

文章编号: 1001- 4322(2001)03- 0357- 03

# 电子初始能量对双向流二极管空间电荷限制流密度的影响

石 磊, 张嘉生, 邱爱慈, 何小平

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 从理论上研究了阴极发射电子初始能量对一维平面非相对论性双向流二极管内空间电荷限制电子、离子流密度的影响, 并与阴极发射电子初始能量为 0 情况下的空间电荷限制电子、离子流密度进行了比较。

关键词: 空间电荷限制电流; 二极管; 双向流; 电子初始能量

中图分类号: TL 501. 5, O 562. 5

文献标识码: A

二极管的电流电压关系是二极管物理中最重要的特性之一。对于一维平面双向流非相对论性二极管, 设阴、阳极间隙为  $d$ , 在  $x = 0$  处阴极电势为 0, 在  $x = d$  处阳极电势为  $V$ , 离子电荷数为  $Z_i$ , 离子质量为  $m_i$ 。当阴、阳极发射电子、离子初始速度均为 0 时, 双向流空间电荷限制电子流和离子流密度分别为<sup>[1]</sup>

$$j_{e0} = 1.86 \times \frac{46V^{3/2}}{9d^2} \sqrt{\frac{2e}{m_e}}, \quad j_{i0} = 1.86 \times \frac{46V^{3/2}}{9d^2} \sqrt{\frac{2Z_i e}{m_i}} \quad (1)$$

在实际中, 有些阴极发射的电子(如热阴极和铁电体阴极发射<sup>[2, 3]</sup>)和阳极发射的离子(如绝缘阳极膜闪络形成阳极等离子体<sup>[4]</sup>和离子多级加速<sup>[5, 6]</sup>)是具有一定初始能量的。阴、阳极发射的电子、离子初始能量对二极管工作状态(如束流密度和阻抗特性等)影响很大。人们对纯电子流(无离子流)二极管中阴极发射电子初始能量对空间电荷修正电子流密度的影响进行了较充分的研究<sup>[2, 7, 8]</sup>。本文研究在一维平面双向流非相对论性二极管中阴极发射电子的初始能量对二极管产生的空间电荷限制电子流和离子流密度的影响。

## 1 电子初始能量对双向流二极管空间电荷限制电流密度的影响

假设: 当阴极发射电子初始速度为  $v_{in}$  (阳极发射离子初始速度为 0) 时, 将在距阴极表面一定距离处产生一个势阱  $\phi$ , 当势阱电势达到  $\phi = -m_e v_{in}^2 / 2e$  时, 双向流空间电荷限制流达到极限值, 将此处距阴极的距离记为  $x_\Delta$ , 此处电子的动能等于 0, 进一步注入电子流量将导致电子的反射。

将二极管分化为两个区, I 区:  $x_\Delta < x < d$ ; II 区:  $0 < x < x_\Delta$ , 如图 1 所示。在整个二极管区域内的

泊松方程为 
$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_e - \rho_i) \quad (2)$$

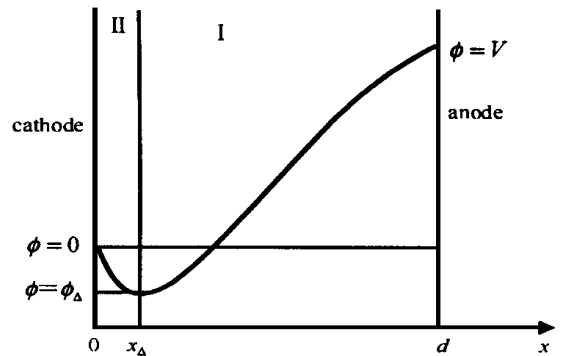


Fig 1 Potential distribution and region divide of one-dimensional slab diode under the condition of energetic electron emitted from cathode  
图 1 阴极发射电子具有初始能量时一维平面双向流二极管内电势分布及区域划分示意图

其中  $\phi$  为二极管内随空间变化的电势;  $\rho_e$ 、 $\rho_i$  分别为局域电子、离子电荷密度.

电子、离子速度可分别表示为  $v_e = \sqrt{v_{in}^2 + 2e\phi/m_e}$  和  $v_i = \sqrt{2Z_i e(V - \phi)/m_i}$ . 在稳态情况下, 由电子和离子电荷守恒, 可得电子流密度  $j_e = \rho_e v_e$  和离子流密度  $j_i = \rho_i v_i$ . 由此可将(2)式写为

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \{ j_e (v_{in}^2 + 2e\phi/m_e)^{-1/2} - j_i [2Z_i e(V - \phi)/m_i]^{-1/2} \} \quad (3)$$

