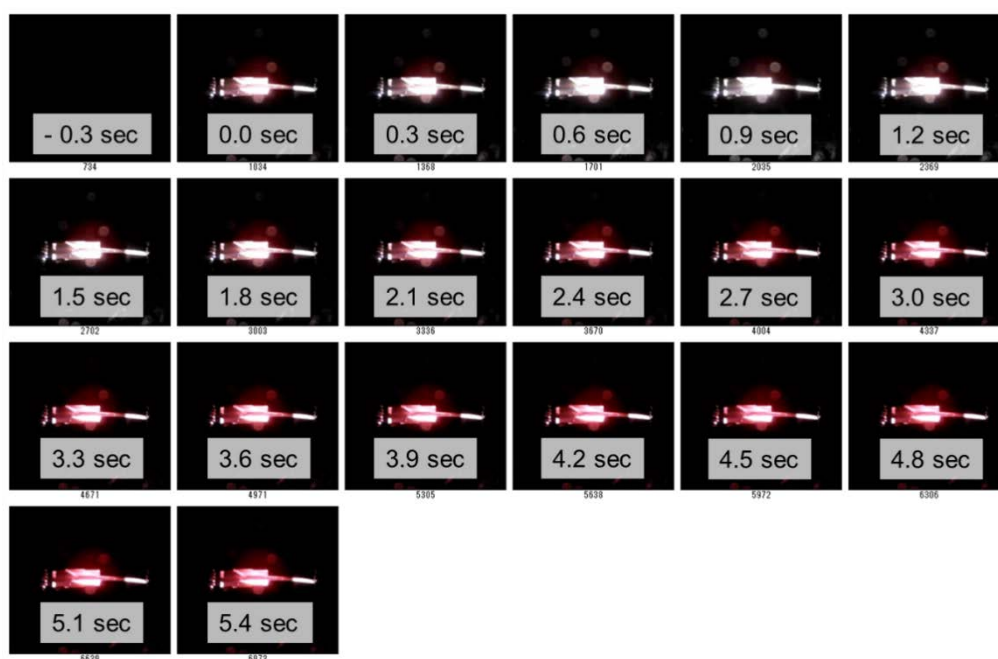


図5 水プラズマ発光様相の経時変化

- レジスト除去時に CO 分子由来の発光スペクトルが存在することを見出した(図6)。また、CO 分子と OH ラジカルの発光強度の経時変化(図7)より、レジスト除去が灰化により行わ

