

文章编号: 2095-4980(2019)03-0536-05

## 利用法拉第筒测试环形强流电子束束流

朱晓欣, 谭维兵, 苏兆峰, 宋 玮, 胡祥刚, 李小泽

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 通过优化设计法拉第筒的响应电阻和分布电感, 在“TPG700”平台上对无箔二极管阴极发射的环形电子束束流进行轴向测试。结果表明, 无波二极管工作在低磁场( $<1$  T)条件下, 在二极管电压较低时, 优化后的法拉第筒测试获得的电子束束流前沿较慢, 随着二极管电压的升高, 电子束束流前沿明显变快; 在强磁场( $>2$  T)条件下, 法拉第筒测试结果与罗果夫斯基线圈测试结果一致。该结果表明, 相比于罗果夫斯基线圈, 法拉第筒更能准确地测试出无箔二极管的前向电子束束流。

**关键词:** 束流测量; 法拉第筒; 二极管电压; 二极管电流

**中图分类号:** TN820.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201903.0536

## Using Faraday cup for measurement of intense pulsed electric beams

ZHU Xiaoxin, TAN Weibing, SU Zhaofeng, SONG Wei, HU Xianggang, LI Xiaozhe

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** The foil-less diode electric beams is measured by using Faraday cup on the TPG700 generator platform. The results show when the diode voltage is low, the diode electric beams rising edge is slower. The diode electric beams rising edge is getting faster as the diode voltage increases. The diode current magnitude by the Rogowski coil measurement is in accordance with that by the Faraday cup measurement for intense magnetic field. When magnetic field is smaller than 1 T, the diode current magnitude by the Rogowski coil measurement is obviously bigger than that by the Faraday cup measurement. The Faraday cup can give accurate measurement on the front electric beams of foil-less diode.

**Keywords:** electric beams measurement; Faraday cup; diode voltage; diode current

在强流电子束束流测试时, 对于值为 kA 量级、脉冲宽度为数十 ns 的电子束束流, 一般采用的测量方法有罗果夫斯基线圈法(简称罗氏线圈, 英文全称为 Rogowski coil)<sup>[1-3]</sup>和法拉第筒法<sup>[4-8]</sup>。罗氏线圈是根据电磁感应原理和全电流定律计算得到电流相关值。罗氏线圈测量电流时与被测电流无直接连接, 为了对微波器件束波相互作用区不产生影响, 一般在真空二极管法兰端面上利用罗果夫斯基线圈测试电子束束流。由于罗氏线圈自身特性, 导致只要有阴极产生的电子到达阳极<sup>[9-11]</sup>, 就会在罗氏线圈上感应到电流。因此无法准确确定该测试电流就是微波产生器件在束波相互作用区的束流。而法拉第筒是一种电荷收集器, 被测量的电子束穿过二极管阳极入射到法拉第筒收集体中, 与收集体物质发生电力相互作用而被阻止时, 电阻上产生正比于电流的瞬时电位。其测试电子束束流时, 响应快, 抗电磁干扰性能强, 性能稳定。为了获得微波产生器件束波相互作用区束流的大小, 在“TPG700”平台<sup>[12]</sup>上利用法拉第筒对无箔二极管阴极发射的环形电子束束流进行了轴向测试。为了准确测试环形电子束束流, 对法拉第筒的结构及取样电阻进行了优化设计。优化后的法拉第筒能够准确测试电子束的轴向电流。

实验结果表明, 无箔二极管工作在低磁场<sup>[13-14]</sup>( $<1$  T)条件下, 在二极管电压较低时, 优化后的法拉第筒测试获得的电子束束流前沿较慢, 随着二极管电压的升高, 电子束束流前沿明显变快; 在强磁场强度大于 2 T 条件下<sup>[15]</sup>, 法拉第筒测试结果与罗氏线圈测试结果一致。法拉第筒能够准确测试束波相互作用区的电子束束流。这些实验结果为研究微波器件的束波作用提供电流数据。

