

文章编号: 100124322(2004) 1221603204

低阻抗强流箍缩电子束二极管 的 3 阶段电子束流模型^X

蒯 斌^{1,2}, 邱爱慈^{1,2}, 王亮平², 丛培天², 梁天学²

(1. 西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 在顺位流模型与“4 阶段”粒子流动模型的基础上, 提出了一种用于分析 100ns/MA 级电子束流的低阻抗强流箍缩二极管物理过程的理论模式。在这种理论分析模式中, 将电子和离子的流动情况随时间的演变过程分成非箍缩电子流、弱箍缩电子流、强箍缩电子流 3 个不同的阶段, 分别结合聚焦流和顺位流模型对各个阶段特性进行估算。利用 KARAT PIC 数值模拟软件并结合“强光一号”加速器的工作状态, 对该类型二极管中电子束的流动过程作了数值模拟, 并在“强光一号”加速器上开展了实验研究。数值模拟和实验结果的对比如表明, 所提出的新的理论分析模式是合理可行的。

关键词: 低阻抗强流箍缩电子束二极管; 顺位流模型; 理论分析模式; 加速器

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

大功率脉冲加速器一般由 3 个或更多的部件组成: 储能装置, 脉冲形成线和粒子束二极管。其中, 粒子束二极管是一个很重要的部件, 它能够把形成线提供的短持续时间、高功率电脉冲转换为有用的粒子束。因此, 各国在开展大功率脉冲粒子束加速器研究的过程中, 都相应地开展了束二极管的研究, 并且针对各种加速器类型及其用途, 设计出了形式多样的束二极管。从所使用的真空绝缘子形状来看, 有两种最常用的二极管管型^[1], 一种是真空绝缘子由一组固体电介质绝缘环和金属环交替堆叠而成, 通常称纵向绝缘型; 另一种是真空绝缘子为单个径向绝缘板, 通常称径向绝缘型。从所产生的电子束情况来看, 束二极管可分为两种类型^[2], 一类是非箍缩型相对论性电子束二极管, 它能够提供高功率、大面积、均匀性好的电子束, 可用于产生高功率微波, 泵浦准分子激光, 等离子体加热以及离子集团加速等。另一类是箍缩型电子束二极管, 目前主要用于产生强韧致辐射、高温高压等离子体等等。本文主要从理论分析、数值模拟和实验 3 方面研究低阻抗强流箍缩电子束二极管的基本物理特性。

1 理论分析与模拟

对箍缩型电子束二极管的理论研究, 到目前为止采用的物理模型主要有聚焦流^[3]、顺位流^[4]和一种最新发展的物理上能比较精确描述大横纵比二极管特性的“四阶段”模型^[5]。这些模型都能较好地解释箍缩电子束的某些特性, 但是也都有各自的局限性, 例如聚焦流、自聚焦流模型主要适用于描述弱箍缩电子束特性; 顺位流模型尽管很好地解析了大横纵比二极管中电子的聚焦以及二极管阻抗变化的特性, 但它无法说明电子在接近阳极处的运动特性, 也没有考虑离子流动的影响; “四阶段”模型虽然将二极管中的粒子流动随时间的演变分成四个阶段, 也能比较清楚地分析各个阶段中粒子的流动情况和束流特性, 但缺乏更深层次的理论研究, 更多的只是提供了物理过程的概念性描述。我们在综合上述模型的基础上, 针对 100ns/MA

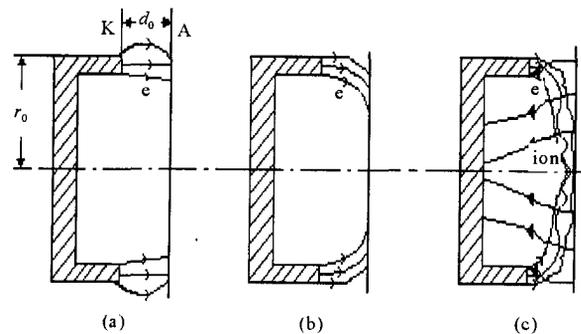


Fig. 1 Evolution of electron and ion flow in an intense pinched electron beam diode

图 1 强流箍缩电子束二极管中电子和离子流动的演变过程

X 收稿日期: 2004204207; 修订日期: 2004207223

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 蒯斌(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 从事脉冲功率技术研究; 西安 69210 信箱。

