

X 波段渡越管振荡器的实验研究

马乔生 刘庆想 苏昶 范植开 常安碧 胡海鹰

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 论述了在 sinus-700 加速器上进行的 X 波段渡越管振荡器的实验研究. 在实验中, 首先对加速器进行了调节, 使其能够稳定运行; 然后对影响器件运行的各个参数进行了调试, 得到各参数的比较合适的值, 其中 1/4 波长支撑的长度为 8mm、磁场的大小为 1.85T、二极管电压的大小为 700kV、二极管阴极结构为倒圆的环形阴极头, 最后得到微波频率为 9.18GHz, 微波功率为 1.5GW, 脉宽为 26ns, 效率达 31% 左右.

关键词 X 波段渡越管振荡器 磁场 高转换效率 脉冲缩短

1 引言

作为自行研制的新型的微波器件, 渡越管振荡器(图 1)具有结构简单、微波输出效率较高、输出微波频率几乎不随束压变化等特点, 因此它是一种非常有前途的器件.

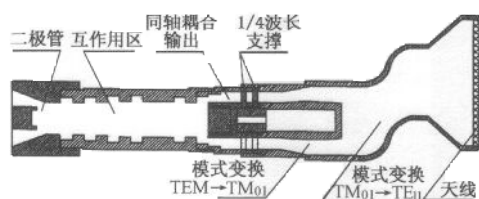


图 1 X 波段渡越管振荡器示意图

渡越管振荡器是一种基于渡越时间效应的微波器件. 所谓渡越时间效应指的就是当电子束注入谐振腔后, 将在腔中激励起一系列的本征模, 这些本征模反作用于后进入的电子束, 使部分电子被加速、部分电子被减速, 电子束与本征模的净能量交换随其在谐振腔中的渡越时间而变化^[1]. 本文主要是对 X 波段渡越管振荡器进行实验研究.

2 实验研究方法及结果

X 波段渡越管实验是在 sinus-700 加速器上进行

的. 在实验中, 磁场系统使用该加速器原有的磁场系统、输出天线和从 TM_{01} 到 TE_{11} 的模式转换器^[2]. 微波测量分为功率测量和频率测量: 微波功率测量系统使用的同样是连同该加速器一起引进的系统, 而微波频率测量则使用了混频器测量的方法.

在实验过程中, 对同轴输出结构的 1/4 波长支撑的长度、磁场的大小、二极管电压的大小、阴阳极结构等进行了调整, 从而找到了一种最佳工作状态. 下面将分别对各个实验步骤进行详细地论述.

2.1 对加速器参数的调试

由于实验是在 sinus-700 加速器上进行的, 加速器能否稳定运行将直接影响到实验的可靠程度, 因此首先对加速器进行了调试, 得到比较稳定的电压和电流波形(图 2), 这样就为后面的器件实验打下了良好的基础.

2.2 1/4 波长支撑的长度的调整

X 波段渡越管振荡器使用的是同轴输出的结构, 该结构可以避免由于电子直接轰击输出波导壁而造成的一些负面影响, 但是却有一个问题需要解决, 那就是内导体的接地问题, 我们所采取的使用 3 个支撑杆直接把它与已接地的外导体连接, 接着又有另外一个问题需要解决, 那就是由于 3 个支撑杆

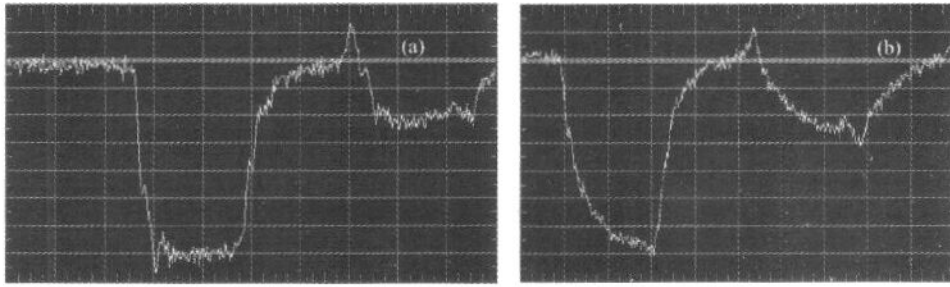


图 2 典型的电压和电流波形

(a) 电压波形: 纵轴 100kV/格, 横轴 20ns/格; (b) 电流波形: 纵轴 1kA/格, 横轴 20ns/格.

对微波的反射从而造成腔体驻波系数的增大, 为解决这个问题, 在 3 个支撑杆后面加了 3 个与它们平行对齐的另外 3 个支撑杆, 这两组支撑杆之间的距离(图 3)是微波波长的 1/4, 这样就可以使两组支撑杆反射的微波在相位上正好相差 180°, 从而相互抵消, 从而减小驻波系数.

