

用于电子直线加速器的S波段 脉冲大功率速调管

丁耀根**、王友智*、刘铁山**、乔郁芳**

摘 要

S波段脉冲大功率速调管 D4009 是为电子直线加速器研制的微波功率源。该管工作频率为 2856 兆赫,工作电压为 250 千伏,工作电流 200 安培,脉冲功率大于 15 兆瓦,效率大于 40%,增益大于 40 分贝,该管已成功应用于 30 兆电子伏特的电子直线加速器上,工作稳定。图 1 是该管的照片。

D4009 速调管的主要设计指标列于表 1。

表 1 D4009 速调管的主要设计指标

中心频率	2856 兆赫	增益	40~50 分贝
峰值输出功率	15~20 兆瓦	脉冲重复频率	50~300 赫
平均输出功率	2~13.5 千瓦	脉宽	2.5~3.0 微秒
效率	30~40%	频宽	±10 兆赫

为了实现上述设计指标,在总体设计和部件设计时,主要考虑了以下几个方面的问题⁽¹⁻⁴⁾。

1. 电子枪采用修正皮尔斯枪,导流系数为 1.6 微朴,面压缩比为 16:1,工作电压 250 千伏。阴极采用海绵镍氧化物阴极,平均发射电流密度为 4A/cm²。采用部分浸没流聚焦,聚焦磁场为二倍布里渊磁场。为了承受 250 千伏高压,电子枪聚束极与阳极之间的最小间距为 26 毫米。高压绝缘段采用直径为 150 毫米,长度为 200 毫米的陶瓷筒。采用电介槽模拟的方法,适当布置内外防晕环的位置,使等位线垂直于陶瓷表面。聚焦方式为线包聚焦。

2. 高频段采用 5 个重入式圆柱腔,固定调谐。第 1 和第 2 腔调谐在中心频率,第 3 和第 4 腔偏谐于高频端,输出腔也调谐于中心频率,这样既可达到较高的增益,又可达到较高的效率。为了缩短整管长度,减轻聚焦系统的重量,一般选择漂移长度远小于 $\frac{1}{4}$ 缩减等离子体波长,但在选择未前二段漂移管的长度时,应从效率最佳条件加以选择。我们

本文 1981 年 12 月 5 日收到。

* 中国科学院高能物理研究所

** 中国科学院电子所

也几

色散

填满

进一

n the
npari-
druple

采用速调管大信号程序计算了 D4009 管的高频特性, 给出了谐振腔参调分布和漂移长度 (见表 II)。

3. 输出窗采用盒形窗, 窗框直径为 80 毫米, 材料为 95% Al_2O_3 瓷, 瓷片厚度为 2.5 毫米, 圆波导长度为 39 毫米, 在大于 10% 的频带内, 驻波比小于 1.1, 在工作频带内无魔模。为了防止二次电子倍增效应造成窗的损坏, 在窗表面蒸钛。

