

ホールスラスタプルームシールドのイオン拡散低減効果と推進効率への影響

○藤田大樹, 赤木将平, 小紫公也, 小泉宏之, Tony Shönherr, 荒川義博 (東京大学)

The effect of decreasing ion diffusion and thrust efficiency of Hall thruster by plume shield
Daiki Fujita, Shohei Akagi, Kimiya Komurasaki, Hiroyuki Koizumi, Tony Shönherr, and Yoshihiro Arakawa (The University of Tokyo)

Key Words : Electric propulsion, Hall thruster, Plume shield, Ion diffusion, thrust efficiency

Abstract

Hall thrusters have advantages that it have high thrust density, and high thrust efficiency in the range of Isp 1000-3000 second, but have disadvantage that it is difficult to fix it on space craft because it has large diffusion angle of plume. Ions have adverse influence by diffusing behind thrusters and evoke abnormal discharge on photovoltaic cells. In this research, we deliberated the effect of decreasing ion diffusion and thrust efficiency by plume shield which is different in size and material.

1. はじめに

宇宙太陽光発電(SPS)建設計画など[1], 近年宇宙開発ミッションは多岐にわたっており, 低コストで物資を大量に輸送できる手段が求められている. そこで脚光を浴びているのが電気推進機のホールスラスタである.

ホールスラスタはイオンエンジンに比べ推力密度が高く, 軽量かつコンパクトであり, 比推力が1000-3000秒の範囲で高い推進効率を実現する一方, ビーム発散角が大きく, 宇宙機への設置が難しいという欠点がある. イオンが宇宙機本体へ拡散すると, 宇宙機から突き出た部分, 主に太陽電池上で異常放電を起こすといった悪影響を及ぼす. 図2に本研究で用いたホールスラスタにおけるスラスタ下流25 cmでの, スラスタ中心軸からの角度に対するイオン電流密度分布を示す. スラスタの真横90°においても0.01-0.07 mA/cm²測定されており, 排出されたイオンがスラスタ背後へ回り込んでいることが分かる.

この原因として考えられるのが, 電荷交換衝突 (Charge exchange collision, CEX)である. 推進剤として供給されるキセノンのうちイオン化されていない低速な中性粒子と静電加速を受けた高速なイオンとの間で次式に示すような電荷の交換が行われる.



熱速度で排出されたキセノンの中性粒子は静電加速を受けたビームに対して非常に低速である. 上記の

電荷交換衝突によって生まれた低速なキセノンイオンは, 推進機背後の電位勾配にしたがって半径方向や上流方向にも拡散し, 宇宙機本体に悪影響を及ぼす大きな原因となっている.

図3にキセノン中性粒子の分布を示す[2]. これより, スラスタ出口から軸方向10 cmの位置まで高い密度でキセノン中性粒子が存在することがわかり, これが電荷交換衝突の大きな原因になっていると考えられる.

本研究では, イオンの拡散を防ぐ手段としてスラスタに幾何形状, 材質の異なるプルームシールドを取り付け, プラズマの拡散低減効果, 推力や推進効率に与える影響をそれぞれ検証し, その結果からプルームシールド最適化の指針を得ることが目的である.

