

発散磁場を持つ静電加速スラスターの作動特性に対する磁場強度分布の影響

Sample of Paper for Space Transport Symposium

○市原 大輔(名大・院)・岩川 輝・佐宗 章弘(名大)

○Daisuke Ichihara・Akira Iwakawa・Akihiro Sasoh (Nagoya University)

Abstract (概要)

Effect of magnetic field properties, such as strength and its distribution on ion beam characteristics in diverging magnetic field electrostatic thruster which has a diverging magnetic field between upstream ring anode with insulating plate to form a working gas injection slit and downstream off-axis hollow cathode is investigated. Applying strength distribution which 250 mT around anode and 150 mT on axis, about 26 V potential drop between anode and center axis is maintained. Injected working gas is ionized efficiently by colliding with accelerated electrons using this potential drop. By suppling 1.0 Aeq argon gas through the slit with 200 V of discharge voltage, same amount of ion current as total injected gas flow rate is measured. Acrossing the diverging magnetic field, ions are electrostatically accelerated from 190 V of electric potential which is close to discharge voltage by a radially inward electric field. As a result, half ion beam diverging angle decrease to 39 deg.

記号の説明

B :	磁場強度
E_i :	イオンビームエネルギー, (1)式
\dot{J}_1 :	作動ガス流量
\dot{J}_2 :	ホローカソード流量
J_c :	RPA コレクタ電流
J_d :	放電電流
J_i :	イオンビーム電流, (2)式
j_i :	イオンビーム電流密度
J_k :	キーパー電流
n_e :	電子数密度
R :	Nude Faraday probe 旋回半径
T_e :	電子温度
V_d :	放電電圧
V_k :	キーパー電圧
V_{RPA} :	RPA 印加電圧
V_s :	空間電位
$\langle\theta\rangle$:	イオンビーム発散半角, (3)式
γ :	2次電子放出係数
σ_b :	2 nd ピーク分散
σ_s :	1 st ピーク分散
φ_b :	2 nd ピーク電位
φ_s :	1 st ピーク電位
r, θ, z :	円筒座標

1. はじめに

静電加速型電気推進機は、高排気速度とそれによる高ペイロード比を達成可能であるため、宇宙機の姿勢制御から軌道変更まで幅広く活躍するようになった¹。発生する推力は主に 100 eV 以上まで静電加速された高エネルギーイオンが担う²。加速電界はグリッド電極ないし外部印加磁場による電子トラップで維持される。前者の場合、グリッドによりイオンは collimate されるため一方向イオンビームの引き出しが可能である³。後者の場合、プラズマ中の電子電流に対して垂直な向き(半径方向)に磁場を印加することで、原理的には、一方向(軸方向)に ion を静電加速できる⁴。しかしトラップされた電子電流による自己誘起磁場や磁気回路端からの漏れ磁場によって磁場形状が湾曲し、それにより加速電界も偏向するため、イオンの一部は加速部壁面に衝突する⁵。これを回避するため Mikellides らは”magnetic shielding”と呼ばれるコンセプトを提案した⁶。磁場形状に合わせた加速部形状とすることで ion の壁面衝突を緩和するものである。Mazouffre らは Anode を推進機出口付近に設置し、放電室外部にて電離・加速を行う “Wall-less Hall thruster”を提案した⁷。しかしながら生成したイオンが磁場に沿って拡散しビームオプティクスが低下した結果、従来の Hall thruster と比較し推進性能は低下した⁸。Cylindrical Hall Thruster⁹, High Efficiency Multistage Plasma thruster¹⁰, Cusped field thruster¹¹は加速部にカスプ磁場を印加し加速電界を半径方向内向きにやや傾けイオン壁面損耗の低減を目指している。加えて、イオンの軌道はスラスター外部の

磁場形状にも影響されることからトリムコイルを用いたビームオプティクス改善も試みられている¹².

Haradaらはリング Anode と Hollow cathode 間にカスプ磁場を配位し Helicon plasma を静電加速する推進機, Helicon Electrostatic Thruster (HEST)を考案した¹³. 続く Uchigashima らの報告では, Hollow cathode からの電子電流は主にリング Anode 内面に流入しており, 発散磁場中に半径方向内向き電界が形成されることが示唆された¹⁴. この結果を受け, 筆者らは HEST と同一の磁気回路を用い, 直流放電によりイオンを生成し発散磁場中において静電加速する”Diverging Magnetic field Electrostatic Thruster” (DM-EST) を考案した¹⁵. 作動ガス供給位置の影響を調査した結果, Anode 内面から作動ガスを供給することで Hollow anode 効果による電離と発散磁場終端付近からの軸方向電界によるイオンビームの引き出しを実証した. 前述の通り電子トラップによって維持された加速電界は磁場の影響を受け, それに応じてイオンビームも偏向するが DM-EST に関する磁場の影響は未解明である. 本論文では磁場強度及びその分布を変化させた際のイオンビーム特性を取得し, 発散磁場中における電界維持とそれに伴うイオン生成・加速特性のさらなる理解・向上を目的とする.

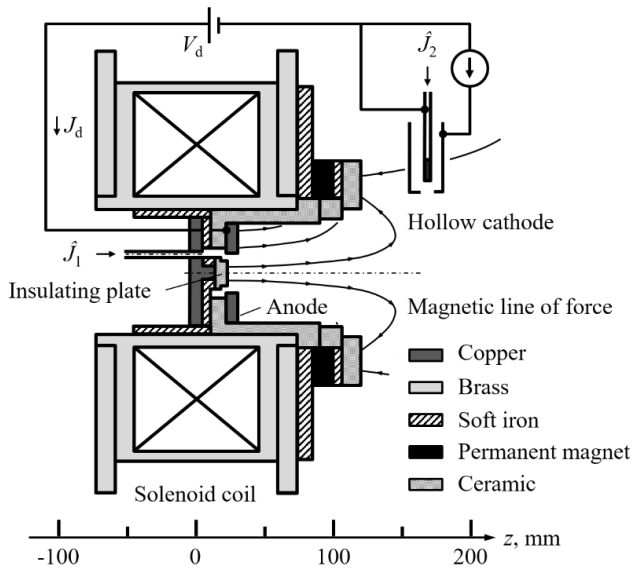


図. 1 Schematics of DM-EST

2. 実験装置

本実験に用いた DM-EST の schematics を図. 1 に示す. ソレノイドコイル, リング Anode, Hollow cathode, Insulating wall などの主要構成部品は Ref. 13, 15 と同一である. しかし, 本研究ではソレノイドコイルの内側にヨークを設置しリング Anode 内部の磁場強度およびその分布を変化させた. 銅製リング Anode は内径 27 mm 厚さ 10 mm とし, ソレノイドコイル中心から 20 mm 下流に設置した. Anode 内部には Boron Nitride 製凸部付き絶縁版を設置した. 絶縁版は作動ガス供給ポートを有する plug metal plate に固定した. 外径 24 mm の凸部と内径 27 mm の Anode 内面とで幅 1.5 mm

