

强流脉冲电子束中影响潘宁放电因素的模拟分析

古亮^{1,2} 杨捷^{1*} 赵华¹ 谭巍¹ 李金荣¹

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心 重庆 400054)

Simulation Analysis of Factors Affecting Penning Discharge in High Current Pulsed Electron Beam

GU Liang^{1,2}, YANG Jie^{1*}, ZHAO Hua¹, TAN Wei¹, LI Jinrong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Energy Internet Engineering Technology Research Center, Chongqing 400054, China)

Abstract In order to study the factors affecting the ionization of Penning ion source inside a high-current pulsed electron beam, a two-dimensional axisymmetric model was established based on the finite element simulation software to simulate the internal magnetic field and electron distribution, and then the effects of anode voltage, magnetic field strength and air pressure on the argon Penning discharge and radial distribution were simulated and studied. The ionization condition and the variation of electron distribution with these three factors are analyzed. The simulation results show that the effect of the electric field on ionization is positively correlated with that of a low electric field at high pressure. When the electric field is large, the influence of the electric field on the ionization degree is negatively correlated. The increase in magnetic field will increase the ionization rate, and the increase in magnetic field intensity will not affect the ionization rate after the increase to 1 T. The influence of the electromagnetic field on the radial distribution of electrons is not obvious. Pressure is positively correlated with ionization. In addition, the smaller the pressure, the more uniform the radial distribution of electrons.

Keywords High-current pulsed electron beam, Penning discharge, Influencing factor, Electron density

摘要 为研究强流脉冲电子束内部潘宁离子源电离情况的影响因素,文章基于有限元仿真软件建立二维轴对称模型对其内部磁场和电子分布进行仿真,再从阳极电压、磁场强度、气压三个方面对氩气潘宁放电及径向分布的影响进行了模拟仿真研究,对电离情况和电子分布随这三个因素变化的情况进行了分析。仿真结果表明:在较高气压状态下,电场较小时,电场对电离度的影响是正相关;电场较大时,电场对电离度的影响是负相关。磁场增大会提高电离率,提升到1 T之后磁场强度提高不会影响电离率。电磁场对电子径向分布影响不明显。气压与电离度呈正相关。此外,气压越小,电子径向分布越均匀。

关键词 强流脉冲电子束 潘宁放电 影响因素 电子密度

中图分类号: O531

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202306003

强流脉冲电子束利用载能束瞬间轰击材料表面,在材料表面引发瞬间的温差造成表面部分材料的熔化、蒸发和气化,使材料改性。强流脉冲电子束装置采用潘宁离子源产生供加速用的电子,然后上阴极点火提供加速电场,将这些电子加速,对阴极进行轰击。由于目前所用潘宁放电电流较弱,能量密度较低,对靶材表面处理深度浅,一般不考虑

采用强流脉冲电子束来处理材料表面。但强流脉冲电子束口径一般较宽,照射面积较大,能量在被轰击材料表面分布密度会更均匀,并且或许目前其它处理方式不能达到强流脉冲电子束的处理效果,这已引起了多家单位注意。对于潘宁离子源的研究,2003年肖坤祥等^[1]实验研究了潘宁离子源中电磁场和气压对氢气电离的影响。西安大学欧阳礼

收稿日期: 2023-06-08

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFR70480); 国家自然科学基金培育计划项目(2021PY211)

