

平成 30 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

「ヘリコン波プラズマ技術を用いたミニマルファブ用超高速
マルチスパッタ装置の開発」

研究開発成果等報告書

令和元年 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 ヘリコン波プラズマ技術の最適化】
- 【2 多品種少量用ターゲット機構及び材料の開発】
- 【3 ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル化】
- 【4 樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発】

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

【研究背景】

(川下企業の課題)

①マスク(パターニングの原版)に 1 年程の作成期間と数千万円の費用がかかる。

②試作の為に 1 ロット(大口径)分の費用(数百万円)と期間(数か月)が必要。

③上記により現実的に考えた時に大量の受注品のみへの対応となってしまう。

上記により QTAT での試作開発を行うことが困難な状況になり、可能性のある小型化高機能の集積回路技術が企画段階でなくなり、小型化・高機能化・多品種生産への対応が困難である。

(川下企業のニーズ)

本アドバイザーである、東芝殿をはじめとする川下企業からは生産性向上・低コスト化に対して下記の様なニーズがある。

①擬似 SoC 技術を用いた QTAT 対応をしたい。

②ミニマルファブにて、再配線プロセスを実施したい。

このようにミニマルファブプロセスを用いた擬似 SoC 技術が検討されているが、既存のスパッタプロセスでは難しく、擬似 SoC 技術への対応に向けた再配線プロセスへの新技術が必要である。

【研究目的及び目標】

本事業では川下企業のニーズに対応するために下記を目的とした研究開発を実施する。

・多品種少量生産システム ミニマルファブシステムにおける高速・低ダメージ・多元スパッタ装置開発

・擬似 SoC 技術の再配線プロセスへの展開

研究開発の最終目標は下記の通りとした。

(1 ヘリコン波プラズマ技術の最適化)

マッチャーレス方式で、高周波電力 200W 以内でプラズマ密度 10^{12}cm^{-3}

(1-1) ヘリコン波プラズマ技術の高周波化

周波数 30MHz での直径 5 cm×長さ 10 cm程度

(1-2) ヘリコン波プラズマ技術の弱磁場化

磁場強度 100 Gauss 以下

(1-3) ヘリコン波プラズマ技術のマッチャーレス化

従来方式の半分程度までの小型化

(2 多品種少量用ターゲット機構及び材料の開発)

2元以上のターゲット機構開発

Ti, Cu をはじめとする各種材料に応じたターゲット材の開発と安定作成

(2-1) 収束磁場によるプラズマ制御技術を有する多元ターゲット機構の開発

ターゲット数2元以上

(2-2) プラズマ生成部, ターゲット, 基板の配置最適化

プラズマ生成部, ターゲット, 基板の配置の最適化実施

(2-3) ターゲット材料開発と多品種化

平均粒径 100 μm 程度の 3 種類以上 (Ti, Cu, その他合金) のターゲット開発

(3 ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル化)

ミニマルプロジェクトで規格化された装置サイズに準ずるものとする。

(3-1) ヘリコン波プラズマ成膜装置のレイアウト最適化

各種電源系統, 真空排気系統, 冷却水系統, ガス導入系等の最適レイアウト実施

(3-2) ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル筐体への組み込み

ミニマル規格に準ずるサイズ(装置サイズ: 約 29cm×45cm×144cm)

(4 樹脂基板上へ多層膜形成技術開発)

Ti-Cu 層をはじめとする各種材料の高速スパッタ。典型的な成膜レートとして, Cu の場合に 0.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ を目標値とする。また樹脂上への配線材の成膜プロセスを実現する。

(4-1) 樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発

表面酸化層除去と多層膜成膜の連続動作

(4-2) プロセスレシピ開発

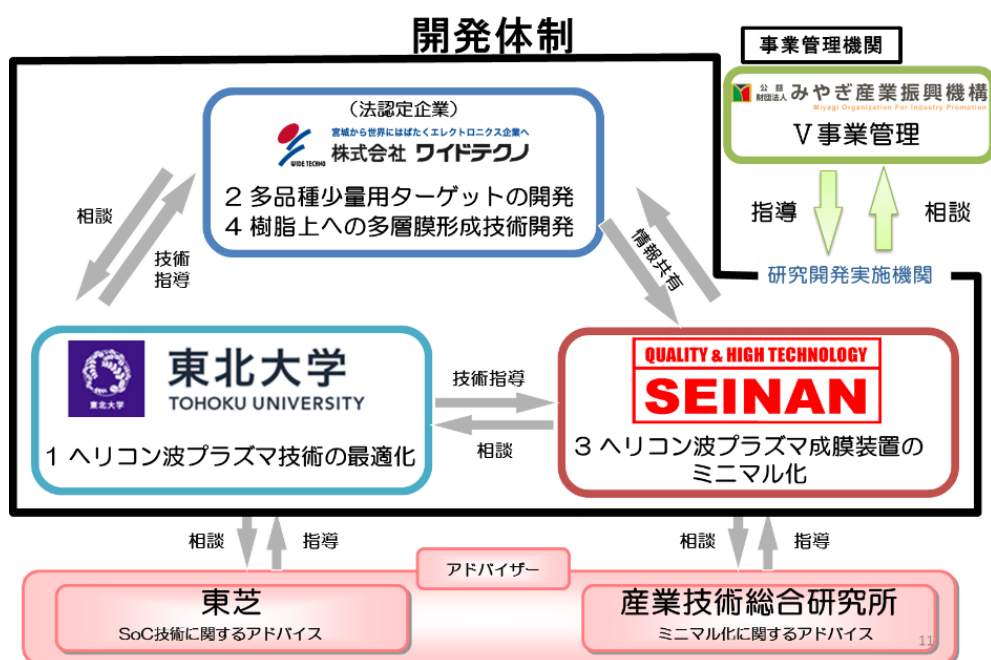
ワンタッチ操作による、表面酸化層除去及び多層膜形成 (Ti 層、Cu 層)

