

S1-6

ヘリコン波プラズマを用いた宇宙工学と地上産業応用 Space and industrial applications of a helicon plasma source

高橋和貴

Kazunori TAKAHASHI

東北大院工

Dept. Electrical Eng., Tohoku Univ.

ホイッスラー波の一種であるヘリコン波は、低気圧・高密度プラズマ生成に有用であることから古くから研究されてきた。一方で、低気圧プラズマの応用であるプラズマプロセスにおいては、シリコンウェハの大面积化に伴い、有磁場型のヘリコン波プラズマ源では均一性を担保するのが困難であり、デバイスプロセスにおいては誘導結合性プラズマまたは容量結合性プラズマが一般的に用いられており、ヘリコン波プラズマ源の応用例が確立されていない状況にある。

筆者らは、長寿命・大電力の宇宙推進機の開発を目的として、ヘリコン波による高密度プラズマ生成法と磁気ノズルを組み合わせた無電極プラズマ推進機に関する研究を行っており、これらの研究開発状況に関して報告する。推進機の高性能化を実現するためにはプラズマ流のダイナミクスの理解が重要であり、推力発生機構に関して報告する【図1】[1-8]。この無電極プラズマスラストの新たな応用例として、単一

プラズマ源より双方向へ噴射するプラズマ流を制御可能なスラストを開発し、スペースデブリの除去に適用可能であることを室内実験でも実証することに成功している[9]。宇宙推進機においては、打ち上げ重量の削減や使用電力の高効率化が求められる。したがって、高周波電力を用いたプラズマ推進機を開発するにあたり、高周波システムの小型化や高効率化に代表される周辺機器の開発も求められる。

一方で、これらの電力高効率化、小型化に関する技術は、地上産業においても重要なテクノロジーの一つである。メガファブによる大量生産によって低コスト化が進められてきた半導体産業においては多品種少量製品を製造することが困難であり、デバイスの多様化が進む中で多品種少量製品に対応した生産システムが求められている。近年、小型の半導体製造プロセス装置群で構成されるミニマルファブの装置開発が進展しており[10]、プラズマスパッタリングやドライエッチング装置の開発も進め

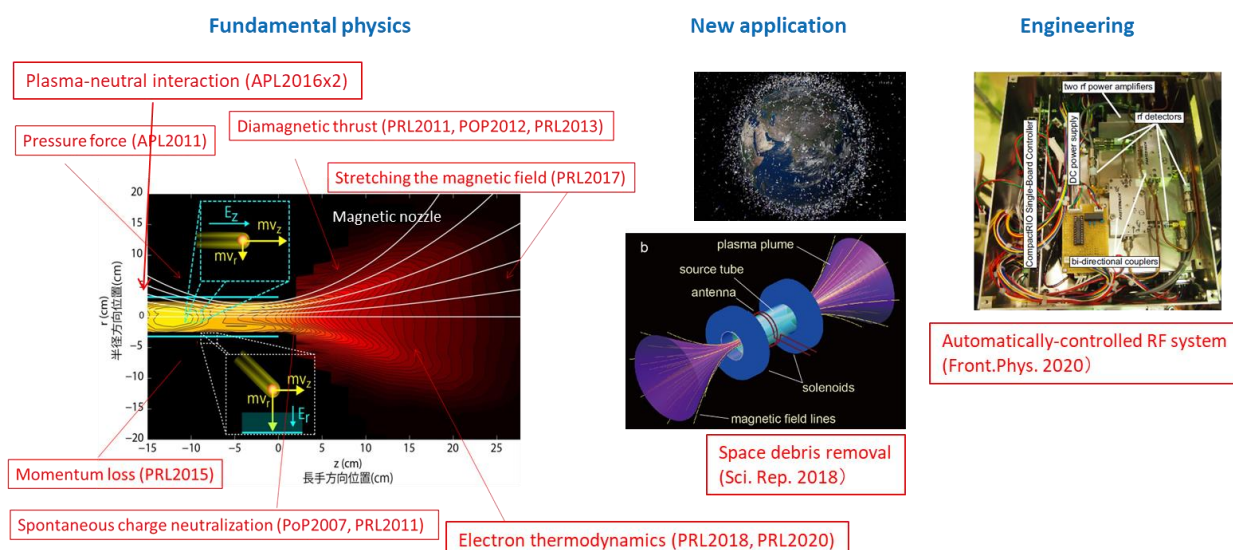


図 1: ヘリコンプラズマを用いた無電極電気推進機に関する物理課題, 工学課題, 応用例.

