

ECR 等离子体产生的电子束源设计和仿真分析

张维嘉 刘海浪 彭治国* 曾李 钟可宁
(桂林电子科技大学 机电工程学院 桂林 541000)

Design and Numerical Simulation of Electron Beam based on ECR Plasma Source

ZHANG Weijia, LIU Hailang, PENG Zhiguo*, ZENG Li, ZHONG Kening

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China)

Abstract The electron cyclotron resonance (ECR) discharge system, generating an electron beam, can effectively address the shortcomings of traditional thermal cathode electron guns, such as short lifespan and unstable performance. To investigate the characteristics of an electron beam source, a simulation analysis of an ECR discharge system operating at 2.45 GHz with a 100 W microwave input was conducted. Argon gas was used as the discharge gas, with processes such as collisions, excitation, and ionization incorporated into the simulation. An ECR discharge model was established to explore the variation of plasma parameters within the ECR plasma, such as electron density and electron temperature, under different working pressures, and to calculate the electron emission current based on these parameters. The results indicate that as the working pressure increased from 0.005 Pa to 0.04 Pa, the electron emission current increased from 60.5 mA to 85.2 mA, meeting the beam source requirements for processing. This study provides a reference for the design of ECR plasma cathode electron guns.

Keywords Electron cyclotron resonance, Plasma discharge, Electron gun, Electron beam source, Simulation analysis

摘要 电子回旋共振(ECR)放电系统作为电子枪束源,能有效解决传统热阴极电子枪寿命短,性能不稳定的缺陷。为探究 ECR 等离子体产生的电子束源时等离子体的参数变化,基于 2.45 GHz, 100 W 的微波输入,开展 ECR 放电系统的仿真分析,以氩气体作为放电气体,考虑碰撞、激发、电离等过程。建立 ECR 等离子体放电模型,探究不同工作气压条件下 ECR 等离子体内的电子密度、电子温度等参数,并以此计算电子发射电流。结果表明,工作气压从 0.005 Pa 增加至 0.04 Pa 的过程中,电子发射电流从 60.5 mA 增加至 85.2 mA,满足电子束加工所需的束源要求,为设计 ECR 等离子体阴极电子枪设计提供参考。

关键词 电子回旋共振 等离子体放电 电子枪 电子束源 仿真分析

中图分类号: O461;V26;V46

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202410008

电子束具有能量密度高、扫描速度快、可精密控制等优点,被广泛应用于材料成型与加工之中^[1]。然而,传统热阴极电子束源阴极寿命短、性能不稳定,导致电子束质量和稳定性有限,在增材制造领域难以产生大规模应用。采用等离子体源产生的电子束有阴极寿命长、电子发射密度高,还有对真空条件不敏感,可在多种环境中运行等优点^[2]。

放电产生等离子体的方式包括空心阴极放电、电弧放电、微波放电等多种类型^[3]。许海鹰等^[4-5]研

究了冷阴极气体放电型电子枪,其原理是在阴阳极之间施加电压形成等离子体,等离子体在电场作用下轰击阴极表面,产生二次电子,最终形成电子束源。但空心阴极具有使阴极劣化、污染导致寿命降低、放电腔几何形状复杂等问题^[6]。

电子回旋共振(ECR)等离子体产生电子束源具有高电离度、无需阴极等特点^[6]。从 ECR 等离子体中引出电子束流的质量取决于放电系统中的等离子体参数,Ding Z F 等^[7]通过实验研究得出等离子体

密度、粒子流方向性等特性对于等离子体加工至关重要。Kornilov S Y 等^[8]通过调整等离子体参数和电子光学系统以获得符合要求的窄聚焦电子束。为了从等离子体中引出电子束流, Takao Y 等^[9]研究了微波 ECR 中和器的电子提取机制, 将氩放电的电子回旋共振等离子体进行模型仿真分析。

然而, 在 ECR 等离子体中, 产生等离子体的多种条件的相互耦合, 此时, 等离子体的物理结构、化学特性对于气体持续放电相当重要。这些特性不但决定了系统中气体的放电情况, 也会影响电子发射密度, 从而影响电子束的质量。

