

2차원 동역학 시뮬레이션을 활용한 부분적으로 자화된 용량성 결합 플라즈마 전산 모사

손성현*·박준범*·정경재**

** 서울대학교 에너지시스템공학부

2D Kinetic Simulation of Partially Magnetized Capacitively Coupled Plasma Sources

Sung Hyun Son*, Junbeom Park* and Kyoung-Jae Chung**†

**† Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

Partially magnetized capacitively coupled plasma (CCP) sources are investigated using a two-dimensional kinetic simulation code named EDIPIC-2D. A converging numerical solution was obtained for CCP with a 60 MHz power source, while properly capturing the dynamics of electrons and power absorption over a single RF period. The effects of magnetic fields with different orientations were evaluated. Axial magnetic fields caused changes in the spatial distribution of plasma density, affecting the loss channel. Transverse magnetic fields enhanced stochastic heating near the powered electrode, leading to an increase in plasma density while the significant $E \times B$ drift loss compensated for this rise.

Key Words : Capacitively Coupled Plasma, Partially Magnetized Plasma, Kinetic Simulation, Plasma Distribution, Semiconductor Processing

1. 서 론

용량성 결합 플라즈마 (Capacitively Coupled Plasma, CCP)는 반도체 및 디스플레이 제조공정에 널리 활용되고 있는 플라즈마 소스 (plasma source) 이다 [1, 2]. 고성능 반도체 및 대면적 디스플레이에 대한 수요가 증가하며 고 효율 플라즈마 소스를 개발하고자 하는 관심이 높아짐에 따라, 장비 구조, 압력, 전력, RF 주파수 등 다양한 인자를 변화시키며 플라즈마 성능을 향상하기 위한 연구가 진행되어왔다 [3]. 최근에는 이온밀도를 높여 생산수율을 증대하기 위해 초 고주파 (Very High Frequency, VHF) 전원을 CCP에 도입한 VHF-CCP 설비가 개발되어 활용되고 있기도 하다 [4, 5].

자기장을 활용해 플라즈마 소스의 성능을 향상하려는 연구들도 활발히 진행되어왔다 [6–9]. 일반적으로는 100 G 내외의 비교적 약한 자기장을 플라즈마에 인가하는데, 가벼운 전자들은 자화 되지만, 이온들은 거의 반응하지 않기에 플라즈마는 부분적으로 자화 된 (partially magnetized) 상태가 된다 [6]. 이 때 플라즈마는 자기장을 따라 가둬지는데, 이 가둠 효과를 활용해 이온밀도를 높이거나 [7], 자기 비대칭 효과 (magnetic asymmetry effect)를 활용해 이온 에너지 분포를 제어하는 등 [8] 공정 플라즈마 성능을 높이는 방법이 개발되었다.

하지만, 부분적으로 자화 된 플라즈마에는 다양한 불안정성이 존재하므로 플라즈마 가둠 손실을 일으키거나 붕괴를 이끄는 등 플라즈마 성능을 현저히 저하할 수 있으므로 플라즈마의 불안정성에 대한 연구가 필수적이다 [9, 10]. 홀 추력기 등 직류 전원을 사용하는 자화 플라즈마에

†E-mail: jkjlsh1@snu.ac.kr

대해서는 이러한 연구가 다양한 방법으로 수행된 바 있으나[11], 아직 VHF-CCP를 비롯한 고정 플라즈마에 대해서는 관련된 연구가 부재하다.

유체 (Fluid) 시뮬레이션은 다양한 가정의 사용으로 복잡한 물리현상을 포착하는 것에 한계가 있기에, 부분적으로 자화 된 플라즈마의 거동 및 불안정성을 효과적으로 연구하기 위해서는 동역학 (Kinetic) 시뮬레이션을 구축하는 것이 필수적이다 [12]. 하지만 자기장이 인가된 CCP의 동역학 시뮬레이션은 아직 1차원 코드 [13–16] 에 머물러 있기에 추가연구가 필요하다. 본 연구에서는 부분적으로 자화 된 VHF-CCP를 모사하여 플라즈마 거동 및 불안정성을 연구하는 기반이 될 2차원 동역학 시뮬레이션을 구축하였다. 또한, 서로 다른 방향의 자기장을 인가했을 때 플라즈마 거동을 분석해 기초적인 특성을 해석하였다.