### 1 法拉第筒结构

该实验用法拉第筒结构简单，主要由用于收集电子的石墨圆片、导电金属、测试电阻和电缆座组成，如图 1 所示。石墨圆片紧贴导电金属，并通过导电金属连接至电缆座的内芯上，在导电金属和电缆座的外导体间均匀并联排布若干个阻值固定的取样电阻。由于测试束流量级在 kA 量级，测试电缆的最大承受电压为几个 kV 量级，因此设计法拉第筒的取样电阻小于  $0.5 \Omega$ ，为了在示波器上测试该电压，需在回路中连接衰减器后再接入示波器进行测试。测试过程中，阴极产生电子束的环境为真空环境，法拉第筒通过加轴向密封圈进行密封。

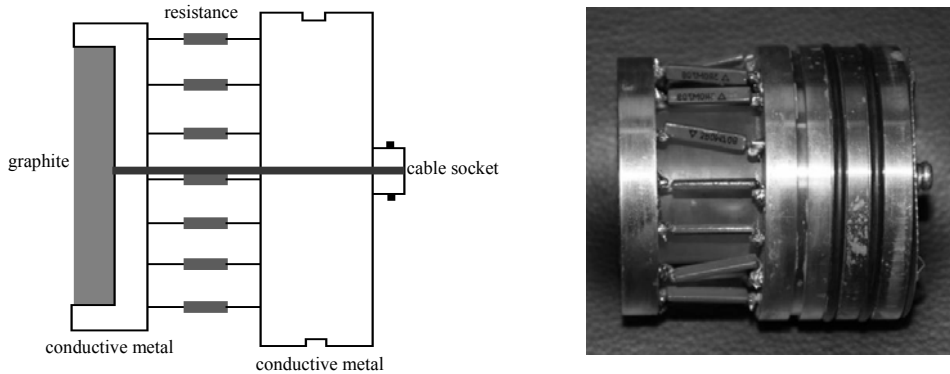


Fig.1 Schematic diagram and picture of the Faraday cup  
图 1 法拉第筒结构示意图和实物照片

### 2 优化法拉第筒响应电阻和分布电感

设计之初，选取了市场上易购的氧化膜电阻，实验中发现，该电阻在短脉冲大电流下随着温度的升高其阻值也在非线性升高，导致测量结果越来越大，同时无法长时间耐受短脉冲大电流的攻击。

在此基础上选取了康铜膜电阻，该材料的阻值不因温度的变化而改变，但该材料的电阻阻值很小，利用康铜膜电阻设计的法拉第筒测试电阻阻值小于  $0.01 \Omega$ ，获得的实验波形如图 2 所示(通道 1 为二极管电压波形，通道 2 为罗果夫斯基线圈测试获得的二极管电流波形，通道 4 为法拉第筒测试波形)，法拉第筒测试波形的前沿出现大的过冲脉冲叠加在真实信号上。通过 Pspice 电路模拟发现，这是由于测试电阻阻值太小，导致法拉第筒电感相对较大引起的，模拟结果如图 3 所示。

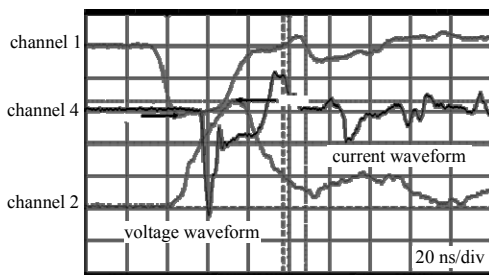


Fig.2 Typical measurement waveforms when Faraday cup has smaller resistance  
图 2 测试电阻较小时获得的典型波形