* 联系人: E-mail: yangJ@stu.cqut.edu.cn

仁等^[2]采用新型的共用阴极的离子源,将离子注入潘宁离子源中,并进一步的调整,提高了阴极引出束流强度。2009 年刘伟波、谷德山等^[3]通过 NT50 型中子管离子源放电实验,研究磁场变化对放电电流的影响。2013 年石磊、钱沐洋等^[4]采用粒子模拟与蒙特卡洛相结合的方法,对氢气潘宁离子源放电和引出过程做了仿真研究。同年石磊、肖坤祥等^[5]对电磁场仿真,模拟分析了电子和正离子的运动轨迹,并对其现象进行了研究与分析,得出电子轨迹受磁场分布影响最大,离子受其影响最小的结论。2014 年黄继鹏等^[6]探究了潘宁离子源中氢负离子的存在及分布规律。2016 年陈宇航、龙继东等^[7]在实验基础上分析了磁场对潘宁离子源中等离子体阻抗变化的影响。2019 年于子童等^[8]设计多种磁体结构,通过实验分析认为圆环形磁体的磁场分布最均匀,且圆环越多磁场越均匀。2019 年李卓希和杨洪广^[9]通过电离特性实验探究了中子管中潘宁离子源电离电流所受影响因素及工作规律。2023 年张景浩等^[10]通过增加磁场强度的方式提高了潘宁离子源的放电稳定性。

相较于其它潘宁离子源,强流脉冲电子束中的潘宁离子源结构更大,上下阴极之间距离更远,潘宁放电后其电子密度及径向分布将直接影响电子束的能量大小与均匀程度。本文基于有限元仿真软件首先对放电腔室内磁场强度进行仿真,再对电子分布及不同阳极电压、磁场强度和气压的情况下的电子密度及分布进行仿真研究。

1 建模与仿真

1.1 建立物理模型

因为所研究的放电腔室具有对称的特点,故采用二维旋转的方法构建模型,如图 1 所示,二维镜像模型右半部分。潘宁离子源由一对双阴极和一个阳极筒以及三组亥姆霍兹线圈组成,这种线圈的大小相同,共用一个中心轴且半径与相邻两线圈之间的距离相等,通入方向相同、大小相等的电流可在中心轴产生较均匀磁场。离子源腔室充入一定气压的氩气。在计算模型中阳极筒半径 R 为 0.03 m,高 0.03 m,两阴极之间距离为 0.23 m,阳极到上阴极的距离 d_1 为 0.06 m,到下阴极距离 d_2 为 0.14 m。在放电腔室中,中性气体与电子之间有激发、弹性碰撞、电离等反应。放电腔室充入气体为氩气,氩气

放电反应模拟过程中考虑的主要反应类型如表 1、表 2 所示,其中 e 为电子,Ar 为氩原子,Ars 为激发态氩原子, Ar^+ 氩离子。

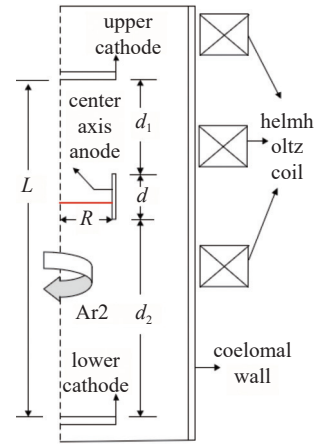


图1 强流脉冲电子束腔室

Fig. 1 High-current pulsed electron beam chamber

表 1 腔室内反应公式

Tab. 1 Interior response formula

No.	Reaction type	Reaction formula	Energy loss /eV
1	Elasticity	$e+Ar \rightarrow e+Ar$	0
2	Excitation	$e+Ar \rightarrow e+Ars$	11.5
3	De-excitation	$e+Ars \rightarrow e+Ar$	-11.5
4	Ionization	$e+Ar \rightarrow 2e+Ar^+$	15.8
5	Ionization	$e+Ars \rightarrow 2e+Ar^+$	4.24
6	De-excitation	$Ars+Ars \rightarrow e+Ar+Ar^+$	/
7	De-excitation	$Ars+Ar \rightarrow Ar+Ar$	/

表 2 表面反应公式

Tab. 2 Surface reaction formula

No.	Reaction formula	Sticking coefficient
1	$Ars \rightarrow Ar$	1
2	$Ar^+ \rightarrow Ar$	1

1.2 模型基本方程

在计算模型中描述等离子体的方程有以下:

(1) 电子连续性方程:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (u \cdot \nabla) n_e \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E) n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (2)$$

