マイクロ波放電式ホールスラストのチャンネル内プラズマ状態および チャンネル長さとのスラスト性能の関係^{*1}

Plasma Characteristics in the Acceleration Channel of a Microwave Discharge Hall Thruster and Relationships between Thruster Performance and Acceleration Channel Length

桑 野 寛 久^{*2}・國 中 均^{*3}・中 島 秀 紀^{*4}
Hirohisa KUWANO, Hitoshi KUNINAKA and Hideki NAKASHIMA

Key Words: Hall Thruster, Double-Stage, Plasma Characteristics, Microwave Discharge, Plasma Characteristics

Abstract: Microwave discharge Hall thruster can be operated by two operating modes. The first one is “no microwave launching” mode, thus having the thruster operating as single-stage type. The other mode is “microwave launching” mode, thus having the thruster operating as double-stage type. In order to examine the influence of microwave launching mode upon the plasma condition inside the acceleration channel, as well as the relationships between thruster performance and acceleration channel length, single-probe measurements and ion beam energy diagnostics in the plume were carried out. Single-probe measurements revealed the existence of dense plasma and high electron temperature region in the acceleration channel upstream due to the heating of the electrons by microwave. The variation in the discharge current characteristic due to the difference in acceleration channel length was not significant. As for discharge current, double-stage operation always results in a lower value compared to the value at the single-stage operation. Ion beam current was always higher at double-stage operation compared to the value at single-stage operation. Voltage utilization efficiency has improved as the channel length became short with microwave launching.

1. 序 論

ホールスラストは、電気推進機の中で近年特に世界的に注目されている推進機であり、1960年代より旧ソ連を中心に研究開発がはじまった。ホールスラストは同軸円環状の加速チャンネルと磁場発生装置および磁気回路、陽極、陰極から構成されている。スラスト作動時にはチャンネル内に軸方向の電場と径方向の磁場を発生させる。スラスト下流側の陽極から供給される電子の一部は、チャンネル内に流入し、電場と磁場の相互作用によってチャンネル内に閉じ込められ、その間に推進剤に衝突し電離させプラズマの生成を行う。生成されたプラズマ中のイオンは、チャンネル内の軸方向電場によって静電的に加速噴射され、その反作用によって推力が発生する。また静電加速型に代表されるイオンエンジンと比べホールスラストのイオン加速領域は準中性に保たれるため、空間電荷制限が緩和し高い推力密度が得られる。このようにホールスラストは構造が比較的コンパクトであり、かつ高効率と高比推力が達成できるため人工衛星の軌道保持や姿勢制御、さらには探査機の主推進機としてロシ

アや欧米の多くのミッションで用いられている¹⁻³⁾。このように高い完成度に達しているホールスラストであるが、現在でも物理機構解明や高効率化を目指した様々な研究が各国で進められている。

高効率化に注目すると現在の実用レベルに到達した一般的な一段加速式ホールスラストの推進効率は50%程度であり、内部効率の中では加速効率が65%程度と最も低く、電圧利用効率も90%程度で若干の改善の余地が残されている⁴⁾。そこで本研究ではこれらの効率改善を目的として二段加速式ホールスラストの研究を進めている。二段加速式とは、プラズマの生成と加速をチャンネル内部の同じ領域で行う方式（一段加速式）に対して、チャンネル内のプラズマ生成とイオンビーム加速を分離した方式の総称である。二段加速式ホールスラストの研究は各国で進められており、その種類も様々である⁵⁻⁷⁾。しかしプラズマ生成部にマイクロ波放電を用いたホールスラストの作動報告例はない。一般的な直流放電式ホールスラストに対し、マイクロ波放電式ホールスラストには以下のメリットが期待される。

- ・ 加速効率と電圧利用効率の改善
 - ・ プラズマ生成の安定化
 - ・ 放電電流振動の抑制
 - ・ 低比推力から高比推力の広い範囲での作動
 - ・ 直流放電方式よりも明確なプラズマ生成と加速の分離
- 本研究では、チャンネル上流側にマイクロ波プラズマ生成

^{*1} © 2007 日本航空宇宙学会

平成18年9月19日原稿受理

^{*2} 九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻

^{*3} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

^{*4} 九州大学総合理工学研究院

機構を有し、一段加速式と二段加速式の両作動方式での作動が可能なホールスラストを製作し、チャンネル内のプラズマ状態をラングミュアプローブ法により計測した。また、マイクロ波放電式ホールスラストに最適なチャンネル形状を決定するために、チャンネル長を変化させて、噴射イオンビーム電流量およびイオンビームエネルギー分布の計測を行った。以上の結果をもとにマイクロ波放電を応用した二段加速式ホールスラストのチャンネル内プラズマ状態と最適なチャンネル形状に関する考察を行った。

