

文章编号: 1001-4322(2001)05-0654-03

强流脉冲电子束二极管等离子体漂移速度的研究^{*}

彭建昌

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 强流相对论电子束二极管阴阳极等离子体的形成和漂移, 是二极管工作状态研究的重要组成部分。根据 Child-Langmuir 定律和二极管导流系数, 结合二极管阴极电子发射面积的变化模型, 给出了二极管阴阳极等离子体漂移所导致的阴阳极间隙闭合速度。

关键词: 二极管; 等离子体漂移; Child-Langmuir 定律
中图分类号: TL 506; O 53 **文献标识码:** A

冷阴极二极管是强流脉冲电子束加速器中的核心部件, 其物理过程的研究一直受到国内外研究人员的关注, 是脉冲功率技术研究的热点问题之一。二极管等离子体漂移速度是其工作状态的重要表征量。本文采用“闪光二号”加速器的实验数据, 应用 Child-Langmuir 定律, 探讨了二极管等离子体漂移速度的变化过程。

1 二极管工作过程概述

对冷阴极二极管来说, 就引起阴阳极间隙中起始击穿的因素, 目前还没有形成统一的认识, 但是对起始电子发射以后的过程, 目前比较认同的观点是, 局部阴极亮斑形成后, 由于其流体力学膨胀, 以每一阴极亮斑为中心, 等离子体快速的向周围膨胀, 形成局部等离子体合并, 同时激发形成新的阴极亮斑, 等离子体轴向膨胀速度约为几厘米每微秒, 这时电子发射面积迅速增长, 最后形成覆盖整个阴极表面的等离子体层, 由于等离子体内德拜场和离子与阴极间电场的作用, 从冷阴极表面继续发射的电子进入等离子体层, 而这时继续向阳极漂移的阴极等离子体就成为电子发射源, 电子流在阴阳极间隙内受到与其相关的空间电荷场的制约。

根据 Child-Langmuir 定律, 二极管电流的产生与阴极电子发射面积、阴阳极间隙上所施加的电压、二极管阴阳极间隙距离等因素有关。阴阳极间隙距离受阴阳极等离子体漂移的影响, 在二极管工作过程中逐步减小, 当阴阳极等离子体漂移使得二极管间隙闭合时, 二极管电子束的产生过程结束。

2 二极管等离子体漂移速度的数值分析

外加电压加到二极管阴阳极间隙上, 当阴极表面微观场增强达到一定阈值时, 在阴极表面首先形成阴极亮斑, 并扩展膨胀形成覆盖整个阴极表面的阴极等离子体; 阳极受电子束流轰击而汽化形成阳极等离子体, 形成的阴阳极等离子体分别向相对方向漂移, 引起阴阳极间隙的减小, 所以这里讨论的阴阳极等离子体漂移速度是二者速度之和, 我们称之为阴阳极间隙闭合速度。

二极管导流系数为

$$F(t) = I_d(t) / U_d(t)^{3/2} \quad (1)$$

式中: $I_d(t)$ 为二极管电流; $U_d(t)$ 为二极管阴阳极间隙电压。考虑等离子体漂移的 Child-Langmuir 定律

$$I_d(t) = 2.34 \times 10^{-6} S U_d(t)^{3/2} / [d - v(t)t]^2 \quad (A) \quad (2)$$

式中: S 为阴极电子发射面积 (cm^2); d 为阴阳极几何间隙 (cm); $v(t)$ 为等离子体漂移速度 (cm/ns) (实际应为二极管阴阳极间隙闭合速度), t 为时间 (ns)。

由 (1), (2) 式得

* 收稿日期: 2000-11-03; 修订日期: 2001-05-10

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 彭建昌 (1966-), 高级工程师, 硕士, 现从事脉冲功率技术的研究及应用工作; 西安市 69-10 信箱。

$$F(t) = 2.34 \times 10^{-6} S / [d - v(t)t]^2 \tag{3}$$

则阴阳极间隙闭合速度为

$$v(t) = \{d - [2.34 \times 10^{-6} S U_d(t)^{3/2} / I_d(t)]^{1/2}\} / t \tag{4}$$

$I_d(t)$ 和 $U_d(t)$ 为实验测量到的数据, 阴极发射电子的面积由实验电流与 Child-Langmuir 定律给出的理论电流比较得出。以闪光二号加速器99125炮的实验数据为例, 分析等离子体漂移速度。图1给出的是二极管电压、电流及间隙电压波形。在测量这些参数时保证了严格的时间关联。由波形可见, 当外加电压作用于二极管时, 二极管电流的产生相对于电压有一时间延迟, 我们称之为二极管启动时间。依据(4)式分析二极管中等离子体的漂移速度, 当以二极管阴极几何面积作为发射面积时, 得出的等离子体漂移速度是一负值, 可见, 阴极的电子发射面积与阴极几何面积是不同的。

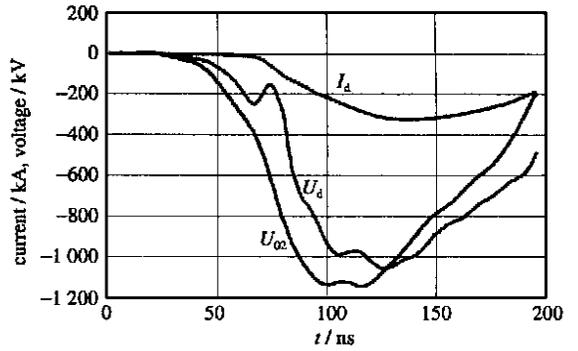


Fig 1 Waveform of diode-voltage (U_{02}), current (I_a) and gap-voltage (U_a)