2. 배경 이론

부분적으로 자화 된 플라즈마에서의 입자 군의 거동은 아래 방정식으로 표현할 수 있다 [10].

$$\vec{u} = -\hat{\mu} \cdot \vec{E} - \hat{D} \cdot \frac{\nabla n}{n} \quad (1)$$

\vec{u} 은 입자 군의 평균적인 속도, $\hat{\mu}$ 은 유동성, \hat{D} 는 확산계수 (diffusion coefficient), \vec{E} 은 전기장 벡터, n 은 입자의 밀도이다. z 방향의 자기장이 인가되었다고 가정했을 때, $\hat{\mu}$ 과 \hat{D} 은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & \mu_x & 0 \\ \mu_x & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (2-a)$$

$$\hat{D} = \begin{pmatrix} D_{\perp} & D_x & 0 \\ D_x & D_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & D_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (2-b)$$

여기서, 자기장에 평행한 방향의 유동성은 $\mu_{\parallel} = \mu = e/mv_m$, 확산계수는 $D_{\parallel} = D = k_B T/mv_m$ 로 자기장이 없는 상황과 동일하다. 여기서, e 는 전자의 전하량, m 은 입자의 질량, v_m 은 충돌 빈도이며 k_B 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다. 반면, 자기장에 평행하지 않은 방향의 유동성 및 확산계수는 $\mu_{\perp} = \mu_{\parallel}/(1 + \Omega^2)$, $\mu_x = \mu_{\parallel}\Omega/(1 + \Omega^2)$ 및 $D_{\perp} = D_{\parallel}/(1 + \Omega^2)$, $D_x = D_{\parallel}\Omega/(1 + \Omega^2)$ 로 표현된다. 이 때, $\Omega = \omega_c/v_m$ 는 자화 정도에 대한 특성화 인자로, ω_c 는 각 입자가 자기장에 반응하는 cyclotron 주파수로, $\omega_c = |q|B/m$ 이다. 즉, 인가된 자기장의 세기 B 가 커질

수록 Ω 는 증가하며 자기장에 수직인 방향의 플라즈마 양극 확산 (ambipolar diffusion)을 억제한다. 따라서, 플라즈마는 인가된 외부 자기장 방향을 따라서 주로 거동하는 독특한 특성을 지닌다.

이 외에도, 다양한 요인에 의해 발생하는 비확산 수송인 플라즈마 표류 (drift) 현상은 부분적으로 자화 된 플라즈마를 모델링하는 것에 있어 어려운 요소 중 하나이다. 일반적 자화 플라즈마에서의 잘 알려진 표류현상은 Table 1에 소개되어 있는데 [2, 10], 이 중에서도 $E \times B$ 표류는 Rotating spoke 등 특이한 플라즈마 수송 현상을 야기하는 등 [17], 다양한 부분적으로 자화 된 플라즈마에서 지배적인 것으로 알려져 있다. 양극 확산 억제에 의해 플라즈마가 자기장을 따라 가뒀진다고 해도, 아래의 표류현상에 의해 입자 손실이 증가할 수 있는 등 복잡한 수송특성을 지니게 된다.

Table 1. Plasma drifts in magnetized plasma sources

Name	Formula
$E \times B$ drift	$\vec{u}_{E \times B} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$
Polarization drift	$\vec{u}_p = \frac{m}{qB^2} \frac{\partial \vec{E}_{\perp}}{\partial t}$
Gradient drift	$\vec{u}_{\nabla B} = \frac{1}{2} \frac{mu_{\perp}^2}{qB} \frac{\vec{B} \times \nabla B}{B^2}$
Curvature drift	$\vec{u}_R = \frac{mu_{\parallel}^2}{qB} \frac{\vec{R}_c \times \vec{B}}{R_c^2}$
Diamagnetic drift	$\vec{u}_{dia} = \frac{\nabla p \times \vec{B}}{enB^2}$

3. 시뮬레이션 방법

2D3V PIC 시뮬레이션인 EDIPIC-2D (Electrostatic Direct Implicit Particle-In-Cell 2D) 코드 [18] 를 활용해 자기장이 인가된 VHF-CCP를 모사하였다. 시뮬레이션 알고리즘에 대한 상세한 설명은 본 코드의 1D 버전 [18] 에 대한 선행논문에서 상세히 소개되어 있다. 이 코드는 Monte Carlo Collision (MCC) 기법을 활용해 입자 충돌 및 거동을 반영하고 있으므로 보다 적은 가정을 바탕으로 플라즈마 시뮬레이션을 수행할 수 있고, MPI (Message Passing Interface) 방법으로 병렬화가 되어 있기에 기존 단일 코어 시뮬레이션에 비해 속도가 빠르다는 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로, 본 코드는 non-local kinetics 해석, 홀 추력기 모사, 기체 방전물리학 연구 [19–24] 등 다양한 저온 플라즈마 상황에서 활발하게 활용되고 있다.