(4-3) 樹脂上への成膜と熱・プラズマダメージの検証

樹脂基板上の温度 (250℃以下)

1－2 研究体制

【研究組織図】



【研究体制】

- ・ 事業管理機関…公益財団法人みやぎ産業振興機構
- ・ 間接補助事業者…株式会社ワイドテクノ、国立大学法人東北大学、誠南工業株式会社

【担当者氏名】

- ・ 遠藤 伸吾（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 原谷 和徳（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 川崎 弘幸（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 千葉 隼人（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 川名 通子（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 松田 淳（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 児玉 優太（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 藤門 彩佳（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 伊東 茉那（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 青木 貴博（株式会社ワイドテクノ）
- ・ 高橋 和貴（国立大学法人 東北大学）

- 亀井 龍一郎（誠南工業株式会社）
- 矢野 雅人（誠南工業株式会社）
- 藪田 勇氣（誠南工業株式会社）
- 城田 佳明（誠南工業株式会社）
- 露口 良一（誠南工業株式会社）
- 孫 宇（誠南工業株式会社）
- 水口 寿史（誠南工業株式会社）
- 片橋 龍一（誠南工業株式会社）
- 佐藤 亮（誠南工業株式会社）
- 呉 邦（誠南工業株式会社）
- 山本 直子（誠南工業株式会社）
- 酒井 康憲（誠南工業株式会社）
- 佐藤 仁紀（誠南工業株式会社）
- 熊谷 実（公益財団法人みやぎ産業振興機構）
- 清正 真砂（公益財団法人みやぎ産業振興機構）
- 石川 仁（公益財団法人みやぎ産業振興機構）
- 菅原 崇（公益財団法人みやぎ産業振興機構）
- 小野寺 桂三（公益財団法人みやぎ産業振興機構）

【アドバイザー】

- 井上 道弘（国立研究開発法人産業技術総合研究所）
- 江澤 弘和（東芝メモリ株式会社）

1-3 成果概要

【1 ヘリコン波プラズマ技術の最適化】

【1-1】ヘリコン波プラズマ技術の高周波化

【1-2】ヘリコン波プラズマ技術の弱磁場化

【1-3】ヘリコン波プラズマ技術のマッチャーレス化

上記3つのテーマにて、

生成部の消費電力抑制を実施し、高周波電力 150W で磁場構造・強度の最適化により下流域であるターゲット近傍でのプラズマ密度 10^{12}cm^{-3} を達成した。また、マッチャーレス小型高周波システムの開発・動作評価を実施し、ミニマル試作機への導入と制御系を構築した。さらに、当初計画よりも進展があったため、反応性スパッタや絶縁物へのスパッタも対応可能な高周波電源システムの開発を追加実施し、市場拡大へ向けた技術基盤構築を進めた。

【2 多品種少量用ターゲット機構及び材料の開発】

【2-1】収束磁場によるプラズマ制御技術を有する多元ターゲット機構の開発

【2-2】プラズマ生成部、ターゲット、基板の配置最適化

【2-3】ターゲット材料開発と多品種化

上記3つのテーマにて、高密度プラズマをターゲットに効率よく照射させるためにプラズマ生成部、ターゲット、基板の配置最適化を行った。背面に永久磁石を配置した収束磁場配置による多元ターゲット機構の開発が完了し、最大で4元化を実現した。さらに、背面の磁石の磁力を利用してターゲットを着脱するワンタッチ交換式ターゲットの開発に成功した。Cu バッキングプレートと着脱用磁性材料を拡散接合させることで高温でも剥離がなく、バッキングプレートの再利用が可能となった。又、多元用のターゲット材の開発を行った。ターゲットの材質は Ti、Cu、Ni、Al、Al/Si、Al/Cu など、平均結晶粒径 $100\mu\text{m}$ 以下のものが完成した。又、Ti ターゲットに対し Al バッキングプレートの拡散接合が有効であることが分かった。マルチターゲットを使う多層膜としては、Cu、Ti、Al でテストを行いメタル多層膜間で GD-プロファイラにより、酸素などのコンタミがないことを確認した。

【3 ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル化】

【3-1】ヘリコン波プラズマ成膜装置のレイアウト最適化

【3-2】ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル筐体への組込み

上記 2 つのテーマにて、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電源、冷却水、真空など各種システムのレイアウト検討を実施し、順次ミニマル筐体への組み込み作業を進め、試運転による動作確認、放電確認を通し最終的な調整を行い、試作機が完成した。前述のプラズマ源および高周波システムの小型化によって筐体内部のスペースを有効活用が可能となったため、ミニマル装置では初の 260L/s のターボ分子ポンプを搭載することに成功した。

