

空心阴极等离子体电子枪研究^{*}

张永辉 江金生 常安碧

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

(2002 年 8 月 29 日收到 2002 年 10 月 31 日收到修改稿)

对空心阴极等离子体电子枪的理论与机理做了较详细的分析,介绍了空心阴极放电特性,论述了激励电极和调制电极在空心阴极内等离子体形成过程中的作用,分析了等离子体中电子和离子的运动及主要参数,推导出空心阴极内电场与电流密度的表达式,研究了形成稳定电子束流的基本条件. 利用泊松方程、电流连续性方程和运动方程对其进行了数值模拟计算,并给出了优化结果. 在此基础上设计出了输出束流脉宽为 $1\mu\text{s}$ 、幅值达 2kA 的空心阴极等离子体电子枪.

关键词: 空心阴极, 等离子体, 电子枪

PACC: 5250J, 5280, 5290, 4260H

1. 引言

近年来, 在高功率脉冲技术的研究和应用中要求发展强流、长脉冲电子束源. 传统的热阴极电子枪可产生长脉冲, 但电流比较小. 场致发射电子枪虽能产生强流电子束, 但束流脉宽较短. 而空心阴极等离子体电子枪(hollow cathode plasma electron-gun)既克服了热阴极电子枪因受空间电荷限制而输出电流密度较低的缺点, 同时也克服了场致发射电子枪由于阴阳极间隙中等离子体闭合而导致短的脉冲宽度的缺点, 可产生长脉冲强流电子束. 20 世纪 90 年代初美国休斯公司利用空心阴极等离子体电子枪研制的 PASOTRON 高能微波源^[1-3], 以其特有的性能及小型化的结构而受到重视.

2. 空心阴极等离子体电子枪基本描述

空心阴极等离子体电子枪是以空心阴极放电形成等离子体并以这种等离子体作为阴极的一种新型电子枪. 图 1 为这种电子枪的工作原理图^[4], 其中 K 为圆筒式空心阴极, A 为激励电极, 接直流激励电

源, A_1 , A_2 分别为调制阳极和加速阳极, 加速阳极又称引出阳极. 两者均为栅网状, 它们上面的网孔严格对准, 以保证通过 A_1 进入加速间隙的电子能完全通过 A_2 . A_1 接脉冲调制电源, A_2 接直流高压电源. 空心阴极中的放电气体由一个低压连续弱阀门或一个暂态的气体喷射系统来提供.

利用空心阴极结构和激励阳极产生的弱电场使低压惰性气体(这里用氩气)发生辉光放电, 形成稀薄等离子体, 然后在调制极 A_1 的脉冲调制电压作用下加剧空心阴极中气体的电离, 并形成等离子体阴极; 与此同时在引出极电压的作用下, 以等离子体波面作为阴极, 从等离子体中引出高密度的电子束, 使之进入加速间隙, 形成电子束源.

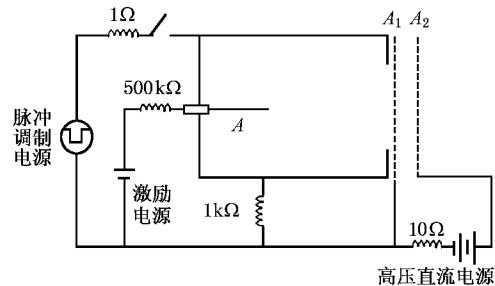


图 1 空心阴极等离子体电子枪原理图

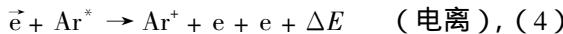
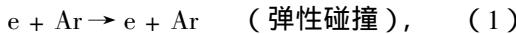
* 国家高技术研究发展计划(批准号 863-410-7-3)及中国工程物理研究院科学技术基金(批准号 20020430)资助的课题.