上式中 n_e 为电子密度, Γ_e 为电子流矢量, R_e 为电子源项, u 为中性流体速度矢量。 D_e 为电子扩散系数。

(2) 电子能量守恒方程:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = S_{en} - (u \cdot \nabla) n_e + \frac{(Q + Q_{gen})}{q} \quad (3)$$

$$\Gamma_e = -(\mu \cdot E) n_e - D_{en} \cdot \nabla n_e \quad (4)$$

上式中为 n_e 电子能密度, Γ_e 为电子能流矢量, S_{en} 为非弹性能量损失, Q 为外部热源, Q_{gen} 为广义热源, D_{en} 为电子能扩散密度。

1.3 边界条件

除以上反应方程外, 还需要对腔室内部边界条件进行定义, 即对磁场强度、阳极筒电压、气体压强、温度等相关参数进行设置。本文中通过改变阳极电压, 磁场强度, 气体压强等参数来进行研究分析。

1.4 网格划分

如图2所示, 利用有限元仿真软件自带的网格划分工具对模型进行网格划分。在本研究中计算域主要采用自由三角形网格, 由于研究时采用稳态与频域-瞬态两种方式进行综合计算, 故对稳态计算域的网格划分较稀疏, 对频域-瞬态的计算域的网格划分较密, 这对节约计算时间和内存非常有利。此外, 对三电极的边进行网格细化剖分。

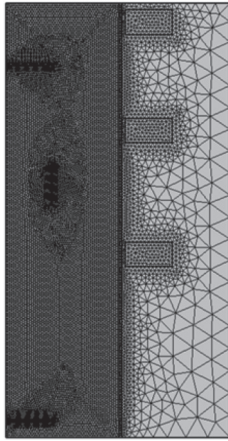


图2 网格划分结果

Fig. 2 Meshing result

2 仿真结果与分析研究

2.1 磁场仿真

为了给放电腔室轴向提供均匀稳定的磁场, 在腔体壁外套上三组亥姆霍兹线圈, 再通入大小、方向均相同的电流, 探究轴向磁感应强度分布特征。如图3所示, 通过对磁通密度模进行仿真可以看出

磁场强度汇集在三组线圈之间, 其内部磁场密度模在三组线圈共有的轴向上比较均匀, 可近似成匀强磁场, 根据毕奥-萨伐尔定律通过积分运算可知载流线圈的磁场强度如式(5)所示:

$$B = \frac{\mu_0 n_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中 μ_0 为真空磁导率, n_0 为线圈匝数, R 为线圈等效半径, X 为中心轴上某一点到圆心的距离。所以在双阴极之间会形成平行于中心轴的匀强磁场, 使电子围绕中心轴做复螺旋运动, 提高电子的电离率。此外, 此匀强磁场还可以给放电腔室提供磁绝缘。

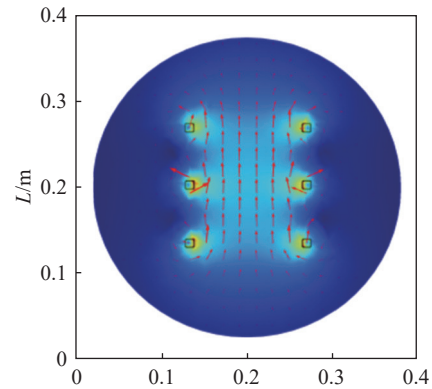


图3 亥姆霍兹线圈组截面磁通密度

Fig. 3 Helmholtz coil group section magnetic flux density

2.2 电子分布

设阳极电压为 2 kV, 磁场强度为 0.4 T, 气体压强为 2×10^{-3} Torr 时, 电子密度分布随时间变化趋势如图4所示。随着时间的增加, 电子会更多地向阳极中心靠近, 稳定后电子绝大部分会聚集在阳极筒内部, 在阳极筒中心达到峰值, 其余电子在双阴极之间形成电子通道, 其密度远远低于阳极周边的电子密度。轴向电子温度随时间变化如图5所示, 刚开始放电时一次电子在阳极附近的动能最大, 在此处发生碰撞电离的次数最多, 电离出来的二次电子和离子最多, 随着放电时间的增加, 一次电子动能和数量减少, 二次电子增多, 二次电子受到电场力的影响动能增大, 当稳定放电后阳极附近的电子动能最小, 没有足够的动能使其离开阳极附近, 故绝大部分电子会聚集在阳极筒内部。