れていることを明らかにした。

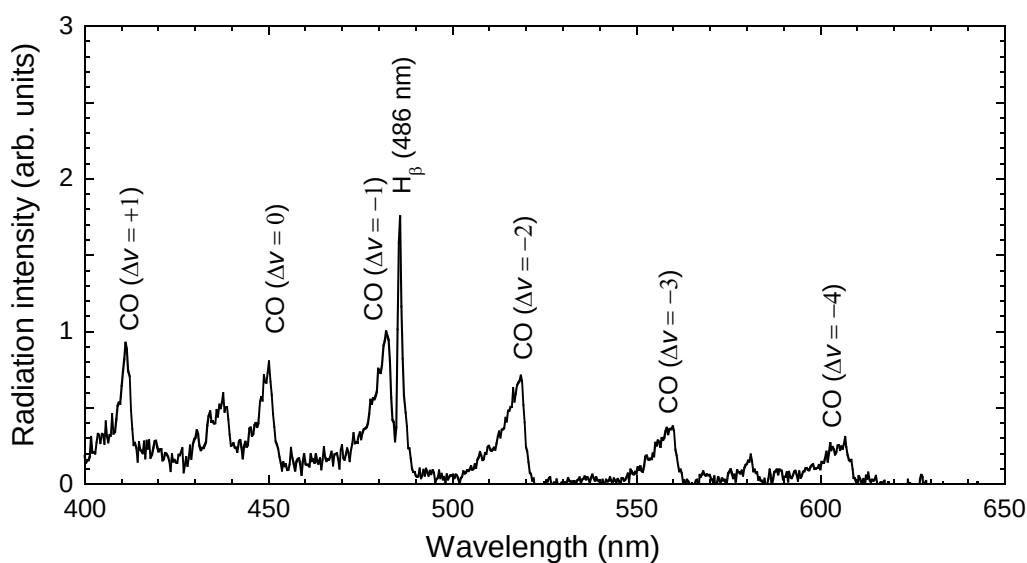


図6 水プラズマが白色発光しているときの発光スペクトル

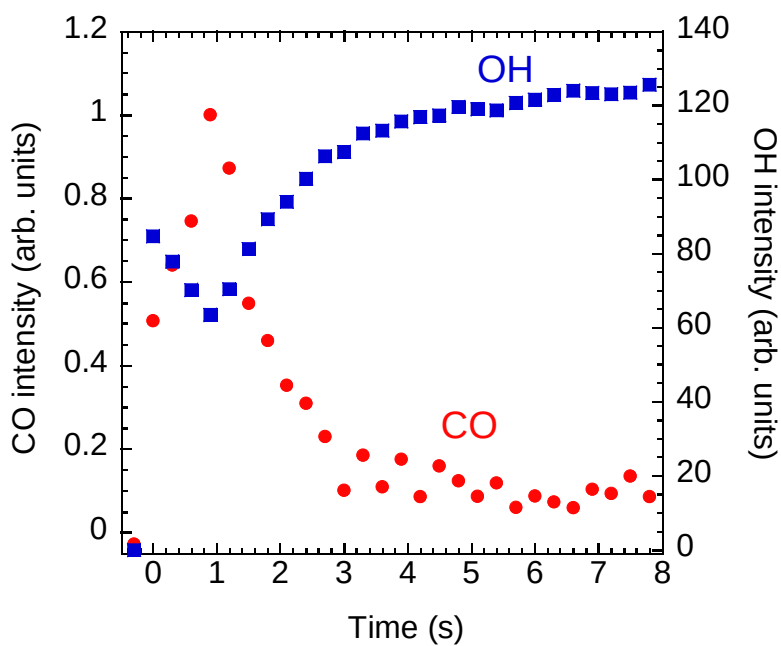


図7 CO 分子スペクトル、OH ラジカルの発光スペクトルの経時変化

- レーザ誘起蛍光法によるOH ラジカル密度の計測評価を行った。OH ラジカルの絶対密度およびラジカル密度の空間分布とレジスト除去特性との相関を明らかにした。
- 試作ミニマル装置（評価用2号機、評価用3号機）に超純水センサー（比抵抗率測定器）を設け、超純水の品質を定常的にモニタリング可能とした。

2-1-2. (Ⅱ) ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

Ⅱ-1 プラズマ発生用の電源、回路系の小型化開発

① <目標値>

平均的なマイクロ波投入電力を 200 W 以下とする水プラズマ生成法を実現する。

② <目標値>

マイクロ波の電源サイズを $270 \times 400 \times 300 \text{ mm}^3$ 以下とすることを実現する。

【成果】

- ・新たに開発されたマイクロ波発振器の採用と、伝送回路および機器の最適化により、電源の小型化を達成した。
- ・このマイクロ波電源をミニマル規格筐体内に完全に収納し、かつマイクロ波投入電力 100 W 以下でのプラズマ安定生成とレジスト除去を達成した。

【開発した小型化電源】

- ・ 平均マイクロ波投入電力：100 W
- ・ マイクロ波電源サイズ： $223 \times 265 \times 176 (\text{mm}^3)$ 、(目標値に対し、体積比約 1/3)

Ⅱ-2 プラズマ生成部、ウェハ処理部の小型化の開発

① <目標値>

ミニマル規格の筐体（高さ 1440 mm、幅 294 mm、奥行き 450 mm）内に水プラズマアッシング機構を収め、ミニマル規格の搬送方式に適合する装置を実現する。

