

文章编号: 2095-4980(2019)02-0338-05

强流平板二极管阻抗特性分析

胡 杨, 杨海亮, 张鹏飞*, 孙 江, 孙剑锋

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 在“剑光一号”上搭建了二极管平台, 理论估计了二极管阻值, 进行了平板二极管阻抗和束流分布测量实验。结合法拉第筒阵列测得的束流密度分布、粒子模拟(PIC)仿真结果对二极管阻抗特性进行了全面的对比分析。结果表明, 二极管工作于弱箍缩状态, 阻抗阻值略低于估计值, 阻抗曲线、法拉第筒波形以及束流箍缩程度三者间存在高度的相关性。当阻抗曲线处在前端(导通前)和末期(崩溃段)时, 束流均处在未箍缩期间, 法拉第筒信号无有效数据; 阻抗曲线处在平区时, 二极管工作平稳, 束流箍缩情况和法拉第筒信号稳定, 阳极边缘处的法拉第筒波形呈现双峰, 与束流箍缩运动情况相符。

关键词: 阻抗; 束流箍缩; 强流平板二极管; 法拉第筒

中图分类号: TN624⁺.2; TL506; O462 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201902.0338

Analysis of a high-current plain diode impedance characteristics

HU Yang, YANG Hailiang, ZHANG Pengfei*, SUN Jiang, SUN Jianfeng

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: A plain high-current diode is fielded on the “Jianguang-I” accelerator preline, and the diode resistance is theoretically estimated. Impedance measurement experiment is conducted, and the experimental results are analyzed combined with the electron beam density gained by a small Faraday cup array and Particle in Cell(PIC) simulation. The results show that there is a high correlation among the impedance value of the diode, the impedance curve, the Faraday cup waveforms and the beam pinching level. When the impedance curve is at the front (where impedance is established) or at the end (impedance collapsing), the beam is in the non-pinching period, the Faraday cup signal has no valid data. When the impedance curve is in the flat area, the diode works well and the beam pinching and Faraday cup signal are stable, and the Faraday cup waveform at the anode edge shows double peaks, which is consistent with the beam pinch motion.

Keywords: impedance; beam pinching; high-current plain diode; Faraday cup

强流二极管阻抗特性是二极管研究的重要内容^[1-2]。通常, 通过二极管电压、电流波形的测量, 就可以得到二极管的阻抗曲线。典型的二极管阻抗曲线的变化趋势为: 初期呈现高阻抗, 导通阶段之后, 阻抗在一定时间段内保持近似恒定值, 而后由于阴阳极等离子体闭合导致阻抗崩溃, 或间隙电压下降, 阻抗不能维持, 阻值减小到零。一般认为, 二极管阻抗与电压、二极管纵横比、束流箍缩情况(等离子体运动)等都有关系^[3-5]。本文在“剑光一号”上进行了平板二极管阻抗测量实验, 结合法拉第筒阵列测得的束流密度分布、粒子网格法(PIC)仿真结果等对二极管阻抗特性, 特别是束流箍缩特性与阻抗间的对应情况进行了全面分析。结果表明, 在二极管外加电压和几何参数不变的情况下, 二极管阻抗曲线、法拉第筒波形以及束流箍缩情况三者间存在高度的相关性, 束流密度分布(法拉第筒波形)直接反应了束流箍缩情况, 而束流箍缩是否处于稳态, 则是二极管阻抗是否能正常维持的标志。

收稿日期: 2017-11-23; 修回日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11305128; 11505142; 11705150); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室资助项目(SKLIPR1503)

*通信作者: 张鹏飞 email:zhangpengfei@nint.ac.cn

1 二极管设计

将“剑光一号”加速器水电缆及其下游的感应电压叠加器和阳极杆箍缩二极管移去，加装锥形传输线，形成“剑光一号”加速器低阻抗状态^[6]，其结构如图 1 所示，驱动源形成的电脉冲经峰化开关、锥形传输线后施加载到负载上。水介质形成线与传输线的阻抗均为 7.8Ω 。按照当前的主开关间隙计算，当负载阻抗与传输线匹配时，Marx 充电电压为 25 kV，负载电压峰值约为 600 kV。