본 연구에서 VHF-CCP를 모사하기 위해 사용한 시뮬레이션 모형은 Fig 1과 같다. 원통형인 플라즈마 소스의 단면을 (x, y) 평면에 투영해 2차원 시뮬레이션으로 모사하였다. 시뮬레이션 영역은 $\Delta x = \Delta y = 100 \mu\text{m}$ 의 균등한 간격의 격자로 구성되었으며, $\Delta t = 10 \text{ ps}$ 의 간격마다 계산을 수행해 대부분의 사공간적 물리현상을 포착할 수 있다.

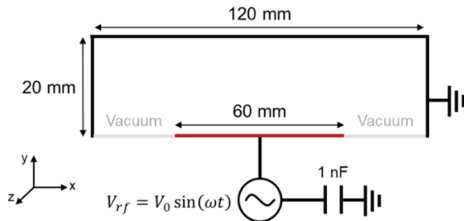


Fig. 1. Simulation domain of the VHF-CCP source.

붉은색 선으로 표시된 길이 60 mm의 전력인가 전극 (powered electrode)은 $\omega = 2\pi f$ 의 주파수를 가진 사인(sine)형 RF 전원에 연결되어 있다. 이 전원에는 1 nF의 크기를 가진 차단 축전기 (blocking capacitor)가 연결되어, RF 전원에서의 자기 바이어스 (self-bias) 효과를 시뮬레이션에 고려하였다. 이 전극은 검정색 선으로 표시된 넓은 접지 전극을 마주보고 있어, 통상적인 공정 CCP와 같이 기하적으로 비대칭한 구조를 가진다. 각 전극에서 이온에 의한 이차전자 방출 계수는 $\gamma_i = 0.15$ 로 가정하였다. RF 전원의 주파수는 $f = 60 \text{ MHz}$, 진폭 V_0 는 300 V 로 가정하였으며 반응 기체는 Argon, 압력은 40 mTorr로 설정하였다.

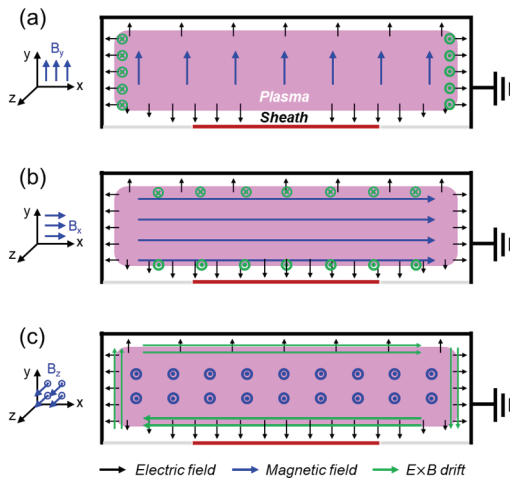


Fig. 2. Simulation domain of VHF-CCP sources with (a) y-direction (axial), (b) x-direction (transverse), and (c) z-direction (transverse) uniform magnetic fields, respectively.

이 연구에서는 Fig 2와 같이, (x, y) 평면에 형성된 VHF-CCP에 x, y, z 방향의 자기장을 인가하여 플라즈마 거동을 연구하였다. 모든 시뮬레이션 상황에서, 자기장의 세기는 공간적으로 균일하다고 가정하였다.

여기에서, 시 평균 전기장은 검정색, 외부 인가 자기장은 파란색, $E \times B$ 표류의 방향은 녹색으로 표시되었다. 본 연구에서 사용된 시뮬레이션이 2차원 좌표계를 사용하기 때문에, 평면에 들어가거나 나가는 방향의 플라즈마 표류는 무시된다. 따라서, Fig 2(b)와 Fig 2(c)는 전극 수평방향의 (transverse) 자기장을 인가한다는 점에서 동일하나, Fig 2(b)에서는 표류효과가 무시된 상황의 플라즈마 산포, Fig 2(c)에서는 표류효과를 고려한 플라즈마 산포를 얻을 수 있다는 차이점을 가진다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 Non-magnetized VHF-CCP 모사