のスリットを形成する. 供給ポートから流入した作動ガスは前記スリットを通じて Anode 内面付近から放電室に流入する. Anode 内部にはソレノイドコイルにより軸方向発散磁場を印加する. 発散磁場は下流部においてネオジウム磁石と純鉄とにより磁場形状は大きく湾曲し, 磁場強度が 3 mT 程度の Field-free 領域を形成する. Hollow cathode (Kaufman & Robinson Inc., DLHC-1000) はオリフィスがソレノイドコイル中心から下流に 150 mm, 中心軸から半径方向に 70 mm の位置に設置した.

本研究では図. 2 に示す 4 つの異なる磁場強度, 分布を評価した. 中心軸上かつ絶縁版下流端面を原点とする $r-z$ 座標を設定し磁場強度 $B(r, z)$ を表す. 本研究では原点 $(r, z) = (0, 0)$ と $z = 0$ mm における Anode 内面 $(r, z) = (13.5, 0)$ とを磁場強度の代表値とする. (a) type A は Ref. 15 と同一のものである. $B(0, 0) = 100$ mT, $B(13.5, 0) = 100$ mT であり Anode 内部に一樣磁場を有する. type S, A, C にはソレノイドコイルケース内部に純鉄性リングヨークを追加し, 絶縁版周囲にはつば板を有する長さ 18 mm の metal ring を設置した. Plug metal plate, つば板付き metal ring の材質を変更し $B(r, z)$ を変化させる. (b) type S では Plug metal plate を純鉄とした. つば板付き金属リングはつば板と上流側 9 mm とを純鉄に下流側 9 mm を銅製とした. このとき $B(0, 0) = 210$ mT, $B(13.5, 0) = 190$ mT である. 最大 10% 程度の強度分布を有するものの, Anode 内部の磁場強度を比較的一様に保ち, type N と比較して磁場強度のみを増加させた. (c) type A では Plug metal plate のみ銅製であり, つば板付き metal ring は純鉄製とした. このとき $B(0, 0) = 250$ mT, $B(13.5, 0) = 150$ mT である. type N と比較して磁場強度を増加させ, なおかつ Anode 近傍において最も磁場強度が強い分布とした. (d) type C は Plug metal plate のみ純鉄製であり, つば板付き metal ring は銅製とした. このとき $B(0, 0) = 300$ mT, $B(13.5, 0) = 190$ mT である. type N と比較して磁場強度を増加させ, かつ中心軸上において最も磁場強度が強い分布とした.

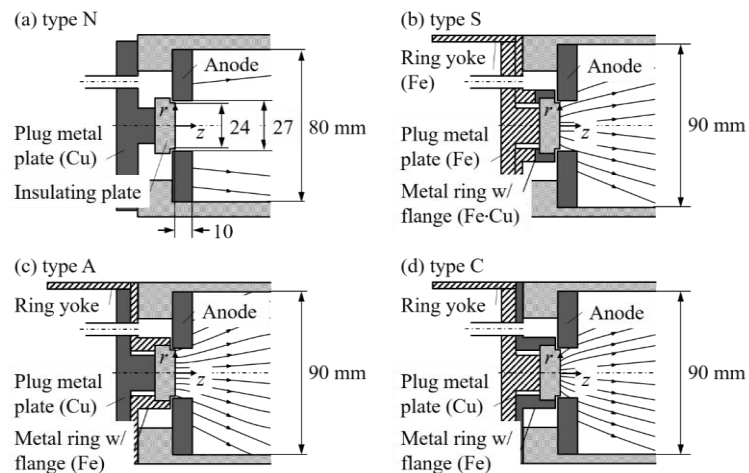


図. 2 Applied magnetic fields (a) type N, (b) type S, (c) type A and (d) type C

イオンビームエネルギー E_i はRetarding potential analyzer (RPA)¹⁶を用いて取得した Ion energy distribution function (IEDF)に基づいて算出した。RPAは $(r, z) = (0, 350)$ に固定した。cathode電位を基準としRPAのグリッド電位 V_{RPA} を -20 V ~ 440 Vの範囲で変化させた際にRPAに流入する電流 J_c を測定した。図. 3に測定した J_c 及びIEDFの例を示す。 J_c は $V_{RPA} < 0$ における平均値で規格化した。IEDFは4つの異なる Gaussian の足し合わせであると仮定し規格化した J_c を最小二乗法でFittingした。Fitting曲線を V_{RPA} に対して微分しIEDFを算出する。IEDFは2つのピークを有する。 $V_{RPA} = \phi_s$ 及び $V_{RPA} = \phi_b$ におけるピークはそれぞれcathode電位を基準とした空間電位、イオンビームエネルギーを表す¹⁷。各ピークに対応するGaussianの変数を用いて E_i 及びその標準偏差を(1)式で定義した。

$$E_i = \phi_b - \phi_s \pm \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_s^2} \quad (1)$$

図. 3に示す作動条件の場合、 $\phi_s = 35$ V, $\phi_b = 190$ Vより、 $E_i = 155 \pm 36$ eVである。

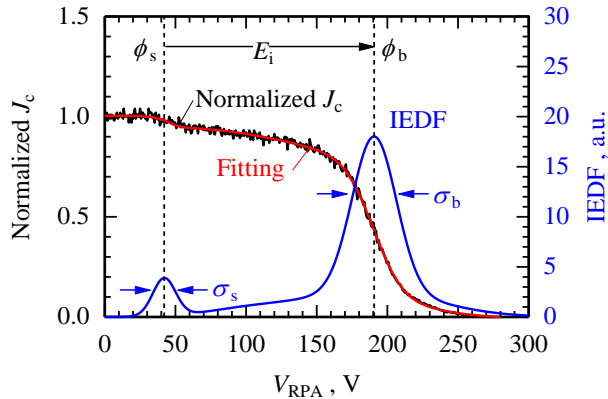


図. 3 Example of normalized RPA ion current J_c vs RPA 3rd grid potential from cathode V_{RPA} . Magnetic field was type A, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