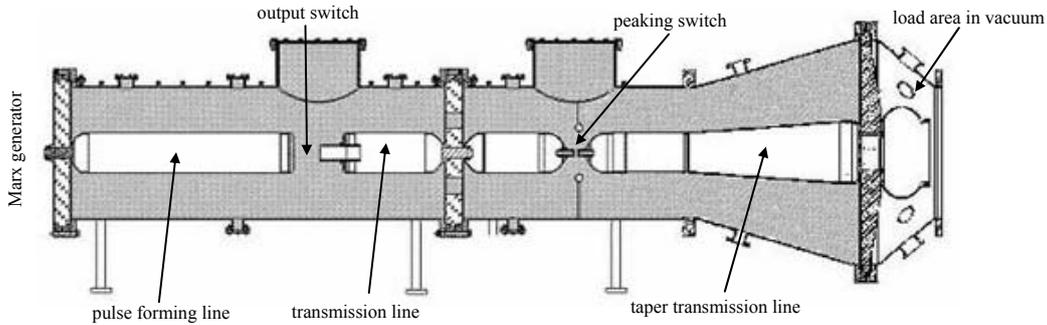


Fig.1 Schematic of “Jianguang-I” accelerator preline

图1 “剑光一号”加速器低阻抗状态结构

根据相对论形式的 Child–Langmiur 定律^[7]，强流平板二极管阻抗可表示为^[8]：

$$Z_d = \left(\frac{d}{r_c} \right)^2 \frac{U_d}{I_a (\sqrt{\gamma} - 0.847)^2} \quad (1)$$

式中：阿尔芬常数 $I_a=8.5 \text{ kA}$ ； d 为二极管阴阳极间隙； r_c 为阴极半径； U_d 为二极管间隙电压。设 $U_d=600 \text{ kV}$ ，易得相对论因子 $\gamma=2.174$ ，代入 $Z_d=7.8 \Omega$ ，可得阻抗匹配时纵横比 $r_c/d=4.76$ 。

另外，根据顺位流模型，对自箍缩流，其饱和顺位流电流 I_p 为^[9-10]：

$$I_p = 8500 \frac{r_c}{d} \gamma \ln \left[\gamma + (\gamma^2 - 1)^2 \right] \quad (2)$$

代入理论峰值电流 $I_p=U_d/Z_d=76.9 \text{ kA}$ ，得最小纵横比为 $r_c/d=2.95$ 。考虑实际实验条件，综合上述计算，阴极半径 r_c 选为 50 mm ，二极管间隙在 $10\sim 20 \text{ mm}$ 间可调。

二极管电压测量采用微型电容分压器，电流测量采用罗氏线圈。罗氏线圈测得的束流即可认为是二极管电流 I_d ，只是波形时刻需要修正。电容分压器测得的电压波形 U_0 和二极管工作电压 U_d 有一定差异，一般认为这一差异是由于测点和二极管之间的传输线电感造成，二者关系可由式(3)给出^[11]：

$$U_d = U_0 - L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

式中 L 由有机玻璃隔板、真空弧形段、二极管过渡段和二极管间隙电感组成。

2 实验结果及分析

实验时阴极为实心平板，采用高纯石墨，直径 100 mm ，阴阳极间隙 10 mm ，预期阻抗 7Ω 。按照上述设计加工装配二极管，进行在线参数实验。Marx 充电电压 25 kV ，二极管间隙电压峰值约为 600 kV 。石墨阴极直径 100 mm ，二极管间隙 12 mm ，阻抗约 7Ω 。同时，在阳极靶面靶心、距靶心 25 mm 和 43 mm 处各布置 1 个法拉第筒探头^[12]，测量这 3 个位置的束流密度。二极管电压电流结果和 3 个位置处的束流密度波形分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 的二极管电压电流波形可知，二极管峰值电压为 575.42 kV ，峰值电流为 76.05 kA ，对应阻抗约为 7.5Ω ，符合理论预期。图 3 给出了阳极靶面不同位置处的束流密度，靶心处的束流密度峰值为 $17.43 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ ，距靶心 25 mm 处束流密度峰值为 $10.45 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ ，距靶心 43 mm 处束流密度峰值为 $8.08 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。可见，靶面束流分布不均匀，靶心处束流密度最大，靶边缘处最小。二极管边缘处的法拉第筒波形($r=43 \text{ mm}$)呈现明显的双峰结构，说明束流存在箍缩，符合设计预期。