为了探究 ECR 等离子体产生的电子束源时等离子体的参数与电流发射情况, 本文以氩气作为放电气体, 仿真模拟其在 2.45 GHz 微波的加热下, 产生等离子体的过程。建立特定的 ECR 等离子体放电模型, 分析等离子体的各项参数在不同工作气压下的变化, 并以此计算电子发射电流。

1 原理分析与模型构建

1.1 ECR 原理

在 ECR 系统中充入放电气体氩气, 气体在通过电场的作用下放电, 产生的等离子体在特定磁场作用下, 电磁波和作回旋运动的电子发生共振, 产生高密度的等离子体。

ECR 中, 由微波加热获得的高能电子通过与氩原子发生碰撞, 电离氩原子生成氩离子和自由电子, 从而形成和维持等离子体。考虑电子(e)、激发态的氩原子(Ar^s)、氩原子(Ar)和氩离子(Ar⁺)的等离子体反应, 其反应方程式^[10]如表 1 所示。

表 1 放电系统等离子体反应方程式

Tab. 1 Plasma reaction formula of discharge system

| 反应类型 | 反应方程式 | 能量损失 |
|------|---|----------|
| 弹性碰撞 | $e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$ | 0 |
| 激发 | $e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^s$ | 11.5 eV |
| 退激 | $e + \text{Ar}^s \rightarrow e + \text{Ar}$ | -11.5 eV |
| 电离 | $e + \text{Ar} \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$ | 15.8 eV |
| 电离 | $e + \text{Ar}^s \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$ | 4.427 eV |
| 电离 | $\text{Ar}^s + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar} + \text{Ar}^+$ | / |
| 去激发 | $\text{Ar}^s + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}$ | / |
| 去激发 | $\text{Ar}^s \rightarrow \text{Ar}$ | / |
| 电荷中和 | $\text{Ar}^+ \rightarrow \text{Ar}$ | / |

ECR 中, 电离率通常低于 10%, 此时电子-离子的碰撞频率相对较低, 对等离子体整体影响较小, 故忽略。而 Hussein M A 等^[11]指出离子-离子碰撞的主要作用是将能量从平行于磁场的方向重新分配到垂直于磁场的方向, 故亦可忽略。

根据 ECR 的共振条件:

$$f_{ce} \approx 2.8B \quad (1)$$

式中, f_{ce} 为电子回旋频率, B 为共振时的磁场强度, 在一般的 ECR 系统中, 微波功率为 2.45 GHz, 当 $f = f_{ce} = 2.45 \text{ GHz}$ 时, 得共振时的磁感应强度 $B_{res} \approx 875 \text{ Gs}$ 。

ECR 中, 磁场的分布和变化是等离子体产生和维持有重要影响。以 Maxwell 方程组模拟放电系统中加热等离子体的电磁场:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e \quad (4)$$

式(2)~(4)中, \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{J} 为等离子体电流密度; \mathbf{A} 为磁矢势; $\sigma \mathbf{E}$ 为电子在电场中运动引起的电流密度; $\sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 为电子在磁场中运动引起的电流密度; \mathbf{J}_e 为线圈电流密度, 其表达式为:

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{coil}}{A} \mathbf{e}_{coil} \quad (5)$$

式中, N 为线圈匝数, I_{coil} 为线圈电流, A 为线圈横截面面积, \mathbf{e}_{coil} 为线圈电流的单位矢量。

1.2 ECR 放电模型构建

在 ECR 等离子体中, 采用描述电子密度 n_e 和能量密度 n_ε 的漂移扩散方程, 这可以描述电子在一般环境下的宏观运动。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = \mathbf{R}_e - (u \cdot \nabla) n_e \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = \mathbf{S}_{en} - u \cdot \nabla n_\varepsilon$$

