

文章编号: 1001-4322(1999)06-0776-05

高功率脉冲离子束的产生

石磊^{1,2}, 邱爱慈², 王永昌¹, 何小平², 张嘉生², 蒯斌², 曾正中²

(1. 西安交通大学, 西安, 710049; 2. 西北核技术研究所, 西安市 69 号信箱 13 分箱, 710024)

摘要: 分析了高功率二极管中的双向流以及提高离子流产生效率的反射二极管、磁绝缘二极管和箍缩二极管工作原理, 概述了高功率脉冲离子束研究进展及发展方向。

关键词: 高功率脉冲离子束; 二极管; 离子束产生效率

中图分类号: O462.5 **文献标识码:** A

七十年代中期以后, 由于核聚变研究的需要, 高功率脉冲离子束的研究得到很大发展, 后来高功率脉冲离子束主要用于材料科学研究。近十年来发展迅速, 如高功率脉冲离子束表面处理、薄膜沉积、纳米粉末合成, 以及模拟 X 射线对材料的响应等。高功率脉冲离子束及其应用技术已成为当前世界上科学发展中最为活跃的领域之一, 是一门多学科交叉的新技术。

高功率脉冲离子束是利用高功率脉冲电子束加速器产生的, 它的基本构成包括初级储能单元、中间储能单元、脉冲形成和压缩单元以及二极管负载。这种加速器的工作原理简单地说, 是将低功率储存电磁能量以高功率释放给二极管负载, 二极管负载再将电磁能转换成离子束或其它辐射。

1 二极管中的双向流^[1]

在高功率脉冲加速器中产生离子束的问题首先与从阴极发射的电子流出现有关。当高压脉冲加到二极管两端时, 很快形成一个覆盖整个阴极表面的等离子体鞘层, 在电场的作用下, 电子从阴极等离子体进入二极管间隙, 入射到阳极上, 将阳极加热, 产生阳极等离子体来作为离子源, 从阳极等离子体引出的离子流部分中和了电子空间电荷。阳极等离子体也可以用其它方法(如外源法和表面闪络法等)产生。为了便于讨论, 以下仅考虑一维平面二极管情况。

1.1 二极管中只有电子流(无离子流)的情况

电子为非相对论时, 电子流密度为

$$j_{ecl} = (4\epsilon_0/9)(2e/m_e)^{1/2}\varphi_0^{3/2}/d^2 \quad (1)$$

这就是著名的 Child-Langmuir 公式, 式中 φ_0 为二极管电压; d 为阴阳极间距。电子为相对论情况时, 电子流密度为

$$j_e = (\epsilon_0 m_e c^3 / 2ed^2) \left[\int_0^{1+\varphi_0/m_e c^2} (t^2 - 1)^{-1/2} dt \right]^2 \quad (2)$$

1.2 二极管中只有离子流(无电子流)的情况

由于离子质量比电子质量大得多, 一般只考虑离子为非相对论情况, 离子流密度为

$$j_{icl} = (4\epsilon_0/9)(2Z_i e/m_i)^{1/2}\varphi_0^{3/2}/d^2 \quad (3)$$

• 国防科技基础研究基金资助课题

1999年2月6日收到原稿, 1999年10月10日收到修改稿。

石磊, 男, 1966年10月出生, 博士生, 助研

其中 m_i 和 Z_i 分别为离子质量和电荷数。

1.3 二极管中具有双向流的情况

电子为非相对论情况时, 电子流和离子流密度分别为

$$j_e \approx 1.86j_{ecl}, j_i \approx 1.86j_{icl} \quad (4)$$

二极管中由于离子空间电荷的存在, 阴阳极间隙内空间电荷部分中和, 使电子流和离子流的密度都增大到只有单一粒子时的 1.86 倍。

电子为相对论情况时, 电子流和离子流密度分别为

$$j_e = (9/16)j_{ecl} \left(\int_0^1 \{t^{1/2}(1+\alpha t)^{1/2} + (1+\alpha)^{1/2}[(1-t)^{1/2} - 1]\}^{-1/2} dt \right)^2 \quad (5)$$