【4 樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発】

【4-1】樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発

【4-2】プロセスレシピ開発

【4-3】樹脂上の成膜と熱・プラズマダメージの検証

上記 3 つのテーマにて、擬似 SoC で使用する樹脂基板上で表面酸化層除去後に Ti と Cu の二層膜の作成を行った。樹脂上への多層膜配線を可能とするプロセスレシピの開発を行い、Ti 50nm/min、Cu 100nm/min の成膜レートで成膜を完了し、樹脂上での再配線のプロセスが完了した。開発過程でターゲット表面からの二次電子によって基板が 400 度程度まで加熱されることが観測されたが、新たに磁気フィルタを導入することで温度上昇を抑制し、150 度以下まで低減することに成功した。60 秒の成膜時間で樹脂材表面温度が 250 度以下であることをサーモラベル等で計測し、今回の樹脂基板の耐熱温度である 250 度を超えないことを確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属 株式会社ワイドテクノ

氏名 遠藤 伸吾

電話 0229-63-6909

FAX 0229-63-7180

E-mail wide22@wide-techno.co.jp

第2章 本論

【1 ヘリコン波プラズマ技術の最適化】

本項目では、本研究開発の基盤技術でもあるヘリコンプラズマ源の小型化・高効率化・低電力化を行った。従来のヘリコン波プラズマ生成装置の主要コンポーネントは、プラズマ生成部であるガラス管、磁界印加用のソレノイド、高周波アンテナ、およびインピーダンス整合のためのマッチャー、および高周波電源であり、比較的大がかりな装置構成である。下記の開発を実施することで、ミニマル装置へ搭載可能なヘリコンプラズマ源を開発した。

【1-1】ヘリコン波プラズマ技術の高周波化（平成 28 年度～平成 30 年度）

高周波コンポーネントのインピーダンスは周波数に依存するため、プラズマ生成用駆動周波数を高周波化することにより、アンテナや高周波アンプの小型化が可能であると考えられる。本項目では従来の 13.56 MHz 帯に変わり、30 MHz 帯でのヘリコン波プラズマ生成技術の開発に着手した。さらに磁力線構造からのプラズマ拡散過程を抑制するために 100 Gauss 程度の磁場強度が必要であることが判明し、プラズマ中電磁波の波動解析により駆動周波数を 40 ± 3 MHz とし開発を進め、目標プラズマ密度を達成

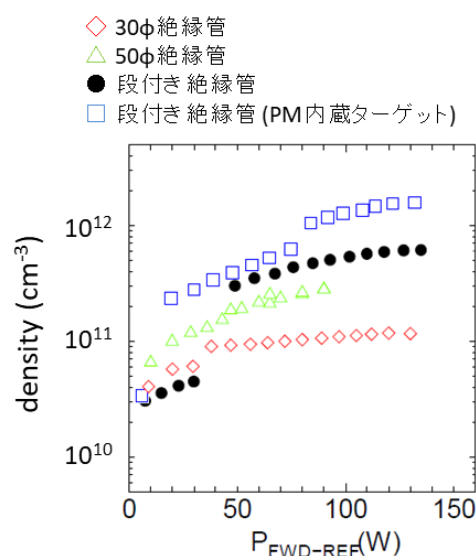


図 1: ターゲット近傍でのプラズマ密度計測結果。

した。さらに、下流域での高密度化を実現するために、段付絶縁管を用いたヘリコンプラズマ源の開発を実施し、ターゲット近傍でのプラズマ密度 10^{12} cm^{-3} 以上を実現した (図 1)。

【1-2】ヘリコン波プラズマ技術の弱磁場化（平成 28 年度～平成 30 年度）

通常のヘリコン波放電では数 100 Gauss ～1000 Gauss 程度の比較的強い磁場強度が用いられており、消費電力(典型的には数 100 W～1 kW)や直流電源のサイズがミニマル化では問題となる。一方で、磁場強度が数 10 Gauss 程度の弱磁場領域におけるヘリコンモードへの遷移が東北大学を含む国内外の基礎研究で観測されている。この際のソレノイド消費電力は数 10 W 以下であり、この弱磁場ヘリコンモードを利用することで、小型ヘリコンプラズマ源の開発が実現可能となった。一方で、磁場強度が弱い場合には磁力線を横切るプラズマ拡散過

程により下流域のプラズマ密度が上昇せず、100Gauss 弱程度が装置設計上最適であると判断した。この条件におけるプラズマ中の電磁波解析の結果、駆動周波数は 40MHz 付近が最適であることがわかり、40MHz 帯周波数において、磁場強度 100Gauss 以下における高密度プラズマ生成方式を確立した。

【1-3】ヘリコン波プラズマ技術のマッチャーレス化（平成 28 年度～平成 30 年度）

高周波プラズマ源でスペース占有率が最も多いコンポーネントは、高周波インピーダンス整合を取るためのマッチャーであり、小型化を妨げる最大の原因である。図 2(A1) に従来のマッチャーを用いたインピーダンス整合法の概略

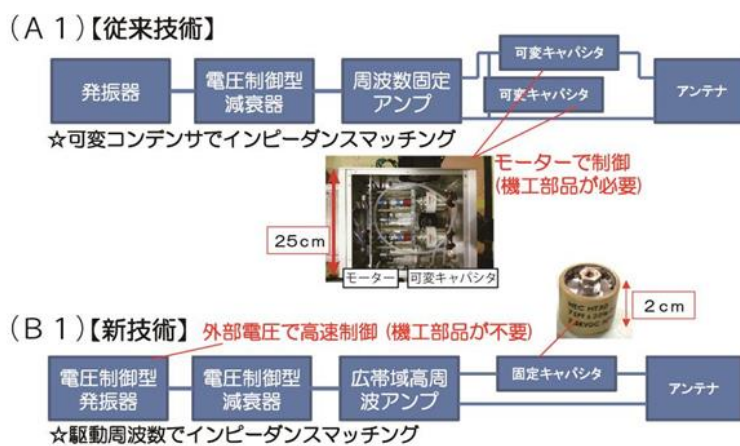


図 2 マッチャーレス高周波プラズマ生成法の原理

図を示す。プラズマ生成またはプラズマの変化に応じて可変キャパシタを用いてインピーダンスの調整を行うのが従来方式である。可変キャパシタは固定キャパシタに対して大きな構造を有しており、さらにモーター等の機械駆動機構等に起因して小型化が困難である。今回開発を行う新技術であるマッチャーレス方式 [図 2(B1)] では、電圧制御発振器を用いて駆動周波数を $40 \pm 3\text{MHz}$ 帯で可変とすることで、駆動周波数によるインピーダンス整合を実現した。あらかじめおおよそのインピーダンスを調整する固定キャパシタが必要

