

文章编号: 1001-4322(2003)08-0797-04

径向渡越时间振荡器的初步实验研究*

贾云峰, 刘永贵, 谭启美

(国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对径向渡越时间振荡器进行了实验研究, 在非最优条件下得到了辐射功率大于 30MW、主频为 3.66GHz 的微波, 同时研究了微波功率随电压、电流的变化, 所得结果和规律与理论分析和数值模拟基本相符。

关键词: 径向渡越时间振荡器; 高功率微波源; 频率

中图分类号: TN732.2 文献标识码: A

M.J. Arman 于 1996 年首次提出了径向渡越时间振荡器(radial transit time oscillator, RTTO)的概念^[1], 该器件的一个重要特征是阴极电子径向发射。由于径向发射面大, 空间电荷效应小, 空间极限电流大, 能在无外加引导磁场条件下运行, 因此有利于实现器件的小型化。Arman 的数值模拟研究表明, RTTO 工作在振荡状态时, 具有不需外加磁场、不需输入射频信号、对电子束质量要求不高、频率稳定、饱和功率高、效率高、阻抗低等优点; 其缺点是起振较慢。我国科研人员的理论分析和数值模拟^[1,2]也表明 RTTO 是一种不需引导磁场的新型的低阻抗高功率微波源。迄今为止, 关于 RTTO 的研究基本上都是理论分析和数值模拟方面的, 国内尚没有关于实验研究的正式报道。本文从实验上对 RTTO 进行了研究, 得到的结果和规律与理论分析和数值模拟基本是一致的。

1 实验设备

实验在水介质传输线强流电子束加速器上进行。加速器正常运行范围为: 二极管电压为 300~600kV; 电子束流大于 10kA; 二极管阻抗为 8~12 Ω ; 实验中真空度保持在 2×10^{-2} Pa。

实验装置如图 1 所示。器件以不锈钢为材料, 阳极网采用 0.3mm、几何透过率为 80% 的不锈钢网, 第一层阳极网用厚度 10cm 的聚丙烯环压紧在阳极上, 以防止高压情况下发生打火。为了防止阴极附近电场发生畸变, 聚丙烯环尽量远离阴极头。第二层阳极网嵌入谐振腔壁开的小槽。阳极最小直径为 30cm, 阴极头长 5cm, 直径分别为 20, 22, 24 和 26cm。为了保证阴极表面电子束发射均匀, 发射面贴上了两层天鹅绒, 天鹅绒宽度略大于谐振腔宽度。在微波提取腔侧面开了两个对称的直径 5cm 的圆孔辐射微波, 微波信号用宽带喇叭天线接收后检波送到 Tek 数字示波器进行测量。进行频率测量时, 宽带喇叭天线接收的微波信号分两路, 一路经过 S 波段色散线, 另一路直接输入示波器, 通过测量两路信号的延时得到微波主频。装置以 300kV, 15kA 的最优化条件为基础设计。实际谐振腔腔长 $l = 3.5$ cm, 径向间距 $d = 5.8$ cm, 相对于最佳匹配尺寸产生了一定的偏差。

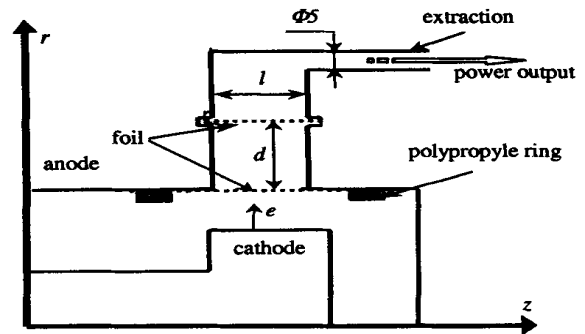


Fig. 1 Schematic of RTTO

图 1 径向渡越时间振荡器结构示意图

2 实验结果

2.1 微波功率和频率特性

用宽带喇叭接收的典型微波功率波形和微波频率测量波形如图 2、图 3 所示。微波脉宽约为 12~20ns, 峰值出现在电流峰值的最大值处。

* 收稿日期: 2002-10-09; 修订日期: 2003-04-24
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 贾云峰(1975-), 男, 博士, 主要从事高功率微波方面研究。