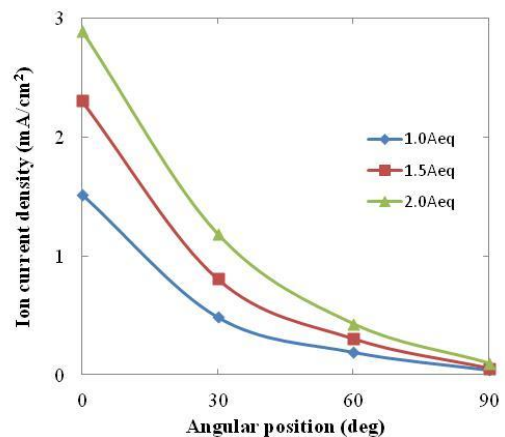


図1. イオン電流密度分布

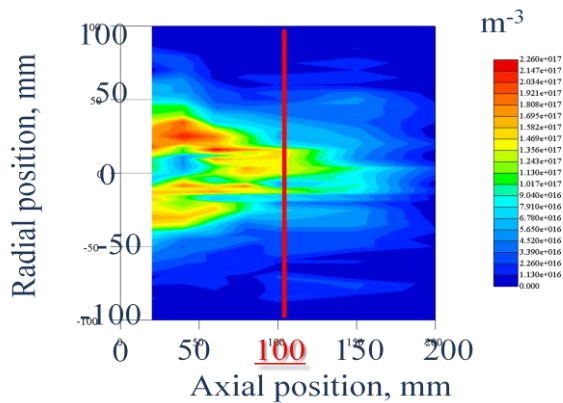


図2. キセノン中性粒子の分布

2. 実験装置

2.1 マグネティックレイヤ型ホールスラスタ

本研究では東京大学のマグネティックレイヤ型ホールスラスタを用いた。断面図を図3に、詳細を表1に示す。最大供給電力は600 Wである。チャンネルにはソレノイドコイルを用いて半径方向に磁場が印加されており、チャンネル壁面の材質、アノードとスラスタの絶縁体は共にBNである。

また、カソードにはイオンテック社製のホローカソードを用い、スラスタ作動中には常にキセノンを0.27 mg/s流した。

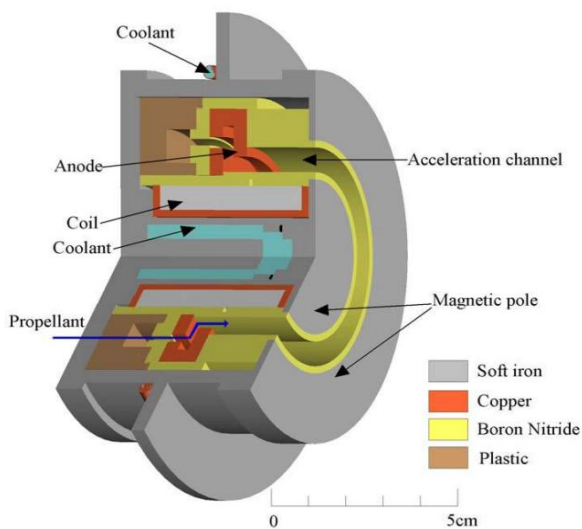


図4. マグネティックレイヤ型ホールスラスタ

表1. ホールスラスタの作動条件と詳細

最大出力	600 W
放電電圧	200-300 V
推進剤	キセノン
推進剤質量流量	1.36-3.4 mg/s
チャンネル外径	62 mm
加速チャンネル長	21 mm

2.2 プルームシールド

本研究では、スラスタのイオン拡散を低減するため、大きく幾何形状、材質の違うシールドを計11用意し、イオン拡散低減効果と推力や推進効率に与える影響をそれぞれ検証した。シールドを取り付けたスラスタの様子を図5に示す。

幾何形状を変化させたシールドの諸元を表2, 3にそれぞれ示す。シールド大とシールド小の2種類のシールドを取り付けた際の概念図を図6に示す。スラスタから70°以上の角度を持って排出されたイオンがシールドに衝突するとしたときのビーム遮り角を20°と定義する。今回は遮り角が20°の2種類のシールドを用意し、ビーム発散角の観点から電荷交換衝突が起こらない理想的な場合にスラスタに与える影響が等しくなるように設計し、それぞれ効果を検証した。また、シールドの軸方向長さを100 mmに揃え、シールド径をそれぞれ200, 250, 300 mmのシールドを取り付け、効果を検証した。ここでシールドの材質はいずれも銅である。

