

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： プラズマナノ科学創成によるプロセスナビゲーション構築とソフト材料加工

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

堀 勝 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者

節原 裕一 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

白谷 正治 (九州大学大学院工学研究科 教授)

3. 研究実施概要

本研究課題は「プラズマナノ科学創成によるプロセスナビゲーション構築とソフト材料加工」を題目とし、我が国の産業全体を支える製造ツールであるプラズマプロセス技術の更なる発展と、革新的ナノ加工生産技術の創成を目指し、現在、我が国の産業全体が抱える、開発コストの増大、人的資源の減少、技術的競争力の持続などの数多くの問題をブレークスルーするものである。

これら危機的課題のブレークスルーを達成するため、本研究では、従来大型プラズマ装置を用いた研究開発からの質的革命を行う、**Labs on Desk** を実現するための、①デスクトップ型のコンビナトリアルプラズマ解析装置を創成し、開発期間と開発費用の飛躍的な削減を目指す。また、②プラズマ中のラジカル・イオンの密度およびエネルギーの時空間モニタリング技術の開発を行い、これらの粒子モニタリング情報を基にして、プロセス特性を決定しているイオン、ラジカルという粒子によってプロセス特性を表すことによって③プラズマナノ科学を創成する。そして、③のプラズマナノ科学を基盤とした、④プロセスナビゲーションという独創的なプロセス指導原理を構築し、プラズマ内部の粒子制御が極めて重要である有機ソフト材料加工における革新的極限プラズマエッチング技術を実現する。

上記各研究課題を、当該分野において日本を代表する、名古屋大学、大阪大学、九州大学の各グループが有する知見・技術に合わせ、1)名古屋大学グループでは、ラジカル・イオン粒子時空間分布計測系の確立、コンビナトリアルプラズマ解析装置を用いた、プラズマプロセスデータベースおよびプラズマ科学ネットの創成、超高選択比・超精密ナノ加工プロセス技術の構築、2)大阪大学グループでは、デスクトップ型コンビナトリアルプラズマ解析装置の開発および無機/有機ナノ界面制御に関する基礎研究、3)九州大学グループでは、自己組織化パターン形成と有機・無機ハイブリット製膜、をそれぞれ主体となって実施した。そして、それぞれにおいて得られた研究成果を集結し、有機ソフト材料の極限微細加工技術の実現と、それぞれのプラズマプロセスにおいて、プロセスナビゲーション技術を実現するため共同となって、これを実施している。

これまでに、大阪大学グループが主体となり進めたコンビナトリアルプラズマ解析装置の開発に成功しており、名古屋大学グループが実現したコンパクトラジカルモニタリング装置による空間分計測技術を組み合わせることで、内部パラメータを関数としたプロセスマップの一括取得に成功しており、これまで一条件で一結果であったプロセス開発の質的革新の実現に成功している。現在では、名古屋大学にて有機ソフト材料の微細加工プロセスのプラズマナノ科学創成のためのデータ取得を実施し、プロセスナビゲーションの実現に近づきつつある。また、有機ソフト材料の極限微細加工技術を実現するうえで、極めて重要である自己組織化マスクを実現するため、九州大学で進めている自己組織化パターン形成では、九州大学グループが独自に開発した異方性プラズマ CVD 技術を更に深化させ、基板温度 100°C でのトレンチ上面のみのカーボン薄膜の異方性製膜に成功し、名古屋大学グループと共同で有機膜プラズマエッチング装置を用いた有機膜 Low-k 膜とのエッチング選択比の調査実験を通じて、その有用性を確認している。さらには、大阪大学グループが進めている無機/有機ナノ界面制御で得られた成果は、プラズマプロセスにより有機ソフト材料へ誘起されるダメージに関する詳細を示すものであり、九州大学グループの有機・無機ハイブリット製膜、名古屋大学グループでの有機膜極限エッチングの実現のための大きな知見となっている。上記のように、各々のグループが主体となって各研究開発項目を実

施しているが、それぞれに得られた成果を各グループの研究推進にフィードバックすることで、共同で進めると共に、実現されるプロセス技術・装置は、コンビナトリアルプラズマ解析装置により得られるプラズマナノ科学データ(プロセスマップ)を基盤としたプロセスナビゲーションシステムを備えた革新的装置として深化させることを最終目的としている。そして、創製した革新的プロセス装置により有機膜極限ナノ加工を実現する。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

