

# 同轴虚阴极谐振效应研究\*

罗 雄<sup>1)2)</sup> 廖 成<sup>1)</sup> 孟凡宝<sup>2)</sup> 张运俭<sup>2)</sup>

1) 西南交通大学电磁场与微波技术研究所, 成都 610031)

2) 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2005 年 12 月 8 日收到, 2005 年 12 月 30 日收到修改稿)

中国工程物理研究院应用电子学研究所的一些实验表明由阳极反射板、阳极网和阴极发射的电子束形成的环状虚阴极围成的准谐振腔是决定同轴虚阴极输出微波功率和传输模式的关键所在. 在二极管电压 350 kV, 电流 23 kA 条件下, 获得了 500 MW 的微波输出功率, 能量转换效率约 6.2%, 工作频率 3.3 GHz, 输出微波主要由  $TM_{01}$  模式和  $TE_{11}$  模式组成. 对同轴虚阴极的谐振效应进行了分析.

关键词: 高功率微波, 同轴虚阴极, 谐振腔, 模式竞争

PACC: 2900, 4100

## 1. 引 言

同轴虚阴极振荡器是一种新型的比较有潜力的高功率微波器件, 它比轴向虚阴极振荡器更有优势<sup>[1,2]</sup>. 为了提高器件的微波输出功率和效率, 对同轴虚阴极振荡器的理论和实验研究显得非常必要和重要. 虽然在理论和实验上已经取得了一定的成果<sup>[3-7]</sup>, 但是还远没有达到像轴向虚阴极那样的深度和广度.

使用谐振腔是虚阴极振荡器产生微波的一种基本技术, 用它可以增加输出微波功率, 可以使输出微波的频谱变窄. Benford 研究了轴向虚阴极振荡器的谐振效应<sup>[8,9]</sup>. 因为同轴虚阴极和轴向虚阴极有着不同的结构, 我们的实验结果揭示了区别于轴向虚阴极的谐振特性, 也许这是一种能提高同轴虚阴极器件效率的方法.

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 二极管由阳极网和发射电子束的天鹅绒阴极组成, 天鹅绒阴极发射的电子束形成的环状虚阴极位于阳极网内. 阳极网直径为 110mm, 对电子的透过率为 90%, 阴极直径为 140mm, 电子发射宽度为 60mm. 阳极反射板距离天鹅绒位置

左端面  $D$  为 90mm. 输出采用直径为 110mm 的圆波导, 后面接口径为 350mm 的圆锥喇叭天线. 系统驱动源采用 SINUS 强流脉冲电子束加速器.

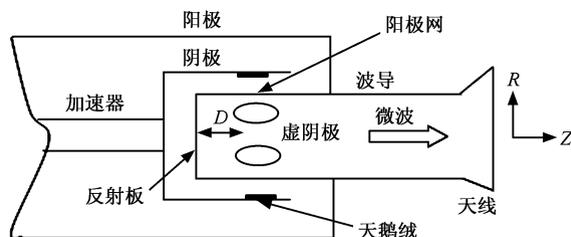


图 1 同轴虚阴极实验装置

在实验中, 二极管电压和电流分别通过电容分压器和 Rogowski 线圈进行测量. 测量天线距离圆锥喇叭天线口面中心 6m, 对输出微波进行远场测量. 输出微波模式通过六路天线测得其远场方向图来进行判断. 输出微波频率通过对接收天线采集到的信号进行 FFT 处理获得. 输出微波功率通过对六路天线所测得的功率密度进行空间积分获得.

## 3. 实验结果及分析

实验过程中, 二极管和输出波导内真空度约为 0.02Pa. 对每一个状态进行多次实验, 得到了稳定的输出结果. 实验测得的典型二极管电压电流波形

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-807-2-1)资助的课题.

如图 2 所示,二极管电压约 350kV,电流约 23kA,上升沿约 7ns,整个脉宽约 40ns.

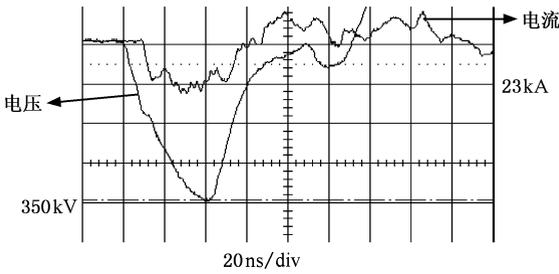


图 2 典型二极管电压电流波形

实验分为两个步骤,一是选用不带阳极反射板的结构,二是选用带阳极反射板的结构.不带阳极反射板结构的同轴虚阴极输出微波波形和频谱如图 3(a)和(b)所示,带阳极反射板结构的同轴虚阴极输出微波波形和频谱如图 4(a)和(b)所示.根据六路天线所测得的功率密度,对其进行空间积分,不带阳极反射板结构的同轴虚阴极输出微波峰值功率为 220MW,功率转换效率约为 2.7%;带阳极反射板结

构的同轴虚阴极输出微波峰值功率为 500MW,功率转换效率约为 6.2%.