2. 二段加速式による効率改善

二段加速式の特徴を示すために第1図にTALタイプの一段加速式と二段加速式概念図を示す⁸⁾。一段加速式はチャンネル上流部に陽極、チャンネル外部に陰極を1組備えている。プラズマの生成は陰極から放出され、チャンネル内を陽極に向かって拡散する逆流電子と作動ガスの衝突電離によって行われる。生成されたイオンは静電界により加速噴出される。よってプラズマ生成と加速は同じ放電によって行われることになる。一方、二段加速式はチャンネルの上流側にプラズマ生成を目的とした加速機構と独立したプラズマ生成機構を備えている。二段加速式TALにおいては上流側陽陰極間の直流放電でプラズマを生成し、下流側の陽陰極でイオン加速を行っている。(1)式に一段加速式ホールスラストの推進効率 η_{t1} を示す。

$$\eta_{t1} = \frac{F^2}{2\dot{m}P} = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d} \quad (1)$$

$$I_d = I_i + I_e \quad (2)$$

ここで F は推力、 $\dot{m}$ は推進剤流量、 P はスラストへの全投入電力、 V_d は放電電圧、 I_d は放電電流、 I_i はイオンビーム電流、 I_e はチャンネルへの逆流電子である。一段加速式ではプラズマ生成と加速を同じ直流放電で行うが、二段加速式ではプラズマ生成と加速と分離して行う。そのため二段加速式ホールスラストの推進効率は(3)式のように示される。

$$\eta_{t2} = \frac{F^2}{2\dot{m}(P_d + P_i)} = \frac{F^2}{2\dot{m}(I_d C_p + I_d V_d)} = \eta_a \eta_u \eta_v \quad (3)$$

第1図 一段加速式と二段加速式概念図

$$\eta_a = \frac{I_i}{I_d} \quad (4)$$

$$\eta_u = \frac{m_i I_i}{e \dot{m}} \quad (5)$$

$$\eta_v = \frac{E_m}{e(C_p + V_d)} \quad (6)$$

ここで P_d はプラズマ生成に消費する電力、 P_i はイオンビーム加速に消費する電力、 C_p はイオン生成コスト(V単位)、 η_a は加速効率、 η_u は推進剤利用効率、 η_v は電圧利用効率、 m_i はイオン質量、 e は電気素量である。(2)式に示すように一段加速式の放電電流 I_d にはイオンビーム電流 I_i のほかにプラズマ維持に必要な逆流電子 I_e が含まれている。この逆流電子によって消費される電力は全投入電力 P に対して3~4割程度となる。よって二段加速式にして低いイオン生成コストかつ安定して生成できれば高い加速電圧領域、即ち高比推力運転時に一段加速式より効率が改善されることになる。

本研究では二段加速式作動におけるプラズマ生成機構にマイクロ波による表面波プラズマを採用している。表面波プラズマは高密度かつ狭い領域で生成される特徴をもつ。また、無電極でプラズマ生成が可能なので低電圧から高電圧まで幅広い作動領域をもつスラストの設計が可能となる。一段加速式と二段加速式の効率比較を行う際は当然、二段加速式のプラズマ生成コストを含めなければならない。しかし本稿はあくまで加速部の形状に注目したものであるため、その点に関しては考慮していない。

3. 実験装置および実験方法

3.1 マイクロ波放電式ホールスラスト 本実験で使用したマイクロ波放電式ホールスラストの概略図を第2図に示す。加速チャンネルは内径52mm、外径74mm、長さ24mmとなっている。チャンネル上流側にはマイクロ波電力を効率的にチャンネル内部に供給するために空洞共鳴器が接続されている。マイクロ波電源には周波数2.45GHzのマグネトロン発振タイプのもを使用している。マイクロ波エネルギーは、チャンネル上流側の石英ガラスを介してチャンネル内

第2図 マイクロ波放電式ホールスラスト概略図

第3図 実験装置概略図

部に侵入し、石英ガラス表面付近に表面波プラズマを生成する。チャンネル内の径方向磁場はサマリウムコバルト永久磁石によって印加される。推進剤はスラスタ側面側2箇所から流入し、ディストリビュータで周方向に均一化した後、マイクロ波投入の妨げにならないようチャンネル外周壁面に設置したリング型陽極の孔からチャンネル内に供給される。チャンネル壁面の絶縁材にはBNを使用した。陽極には電子放出を良くするために2%トリア入りタングステン線材を使用した。