$$j_i = j_e (Z_i m_e / m_i)^{1/2} (1+\alpha)^{1/2} \quad (6)$$

其中 $\alpha = e\varphi_0 / 2m_e c^2$ 。

2 提高二极管中离子流的方法及研究进展

双向流情况下, 二极管离子产生效率为

$$k_{eff} = I_i / (I_i + I_e) = j_i / (j_i + j_e) \quad (7)$$

为了提高离子产生效率, 必须改善二极管中电子密度分布或抑制电子在二极管中的流动。可以通过增加电子在二极管内的平均渡越时间的方法, 来提高离子转换效率 k_{eff} , 对于空间电荷限制流 ($\varphi_A = \varphi_C = 0$), 二极管内总的电荷近似为 0。离子流与电子流之比等于电子平均渡越时间 $\langle t_e \rangle$ 与离子平均渡越时间 $\langle t_i \rangle$ 之比

$$I_i / I_e \approx \langle t_e \rangle / \langle t_i \rangle \quad (8)$$

依赖特定二极管形状和加速器参数, 可以通过以下几个方法来增大 $\langle t_e \rangle$: (1) 电子多次穿过阳极, 即采用反射三极管; (2) 在二极管间隙施加一外加平行于阴阳极表面的磁场, 即采用磁绝缘二极管; (3) 利用二极管间隙束流产生的自磁场, 即采用箍缩二极管。

2.1 反射三极管

反射三极管工作原理如图 1(a) 所示, 它由一个阳极平面和两个阴极平面组成, 两个阴极平面电势为 0, 阳极平面电势为 φ_0 (正值)。阳极为具有碳氢化合物涂层的金属箔或金属网, 或采用非导电性碳氢化合物膜(网)(如尼龙), 阳极厚度要小于电子射程。阴极发射的电子轰击并通过阳极, 由于在穿越阳极时的能量损失, 它们达不到对面的阴极就停下来, 然后这些电子

又在电场的作用下返回, 再次穿过阳极并损失部分能量, 这样电子作不断穿越阳极的运动, 直到其动能低到不能穿过阳极而停在阳极上为止, 这样延长了电子在阴阳极间隙中的平均渡越时间, 抑制了电子流, 离子流得到增强; 在此过程中形成阳极等离子体, 由于提高了阳极附近的电子密度, 使从阳极等离子体引出的离子束流密度大大增加。假若阴极是可穿透的, 离子就可从阴极引出, 形成离子束。在实际上, 不需要第二个阴极, 因为阳极之外的空间电荷将确保形成一虚阴极(如图 1(b) 所示), 并且因此提供了能使离子流占优势所需的电子反射。反射三极管离子产生效率为^[1]

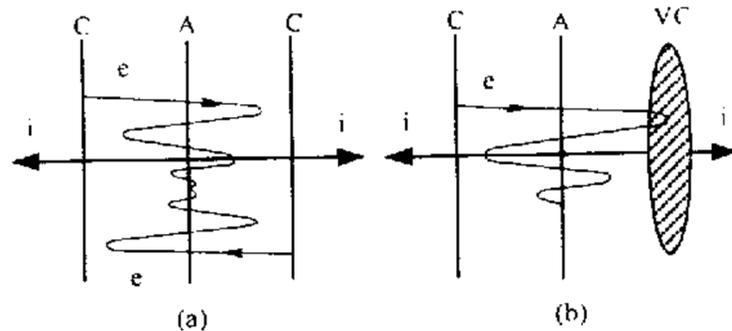


Fig. 1 Principle diagram of reflex triode

图 1 反射三极管原理图

$$k_{\text{eff}} = [1 + (m_i/Z_i m_e)^{1/2}/\eta]^{-1} \quad (9)$$

其中 η 是电子通过阳极的平均次数,当阳极面上电子束流密度按能量分布的能谱幅度为常数时,在最佳条件下, $\eta \approx 11$, $k_{\text{eff}} \approx 20\%$ 左右,二极管电流大部分是电子流的贡献。由于阳极受到电子束轰击,一次放电后就损坏了。另外,为了保持一维流体通常需要加强的纵向磁场,其结构较为复杂。80 年代之后,很少采用这种结构,但它的物理思想在箍缩二极管中得到了应用。