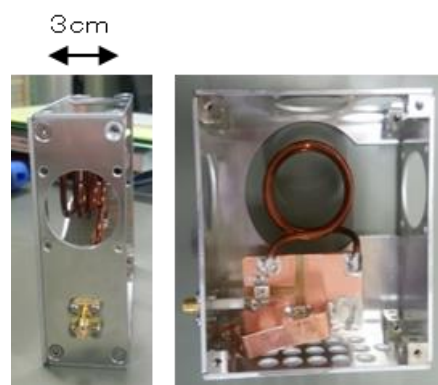


図 3: 固定キャパシタのみを用いた整合回路。

要であるが、直径・長さ 1cm 以下と小型コンポーネントであるため、従来方式に比べて飛躍的な小型化が可能であり(図 3)、高周波システムを含めたプラズマ源全体として従来方式の半分以下の小型化が可能である。これにより使用可能スペースが圧倒的に増えるため、後述するターゲットの多元化等の設計・制作、真空排気系の設計・制作にとっても有用である。これは、あらゆるプラズマプロセス装置に適用可能な技術であるといえ、東北大学にて開発が実施されたものであり、今回のプロジェクトに対して最適なプラズマ生成方式であるとともに

に、他のプラズマプロセス装置への産業展開も可能である。

また市場調査の結果、絶縁物スパッタや反応性スパッタの要望が多く見受けられたため、今回開発を進めるスパッタ装置の市場拡大を見込んで、当初計画に加えて、高周波基板バイアスを可能とするために、2系統出力の高周波システム開発も実施し、ミニマル装置に収容可能なサイズでの開発に成功した。

●ヘリコン波プラズマ技術の最適化の成果

東北大学にてプラズマ源の最適化による高効率化を図りマッチャーレスヘリコンプラズマ技術確立し、ワイドテクノ・誠南工業にて最終的なミニマル仕様のプラズマ源を完成させた。最終目標に対し、100%達成することができた。当初計画では3年目で上記開発を完了する予定であったが、今回2年目で開発が完了したため、将来的な絶縁物スパッタや反応性スパッタを視野に入れた2系統出力高周波システム開発も行い、ミニマル筐体に収容可能な2系統出力高周波システム開発を実現した。

【2 多品種少量用ターゲット機構及び材料の開発】

本項目では、ターゲットの多元化による高速多層膜形成に関する技術開発を行った。擬似SoCによりICを結合した場合、その配線層の膜質によりチップ間の信号伝送速度が影響を受けるため、その信頼性と高速性を確保するためには、均一かつ安定した高速製膜技術に加えて、その多元化が要求された。この課題に対して下記の開発を推進することで、課題解決が可能になった。

【2-1】収束磁場によるプラズマ制御技術を有する多元ターゲット機構の開発（平成28年度～平成30年度）

高スパッタレートを実現するためには、高密度プラズマをターゲット材料に効率よく照射する必要がある。ここではターゲット背面に永久磁石を内蔵しターゲット表面へとプラズマを収束可能であり、回転機構を利

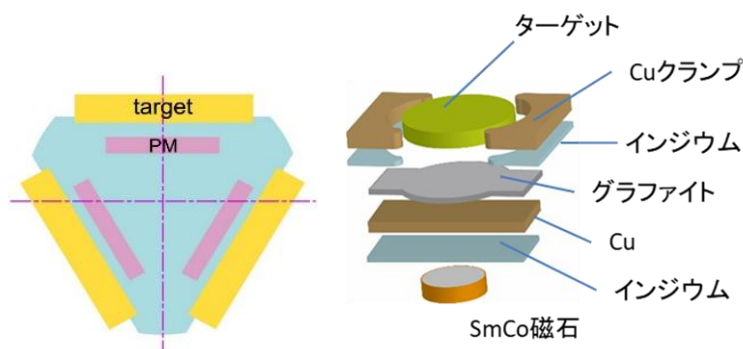


図4: (左図) 多元ターゲット機構概略図 (3元の場合)、(右図) ターゲット放熱冷却機構。

用した多元ターゲット開発を東北大学にて実施し(図 4 左図), この設計をミニマル試作機へと適用した。ここでは, 容器内部でのパーティクル発生を抑制するために、磁性流体シールを用いた回転機構を搭載し, さらにターゲットの温度上昇を抑制するために, 従来用いられてきたインジウムシートと, 面内方向に高い熱伝導度を有するグラファイトシートを併用した冷却機構の開発にも成功した (図 4 右図)。

【2-2】プラズマ生成部, ターゲット, 基板の配置最適化 (平成 28 年度～平成 30 年度)