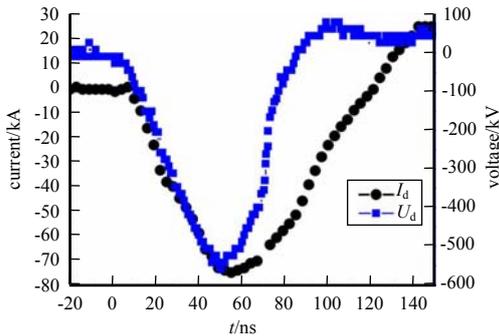


Fig.2 Voltage and current waveforms of diode AK gap
图2 研制的二极管电压和电流波形

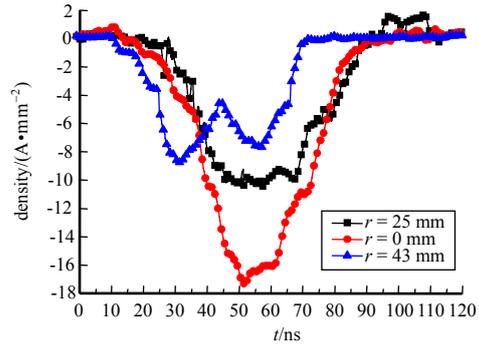


Fig.3 Current density at different anode positions
图3 阳极靶面不同位置处束流密度

2.1 箍缩特性分析

建立了二极管的 PIC 模型，以实测的二极管电压为馈入条件，对二极管工作过程中的电子运动进行了仿真记录，部分结果如图 4 所示。结合均匀性测量波形和 PIC 仿真，分析可得如下结果：

1) 比较 3 个阵列波形，阳极靶面边缘处起始波形时刻为 11 ns，靶面中心和距中心较近的内环区波形起始时刻为 13 ns。表面阴极倒圆角处最先发射，这与仿真情形一致，见图 4(a)、图 4(b)。

2) 靶面边缘的法拉第筒波形呈现明显的双峰，这是束流向靶中心箍缩的结果。如图 4(c)、图 4(d)，束流从约 28 ns 时开始箍缩，至 54 ns 时箍缩发展至最大程度。仿真结果与法拉第筒波形基本相符，法拉第筒波形略有收窄。整个二极管工作过程可分为三个阶段：非箍缩流—弱箍缩流—非箍缩流。本实验中，阴极石墨为实心结构，且在箍缩完之后，二极管束流继续为稳态流，故此处弱箍缩流可用下式估算^[13-14]：

$$I = I_a \frac{r_c}{d} \gamma^{1/2} \ln \left[\gamma + (\gamma^2 - 1)^{1/2} \right] \tag{4}$$