プラズマプロセス特性を装置に依存しない内部パラメータで表現できることを提案し、実際に測定した内部パラメータから個々のプロセスに対して最適条件を提案するナビゲーションシステムを構築したことは高く評価したい。本プロジェクトにより、これまで試行錯誤で行ってきたプラズマ制御が、代表者が提案するプラズマナノ科学により理論的に制御することが可能となった。また開発したプラズマ解析装置は小型で実用化に適している。本研究チームは、これらの成果を基に世界におけるプラズマ科学研究のネットワークを構築し先導的役割を果たそうとしている。今後は世界のこの分野の研究者達が賛同して連携を成長させて行くことが重要な課題である。先行するネットワークとの調整などこれまでの研究とは異なる努力も必要となるであろう。また、実際に製造している企業がこのシステムを採用するための工夫も必要である。

本チームは多くの論文発表、国際会議での招待講演を行っており、すぐれた研究発信力で国際的な研究コミュニティのリーダーシップをとっている。

- ① 原著論文(国内4件、海外55件)、その他の著作物・総説、書籍16件
- ② 学会招待講演(国内会議45件、国際会議61件)
- ③ 学会口頭発表(国内会議182件、国際会議92件)、ポスター発表(国内会議43件、国際会議163件)
- ④ 国内特許出願(5件)、海外特許出願(1件)
- ⑤ 受賞9件、新聞報道等1件

##### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

実用レベルでのプラズマプロセスを内部パラメータで統一的に表現するプラズマナノ科学を提案し、実測する装置を開発した。従来、試行錯誤で行われてきたプラズマプロセスの条件設定を統一的、理論的に行うことが出来るようになったことは高く評価したい。

この研究により得られた成果はプラズマ科学の理解を大いに進め、半導体産業の高精度化、高効率化に貢献する。実際、すでにラジカルモニターは多くの企業に導入されている。また、プラズマナノ科学ネットも構築準備がされ、世界のこの分野におけるリーダーシップを発揮している。

この研究成果は、より高精度な加工には普遍的に必要になり、世界的にもデータが蓄積されるので、半導体加工技術の高精度化の流れにつながる。実際、量産現場での装置の開発及びプロセス開発を進めており、その成果の一部は実用化されている。また、研究成果を基礎に国際的なプラズマ科学ネットワークの構築を進めており、大きな社会的なインパクトのある研究となっている。プラズマプロセスは半導体産業の基幹技術である。プラズマナノ科学によりプラズマプロセスを理論的に制御することが可能となれば、その効果は大きいものになると予測される。

なお、それぞれの研究成果について、重要な将来的課題が残されており、研究の一層の深化が期待される。

##### 4-3. 総合的評価

当初の基本的な目標は十分に達成しており、それぞれの課題について重要な成果が得られている。また、装置開発も応用、実用の方向で重要な貢献をしている。

研究コンセプト、研究戦略により、全体の大きな流れを作っており、研究期間を通して、研究代表者のリーダーシップが有効に働いており重要でユニークな研究成果を国際的に発信している。研究グループ内の研究分担は合理的であり、運営方針も優れている。

本研究はプラズマ装置内の化学種を計測するモニターの開発、解析ソフトの開発、傾斜プラズマ測定システム

の開発からなり、いずれも満足できる高いレベルで達成された。これらの成果を基にプラズマナビゲーションシステムの基盤や世界におけるプラズマ科学研究のネットワークを構築し先導的役割を果たそうとしている。これらについては、今後の展開次第であるが、これまでにない壮大規模の構想であり、その実現を期待している。

プラズマプロセスは半導体産業の基幹技術である。プラズマナノ科学によりプラズマプロセスを理論的に制御することが可能となれば、その効果は大きいものになると予測できる。また開発したプラズマ解析装置は小型で実用化に適している。ただし、プラズマの条件は多様であり、プラズマ科学を一般化するためには、多くのデータを取得する必要がある。その観点から、データベース化は重要であるが、統一した形式でデータを取得する方法論が確立しているとは言えない。国際的に組織された研究機関の連携を進め、統一したデータ収集システムを確立する必要がある。