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = \mathbf{S}_{en} - u \cdot \nabla n_\varepsilon +$$

$$(\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_{in})/q \quad (7)$$

式(6)、(7)分别为粒子守恒方程和能量守恒方程, 描述了电子在空间和时间上的分布变化, 其中包括了电子由于电场或磁场引起的漂移、由于浓度梯度引起的扩散现象, 以及电子产生或消失的源项对电子的影响。式中, \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{R}_e 为电子产生项, 表示电子和中性电子碰撞产生新电子的过程; Γ_e 为电子通量; Γ_ε 为能量通量; \mathbf{S}_{en} 为能量源项, ECR

放电模型的能量源为微波; Q 为外部输入的电子能量; Q_m 为内部生成的电子能量; q 为电子电荷量。

其中, 电子通量和能量通量的计算式

$$\Gamma_e = -\mu_e \cdot \nabla n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (8)$$

$$\Gamma_\varepsilon = -\mu_\varepsilon \cdot \nabla n_\varepsilon - D_\varepsilon \cdot \nabla n_\varepsilon \quad (9)$$

式中, μ_e 为电子迁移率; D_e 为电子扩散系数; μ_ε 为电子能量迁移率; D_ε 为电子能量扩散系数, 其关系为:

$$D_e = \mu_e T_e, \quad D_\varepsilon = \mu_\varepsilon T_e, \quad \mu_\varepsilon = \left(\frac{5}{3}\right) \mu_e \quad (10)$$

为了简化计算, 假设等离子体在整个放电腔内是均匀的, 并且电子能量依照麦克斯韦分布, 当 ECR 等离子体达到平衡时, 抽取等离子体内的电子, 电子发射电流密度 J_{em} 和电子发射电流 I_{em} 由 Boltzmann 关系确定^[12], 假设电子从开放的等离子体表面发射, 则发射方程:

$$I_{em} = J_{em} S_e \quad (11)$$

式中, $S_e = \pi r_e^2$ 为电子发射口面积, r_e 为电子发射口半径。

热电子电流密度 J_{em} :

$$J_{em} = j_{ex} \exp\left[-\frac{e(\varphi_{pl} - \varphi_c)}{kT_e}\right] \quad (12)$$

式中, j_{ex} 是等离子体中电子电流密度, φ_{pl} 和 φ_c 分别是放电系统中等离子体电位和收集极电位, k 是 Boltzmann 常数, T_e 是电子温度。

电子电流密度 j_{ex} :

$$j_{ex} = en_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2} \quad (13)$$

式中, e 为电子电荷量, n_e 为等离子体中的单位体积内的电子数, 即电子密度, m_e 为电子的静止质量。

2 几何模型与磁场条件

ECR 等离子体放电系统几何图形是以圆柱坐标 (z, r) 设立的对称几何体。该装置为 $\Phi 300 \times \Phi 150$ mm 的腔体, 这一空心腔体是氩气放电的区域。设置环状的电磁线圈域, 线圈的位置和线圈电流决定了磁场的分布情况。中间是输入微波的同轴电缆。其装置尺寸见表 2。

放电装置的结构与磁场分布如图 1(a) 所示, 为了达到 ECR 共振条件所需的磁感应强度 $B_{res} \approx 875$ Gs, 线圈匝数为 5000 匝, 通过线圈的电流为 2.0A, 计算得出最大磁感应强度大于 1000 Gs, 满足 ECR 共振条件所需的磁感应强度要求。

表 2 ECR 等离子体放电系统结构装置尺寸

Tab. 2 Sizes of simulated structure of ECR plasma discharge system

| 区域 | 尺寸/mm |
|--------|------------------------|
| 气体反应区域 | 半径 150, 高度 150 |
| 微波输入区域 | 半径 10, 高 65, 输入/出口半径 1 |
| 电磁区域 | 内径 240, 截面宽 10, 高 60 |

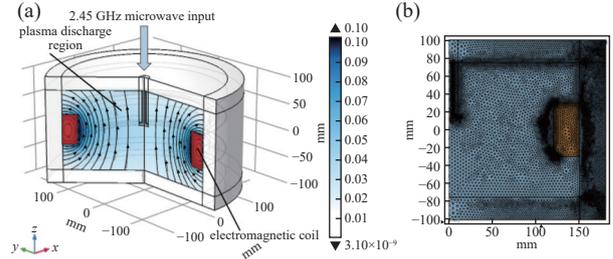


图 1 ECR 放电系统。(a) 结构与磁场分布, (b) 网格划分
Fig. 1 ECR discharge system. (a) Structure and magnetic field distribution, (b) mesh