【成果】

- ・マイクロ波伝送回路（導波管など）の小型化設計、プロセスチャンバーやウェハ洗浄乾燥機構など各種構成機器の小型化設計、レイアウトの最適化により、ミニマル規格筐体（ $h1440 \times w294 \times d450 [\text{mm}^3]$ ）内に水プラズマアッシングに必要なすべての機構を収めることに成功した。
- ・ミニマル規格のウェハ搬送システム（PLAD）、およびミニマルシャトルを用いたウェハ供給取出し方式への完全適合を達成した。

Ⅱ-3 超純水使用量の極小化の開発

① <目標値>

ハーフィンチウェハに対し、1 度の処理の溶液（超純水）使用量を 20 cc 以下とするレジスト除去を実現する。

【成果】

- ・超純水使用量は、目標：20 cc 以下/1 プロセスに対し、現在は 31 cc/1 プロセスであ

り、目標値には到達していない。今後の対策については後述する。

- ・現在は装置内に設けられた原料供給ボトルに、外部の超純水製造装置から直接、原料となる超純水を補充する形であり、完全なカートリッジボトル方式には到達していない。今後の対策については後述する。

Ⅱ－４ ミニマルモデル装置の試作評価

① <目標値>

半導体デバイス製造ラインに組み入れ、実用性の評価を行うことが可能なミニマル規格の水プラズマアッシング装置の試作機を完成させる。

【成果】

- ・すべての機構、機能をミニマル規格内に収めた試作ミニマル装置（評価用３号機、図８）を完成させた。半導体関連の大規模国際展示会（SEMICON Japan 2017）での実機展示、動作デモを実施した。
- ・（一社）ミニマルファブ推進機構のミニマルファブラインへの組入れ、デバイス試作が可能となる性能を達成した。
- ・ミニマル規格に適合する、装置全体の消費電力：100 V×10 A 以内を達成した。