I 区 ( $x_{\Delta} < x < d$ ): 设  $y = d\phi/dx$ , 注意到  $d^2\phi/dx^2 = y dy/d\phi$  并考虑边界条件  $x = d$  时,  $d\phi/dx = 0$ ,  $\phi = V$ , 将(3)式积分 ( $x: d \rightarrow x, \phi: V \rightarrow \phi$ ) 得

$$\frac{d\phi}{dx} = \sqrt{\frac{4}{\sqrt{2e\epsilon_0}} \{ j_e m_e^{1/2} [(\phi + m_e v_{in}^2/2e)^{1/2} - (V + m_e v_{in}^2/2e)^{1/2}] + j_i m_i^{1/2} (V - \phi)^{1/2}/Z_i^{1/2} \}} \quad (4)$$

再次积分 ( $x: x_{\Delta} \rightarrow d, \phi: \phi \rightarrow V$ ) 得

$$d - x_{\Delta} = \left(\frac{\sqrt{2e\epsilon_0}}{4}\right)^{1/2} \int_{\phi}^V \{ j_e m_e^{1/2} [(\phi + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2} - (V + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2}] + \frac{j_i m_i^{1/2} (V - \phi)^{1/2}}{Z_i^{1/2}} \}^{-1/2} d\phi \quad (5)$$

II 区 ( $0 < x < x_{\Delta}$ ): 边界条件  $x = x_{\Delta}$  时,  $d\phi/dx = 0$ ,  $\phi = \phi_{\Delta}$ ;  $x = 0$  时,  $\phi = 0$ . 按 I 区同样方法将(3)式积分 ( $x: 0 \rightarrow x, \phi: 0 \rightarrow \phi$ ) 得

$$\frac{d\phi}{dx} = \sqrt{\frac{4}{\sqrt{2e\epsilon_0}} [j_e m_e^{1/2} (\sqrt{\phi + \frac{m_e v_{in}^2}{2e}} - \sqrt{\phi_{\Delta} + \frac{m_e v_{in}^2}{2e}}) + j_i \sqrt{\frac{m_i}{Z_i}} (\sqrt{V - \phi} - \sqrt{V - \phi_{\Delta}})]} \quad (6)$$

再次积分 ( $x: 0 \rightarrow x_{\Delta}, \phi: 0 \rightarrow \phi_{\Delta}$ ) 得

$$x_{\Delta} = \frac{\sqrt{2e\epsilon_0}}{4} \int_0^{\phi_{\Delta}} [j_e \sqrt{m_e} (\sqrt{\phi + \frac{m_e v_{in}^2}{2e}} - \sqrt{\phi_{\Delta} + \frac{m_e v_{in}^2}{2e}}) + j_i \sqrt{\frac{m_i}{Z_i}} (\sqrt{V - \phi} - \sqrt{V - \phi_{\Delta}})]^{-1/2} d\phi \quad (7)$$

$x = x_{\Delta}$  处电场为 0, 并且考虑到此处的电势  $\phi_{\Delta} = m_e v_{in}^2/2e$ , 由(4)式可得

$$j_i/j_e = \sqrt{m_e Z_i/m_i} \quad (8)$$

将(7)、(8)和(5)式联立, 并考虑到  $\phi_{\Delta} = m_e v_{in}^2/2e$ , 得双向流空间电荷限制电子流、离子流密度分别为

$$j_e = \frac{\epsilon_0}{4d^2} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int_0^V [(\phi + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2} + (V - \phi)^{1/2} - (V + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2}]^{-1/2} d\phi^2 \quad (9)$$

$$j_i = \frac{\epsilon_0}{4d^2} \sqrt{\frac{2Z_i e}{m_i}} \int_0^V [(\phi + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2} + (V - \phi)^{1/2} - (V + \frac{m_e v_{in}^2}{2e})^{1/2}]^{-1/2} d\phi^2 \quad (10)$$

将电子初始能量与  $eV$  之比记为  $R_{in} = m_e v_{in}^2/2eV$ , 并设  $\xi = \phi/V$ , 可以得到双向流空间电荷限制电子流、离子流密度增大因子 (当阴极发射电子具有初始能量时与当阴极发射电子初始能量为 0 时的双向流空间电荷限制流密度之比) 均为

$$\frac{j_e}{j_{e0}} = \frac{j_i}{j_{i0}} = \frac{1}{0.302} \int_0^1 [(\xi + R_{in})^{1/2} + (1 - \xi)^{1/2} - (1 - R_{in})^{1/2}]^{-1/2} d\xi^2 \quad (11)$$

双向流空间电荷限制流密度增大因子随阴极发射电子初始能量的变化关系如图 2 所示. 可以看出, 当二极管电压一定时, 阴极发射电子初始能量使得双向流二极管产生的空间电荷限制电子流、离子流密度减小. 当阴极发射电子能量与  $eV$  之比大于 0.01 时, 双向流空间电荷限制电子流、离子流密度随阴极发射电子能量的增加迅速减小. 当电子初始能量等于 0 (即  $R_{in} = 0$ ) 时, 双向流空间电荷限制电子流、离子流密度增大因子均等于 1, 结果是合理的. 当电子初始能量远远大于  $eV$  时, (11) 式趋于  $1/1.86$ , 由