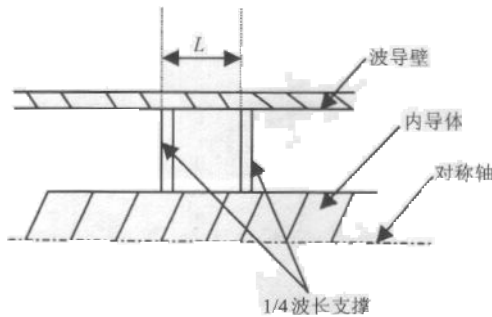


图 3 输出结构的 1/4 波长支撑示意图

为了能够得到比较低的驻波系数, 对图 3 中的 L 进行了调节, 得到了 L 和有引进的测量系统所测得的电压幅值之间的对应关系如下表:

表 1 1/4 波长支撑的长度与电压幅值之间的关系

L/mm	U/V
5.0	1.23
6.0	1.32
7.0	1.27
7.5	1.29
8.0	1.50
8.5	1.33
9.0	1.44

通过比较电压的值, 我们认为 L 等于 8mm 是一个最佳值, 即 1/4 波长为 8mm, 这样就可以从这个 L 值计算得到产生的微波的频率大致为 9.375GHz.

2.3 磁场大小的调整

X 波段渡越管振荡器一般需要强的轴向引导磁

场来对电子束进行引导, 实验表明这个磁场的大小对输出微波的功率和脉宽产生很大的影响.

首先, 在同样的电压和电流下, 随着引导磁场的增大, 输出微波的峰值功率增大. 这是因为在比较高的磁场强度下, 电子的 Larmor 半径较小, 电子束基本位于相同的半径, 这样就保证了束波相互作用的有效性, 所以输出微波的峰值功率就比较高^[3].

其次, 当引导磁场增大时, 微波脉宽有降低的趋势. 这是因为当磁场强度增大时, 输出的微波峰值功率也随之增大, 这样就有更多的电子被反射回去, 这些反射电子被强磁场所约束, 阻碍或破坏了电子束与结构波的相互作用, 这不利于微波被迅速起振和放大, 因此导致脉宽减小.

表 2 是对磁场强度对微波峰值功率和脉宽影响的实验数据的一个统计.

表 2 磁场强度与微波峰值功率与微波脉宽的对应关系

磁场 /T	二极管电压 /kV	二极管电流 /kA	输出微波功率 /MW	输出微波半高宽 /ns
1.73	808	7.0	400	20
1.82	800	7.0	670	16
1.87	800	6.6	690	15
1.89	808	7.0	720	13
1.92	800	7.0	720	12
2.13	800	7.0	794	8

2.4 二极管电压大小的调整

在同样的二极管阻抗和同样的磁场强度下, 研究了二极管电压对微波输出的影响. 结果发现随着二极管电压的增大, 输出微波峰值功率增大、脉宽变窄; 而在同样的二极管阻抗和同样的磁场强度下, 随着二极管电压的降低, 输出微波峰值功率减小、脉宽变宽; 在同样的二极管阻抗下, 对于每一个磁场强度, 都有一个最佳的二极管电压值与其对应.

之所以有以上的结果是因为, 随着二极管电压

的增大,电流也增大,这样就有更多的电子与结构波相互作用,所以微波峰值功率就增大,但是却有更多的电子被反射回去,这些电子被强磁场所约束反过来阻碍或破坏电子与结构波之间的相互作用,这不利于微波的迅速起振或放大,因此脉宽就变窄;同理,但二极管电压降低时,电流也减小,所以输出微波峰值功率减小,同时反射电子也减少,因此微波脉宽变宽.综上所述,在同样的二极管阻抗下,对于每一个磁场强度都对应一个最佳的二极管电压值.

2.5 二极管阴阳极结构的调整

实验中发现,二极管的阻抗和阴极的形状对渡越时间振荡器的输出微波影响比较大.

首先,我们对二极管的阻抗进行了调节,结果发现在二极管阻抗大约为 100Ω 时效果最佳.这是因为此时,二极管的阻抗和器件阻抗匹配较好,因此不至于造成电流的反射,因而效果较好.

其次,我们对阴极形状对微波输出的影响进行了研究,结果发现 2.5mm 厚、如图 4 的阴极效果最好.因为这种阴极发射出的电子比较均匀且束密度较低,这样在较低的磁场就能实现很好的相干调制,输出较高的微波功率;另外由于是在较低的磁场下,所以又能得到较宽的脉宽.