Fig 1에 주어진 상황에 대해 수십 마이크로 초 동안 시뮬레이션을 수행하여 자기장이 인가되지 않은 VHF-CCP에 대한 수렴해를 획득하였다. 전자 밀도의 분포로 대표된 시뮬레이션 결과의 시변화는 Fig 3에 나타나 있다. 약 $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 의 중심밀도를 가지고, 전극 바깥으로 갈수록 밀도가 감소하는 경향을 가진다. 이는 통상적인 CCP의 전자 밀도 분포와 유사한데, 플라즈마의 양극확산에 의한 결과로 알려져 있다 [2, 10].

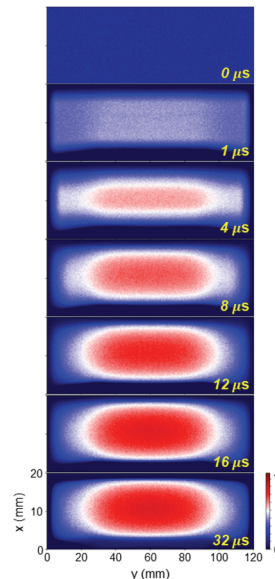


Fig. 3. Time-varying electron density ($\times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) distributions of a VHF-CCP source.

해가 수렴하는 것을 확인한 이후, 본 연구에서 구축한 시뮬레이션이 적합한지에 대해 검토하기 위해서 60MHz 전원의 주기 ($\tau_{RF} \approx 16.67$ ns) 내에서의 플라즈마 거동을 확인하였다. Fig 4(a)는 한 주기 내 RF 전원의 전위 V_{rf} 및 전극과 플라즈마 사이 쉬스에 인가된 전압 V_{sh} 을 나타낸다. 통상적으로 쉬스의 두께는 쉬스 전압에 비례한다고 알려져 있는데, 이러한 사실에 비추었을 때 $T_1 \sim T_3$ 는 전극 앞의 쉬스의 두께가 감소하는 시기, T_4 는 쉬스가 완전히 collapse되는 시점이며 $T_5 \sim T_7$ 는 쉬스의 두께가 팽창하는 시기, T_8 는 쉬스 두께가 최대인 시점이다. 각 시점에서의 전자 온도를 Fig 4(b)에서 확인할 수 있다. $T_5 \sim T_7$ 에서는 쉬스 전압이 증가하므로, 전극 앞의 쉬스가 팽창한다. Stochastic 가열 기작 [25] 을 통해 전자는 에너지를 얻으며, 벌크(Bulk) 영역으로 이동하며 에너지를 전달한다. 이와 반대로, $T_1 \sim T_3$ 에서는 쉬스 전압이 감소하며 쉬스가 수축한다. 전류균형을 맞추기 위해, 전극 앞의 쉬스가 수축하면 접지전극 앞에서의 쉬스가 팽창하므로 해당 영역에서 전자가 에너지를 얻는 것을 확인할 수 있다. 같은 시점에서 전자밀도 분포는 벌크 영역에서는 거의 일정하고, 쉬스 두께가 매우 얇아진 T_4 에서는 전극 근처까지 전자가 침투하는 것을 Fig 4(c)에서 확인할 수 있다. 이를 통해, 본 시뮬레이션이 VHF-CCP에 대한 플라즈마 분포가 수렴하는 조건을 잘 모사하고, RF 주기 내 플라즈마 거동을 포착하고 있음을 확인하였다.

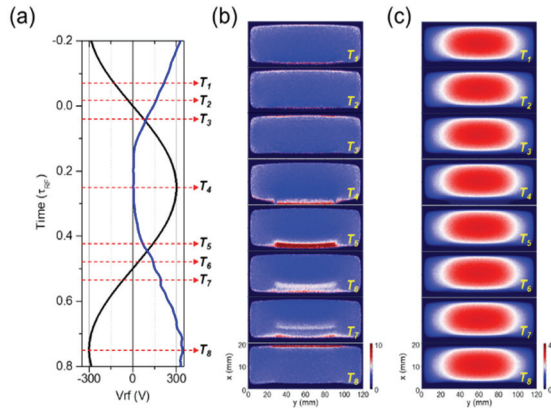


Fig. 4. Time-varying (a) RF power potential (black) and Sheath voltage (blue) in a single RF period. Corresponding (b) electron temperature (eV), and (c) electron density ($\times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) distributions.