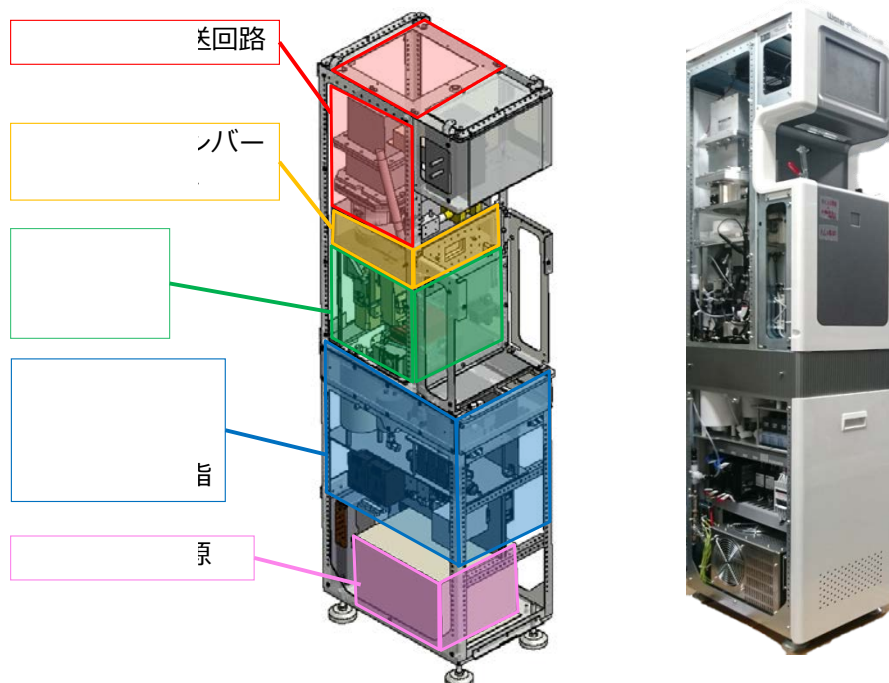


図８ 試作３号機の装置概略

2-1-3. (Ⅲ) 半導体製造プロセスへの組み入れと実用化テスト

Ⅲ-1 (一社) ミニマルファブ推進機構における実デバイスにおける性能評価

① <目標値>

ミニマルファブ技術研究組合におけるフィールドテストの実施により、水プラズマアッシング法およびミニマル水プラズマアッシング装置の利点・問題点を明らかにする。

【成果】

- ・(一社) ミニマルファブ推進機構(※ 平成 29 年度にミニマルファブ技術研究組合から事業承継) のミニマルファブラインにて、MOS キャパシタ、pMOS トランジスタの製造工程に水プラズマアッシングを組み入れて試作を行い、デバイスの性能評価を実施した。
- ・電極(AI) 形成後のレジスト除去工程に水プラズマアッシングを用いた場合においては、従来手法(O_2 アッシング) と同等以上の電気特性が得られ、同工程では従来手法からの置き換えが可能であることを確認した。

Ⅲ-2 ファブシステム研究会内の川下企業における実用性評価

① <目標値>

川下企業におけるフィールドテストの実施により、ニーズ(歩留まり・デバイス品質の向上) に対する評価を得る。

【成果】

- ・アドバイザーを中心に川下ユーザ企業を訪問し、現状報告を行い、水プラズマアッシングの課題点や優位性、具体的な適用プロセスに対する議論、ヒアリング調査を実施した。
- ・川下ユーザ企業より、従来手法ではレジスト除去が困難な実デバイスのサンプル提供を受け、水プラズマアッシングによるテストと性能評価を実施した。

2-1-4. (Ⅳ) 事業化のためのマーケティング活動

① <目標値>

学会や展示会等における成果発表を年2件以上行う。半導体プロセスとして広く利用されるための具体的なポイント・課題を明らかにする。

【成果】

- ・半導体関連の大規模国際展示会（SEMICON Japan 2016、SEMICON Japan 2017）、及び国際会議 EDTM2017 に実機を出展した（図9）。セミコンの来場者からは廃液を使わないことは非常に画期的である等、開発に期待を寄せる多くの反応があった。3年の事業期間内で3件の展示会を行った。
- ・応用物理学会（春季・秋季学術講演会）で成果発表を行った。
- ・第39回ドライプロセス国際シンポジウムで成果発表を行った。
- ・第33、34回フォトポリマー科学技術国際会議で成果発表を行った。
- ・リソグラフィに関する英文科学専門誌に論文投稿し、本研究に関わる成果の一部を報告した。
- ・これらを合わせ、3年の事業期間内で12件以上の学会発表を行った。



図9 SEMICON Japan 2017
における展示の様子

2-2 今後の対策

本事業期間内で未到達であった研究目標値については、今後以下に示す対策を実施する。当初目標値を達成し、装置の完成度を高める。

I. 水プラズマアッシングプロセスの開発

I-1 半導体製造に適用可能なレベルの水プラズマアッシング法の開発

- ・ハーフィンチウェハに対し、面内均一：±5%以内を実現する。

【対策】 半導体製造に適用可能なレベルの水プラズマアッシング法の開発において、現在ミニマルファブで用いている標準のレジスト（ノボラック系ポジ型レジスト，膜厚 1 μm）に対してはレジスト除去速度が大きく、極めて短時間でレジスト除去がなされるため、単位時間当たりの正確なレジスト除去量を計測することが困難である。厚膜形成が可能な種類のレジストを用いることで単位時間当たりのレジスト除去量を明らかにし、正確な面内均一性の評価を行う。

またアンテナ形状のシミュレーションを行い、形状最適化を行うことで面内均一性の改善が可能である。シミュレーションを実施することにより検討を進める。

Ⅱ. ミニマル規格の水プラズマアッシング装置の開発

Ⅱ－３. 超純水使用量の極小化の開発

- ・ハーフィンチウェハに対し、１度の処理の溶液（超純水）使用量を 20 cc 以下とするレジスト除去を実現する。

【対策】 目標値 20cc に対し、現在の使用量は 31 cc である。現在はプロセスチャンバー内にウェハの保持（メカチャック）機構を設けるための空間が必要となっており、使用量の増加につながっている。