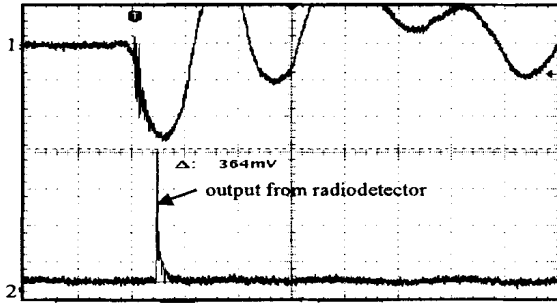


Fig. 2 Typical microwave signal received by horn

图2 喇叭天线测得的典型微波信号(下)

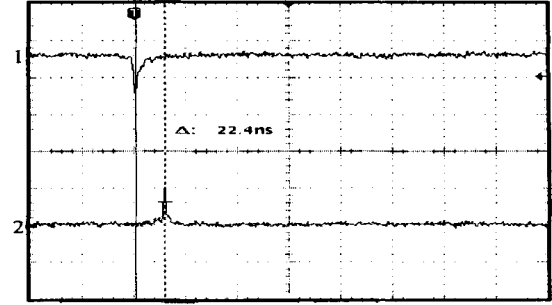


Fig. 3 Frequency measurement of microwave

图3 微波频率测量波形

我们在离辐射口 50cm 处用喇叭天线接收微波信号,经检波器后得到的电压信号为 97.5mV。经过严格标定,计算得到单一辐射孔的功率为

$$P = 10^{-9+(1+2+3)/10} \text{MW} = 32.4 \text{MW} \quad (1)$$

式中: 1 为源、腔体、提取口及 50cm 大气传输所组成的系统的总衰减,经过微波网络分析仪标定得 $1 = 58.5 \text{dB}$; $2 = 32.1 \text{dB}$,为所加的衰减器的衰减; $3 = 14.5 \text{dB}$,为检波器上电压信号对应的以 dB 表示的微波幅值。如果两个辐射孔能够实现相位匹配,辐射总功率将达到约 70MW。微波频率为

$$f = f_c / \sqrt{1 - [L/c(t - t_0)]^2} = 3.66 \text{GHz} \quad (2)$$

式中: $f_c = c/2a = 2.078 \text{GHz}$,为所用的 S 波段色散线的截止频率; $L = 4.3 \text{m}$,为所用波导色散线的长度; c 为光速; $t = 22.4 \text{ns}$,为两路微波信号在示波器上的延时; $t_0 = 5 \text{ns}$ 为两路信号电缆的延时。

在实际谐振腔尺寸和 350kV 电压下,不考虑电压电流波形、阳极网透过率、发射不对称这些问题的影响,模拟计算结果显示,微波饱和时间达到了 50ns,峰值功率先达到约 250MW,然后迅速下降到约 100MW,有明显的过饱和现象。模拟得到的功率和频率如图 4,图 5 所示,图 4 中的平均功率为 42.679MW。