2.45 GHz 微波从放电系统顶部, 半径为 10 mm 的同轴电缆中输入至放电腔内, 为了使磁场强度最大的区域落在放电区域中部, 设置尺寸为 10 mm×60 mm 的线圈域, 线圈域和同轴电缆的材料设置为铜。其余区域为空气域。

设定电磁波、电磁场, 与等离子体模型中的粒子密度、温度参数进行耦合, 形成由电磁波加热, 电磁场共振的宏观等离子体反应模型, 该模型通过 COMSOL Multiphysics 进行求解, 求解模型的网格如图 1(b) 所示, 分区域划分为: 内壁面边界采用 1.5 mm 边界网格、微波同轴电缆区域采用 1 mm 三角形网格、微波输出端边界采用 0.5 mm 边界网格, 靠近共振点的区域采用自适应细化边界网格, ECR 腔体和其他区域采用预定义的细化或超细化三角形网格。

3 仿真结果与计算分析

为了降低真空度对电子轨迹的影响, ECR 等离子体放电系统中的工作气压不宜过大。取微波功率为 100 W, 工作气压取 0.005、0.01、0.02、0.04 Pa 进行仿真计算, 研究放电特性。

3.1 电子密度

不同工作气压下电子密度如图 2 所示, 电子密度峰值分别为 $8.72 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 、 $9.63 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 、 $10.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 、 $10.03 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 。

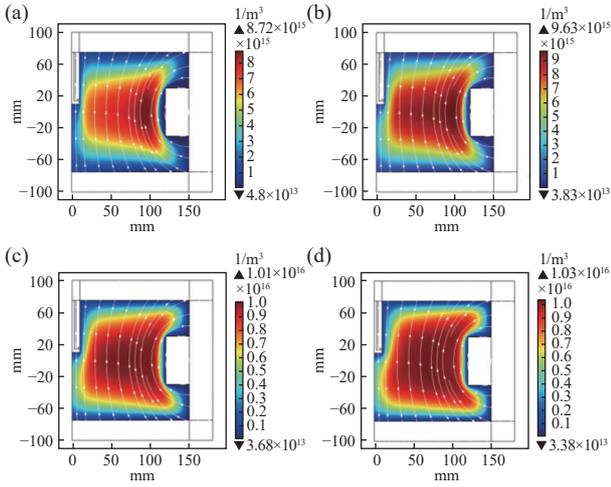


图2 不同工作气压下的电子密度与磁场分布图。(a) 0.005 Pa, (b) 0.01 Pa, (c) 0.02 Pa, (d) 0.04 Pa

Fig. 2 Electron density and magnetic field distribution under different pressures. (a) 0.005 Pa, (b) 0.01 Pa, (c) 0.02 Pa, (d) 0.04 Pa

由图2可知,电子密度在径向和轴向均存在显著的密度梯度,其分布与磁场线形状基本吻合。证明在该区域内,微波和作回旋运动的电子间发生共振,继续电离周围的气体分子。

不同工作气压下放电系统中部(0, r)电子密度沿径向距离分布如图3所示。在相同的位置下,工作气压越高,电子密度越高;不同工作气压下,磁场位形和微波功率分布保持相对稳定,电子密度沿径向距离的分布趋势相似。

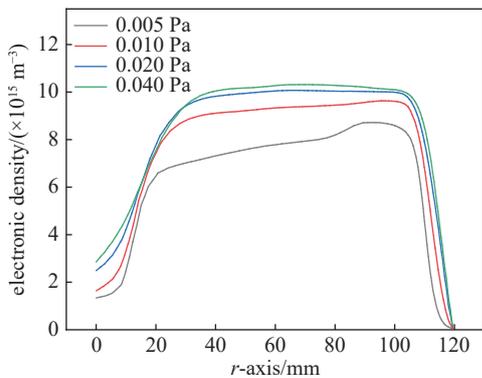


图3 不同工作气压下的电子密度变化曲线

Fig. 3 Electronic density variation curve under different operating pressures

对比不同工作气压下的电子密度可以发现,随着气压增加,电子密度更高的区域向更广泛的区域扩展。高气压使电子和中性气体分子碰撞频率增加,电子密度提高。然而,在气压继续增加时,碰撞