3.2 実験装置 第3図に実験装置の概略図を示す。実験は直径1.5m、長さ2.8mのステンレス製真空チャンバ内で行った。排気には2台の油拡散ポンプを使用し、推進剤を流さない状態で 1.0×10^{-3} Pa程度の高真空状態を維持することができる。スラスタは真空チャンバ側面に直付けされている。電源は加速電源用として1台、フィラメント加熱用電源として1台、マイクロ波電源1台を使用した。マイクロ波エネルギーは導波管にて空洞共鳴器へ伝播させた。主推進剤にはキセノンを使用し、流量はマスフローコントローラによって制御した。

3.3 ラングミュアプローブ計測装置 マイクロ波投入の有無がチャンネル内プラズマ状態に及ぼす影響を調べるために、シングルプローブを用いてプラズマパラメータ(空間電位、電子密度、電子温度)の計測を行った。第4図にラングミュアプローブ計測装置の概略図を示す。プローブには直径0.1mmのタングステン線の先端を1mm露出させ、側面を直径2mmのセラミックスチューブで被覆した円筒プローブを使用した。プローブはチャンネル出口側から挿入した。計測位置はチャンネル中央、上流側の石英ガラス面を基準面として3, 7, 11, 15, 19, 23, 27mmの7点とした。この計測ではプローブの損耗および加速チャンネル内のプラズマへの擾乱をできる限り抑えるために短時間で計測を終了しなければならない。そこでプローブの移動にはステッピングモータを使用し、プローブの移動と計測がプログラム制御で自動的に行われるようにした。

第4図 ラングミュアプローブ計測装置の概略図

第5図 RPA 概略図

3.4 スラスタ性能計測 マイクロ波投入の有無とチャンネル形状がスラスタの作動に及ぼす影響を調べるため、チャンネル長を変化させながら放電電流、噴射イオンビーム電流、およびイオンビームエネルギー分布特性の計測を行った。チャンネル長の変更はマイクロ波の損失が少ないBN板を上流側に挿入して行い、測定ケースはチャンネル長24(BN板挿入無し)、19, 14, 9mmの4ケースとした。噴射イオンビーム電流の計測は、スラスタ出口から200mmの位置に設置した300×300mmの金属板で行った。イオンビームエネルギー分布特性は装置の簡便性を鑑みて電界反射型エネルギーアナライザ(RPA: Retarding Potential Analyzer)を使用した。RPAはスラスタの中心軸上、スラスタ出口から200mmの位置に設置した。第5図に使用したRPAの概略図を示す。RPAは3枚のグリッドおよび透過したイオンの捕集のためのコレクタから構成されている。

① Floating grid (FG): 噴射イオンビームに接するグリッドで電位的に浮かせた状態にしてある。これによりエネルギーアナライザ内部の電場がプラズマ中に浸透、擾乱するのを防ぐ。

② Electron retarding grid (ERG): RPA内部に電子が侵入することを防ぐ。基準電位に対し-30Vの負電圧を印

加した．

③ Ion retarding grid (IRG) : RPA 内部に侵入してきたイオンにフィルタをかける役割を果たす．本実験では 0 ~ 250 V の電圧で挿引した．

イオンビームエネルギー分布関数 $f(E)$ は RPA のコレクタで捕集されたイオン電流 I_c とグリッド挿引電圧 $E_{sw} = eV_{sw}$ を用いて次式で得られる．

$$f(E) = -\frac{1}{I_{c0}} \frac{dI_c}{dE_{sw}} \quad (7)$$

ここで、 I_{c0} はグリッド印加電圧が 0 V のときにコレクタで捕集されるイオン電流量である．スラストの効率を評価する値として電圧利用効率を用いる．2 章で述べたように本稿ではマイクロ波によるプラズマ生成コストを考慮しないので、(6) 式は用いず、次に示す電圧利用効率 η_V を新たに定義する．

$$\eta_V = \frac{E_m}{eV_d} \quad (8)$$

η_V の算出に必要なイオンビームの平均エネルギー E_m は次式で得られる．

$$E_m = \left\{ \int f(E) \sqrt{E_{sw}} dE \right\}^2 \quad (9)$$

4. 実験結果および考察

4.1 チャンネル内プローブ計測 マイクロ波を投入しない一段加速式とマイクロ波電力をスラストへ投入する二段加速式の二つの作動方式におけるチャンネル内プラズマ状態のシングルプローブ計測を行った．放電電圧は 200 V に固定し、推進剤流量は 1.75 mg/s に固定した．二段加速時におけるマイクロ波投入電力は発振器出口にて正味 300 W とした．

