

测真空二极管强电子束流的同轴分流器*

刘金亮 谭启美

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 本文介绍了一种结构紧凑,安装在阳极座中,测量真空二极管内阴阳极间电子束流的同轴分流器,经定标此分流器的电阻为 $2\text{m}\Omega$,响应时间为 3.2ns 。已用它测量81-7M-01强流相对论电子束加速器二极管的电子束流,测得的束流强度为 90kA 左右。此同轴分流器结构简单,易于使用,在研究阴阳极的材料和形状对二极管束流的影响等方面有潜在的应用价值。

关键词 真空二极管,束流,同轴分流器,响应时间

分类号 TM835.2, TM836

A Compact Coaxial Shunt for Measuring Intense Pulse Beam Current of Vacuum Diode

Liu Jiniang Tan Qimei

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract A compact coaxial shunt, which is assembled in anode seat, is introduced. The active resistance and response time are calibrated to be $2\text{m}\Omega$ and 3.2ns , respectively. The shunt has been used to measure intense beam current from vacuum diode of 81-7M-01 Intense Relativistic Electron Beam Accelerator and measurement beam current is about 90kA . This kind of shunt with simple structure is used easily and potential applied in research of material and form of anode and cathode effecting on electron beam currents of vacuum diode.

Key words vacuum diode, beam current, coaxial shunt, response time

* 国防预研基金项目
1996年11月7日收稿

在强流电子束加速器和高功率微波等研究领域,常要测量真空二极管内阴阳极间的束流,束流强度可达 $0.1\sim 100\text{kA}$,脉宽约 $50\text{ns}\sim 2\mu\text{s}$ 。如此高流强的电子束流不能采用一般的测量手段,为此人们常采用罗可夫斯基线圈和分流器来测量。

罗可夫斯基线圈是间接测量方法,虽不影响束流的传输,但误差较大,且当真空二极管的体积较大时,使得罗可夫斯基线圈结构复杂。在各种各样的分流器中,人们常用的是法拉第筒和壁电流分流器。法拉第筒是直接接收电子束并将其转化为激励电流,通过测量激励电流在分流电阻的压降进而算出激励电流的强度,这个电流强度就可认为是电子束流的强度。测量结果较为准确,并且可方便的测量漂移管中不同位置传输束流强度^[1],但很难测量不同间距阴阳极间束流大小。壁电流分流器是在二极管底板与地之间接一个环形小电阻环^[2],通过测量小电阻上的电压降而算出电流强度,此电流强度就认为是二极管的束流强度,此种方法虽能测出二极管阴阳极间的束流,但小电阻环常需1千多个碳墨电阻并联,还需密封真空,使分流器结构复杂。且很难将所有并联的电阻蔽屏,当要阴阳极间束流较小时,测得信号易受外界的干扰,产生较大的误差。

1 分流器的结构和测量原理

此种同轴分流器的结构如图1所示。它主要由 Q_0 电缆接头、阳极、芯线杆、绝缘套、连接板、外壳和康铜圆筒小电阻等组成。小电阻是用厚度为 0.1mm 的康铜皮卷焊而成。芯线杆是 $\phi 10\text{mm}$ 的紫铜杆,一头与小电阻和 Q_0 电缆接头的芯线相连,另一头用螺纹与阳极相连接。阳极可根据实验的需要用铝、石墨或不锈钢等材料加工而成。屏蔽外壳一端通过连接板与小电阻相连,另一端与二极管端盖板和 Q_0 接头外壳相连直接接地,这样使分流器有良好的屏蔽特性。在屏蔽外壳与圆筒小电阻以及圆筒小电阻与芯线之间装有聚四氟乙烯套管,其目的是为了保证分流器有足够的耐电压强度,且防止康筒薄圆筒小电阻因电动力作用而变形。由于屏蔽外壳通过连接板与小电阻焊接于一体,而小电阻与芯线杆焊接在一起,这样抽真空时,同轴分流器本身不会漏气,此同轴分流器没有使用真空,密封圈能将真空密封好。

当脉冲高电压加在阴极上时,使阴阳极导通,产生电子束流,电子束流在芯线杆上产生传导电流并通过小电阻到屏蔽壳(接地),将在小电阻上产生电压降,此电压降经恰当的衰减,可用采样频率较高的示波器直接测得电压波形,再根据小电阻的定标动态电阻值可计算要测量的传导电流大小,如果不考虑电子束在阳极上的发散,损失和阴极上电子束的侧向发射,就可近似认为此传导电流强度是阴阳极间束流强度。