最終的に基板に効率よく膜を形成するためには, ターゲットへの高効率プラズマ照射, ターゲット材料と基板の間隔等の幾何学的な配置が重要なパラメータである。すなわち, プラズマをターゲットのみに照射可能とする磁場配置設計, 最適ターゲット位置の同定, およびプラズマに直接接触せずかつターゲットから近い位置に基板を配置する必要がある。これらをすべて満足する配置を実験機および磁場解析を併用して同定し (図 5), 最終的なミニマル化の際の設計に反映した。

これにより, 当初目標値であった Cu 成膜レート 100-200 nm/min の値を実現することができ, 他のターゲット材料 (Al, Ti) についても要求仕様を満足する成膜レートが得られた (図 6)。また, SEM, EDX 分析によって成膜後基板の表面状態観察と不純物解析を行ったところ, 表面状態に目立った荒れは無く, ターゲット材料とシリコン基板以外の材料に関しては検出限

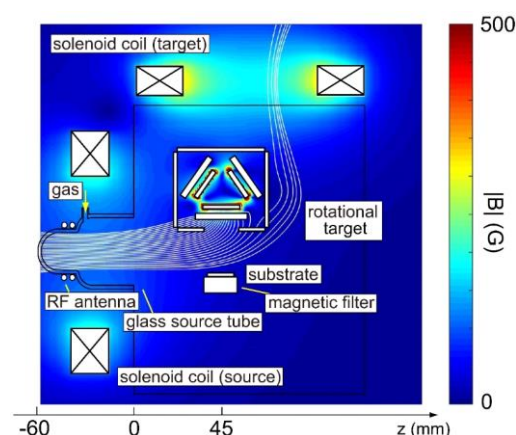


図 5: プラズマ源, ターゲット, 基板の配置。図中白線は磁力線の計算結果である。

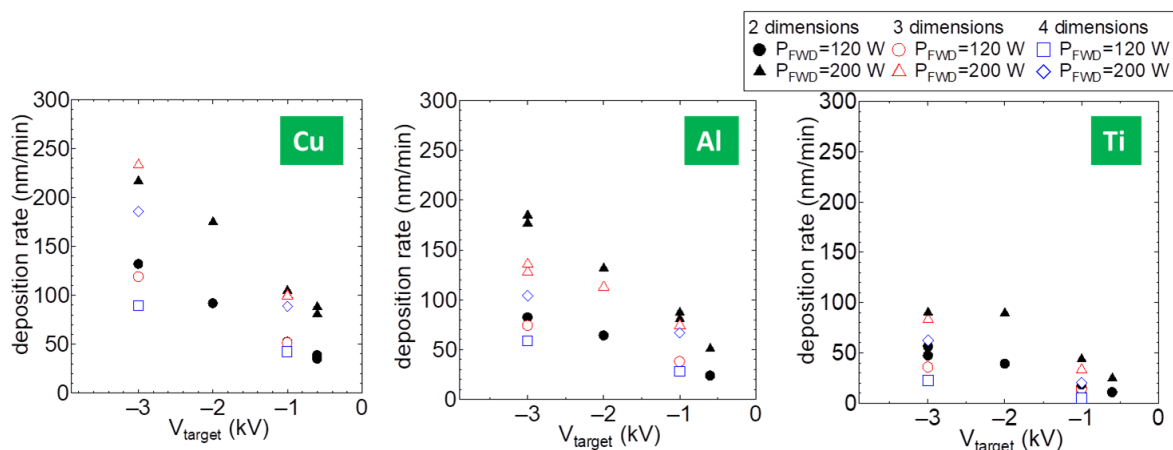


図 6: 各種ターゲット材料におけるシリコン基板への成膜レート測定結果。

界以下であった。

また、不純物混入の指標として、金属膜の比抵抗計測を行い、不純物混入のない Cu 膜の比抵抗として知られる $2\mu\Omega\cdot\text{cm}$ と同様の値を得た(図 7)。

【2-3】ターゲット材料開発と多品種化 (平成 28 年度～平成 30 年度)

擬似 SoC のチップ間配線では、樹脂と金属膜の密着性を向上させる密着層と配線層を形成する必要があるため、Ti 層 - Cu 層の多元スパッタが求められており、これらのターゲット材料の開発を実施した。安定した品質 (電気伝導性等) の配線形成を行うためには、不純物のないターゲット材料の開発および各ロットでばらつきのないターゲット材料の供給が必須課題であり、(株)ワイドテクノの有する材料開発のノウハウを駆使した高品質ターゲットを開発した。ここではターゲット材料の均質化が必要となるため、微細化かつ均一化が施されたターゲット材料の開発を行い、(株)ワイドテクノが実績を有する結晶粒系制御技術を各種ターゲット材料の製造へと適用し、平均粒径 $100\mu\text{m}$ 程度の高品質各種ターゲット材の製造法を確立した。