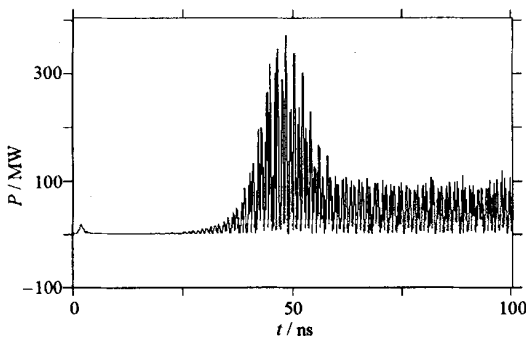


Fig. 4 Variation of power vs time

图4 微波功率图

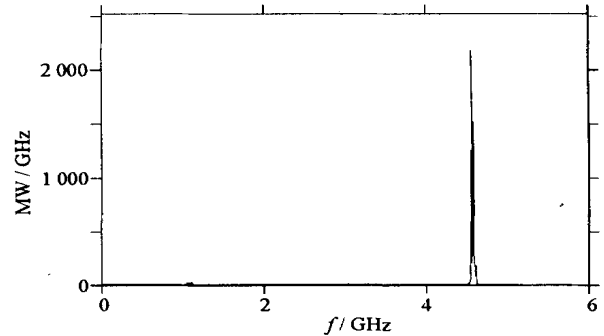


Fig. 5 Frequency spectrum of microwave

图5 微波频率图

与模拟结果相比,实验所得的微波功率偏小。微波功率偏小的原因在于:(1)加工时没有保证谐振腔的精度,对密封圈的厚度考虑不周,造成谐振腔宽度偏差较大(4~5mm),谐振频率漂移。由于没有达到渡越时间振荡器的要求(谐振腔宽度和径向间距严格匹配),所以造成增长率不高,起振和饱和时间变长;(2)电压电流波形非理想化,器件起振时间变长后,增长更不容易;(3)由于实验设备本身的原因,电压和电流不能达到设计最佳值;(4)最重要的一点,大阴极径向同轴发射很难保证发射的均匀性和对称性;(5)不锈钢网对电子束的阻碍减小了参与有效相互作用的束流;(6)提取口耦合效率不高。

用微波网络分析仪对谐振腔进行冷测时发现,谐振腔的选择性较差,出现了 3.6,3.8 和 4.2GHz 几个谐振点,当然这也证实了主频为 3.66GHz 的合理性。由于谐振腔壁的衰减与频率的 3 次方成反比,低频分量在谐振腔内衰减小,增益高,起振容易,总是优先增长,所以实验中主频多在 3.6GHz 附近,在少数情况下出现了主频为 3.88 和 4.26GHz 的情况。同时实验中局部发射电流过大导致的空间电荷效应也会引起频率漂移,在模拟计算中已发现这一现象。另外,非理想化的谐振腔中电容、电感等分布参数会导致谐振腔的微扰,也会造成频率漂移,上述的冷测结果证实了这些因素的影响。

实验中发现,一般在阴极刚贴上天鹅绒时,电子发射相对比较均匀,产生的微波功率较高,频率特性比较固定单一。在天鹅绒打过三四十炮后,发现微波功率明显下降,频率特性显著恶化。微波脉冲本身存在多峰值,经过色散线后可以看出,除了位于微波主频 3.6 GHz 处的峰值,还有别的频率成分产生,说明微波产生与阴极电子的发射状态关系密切,恶化的阴极表面产生的局部轴向电子发射和非对称的径向发射是造成杂散模式和频率出现的主要原因。

2.2 微波功率与电压、电流的关系

尽管功率水平不高,但是模拟中的规律还是能在实验中反映出来。实验中研究了二极管电压在 340 ~ 425kV 范围内变化时微波功率的变化规律。通过改变阴极半径来改变二极管阻抗,从而间接改变电流,我们得到了微波功率随电压、电流变化的规律,如图 6,图 7 所示。