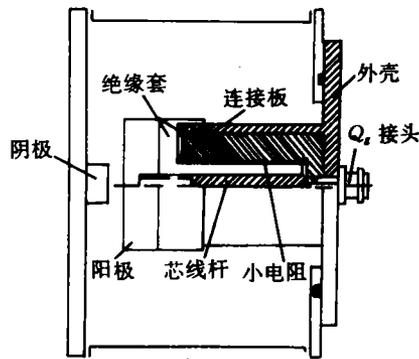


图1 同轴分流器结构简图

2 简单理论分析

工作在脉冲大电流下的同轴分流器,除要减小本身的电感量之外,很重要一点是要考虑趋肤效应的影响,特别对于快速变化的冲击大电流,由于分流器存在趋肤效应,使得分流器电阻位输出端的电压发生时移。减小趋肤效应的影响,最简单的办法是减小分流器小电阻圆筒的厚度。但由于分流器本身存在电磁力和热应力以及受到热容量的限制,管壁不能太薄。所以对于工作在脉冲电流下的同轴分流器,应研究其中电流分布和瞬变过程,从中找出合理的解决办法。关于这方面的理论研究, Park 和 Bennett^[3,4]等做了大量工作。下面就同轴分流器设计时要考虑的主要因素进行分析。

2.1 小电阻计算

同轴分流器的小电阻,一般用不锈钢箔或康铜箔等卷焊成圆筒做成,其电阻值为:

$$R_o = \rho \frac{l}{\pi(a+h)h} \quad (1)$$

式中 ρ 是材料电阻率, l , h 和 a 分别为小电阻圆筒长度、厚度和内径。

2.2 响应时间

同轴分流器对方波脉冲的响应时间 (T) 是衡量其性能的一个重要参数,主要由下式决定^[5]:

$$T = \mu h^2 / 6\rho \quad (2)$$

式中 μ 是小电阻材料的磁导率 $\mu = \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ 。 T 越小,分流器能测量脉冲电子束流的脉宽越窄,一般要求被测脉冲电流脉宽大于 $10T$ 。

2.3 电磁力的作用

当冲击大电流通过同轴分流器时,产生的电磁力使屏蔽外壳向外胀,小电阻圆筒向里挤。如果电阻圆筒太薄则会被挤变形或者损坏,这个电磁力的大小可用下式进行计算^[5]:

$$P = \frac{2.16(a+2b)}{a(a+b)^2} I_m^2 \cdot 10^{-9} \text{kg/cm}^2 \quad (3)$$

式中 a 和 b 分别是电阻圆筒内径和外径, I_m 为脉冲电流的峰值。设计时应尽量使被测冲击电流在圆筒上产生的电磁力小于其所能承受的最大内压力,一般在电阻圆筒和芯线杆之间加一个绝缘套起支撑作用,使电阻圆筒受内压力而不会产生变形和损坏。

2.4 同轴分流器的热容量

脉冲大电流流过分流器,持续时间短,来不及散热,可认为脉冲电流产生的欧姆热全部被小电阻吸收,电阻吸热后,温度升高,温度太高会使电阻圆筒和绝缘介质烧坏。一般要求温升 Q 小于 100°C 。 Q 由下式计算

$$Q = I_m^2 R J / C_o V \gamma 4.18 \quad (4)$$

式中 C_o 和 γ 分别为电阻圆筒材料的比热和密度, V 为圆筒体积, J 是被测量脉冲电流的脉宽。

对于此种结构的同轴分流器, $l = 4.5 \times 10^{-2} \text{m}$, $J = 2 \times 10^{-6} \text{S}$, $c = 418.4 \text{Jkg} \cdot \text{deg}$, $\gamma = 8.9 \times 10^{-3} \text{kg/m}^3$, $I_m = 100 \text{kA}$, $h = 10^{-4} \text{m}$, $\rho = 0.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, $a = 3.36 \times 10^{-2} \text{m}$, $b = 3.38 \times 10^{-2} \text{m}$, 将这些参数代入(1)至(4)式可计算得, $R_o = 2.13 \text{m}\Omega$, $T = 4.18 \text{ns}$, $P =$

1. $4\text{kg}/\text{cm}^2$, $Q=75^\circ\text{C}$, 理论计算的各参数合乎要求。

3 同轴分流器的定标

同轴分流对脉冲方波的响应时间和动态电阻值, 必须通过定标才能确定。定标值的准确性, 直接关系到测量结果的准确性。定标原理如图 2 所示, 用 MFD-1 信号发生器产生幅度约 200V, 脉宽 100ns 单次方波脉冲信号, 信号分成两路, 一路接 1:100 的衰减器, 示波器测得衰减后信号源的波形如图 3(a), 从此图得信号源电压脉冲幅值 $u_{\text{源}}=181.2\text{V}$, 上升时间 $t_{\text{源}}=3.6\text{ns}$ (10%~90% 幅度的上升时间)。