3. 等离子体阴极的形成^[5-7]

等离子体阴极的形成大致可分为两个阶段:第一阶段是在空心阴极激励电压的作用下激活气体中的自由电子并使其电离,形成初始(或称本底)稀薄等离子体,第二阶段是在本底等离子体环境下在调制电压作用下使空心阴极内的气体进一步电离,从而提高空心阴极内等离子体的密度,并形成等离子体阴极。

3.1. 基本物理化学过程

空心阴极中带电粒子与中性原子相互作用产生气体电离,下面是基本物理化学过程:



式中 Ar 为基态的氩原子, Ar* 为激发态的氩原子, Ar+ 为一次电离的氩离子, \vec{e} 为能量较大的快电子, Ar** 为更高激发态的氩原子, ΔE 为动能的变化量。在本文讨论中,忽略去二次激发和二次电离过程。在实际系统中,还有其他的碰撞和激励方式,因碰撞截面较小而忽略不计。

3.2. 电离过程的发展和自持放电的形成

在上述碰撞电离过程的作用下,根据汤生的电子繁流理论,阴极筒内电子和离子的数目是以指数形式增长的。假设气体中初始的自由电子数密度为 n_0 ,当电子振荡一个半径长路程时其中的电子数密度增为

$$n = n_0 \exp\left(\int_0^R \alpha dr\right) = n_0 \exp(\alpha R), \quad (8)$$

式中 α 为电子的电离系数。可见由于 α 过程在空间产生的新的电子数为 $n - n_0 = n_0[\exp(\alpha R) - 1]$ 。若只考虑一次电离,这也是新产生的离子数,这些离子数向阴极方向运动。如果忽略正离子在空间的碰撞电离作用,则将在阴极上新产生 $\gamma n_0[\exp(\alpha R) - 1]$ 个电子,其中 γ 为正离子引起的二次电子发射系数。这些电子在电场的作用下又会碰撞气体分子产

生更多的电离。若令

$$g = \gamma[\exp(\alpha R) - 1], \quad (9)$$

则可得无限次碰撞之后到达阳极的电子数为

$$n_a = n_0 \exp(\alpha R)(1 + g + g^2 + g^3 + \dots). \quad (10)$$

(10)式是一个等比级数之和,该级数收敛的条件为 $g < 1$, 极值为

$$n_a = \frac{n_0 \exp(\alpha R)}{1 - g} = \frac{n_0 \exp(\alpha R)}{1 - \gamma[\exp(\alpha R) - 1]}. \quad (11)$$

由(11)式可以看出,当分母为零时,电子数密度可趋于无穷大,或当分母为零,分子也趋于零时, n_a 仍可以为有限值。这表明当外界电离源去除,即使初始电流 $j_0 = 0$, 放电仍然继续进行,这就形成了自持放电。因此,放电着火的条件为

$$\gamma[\exp(\alpha R) - 1] = 1. \quad (12)$$

3.3. 激励电压作用下形成初始等离子体背景

在激励电压作用下自由电子和阴极发射的电子在阴极之间来回振荡,使电子与气体分子之间的碰撞次数增加,气体电离率增加,形成低密度等离子体背景。

3.4. 调制电压作用下形成等离子体阴极

在调制极电压作用下,将进一步电离空心阴极中的气体,使等离子体的密度急剧增加并达到动态平衡。如果引出极电压大小适合,会形成相对稳定的等离子体阴极界面。

4. 空心阴极等离子体电子枪束流的产生和引出^[5-6-8]

从等离子体阴极中引出电子与从热阴极表面引出电子既有相似之处,又有不同之处。相似的是电子离开等离子体阴极之后在引出系统中运动所遵循的规律与电子离开阴极表面的相同。但是用等离子体的边界作为电子发射面与用固体热阴极作为电子发射面有许多不同之处,表现在热发射体的表面是固定的,而等离子体表面并不是固定不变的。等离子体阴极界面位置取决于外电场和等离子体本身的工作状态,它往往容易产生畸变。因此从等离子体中引出电子是一个非常复杂的问题,电子束的性质不仅与引出系统中的结构及参数有关,也与等离子体本身的参数及特征有关。当空心阴极内形成稳定等离子体后,调制阳极的电压几乎全部降落在空心阴

