

氏名	KARADAG Burak
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	総研大甲第 1988 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 23 日
学位授与の要件	物理科学研究科 宇宙科学専攻 学位規則第6条第1項該当
学位論文題目	External Discharge Plasma Thruster
論文審査委員	主査 教授 小紫 公也 東京大学 大学院 工学系研究科 准教授 船木 一幸 准教授 篠原 育 准教授 西山 和孝 教授 宮坂 武志 岐阜大学 工学部

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

An external discharge plasma thruster (XPT), a prototype of alternative low power Hall thruster, which produces and sustains plasma discharge completely outside a non-anodic cavity, was proposed in order to address efficient scaling down and lifetime problems of low power Hall thrusters. XPT is the first Hall thruster that operates without any annular or cylindrical discharge channel walls. In particular, it is expected to operate in very low power regime where conventional Hall thrusters cannot prevent high ion/electron losses to the channel walls. Design details and key physics of this novel Hall thruster were described, and action items for improving thrust performance are presented.

To validate a fully kinetic particle code, and to investigate the importance of uncertainties associated to physical parameters a sensitivity analysis was conducted. A 500W-class laboratory model magnetic-layer Hall thruster was used as the testbed. The sensitivities of the physical parameters, including thermal accommodation coefficient, anode/wall temperature, Bohm diffusion coefficient, electron injection current, cathode coupling voltage, and background pressure, were quantified one-by-one on a conservative possible range. The results suggest the wall erosion prediction is more sensitive to the physical parameters than the thrust or the discharge current. Among the physical parameters, sensitivity to the Bohm diffusion coefficient and parameters related to the neutral flow (i.e., thermal accommodation coefficient and anode/wall temperatures) were dominant. It was hence found that uncertainties in the physical parameters related to the neutral flow had comparable influence on the Bohm diffusion coefficient despite the low attention they attracted.

XPT was simulated by the fully kinetic particle code, and the sensitivity analysis methodology was applied to determine upper and lower bounds for estimated thrust performance. Numerical results suggested that XPT can be as much efficient as conventional Hall thrusters of the same power range, which prompted us to manufacture the thruster and perform experimental investigation to verify numerical simulations.

Experiment results showed that XPT has similar discharge characteristics with SPT. The thrust and the anode specific impulse ranged from 1.6 to 17.9 mN, and from 352 to 1276 sec respectively at anode potentials of 150-200-250 V with anode mass flow rates of 0.48-0.95-1.43 mg/s. The anode efficiency ranged from 6.7 to 26.8 % at discharge powers from 43 to 418 W. Performance of XPT is comparable to SPT at the same power level. Significantly, stable operation ( $\Delta < 0.2$ ) was possible over wide range of operational conditions. These results supported the conclusion made from the numerical study.

XPT does not possess an annular discharge channel or a cylindrical one and working

(別紙様式 2)

(Separate Form 2)

gas is allowed to expand into vacuum right after leaving anode. It might be considered that such a “cavity-less plasma thruster” would have very low plume divergence efficiency and mass utilization efficiency since neutral particles migrate away from the anode surface in all directions when sidewalls are absent. Therefore, farfield ion current density measurements were taken to find out plume divergence through sweeping a nude Faraday probe in the radial direction at fixed axial distances. Ion current density profiles revealed that ion beams are collimated and plumes have Gaussian distributions. The charged-weighted divergence angles were essentially similar to those of typical Hall thrusters and varied from 34 to 51 degrees. Mass utilization efficiencies ranged from 28 to 62%.

XPT has four slots on the anode to inject neutrals and this non-uniform injection scheme leads to bright and dark regions in the plume. The bright regions are formed along the anode slots and the light intensity is stronger at the slot center. Thus, one can expect that plasma density in the dark regions where there are flat head screws will be significantly lower than of the bright regions due to higher neutral density. To examine this phenomenon, the near field plume of XPT was mapped using double Langmuir probe method. Plasma density and electron temperature were measured in the radial, axial and azimuthal directions at anode potentials of 150, 200, and 250 V and mass flow rates of 0.95 and 1.43 mg/s. Plasma densities and electron temperatures were found to reach  $6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  and 15 eV respectively. These values are substantially higher than conventional Hall thrusters, which explain why our thruster is as efficient as conventional ones even without a physical ionization chamber. The 2D maps of ion number density revealed an interesting result that the darks regions can have as much plasma density as the bright regions. The effect of the cathode position was also examined, and it was understood that plasma density, and Br profile are correlated, and that even very small non-uniformity of the radial magnetic field strength in the azimuthal direction has significant influence on plasma density distribution.