4.2 Partially magnetized VHF-CCP 모사

4.1에서 구축한 Non-magnetized VHF-CCP 시뮬레이션의 수렴해를 초기조건으로 하여, Fig 2와 같이 다양한 방향의

자기장을 인가한 상황을 모사하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig 5는 Fig 2(a)에 표시된 것과 같이 y 방향으로 자기장이 인가된 뒤, $10 \mu\text{s}$ 이후의 전자밀도 분포를 나타낸다. 0 G, 25 G, 37.5 G, 50 G로 점진적으로 자기장의 세기를 증가시키에 따라서, 중심부의 전자밀도는 감소하고 전극 경계에 가까운 외곽부의 전자밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (2)에 표시된 것처럼, 플라즈마가 자기장을 따라 가뒀기 때문이다. 자기장을 인가함에 따라, 자기장의 수직 방향인 x방향의 플라즈마 확산이 억제된다. 따라서, 중심부에서는 플라즈마가 하단 및 상단의 전극으로 유실되는 것이 상대적으로 더 쉬워지기에 밀도가 감소한다. 반면, 외곽부에서는 반경방향 벽면으로 소실되는 양이 적어지기 때문에, 밀도가 상대적으로 높아진다. 축 방향 자기장의 세기를 조절하면서, 플라즈마의 반경방향 산포가 변화하는 것을 확인하였다.

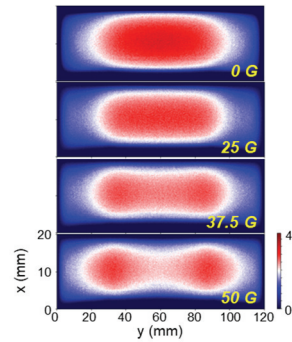


Fig. 5. Electron density ($\times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) distributions of VHF-CCPs with different axial magnetic field intensities.

Fig 6은 Fig 2(b)와 Fig 2(c)에 표시된 것과 같이 전극표면에 수평한 방향의 자기장을 인가한 뒤 $10 \mu\text{s}$ 이후의 전자밀도 분포를 나타낸다. 각 상황에서 자기장의 세기는 50 G로 서로 같다. x 방향 자기장을 인가한 상황에서, 반경 방향의 플라즈마 대칭성은 거의 깨지지 않으며 전극 근처에서의 플라즈마 밀도가 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 전극 쉬스 근처에 전자들이 머무르는 시간이 증가하기 때문에, Stochastic 가열의 효율이 더 높아지기 때문이다 [26–27]. 하지만, 본 연구에서 활용한 시뮬레이션은 2차원에서의 플라즈마 거동만 반영할 수 있기 때문에, x 방향 자기장을 인가하면 E \times B 표류에 의한 플라즈마 소실을 무시된 상황이 된다. 수평방향 자기장의 효과를 확인하기 위해, 표류를 (x, y) 평면에서 포착할 수 있는 z 방향 자기장을 인가해 시뮬레이션을 수행하였다. 전극 근처의 밀도가 상대적으로 상승하는 것은 유사하나, 음의 x

방향으로 플라즈마가 표류해 소실되는 현상이 존재함을 확인하였다. 이는 z 방향 자기장을 인가한 상황에서 시간에 따른 전자 밀도의 분포를 나타낸 Fig. 7에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

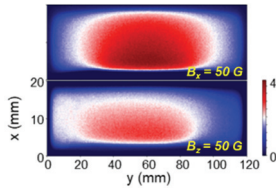


Fig. 6. Electron density ($\times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) distributions of VHF-CCPs with differently oriented transverse (x and z direction) magnetic fields.

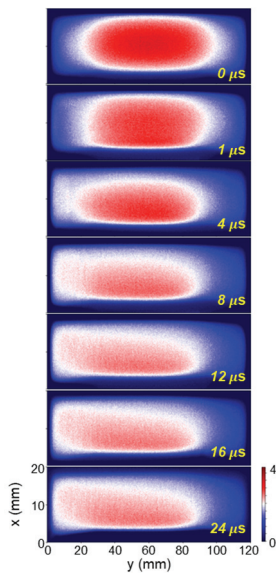


Fig. 7. Time-varying electron density ($\times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) distributions of VHF-CCPs with z direction magnetic fields.