极的阴极位降区上,等离子体中的电子将聚积在调制极表面附近并形成电子鞘层,使内部等离子体仍保持准电中性. 从宏观上看,在一个脉冲调制周期内等离子体团与调制极基本同电位. 如图 2 所示. 当 A_1 上面的孔隙直径大于 2Δ 时(Δ 为等离子体鞘层厚度)在加速阳极电压的作用下,等离子体中的电子将通过小孔被引出并进入加速间隙,并呈束状通过两层栅网孔隙而飞出电子枪.

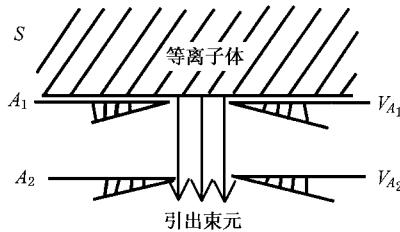


图 2 电子束引出的微观图

假设等离子体中的电子速度符合 Maxwell 分布, 则等离子体边界电子发射面的发射电流密度应等于

$$j_{ez} = \frac{1}{4} e n_e \bar{v}_e, \quad (13)$$

式中 $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$ 为电子的平均热速度.

另外, 如果假设引出极是无限大平板电极, 则进入加速间隙的电子束应满足 Child-Langmuir 定理, 这样系统所能引出的电流密度为

$$J_e = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m_e}} \frac{1}{(d + \Delta)^2} (V_{A_2} - V_{A_1})^{3/2}. \quad (14)$$

等离子体鞘层厚度 Δ 一般为十分之几毫米量级, 相对于 d , Δ 可以忽略. 等离子体发射面稳定的条件为

$$j_{ez} = J_e. \quad (15)$$

(15)式左端表示等离子体自身所能提供的电流, 右端表示该引出系统理论上所能引出的电流. 只有这两者相等时, 才能保证等离子体面不发生畸变. 当满足以上条件时, 等离子体才能保持良好的稳定性, 输出电流才能平稳. 理论上可以将极间距离缩得很短, 以增大电流量, 并且在(14)式中, 电子束流 J_e 似乎随 $(V_{A_2} - V_{A_1})^{3/2}$ 而增加, 但实际上这一方面会受到电极之间绝缘情况的限制, 另一方面当放电参数固定时, 电子束流密度还须满足(15)式, 否则等离子体阴极面将发生畸变. 因此, 更确切地说, (14)式是给出了等离子体边界面稳定时, 加速间隙

d 和引出极电压 V_{A_2} 之间的关系.

当然, 这些电流不可能全部被引出极引出. 因为引出极引出的电流有一部分将被调制极吸收并由外电路流向电源, 只有通过栅网孔隙的电子束才能进入加速间隙被引出电子枪. 如果设 A_1 的透射系数为 T , 则电子枪最后输出电流密度为

$$J_{ez} = T j_{ez} = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m_e}} T \frac{(V_{A_2} - V_{A_1})^{3/2}}{d^2}. \quad (16)$$

5. 空心阴极等离子体电子枪的设计

[8-10]

空心阴极等离子体电子枪的基本物理参量包括 电子枪的几何尺寸、所充气体的气压、带电粒子的初始密度、二次电子发射系数及各个电极的电位. 几何尺寸包括空心圆筒阴极的半径 R 、长度 L 和激励电极 A 的尺寸 L_A 以及两栅网的间距 d . 图 3 即为基本参数示意图.