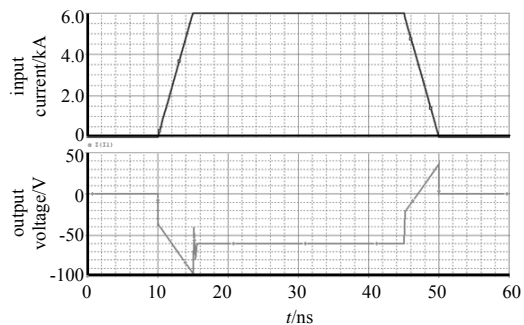


Fig.3 Simulation circuit diagram and results when Faraday cup has smaller resistance  
图 3 法拉第筒测试电阻为  $0.01 \Omega$  时的模拟结果

将康铜膜电阻换成康铜丝后，测试电阻由原来的  $0.01 \Omega$  提高到  $0.07 \Omega$ ，测试波形如图 4 所示，在测试波形的上升沿和下降沿都存在过冲现象。通过模拟得知，该阻抗下法拉第筒的整体电感略大，导致脉冲前后沿处有过冲现象，模拟结果如图 5 所示。

最终选取的取样电阻为幅值  $3 \Omega$  的碳芯电阻，该电阻的阻值基本不随温度变化，选取 16 个取样电阻均匀并联排布在 2 个导电金属间，实际测量电阻阻值为  $0.234 \Omega$ 。图 6 给出了该电阻下法拉第筒的实际测试波形，图 7 为法拉第筒在该阻值下的模拟结果。可以看出在该测试电阻阻值下，法拉第筒的测试波形较准确，能够真实反映电子束的束流幅值随时间的变化。

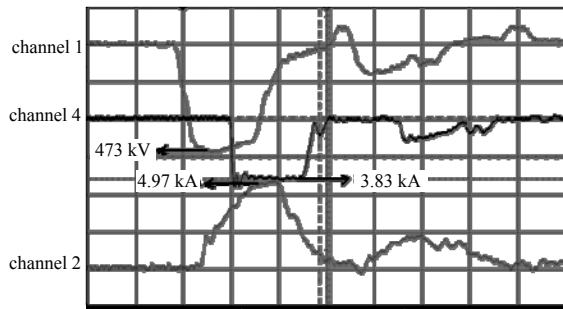


Fig.4 Measurement results when Faraday cup's resistance is 0.07 Ω  
图 4 阻抗为 0.07 Ω 时法拉第筒测试结果

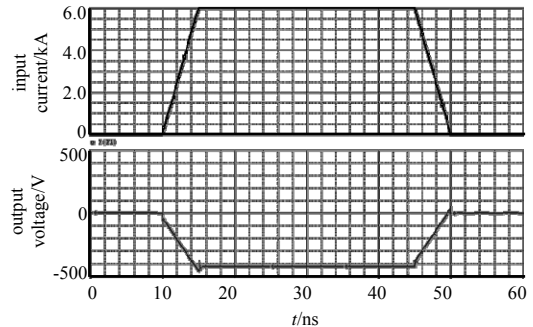


Fig.5 Simulation results when Faraday cup's resistance is 0.07 Ω  
图 5 阻抗为 0.07 Ω 时模拟结果

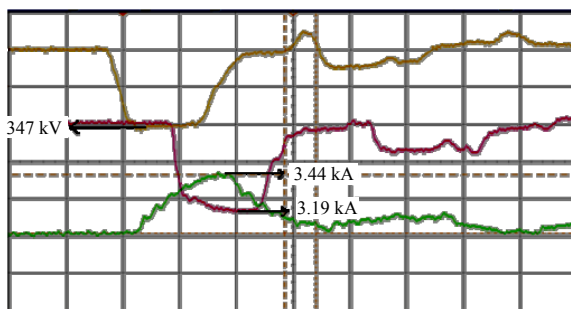


Fig.6 Measurement results when Faraday cup's resistance is 0.234 Ω  
图 6 阻抗为 0.234 Ω 时法拉第筒测试结果