(9) 和(10) 式得双向流空间电荷限制电子流、离子流密度分别趋于  $j_e = (4\epsilon_0 V^{3/2}/9d^2) \sqrt{2e/m_e}$  和  $j_i = (4\epsilon_0 V^{3/2}/9d^2) \sqrt{2Z_i e/m_i}$ , 分别与纯电子流、纯离子流二极管的空间电荷限制电子流、离子流密度<sup>[1]</sup>相同. 在双向流二极管中, 随着阴极发射电子初始能量的增加, 其密度减小, 这样导致阳极发射离子的密度

也减小,从而使得双向流空间电荷限制电子流、离子流密度随阴极发射电子能量的增加而减小。

阴极发射电子具有一定能量时,严格的势阱电势值和位置与电子发射条件有关,需用数值方法求出。在实际中,由于势阱处电子密度不可能无限大,而是具有一定的数值,势阱电势值要比本文假设的  $\phi_{-} - m_e v_{in}^2 / 2e$  略大,但本文的结果在一定程度上反映了二极管双向空间电荷限制流密度增大因子随阴极发射电子初始能量的变化关系。

## 2 小 结

从理论上研究了阴极发射电子的初始能量对双向流二极管内电子、离子流密度的影响。当阴极发射电子的初始能量较大时,双向流二极管产生的空间电荷限制电子流、离子流密度的减小不能忽略,在实际实验中应尽量减少阴极发射电子的初始能量(如尽量不使用热阴极和铁电体阴极等)。阳极发射离子的初始能量对双向流二极管产生的空间电荷限制电子流、离子流密度的影响有待于进一步研究。本文所得的结论对双向流二极管实验结果的分析 and 二极管物理设计具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 石磊,邱爱慈,王永昌,等. 高功率脉冲离子束的产生[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6): 776-780  
[Shi L, Qiu A C, Wang Y C, et al. The generation of high-power pulsed ion beams[J]. High power laser and particle beams, 1999, 11(6): 776-780] (in Chinese)
- [2] 刘国治. 二极管空间电荷限制电流修正[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 375-378  
[Liu G Z. Modification to space-charge-limited current of intense electron beam diode[J]. High power laser and particle beams, 2000, 12(3): 375-378] (in Chinese)
- [3] Ivers J D, Schachter L, Nation J A. Electron-beam diodes using ferroelectric cathodes[J]. *J Appl Phys*, 1993, 73(6): 2667-2671.
- [4] Duvall R E, Fruchtmann A, Maron Y, et al. A model for energetic ion generation in an anode plasma[J]. *Phys Fluids*, 1993, B5(9): 3399-3407.
- [5] Mehlhorn T A. Intense ion beams for inertial confinement fusion[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1997, 25(6): 1336-1356
- [6] Slutz S A, Desjarlais M P. Theory of multistage intense ion-beam acceleration[J]. *J Appl Phys*, 1990, 67(11): 6705-6717.
- [7] Jory H R, Trivelpiece A W. Exact relativistic solution for the one-dimensional diode[J]. *J Appl Phys*, 1969, 40(10): 3924-3926
- [8] Liu S, Dougal R A. Initial velocity effect on space-charge-limited currents[J]. *J Appl Phys*, 1995, 79(10): 5919-5925.

## Initial energy of electrons effect on space-charge-limited current densities in two-component flux diode

SHI Lei, ZHANG Jia-sheng, QIU Aici, HE Xiaoping

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

**ABSTRACT:** The beam current characteristics of a two-component space-charge diode under the effect of electron injection with initial energy are studied. The diode is divided into two regions, by solving Poisson equations in the two regions, to yield analytical expressions for space-charge-limited electron/ion beam current densities of non-relativistic one-dimensional slab two-component flux diode as a function of the initial energy of electrons emitted from the cathode, and compared with these results of zero initial energy of electrons, the results show that the two-component space-charge-limited current densities decrease as the initial energy of electrons increase.

**KEY WORDS:** space-charge-limited current; diode; two-component fluxes; initial energy of electron

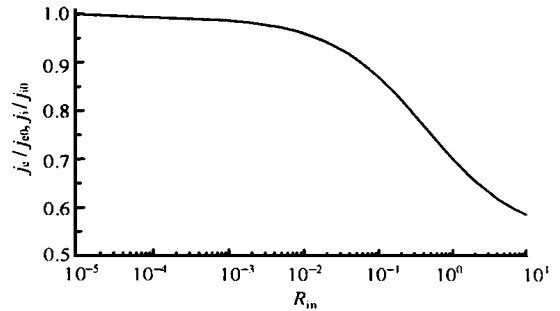


Fig. 2  $R_{in}$  and electron space-charge-limited current density enhanced factors as a function of initial energy of electron emitted from cathode

图2 双向流空间电荷限制流密度增大因子随阴极发射电子初始能量的变化关系