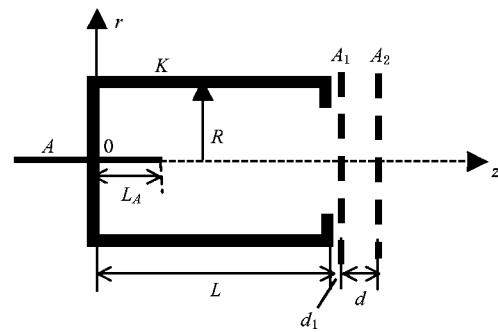


图 3 空心阴极等离子体电子枪基本参数示意图

5.1. 空心阴极等离子体电子枪设计的基本原则

从理论分析并参考前人对空心阴极设计的总结知, 在设计空心阴极等离子体电子枪时应遵循: 1) 圆筒空心阴极的半径 R 必须大于阴极暗区而小于阴极暗区与负辉区之和, 这样才能保证圆筒空心阴极的负辉区相互重叠, 形成空心阴极放电. 2) 圆筒空心阴极的长度与圆筒直径之比应小于 7, 以确保空心阴极效应的产生. 3) 空心阴极电子枪的加速间隙与加速电压的设计受到两栅网阳极绝缘程度的限制.

5.2. 数值模拟过程中所用的基本方程

数值模拟过程中所用的基本方程为

$$\nabla^2 V = -\frac{|e|}{\epsilon_0} (n_i - n_e), \quad (17)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot n_e v_e = S, \quad (18)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot n_i v_i = S, \quad (19)$$

$$\frac{d \mathbf{v}}{dt} = -\frac{e \mathbf{E}}{m}, \quad (20)$$

$$\mathbf{j} = nev, \quad (21)$$

(17)式为静电场并考虑到空间电荷效应的 Maxwell 方程。(18)与(19)式为考虑时间因素的前提下,电子与离子的连续性方程。(20)与(21)式分别为粒子运动方程与电流密度表达式。式中 n_e, v_e 及 n_i, v_i 分别为电子和正离子的数密度和平均速度, V 为阴极电压, E 为作用区电场强度, j 为电流密度, S 为电离源项, 表示气体原子的净电离率, 也称为源函数, 通过快电子蒙特-卡洛模拟的输出为慢电子产生速率 $S_e(r, z)$ 和离子产生速率 $S_i(r, z)$ 。此两速率通过放电总电流归一化, 方法如下: 如果从阴极发射的电子总数为 N_0 , 在体积元 $\Delta r \times \Delta z \times L$ 内产生的慢电子或离子数为 N_{rz} , 则电离源项 $S(r, z)$ 为

$$S(r, z) = \frac{N_{rz}}{N_0} \frac{I}{|e|(1 + 1/\gamma) \Delta r \Delta z L}, \quad (22)$$

式中 γ 为阴极二次电子发射系数, L 为电极长度, I 为放电总电流。具体的形式及算法见文献 [11, 12]。

5.3. 空心阴极等离子体电子枪的优化参数

考虑到上述原则, 利用基本方程和边界条件, 其中物理边界条件为: 气体压强暂给 6.6Pa、阴极电位为 -5kV、调制极电位为 5kV、引出极电位为 100kV、激励电极电位为 0V、带电粒子初始密度为 10^9 cm^{-3} 、二次电子发射系数为 0.3; 几何边界条件包括空心阴极半径 $R = 6\text{cm}$ 、管长 $L = 11.2\text{cm}$ 、加速间隙 $d = 1.1\text{cm}$ 、气压 $P = 19.8\text{Pa}$ 、阴极电位 $V_{\text{cathode}} = -5\text{kV}$ 、调制阳极电位 $V_{A_1} = 5\text{kV}$ 、引出极电位 $V_{A_2} = 100\text{kV}$ 、激励电极电位 $V_{\text{electrod}} = 0\text{V}$ 。

6. 结果与讨论

6.1. 空心阴极内初始时刻的电位、电场分布及带电粒子的变化

由图 4—图 6 可以看出, 在初始时刻由于只有

激励电极作用, 空心阴极中带电粒子的数量非常少, 以及空心阴极的特殊结构, 在空心阴极内部的电场比较弱, 电压降主要集中在空心阴极中的电极附近, 并沿着 r 轴和 z 轴迅速下降。在这个较弱的径向电场 E_r 作用下, 空心阴极中的那些少量的自由电子或离子会加速其双极性运动, 并进而不断碰撞其他的中性原子使之电离, 使空心阴极中的带电粒子数迅速上升。该变化趋势见图 7, 曲线表明了空心阴极中的带电粒子(电子 e 和离子 i)从 $t = 0$ 时刻到 $t = 300\text{ns}$ 的变化情况。