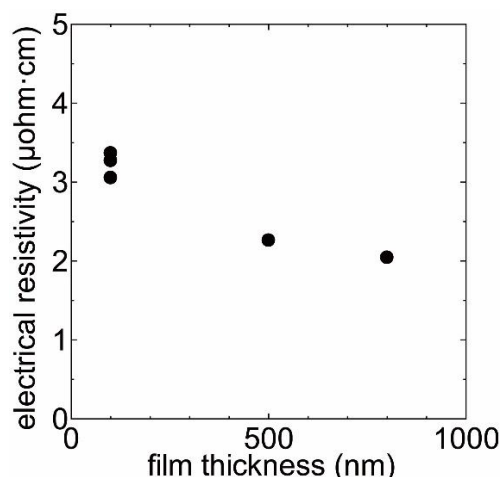


図 7: Cu 膜の比抵抗測定結果。

〈例: 純 Al(5N5)ターゲットの結晶粒微細化〉

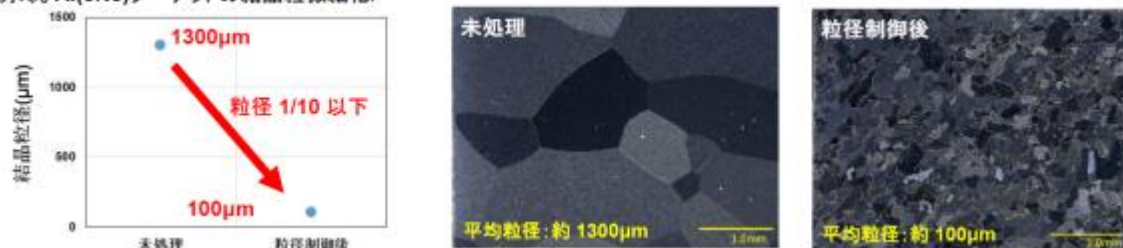
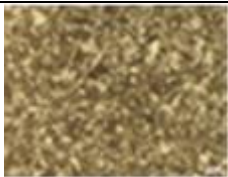
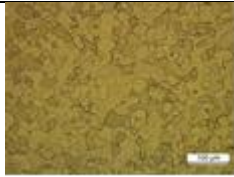
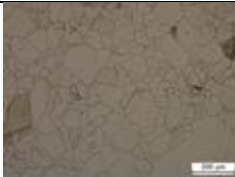
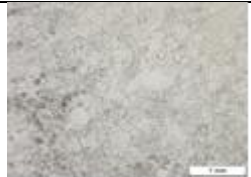


図 6: 結晶粒径制御の有無による Al ターゲット材の違い

●多品種少量用ターゲット機構及び材料の開発の成果

東北大学で設計・試作を行ったマルチターゲット機構をベースとして、ワイドテクノ・誠南工業にてミニマル装置に搭載可能なターゲット機構を完成させ、その動作チェックや再現性の確認を行い、必要に応じて微調整することで、装置の安定動作を実現するとともに、そのノウハウを確保した。また、最終目標に対し 100%達成することができた。さらに、当初計画であった 2 元ターゲットに加えて、最大 4 元化が可能なターゲット機構の開発に成功し

た。

Cu材	Ti材	Ni材	Al/Cu材
			
結晶粒径 約23μm	結晶粒径 約15μm	結晶粒径 約80μm	結晶粒径 約90μm

【3 ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル化】

上記1, 2の開発項目を踏まえたヘリコン波プラズマスパッタ装置のミニマル化を実施する。ここでは周辺機器 (ウェハ搬送ユニット PLAD, 真空排気系, ガス導入系, タッチパネル式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。

【3-1】ヘリコン波プラズマ成膜装置のレイアウト最適化 (平成28年度～平成30年度)

最終的なプラズマ源, 多元ターゲットユニット, 基板位置を確定後に, ミニマル規格に準ずる筐体 (29cm×45cm×144cm)内に全コンポーネントを収納可能であり, PLADとの接続およびウェハ搬送メカトロニクスを搭載した装置設計を実施した。

【3-2】ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル筐体への組み込み (平成29年度～平成30年度)

上記で詳細設計が進み次第, 順次部材を手配し, ミニマル筐体への各コンポーネントの組み込み作業を進め, 真空リークチェック, 各種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着実にいった。



図7:ヘリコン波プラズマ成膜装置

●ヘリコン波プラズマ成膜装置のミニマル化の成果

東北大学にてプラズマ源構成に必要な寸法を確定し, ワイドテクノ・誠南工業(株)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。ワイドテクノ・誠南工業(株)にて, 構成部品検討に基づいた試作機への組み込みを行った。上記で開発したプラズマ源およびターゲット機構を含め, ミニマル筐体への組み込みを誠南工業にて行い, その動作チェック, 調

整を行い、ワイドテクノにて最終的な装置を完成させた。また、最終目標に対し 100%達成することができた。

【4 樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発】

上記で制作したミニマルヘリコン波スパッタ装置を用いて、樹脂状での表面酸化層除去及び配線多層膜形成技術の開発を実施した。ここでは、最終的に㈱誠南工業でパッケージした装置を材料分析設備の整った㈱ワイドテクノへ設置し、プロセスを実施した。

【4-1】樹脂基板上での表面酸化層除去及び多層膜形成技術開発（平成 28 年度～平成 30 年度）

まず、表面酸化層除去機能付き基板ホルダーの開発を行いミニマルスパッタ装置で開発中である基板の酸化膜処理機能を本装置に適用させた。また、東北大学において、ヘリコンプラズマ生成と、酸化膜除去のための基板上における容量結合性プラズマ生成を、1 台の高周波アンプで実現できる高周波システムを開発し、同様のシステムをミニマル試作機に搭載した。

【4-2】プロセスレシピ開発（平成 30 年度）

次に樹脂上への多層膜配線を可能とするプロセスレシピの開発を行う。プラズマ源の高周波電力、アルゴン動作ガス圧、基板電圧等の最適化により、目標値である Ti 層 50 nm～200 nmの後に Cu 層を 100 nm～300 nmの成膜が可能な条件を、図 6 のデータをもとに決定する。また 2 で開発した各種ターゲット材に対して実験を行い、各種材料に応じたプロセスレシピを開発する。このプロセスレシピを販売装置と同時に提供することで、本プロジェクトで開発するミニマルヘリコン波スパッタ装置の付加価値を高めることが可能となり、産業化が可能となる。成膜レートの正確な測定と開発コストの抑制を目的として、まずは熱によるゆがみや表面粗さが小さいシリコンウエハを基板とした膜厚計測を実施する。平成 28～29 年度に東北大で行った実験機での結果を踏まえて、ワイドテクノにて平成 30 年度に成膜技術を用いた、プロセスレシピの開発を行った。

