

低功率驱动的高功率微波放大器实验研究*

吴洋^{1)2)†} 许州²⁾ 徐勇²⁾ 金晓²⁾ 常安碧²⁾ 李正红²⁾
黄华²⁾ 刘忠²⁾ 罗雄²⁾ 马乔生²⁾ 唐传祥¹⁾

1) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2009年12月24日收到; 2010年5月26日收到修改稿)

在器件设计上, 针对低功率驱动的高功率微波放大器或高增益放大器中的高次模激励和自激振荡问题, 采取了降低电子束同器件前端结构耦合等措施, 来保证器件在工作区间完全处于放大状态, 通过 PIC 模拟, 设计了低功率驱动的 S 波段高功率微波放大器(电子束: 流强 7.5 kA, 电子能量 750 kV), 注入微波 6.8 kW 时, 模拟微波输出功率 1.7 GW, 增益 53.9 dB. 在 Sinus 加速器平台上开展了相应的实验研究: 注入微波 62 kW 时, 微波输出功率达到 2.04 GW (电子束: 流强 8 kA, 电子能量 800 kV), 输出频率同注入微波一致, 增益 45.1 dB, 效率为 32%; 而当注入微波降低到 39 kW, 增益达到最大(46.7 dB), 相应的微波输出为 1.84 GW. 因此论文从实验和模拟两个方面, 验证了 kW 级注入微波驱动的高功率微波放大器的可行性.

关键词: 高功率微波, 微波器件, 高增益, 模式控制

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Bq, 52.59.Ye

1. 引言

由于受微波器件物理、工艺和脉冲功率技术等限制, 单个微波器件的微波输出功率受到理论限制(~ 10 GW), 要发展超过这个限制的 HPM 发生器, 可行的技术路线就是功率合成, 而能有效实现功率合成的微波器件就是放大器^[1,2]. 随着 HPM 技术的发展, 放大器类的 HPM 器件变得越来越重要, 一般的 HPM 放大器, 为实现对注入微波的放大, 需要很高的微波注入^[3,4], 而大功率的微波馈入, 一方面容易造成波导打火, 另一方面也增加了种子源成本和体积, 不利于器件向紧凑化方向发展. 发展低功率驱动或高增益微波放大器的需求变得越来越强烈. 速调管放大器(KA)作为一种成熟的微波放大器, 其结构简单, 物理过程清楚, 常规速调管的增益通常为 60 dB. 然而驱动 HPM 器件的电子束流强通常为数 kA 到数十 kA, 在这类器件中高次模的自激振荡严重破坏工作模式的束波相互作用过程, 造成微波脉冲缩短, 这也是发展低功率驱动或高增益的

相对论微波器件的主要限制^[5,6]. 由于高次模激发的影响, 通常的相对论速调管的增益约为 30 dB, 而且要求较高的注入微波驱动^[7], 在这里: 1) 根据高次模激发的正反馈物理过程, 采取了适当措施有效控制高次模激发, 提高其阈值电流以致大于工作电流, 使微波器件在适当的低功率驱动或高增益条件下工作, 避免高次模影响, 进而降低注入微波功率和降低注入微波源的成本和体积. 2) 采用了高相互作用、低换能的调制腔, 使低功率的注入微波能驱动强流相对论电子束, 最后在实验和模拟上实现了 kW 级注入微波驱动的 S 波段相对论速调管, 模拟和实验微波功率输出达到 ~ 2 GW 级.

2. 实验系统

实验系统框图如图 1 所示. 电子束源由 Sinus 加速器驱动, 电子束从阴极发射后, 在引导磁场约束下, 经过输入腔间隙驻波场的调制后, 在随后的漂移管中发生群聚, 束流在输出腔入口调制达到最大, 并在输出腔中实现换能, 输出微波经过 TEM-

* 国家自然科学基金(批准号: 10347099)和国家高技术研究发展计划(批准号: 863-803-403)资助的课题.

† E-mail: wuyang851219@gmail.com

TM₀₁-TE₁₁模式变换器后,通过末端的输出天线(圆锥喇叭)向空间辐射(如图2),微波辐射模式为TE₁₁.在实验中,采用BJ-32开口波导喇叭作为接收天线对微波进行测量,输出微波功率通过天线增益计算获得(由于微波输出频率稳定、输出模式很纯,根据天线增益得到的微波输出功率同空间积分法得到的微波输出功率一致),微波输入输出频率是通过射频频谱的快速傅里叶变换(FFT)处理获得.