2.3 电压大小对电子密度及分布的影响

设置气压为 2×10^{-3} Torr, 阳极筒中心磁场为 0.4 T, 在阳极施加五个电压值为 1.2 kV、1.4 kV、1.6 kV、

1.8 kV、2 kV。如图 4 所示, 由于稳定后阳极内部中心的电子密度高出其它位置 4-5 个数量级, 故此处

的电子密度的多少即可代表电离度的大小。对此处在不同电压下的电子密度做仿真研究。

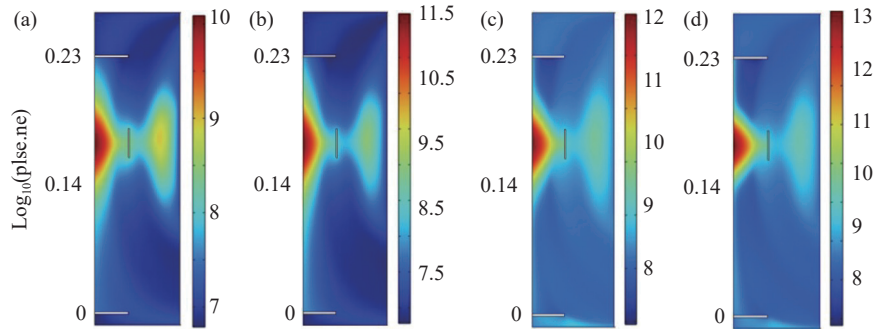


图4 电子密度分布随时间变化。(a) 0.3 μs , (b) 0.5 μs , (c) 0.7 μs , (d) 0.9 μs

Fig. 4 Electron density distribution varies with time. (a) 0.3 μs , (b) 0.5 μs , (c) 0.7 μs , (d) 0.9 μs

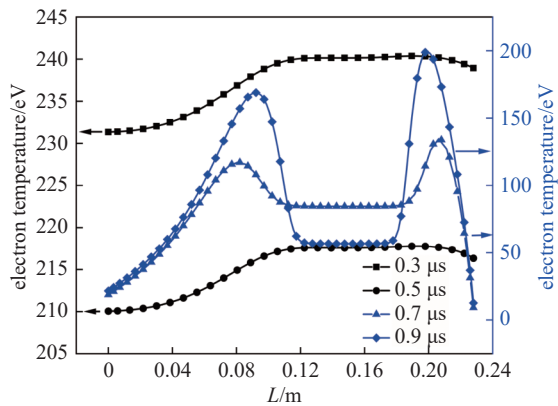


图5 轴向电子温度随时间变化

Fig. 5 Axial electron temperature varies with time

阳极电压对电子密度影响如图 6 所示。由图可知当阳极电压从 1.2 kV 升至 1.6 kV 时, 电子密度逐渐升高, 但从 1.6 kV 升至 2 kV 时, 电子密度会降低。为进一步探究电压对电离度的影响, 再对阳极内壁电子温度仿真如图 7 所示, 电子温度随阳极电压升高而升高, 结合电子运动分析可知: 一方面轴向电子在电场力的作用下从阴极往阳极运动穿过阳极环做加速运动, 并且在惯性作用下继续往另一阴极运动, 在此过程中电子受到反向电场力作用做减速运动, 速度降为零后做反向加速运动, 过了阳极之后再次减速, 速度减为零后重复以上运动过程, 这使电子在双阴极之间做往复运动。另一方面设电子速度为将其分解为垂直于中心轴方向的分量和平行于中心轴方向的分量。其中不受磁场强度影响, 而受电磁场的影响使得电子在绕中心轴做圆周运动, 其运动半径如式 6 所示。