另一路经过 50Ω 标准电阻和同轴分流器串联的回路, 测得分流器小电阻的电压降波形如图 3(b), 从图可得, 脉冲电压幅值 $u_{\text{分}}=7.18\text{mV}$, 上升时间 $t_{\text{分}}=4.8\text{ns}$, 这样可得, 同轴分流器的动态电阻 R 和对方波脉冲的响应时间 T 分别为: $R = u_{\text{分}} \cdot 50 / u_{\text{源}} \approx 2\text{m}\Omega$, $T = \sqrt{t_{\text{分}}^2 - t_{\text{源}}^2} \approx 3.2\text{ns}$. 因此此种同轴分流器定标电阻值为 $2\text{m}\Omega$, 对方波脉冲响应时间为 3.2ns .

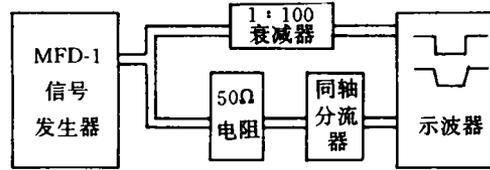


图 2 同轴分流器定标简图

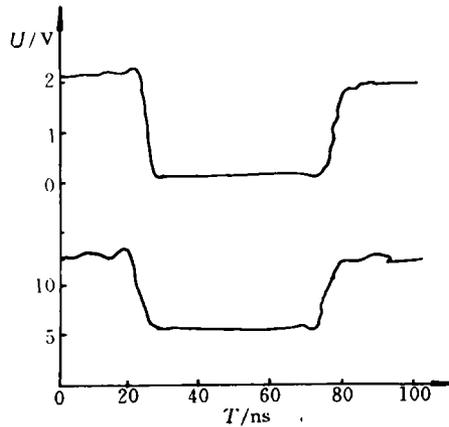


图 3 同轴分流器定标波形

(a) 脉冲信号源波形

(b) 分流器上电压降波形

4 应用和结论

在强流相对论电子束加速器^[2]上, 用石墨作为阳极, 用此同轴分流器测二极管阴阳极间束流, 如图 4 是经 1:30 衰减后, 用 HP54502A 数字示波器测得分流器上电压降波形, 根据波形和同轴分流器的电阻值, 可计算得阴阳极间的束流强度为 90kA 左右。

用壁电流分流器^[2]测得束流强度为 95kA 左右, 两种方法测得的束流波形基本一致, 但用此同轴分流器测得的束流小几千安, 其主要原因是: 用壁电流分流测得的二极管束流大小, 它包括阳极吸收束流和散射电子束流, 而用此同轴分流器测得的仅是阳极吸收束流, 因此同轴分流器测得的束流强度比壁电流分流器测得的束流强度要小。

本文简单分析了同轴分流器设计时要考虑的主要因素。研制了一种结构紧凑, 屏蔽效果好, 能密封真空, 测量二极管阴阳极间束流大小的同轴分流器, 分流器定标电阻值为 $2\text{m}\Omega$, 对方波脉冲响应时间为 3.2ns . 已用它测量强流相对论电子加速器阴阳极间束流, 测得束流脉冲的半高脉宽为 80ns, 束流强度 90kA 左右, 二极管运行的电压为 285kV.

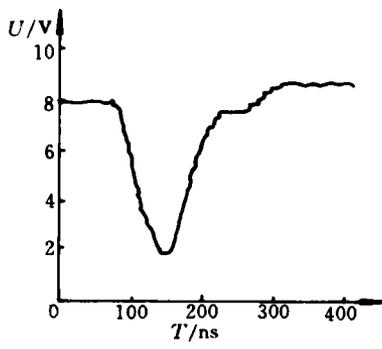


图4 同轴分流器测得的束流波形

参考文献

- 1 刘金亮等. 测量电子束流的小型法拉第筒. 强激光与粒子束, 1993, 5(4): 629
- 2 李传胥等. “81-7M-01”型强流相对论电子束加速器鉴定会文集. 国防科技大学, 1987
- 3 Park J H. Shut and Inductor for Surge—Current Measurement. J. R. NBS, 1947. 39: 191
- 4 Bennett F D. Current Measurement and Transient Skin Effects in Exploding Wire Circuitry. Sci. Instrum, 1962. 33 (11): 1218
- 5 华中工学院与上海交通大学合编. 高电压试验技术. 水利电力出版社, 1982
- 6 项志遵等. 高温等离子体诊断技术. 上海科技出版社, 1982

(责任编辑 石少平)