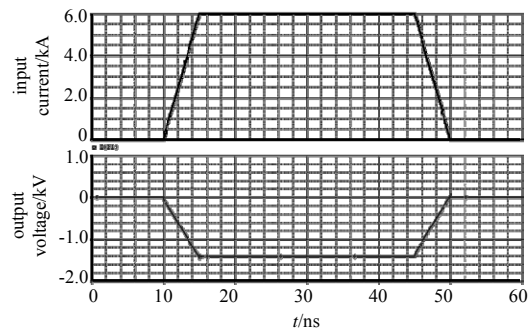


Fig.7 Simulation results when Faraday cup's resistance is 0.234 Ω  
图 7 阻抗为 0.234 Ω 时模拟结果

分析以上结果发现，示波器获得的法拉第筒测试波形为电压波形，主要由法拉第筒的电阻和电感两部分贡献获得。

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

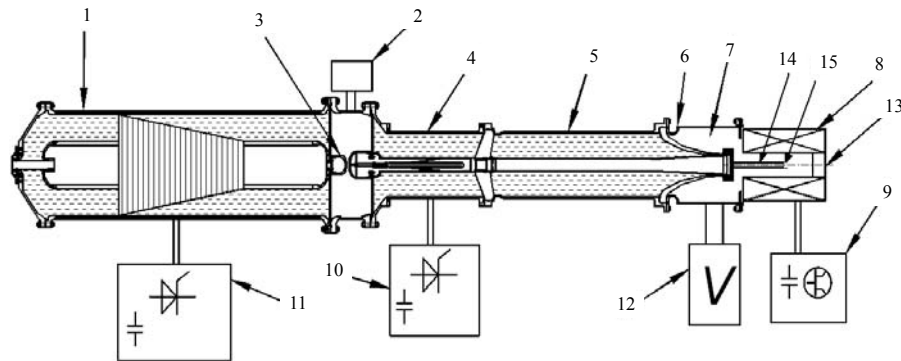
式中： $U$  为电压； $I$  为电流； $R$  为电阻； $L$  为电感。该式第一项由电阻和电流贡献获得，第二项由电感和电流对时间的倒数贡献获得。在设计中为了尽可能减小第二项的贡献，应将法拉第筒的电感设计得越小越好，同时在电缆能承受的电压范围内将电阻设计得越大越好。

设计中为了使取样电阻通过的电流大小一样，取样电阻的阻值尽量挑选一致。取样电阻上通过的电流在 kA 量级，电阻上会有一部分能量转换为热，因此尽量选取电阻值随温度基本无变化的电阻。

### 3 实际应用

将设计的法拉第筒应用在“TPG700”高功率微波驱动源平台上进行不同磁场约束下的无箔二极管阴极发射环形电子束束流轴向测试。“TPG700”高功率微波驱动源在阻抗匹配时(负载阻抗 40 Ω)输出电压~700 kV，电流~7 kA，重复频率 100 Hz，输出功率可调，可从单次到 100 Hz 设定工作状态。该平台是一台基于 Tesla 变压器的 HPM 驱动源，主要由初级电源模块、Tesla 变压器部分、重频气体主开关、脉冲传输线及强流电子束二极管等主要单元和控制系统、测量系统、真空系统等组成，见图 8。实验中法拉第筒位于阴极后 10 mm 处，即图 8 中的第 13 处。