イオンビーム電流 J_i 及びHalf beam divergence angle $\langle \theta \rangle$ はNude Faraday probe¹⁸により測定した。Nude Faraday probeは直径12 mmの捕集面と内径13 mm, 外径23 mmのガードリングから構成される。加速機水平断面において $(r, z) = (0, 115)$ を旋回中心とし中心軸からの周方向角度 θ に対する電流を測定した。旋回半径 R は250 mmである。捕集面とガードリングとをともにcathode電位から50V負にバイアスし、捕集面に流入する電流を回路に直列接続した精密抵抗($1 \text{ k}\Omega \pm 1\%$)での電圧降下から算出した。測定した電流を捕集面積で割った電流密度 $j_i(\theta)$ の測定例を図. 4に示す。 $j_i(\theta)$ は $\theta = 0$ deg. の値で規格化した。軸対象ブルームを仮定し、(2)式に基づき $j_i(\theta)$ を半径 R の半球面上で積分し J_i を算出した。

$$J_i = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) \pi R^2 \sin\theta d\theta \quad (2)$$

$0 \sim \pi/2$ 及び $-\pi/2 \sim 0$ での $j_i(\theta)$ を用いて軸対象を仮定し算出

した J_i は(2)式から算出した J_i に対して $\pm 5\%$ 以内で一致した。図. 3より、最大300 eVのエネルギーを有するアルゴンイオンが捕集面に流入するが、その際の2次電子放出係数 γ は0.1程度と見積られる¹⁹。そのため J_i を γ で除した値を評価した。また、 $\langle \theta \rangle$ は半球面上における軸方向イオン flux の平均として(3)式に基づき算出した²⁰。

$$\cos\langle \theta \rangle = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) \pi R^2 \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) \pi R^2 \sin\theta d\theta} \quad (3)$$

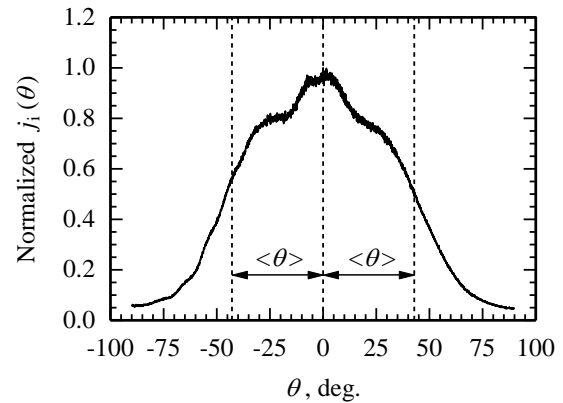


図. 4 Example of normalized ion beam current density j_i vs angle θ with respect to the accelerator center axis. Magnetic field was type C, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 175$ V.

電子数密度 n_e 及び電子温度 T_e の計測はdouble probeを用いて測定した。probe先端は直径0.3mmのタングステンワイヤー製で露出長さは3 mmとした。ワイヤー間隔は2.2 mmである。probe間電位差を10 Hzで変化させた際にprobeに流れる電流値を測定し、最小二乗法により電流-電圧曲線を双曲線正接関数(hyperbolic tangent function)でFittingした²¹。 T_e はFittingパラメータから算出した。 T_e に加え、イオン飽和電流値と、シース厚さを考慮した捕集面積²²を用いて n_e を算出した。

Cathode電位を基準電位とした空間電位 V_s はfloating emissive probe²³を用い、Cathodeとemissive probeとの電位差を高電圧probe(Tektronix, P5100A)で測定した。熱電子放出部は、直径0.185 mmの1%トリア入りタングステンワイヤーを用いた直径2 mmの半円弧形状とした。ヒーター電流値を変化させ、中心軸上のAnode入口 $(r, z) = (0, 0)$ と加速機出口 $(r, z) = (0, 115)$ において V_s が頭打ちとなるまで熱電子放出部を加熱した。

Double probe, Emissive probeともにステッピングモーター(オリエンタルモーター製, PK569AWM)に固定し、各測定点におけるプラズマへの掃引時間は0.2 s程度とした。

3. 実験結果

3.1 実験条件 実験は全て直径1.2 m長さ3.2 mのステンレス製真空チャンバー内で実施した。チャンバー内はド

ライポンプ (排気速度 120 L/s) とクライオポンプ (8400 L/s) とで真空排気した。チャンパー内圧力は電離真空計を用いて計測し、作動ガスを 1.36 Aeq 供給した際のチャンパー内圧力は 10 mPa 程度に保った。

Hollow cathode の作動は供給ガス流量 $\dot{J}_2 = 0.36$ Aeq, キーパー電流 $J_k = 2$ A とした。放電室に供給する流量 \dot{J}_1 は 1.0 Aeq に固定し放電電圧 V_d を 125 – 225 V の範囲で変化させた際の $E_i, J_i, \langle \theta \rangle$ に加え放電電流 J_d , キーパー電圧 V_k を各作動条件において最低 2 回ずつ測定した。以降図中のシンボルは平均値を表す。 E_i のエラーバーは(1)式で定義される標準偏差に、 $J_i, J_d, \langle \theta \rangle$ に関しては試行回数に対する標準偏差 1σ に対応する。作動ガスは放電室, Hollow cathode とともにアルゴン(純度 99.9999%)である。データ取得に要する加速機作動時間は最低 3.5 s である。作動に伴う Insulating plate の損耗を評価すべく $\dot{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\dot{J}_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V において 10 秒間の作動を 30 秒間隔で 5 回実施し、作動前後の質量を電子天秤(島津製作所, AW320)で測定した。質量差は電子天秤の測定分解能(0.1 mg)未満であった。

3.2 磁場強度の影響 放電室内において一様磁場を印加した type N と S とを比較し、磁場強度がイオン加速及び放電特性に及ぼす影響を考察する。磁場強度を変化させた際の、加速機の中心軸からの角度 θ に対するイオンビーム電流密度 j_i の変化を図. 5 (a) に示す。