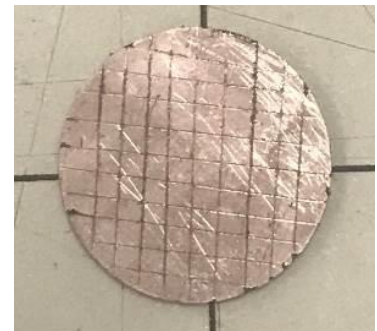
【4-3】樹脂上への成膜と熱・プラズマダメージの検証（平成 30 年度）

上記で最適化されたプロセスレシピを用いて、実際の擬似 SoC で使用するエポキシ樹脂材への成膜を実施し、その実証試験を行った。ここでは樹脂材表面の温度も合わせて計測し、

既定の温度を超えないかを検証した。また成膜後の樹脂の絶縁性や歪みを調べることで、擬似 SoC プロセスにおいてミニマルヘリコン波スパッタ装置が使用可能であることを実証した。ワイドテクノにて基板検査技術を用いた、熱・電氣的ダメージの検証を行った。

●樹脂基板上への多層膜形成技術開発の成果

ワイドテクノにてプラズマパラメータを精密にコントロールした条件下で各種条件および材料をサーベイし、材料に応じた樹脂上への成膜プロセスレシピを完成し、ミニマル装置の制御プログラムへとフィードバックをかけ、ミニマル装置販売および成膜事業展開へ向けた技術を確立した。また、最終目標に対し 100% 達成することができた。



ピーリングテスト
(樹脂基盤へ成膜 Ti+Cu)
剥離することはなかった

第三章 全体総括

1. 複数年の研究開発の成果

- ・ ヘリコン波プラズマ技術の最適化
- ・ 高周波電源システムの開発
- ・ 磁気フィルターの開発
- ・ 2元・3元・4元ターゲット機構の開発（4元はラボ機）
- ・ ミニマルファブ規格筐体へのレイアウトの最適化と配置
- ・ プラズマ生成部、ターゲット、基板の配置最適化
- ・ 表面酸化層除去機能付き基板ホルダーの開発
- ・ ワンタッチ取り付けバックングプレートの開発
- ・ ターゲット材の開発（ターゲット粒径制御（Ti Cu Ni Al/Si Al/Cu など））
- ・ 樹脂基板上への成膜

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】

産総研・ミニマルファブシステム研究会の試算によれば、ミニマルファブ装置販売の市場は 2020 年に数千億規模に達すると期待されている。また、本事業のテーマであるミニマルファブ用超高速マルチスパッタ装置を必要とする市場は、ミニマルデバイス市場のおよそ 70%を占めると想定され、大きな市場形成が期待できる。

【売上高積算根拠】

ミニマル超高速マルチスパッタ装置

販売先	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
【市場1】公的研究機関[台]*1	1	5	25	50	90
【市場2】民間研究機関[台]				10	10
【市場3】量産工程[台]					
全体市場への年間合計販売台数[台]	1	5	25	60	100
販売金額[千円]	25,000	125,000	625,000	1,500,000	2,500,000

売上想定表

（仮定）

以下の産総研調査結果から導かれたミニマルファブ導入可能性のある約 280 ラインのうち 60%程度(約 170 台)に本提案のミニマル超高速マルチスパッタ装置が導入されると仮定した。また日本全国の 20 社程度の中小企業にも約 20 台程度導入されると仮定した。よって上表の通り、事業開始から 5 年間で合計 190 台程度の販売が見込めるものと考えている。

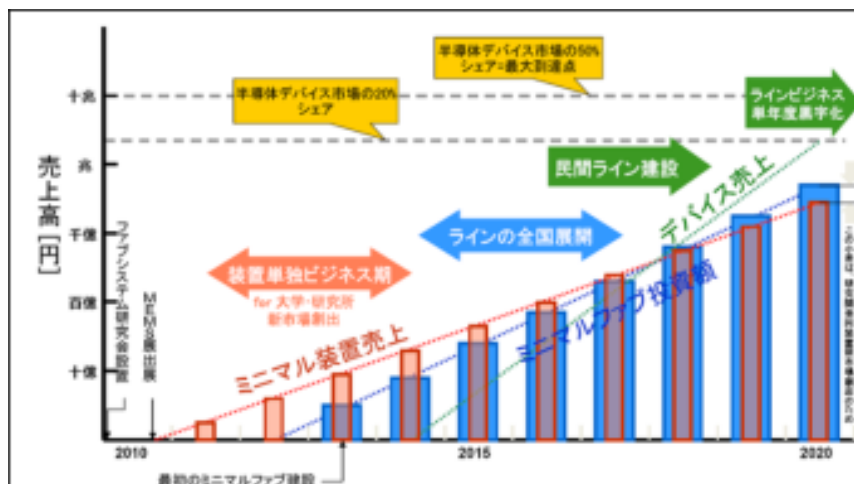
■ 大学	-----	257ライン
□ 国立大学	120ライン	
□ 私立大学	74ライン	
□ 公立大学	6ライン	
□ 高等専門学校	57ライン	
■ 都道府県の公設研	-----	15ライン
■ 産総研	-----	7ライン
■ 物材機構、理研	-----	3ライン
		合計282ライン