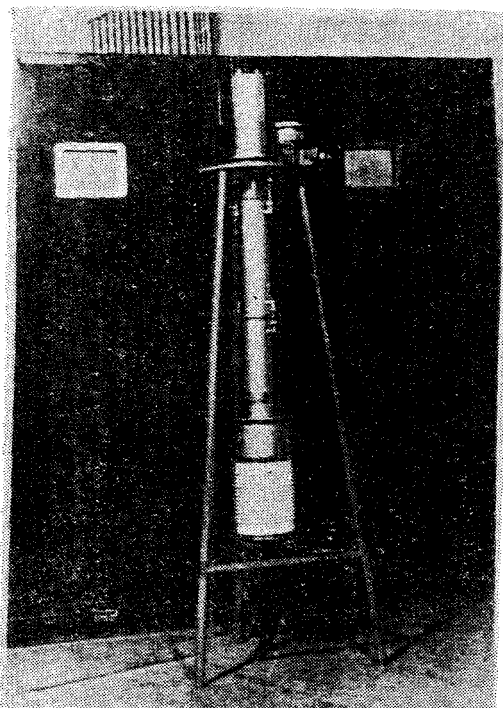


图 1 S 波段大功率速调管 D4009 外形图

4. 该管输入为 N 型同轴线, 输出为波导。输出波导在 E 面 90° 弯曲。采用圆弧型弯波

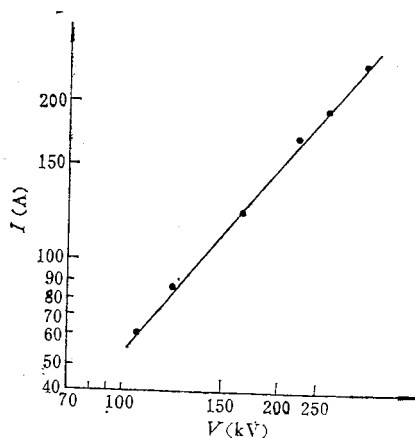


图 2 电子注伏安特性曲线

导, 弯曲部分中心处圆弧长度为工作波导波长的一半, 在 20% 频带内, 驻波比小于 1.05。

5. 管体和收集极采用水冷, 电子枪油冷。收集极直径为 60 毫米, 单位面积平均耗散功率为 $157\text{W}/\text{cm}^2$, 采用自来水冷却, 温升不超过 46.5°C 为防止二次电子从收集极返回高频互作用区引起振荡, 在收集极内表面烧结碳化钨。

6. 为防止 X 射线, 在管体和收集极加铅保护套, 其厚度分别为 20 毫米和 40 毫米。设计铅保护套时, 应尽量防止 X 射线从输出波导和水接头中泄漏出来。

表 2 列出 D4009 速调管的主要参数。

下面介绍一下管子的性能和使用情况:

1. 速调管的直流特性示于图 2, 电子注的伏安特性基本上与设计接近, 直流电子注通过率大于 95%。

2. 速调管的高频特性示于图 3 和图 4。图 3 为速调管输出功率和效率随工作电压变化曲线。当工作电压为 240 千伏时, 输出功率为 17.7 兆瓦, 效率为 40%。实测输入激励功率为 450 瓦, 增益大于 45 分贝。图 13 为速调管最佳激励情况下的频带特性, 在 $f_0 \pm 10$ 兆赫的频带范围内, 功率波动小于 0.5 分贝。

3. 在速调管研制过程中, 发现了一些问题, 这些问题还有待进一步解决^[5-7]。

(a) 耐压问题。在研制过程中观察到二种击穿现象。其一是电子枪绝缘瓷在冷高压

表 2 D4009 速调管主要参数

电子注电压	250 千伏	阴极曲率半径	R58
电子注电流	200 安培	阴极底部半径	$\phi 80$ (喷粉面 $\phi 76$)
导流系数	7.6 微朴	灯丝电压	26 伏
电子注半径	10 毫米	灯丝电流	10.5 安培
漂移管半径	13 毫米	腔 数	5
r_{oa}	0.705	腔间隙距离	15 毫米 ($\beta_e d = 1.2$)
r_{ob}	0.542	腔 负载 Q	输入腔的 $Q_{ext} = 100$ 输出腔的 $Q_{ext} = 30 \sim 40$
b/a	0.77	漂 移 距 离	$\theta_{12} = \theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{34} = 55^\circ$, $\theta_{45} = 35^\circ$
B_b	525 高斯	腔 频 率 分 布	$f_1 = f_2 = 2856$ 兆赫
B	1050 高斯		$f_3 = 2900$ 兆赫, $f_4 = 2920$ 兆赫 $f_5 = 2856$ 兆赫
电子枪压缩比	16:1		
阴极发射密度	4A/cm ²		