$$R = \frac{mV_x}{qB} \quad (6)$$

式中 m 为电子质量, q 为电子电荷量, B 为磁感应强度。当磁场一定时, 阳极电压升高, 径向电场强度增大, 电子随着电场强度增大, V_x 逐渐增大, 旋转半径 R 增大。上述两方面增大了电子在腔室中的运动路径, 大于其气体分子的平均自由程, 继而发生碰撞电离产生二次电子, 提高了电离度。但当阳极电压大于 1.6 kV 时, 电子会因为运动半径 R 过大而还未与氩原子发生碰撞电离就与阳极筒碰撞, 这使得阳极内壁的电子温度随着阳极电压的升高而增大, 导致电离出的电子减少。

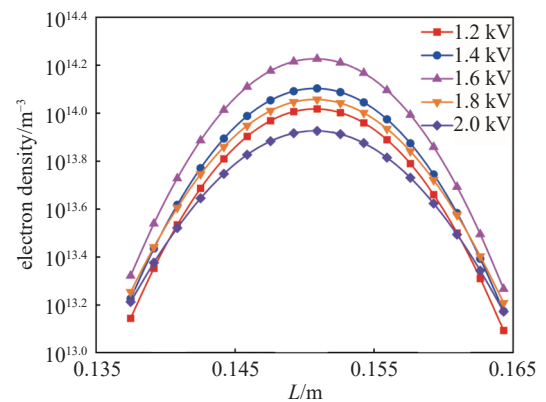


图6 阳极电压对轴向电子密度的影响

Fig. 6 Effect of anode voltage on axial electron density

由于上阴极放电后会将电子加速发射到下阴极上, 故中心轴到阳极之间的电子分布是否均匀将直接影响电子束能量的均匀程度。在阳极壁和中心轴之间选取一条直线即图 1 中红线, 研究电子在该线即阳极环径向上的分布状况和阳极电压对电

子分布的影响。

如图8所示,电子在径向上的分布并不均匀,从中心轴到阳极,电子密度逐渐降低,且下降幅度很大,相差达到4个数量级。此外阳极电压的变化只会改变电离出的电子密度,并不会对电子在径向上的分布产生影响。

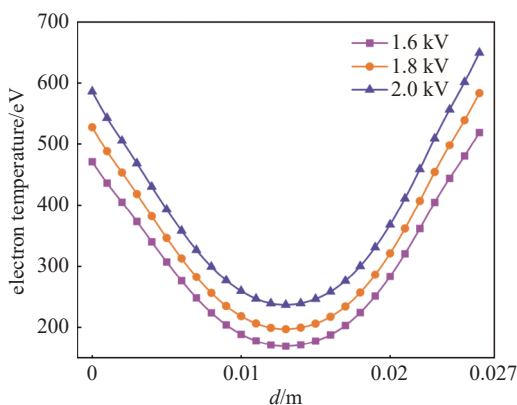


图7 阳极电压对阳极内壁电子温度影响

Fig. 7 Effect of anode voltage on anode inner wall electron temperature

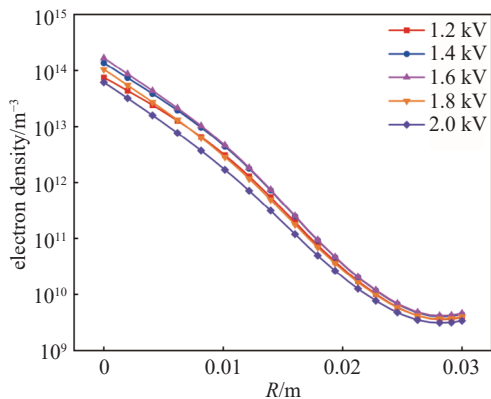


图8 阳极电压对径向电子分布影响

Fig. 8 Effect of anode voltage on radial electron distribution

2.4 磁场强度大小对电子密度及分布的影响

设置阳极电压为 2 kV, 气压不变, 取不同的阳极筒中心磁场强度分布为 0.1 T、0.4 T、0.7 T、1 T、1.3 T, 研究不同磁场强度下的电子密度及分布。