级电子束流的低阻抗(约为 1)强箍缩二极管结构特点,提出了一种新的理论分析模式,并利用 KARAT PIC 模拟软件进行了验证性计算。

在这种理论分析模式中,我们将电子和离子的流动情况随时间的演变过程分成 3 个不同的阶段,分别结合聚焦流和顺位流模型对各个阶段特性进行估算,见图 1。

阶段 1——非箍缩电子流。在电压脉冲的初始时段,阴极等离子体形成后产生的电子流垂直于等位面流动,电子束流较弱未发生箍缩。非箍缩阶段二极管电子束流特性可用下列非箍缩模型估算^[6]

$$I = 4.266 [(1 + 1/6^4) - 1.2]^2 (r_0/d_0)^2 \quad (1)$$

式中: $\beta = \sqrt{v_0 + \sqrt{v_0^2 - 1}}$; v_0 是相对论因子; r_0 为阴极半径; d_0 为阴阳极起始间距。在该阶段尚未形成阳极等离子体。

阶段 2——弱箍缩电子流。当二极管电压继续上升致使二极管束流超过临界电流时,自磁场使外层电子轨道弯曲,形成弱箍缩,同时电子束轰击阳极形成阳极等离子体。在弱箍缩阶段的二极管电子束流特性可用聚焦流模型进行估算^[3]

$$I = 8.500 (r_0/d_0) v_0^{1/2} \ln [v_0 + (v_0^2 - 1)^{1/2}] \quad (2)$$

阶段 3——强箍缩电子流。在第 2 阶段产生的阳极等离子体提供了一个受空间电荷限制的离子源。离子流的空间电荷中和了电子的空间电荷,同时离子流附加到电子流中导致极强的箍缩电子流,这些电子掠射进入到阳极等离子体时,由于等离子体中不存在足以抵消磁力 $ev_r B$ 的电场力,因此它们在 $ev_r B$ 作用下,朝阴极方向运动,同时仍然继续向内作径向漂移,直到抵达无阳极等离子体的区域。该过程一直重复,直至电子沿多次反射的复杂轨道向内漂移而形成更强的箍缩,最终达到由层流离子流和箍缩电子流表征的稳态条件。在强箍缩阶段的二极管电子束流特性可用经过阴阳极间隙修正的顺位流模型进行估算^[4]

$$I = 8.500 (r_0/d) v_0 \ln [v_0 + (v_0^2 - 1)^{1/2}] \quad (3)$$

式中: $d = d_0 - (v_c + v_a) t$, 是考虑了阴、阳极等离子体运动后的阴阳极间隙; v_c 和 v_a 分别是阴、阳极等离子体运动速度。

为了验证上述模型,我们针对“强光一号”加速器的工作状态,用 KARAT PIC 数值模拟软件对箍缩电子束二极管中电子运动进行了模拟,模拟中外加电压幅值取 1.5MV,波形设置为类正弦波,整个脉冲持续时间为 100ns;二极管为杯状,外径 <13cm,内径 <1cm,阴阳极间隙 1cm。计算结果表明:在 20ns 以前电子流运动轨迹基本垂直于等位面,在 20~37.5ns 之间电子流呈现出弱箍缩现象,并且随着时间的增大箍缩越来越强;在 37.5~75ns 之间电子流箍缩最强,随后电子流开始减弱并逐渐消失,这与前文所分析的过程基本符合。模拟计算的电子轨迹见图 2。

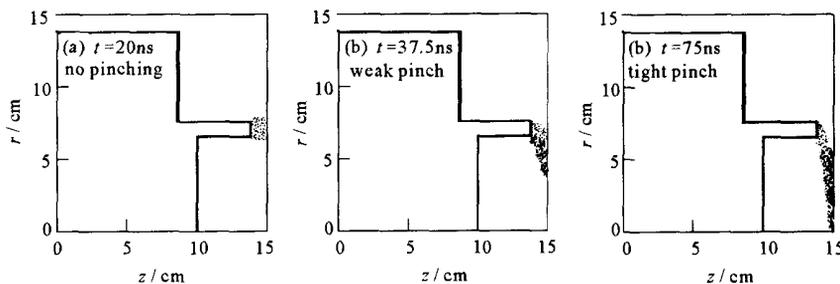


Fig. 2 Electron trajectories in the anode-cathode gap

图 2 阴阳极间隙中电子运动轨迹

2 实验研究

为了进一步验证上述的理论分析模式并开展强流箍缩电子束二极管的应用研究,我们在“强光一号”加速器上开展了实验,其中加速器脉冲功率源的特性参数:行波电压幅值为 1.3MV,脉冲半高宽为 75ns,输出阻抗为 0.75,预脉冲电压小于 3kV^[7]。