2.2 磁绝缘二极管

磁绝缘二极管工作原理如图 2 所示。在二极管阴阳极间隙加一适当的绝缘磁场,磁力线平行于阴极平面,磁场足够强使得从阴极发射的电子沿类磁子轨道运动,不能达到阳极,这样电子流得到抑制。使间隙绝缘所需的最小磁场称为临界磁场,其相对论性的校正值为^[1]

$$B_c = (m_e c / e d) [2e\phi_0 / m_e c^2 + (e\phi_0 / m_e c^2)^2]^{1/2} \quad (10)$$

而质量比电子大得多的离子运动受磁场的偏转较小,基本上径直穿过间隙,偏转角约为

$$\bar{\theta} = (m_e / m_i)^{1/2} B / B_c \quad (11)$$

其中 B 为外加绝缘磁场。若有必要,从阴极平面引出离子束后,再加反向磁场抵消其偏转。

Sudan 和 Lovelace^[2]首次对磁绝缘二极管进行了详细的理论分析,假设在二极管开始加电压时,阳极表面已形成丰富的离子,电子是非相对论的。电子被限制在阴极附近的电子鞘层内,电子流是准层流的,其轨迹如图 2 所示。离子流密度为

$$j_i = (4\epsilon_0 / 9) (2Z_i e / m_i)^{1/2} (\phi_0 - \phi_x)^{3/2} / (d - x_x)^2 \quad (12)$$

其中 $x_x = 1.5d [1 - (1 - 16\phi_0 m_e / 9d^2 B^2 e)^{1/2}]$ 为电子可到达的距阴极面最大距离; $\phi_x = B^2 e x_x^2 / 2m_e$ 为 x_x 处的电势。当外加磁场远大于临界磁场时,离子流密度近似(3)式;当外加磁场接近临界磁场时,电子鞘层扩展到阳极附近,离子流密度大约是(3)式值的三倍。

Bergeron^[3]考虑了电子的相对论效应,通过求解电子和离子流体自治方程,发现由于电子质量增大、外加磁场在临界磁场附近时,离子流密度大约是(3)式值的六倍。Antonsen 等人^[4]假设电子以速度 $\vec{E} \times \vec{B}$ 沿等势面运动,其结果与 Bergeron 模型的结果相近。以上几种模型均假设阴极面是固定的,电子鞘层不能运动,它们不能解释磁绝缘二极管的阻抗特性,与实验结果相差较大。Desjarlais 等人^[5]对上述模型进行了修正,考虑了电子鞘层(又称虚阴极)向阳极运动造成的有效间隙减小因素,此模型较成功地解释了二极管阻抗特性与实验结果符合较好。

要使磁绝缘二极管能够成功地工作,需满足两个条件,一是阳极面能提供丰富的等离子体;二是要有设计很好的磁场构形。前者多采用表面闪络技术来获得,近些年发展了脉冲等离子体技术,如采用双极性脉冲,即阳极先加负高压脉冲形成等离子体层,再加正高压加速正离子;采用气体感应放电形成阳极等离子体;以及采用激光预电离形成阳极等离子体等。后者要求磁力线尽量不要穿过二极管间隙,磁场构形不能容许电子很密地穿过间隙。在磁绝缘二极管实验中,曾采用过多种二极管结构,主要有:(1)桶状二极管,以内电极做阴极的两个同心圆筒,从阴极表面的中空部分(或孔中)引出离子束。(2)阳极为平面结构,阴极为两个同心圆筒组成,