如图9所示磁场强度从 0.1 T 上升到 0.7 T 时, 电子密度在阳极筒附近的密度呈上升趋势。从 0.7 T 到 1.3 T 时, 电子密度逐渐降低。根据式6可知, 磁场强度增大时, 电子做螺旋运动的半径 R 将会减小, 使原本因为磁场较小而撞击在阳极内壁湮灭的电子在运动时避开阳极, 继续与气体发生碰撞电离,

此时原本会撞击阳极的电子虽避开阳极, 但离阳极很近, V_x 较大, 电离率提高。当磁场强度为从 0.7 T 升至 1 T 时, R 继续减小, 电子会远离阳极运动, V_x 减小, 电离率减小, 当磁场强度从 1 T 升至 1.3 T 时, 电子距离阳极更远, 此时阳极对电子的影响减小, V_x 的变化很小, 电子主要受磁场作用, 磁场增大并不会改变电子的运动路径, 故电离率基本没有变化。再对红线上电子分布做仿真, 研究磁场强度对径向电子分布的影响如图10所示。

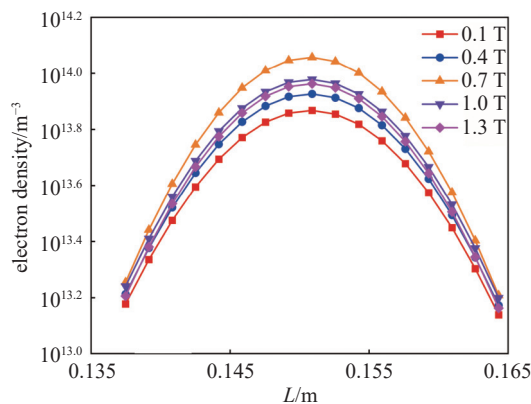


图9 磁场强度对轴向电子密度影响

Fig. 9 Effect of magnetic field intensity on axialelectron density

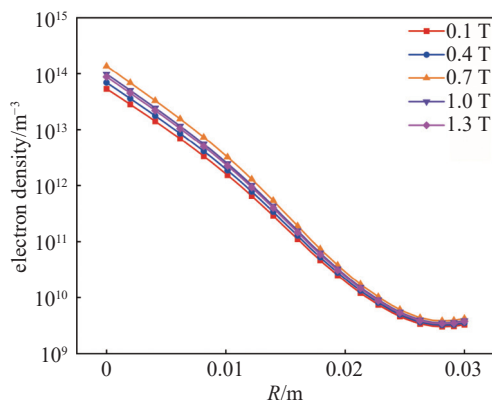


图10 磁场强度对径向电子分布影响

Fig. 10 Effect of magnetic field intensity on radial electron distribution

如图10所示, 径向上电子分布也并不均匀, 其电子密度相差也达到了4个数量级, 且磁场强度的变化并不能改变电子在径向上的分布趋势, 这与阳极电压对电子分布的影响类似。

2.5 气压大小对电子密度及分布的影响

设置阳极电压为 2 kV 磁场强度为 0.4 T, 选取

七个气压值: 2×10^{-4} Torr、 4×10^{-4} Torr、 6×10^{-4} Torr、 8×10^{-4} Torr、 1×10^{-3} Torr、 1.2×10^{-3} Torr、 1.4×10^{-3} Torr。研究不同气压下的电子密度及分布。

如图 11 所示, 随着气压的上升, 电离出的电子密度持续升高, 且仅提高少量气压就能使电子密度出现较大改变, 这表明电离度对气压的变化非常敏感, 对于腔室内的电子与气体分子发生碰撞电离, 单位时间内产生的离子数目为:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J_e}{e} n_0 \sigma \quad (7)$$