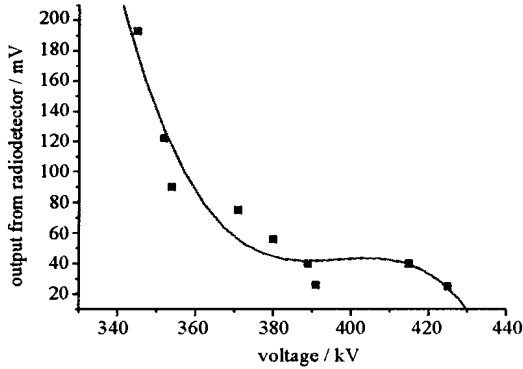


Fig. 6 Variation of output from radiodetector vs voltage

图 6 检波器输出电压随电压变化

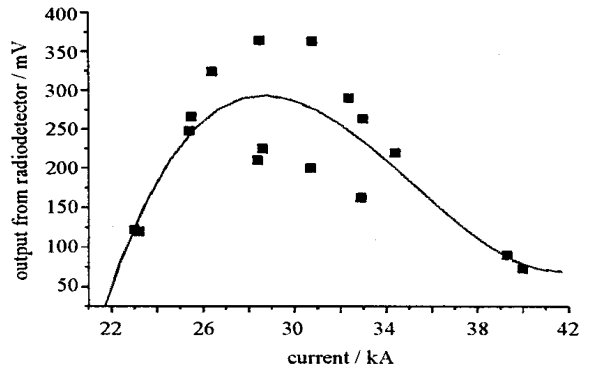


Fig. 7 Variation of output from radiodetector vs current

图 7 检波器输出电压随电流的变化

从以上结果看出,电压为 340kV 时功率最大,电压偏离预期最佳值(300kV)越多时功率越小,直至电压为 400kV 以上时微波功率降低一个数量级。变化规律与理论和模拟分析一致,表明工作的机制的确是渡越时间效应;电流存在一个最佳值,在电流小于 26kA 时,微波功率明显下降,当电流低于 20kA 时不能产生微波,表明器件存在起振电流,当电流大于 34kA 后,微波功率也呈显著下降趋势,这是由于空间电荷效应的影响器件已经不能正常工作。最佳电流大概在 28 ~ 31kA 之间,实验中微波功率最高时的电流为 29.7kA。由于我们测量的是二极管的壁电流 I_t ,而模拟计算中用的是电子束流 I_b ,它通常为壁电流的 75%^[1],考虑到阳极网的透过率为 80%及天鹅绒宽度略大造成的电子束直接打到阳极壁上的损耗,因此实际注入到相互作用腔体中的电子束流 I_b 约为 17kA 左右,这与模拟得到的最佳电流 15kA 是吻合的。

为了进一步验证实验中已得到的规律,我们直接用电探针测量了微波提取腔中心处的微波场,研究了微波功率随电压和电流变化的规律。典型的探针测量的波形如图 8 所示,用示波器读数值表示的相对微波功率随电流、电压的变化规律示于图 9,图 10。

图 8 中,信号的尖峰部分就是所测得的微波信号,与喇叭天线所测的信号相比,脉宽较大,同时幅值也大一个量级以上。图中尾巴部分信号具有明显的振荡,这可能是由于探针本身具有寄生电感和电容,电子束的轰击造成探针回路的充放电过程。在文献[3]实验工作中也发现了类似的现象。实验发现,当电流较大时,信号的尾巴的幅值也较大,表明这一过程的形成与电子束流有关。由于探针的耦合效率与探针的位置、有效面积、阻抗等多种因素有关,标定不易,所以我们在测量微波功率时以比较成熟的喇叭天线测量法为准。

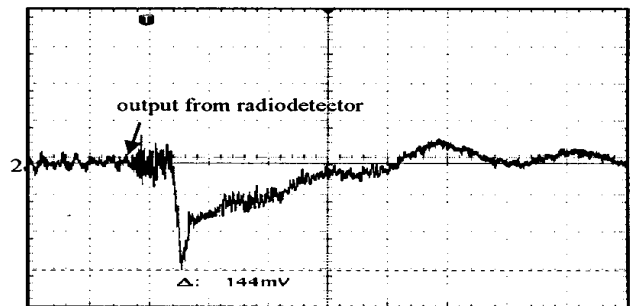


Fig. 8 Typical signal of probe measurement

图 8 典型探针信号波形

从探针测量实验结果看出,在 340 ~ 420kV 范围内,输出微波功率随束电压的增大而减小,当电压增大到 450kV 以上时,不再产生微波;在电压保持不变时,微波功率随束电流的变化趋势和用喇叭天线接收得到的结果一致,电流小于 20kA 时,器件不起振,当电流增大到约 29kA 时微波功率达到最大,当电流继续增大时,微波