2.1 二极管结构设计

实验中采用的强流箍缩电子束二极管的整体结构见图 3。二极管的管绝缘体和真空磁绝缘传输线(MITL)采用轴向绝缘结构,管绝缘体的长度约 25cm,外径为 <167cm;真空磁绝缘传输线的阴极板与阳极回流

线之间的真空间隙最小值约 3cm,并满足 Z_d/Z_0 0.5,其中 Z_d 是二极管阻抗, Z_0 是真空磁绝缘传输线的几何阻抗。阴极是具有边缘发射的钢环或该钢环加天鹅绒,直径 <13cm,环宽可调。阳极是厚度约 50 μ m、直径 <130mm 的钽箔,阴阳极间隙可在 0.5 ~ 1cm 调节。阳极靶后用铝板吸收透射电子并抑制虚阴极形成。工作的真空度为 10^{-2} Pa。

2.2 实验结果与分析

在不同的阴阳极间隙下,实验测得的工作电流幅值约为 0.8MA,二极管管电压幅值约为 1.3MV。图 4 给出了阴阳极间隙为 0.8cm 时,二极管的电压,电流波形。图 5 是相应的二极管阻抗变化曲线,其中实线是实验值,对应于二极管电压幅值的阻抗值为 1.25 Ω ;点线是采用上述理论分析模式结合各个阶段模型公式计算的结果,其中,小于 20ns 时间段内的曲线是按照估算“阶段 1”的二极管特性公式(1)计算的,20~40ns 时间段内的曲线是按照估算“阶段 2”的二极管特性公式(2)计算的,大于 40ns 时按照估算“阶段 3”的二极管特性公式(3)计算得到的结果。在小于 80ns 时间段内,阻抗变化曲线比对结果一致,表明上述理论分析模式能够反映 100ns 低阻抗电子束二极管的物理过程,即小于 20ns 时间段属“阶段 1”,20~40ns 时间段属“阶段 2”,40~80ns 时间段属“阶段 3”。

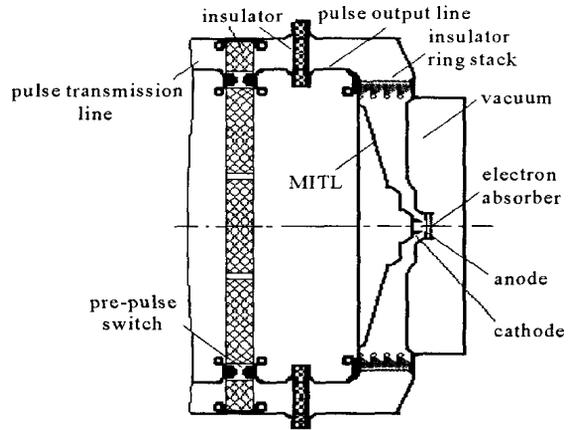


Fig. 3 Schematic diagram of the intense pinched electron beam diode in Qiangguang2I accelerator

图 3 “强光一号”加速器的强流箍缩电子束二极管结构图

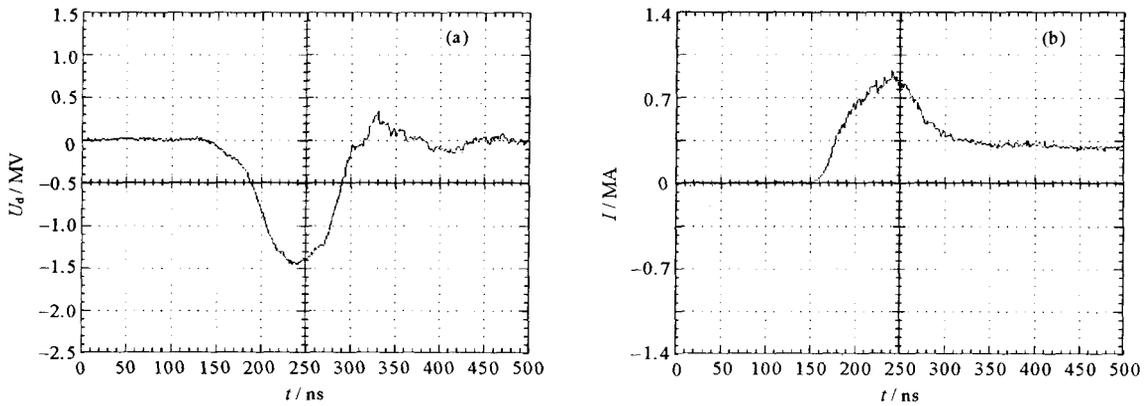


Fig. 4 Typical waveforms for diode voltage (a) and current (b)