频率增大,能量损失加重,导致电子密度增加迟缓。

3.2 电子温度

不同工作气压下电子温度对应的能量分布情况如图4所示,是电子温度乘以 Boltzmann 常数 (kT_e)表示的能量,峰值分别为 10.9 eV、12 eV、13.5 eV、16.3 eV。

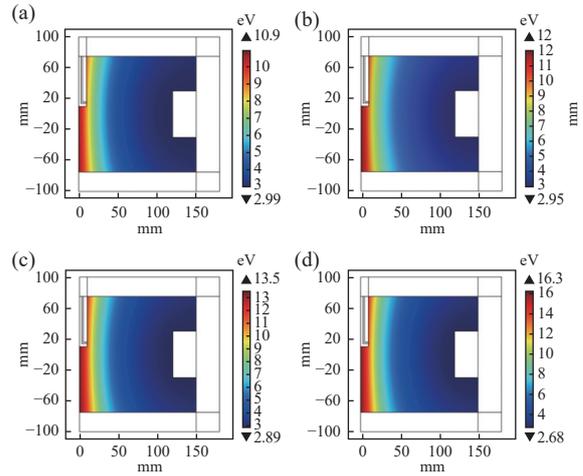


图4 不同工作气压下的电子温度对应的能量分布图。(a) 0.005 Pa, (b) 0.01 Pa, (c) 0.02 Pa, (d) 0.04 Pa

Fig. 4 Electron temperature under different working pressure. (a) 0.005 Pa, (b) 0.01 Pa, (c) 0.02 Pa, (d) 0.04 Pa

由图4可知,电子温度沿腔体径向向外逐渐递减,高温电子集中靠近微波能量的输入端。当微波进入等离子体时,电子吸收部分能量,由于越靠近共振点,电子间碰撞越剧烈,能量沿着径向逐渐耗散,电子温度减小。

不同工作气压下放电系统中部(0, r)电子温度沿径向距离分布如图5所示。随着气压增加,高温区域会扩大和增强,但由于磁场条件没有变化,电子温度的变化维持在相对恒定的水平。

在不同气压下,电子温度分布比较均匀,远离微波输入端的区域保持低温,随着气压增大,温度梯度变得更大,由此可知,此处局部加热效应更强。

3.3 等离子体电势

不同工作气压下等离子体电势分布情况如图6所示,电势峰值分别为 15.7 V、19.7 V、25.2 V、34.3 V。

由图6可知,由于微波在腔体中央输入,在微波输入附近,由于微波能量沉积和局部加热效应显著,电势较高;随着气压增加,电子碰撞频繁,能量

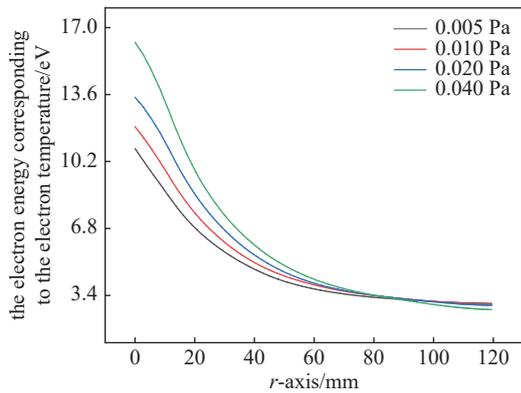


图5 不同工作气压下的电子温度对应的能量变化曲线

Fig. 5 The electron energy corresponding to the electron temperature variation curve under different working pressure