对带阳极反射板结构和不带阳极反射板结构这两种状态进行对比.从图 3 和图 4 中可以看出,不带阳极反射板的同轴虚阴极输出微波的幅度并不大,频谱也不理想,有好几个峰值.相反,带阳极反射板的同轴虚阴极输出微波的幅度明显要比第一种状态高出很多,同时频谱也变得很纯,基本上只有一个主峰值,在 3.3GHz 左右.这表明在加了阳极反射板以后,同轴虚阴极振荡器的输出微波功率和频谱都有着非常明显的改善.

为了对实验做出理论的解释,把阳极反射板、阳极网和阴极发射的电子束形成的虚阴极考虑为一个准谐振腔.事实上这是可行的,虚阴极对微波有着较强的反射能力<sup>[10,11]</sup>,考虑到它的结构,可以把它近似看成一个金属圆环.谐振腔的谐振频率与它自身的结构参数关系由方程(1)<sup>[12]</sup>决定,

$$f_{nm} = \frac{k_{nm} c}{2\pi} = \left[ \left( \frac{x_{nm}}{a} \right)^2 + \left( \frac{l\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{c}{2\pi}, \quad (1)$$

式中,  $x_{nm}$  为  $n$  阶贝塞尔函数的第  $m$  个零点位置,  $a$

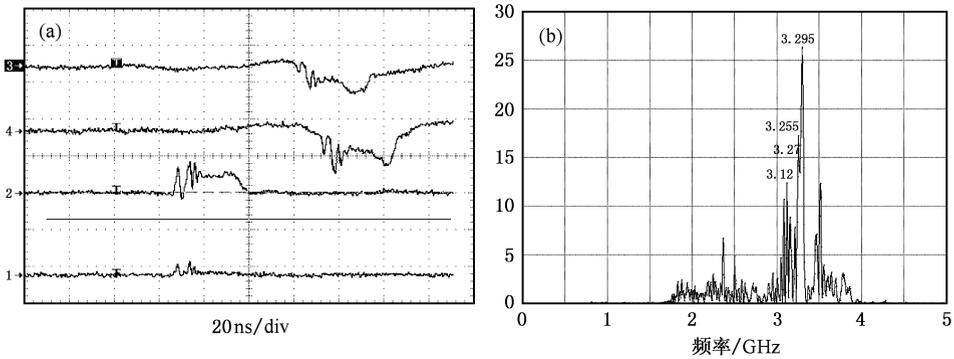


图 3 不带反射板的典型微波波形(a)及其频谱(b)

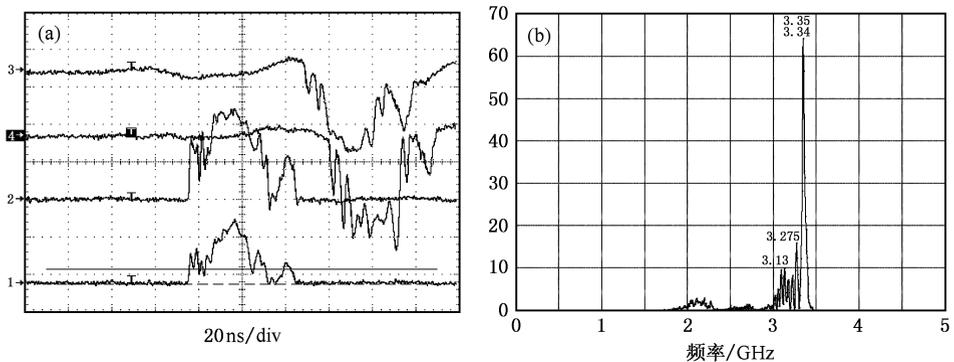


图 4 带反射板的典型微波波形(a)及其频谱(b)

为阳极半径  $d$  为谐振腔的长度. 考虑到输出波导的尺寸限制, 在 3.3GHz 下只有三种模式能通过圆波导, 即  $TE_{11}$  模式、 $TM_{01}$  模式和  $TE_{21}$  模式, 做出这三种模式的谐振频率随谐振腔长度变化的关系, 如图 5 所示.