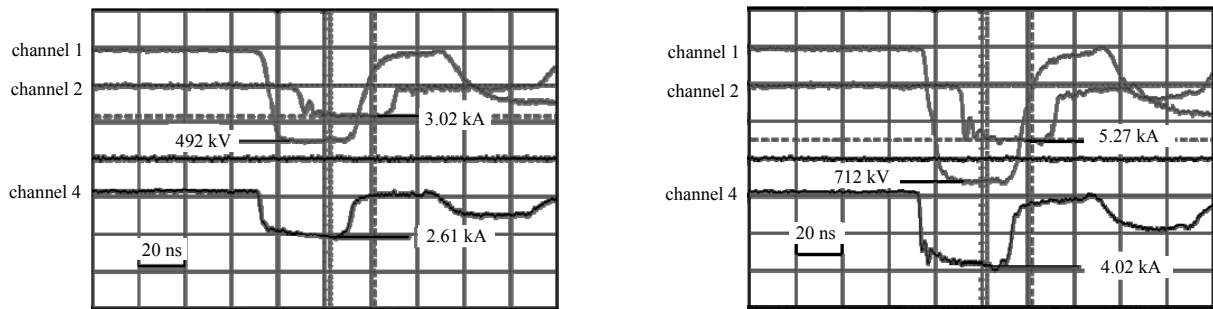
图 9 为低磁场下二极管的测试结果，其中通道 1 为电压波形，通道 2 为罗氏线圈测试电流波形，通道 4 为法拉第筒测试电流波形。图 9(a)为二极管电压为 490 kV 时的测试波形，法拉第筒测试电流的上升沿为~5 ns，明显比罗氏线圈测试电流波形上升沿快。图 9(b)给出同一磁场下当二极管电压为 710 kV 时，法拉第筒测试波形上升沿为~2 ns，可见随着电压的升高，阴极发射电子的速度明显加快。法拉第筒测试结果能准确反应阴极发射电子的速度和能力。在磁感应强度>2 T 时，法拉第筒测试电流幅值与罗氏线圈测试电流幅值一致。说明阴极发射的电子束在强磁场约束时能够完全进入束波相互作用区，而在较弱磁场约束时，阴极发射的电子束有一部分不能到达束波相互作用区。



1-Tesla transformer, 2-fan, 3-repetition gas switch, 4-transmission line segment, 5-transmission line, 6-voltage and current measurement ports, 7-vacuum diode, 8-beam guided magnetic field, 9-magnetic field power, 10-trigger power, 11-primary power, 12-vacuum pumps, 13-Faraday cup, 14-cathode lead rod, 15-cathode

Fig.8 Schematic diagram of the TPG700 repetition rate generator

图 8 “TPG700” 重复频率高功率微波驱动源结构示意图



(a) measurement waveforms of the diode voltage and currents when diode voltage is 490 kV

(b) measurement waveforms of the diode voltage and currents when diode voltage is 710 kV

channel 1: diode voltage waveform; channel 2: current waveform measured by Rogowski coil; channel 4: current waveform measured by Faraday cup

Fig.9 Measurement waveforms of the diode voltage and currents

图 9 用法拉第筒测试环形电子束前向束流典型波形

## 4 结论

本文设计了一种用于测试环形强流电子束前向束流的法拉第筒，该法拉第筒经过对测试电阻的精心挑选，同时在结构设计上尽量减小回路电感等方法，准确测试了 kA 量级电子束束流，测试波形无前后沿过冲现象，并能反映束流的形成时间和大小，为微波器件束波作用区的束流测量提供了一种较可信的方法。

## 参考文献：

- [ 1 ] 卫兵,卿燕玲,关永超,等. 测量低频大电流的自积分罗氏线圈设计[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(9):2227-2231. (WEI Bing,QING Yanling,GUAN Yongchao,et al. Self-integrated Rogowski coil for low-frequency high current measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(9):2227-2231.)
- [ 2 ] 韩持宗. 罗果夫斯基线圈诊断径向束流的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008. (HAN Chizong. Study of Rogowski coil for measuring radial beam current[D]. Chengdu,China:Southwest Jiao Tong University, 2008.)
- [ 3 ] 张建永,胡耀元,贾云涛,等. 脉冲电流测量方法分析与比较[J]. 计测技术, 2015,35(3):10-13. (ZHANG Jianyong,HU Yaoyuan,JIA Yuntao,et al. Analysis and comparison of pulse current measurement[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015,35(3):10-13.)
- [ 4 ] 苏兆峰,杨海亮,张鹏飞,等. 脉冲电场下两种电极材料表面电子发射阈值特性的实验研究[J]. 物理学报, 2014,63(10):106801-1-106801-6. (SU Zhaofeng,YANG Hailiang,ZHANG Pengfei,et al. Preliminary experimental research of electron emission characteristics on surface area of two kinds of electrodes[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(10):106801-1-106801-6.)
- [ 5 ] 胡杨,杨海亮,孙剑锋,等. 用于强流电子束入射角测量的法拉第筒阵列研制[C]// 中国核科学技术进展报告(第四卷). 绵阳:中国核学会, 2015:18-23. (HU Yang,YANG Hailiang,SUN Jianfeng,et al. Faraday cup array designed for measurement of intense pulsed electron beam incident angles[C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology(Vol.4). Mianyang,China:Chinese Nuclear Society, 2015:18-23.)