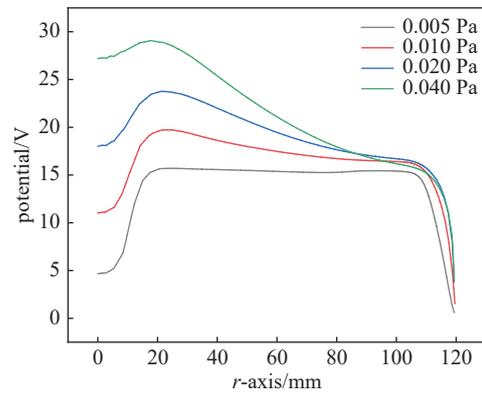


图7 不同工作气压下的电势变化曲线

Fig. 7 Potential variation curve under different working pressure

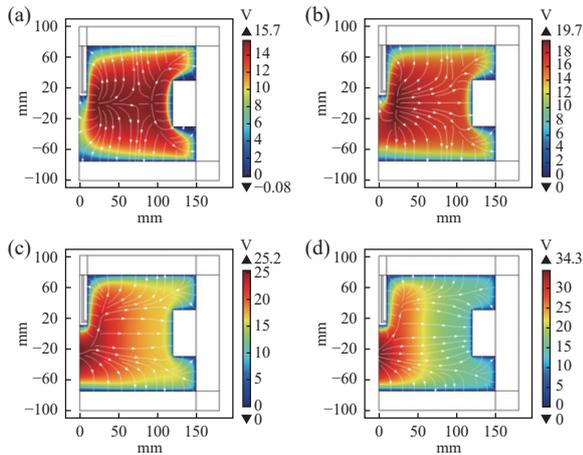


图6 不同工作气压下的电势分布及电场线图。(a)0.005 Pa, (b)0.01 Pa, (c)0.02 Pa, (d)0.04 Pa

Fig. 6 Potential distribution and electric field lines under different pressures. (a) 0.005 Pa, (b) 0.01 Pa, (c) 0.02 Pa, (d) 0.04 Pa

传输变得更为局部化, 导致电场从较为均匀分布向局部化增强转变, 远离输入区域的电子能量较低, 电势也较低。磁场分布对电子运动轨迹的限制, 以及空间电荷效应的增加, 进一步加剧了电场和电势梯度的增强。

不同工作气压下放电系统中部(0, r)电子温度沿径向距离分布如图 7 所示。随着气压的增加, 电势峰值逐渐升高, 高电势区域逐渐扩展。

气压增加时, 电子与中性粒子的碰撞增多, 导致能量损耗增加, 但同时电场的作用也增强, 因此电势逐步升高。这是由于较高气压下, 更多的电子被局部加热并且形成更强的电场。不同工作气压下的电势分布表明, 由于气压增大时碰撞频率的提

升导致的电荷积累效应增强, 使得等离子体中的电势差和电场强度增大。

3.4 电子发射电流

通过 ECR 放电系统释放出的电子电流即电子发射电流。随着阴极电子发射电流的增加, 发射出的电子数量增多, 电子束流增大。电子发射电流随工作气压变化如图 8 所示。

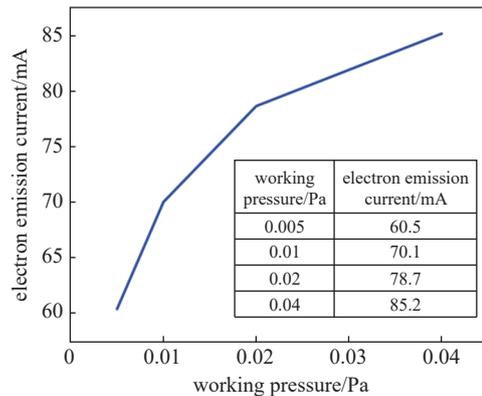


图8 不同工作气压下的电子发射电流

Fig. 8 Electron emission current under different working pressure

4 结论

通过仿真分析发现, 在工作压力为 0.005~0.04 Pa 的范围内, 可得到的电子发射电流为 60.5~80.2 mA, 因此, 该 ECR 等离子体放电系统能该气压范围内能产生稳定且足够强的电子发射电流, 满足电子枪的束源要求。电子密度峰值在工作气压为 0.005~0.015 Pa 的区间内变化较为明显。与其正相关的电子发射电流亦然, 为了利用改变工作气压的方式控制束流大小, 且由于电子枪内电子光学系统和电子束加工