次に、材質の違うシールドを製作し、それぞれ効果を検証した。諸元を表4に示す。シールドの材質を銅からステンレスのメッシュにし、効果を検証した。メッシュの粗さは80 mesh/inch, 200 mesh/inchの2種類用意した。直径200 mmのシールドが存在する点のおおそのデバイ長を以下の式を使って見積もり、メッシュの粗さを選択した[3]。

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

電子温度を1 eV、電子密度を $1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ とすると

$\lambda_D = 0.0743 \text{ mm}$ となる。200 mesh/inchのシールドは見開きが0.077 mmとなり、デバイ長とおおよそ一致する。また、80 mesh/inchのシールドは見開きが0.198 mmで、デバイ長のおよそ2.5倍となっている。シールドを網状にすることで中性粒子の密度分布集中が改善され、中性粒子や高速なイオンは拡散させつつ低速なイオンのみをシースで吸収するという効果が期待される。

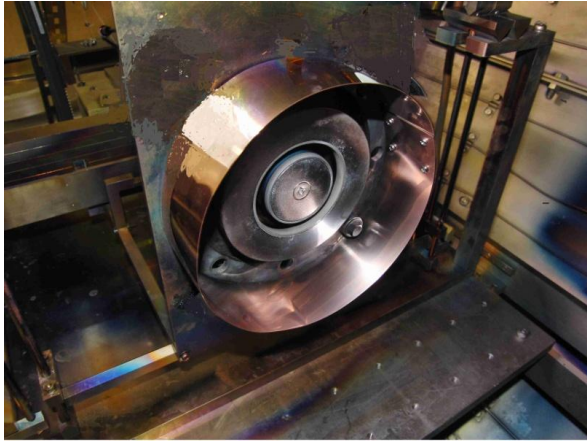


図5. プルームシールドを取り付けたスラスタ

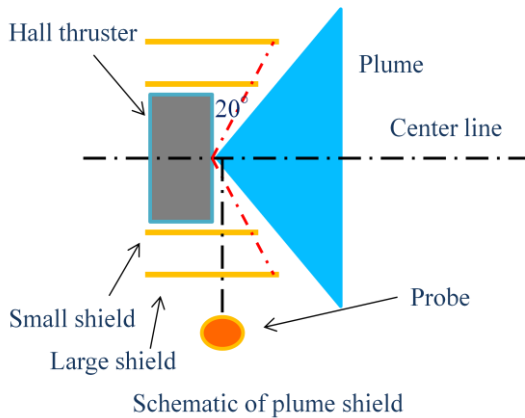


図6. プルームシールドを取り付けたスラスタ



図7. ステンレスメッシュシールド

表2. 幾何形状の違うシールドの諸元1

	シールド大	シールド小
軸方向長さ	30 mm	20 mm
シールド径	163 mm	120 mm
ビーム遮り角	20°	20°

表3. 幾何形状の違うシールドの諸元2

軸方向長さ	100 mm	100 mm	100 mm
シールド径	200 mm	250 mm	300 mm

表4. 形質の違うシールドの諸元

軸方向長さ	100 mm	
シールド径	200, 250, 300 mm	
形質	80 mesh/inch	200 mesh/inch
デバイ長との比	2.66	1.04

2.3 イオン捕集プローブ

本研究ではイオン電流密度を測定するため、2種類のイオンコレクタを用いた。スラスタ下流25 cmの位置での測定にはファラデープローブを用い、スラスタ下流75 cmの位置での測定にはイオンコレクタを用いた。測定方法の模式図を図8に示す。今回は図の位置でのイオン電流密度がシールドをつけていない時に比べてシールドをつけた際にどれだけ減少したかを測定し、イオン拡散低減効果を計る。

図9にファラデープローブ、図10にイオンコレクタの外観をそれぞれ示す。コレクタ表面の直径はそれぞれ30 mm, 120 mmである。ホールスラスタにおけるプラズマ計測が行われた過去の研究[4][5][6][7][8][9]を参考にし、コレクタ表面の大きさを決定した。