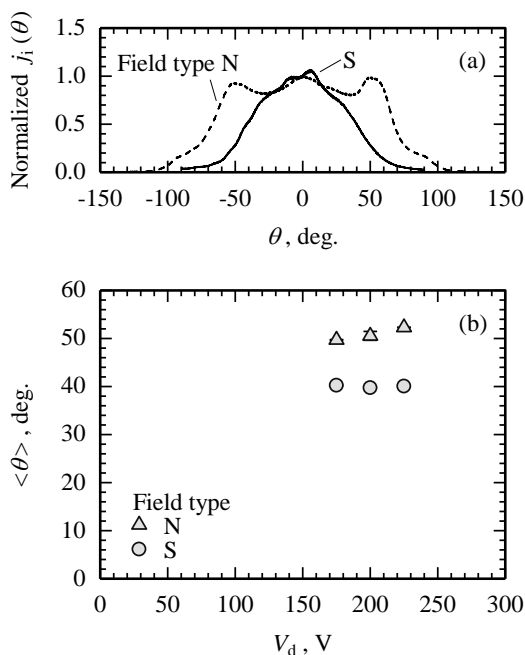


図. 5 Ion beam distribution characteristics with magnetic field type N and S, $\dot{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\dot{J}_2 = 0.36$ Aeq, (a) normalized ion beam current density j_i vs angle θ with respect to the accelerator center axis, $V_d = 200$ V, (b) $\langle \theta \rangle$ vs V_d

type N の場合、 j_i は $\theta = 0$ deg. に加えて $\theta = \pm 50$ deg. においてもピークを有している。 type S の場合 $\theta = 0$ deg. 付近において j_i は最も大きく $|\theta|$ の増加とともに j_i は減少した。 磁場

強度を変化させた際の V_d に対する $\langle \theta \rangle$ の変化を図. 5 (b) に示す。 type N では V_d の増加とともに $\langle \theta \rangle$ も最大 3 deg. 増加するのに対し type S では V_d の変化に対する $\langle \theta \rangle$ の変化は 1 deg. 未満であった。 type N と比較して type S は $\langle \theta \rangle$ が小さく、 $V_d = 225$ V における $\langle \theta \rangle$ は type N, S においてそれぞれ 52 deg., 40 deg. である。

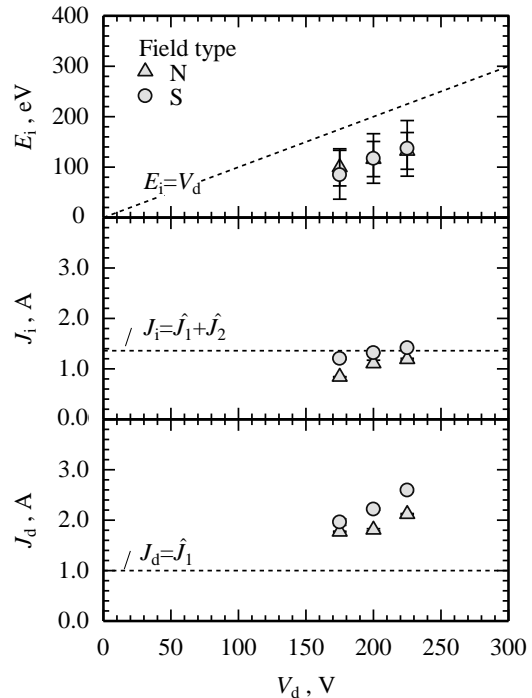


図. 6 V_d vs E_i, J_i and J_d with magnetic field type N and S, $\dot{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\dot{J}_2 = 0.36$ Aeq.

次に、 V_d に対する E_i, J_i, J_d 測定結果を図. 6 に示す。 磁場強度によらず V_d の増加に対して E_i は線形に増加した。 その傾き dE_i/dV_d は type N で 0.65, type S で 1.0 であり $V_d = 225$ V において E_i / V_d は type N, S においてそれぞれ 0.58, 0.60 であった。 (1)式によって定義される標準偏差は type N においてそれぞれ $\pm 34 - 36$ eV, type S では $\pm 48 - 55$ eV であった。 E_i 同様、磁場強度に依らず V_d の増加に対して J_i は増加するが、 J_i は全供給作動ガス流量 $\dot{J}_1 + \dot{J}_2$ 程度で頭打ちとなった。 $\dot{J}_1 + \dot{J}_2$ に対する J_i の割合 $J_i / (\dot{J}_1 + \dot{J}_2)$ は $V_d = 225$ V において type N, では 0.87 であるのに対し、 type S では 1.0 となり、磁場強度増加により供給作動ガス流量に等しいイオンビームを生成できた。 J_d についても E_i, J_i 同様に磁場強度に依らず V_d の増加に伴い J_d も増加したが、 J_i のようなプラトーは見られない。 磁場強度が強い方が J_d も大きく $V_d = 225$ V における J_d は type N, S にてそれぞれ 2.1 A, 2.6 A となり、放電室への供給作動ガス流量 \dot{J}_1 に対して 2 倍以上大きい。 J_d は Anode に流入する電子電流に等しく作動ガスの電離による電子電流と Hollow cathode からの電子電流との和である。 V_d の増加により J_i は頭打ちとなる一方で J_d は線形に増加するため、 J_d に対する J_i の比 J_i / J_d は最大値を有する。 type N, S とともに J_i / J_d は最大 0.67 であった。 よって J_d に占める割合は作動ガスの電離による電子電流が 67%, Hollow cathode

からの逆流電子電流が 33% である。type N においては $V_d = 200$ V において J_i/J_d は最大となるのに対し、type S では $V_d = 175$ V で最大となり V_d の増加に伴い J_i/J_d は減少した。