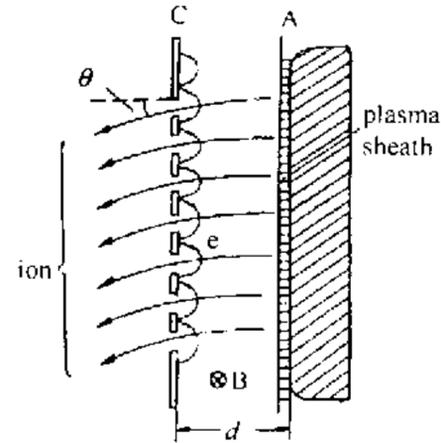


Fig. 2 Principle diagram of magnet-insulating diode

图 2 磁绝缘二极管原理图

离子从阴极两个圆筒之间引出。

磁绝缘二极管中离子束流增大主要是由于电子鞘层有一定厚度和电子鞘层整体向阳极运动造成的。另外还有一个因素就是阴、阳极等离子体形成后,以一定速度($2\sim 4\text{cm}/\mu\text{s}$)作相对运动,使得有效间隙减小。由以上三个因素,磁绝缘二极管的离子束流在适当情况下,可比 Child-Langmuir 值增大几倍至几十倍,离子束产生效率可达 80% 以上。

2.3 箍缩(pinch)二极管

在大尺度比二极管中,阴极发射的电子轰击阳极很快导致阳极等离子体的形成,可以引出强离子流。设想用圆环形阴极,由于电子束的轰击,从阳极材料中释放气体并形成等离子体,在二极管电场作用下,从阳极等离子体发射的离子朝向阴极运动,在二极管的双向流引起电子束流增大,束就开始箍缩,在箍缩的每个阶段,阳极释放出更多的等离子体,不断从等离子体发射离子,电子束继续箍缩。当电子束到达二极管轴线时,形成准稳态,电子流从阴极的边缘流向轴;由于离子质量较大,自磁场对它的影响可忽略,离子几乎沿直线从阳极流向阴极。

将带电粒子流随时间的变化分为四个阶段^[1]:(1) 低压下的纯电子流动;(2) 高压下的弱箍缩;(3) 由于阳极等离子体的时间相关离子发射引起的崩溃箍缩流;(4) 稳态的箍缩电子流和层流离子流。如图 3 所示。假定最终达到第四阶段,对箍缩电子流来说,渡越长度约为二极管半径,离子流的渡越长度仍为二极管的间距。因此渡越时间的比值增大 R/d 倍。

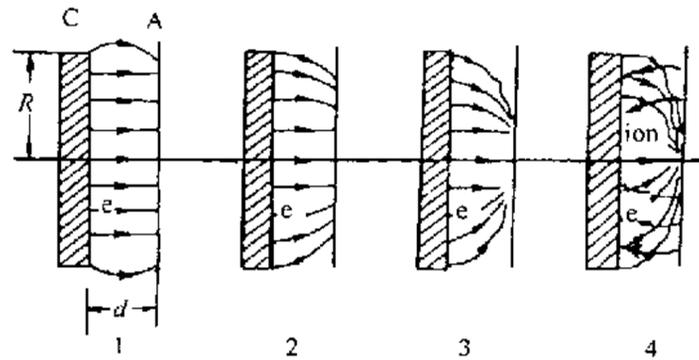


Fig. 3 Evolution of charge flow in an intense pinched diode

图 3 强箍缩二极管中电荷流动的演变过程

通过理论分析得离子流与电子流的比值为

$$I_i/I_e = (R/2d)(2e\phi_0 Z_i/m_i c^2)^{1/2} \quad (13)$$

在尺度比 R/d 很大时,离子流有可能超过电子流。Poukey 的数值模拟结果表明,箍缩二极管中的总束流很近似于饱和顺位流^[6],即

$$I_{\text{tot}} = I_i + I_e = I_p = 8500(R/d)\gamma \ln[\gamma + (\gamma^2 - 1)^{1/2}] \quad (14)$$

其中 γ 为相对论因子。之后,箍缩二极管理论研究一直没有大的发展,但在二极管实现技术上进行了许多改进。

Swain 等人^[7]利用 200kV、50kA 的小型加速器进行了箍缩过程的研究,无论采用金属或碳氢化合物作阳极,产生的主要离子都是 H^+ 或 H^{2+} ,这是由于金属作表面的吸附气体等杂质、氢原子质量较小等因素造成的,用碳氢化合物作阳极时极易产生阳极等离子体。Cooperstein 等人^[8]用阳极膜代替固体阳极改善了箍缩过程,该二极管的阳极座前面有一有机材料薄膜绷在一个绝缘环上,并通过二极管轴上一根中央导体同阳极保持电接触,阴极是一空心金属圆筒,阴极发射的电子通过阳极膜后,在中央导体电流产生的角向磁场作用下,反射回二极管间