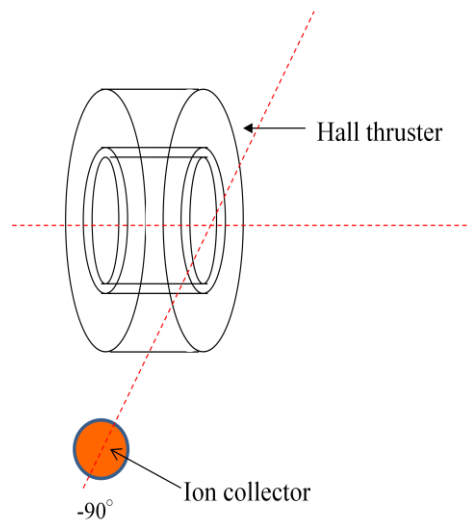


図8. 測定方法模式図

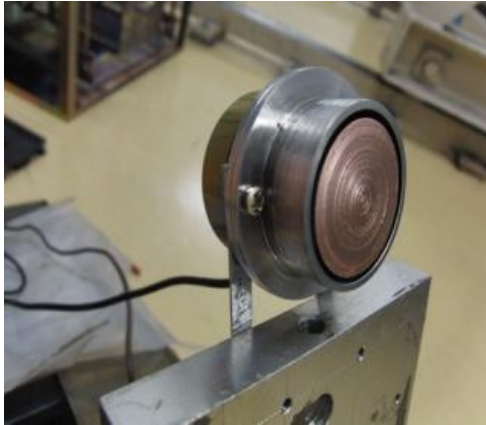


図3. ファラデープローブ外観

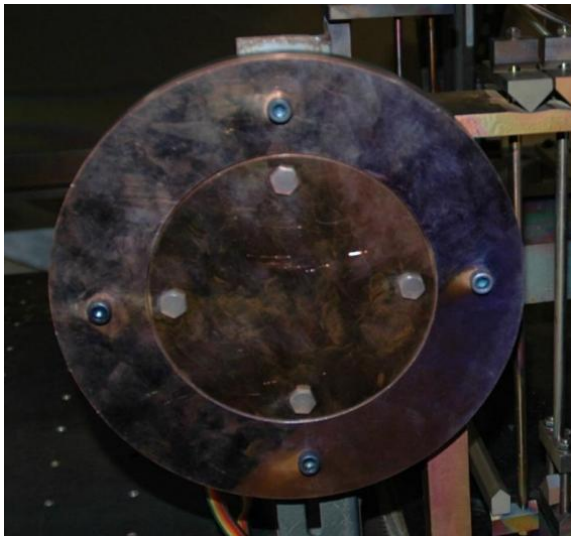


図8. イオンコレクタ外観

2.4 実験設備

今回の実験は、図5に示す直径 2.0m、長さ 3.0m のステンレス製円筒形真空チャンバで行った。真空排気には、油拡散ポンプ (ULVAC 社製 SPD-36、排気速度 37000L/s) 1 台を使用した。この油拡散ポンプには、補助ポンプとしてメカニカルブースターポンプ (ULVAC 社製 MB-10000、排気速度10000m³/h)



図5. 円筒形大型真空チャンバ

表2. スラスタ作動中における背圧

推進剤流量	Xe (2.0 Aeq)
相対感度	2.5
チャンバ内圧力	1.76×10^{-5} Torr

1 台が取り付けられており、さらにこの補助ポンプとしてロータリーポンプ (ULVAC 社製 KS-150、排気速度 15000L/min) 2台が取り付けられている。チャンバ内圧力は電離真空計を用いて計測している。到達圧力は 1.9×10^{-6} Torrであった。表2にそれぞれの推進剤の電離真空計の相対感度と、作動中の較正後の圧力を表2に示す。また、推力の測定には振り子式スラストスタンドを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 シールド長さによる変化