이 결과를 바탕으로, VHF-CCP에 수평방향 자기장이 인가된 경우 대칭적으로 자기장 구조를 만드는 등의 방법 [28] 으로 $E \times B$ 표류를 상쇄해야만 x 방향의 자기장을 걸었을 때의 결과와 같이 전극 근처에서 플라즈마 밀도를 증대할 수 있음을 예상할 수 있다.

5. 결론

저온 플라즈마 시뮬레이션 코드인 EDIPIC-2D를 활용하여, VHF-CCP를 모사할 수 있는 2차원 동역학 시뮬레이션

을 구축하는 것에 성공하였으며, 다양한 방향의 자기장을 인가하며 이에 따른 플라즈마의 거동을 분석하였다. 전극에 수직인 방향의 자기장을 인가했을 때, 자기장의 크기가 증가함에 따라 플라즈마 소실 영역의 변화로 인해 플라즈마 밀도의 분포가 중심이 높은 형태에서 외곽이 높은 형태로 변화했다. 전극에 수평인 방향의 자기장을 인가했을 때, 전극 근처에서의 밀도가 증가하는 것을 확인하였으며 $E \times B$ 표류에 의한 플라즈마 소실이 치명적일 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 다양한 구조의 자기장을 인가한 상황에서의 VHF-CCP 산포 최적화, 불안정성 해석 등 다양한 후속연구를 진행함에 있어 기반이 되는 시뮬레이션을 제공한다. 이를 활용해 부분적으로 자화 된 플라즈마 소스를 활용한 물리 연구 및 반도체 공정 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Donnelly, Vincent M, and Avinoam Kornblit. "Plasma Etching: Yesterday, Today, and Tomorrow." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 31, no. 5 (2013): 050825.
2. Lieberman, Michael A, and Allan J Lichtenberg. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Vol. 30, WILEY (1994).
3. Chabert, Pascal, Tsanko Vaskov Tsankov, and Uwe Czarnetzki. "Foundations of Capacitive and Inductive Radio-Frequency Discharges." *Plasma Sources Science and Technology* 30, no. 2 (2021): 024001.
4. Lieberman, MA, JP Booth, P Chabert, JM Rax, and MM Turner. "Standing Wave and Skin Effects in Large-Area, High-Frequency Capacitive Discharges." *Plasma Sources Science and Technology* 11, no. 3 (2002): 283.
5. Chabert, Pascal. "Electromagnetic Effects in High-Frequency Capacitive Discharges Used for Plasma Processing." *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, no. 3 (2007): R63.
6. Tsankov, Tsanko V, Pascal Chabert, and Uwe Czarnetzki. "Foundations of Magnetized Radio-Frequency Discharges." *Plasma Sources Science and Technology* 31, no. 8 (2022): 084007.
7. Maurmann, S, VA Kadetov, AAI Khalil, HJ Kunze, and U Czarnetzki. "Thomson Scattering in Low Temperature Helium Plasmas of a Magnetic Multipole Plasma Source." *Journal of Physics D: Applied Physics* 37, no. 19 (2004): 2677.
8. Kushner, Mark J. "Modeling of Magnetically Enhanced Capacitively Coupled Plasma Sources: Ar Discharges." *Journal of applied physics* 94, no. 3 (2003): 1436-47.
9. Kim, June Young, Jae Young Jang, Jaeyoung Choi, Jong-in Wang, Won Ik Jeong, MAI Elgarhy, Geunwoo