保持部の機構、構造を変更（メカチャック方式 → 静電チャック方式）することでチャンバー内の空間を小さくすることが可能であり、約 15 cc の削減が見込まれる。これにより、目標値である 20 cc 以下／1 プロセスを達成する。

- ・カートリッジボトル交換方式による超純水の供給

【対策】 超純水を完全なカートリッジボトルによる原料供給方式にすることができなかった。外部のタンク、ボトルなどで保管されている超純水は、一般的に品質の劣化（抵抗率低下）が避けられない。現在は装置内部で超純水の品質を維持する機構は設けているが、品質劣化を回復する機能までは備えていないため、あらかじめ品質が確保された超純水のみを補充する形となっている。

装置内部に品質劣化を回復する機能（フィルタの強化、循環回路の改良）を追加することで、完全なカートリッジボトルによる原料供給方式に対応する。

Ⅲ. 半導体製造プロセスへの組入れと実用化テスト

Ⅲ－１. （一社）ミニマルファブ推進機構における実デバイスにおける性能評価

- ・（一社）ミニマルファブ推進機構におけるフィールドテストの実施により、水プラズマアッシング法およびミニマル水プラズマアッシング装置の利点・問題点を明らかにする。

【対策】 （一社）ミニマルファブ推進機構における実デバイスにおける性能評価において、コンタクトホール形成後のレジスト除去工程に水プラズマアッシングを用いた場合においては、従来手法（SPM 処理）と比較して、界面準位密度が増大しているなど電気特性の低下が見られている。

様々な実験評価から原因の推定を行った結果、ウェハ界面が過剰にプラズマに曝されることによる影響と考えられる。プラズマ照射時間の精密制御などプロセスを緻密にコントロールすることで改善可能である。

第3章 全体総括

半導体製造におけるレジスト膜を除去する手法としては従来、酸素プラズマ処理法と薬液処理法が用いられている。これらは、酸化ダメージやパーティクル発生により不良率が増加するなどの課題がある。

本事業において、これらの課題を解決するため、新たに水プラズマという手法を用いるレジスト除去方法を開発し、ミニマルファブ規格で装置化を行った。半導体製造に必要とされるレベル、およびミニマル規格に適合させるため、開発を進める装置の機械設計と電気設計、特に要素技術となる機構や性能を担保するシステム構成の設計においては、部品レベルでの性能確認実験も行った上で開発を進めた。

補助事業の支援を受けることで二年目に試作ミニマル装置の評価用2号機を完成させ、最終年度において実用化を見通すことができる評価用3号機を完成させることができた。評価用2号機及び3号機は、それぞれ SEMICON Japan 2016, 2017、国際会議（2017 IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference）において展示公開し、水プラズマによるアッシングプロセスのデモ運転を行った。実際にデモ運転を見学したアドバイザーや展示会来場者からは、リソグラフィ工程で繰り返し利用されるレジスト除去プロセスを水プラズマで行うことの重要性和意義について高い評価を得ることができた。

本プロセスは、ミニマルファブによる半導体製造プロセスにおいて、高い付加価値を提供できる可能性があり、大いに期待されている。ミニマルファブ規格での装置化を行うことにより、メガファブで性能評価を行うことが極めて困難な、斬新で大きな利点を有する半導体製造プロセスの開発が進み、実用化に向けて大きく進展した。

本事業の研究開発成果は、ミニマルファブを含めた半導体製造工程全般において、歩留まりの低減と、高い環境負荷の低減につながる付加価値の高い有用な技術である。今後は、ユーザからのニーズに対応できるプロセスのレシピの最適化に関する研究開発を進め、適用できるプロセスの検証と信頼性を高めて販売につなげていく。早期に市場に投入し、半導体デバイス製造を通じた社会の持続的な発展に大いに貢献していく。