易得弱箍缩时二极管电流为 73.94 kA。实测的二极管电流峰值为 76.05 kA，二者符合较好。

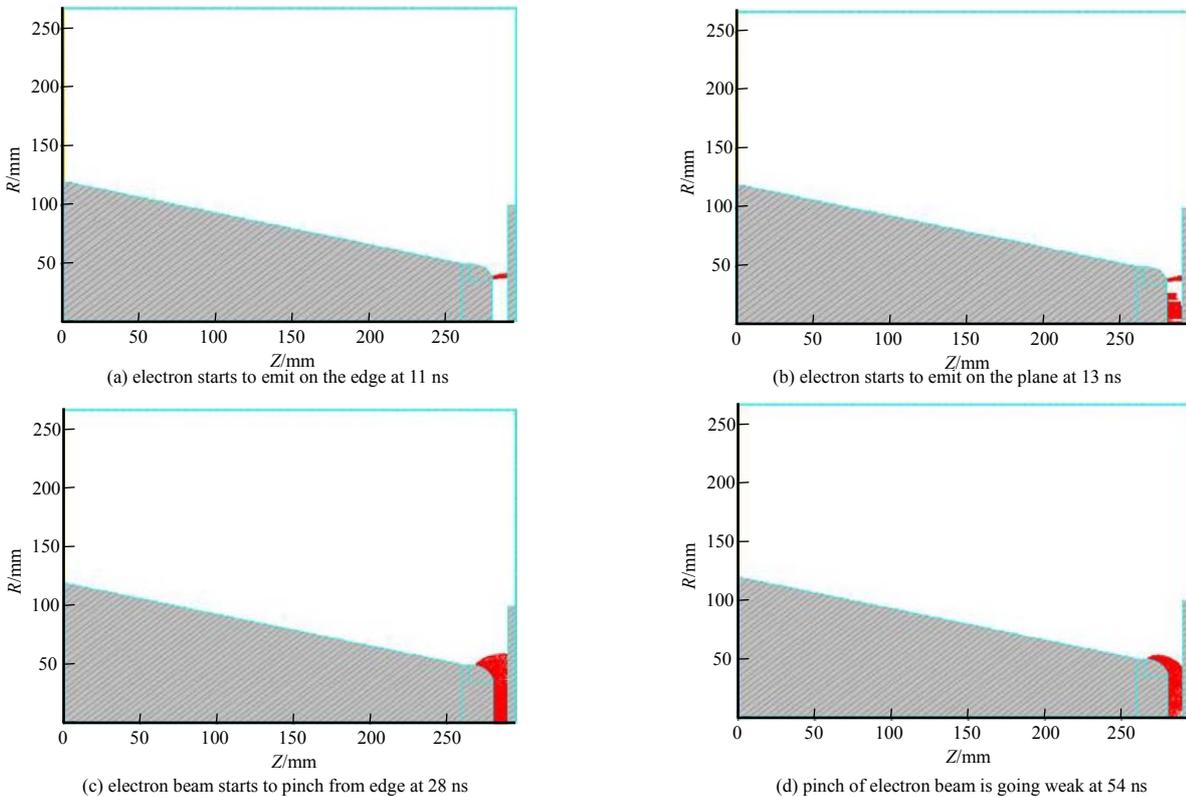


Fig.4 PIC simulation for the diode
图4 二极管 PIC 模拟结果

2.2 阻抗特性分析

由实测的电压电流波形得出如图 5 所示的二极管阻抗曲线。该曲线与典型二极管阻抗曲线的变化趋势一致：初期呈现高阻抗，随后阻抗在一定时间段内保持近似恒定值，而后阻抗因等离子体导通或馈入电压下降而崩溃，阻值迅速减小到零。

对比图 3 的法拉第筒波形和图 4 粒子模拟结果，结合二极管的束流箍缩情况，发现：

1) 二极管阻抗约在 15 ns 时建立，70 ns 时崩溃，这两个时刻分别对应了靶边沿处的法拉第筒波形。说明当二极管阻抗未能建立时，只有少量阴极边沿发射的电子轰击到阳极上，法拉第筒收集的电子较少，无有效数据；当阻抗崩溃时，二极管空间电磁环境紊乱，存在复杂的束-场耦合过程^[15]，受此影响法拉第筒亦无法获取有效电子信息。

2) 粒子模拟结果显示，当整个阴极面开始发射时(13 ns)，此时阻抗开始建立(15 ns)；束流箍缩至最剧烈程度开始衰减时(54 ns)，束流由整体箍缩向阳极中心的“类锥形”逐渐向无箍缩的情形转变，阻抗下滑的趋势并没有明显加快，直到馈入电压。这说明，本实验中的二极管阻抗崩溃并不是因为阴阳极等离子体导通所致。该结论也与弱箍缩的二极管设计相符。

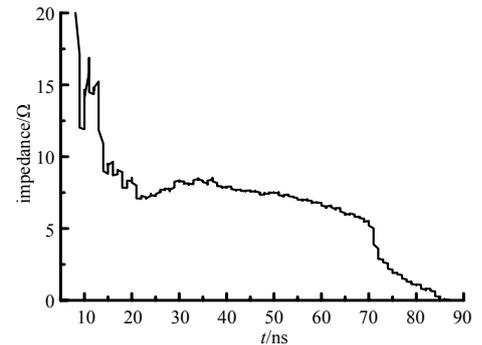


Fig.5 Impedance curve of the diode

图 5 二极管阻抗曲线

3 结论

本文在“剑光一号”前级水线上进行了平板二极管阻抗测量实验，结合法拉第筒阵列测得的束流密度分布、PIC 仿真结果对二极管束流箍缩与阻抗特性进行了全面的对比分析。在二极管外加电压和几何参数不变的情况下，二极管阻抗曲线、法拉第筒波形以及束流箍缩情况三者间存在高度的相关性，束流密度分布(法拉第筒波形)直接反应了束流箍缩情况，而束流箍缩是否处于稳态，则是二极管阻抗是否能正常维持的标志。当阻抗曲线处在前端(导通前)和末期(崩溃段)时，束流均处在未箍缩期间，同时法拉第筒信号振荡剧烈，无有效数据；阻抗曲线处在平区时，二极管工作平稳，束流箍缩情况和法拉第筒信号稳定。