室内存在严格的真空度要求,因此在下一步工作中,考虑将工作气压控制在 0.01 Pa 左右。

仿真结果表明,电子密度峰值从 $8.72 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 增至 $10.03 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$,电子温度对应的能量峰值从 10.9 eV 增至 16.3 eV,电势从 15.7 V 增至 34.3 V。以上数据表明:随着工作气压增大,等离子体中自由电子束流增多,碰撞频率增加,更多的气体分子被电离,从而产生更多的电子,电子密度亦呈上升趋势。电子温度随着气压增大逐渐上升,表明虽然电子和中性气体分子的碰撞增加,但电子能量并没有显著损失,微波能量能有效地被传递给电子,意味着电子具备更高的能量。电势的增强意味着产生更强的电场,决定了电子束的提取与加速。

适当的工作气压可以在保证电子温度和电势的前提下,产生稳定且高强度的电子束流。因此,选择合适的工作气压能够在保持系统效率的同时,满足电子枪对束源的要求。

参 考 文 献

- [1] Kashiwagi M, Hoshi Y. Electron beam processing system and its application[J]. SEI Technical Review, 2012, 75: 47-53
- [2] Zhang Y H, Jiang J S, Chang A B, et al. Study of the hollow cathode plasma electron-gun[J]. Acta Physica Sinica, 2003(7): 1676-1681 (张永辉,江金生,常安碧,等.空心阴极等离子体电子枪研究[J].物理学报,2003(7): 1676-1681 (in Chinese))
- [3] Shi F, Wang H. Gas discharge plasmas and their application[J]. Vacuum & Cryogenics, 2018, 24(2): 80-85 (石峰,王昊.气体放电等离子体及应用的研究进展[J].真空与低温,2018,24(2): 80-85 (in Chinese))
- [4] Xu H Y, Sang X H, Yang B, et al. Research and development of cold cathode gas discharge electron beam source system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 98-105 (许海鹰,桑兴华,杨波,等.冷阴极气体放电电子束源系统研制[J].航空制造技术,2022, 65(1/2): 98-105 (in Chinese))
- [5] Xu H Y, Wang Z, Peng Y, et al. Development of gas discharge electron beam source of electron beam coaxial wire and fuse additive manufacturing applicability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 276-283 (许海鹰,王壮,彭勇,等.丝束同轴冷阴极电子束源研制及其熔丝增材制造适用性研究[J].机械工程学报,2022,58(7): 276-283 (in Chinese))
- [6] Oks E M. Physics and technique of plasma electron sources[J]. Plasma Sources Science and Technology, 1992, 1(4): 249
- [7] Ding Z F, Wu Q C, Ren Z X. Electron cyclotron resonance plasma technique[J]. Physics, 1996, 25(10): 608-635 (丁振峰,邬钦崇,任兆杏.电子回旋共振等离子体技术[J].物理,1996,25(10): 608-635 (in Chinese))
- [8] Kornilov S Y, Osipov I V, Rempe N G, et al. Generation of narrow focused beams in a plasma-cathode electron gun[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2009, 52: 406-411
- [9] Takao Y, Hiramoto K, Nakagawa Y, et al. Electron extraction mechanisms of a micro-ECR neutralizer[J]. Japanese journal of applied physics, 2016, 55(7S2): 07LD09
- [10] Yang J. Research on the distribution law of strong current pulsed electron beam Panning discharge plasma under cathode acceleration[D]. Chongqing University of Technology, 2024 (杨捷.阴极加速下的强流脉冲电子束潘宁放电等离子体的分布规律研[D].重庆理工大学,2024 (in Chinese))
- [11] Hussein M A, Emmert G A. Modeling of plasma flow downstream of an electron cyclotron resonance plasma source[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1990, 8(3): 2913-2918
- [12] Nag B. The boltzmann transport equation and its solution[M]. Electron Transport in Compound Semiconductors. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1980: 129-170