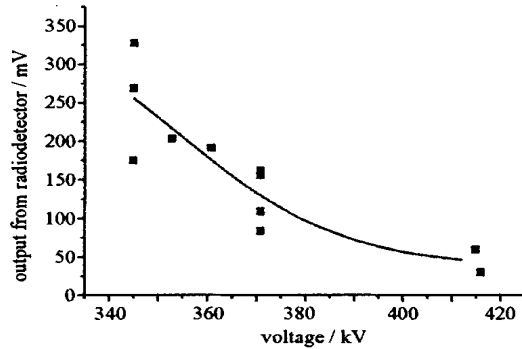


Fig. 9 Variation of output from radiodetector vs voltage

图9 探针测量的检波器输出电压随电压的变化

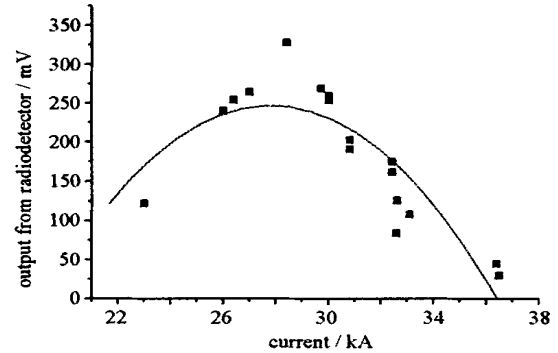


Fig. 10 Variation of output from radiodetector vs current

图10 探针测量的检波器输出电压随电流的变化

功率又逐步降低,到40kA以后,功率很小,且频率特性也变得杂乱,我们认为此时器件已经偏离了渡越时间效应的工作点。总的看来,探针实验结果和喇叭天线实验结果定性一致。

3 结论

对径向渡越时间振荡器进行了实验研究,验证了径向渡越时间振荡器产生高功率微波辐射的机制,得到了辐射功率大于30MW,主频3.66GHz,脉宽12~20ns的高功率微波辐射。微波功率和频率随束电流、电压的变化规律与理论分析和数值模拟基本一致。实验还有些需要改进的方面,主要是在提高加工精度,降低加工和装配难度;改善大半径环型阴极同轴电子发射特性;改进微波提取口等方面,这些工作将随后开展。

参考文献:

- [1] Arman M J. High power radial klystron oscillator[A]. SPIE[C]. San Diego, USA, 1995, 2557:21—31.
- [2] 吴中发,王玉芝. 径向速调管振荡器的理论设计和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2):211—214. (Wu Z F, Wang Y Z. Theoretical design and numerical simulations of radial klystron oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(2):211—214)
- [3] 贾云峰,刘永贵,李传胪. 径向渡越时间振荡器的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1):95—98. (Jia Y F, Liu Y G, Li C L. Numerical simulation of radial transit-time oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1):95—98)
- [4] 刘松. 磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙:国防科技大学,2001. 76. (Liu S. Research of magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. 76)
- [5] 贾云峰,钱宝良,张建德. 静电探针测量强流相对论电子束电离中性气体产生的等离子体密度[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3):343—346. (Jia Y F, Qian B L, Zhang J D. Using Langmuir probe to diagnose plasma produced by relativistic electron beam ionizing neutral gas. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(3):343—346)

Primary experimental study on radial transit time oscillator

JIA Yurfeng, LIU Yonggui, TAN Qimei

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The primary experimental study on radial transit time oscillator (RTTO) was carried out. Under nonoptimized conditions, a microwave with the output peak power of above 30MW was generated at frequency 3.66GHz. The dependence of microwave power on the diode voltage and current are presented in this paper. The results obtained from this work agree with those from theoretical analysis and particle simulation.

Key words: Radial transit time oscillator(RTTO); High power microwave source; Frequency