3.3 磁場強度分布の影響 本節では磁場 type S と A, S と C の比較を通じて磁場強度分布がイオン加速及び放電特性に及ぼす影響を考察する。磁場強度分布を変化させた際の θ に対する j_i の分布を図. 7 (a) に示す。type N と同様に type A における j_i は $\theta = \pm 10$ deg. 付近にて $\theta = 0$ deg. より 5 - 15% 高いピークを持つ。一方 type C では type S と同様に $\theta = 0$ deg. 付近で j_i は最大となり $|j_i|$ の増加とともに減少した。磁場強度分布を変化させた際の V_d に対する $\langle \theta \rangle$ の変化を図. 7 (b) に示す。Type S と異なり、type C では V_d の増加に伴い $\langle \theta \rangle$ も増加するのに対し、type A では $\langle \theta \rangle$ は減少した。 $V_d = 175 - 225$ V の範囲において type A における $\langle \theta \rangle$ は type S, C の中で最も小さく、 $V_d = 225$ V にて 39 deg. であった。

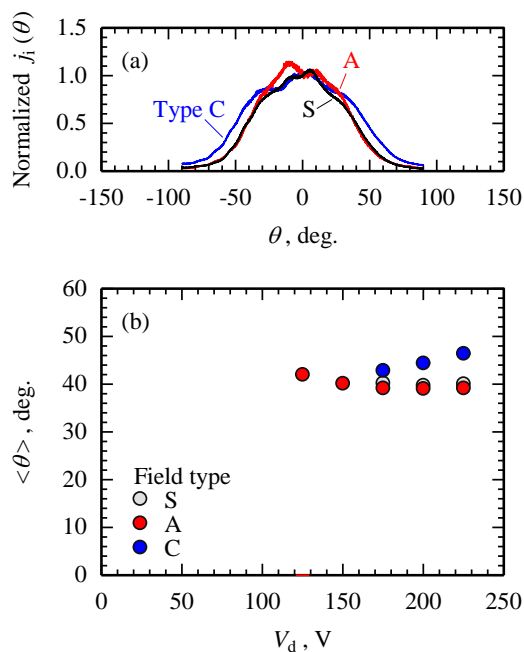


図. 7 Ion beam distribution characteristics with magnetic field type S, A, and C, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq, (a) normalized ion beam current density j_i vs angle θ with respect to the accelerator center axis, $V_d = 200$ V, (b) $\langle \theta \rangle$ vs V_d

次に、 V_d に対する E_i, J_i, J_d 測定結果を図. 8 に示す。磁場強度分布に依らず V_d の増加に対し E_i は線形に増加し、type S と同様に $dE_i/dV_d \approx 1.0$ であった。 E_i の標準偏差は type A において最も小さく ± 36 eV であるのに対し type C では $\pm 55 - 68$ eV であった。 $V_d = 175 - 225$ V の範囲において type S と C とでは E_i は高々 8 eV 程度の差であるのに対し、type A の E_i は type S の E_i に対して 40 eV 程度高く、 $V_d = 225$ V において $dE_i/dV_d = 0.79$ となった。 J_i は E_i のように磁場強度分布に応じた大きな差は見られない。磁場強度分布に依らず V_d の増加に対して J_i は $\hat{J}_1 + \hat{J}_2$ 程度で頭打ちとなり、 $V_d = 225$ V における J_i は type A, C においてそれぞれ 1.5 A, 1.4 A であった。これは供給した全作動ガス流量 1.36 A を上回る値であるが、流量の供給に用いたマスフローコントローラー

並びに J_i 算出に用いた抵抗値の精度が $\pm 1\%$ 程度であることを考慮すると許容範囲内といえる。作動ガスが電離し放電を維持可能な最低放電電圧は磁場強度分布に応じて異なり、type A においてのみ $V_d = 125$ V から $J_i / (\hat{J}_1 + \hat{J}_2) = 0.63$ 程度のイオンビームが存在する。Type S 同様 type A, C ともに V_d の増加に伴い J_d も増加し $V_d = 225$ V においてそれぞれ 2.7 A, 2.8 A であった。 J_i/J_d は type A, C においてそれぞれ最大 0.66, 0.75 であり V_d の増加と共に J_i/J_d は減少した。

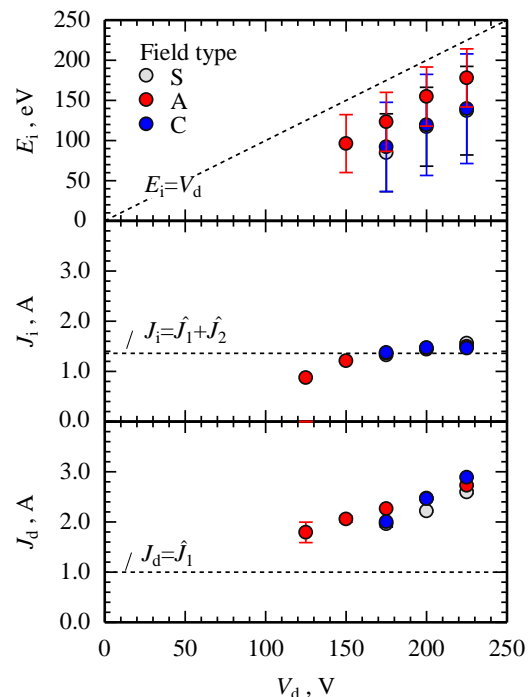


図. 8 V_d vs E_i, J_i and J_d with magnetic field type S, A, and C, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq.

4. 考察

本章では double probe による電子数密度 n_e 、電子温度 T_e の空間分布と、emissive probe による Cathode 電位を基準電位とした空間電位 V_s の空間分布測定結果に基づき、3 章にて得られたイオン加速及び放電特性に関して Ionization と Acceleration に分けて考察する。

4.1 電離特性 図. 6, 図. 8 より type S, A, C の J_i は type N に対して 18 - 25% 高いことから、磁場強度が強いほど J_i も増加することが分かる。各磁場 type ごとの n_e 分布測定結果を図. 9 に示す。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ type N, S, A, and C の n_e 分布である。磁場強度が強い場合 (type S, A, C), 中心軸上から Anode 半径程度にかけて n_e は 10^{18} $1/m^3$ オーダーに達している。type S では中心軸上の $z = 40$ mm 付近において局所的な n_e の増加が確認された。type S は Anode 近傍に対して中心軸上の磁場強度が強い。これは Cylindrical Hall thruster と同様の磁場強度分布である。Yuanyuan らの報告では Anode 近傍の磁場強度が十分に強い場合 (~ 70 mT) 中心軸上において作動ガスが電離することが示唆されている²⁴。type S では Anode 内表面 ($r = 13.5$ mm, $z = 0$ mm) での磁場強