公的機関を対象としたミニマル市場(出所：産総研ファブシステム研究科調査データ)

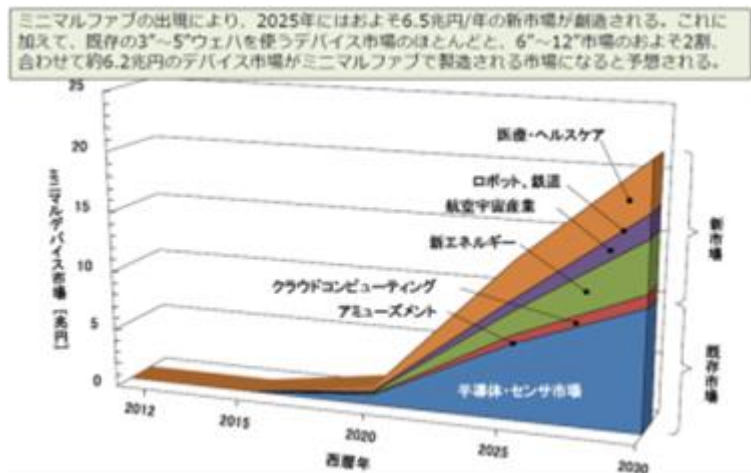
【それが達成できる理由】

現在ミニマルファブを用いたファウンドリによりプロセス技術の開発が行われており、ファウンドリによるプロセス技術開発が終わると、各企業が多品種少量生産向けにミニマルファブの導入が実施されることが見込まれる。

【想定する国内市場】



ミニマル装置、ミニマルファブ、デバイス市場予測



ミニマル新市場

【想定する海外市場】

ミニマルファブ全体で海外への展開は、全ての規格が完成してから輸出する予定となっており、世界中に広がった場合には米国、欧州、東南アジア、台湾、ロシアなど幅広い市場への展開が期待できる。

【研究開発成果に係わる製品等】

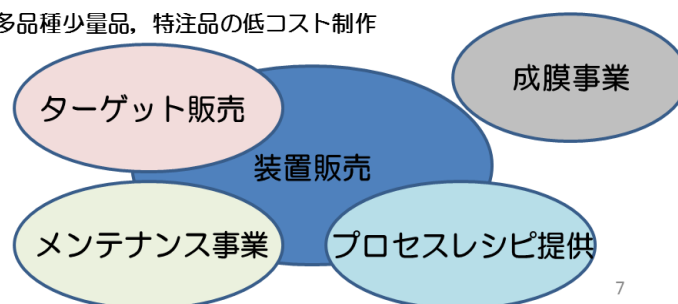
(1) ミニマル超高速マルチスパッタ装置 1 台の装置で

- ① 表面酸化膜の除去
- ② 基板への低ダメージスパッタ
- ③ 多層膜の形成が可能なミニマルマルチスパッタ装置

(2) 高品質ターゲット材

平均粒径 $100\mu\text{m}$ 程度の高品質各種ターゲット材により安定した成膜が可能となる。

多品種少量品、特注品の低コスト制作



本事業の成果による事業化想定

(3) 成膜プロセス

疑似 SoC 技術をはじめとする、表面酸化膜の除去プロセス及び多層膜形成プロセス。
上記製品により、日本再興戦略にある、「病気やけがをしても、良質な医療・介護へのアクセスにより、早く社会に復帰できる社会」に向けたロボット介護機器や生活支援ロボットなどの利用者の個々の状況に応じた多様化への対応、また第 4 次産業革命として実社会のあらゆる事業・情報が、データ化・ネットワークを通じて自由にやりとり可能になる IoT に必要不可欠な多種多様なセンサー搭載型デバイスの開発が推進される

【特許出願】

特願 2017-015548

発明の名称：プラズマ発生装置、プラズマスパッタリング装置及びプラズマスパッタリング方法

発明者：高橋和貴，安藤晃，佐々木保正

出願日：平成 29 年 1 月 31 日

PCT 出願 PCT/JP2018/2876

発明の名称：プラズマ発生装置、プラズマスパッタリング装置及びプラズマスパッタリング方法

発明者：高橋和貴，福島潤，安藤晃，佐々木保正

出願日：平成 30 年 1 月 30 日

【論文投稿】

Kazunori Takahashi, Yudai Nakano, and Akira Ando,
Frequency-tuning Inductively-coupled and helicon plasma source Journal of Physics,
D:Applied Physics,50,265201(2017).

Kazunori Takahashi, Hikaru Akahoshi, Christine Charles, Rod W. Boswell, and Akira Ando High temperature electrons exhausted from rf plasma sources along a magnetic nozzle Physics of Plasmas,24,084503(2017).

Hiraku Akaboshi, kazunori Takahashi, and Akira Ando Filtering peripheral high temperature electrons in a cylindrical rf-driven plasmas by an axisymmetric radial magnetic field AIP Advances,8,035208(2018).

Hikaru Akahoshi, Kazunori Takahashi, and Akira Ando Filtering peripheral high temperature electrons in a cylindrical rf-driven plasmas by an axisymmetric radial magnetic field AIP Advances,8,035208(2018).

Taichi Saito, Kazunori Takahashi,Akira Ando, and Shiro Hara Enhancement of downstream plasma density by a stepped-diameter radiofrequency plasma source under a static magnetic field for a compact sputtering reactor Vacuum,163,269(2019).