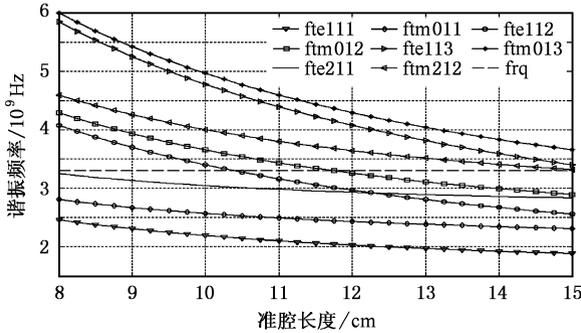


图 5 谐振频率与谐振腔长度的关系

从图 7 中可以看出, 在电子束的发射位置(9—15cm)之间, 与输出微波频率  $f_{\eta}$  (3.3GHz) 相交的只有两条线: 在谐振腔长度为 10.4cm 处的  $TE_{112}$  和在谐振腔长度为 11.7cm 处的  $TM_{012}$ . 这表明在输出微

波频率为 3.3GHz 时, 只有  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式才可能在谐振腔内产生谐振输出微波. 为了证实这一点, 做出了实验中所采用的圆锥喇叭天线对这两种模式的远场方向图, 如图 6(a) 和 6(b) 所示.

从图 6 可以看出,  $TE_{11}$  模式的最大增益在  $0^\circ$  方向约为 17.49dB, 而  $TM_{01}$  模式在  $0^\circ$  方向增益为 -20dB, 它的最大增益在  $12^\circ$  方向左右, 约为 13.78dB. 根据实验数据, 做出了输出微波中两种比较典型的两种方向图, 如图 7(a) 中曲线 a, b 所示.

比较  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式的远场方向图, 可以基本判断图 7(a) 中的输出微波是由  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式共同组成的. 为了进一步验证这点, 通过软件做出了  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式在模比分别为 1:2 和 1:3 时的远场方向图, 分别如图 7(b) 和图 7(c) 所示. 比较曲线 7(b) 与 7(a) 中的曲线 a, 图 7(c) 与图 7(a) 中曲线 b, 可以发现它们有惊人的相似之处, 这与前面的分析得出的结论吻合得非常好. 这表明实验所测得的输出微波主要由  $TM_{01}$  模式和  $TE_{11}$  模式共同组成, 其中  $TM_{01}$  模式所占比例约 66%—75%,  $TE_{11}$  模式所占比例约 25%—33%. 这同时也表明在该准

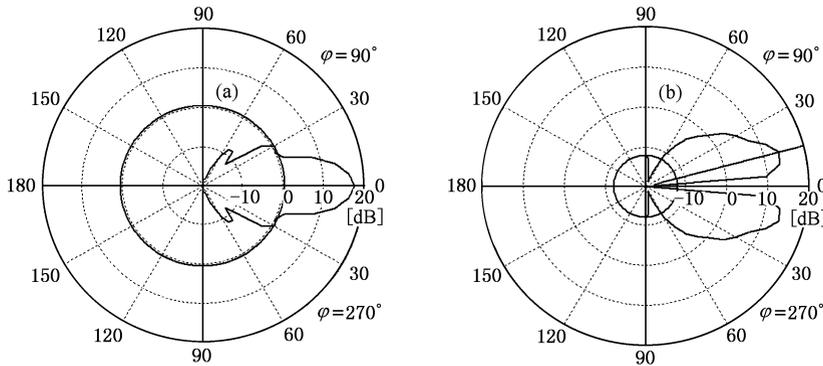


图 6 3.3GHz 下辐射天线的  $TE_{11}$  模式方向图(a) 和  $TM_{01}$  模式方向图(b)

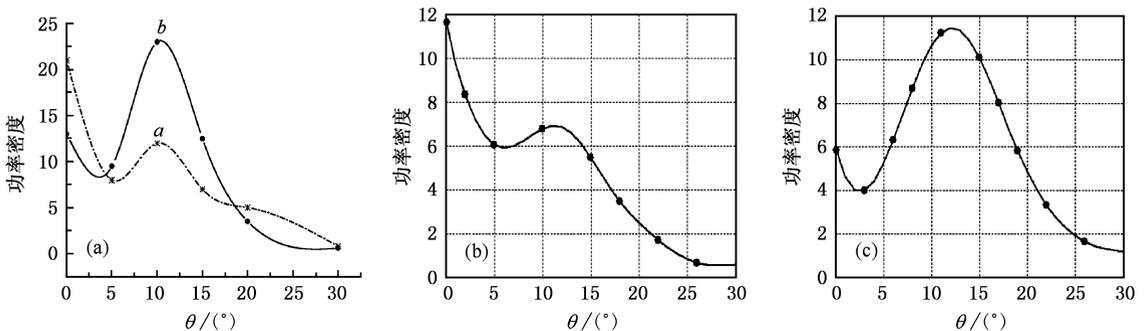


图 7 实验所获得的两种典型方向图(a) 及  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式模比分别为 1:2(b) 和 1:3(c) 的方向图

谐振腔内,  $TM_{01}$  模式与电子束的相互作用和自谐振能力要优于  $TE_{11}$  模式,  $TM_{01}$  模式在模式竞争中处于优势, 从而获得了较大输出,  $TE_{11}$  模式在模式竞争中处于劣势, 从而获得了较小输出.