- Go, Kyoung-Jae Chung, and YS Hwang. "Magnetic Confinement and Instability in Partially Magnetized Plasma." *Plasma Sources Science and Technology* 30, no. 2 (2021): 025011.
10. Chen, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Vol. 1: Springer (1984).
11. Taccogna, F, and Laurent Garrigues. "Latest Progress in Hall Thrusters Plasma Modelling." *Reviews of Modern Plasma Physics* 3 (2019): 1-63.
12. Boeuf, Jean-Pierre, and Laurent Garrigues. " $E \times B$ Electron Drift Instability in Hall Thrusters: Particle-in-Cell Simulations Vs. Theory." *Physics of Plasmas* 25, no. 6 (2018): 061204.
13. Yang, Shali, Ya Zhang, Hong-Yu Wang, Shuai Wang, and Wei Jiang. "Electrical Asymmetry Effects in Magnetized Capacitively Coupled Plasmas in Argon." *Plasma Sources Science and Technology* 26, no. 6 (2017): 065011.
14. Sun, Jing-Yu, Quan-Zhi Zhang, Jia-Rui Liu, Yuan-Hong Song, and You-Nian Wang. "Electrical Asymmetry Effect in Inhomogeneously Magnetized Capacitively Coupled Plasmas." *Plasma Sources Science and Technology* 29, no. 11 (2020): 114002.
15. Sharma, Sarveshwar, Igor D Kaganovich, Alexander V Khrabrov, Predhiman Kaw, and Abhijit Sen. "Spatial Symmetry Breaking in Single-Frequency Ccp Discharge with Transverse Magnetic Field." *Physics of Plasmas* 25, no. 8 (2018): 080704.
16. Wang, Li, De-Qi Wen, Peter Hartmann, Zoltán Donkó, Aranka Derzsi, Xi-Feng Wang, Yuan-Hong Song, You-Nian Wang, and Julian Schulze. "Electron Power Absorption Dynamics in Magnetized Capacitively Coupled Radio Frequency Oxygen Discharges." *Plasma Sources Science and Technology* 29, no. 10 (2020): 105004.
17. McDonald, Michael S, and Alec D Gallimore. "Rotating Spoke Instabilities in Hall Thrusters." *IEEE Transactions on Plasma Science* 39, no. 11 (2011): 2952-53.
18. Sydorenko, D. "Particle-in-Cell Simulations of Electron Dynamics in Low Pressure Discharges with Magnetic Fields." PhD thesis, University of Saskatchewan Saskatoon (2006).
19. Sydorenko, D, I Kaganovich, Y Raitses, and A Smolyakov. "Breakdown of a Space Charge Limited Regime of a Sheath in a Weakly Collisional Plasma Bounded by Walls with Secondary Electron Emission." *Physical review letters* 103, no. 14 (2009): 145004.
20. Carlsson, Johan, Alexander Khrabrov, Igor Kaganovich, Timothy Sommerer, and David Keating. "Validation and Benchmarking of Two Particle-in-Cell Codes for a Glow Discharge." *Plasma Sources Science and Technology* 26, no. 1 (2016): 014003.
21. Sharma, Sarveshwar, Sanket Patil, Sudip Sengupta, Abhijit Sen, Alexander Khrabrov, and Igor Kaganovich. "Investigating the Effects of Electron Bounce-Cyclotron Resonance on Plasma Dynamics in Capacitive Discharges Operated in the Presence of a Weak Transverse Magnetic Field." *Physics of Plasmas* 29, no. 6 (2022): 063501.
22. Sun, Haomin, Jian Chen, Igor D Kaganovich, Alexander Khrabrov, and Dmytro Sydorenko. "Electron Modulational Instability in the Strong Turbulent Regime for an Electron Beam Propagating in a Background Plasma." *Physical Review Letters* 129, no. 12 (2022): 125001.
23. Jin, Biemeng, Jian Chen, Alexander V Khrabrov, Zhibin Wang, and Liang Xu. "Particle-in-Cell Simulations of the Direct-Current Argon Breakdown Process in the 10–300 Kv Range." *Plasma Sources Science and Technology* 31, no. 11 (2022): 115015.
24. Xu, Liang, Alexander V Khrabrov, Igor D Kaganovich, and Timothy J Sommerer. "Investigation of the Paschen Curve for Helium in the 100–1000 Kv Range." *Physics of Plasmas* 24, no. 9 (2017): 093511.
25. Kaganovich, ID, VI Kolobov, and LD Tsendin. "Stochastic Electron Heating in Bounded Radio-Frequency Plasmas." *Applied physics letters* 69, no. 25 (1996): 3818-20.
26. Lieberman, Michael A, Allan J Lichtenberg, and SE Savas. "Model of Magnetically Enhanced, Capacitive Rf Discharges." *IEEE transactions on plasma science* 19, no. 2 (1991): 189-96.
27. Lee, SH, SJ You, Hong-Young Chang, and JK Lee. "Electron and Ion Kinetics in Magnetized Capacitively Coupled Plasma Source." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 25, no. 3 (2007): 455-63.
28. Winter, J, A Hecimovic, T De los Arcos, M Böke, and V Schulz-Von Der Gathen. "Instabilities in High-Power Impulse Magnetron Plasmas: From Stochasticity to Periodicity." *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, no. 8 (2013): 084007.

접수일: 2023년 3월 9일, 심사일: 2023년 3월 16일,
게재확정일: 2023년 3월 16일