度が 190 mT であるため、同様の n_e 分布になったと考えられる。一方で type N, A では Anode 近傍において局所的に n_e が増加した。

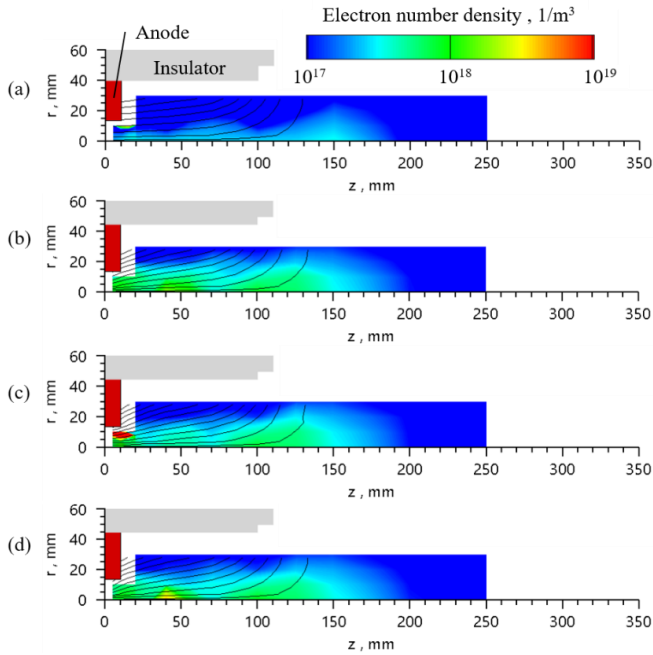


図. 9 n_e distributions with varying magnetic field types (a) type N, (b) type S, (c) type A, and (d) type S, $J_1 = 1.0$ Aeq, $J_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

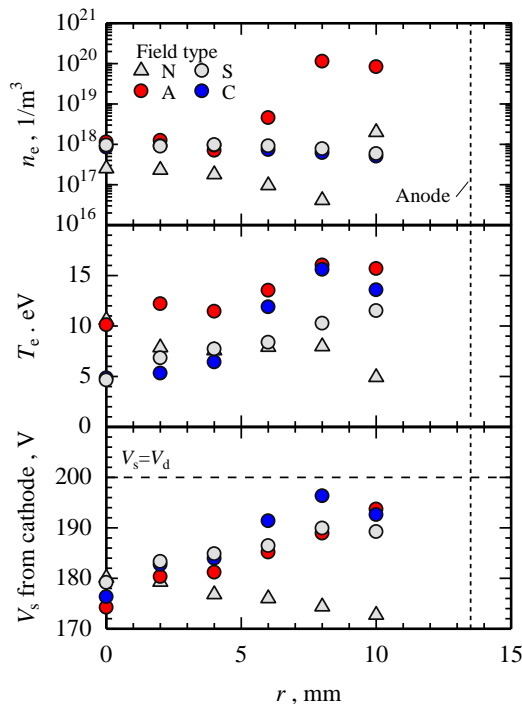


図. 10 n_e , T_e , and V_s distribution on $z = 10$ mm with varying magnetic field types, $J_1 = 1.0$ Aeq, $J_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

$z = 10$ mm における n_e , T_e , V_s の r 方向分布を図. 10 に示す。type S, C において n_e は $r = 0 - 10$ mm にかけて $5.0 \times 10^{17} - 1.0 \times 10^{18}$ $1/m^3$ の範囲で推移する。一方で type N では $r = 10$ mm

において Hollow anode 効果により²⁵電子数密度は局所的に増大し 2×10^{18} $1/m^3$ となるものの $r = 0 - 8$ mm では n_e は $10^{16} - 10^{17}$ $1/m^3$ にとどまっている。Anode 近傍での n_e の急増は type A においても確認され、 $r = 8 - 10$ mm において 10^{20} $1/m^3$ に達した。磁場強度が強い type S, A, C では中心軸場から Anode 面に向かって空間電位は上昇した。中心軸上の空間電位は type A において最も低下し Anode 電位 (= V_a) から 26V 低い。Anode 内部で誘起される半径方向内向き電界は電子を加速し、電子温度は $r = 8 - 10$ mm において Ar の電離電圧 (15.8 eV) 相当に達する。Anode 近傍から供給した作動ガスは電離電圧以上のエネルギーを持つ電子と電離衝突した結果、 n_e が増加し J_i も増加したと考えられる。

4.2 加速特性 図. 5 (b), 図. 7 (b) より、磁場強度と強度分布との両方の変化に応じて $\langle \theta \rangle$ も変化し、磁場 type N, C, S, A の順に小さくなる。各磁場 type における T_e の空間分布を図. 11 に示す。 T_e は最大値を有し、type N では $z = 100$ mm 付近で、type S, A, C では $z = 55 - 85$ mm においてともに 30 eV 程度となった。

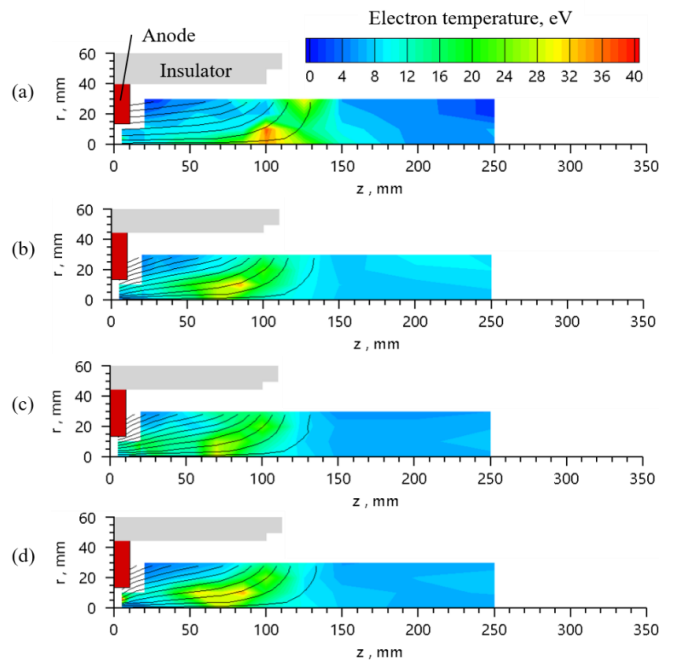


図. 11 T_e distributions with varying magnetic field types (a) type N, (b) type S, (c) type A, and (d) type S, $J_1 = 1.0$ Aeq, $J_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