まずビーム遮り角を20°で揃え、シールドの大きさを変えて効果を検証した。スラスタの真横25 cmの位置においてファラデープローブを用いて測定した。図11にシールド大、シールド小それぞれを取り付けた際のイオン電流密度低減率を示す。シールド大を取り付けた際に最大37%低減することに成功した。しかし、依然0.04 mA/cm²測定されており、宇宙機へ与える悪影響が十分小さくなるとはいえない。そこで測定したデータを元に、スラスタを軸方向に延長させることによるイオン電流密度の減衰を予測した。(図.12) どの推進剤流量においても10 cmほどの軸方向長さを持つシールドを取り付ければイオン電流密度はほぼ0になり、宇宙機への悪影響を最大限少なくすることができると思われ。これは前述した先行研究結果とよく一致している。

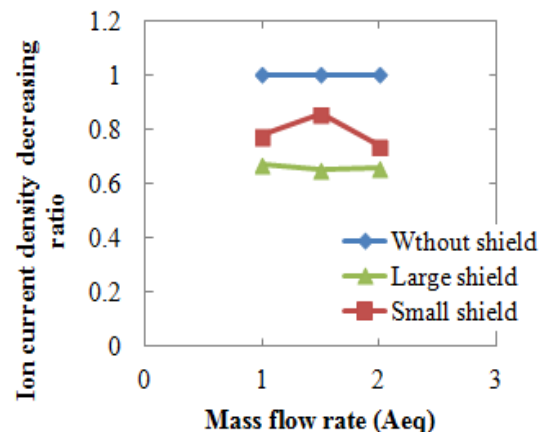


図11. シールド大、小のイオン電流密度低減率

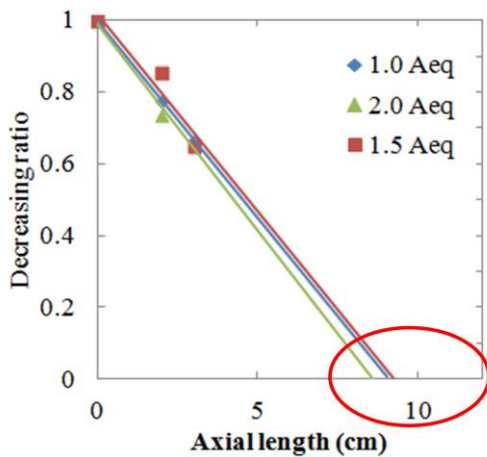


図12. イオン電流密度低減予測

図13にシールドを取り付けた際の推力の変化を示す。多くの作動点において推力が減少しているのが分かる。2種類のシールドはビーム遮り角が同じであるが、大きいシールドの方が推力に与える影響は少ない。この原因として、小さいシールドの方が推力源である加速されたイオンを遮っていると考えられる。中性粒子の半径方向の拡散が小さいシールドの方が抑えられ、軸方向に中性粒子の密度分布が伸び電荷交換衝突が起こってイオンの拡散が起こっていると考えられる。

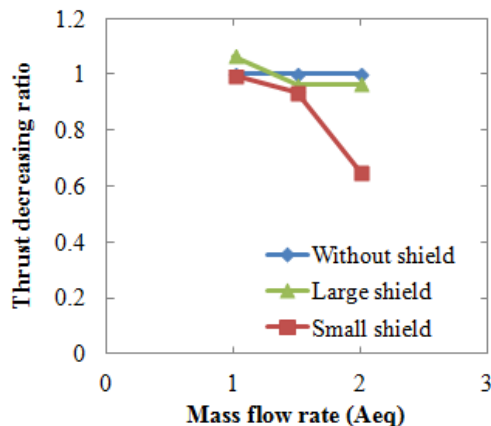


図13. シールド大, 小による推力変化率

3.2 シールドの径による変化

3.1の結果から、次にシールドの軸方向長さを10 cmに固定し、シールドの径を200 mm, 250 mm, 300 mmと変化させ、効果をそれぞれ検証した。

図14にそれぞれのシールドについてのイオン電流密度低減率を示す。放電電圧は300 Vである。平均して、直径200 mmで19.5%, 250 mmで34.4%, 300 mmで20.3%減少した。特に推進剤流量が2.0Aeqの作動点で直径200 mmのシールドでの電流密度低減率が低くなっている。これはシールドによりプルームが半径方