图1 99125炮二极管电压 (U_{02})、电流 (I_a) 及间隙电压 (U_a) 波形

不考虑等离子体漂移时, Child-Langmuir 定律给出的二极管理论电流比实验电流大, 结合闪光二号加速器二极管实验运行时的现象, 分析认为二极管工作时, 阴极电子发射面积有一有效值, 在这里定义为阴极电子发射的有效面积(区别于几何面积), 对表面物理状态一致的平面圆柱形二极管阴极, PIC 电磁模拟的结果表明, 电子发射由阴极棱边开始, 逐渐向阴极几何中心推移。因此, 阴极有效电子发射面积也是随时间变化的, 结合 Child-Langmuir 定律给出的理论电流与实验测量电流的比较, 阴极电子发射的有效面积在二极管工作的一定时间区间内近似线性增长, 以闪光二号加速器99125炮的实验数据为例, Child-Langmuir 定律给出的理论电流与实验测量电流比值的线性拟合, 给出了在80~ 196ns 之间, 阴极电子发射的有效面积

$$S(t) = (5.7 \times 10^{-3} t + 0.34) \times S_0 \tag{5}$$

式中: $S(t)$ 为阴极电子发射的有效面积; S_0 为阴极几何面积; 5.7×10^{-3} 为二极管阴极电子发射的有效面积在80~ 196ns 之间的增长因子; 0.34为80ns 时刻阴极电子发射的有效面积。在考虑二极管阴极电子有效发射面积条件下, 等离子体漂移速度随时间的变化如图2所示。

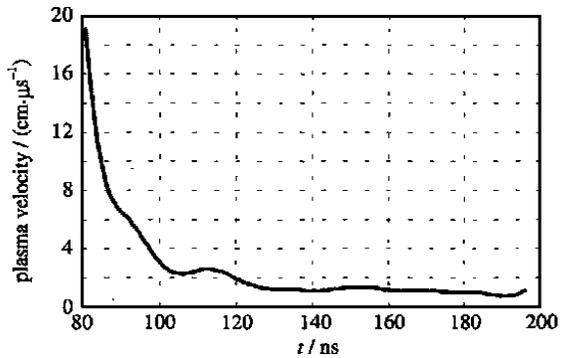


Fig 2 Plasma velocity vs time in REB diode

图2 二极管等离子体漂移速度随时间的变化

由图2可见, 等离子体漂移速度是随时间变化的, 在二极管发射电子的起始阶段, 是阴极亮斑和等离子体的形成及扩张阶段, 阴极等离子体密度较低, 等离子体的漂移速度较大(就轴向而言)。随着阴极发射电流强度的增加, 阴极等离子体密度增高, 等离子体漂移速度减缓, 受到二极管内强电磁场的作用, 进入相对稳定的过程。由图2给出的80~ 196ns 之间的等离子体平均速度为 $2\text{cm}/\mu\text{s}$ 。由于在前边给出的阴极发射电子的有效面积是由不考虑等离子体漂移速度的 Child-Langmuir 定律得出的, 所以, 这里给出的等离子体漂移速度也只是一种定性的分析, 反映等离子体漂移速度随时间的变化趋势。给出的漂移速度实际上是阴极等离子体和阳极等离子体漂移速度之和, 即为二极管阴阳极间隙闭合速度。

3 结束语

在考虑二极管阴极电子发射的有效面积时, 由 Child-Langmuir 定律及二极管导流系数, 给出了二



极管阴阳极等离子体漂移所引起的阴阳极间隙闭合速度随时间的变化趋势,较好地反映了二极管工作时等离子体的运动行为。二极管阴阳极等离子体的形成和漂移受到阴阳极材料、表面状态、外加脉冲电压波等因素影响,将结合二极管阴、阳极等离子体的光学诊断进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] Mesyats G A, Prokourousky D I Pulsed electrical discharge in vacuum [M]. 1988
- [2] Benibov M S Theory of a collision-dominated space-charge sheath on an emitting cathode[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1997, **30**: 1115—1119
- [3] Knoblauch A, Wilbertz Ch, Miller Th, et al Field electron emission properties of a supertip[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1996, **29**: 470—473
- [4] Turchi P J, Peterkin R E, Jr Modeling of impedance collapse in high-voltage diodes[A]. 11th IEEE International Pulsed Power Interference, 1998 1363—1368
- [5] Tarakanov User manual of code KARAT[M]. 1997.
- [6] 米勒 R B, 刘锡三 强流带电粒子束物理学导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1990 (Miller R B. An introduction to the physics of intense charged particle beams New York: Plenum Press, 1982)
- [7] 刘俊民, 张永民, 邱爱慈, 等 低阻抗脉冲电子束加速器的二极管参数测量[J]. 强激光与粒子束, 1992, **8**(3): 343—348 (Liu J M, Zhang Y M, Qiu A C, et al Measurement for REB accelerator diode parameter. *High power laser and particle beams*, 1992, **8**(3): 343—348)

Investigation of plasma drift velocity vs time in intense electron beam diode

PENG Jian-chang

(North West Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract The forming and drifting of plasma in the intense electron beam diode is one of the important issues in studying the diode's operation. In this paper, based on the Child-Langmuir law and conduction coefficient of the cool-cathode diode, it is suppose that the cathode emission area of intense electron beam diode is variable. The drift velocity of the plasma in the diode is studied with experimental data of FLASH-II accelerator. The result shows that the drift velocity of plasma is variable with time. The qualitative analysis about this velocity presents the closing speed of the gap between the diode's two poles and also fully explains the plasma's movement while the diode is on.

Key words diode; plasma drift; Child-Langmuir law