式中 J_e 为离子流密度; σ 为碰撞截面; n_0 为中性气体分子密度, $n_0 = P/KT$ 。根据式 7 分析可知, 气压提高, 单位体积内的中性气体分子数增加, 中性气体分子平均自由程减小, 电子与其发生碰撞电离的概率提高, 程度更剧烈, 使得单位时间内产生的离子增多, 提高电离效率。

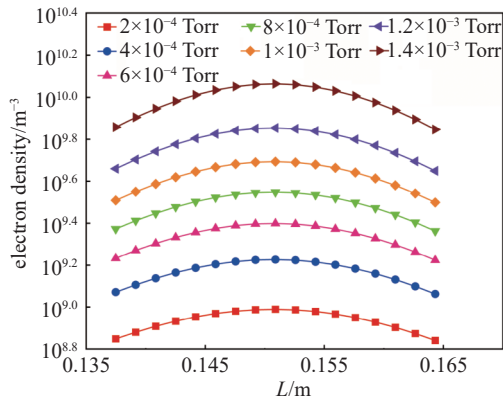


图 11 气压对轴向电子密度的影响

Fig. 11 Effect of air pressure on axial electron density

再对红线上电子分布做仿真, 研究气压对径向电子分布的影响如图 12 所示。

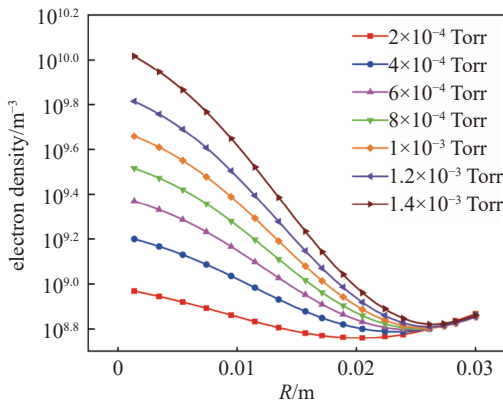


图 12 气压对径向电子分布影响

Fig. 12 Effect of air pressure on radial electron distribution

如图 12 所示, 随着气压的降低, 径向电子分布逐渐均匀。气压为 2×10^{-4} Torr 时, 径向电子分布最均匀, 最高点与最低点相差不超过 1.5849 m^{-3} , 此时电子虽然在磁场的约束下向中心轴运动, 但是因为气压较低, 气体分子的平均自由程较大, 径向上每一处电子在运动过程中与其发生碰撞电离的概率都大致相同, 这使得电子在径向上的分布更均匀, 但气压不能过低, 若气压过低电子会因为运动路径小于中性气体分子平均自由程而不发生碰撞电离。相对于阳极电压和磁场强度, 气压对径向电子分布有明显影响, 即气压越低, 径向电子分布越均匀。

3 结论

本文基于有限元仿真软件对强流脉冲电子束中磁场分布, 潘宁放电电子密度及分布进行仿真研究, 结果表明:

(1) 潘宁放电稳定后绝大部分电子聚集于中阳极筒内部。在较高气压等级下, 当磁场强度为 0.4 T 时, 阳极电压越大, 电离度越高; 当阳极电压超过 1.6 kV 时, 电离度反而降低。当阳极电压升为 2 kV 时, 磁场强度增大会提高电离度, 在 0.7 T 时电离率达到峰值, 提升到 1 T 时电离率有所下降, 之后继续提升磁场强度不会影响电离率。

(2) 潘宁离子源中阳极电压与磁场强度的变化几乎不影响电子在径向的分布。

(3) 不同于电压和磁场, 气压的改变会改变电子分布, 即气压越低, 分布越均匀。气压为 2×10^{-4} Torr 时, 径向上电子分布最均匀。且随着气压增高, 电离度也会提高。相比于阳极电压和磁场强度, 电离度对气压的变化更加敏感。