第 6 図にチャンネル内空間電位分布と径方向磁場強度の軸方向分布を示す．実線が一段加速、点線が二段加速の結果を示している．作動方式による軸方向空間電位分布の違いはほとんど見られず、チャンネル上流側から 10 mm 付近ま

第 6 図 チャンネル内空間電位分布

では放電電圧とほぼ等しい値を示し、10 mm 以降のスラスト出口に向かって急激な電圧降下が見られる．この電圧降下領域とチャンネル内径方向磁場のピークはほぼ一致しており、他の SPT タイプスラストにも同様の報告がされている^{9, 10)}．

第 7 図にチャンネル内プラズマ密度の軸方向分布を示す．一段加速時においては陽極側からスラスト出口側に移動するに従ってプラズマ密度が上昇しており、チャンネル内電界が最も大きくなる 15 ~ 20 mm の領域に 10^{18} m^{-3} オーダの非常に高密度なプラズマが存在している．二段加速においてはチャンネル上流の石英ガラス近傍から 10^{18} m^{-3} オーダの高密度プラズマが生成されており、7 mm 付近から緩やかにプラズマ密度が下がり始め、15 mm 以降は一段加速とほぼ同様の結果となった．この二段加速においてのみ見られるチャンネル上流、石英ガラス面から 7 mm の高密度プラズマ領域は表面波プラズマによって生成されたものと考えられる．実際に密度 10^{18} m^{-3} 程度のプラズマに 2.45 GHz のマイクロ波を入射した場合のプラズマ表皮深さは 5.3 mm 程度であり、チャンネル上流側の高密度プラズマ領域とほぼ一致している．以上の結果から二段加速においてはチャンネル上流の石英ガラス付近とチャンネル下流の領域で同時に高密度のプラズマが生成されていると考えられる．

第 8 図にチャンネル内電子温度の軸方向分布を示す．電子

第 7 図 チャンネル内プラズマ密度分布

第 8 図 チャンネル内電子温度分布

温度は一段加速、二段加速ともにチャンネルの中流よりやや出口側の領域が最も高く 13 eV 程度となった。但しチャンネル上流付近では二段加速の方が一段加速よりも高い電子温度を示す結果となった。この二段加速時のみに現れるチャンネル上流側の高い電子温度領域はマイクロ波が電子にエネルギーを供給しているためと考えられる。

4.2 放電電流とイオンビーム電流の計測 チャンネル長と作動方式がスラスタの作動特性に及ぼす影響を調べるためにチャンネル長を 24, 19, 14, 9 mm と変化させて放電電流とイオンビーム電流を計測した。放電電圧は 200 V に固定し、推進剤流量は 1.75 mg/s に固定した。二段加速時のマイクロ波投入電力は発振器出口において正味 300 W とした。チャンネル内の径方向磁場分布はプローブ計測時と同形状とした。

第 9 図にチャンネル長を変化させたときの放電電流の計測結果を示す。一段加速、二段加速ともにチャンネル長を変化させても放電電流に大きな変化は見られず、ほぼ一定の値となった。また一段加速よりも二段加速における放電電流の方が低くなっている。これは一段加速式におけるプラズマの生成が陰極より供給される電子と推進剤の衝突電離のみによって行われているのに対し、二段加速式においては電離の一部をマイクロ波過熱が担っており、チャンネル下流側の衝突電離に必要な逆流電子の量が減少したためと考えられる。

第 10 図にチャンネル長を変化させたときのイオンビーム電

第 9 図 チャンネル長と放電電流の関係

第 10 図 チャンネル長とイオンビーム電流量の関係

流量の計測結果を示す。チャンネル長 24 mm では一段加速、二段加速に大きな違いは見られない。一段加速においてはチャンネル長が短くなるに従って、得られるイオンビーム電流が減少している。これはチャンネル長が短くなってしまったことによりプラズマ生成領域が狭くなり、チャンネル内で十分に推進剤を電離できなくなってしまったためと考えられる。また、二段加速においてはチャンネル長が 19 mm に短くなると一段加速式と同様にイオンビーム量は少なくなるが 14, 9 mm と更に短くしてもイオンビーム電流量の変化はほとんど見られない。これはチャンネル上流面がスラスタ出口に近づくことによって、表面波プラズマ中のイオンが壁面損失とならず有効に加速噴射されるようになったためと考えられる。また、第 11 図に示すように二段加速を行うことにより加速効率の改善が見られた。この傾向はチャンネル長が短くなるとより顕著に現れた。