向に広がらず、軸方向に伸びた結果シールドされないプルーム領域が増えたためだと考えられる。

図15にそれぞれのシールドについての推力変化を示す。直径200 mmで15.4%, 直径250 mmで6.9%, 300 mmで4.9%減少した。直径200 mmのシールドで推力の低下が大きいのは、推力源である加速されたイオンを大きく遮っているためだと考えられる。

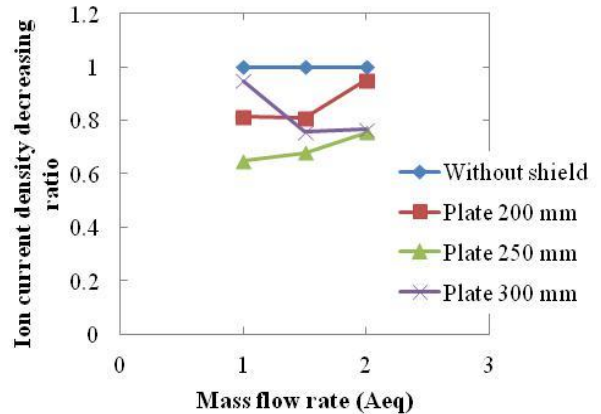


図14. イオン電流密度低減率

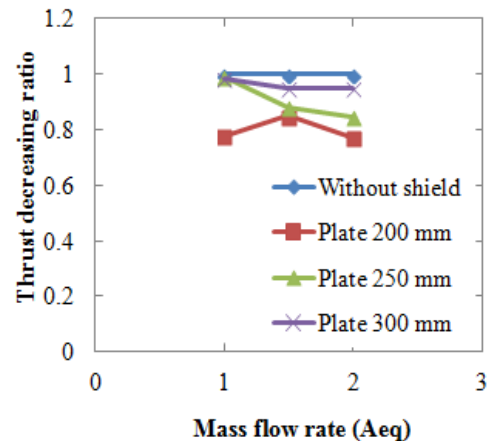


図15. 推力変化率

3.3 シールドの形質による変化

次にシールドの形質の変化の影響について検証した。図16にイオン電流密度低減率、図17に推力変化率を示す。イオン電流密度は、板状のシールドで19.6%, 200 mesh/inchのシールドで23.3%, 80 mesh/inchのシールドで4.8%減少した。網状のシールドは板状のものより良い性能をあげ、期待通りの効果を挙げると考えられる。また、メッシュの粗さにより効果に差が出たことを考えますと、よりよい効果を上げる最適なシールドのメッシュ数が存在すると考えられる。