参 考 文 献

- [1] Xiao K X, Zhou M G, Tan X H. Effect of electromagnetic field and air pressure on hydrogen ionization in penning ion source[J]. Vacuum Electronics Technology, 2003(06): 36-38+48 (肖坤祥, 周明贵, 谈效华. 潘宁离子源中电磁场和气压对氢气电离的影响 [J]. 真空电子技术, 2003(06): 36-38+48(in chinese))
- [2] Ouyang L R, Zheng D X. Study on wide beam rectangular cold cathode penning ion source[J]. Vacuum electronics technology, 2003(02): 59-61 (欧阳礼仁, 郑德修. 宽束矩形冷阴极潘宁离子源研究 [J]. 真空电子技术, 2003(02): 59-61(in chinese))
- [3] Liu W B, Gu D S, Li M J, et al. Effect of magnetic field

- variation of ion source in NT50 neutron tube on discharge current[J]. *Nuclear Technology*, 2009, 32(08): 592–595 (刘伟波, 谷德山, 李明娟, 等. NT50 型中子管离子源磁场变化对放电电流的影响 [J]. *核技术*, 2009, 32(08): 592–595(in chinese))
- [4] Shi L, Qian M Y, Xiao K X, et al. Simulation analysis of hydrogen penning discharge under low pressure[J]. *Journal of Physics*, 2013, 62(17): 347–353 (石磊, 钱沐杨, 肖坤祥, 等. 低气压条件下氢气潘宁放电的模拟分析 [J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 347–353(in chinese))
- [5] Shi L, Xiao K X, Qian M Y. Dynamic simulation of charged particles in a micro penning ion source[C]. Chinese Nuclear Society. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China (Volume 3) - Proceedings of the 2013 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society, Volume 6 (Nuclear Physics Sub-volume, Computational Physics Sub-volume, Particle Accelerator Sub-volume) China Atomic Energy Press, 2013: 132–137 (石磊, 肖坤祥, 钱沐杨. 带电粒子在微型潘宁离子源中的动力学仿真 [C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第三卷)——中国核学会 2013 年学术年会论文集第 6 册(核物理分卷, 计算物理分卷, 粒子加速器分卷). 中国原子能出版社, 2013: 132–137(in chinese))
- [6] Huang J P, Qiao S. Production mechanism and experimental study of hydrogen negative ions in penning ion source in neutron tube[J]. *Intense Laser and Particle Beams*, 2014, 26(02): 244–248 (黄继鹏, 乔双. 中子管用潘宁离子源氢负离子产生机理及实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(02): 244–248(in chinese))
- [7] Chen Y H, Long J D, Liu E X, et al. Study on impedance change of penning ion source induced by magnetic field[J]. *Intense Laser and Particle Beams*, 2016, 28(04): 196–201 (陈宇航, 龙继东, 刘尔祥, 等. 磁场引起的潘宁离子源阻抗变化研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(04): 196–201(in chinese))
- [8] Yu Z T, Jing S W, Nian R X, et al. Magnetic circuit simulation design of penning ion source in miniature neutron tube[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2019, 39(04): 410–415 (于子童, 景士伟, 年瑞雪, 等. 小型中子管潘宁离子源磁路模拟设计 [J]. *核电子学与探测技术*, 2019, 39(04): 410–415(in chinese))
- [9] Li Z X, Yang H G. Study on ionization characteristics of penning ion source in neutron tube[J]. *Electronic World*, 2019(11): 31–32(in chinese) (李卓希, 杨洪广. 中子管用潘宁离子源电离特性研究 [J]. *电子世界*, 2019(11): 31–32)
- [10] Zhang J H, Zhang X X, Wolf C, et al. Study on time-discharge electrical characteristics of miniaturized penning ion source with magnetic field assistance[J]. *Electronic Science and Technology*, 2023, 36(05): 71–79 (张景皓, 张轩雄, Christian Wolf, 等. 磁场辅助的小型化潘宁离子源点时燃放电特性研究 [J]. *电子科技*, 2023, 36(05): 71–79)