中心軸上の n_e , T_e , V_s 分布を図. 12 に示す。 T_e が最大となる位置は V_s が降下し始める位置に対応する。 $z = 100$ mm において、type N では T_e が最大となり同位置において V_s が降下し始めるのに対し、type S, A, C ではすでに $V_s = 150$ V 程度まで電位が降下している。一方で磁場強度を増加させた場合 (type S, A, C) では $z = 70 - 80$ mm 付近から軸方向に電位降下が生じ軸方向電界を形成していることから磁場強度の増加により電位降下が始まる位置が Anode 側にシフトすることが分かる。

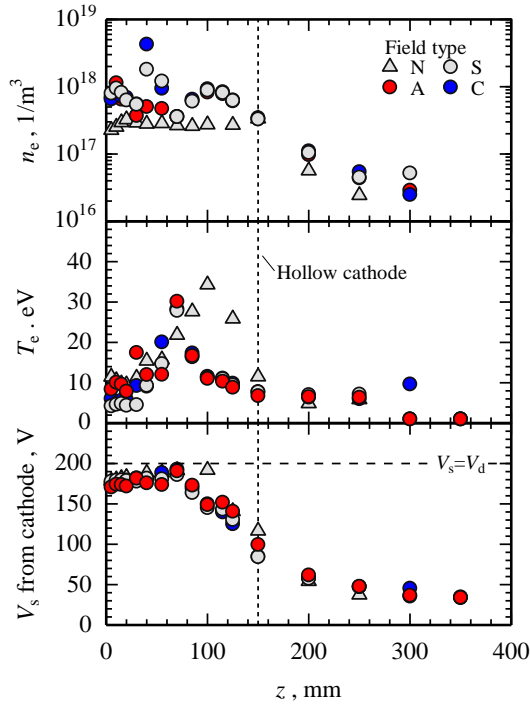


図. 12 n_e , T_e , and V_s distribution on axis with varying magnetic field types, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

V_s の空間分布測定結果を図. 13に示す. type Nにて電位降下が始まる $z = 100$ mm では中心軸上の V_s が最も高いのに対し type S, A, C では中心軸上が最も V_s が低い. 加えて, $z = 0$ mm から電位降下の始まる $z = 55$ mm にかけて中心軸上の V_s は type A が最も低く, type S, C の順に高くなる. よって外向きの半径方向磁場強度勾配 $(\nabla B)_r$ を有する type A において半径方向内向き電界が最も強くイオンを斜め内向きに加速し集光する効果が顕著に働く. その結果 type A において $\langle \theta \rangle$ が最も小さくなり, $(\nabla B)_r$ が小さい type S, $(\nabla B)_r$ が負となる type C の順に $\langle \theta \rangle$ が増加する.

(1)式に示す通り, 静電加速によってイオンが獲得するエネルギー E_i は電離位置における空間電位 (see ϕ_b in 図. 3) から IEDF 計測位置での空間電位 (see ϕ_s in 図. 3) までの電位差によって決定づけられる. 図. 6, 図. 8より E_i は type A において最も高く, type N, S, C 間における E_i の差は 5 eV 程度である. 図. 9に示す通り type A では Anode 近傍で局所的に電離が進行する. $r = 10$ mm, $z = 10$ mm における V_s は 193 V であり, 同条件において RPA により取得した ϕ_b ($= 190$ V) とよく一致した. 一方で type N, S, C において n_e が最大となる位置はそれぞれ $(r, z) = (10, 10), (0, 40), (0, 40)$ でありそこでの V_s はそれぞれ 172 V 181 V, 179 V であった. 図. 13 に示す通り RPA 設置位置 ($z = 350$ mm) での空間電位は磁場 type に依らず同程度であることを考えると電離位置での V_s に応じて E_i は決定され, Hollow anode 効果によって Anode 電位に近い位置でイオンが生成される type A において最も効率的なイオン静電加速が期待できる. また(1)式で定義される E_i の標準偏差は type S, C と比較して type N, A の方が 10-30 eV 程度小さい. ビームエネルギーのばらつきは電離位置のばらつき²⁶, あるいはイオンと電子とのクロー

ン衝突や中性粒子との電荷交換衝突の影響を受ける²⁷. Hollow anode 効果の生じる type N, A では電離位置が Anode 近傍に限定されているため E_i の標準偏差が小さくなったと考えられる.

このように外向き磁場強度勾配を与えることで Hollow anode 効果によって供給流量相当のイオンを生成するとともに, 生成したイオンを印加電圧に近い電位から静電加速しイオンビームとして引き出すことができた. このとき, 全投入電力 ($J_a V_d + J_k V_k$) に対するイオンビーム電力 ($J_i E_i$) の比は最大 46% まで向上した. イオンが加速部壁面から遠ざかる向きに加速される機構は壁面へのイオン衝突とそれに伴う壁面損耗の緩和につながり, Wall-less ion accelerator として推進機への適用が期待できる. 推力の直接計測など推進機としての評価は本論文の範疇外であるため今後の課題とする.

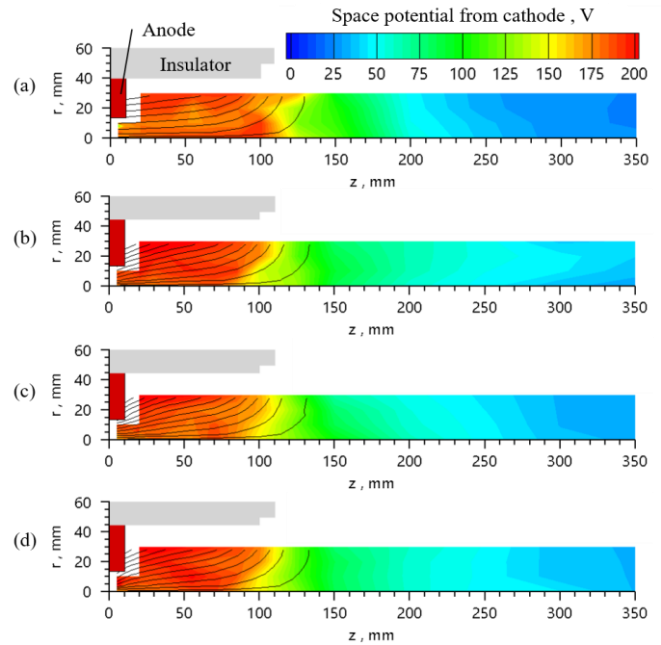


図. 13 V_s distributions with varying magnetic field types (a) type N, (b) type S, (c) type A, and (d) type S, $\hat{J}_1 = 1.0$ Aeq, $\hat{J}_2 = 0.36$ Aeq, $V_d = 200$ V.