- [6] 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):054002-1-054002-5. (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):054002-1-054002-5.)
- [7] 胡杨,杨海亮,孙剑锋,等. 强流电子束入射角二维分布测量方法[J]. 物理学报, 2015,64(27):245203-1-245203-7. (HU Yang,YANG Hailiang,SUN Jianfeng,et al. A method of measuring the incidence angle of intense electron beam[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(27):245203-1-245203-7.)
- [8] 刘金亮,谭启美,李传庐. 法拉第筒阻抗对二极管电子束流性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 1998,10(1):94-97. (LIU Jinliang,TAN Qimei,LI Chuanlu. Effect of Faraday cup impedance on electron beam current of diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998,10(1):94-97.)
- [9] 唐影,钱航,易爱平,等. 法拉第筒用于大面积电子束均匀性诊断[J]. 核电子学与探测技术, 2008,28(3):667-670. (TANG Ying,QIAN Hang,YI Aiping,et al. Diagnose of large area electron beam with Faraday cup[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008,28(3):667-670.)
- [10] 何小平,石磊,张嘉生,等. 用偏压法拉第筒测量强流脉冲离子束[J]. 强激光与粒子束, 2000,12(6):753-755. (HE Xiaoping,SHI Lei,ZHANG Jiasheng,et al. Mini biased collimated Faraday cups for measurement of intense pulsed ion beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000,12(6):753-755.)
- [11] 韦宇祥,黄明光,刘濮鲲,等. 测量行波管电子注的法拉第筒的热分析[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(9):2461-2464. (WEI Yuxiang,HUANG Mingguang,LIU Pukun,et al. Thermal analysis of Faraday cup for measuring electron beams of traveling wave tubes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(9):2461-2464.)
- [12] SONG Xiaoxin,LIU Guozhi,PENG Jianchang,et al. A repetitive high-current pulsed accelerator-TPG700[C]// Proceedings of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams. Xi'an,China:IEEE, 2008:75-79.
- [13] 刘忠,马乔生,李正红. 永磁包装相对论返波管振荡器实验研究[J]. 微波学报, 2012,28(2):79-81. (LIU Zhong,MA Qiaosheng,LI Zhenghong. Experimental investigation of a relativistic backward wave oscillator with a permanent magnet[J]. Journal of Microwaves, 2012,28(2):79-81.)
- [14] 邵剑波,谢鸿全,李正红,等. Ku 波段低磁场返波管振荡器的模拟与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):80-85. (SHAO Jianbo,XIE Hongquan,LI Zhenghong,et al. Simulation and experiment of Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):80-85.)
- [15] 霍少飞,孙钧,梁玉钦,等. 不锈钢电子束收集极的损伤能量密度阈值[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):33-36. (HUO Shaofei,SUN Jun,LIANG Yuqin,et al. Damage threshold of energy density of stainless steel electron beam collector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):33-36.)

#### 作者简介:



朱晓欣(1978-),女,陕西省渭南市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波技术.email:zhuxiaoxin@nint.ac.cn.

谭维兵(1988-),男,西安市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为高功率微波技术.

苏兆峰(1981-),男,山东省菏泽市人,硕士,工程师,主要研究方向为脉冲辐射场诊断技术.

宋玮(1982-),男,湖北省巴东县人,博士,研究员,主要研究方向为高功率微波技术开发.

胡祥刚(1987-),男,陕西省汉中市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为高功率微波技术.

李小泽(1981-),男,浙江省温州市人,博士,副研究员,主要研究方向为高功率微波技术开发.