4.3 イオンビームエネルギー分布の計測 RPA を用いて噴射イオンビームのエネルギー分布計測を行った。チャンネル長は 24, 19, 14, 9 mm の 4 種類とした。放電電圧は 200 V、推進剤流量は 1.75 mg/s に固定した。一段加速と二段加速の 2 方式でスラスタを作動させ、二段加速時におけるマイクロ波投入電力は発振器出口において正味 300 W とした。チャンネル内径方向磁場分布はプローブ計測時と同じとした。

第 12 図 (a) ~ (d) に各チャンネル長におけるイオンビームエネルギー分布を示す。一段加速、二段加速ともに 10 ~ 40 eV 付近に小さなピークが見られる。この領域に含まれるイオンはチャンネル内部で生成されたものではなく、チャンネル外部のバックグラウンド電位で中性粒子とスラスタから加速噴射された高エネルギーイオンが電荷交換衝突することにより生じたイオンであると考えられる。作動方式別にイオンビームエネルギー分布を見てみる。第 12 図 (a) の一段加速の結果を見ると 120 eV 付近に大きなピークが現れている。このイオンエネルギー領域を第 6, 7 図の空間電位、プラズマ密度分布と比較すると、一段加速における最もプラズマ密度の高い領域の空間電位にほぼ一致している。よってこの領域のイオンの大部分はホール運動する電子と推進剤の衝突電離によって生成されたプラズマ中から加速噴射されたイオンであると考えられる。チャンネル長を徐々に短くし

第 11 図 チャンネル長と加速効率の関係

(a) チャンネル長 24 mm (BN 板挿入無し)

(b) チャンネル長 19 mm (5 mm 厚 BN 板挿入)

(c) チャンネル長 14 mm (10 mm 厚 BN 板挿入)

(d) チャンネル長 9 mm (15 mm 厚 BN 板挿入)

第12図 チャンネル長とイオンビームエネルギーの関係

第13図 チャンネル長と電圧利用効率の関係

た第12図(b), (c), (d)においてもほぼ同じ領域にピークができています。チャンネル内部の空間電位は、径方向磁場形状に強く依存する。よってチャンネル長を短くした場合はチャンネル上流部の緩やかに電位が下降する領域が狭くなり、下流側の空間電位分布は大きく変化しないと考えると、これらのイオンもホール運動する電子と推進剤の衝突電離で生成されたイオンと考えられる。次に二段加速におけるイオンエネルギー分布を見てみる。いずれのチャンネル長のケースにおいても120 eV付近の最も大きなピークの他に更に高エネルギー領域においてもう一つ別の小さなピークが見られる。プラズマ密度分布の考察でも述べたが二段加速においてはチャンネル上流側とチャンネル下流側の二つの領域でプラズマ生成が行われていると考えられる。よって120 eV付近のイオンエネルギーをもつイオンはチャンネル下流側の領域で一段加速と同様のメカニズムで生成されたプラズマ起源のものであり、更に高エネルギー側にあるイオンはマイクロ波によってチャンネル上流の石英ガラス付近に生成された表面波プラズマ起源のものであると考えられる。

第13図にチャンネル長を変化させたときの各作動方式における電圧利用効率を示す。二段加速において一段加速よりも電圧利用効率の改善が得られた。この傾向はチャンネル長が短くなるに従って顕著になり、チャンネル長9 mmにおいて12%程度高くなっている。これはチャンネル上流側の石英ガラス面が下流側に接近することにより、チャンネル上流側陽極近傍に生成される表面波プラズマ中からのイオンが有効に加速噴射されるようになったためと考えられる。

5. マイクロ波放電式ホールスラストの設計指針

これまでにマイクロ波放電技術を応用した二段加速式ホールスラストの開発を目指して、ECR放電を利用したスラストの研究が行われた。しかし、ECR放電ではチャンネル内にECR領域を設ける必要があり、チャンネル内磁場形状がスラスト性能に大きく寄与するホールスラストにおいては設計が困難であった。またECRプラズマではカットオフ密度以上のプラズマを生成するのが困難であり、スラスト作動に十分なプラズマ密度が得られないことも難点の一つであった。そこで今回ECR放電から表面波を利用したも