参考文献

- ¹ D. Y. Oh, J. S. Snyder, D. M. Goebel, R. R. Hofer, and T. M. Randolph, "Solar electric propulsion for Discovery-class missions," *J. Spacecraft Rockets* **51**, 1822–1835 (2014).
- ² D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (John Wiley & Sons, 2008), pp. 429–446.
- ³ J. Snyder, D. M. Goebel, R. R. Hofer, J. E. Polk, N. C. Wallace, and H. Simpson, "Performance evaluation of the T6 ion engine," *J. Propul. Power* **28**, 371–379 (2012).
- ⁴ Jean-Pierre Boeuf, "Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters," *J. Appl. Phys.* **121**, 011101 (2017).
- ⁵ M. Keidar, I. D. Boyd, and I. I. Beilis, "Plasma flow and plasma-wall transition in Hall thruster channel," *Phys. Plasmas* **8**, 5315–5322 (2001).
- ⁶ I. G. Mikellides, I. Katz, R. R. Hofer, and D. M. Goebel, "Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. Theory and

- validation,” *J. Appl. Phys.* **115**, 043303 (2014).
- ⁷ S. Mazouffre, S. Tskikata and J. Vaudolon, “Development and experimental characterization of a wall-less Hall thruster,” *J. Appl. Phys.* **116**, 243302 (2014).
- ⁸ Julien Vaudolon, Stéphane Mazouffre, Carole Hénaux, Dominique Hamibey and Alberto Rossi, “Optimization of a wall-less Hall thruster,” *Appl. Phys. Lett.* **107**, 174103 (2015).
- ⁹ K. D. Diamant, J. E. Pollard, Y. Raitses, and N. J. Fisch, “Ionization, plume properties, and performance of cylindrical Hall thrusters,” *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 1052–1057 (2010).
- ¹⁰ N. Koch, H. P. Harmann, and G. Kornfeld, “Development and test status of the THALES high efficiency multistage plasma (HEMP) thruster family,” in *Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference*, Princeton, USA (2005), IEPC Paper No. 2005-297.
- ¹¹ N. A. MacDonald, C. V. Young, M. A. Cappelli, and W. A. Hargus, Jr., “Ion velocity and plasma potential measurements of a cylindrical cusped field thruster,” *J. Appl. Phys.* **111**, 093303 (2012).
- ¹² Hui Liu, Guoshun Sun, Yinjian Zhao, Pengbo Chen, Chengyu Ma, Huan Wu and Daren Yu, “Plume Control of a Cusped Field Thruster,” *IEEE. Trans. Plasma Sci.* **43**, 127–129 (2015).
- ¹³ S. Harada, T. Baba, A. Uchigashima, S. Yokota, A. Iwakawa, A. Sasoh, T. Yamazaki, and H. Shimizu, “Electrostatic acceleration of helicon plasma using a cusped magnetic field,” *Appl. Phys. Lett.* **105**, 194101 (2014).
- ¹⁴ A. Uchigashima, T. Baba, D. Ichihara, A. Iwakawa, A. Sasoh, T. Yamazaki, S. Harada, M. Sasahara, and T. Iwasaki, “Anode geometry effects on ion beam energy performance in helicon electrostatic thruster,” *IEEE. Trans. Plasma Sci.* **44**, 306–313 (2016).
- ¹⁵ D. Ichihara, A. Uchigashima, A. Iwakawa and A. Sasoh, “Electrostatic ion acceleration across a diverging magnetic field,” *Appl. Phys. Lett.* **109**, 053901 (2016).
- ¹⁶ J. A. Simpson, “Design of retarding field energy analyzers,” *Rev. Sci. Instrum.* **32**, 1283–1293 (1961).
- ¹⁷ C. Charles, “A review of recent laboratory double layer experiments,” *Plasma Source Sci. Technol.* **16**, R1-R25 (2007).
- ¹⁸ M. L. R. Walker, R. R. Hofer and A. D. Gallimore, “Ion Collection in Hall Thruster Plumes,” *J. Propul. Power* **22**, 205-209 (2006).
- ¹⁹ Homer D. Hagstrum, “Auger Ejection of Electrons from Tungsten by Noble Gas Ions,” *Phys. Rev.* **15**, 325-335 (1954).
- ²⁰ D. L. Brown, C. W. Larson, B. E. Beal, and A. D. Gallimore, “Methodology and historical perspective of a Hall thruster efficiency analysis,” *J. Propul. Power* **25**, 1163–1177 (2009).
- ²¹ Daniel A. Herman and Alec D. Gallimore, “An ion thruster internal discharge chamber electrostatic probe diagnostic technique using a high-speed probe positioning system,” *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 013302 (2008).
- ²² I. H. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics* second edition (Cambridge University Press), pp. 65-67.
- ²³ J. P. Sheehan and N. Hershkowitz, “Emissive probes,” *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**, 063001 (2011).
- ²⁴ Yuanyuan Gao, Hui Liu, Peng Hu, Hongyan Huang and Daren Yu, “The effect of magnetic field near the anode on cylindrical Hall thruster,” *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 035011 (2016).
- ²⁵ A. Anders and S. Anders, “The working principle of the hollow-anode plasma source,” *Plasma Source Sci. Technol.* **4**, 571–575 (1995).
- ²⁶ Lyon B. King and Alec D. Gallimore, “Ion-Energy Distributions in an SPT-100 Plume from Thrust Axis to Backflow,” *J. Propul. Power* **20**, 228-242 (2004).
- ²⁷ L. Garrigues, “Ion properties in a Hall current thruster operating at high voltage,” *J. Appl. Phys.* **119**, 163305 (2016).