图 4 二极管典型电压(a)和电流(b)波形

3 结 论

数值模拟和实验研究均表明,在强流箍缩电子束二极管中,粒子的流动可分成 3 个连续的过程,这说明所提出的描述强流箍缩电子束特性的理论分析模式是合理可行的。在分析强流箍缩电子束二极管的粒子特性时,没有考虑电子流可能形成的虚阴极及外加因素(外加磁场等)对二极管中电子流动的影响,这将在今后的工作中加以补充研究。此外,本文提出的理论分析模式只是针对 100ns/MA 级电子束流的低阻抗(约 1 Ω)强箍缩二极管而言的,对其它类型箍缩电子束二极管的适用性有待进一步检验。

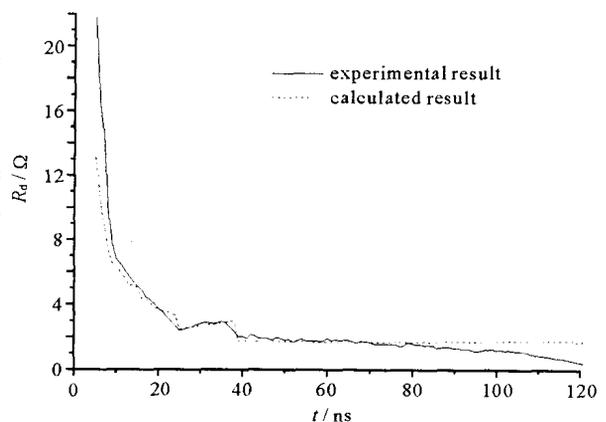


Fig. 5 Typical impedance curve for diode

图 5 二极管典型阻抗曲线

参考文献:

- [1] Miller R B. An introduction to the physics of intense charged particle beams[M]. New York:Plenum Press,1982.
- [2] 王乃彦. 强流非箍缩型相对论性电子束的产生及其特性的研究[A]. 全国高功率粒子束十年文集[C]. 绵阳,1995. 494—504. (Wang N Y. Generation of non-focused high-current relativistic beams and their characters. The Decade Selected Works of High Pulsed Power in China. Mi2anyang,1995. 494—504)
- [3] Goldstein S A,Davidson R C,Siambis J G,et al. Focused-flow model of relativistic diodes[J]. *Phys Rev Lett*,1974,**33**(25):1471—1474.
- [4] Creedon J M. Relativistic Brillouin flow in the high / diode[J]. *J Appl Phys*,1975,**46**(7):2946—2955.
- [5] Pai S T, Zhang Q. Introduction to high power pulse technology[M]. World Scientific Press, 1995.
- [6] , , . 21[J]. ,1995,(12):79.
- [7] 丛培天,蒯斌,邱爱慈,等.“强光一号”预脉冲气体开关特性研究[J]. 强激光与粒子束,2003,**15**(7):725—728. (Cong P T,Kuai B,Qiu A C, et al. Research of prepulse gas switch for Qiangguang2I generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003,**15**(7):725—728)

Three phases electron beam flow model for low-impedance intense-current pinched electron beam diode

KUAI Bin^{1,2}, QIU Ai2ci^{1,2}, WANG Liang2ping², CONG Pei2tian², LIANG Tian2xue²

(1. Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69210, Xi 'an 710024, China)

Abstract: This paper presents a theoretical analysis model based on the parapotential flow and “four2phase” charge flow models. The model could more exactly describe the physics process in a low-impedance MA intense pinched beam diode. In the model, the evolu2tion of electrons is divided into three phases: no pinching phase, weak pinch phase and tight pinch phase, and in each phase a proper em2pirical formula is provided for writing the characters of electron beam. Using the KARAT PIC program, the evolution process of electron flow was simulated in the diode, which was designed to test on the Qiangguang2I accelerator for producing intensive current pinched elec2tron beam. Moreover, the experiment with the diode was carried out on Qiangguang2I accelerator. The contrast between simulated and experimental results shows that the theoretical analysis model called three phases electron beam model is reasonable.

Key words: Low impedance intense-current pinched electron beam diode; Parapotential flow model; Theoretical analysis mod2el; Accelerator