15. 散 [高 设 生通 压变 激励 士 10 高压

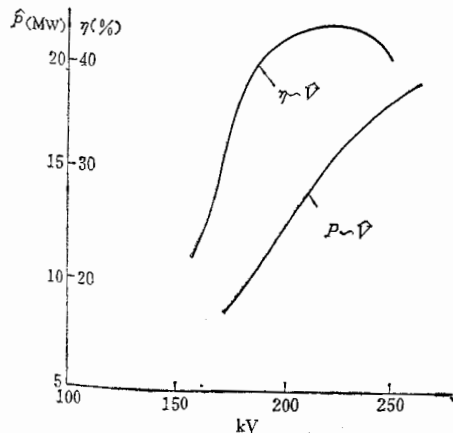


图 3 输出功率、效率与工作电压变化特性曲线

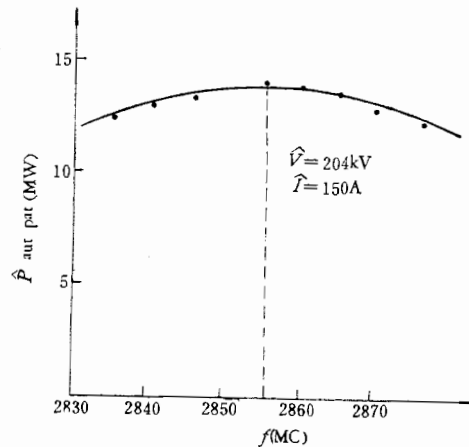


图 4 输出功率与频率特性曲线

老炼时因穿孔而损坏。造成这类穿孔的原因是陶瓷表面因垂直电场造成滑闪发电所引起。通过适当布置防晕环的位置可消除这种损坏。另一种击穿是陶瓷筒真空一侧沿面放电,使陶瓷表面产生黑点,严重的产生裂纹,造成管子损坏。防止这类损坏主要是减少阴极蒸散和改进工艺。

(b) 在使用过程中,发生输出窗损坏。经分析发现,当速调管与加速器联试时,当速调管的负载驻波比大于 1.9 时引起输出窗打火使窗炸裂。减小负载驻波比和蒸钛是提高输出窗寿命的有效途径。

(c) 收集极高频泄漏和打火。在高功率状态,收集极与管体向绝缘瓷泄漏出高频功率,并发生打火。可在测试时在管体与收集极处并联电容使高频旁路或将收集极与管体短路

D4009 速调管在高能物理所研制的 30 兆电子伏直线加速器上应用,当速调管的输出功率为 13.5 兆瓦时,加速器能量为 28 兆电子伏,脉冲束流 150 毫安。加速器最高能量为 33 兆电子伏特,最大 γ 射线强度为 1.05×10^8 伦琴/分钟。该加速器用于 γ 射线辐照,模拟核电子学仪器效应, γ 射线辐照材料改变性能及医药灭菌的应用研究等方面。

参 考 文 献

- [1] 谢家驷、赵永翔著,速调管群聚理论,科学出版社,1966年。
- [2] 电子管设计手册编辑委员会编,大功率速调管设计手册,第二章,国防工业出版社,1979年。
- [3] R. L. Stringall and J. V. Lebacqz "High Power klystron development at the stanford linear accelerator center".
- [4] 冈田武夫等 "S バンド 25MW パルス クライストロン PV-2014" 三菱电机技报, Vol. 41 December, 1967. No. 12 P1511-.
- [5] A. M. 扎列茨基主编,李纪译"高压电器的绝缘"机械工业出版社,1965年。
- [6] 同 [5],第六章。
- [7] "High power microwave window", Microwave Tubes-Proceedings of 5th International Congress, 1964.

A S-BAND HIGH POWER PULSED KLYSTRON USED IN ELECTRON LINEAR ACCELERATORS

DING YAO-GEN** WANG YOU-ZHI* LIU TIE-SHAN** QIAO YU-FANG**

ABSTRACT

A S-band high-power pulsed klystron is described in this paper. This klystron operates at 2856 MHz, 250 kV and 200 A. Its measured pulsed power exceeds 15 MW with efficiency higher than 40% and gain greater than 40 db. This tube has been used routinely on a 30 MeV Electron Linear Accelerator with reliable performance.

In this paper, the design requirements, the design considerations, the measured results and the problems encountered are discussed.

* Institute of High Energy, Physics, Academia Sinica

** Institute of Electronics, Academia Sinica

直接
究,对
室,且
便于
极丝
计和

增加