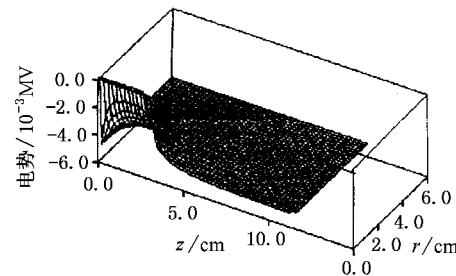


图 4 电子枪内电势分布

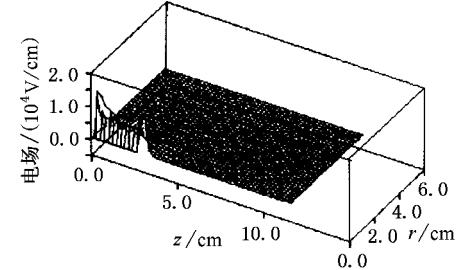


图 5 径向电场 E_r

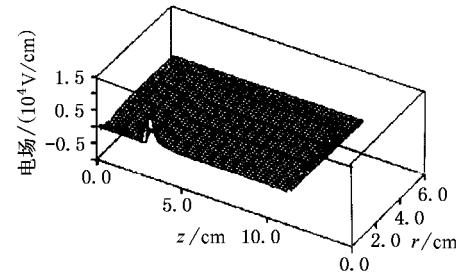


图 6 纵向电场 E_z

6.2. 空心阴极等离子体电子枪输出束流

限于计算工作量, 只给调制阳极加了一个脉宽为 $1\mu\text{s}$ 的方波, 在该方波脉冲作用下, 模拟出了一个

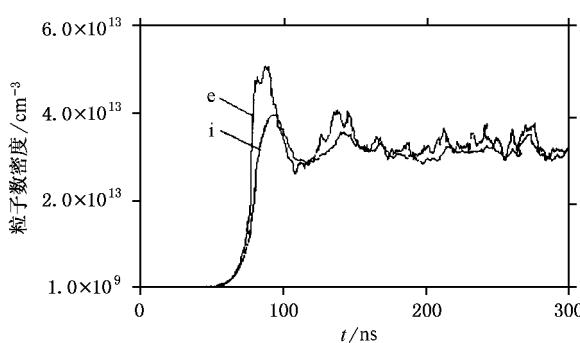


图7 空心阴极等离子体电子枪阴极内等离子体密度变化

脉宽约为 $1\mu\text{s}$ 的电子枪输出电子束流波形. 图8为优化之后的空心阴极等离子体电子枪的输出束流图形. 由图8可以看出, 电子枪输出束流幅值已超过 2kA .

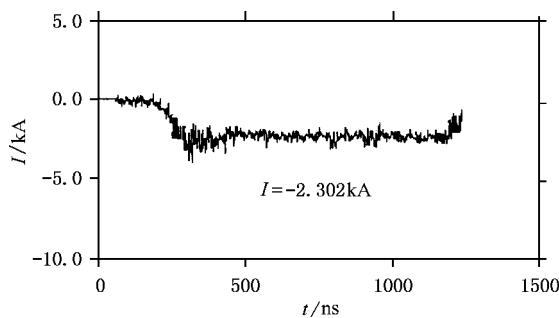


图8 空心阴极等离子体电子枪输出电子束流

由于在静电极限下, 最高频率的振荡接近于电子等离子体频率 ω_{pe} , 在粒子模拟过程中, 为了保证数值稳定性, 时间步长一般取为 $\Delta t = 0.2\omega_{\text{pe}}^{-1}$. 当然也必须分辨集体性质的特征标长, 所以网格大小一般选取为 $1-2\lambda_{\text{De}}$, 其中 λ_{De} 为电子 Debye 长度, 因此在模拟过程中所需的时间就比较长. 同时, 由于时间步长较短, 模拟所得到的结果基本上反映的是等离子体电子枪的微观物理机理与现象.