参考文献：

- [1] CHOATE L M,SCHMIDT T R. Sandia National Laboratories radiation facilities[R]. Albuquerque,NM,USA:Sandia National Laboratories, 1993.
- [2] MARTIN T H. Design and performance of the Sandia Laboratories Hermes II flash X-ray generator[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1969,16(3):59-63.
- [3] KABLAMBAEV B A,RATAKHIN N A,PETIN V K. 2 MeV average γ -ray energy, 6 ns duration bremsstrahlung radiation from the conical anode diode[C]// 14th International Conference on High-Power Particle Beams(BEAMS). New York: American Institute of Physics, 2002:175-178.
- [4] COOPERSTEIN G,MOSHER D,STEPHANAKIS S J,et al. Experimental observations of electron-backscatter effects from high-atomic-number anodes in large-aspect-ratio, electron-beam diodes[C]// 11th International Conference on High-Power Particle Beams. Prague,Czech:IEEE, 1996:1151-1154.
- [5] PERELRA N R,FISHER A. Slower impedance collapse with hot anode and enhanced emission cathode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999,27(4):1169-1174.
- [6] 孙凤举,邱爱慈,杨海亮,等. 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩二极管型脉冲 X 射线源线源[J]. 强激光与粒子束, 2004,22(4):936-940. (SUN Fengju,QIU Aici,YANG Hailiang,et al. Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,22(4):936-940.)
- [7] GOLDSTEIN S A,SWAIN D W,HADLEY G R,et al. Anode plasma and focusing in REB diodes[C]// 1975 International Topical Conference on Electron Beam Research & Technology. Albuquerque,New Mexico:IEEE, 1975:262-283.
- [8] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003:100-103. (ZENG Zhengzhong. Introduction to applied pulsed power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003:100-103.)
- [9] GOLDSTEIN S A,DAVIDSON R C,SIAMBIS J G,et al. Focused-flow model of relativistic diodes[J]. Physical Review Letters, 1974,33(25):1471-1474.

- [10] BLAUGRUND A E, COOPERSTEIN G, GOLDSTEIN S A. Processes governing pinch formation in diodes[C]// International Topical Conference on Electron Beam Research & Technology. Albuquerque, New Mexico: IEEE, 1975: 233–246.
- [11] GROSSMANN J M. Investigation of collisional effects in the plasma erosion opening switch[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(12): 6646–6653.
- [12] 胡杨, 杨海亮, 孙剑锋, 等. 微型法拉第筒阵列束流均匀性测量[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 195–199. (HU Yang, YANG Hailiang, SUN Jianfeng, et al. Measurement of current distribution based on Faraday cup array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 195–199.)
- [13] 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 313–315. (LIU Xisan. Intense particle beams and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 313–315.)
- [14] PAI S T, ZHANG Q. Introduction to high power pulse technology[M]. Singapore: World Scientific, 1995: 136–175.
- [15] MILLER R B. An introduction to the physics of intense charged particle beams[M]. New York: Plenum Press, 1982: 352–360.

作者简介:



胡 杨(1989–), 男, 陕西省商洛市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为强束流二极管物理. email: huyang@nint.ac.cn.

杨海亮(1968–), 男, 山东省诸城市人, 博士, 研究员, 研究方向为脉冲功率负载技术.

张鹏飞(1985–), 男, 湖北省宜昌市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率负载技术.

孙 江(1986–), 男, 长春市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术.

孙剑锋(1978–), 男, 辽宁省阜新市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为脉冲功率负载技术.

雷达学报第五届青年科学家论坛通知

由内蒙古工业大学信息工程学院和《雷达学报》编辑部共同主办的“雷达学报第五届青年科学家论坛”拟于 2019 年 8 月 15 日~16 日在呼和浩特市内蒙古工业大学举办。论坛将在相互启迪、开拓视野、深入探讨的基础上, 为雷达领域青年才俊提供一个学术交流、合作创新的平台。

本届论坛主题: 雷达成像技术与微波遥感应用

论坛主席: 黄平平

论坛日程包括: 特邀专家报告、青年专家报告、学术讨论和实验室参观。具体内容请待下一轮通知。

本届论坛免收会议费, 有意参会者请于 5 月 31 日前报名申请。

联系人: 高 华: 010-58887063; radars@mail.ie.ac.cn