のに変更し、一般的な SPT タイプのホールスラストをモデルとして一段加速、二段加速の両方での作動が可能なスラストを製作、試験した。その結果マイクロ波放電によってチャンネル内部に十分な密度のプラズマを生成できることが確認された。またチャンネル長を変化させると一段加速で作動させた場合はチャンネル長が短くなるに従ってイオンビーム電流が減少し性能が低下してしまっただが、二段加速においてはわずかな減少に留まった。また放電電流の値も一段加速より低く抑えられたため加速効率が改善された。電圧利用効率も二段加速によって改善された。よって表面波を利用した二段加速式のホールスラストを設計するにあたっては SPT タイプのように十分なチャンネル長を設けるのではなく、逆にチャンネル長を短くすることによって上流側の表面波プラズマ領域を加速領域に近づけ、狭い領域で高密度のプラズマを生成し、壁面などで損失となってしまう前に速やかに加速した方がよいと考えられる。

6. ま と め

マイクロ波放電を利用する二段加速と従来の一段加速作動が可能なマイクロ波放電式ホールスラストにおいて、ラングミュアプローブ法によるチャンネル内部プラズマ状態の計測とチャンネル長を変化させたときのスラストの作動特性、およびイオンビームエネルギー分布の計測を行った。プローブ計測結果から、二段加速時においてチャンネル上流側に一段加速時では見られない高密度プラズマ領域が確認された。また、作動方式の違いによる空間電位分布の変化はほとんど見られなかった。電子温度分布に関しては二段加速時の方が一段加速時よりもチャンネル上流側でやや高い値となった。チャンネル長を短くした場合、放電電流に関しては長さに関する変化は少ないが、全体的に二段加速時に放電電流が低くなる傾向が得られた。イオンビーム電流は一段加速時で

はチャンネル長が短くなるに従って減少傾向にあったが、二段加速時には一段加速時ほどの電流の減少が見られなかった。その結果二段加速による加速効率の改善が確認された。またブルーム診断より電圧利用効率に関しても二段加速の優位性が確認された。

参 考 文 献

- 1) Kim, V., Popov, G., Arkhipov, B., Murashko, V., Gorshkov, O., Koroteyev, A., Garkusha, V., Semenko, A. and Tverdokhlebov, S.: Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 2001-005, 2001.
- 2) Myers, R. M.: Overview of Major U.S. Industrial Electric Propulsion Programs, AIAA Paper 2004-3331, 2004.
- 3) Milligan, D., Gestal, D., Camino, O., Estublier, D. and Koppel, C.: SMART-1 Electric Propulsion Operations, AIAA Paper 2004-3436, 2004.
- 4) Hofer, R. R. and Gallimore, A. D.: High-Specific Impulse Hall Thrusters, Part 2: Efficiency Analysis, J. Propul. Power, **22** (2006), pp. 732-740.
- 5) Demidenko, I. I., Lomino, N. S., Morozov, A. I., Ovcharenko, V. D. and Padalka, V. G.: Two-Stage Hall-Current Plasma Accelerator, Soviet J. Plasma Phys., **3** (1977), pp. 31-33.
- 6) Yamagiwa, Y. and Kuriki, K.: Performance of Double-Stage Discharge Hall Ion Thruster, J. Propul. Power, **7** (1991), pp. 65-70.
- 7) Yashnov, Y. M., Koester, J. K., McVey, J. B. and Britt, E. J.: Fundamental Design of Highly Effective Hall Thrusters, IEPC Paper 1999-099, 1999.
- 8) Semenko, A. V. and Solodukhin, A. E.: Operation of Two-Stage Thruster with Anode Layer in "Floating Electrode" Scheme, IEPC Paper 2005-145, 2005.
- 9) Hass, J. M. and Gallimore, A. D.: An Investigation of Internal Electron Number Density and Electron Temperature Profiles in a Laboratory-Model Hall Thruster, AIAA Paper 2000-3422, 2000.
- 10) Bugrova, A. I., Morozov, A. I., Lipatov, A. S., Bishaev, A. M., Kharchevnikov, V. K. and Kozintseva, M. V.: Integral and Spectral Characteristics of ATON Stationary Plasma Thruster Operating on Krypton and Xenon, IEPC Paper 2003-366, 2003.