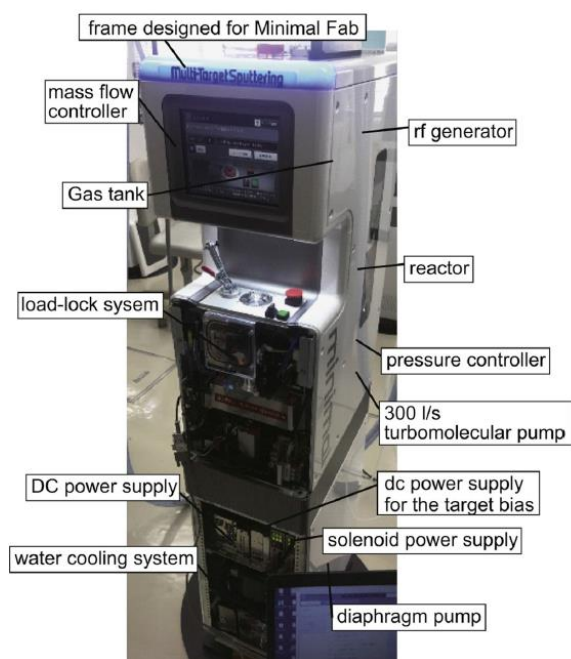


図 2: ミニマルマルチターゲットスパッタリング装置の外観。

られている。クリーンルームに起因する設備コストの削減を実現するために、局所クリーン化技術を導入したウェハ搬送ラインへ製造装置群を接続するために、プロセス装置群の規格が厳格に定められている。従って限られたスペースや消費電力の中でプロセス装置を開発する必要があり、電気推進技術との共通課題が多い。小型の高周波システムを実現するために、周波数制御によりインピーダンス整合を実現する手法を適用し、電源内部に制御コントローラも内蔵した電源の開発を行った【図2】。その結果ミニマルファブで定められた筐体に収納可能なヘリコンプラズマ源の開発に成功し、この技術を適用したプラズマスパッタリング装置およびドライエッチング装置の開発を進めている[11-16]。

本シンポジウムでは、上述のヘリコンプラズマを用いた宇宙工学である無電極プラズマ推進機および、地上産業への応用としてミニマルファブにおけるヘリコン波プラズマを使用したプロセス装置の開発に関して報告する。

これらの研究を推進するにあたり、オーストラリア国立大学 Christine Charles 教授，Rod Boswell 教授，ホロン工科大 Amnon Fruchtmann 教授，プリンストンプラズマ研究所 Igor Kaganovich 教授，横浜国立大学 鷹尾祥典准教授，産総研 原史朗氏，および本学大学院生（千葉愛貴氏，仲野雄大氏，赤星晃氏，橋詰太一郎氏，

菅原丈晴氏，斎藤太地氏，花岡健吾氏），誠南工業株式会社，ワイドテクノ株式会社をはじめとする多くの方々にご協力を頂いたことに謝辞を申し上げます。

- [1] K. Takahashi, Rev. Mod. Plasma Phys., **3**, 3 (2019).
- [2] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, 235001 (2011).
- [3] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, 035002 (2011).
- [4] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **110**, 195003 (2013).
- [5] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **114**, 195001 (2015).
- [6] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **118**, 225002 (2017).
- [7] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **120**, 045001 (2018).
- [8] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **125**, 165001 (2020).
- [9] K. Takahashi *et al.*, Sci. Rep., **8**, 14417 (2018).
- [10] 原史朗, 他, プラズマ核融合学会誌 小特集記事, “革新的半導体産業システムミニマルファブにおけるプラズマテクノロジー”, J. Plasma Fusion Res., **96**, 531 (2020).
- [11] K. Takahashi *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys., **47**, 425201 (2014).
- [12] K. Takahashi *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys., **50**, 265201 (2017).
- [13] T. Saito *et al.*, Vacuum, **163**, 269 (2019).
- [14] K. Takahashi *et al.*, Vacuum, **171**, 109000 (2020).
- [15] K. Takahashi *et al.*, Front. Phys., **7**, 227 (2020).
- [16] K. Hanaoka *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci., **48**, 2138 (2020).