## 4. 结 论

同轴虚阴极实验结果表明, 由阳极反射板、阳极网和阴极发射的电子束形成的虚阴极围成的准谐振腔对同轴虚阴极输出微波功率和传输模式起到了非常关键的作用. 并在二极管电压 350kV, 电流 23kA 的条件下, 获得了峰值功率 500MW, 脉宽约 40ns 的

微波输出, 能量转换效率约 6.2%, 频率约 3.3GHz.

理论分析表明, 在带阳极反射板结构的同轴虚阴极中, 阳极反射板、阳极网和虚阴极形成了一个准谐振腔. 在电子束和激励出的微波相互作用过程中,  $TE_{11}$  模式和  $TM_{01}$  模式在该准谐振腔内产生模式竞争, 在竞争中处于优势的  $TM_{01}$  模式获得了较大的输出, 在竞争中处于劣势的  $TE_{11}$  模式获得了较小的输出.

值得一提的是, 输出微波中  $TE_{11}$  模式的贡献虽然只占 1/4—1/3 左右, 但对输出微波方向图由两瓣变成一瓣起到了关键作用, 这在实际应用中有着非常重要的意义.

- 
- [ 1 ] Jiang W H , Woolvorton K , Dickens J *et al* 1999 *IEEE Trans Plasma . Sci.* **27** 1538
- [ 2 ] Jiang W H , Dickens J , Kristiansen M 1999 *IEEE Trans . Plasma . Sci.* **27** 1543
- [ 3 ] Jiang W H , Kristiansen M 2001 *Physics of Plasma* **8** 3781
- [ 4 ] Cheng X P , Dickens J , Choi E H *et al* 2003 *Proc. of the 2003 IEEE Inter Pulse Power Conf.* 1165
- [ 5 ] Yang Z F , Shao H , Liu G Z 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1217 ( in Chinese ) [ 杨占峰、邵 浩、刘国治 2003 强激光与粒子束 **12** 1217 ]
- [ 6 ] Shao H , Liu G Z , FAN R Y 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 616 ( in Chinese ) [ 邵 浩、刘国治、范如玉 1998 强激光与粒子束 **10** 616 ]
- [ 7 ] Shao H , Liu G Z 2001 *Acta Phys . Sin* **50** 2387 ( in Chinese ) [ 邵浩、刘国治 2001 物理学报 **50** 2387 ]
- [ 8 ] Benford J , Price D , Sze H *et al* 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 2098
- [ 9 ] Benford J , Swegle J 1991 *High-Power Microwaves* ( Artech House , Boston London ) pp307—338
- [ 10 ] Ye W M , Li C L 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 268 ( in Chinese ) [ 叶卫民、李传胪 1998 强激光与粒子束 **10** 268 ]
- [ 11 ] Yu G F , Wang W X , Liu S G *et al* 1996 *Journal of UESTC of China* **25** 81 ( in Chinese ) [ 余国芬、王文祥、刘盛纲等 1996 电子科技大学学报 **25** 81 ]
- [ 12 ] Harrington R F 1961 *Time-Harmonic Electromagnetic Fields* ( McGraw-Hill Book Co. ) pp230—233

# Resonance effect on a coaxial vircator<sup>\*</sup>

Luo Xiong<sup>1,2)</sup> Liao Cheng<sup>1)</sup> Meng Fan-Bao<sup>2)</sup> Zhang Yun-Jian<sup>2)</sup>

1) *Institute of Electromagnetic and Microwave Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*

2) *Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

( Received 8 December 2005 ; revised manuscript received 30 December 2005 )

## Abstract

Some experiments at Institute of Applied Electronics of CAEP showed that the interaction between the virtual cathode oscillator and the cavity is a key factor in determining the output microwave power and propagating modes. Particularly, we observed that the E-beam plays an important role in the cavity formation. The experiments have been carried out with 350 kV diode voltage and 23 kA diode current, where pulsed microwaves of 500 MW in peak power and 3.3 GHz in frequency have been obtained. The energy conversion efficiency from the electron beam to microwave is about 6.2%, and the output microwave modes are mainly the  $TM_{01}$  mode and  $TE_{11}$  mode. The cavity resonance effect on a coaxial virtual cathode oscillator has been investigated in detail.

**Keywords** : high power microwave, coaxial vircator, resonance cavity, mode competition

**PACC** : 2900, 4100

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 863-807-2-1 ).