7. 结 论

1. 由于空心阴极等离子体电子枪克服了场发射电子枪等离子体闭合加速间隙的缺点, 因此可产生长脉冲强流电子束.

2. 调制阳极电压确定了空心阴极内等离子体的密度, 它与引出阳极电压的合理配合决定了等离子体阴极界面的稳定性, 以及电子枪输出电子束流的大小和质量.

3. 激励电压的作用是激活空心阴极中的自由电子使气体电离形成低密度等离子体背景, 从而起到加速等离子体阴极的形成和保持输出束流的稳定性的作用.

4. 设计的空心阴极等离子体电子枪输出电流脉宽为 $1\mu\text{s}$, 幅值达 2kA .

[1] Goebel D M, Schumacher R W and Watkins R M 1992 *Proc. Beams '92 Conf.*, vol II p1093

[2] Goebel D M *et al* 1992 *Proc. SPIE* **1629** 119

[3] Butler J M *et al* 1992 *Proc. Beams '92 Conf.*, vol III p1637

[4] Goebel D M *et al* 1994 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** 547

[5] Yao Z X, Zheng D X and Feng X M 1991 *Physical Electronics* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) [姚宗熙、郑德修、封学民 1991 物理电子学(西安: 西安交通大学出版社)]

[6] Yuri P R 1991 *Physics* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag)

[7] Krasic Y E, Dunaevsky A and Felsteiner J 1998 *Proc. Beams '98 Conf.*, vol I p376

[8] Boeuf J P and Pitchford L C 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 286

[9] Zhang J T 1995 *Interaction of Laser and Plasma* (Beijing : Graduate School, China Academy of Engineering Physics) [in Chinese] [张家泰 1995 激光等离子体相互作用(北京: 中国工程物理研究院研究生部)]

[10] Hashiguchi S 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 297

[11] Yu J H, Lai J J, Huang J J, Wang X B and Qiu J L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2080 [in Chinese] [余建华、赖建军、黄建军、王新兵、丘军林 2002 物理学报 **51** 2080]

[12] Lai J J, Yu J H, Huang J J, Wang X B and Qiu J L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1528 [in Chinese] [赖建军、余建华、黄建军、王新兵、丘军林 2001 物理学报 **50** 1528]

Study of the hollow cathode plasma electron-gun^{*}

Zhang Yong-Hui Jiang Jin-Sheng Chang An-Bi

(Institute of Applied Electronics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 29 August 2002 ; revised manuscript received 31 October 2002)

Abstract

For developing a novel high-current , long pulsedwidth electron source , the theoretics and mechanism of the hollow cathode plasma electron-gun are analyzed in detail in this paper , the structure and the physical process of hollow cathode plasma electron-gun are also studied. This gun overcomes the limitations of most high-power microwave tubes , which employ either thermionic cathodes that produce low current-density beams because of the limitation of the space charge , or field-emission cathodes that offer high current density but provide only short pulsedwidth because of plasma closure of the accelerating gap. In the theories studying on hollow cathode plasma electron-gun , the characteristic of the hollow-cathode discharge is introduced , the action during the forming of plasma of the stimulating electrode and the modulating anode are discussed , the movement of electrons and ions and the primary parameters are analyzed , and the formulas of the electric field , beam current density and the stabilization conditions of the beam current are also presented in this paper. The numerical simulation is carried out based on Poisson 's equation , and the equations of current continuity and movement. And the optimized result is reported. On this basis , we have designed a hollow-cathode-plasma electron-gun , whose output pulse current is 2kA , and pulse width is 1 microsecond.

Keywords : hollow cathode , plasma , electron-gun

PACC : 5250J , 5280 , 5290 , 4260H

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No.863-410-7-3) , and the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics(Grant No.20020430).