隙,这样电子束多次穿过阳极膜并向轴线箍缩,可产生更多的阳极等离子体,电子路径进一步增大,使离子流产生效率提高。Stephanakis 等人^[9]对上述二极管又作了改进,将中央导体去掉,有机材料阳极膜边缘处固定在阳极上,把阳极膜后方的阳极部分掏空,与二极管一起抽真空。阴极发射的电子穿过阳极膜后,形成虚阴极,电子在阴极与虚阴极之间来回反射,这种二极管称为箍缩反射二极管,其电子路径更长,离子产生效率更高,实验得到的 I_i/I_e 值略大于(13)式的理论值,既适用于低阻二极管也适用于高阻二极管。

3 结束语

高功率脉冲离子束是在核聚变研究中发展起来的,后来在许多领域都得到了应用,技术上取得了巨大进步,已经可以产生脉宽为 10~1000ns、流强为 10~1000kA、能量为 10keV~10MeV 的离子束。二极管中离子流产生效率大大提高,束品质得到很大改善。根据离子束的不同应用背景和加速器本身特性,可选用以上三种离子束二极管的一种。如反射三极管适合于低压情况下,离子束应用于等离子体加热、离子环产生及材料科学等方面;磁绝缘二极管和箍缩二极管适应于高压情况,离子束应用于热核聚变、高功率中子脉冲的产生及材料科学等方面。

高功率脉冲离子束产生技术的理论研究有待于进一步完善,现有的理论模型均忽略了阳极等离子体中中性气体原子或分子与离子的电荷交换、碰撞电离等因素对离子流产生的影响。对高功率脉冲离子束技术的研究,在国际上也还限于少数几个实验室,无论在理论与实验研究方面都有待于进一步深入。目前高功率脉冲离子束朝更完善的离子二极管理论、更丰富的单一离子阳极等离子体、更合理的磁场构形和二极管结构及高重复率方向发展。国内近年来对高功率脉冲离子束用于材料改性进行了研究^[10],目前西北核技术研究所正在开展高功率脉冲离子束产生技术研究工作。

参考文献

- 1 米勒 R B. 强流带电粒子束物理学导论. 北京:原子能出版社,1990
- 2 Sudan R N, Lovelace R V. *Phys Rev Lett*,1973,31:1174
- 3 Bergeron K D. *Phys Fluids*,1977,20:688
- 4 Antonsen T M, Ott E. *Phys Fluids*,1976,19:52
- 5 Desjarlais M P, et al. *Phys Fluids*,1989,B1(8):1709
- 6 Poukey J W. *Vac J Sci Technol*,1975,12:1214
- 7 Sawin D, Goldstein S, et al. *J Appl Phys*,1977,48:1085
- 8 Cooperstein G, Goldstein S A, et al. Proc 4th Int. Conf. on high power electron and ion beam research and technology, Palaiseau, France, 1981. p53
- 9 Stephanakis S J, Boiler J R, et al. Proc. 9th Int. Conf. on high power particle beams, Washington, DC, 1992, p87
- 10 赵渭江等. 原子核物理评论. 1998,15(2):97

THE GENERATION OF HIGH-POWER PULSED ION BEAMS

SHI Lei^{1,2}, QIU Ai-ci², WANG Yong-chang¹, HE Xiao-ping²,
ZHANG Jia-sheng², KUAI Bin², ZENG Zheng-zhong²

(1. Xi'an jiaotong University, Xi'an, 710049; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

ABSTRACT: The article analyzed the bipolar flow in high-power diode and operating principle of reflex diode, magnetic insulating diode and pinch diode for improving ion beam generation efficiency, summarized and pointed out research development and developing direction of high-power ion beams.

KEY WORDS: high-power pulsed ion beams; diode; ion beam generation efficiency