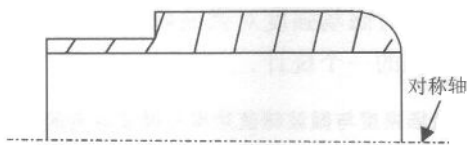


图 4 阴极结构图

3 结论

基于上面的实验,我们在 $1/4$ 波长支撑为 8mm、二极管阻抗为 100Ω 、阴极形状如图 4 的情况下对该 X 波段渡越管振荡器进行了调试,在电压为 700kV、电流为 7kA 时,得到的微波频率为 9.18GHz,微波功率为 1.5GW,脉宽为 26ns,效率达 31% 左右,得到的

波形如图 5. 该实验结果与理论设计结果得到了很好的吻合

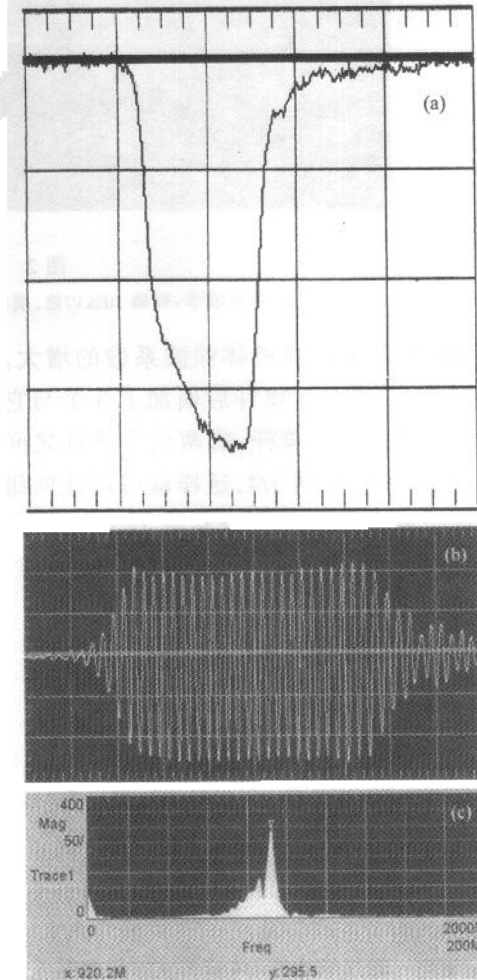


图 5 实验得到的微波功率的检波和频谱
(a) 波检波:纵轴 500mV/格,横轴 20ns/格; (b) 混器测得的波形:本征频率为 10.1GHz,横轴 5ns/格;
(c) 对(b)的 FFT 结果.

下面把该实验结果与同类器件作一比较. 在国外,与该器件相类似的高功率微波器件有两种: Super-Reltron 和 Split-Cavity oscillator (SCO), 它们都利用了渡越时间效应对电子束进行自调制. 但是 Super-Reltron 和 Split-Cavity oscillator (SCO) 只能对较低的电压 ($< 250\text{kV}$) 和电流 ($< 1.5\text{kA}$) 的电子束进行自调制.

参考文献 (References)

- 1 FAN Zhi-Kai. The Theoretic Investigation and the Principal Experiment of the Transit-time Tube Oscillator. Chinese Academy of Engineer Physics Ph. D thesis. 1999, 6 (in Chinese)
(范植开. 渡越管振荡器的理论研究与原理性实验. 中国工程物理研究院博士论文, 1999, 6)
- 2 Resaerch Report of sinus-700 Accelerator. Siberia Branch of Russian Academy of Science, 1995
- 3 CHEN Chang-Hua, LIU Guo-Zhi et al. High Power Laser and Particle Beam. 2000, 6 (in Chinese)
(陈昌华, 刘国治等. 引导磁场对相对论返波管微波功率的影响. 强激光与粒子束, 2000, 6)

Experimental Investigation of the X-Band Transit-Time Tube Oscillator

MA Qiao-Sheng LIU Qing-Xiang SU Chang FAN Zhi-Kai CHANG An-Bi HU Hai-Ying

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract A newly manufactured X-band transit-time tube oscillator is introduced. The major advantages of this oscillator include: 1) simple structure, 2) high conversion efficiency, and 3) RF output frequency almost independent of electron beam voltage. On the accelerator sinus-700, its output power's dependences on system parameters are experimentally investigated. The experiment results are in excellent agreement with the theoretical predicts, and the design specifications of 9.18GHz microwave frequency, 26ns pulse width and 31% conversion efficiency are reached. At higher powers, the pulse shortening develops. It's presumably because of reflected electrons, which will be trapped by a strong magnetic field, and then disturb the ongoing electron's interaction with microwave.

Key words X-band transit-time tube oscillator, magnetic field, the high conversion efficiency, pulse shortening