Overall results question the necessity of discharge channel walls or guard rings, and provide a successful proof of concept experiment of XPT. Proof-of-concept study was completed, but further study is required to enhance thrust performance of XPT.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

ホールスラスタは、高い効率と推力密度とから人工衛星推進用電気推進の主力として活発な研究開発がなされており、国内においても宇宙航空研究開発機構が開発中の技術試験衛星 9 号機にて、国産ホールスラスタの初の宇宙実証が計画されている。これまでに国内外で研究開発された既存のホールスラスタは、プラズマの生成と加速をセラミック製または金属製のチャンネル内部で行うことから、このチャンネルへの高エネルギーイオンの流入とこれに基づく損耗が避けられず、推進機寿命が制約されることが知られている。大型衛星の軌道遷移用途としての大型スラスタから、小型衛星の姿勢制御のための小型スラスタまで、大小様々なホールスラスタが求められているが、小型ホールスラスタではプラズマ体積に対する壁面面積が相対的に大きくなり、イオンのチャンネル壁面への流束が大きくなることから、高性能と長寿命のいずれも、達成することが非常に難しい。そこで本博士論文では、チャンネルによらずにプラズマの生成と加速を行う、新しい低電力ホールスラスタコンセプトを提案し、そのコンセプト検証を数値シミュレーションならびに真空チャンバー実験にて実施した。

出願者が「外部放電型プラズマスラスタ (XPT)」と呼ぶ新しいホールスラスタは、平板状のセラミックプレートに永久磁石からなる磁気回路と陽極を装着して、陽極と陰極(ホロカソード)との間で放電を行う構成である。XPT スラスタでは、既存のホールスラスタでは必須であったプラズマ生成と加速のためのチャンネルを完全に排除したことから、陽極とその周囲の磁場は開いた空間(真空中)に露出し、陽極から離れるに従って急激に減衰する磁束密度強度分布を特徴としている。このため、プラズマ生成は、磁気ミラーに閉じ込められた電子と、開いた空間(真空中)に放出されるキセノンガスとの電離衝突によって、アノードから下流 2-3mm といった非常に狭い電離領域にて実現し、引き続き陽極と陰極間の電位勾配にてイオンが加速されるといった、プラズマ生成加速コンセプトとなっている。以上のコンセプトを数値シミュレーションにて確認後、50W から最大で 500W までの投入電力領域にて、XPT スラスタを試作して試験したところ、典型的な 250W 動作では、推力 11mN、アノード効率 25%、放電安定性を示す放電電流振幅は放電電流の 20%以下を達成しており、初の設計試作ならびに性能評価実験であったにもかかわらず、この電力域における既存ホールスラスタと同レベルの性能ならびに放電安定性が得られた。また、ファラデープローブおよびラングミュアプローブによるプラズマ診断により、推進剤利用効率が最大で 62%、イオンビームの発散角に関する効率が最大 48%で、典型的な陽極から 10mm 下流位置でのプラズマ密度が  $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度が 15 eV であることが明らかとなった。実用に向けては、推進剤利用効率ならびにイオンビーム発散性のさらなる改善が必要であることが明らかとなったが、プラズマ着火特性やプラズマ分布の周方向一様性も良く、小型スラスタとして非常に優れた試験結果が得られた。

出願者は、XPT スラスタについて、コンセプトの提案から数値解析を利用したスラスタ形状の決定と、0.5kW 級の小型 XPT スラスタの製作・試験評価までを実施し、コンセプトレベルではあるが、実験室検証することに成功しており、新しいスラスタの研究開発を切り拓くことに成功した。以上の成果は、チャンネルに寄らずにプラズマの生成と加速を行

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

う、新しい低電力ホールスラストコンセプトであることから、極めて独創性が高く、かつ、将来の同スラスト実現に向けて有益な結論が得られている。更に、本論文の主な部分は、査読付き学術雑誌 1 篇として掲載済みであり、また、2 篇についても投稿・審査中である。以上の結果を踏まえ、本論文は、博士論文として十分な学術水準に達していると判定した。

申請者の学力に関しては、予備審査および本審査において口述試験を実施した。その結果、博士論文に関連した宇宙推進工学・プラズマ工学等の専門分野、および、関連する基礎分野について、申請者が十分な学識を持っていることを確認した。また、英語の能力については、申請者が既に国際誌に投稿して掲載済み論文があることに加え、複数の国際学会発表を経験していること、博士論文本文も明快な英語で記載されていることから、十分な英語力があると判断された。

更には、出願者の在学期間、単位取得状況等についても、疑義は無く、博士論文審査の出願資格を満たしていることから、審査委員全員一致で合格と判断した。