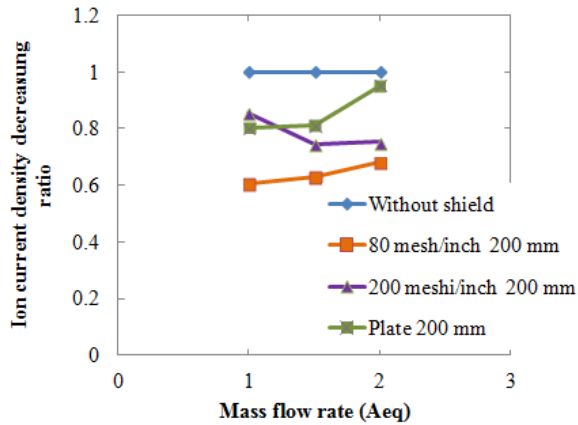


図15.推力変化率

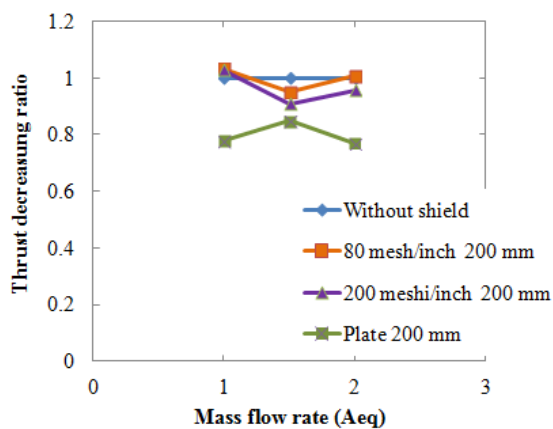


図15.推力変化率

4. 結論

以上のことから、本研究においては

- ・ビーム遮り角が同じであっても大きいシールドの方がイオン拡散低減効果があることが分かり、また推力に与える影響も少ない

- ・直径の小さいシールドはイオン拡散低減効果が少なく、更に板状のシールドは中性粒子の分布を軸方向へ伸長させている

- ・網状のシールドにおいて板状のシールドに比べてイオン拡散低減効果が得られ、また推力の低下も抑えることができる

ことが分かった。シールドによる中性粒子密度分布の軸方向への伸びを抑えないとシールドとしての効果が挙げられないこと、そして推進効率への悪影響は加速されたイオンをどれだけ遮るかによるということが結論付けられる。メッシュの粗さにより効果に差が出たということから、よりよい効果を挙げる最適なシールドのメッシュ数が存在すると考えられる。

参考文献

- [1] S. Sasaki, K. Tanaka, N. Okuizumi, S. Kawasaki, M. Shinohara, K. Senda, K. Ishimura, and USEF SSPS Study Team, "Tethered Solar Power Satellite," JAXA Research and Development Report, JAXA RR-03-005E, pp. 1-12, 2004.
- [2] 佐孝大地, "ホールスラスターのプルームにおける中性粒子密度分布", 2008
- [3] Francis F. Chen, "Introduction to plasma physics and controlled fusion", 1984
- [4] A Comparison of Nude and Collimated Faraday Probes for Use with Hall Thrusters Richard R. Hofer, Mitchell L. R. Walker, Alec D. Gallimore Plasmadynamics and Electric Propulsion Laboratory University of Michigan Ann Arbor, MI USA. 2001
- [5] Characterization of a High Specific Impulse Xenon Hall Effect Thruster IEPC-2005-324 Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 - November 4, 2005 .James J. Szabo, Busek Co. Inc, Natick, MA, 01760, USA, Yassir Azziz MIT, Cambridge, MA, 02139, USA
- [6] Computational Simulation of Faraday Probe Measurements by Jeremiah J. Boerner A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan 2008
- [7] Evaluation of a Magnetically-Filtered Faraday Probe for measuring the ion current density profile of a Hall thruster : Joshua L. Rovey, Mitchell L.R. Walker, and Alec D. Gallimore Plasmadynamics and Electric Propulsion Laboratory Department of Aerospace Engineering University of Michigan . 2004
- [8] Magnetically filtered Faraday probe for measuring the ion current density profile of a Hall thruster ; Joshua L. Rovey,a_ Mitchell L. R. Walker, and Alec D. Gallimore Plasmadynamics and Electric Propulsion Laboratory, Department of Aerospace Engineering, College of Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109 ,Peter Y. Peterson QSS Inc., NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio 44135 . Received 17 June 2005
- [9] Ultra-Low Power Stationary Plasma Thruster IEPC-2005-198 Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University October 31 - November 4, 2005 . Tsuyohito Ito, Nicolas Gascon, W. Scott Crawford, and Mark A. Cappelli , Stanford University, Stanford, California, , USA