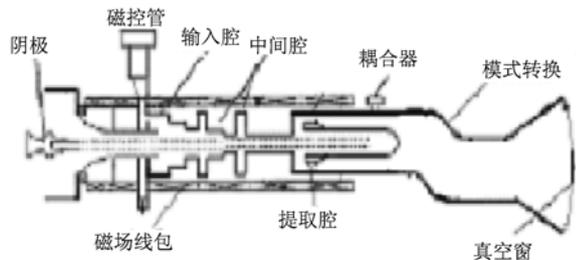


图1 实验系统框图

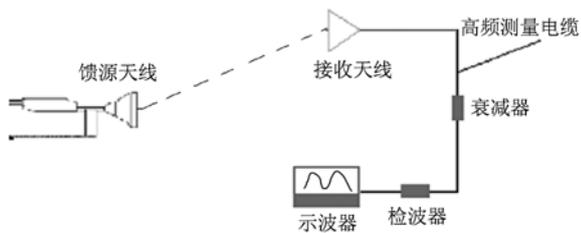


图2 微波测量安排图

3. 物理模型

3.1. 器件结构

在调制腔和输出腔之间增加中间腔可以有效降低注入微波功率,实现高增益放大^[8].在图3结构中,当注入微波的功率为 $P_{in} = 6.83 \text{ kW}$ 时,电子束调制深度在第一个中间腔为 $\sim 1.1\%$,在第二个中间腔为 10% ,电子束在这个中间腔激发的微波间隙作用为 90 kV ,电子束调制深度在输出腔处达到最大,并产生需要的高功率微波.图3结构的腔体参数见表1.图3结构中采用了高相互作用、低换能的调制腔,这种调制腔同普通RKA^[4]采用的同轴结构调制腔的区别是:1)腔体微波场主要集中在作用间隙,2)电子渡越角通过腔后面一个小台阶来调节,实现

高相互作用、低换能,同时保持一个相对稳定的谐振频率.

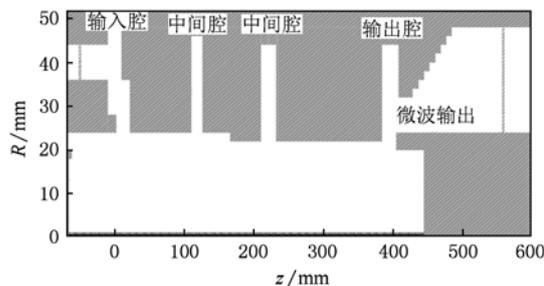


图3 高增益的速调管结构图

表1 图3结构的腔体参数

	输入腔	中间腔 I	中间腔 II	输出腔
谐振频率 f/GHz	2.9455	3.0546	2.8546	2.7819
有载 Q_L	40.0	∞^*	∞^*	38.2

* 由于中间腔 I, II 两端对于微波是截止的,当不考虑微波的腔壁损耗时,微波腔的 Q 值是 ∞ .

采用图3结构进行PIC模拟,模拟条件为:馈入功率 6.83 kW ,频率 2.850 GHz ,模拟微波输出 1.7 GW (电子束: $750 \text{ kV}, 7.5 \text{ kA}$),增益为 53.9 dB .图4为模拟得到的输出微波包络,图5为输出微波频谱,频率 2.850 GHz ,同注入频率一致.

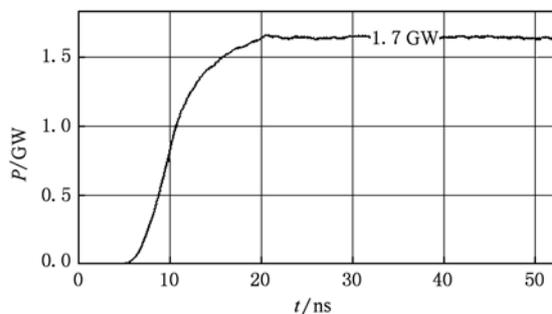


图4 模拟得到的输出微波包络

3.2. 高次模抑制

理论上,在调制腔和输出腔之间增加中间腔可以进一步降低注入微波功率,提高放大增益.然而随着中间腔的增加,在器件中很容易激发高次模,这些高次模会严重干扰器件工作模式的束波相互作用,造成微波脉冲缩短.而且这些高次模的起振阈值电流与中间腔的个数成反比,中间腔越多,越容易激发高次模.因此高次模抑制是高增益速调管结构中的重要问题,对高功率微波器件尤其严重,这

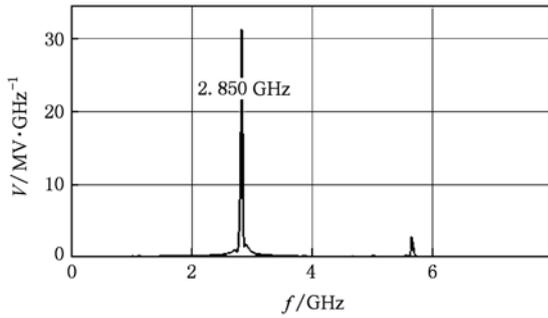


图5 输出微波频谱

类器件的电子束流强很高,甚至达到数十 kA. 高次模激发是一种自激振荡,电子束在下游位置同微波腔作用,产生微波场,该微波场要反馈到上游位置的微波腔中形成一个正反馈回路(如图6),在这个腔中形成电子束的调制^[9]. 在图3这种结构中,1) 保证微波输出功率,2) 通过调节输出腔 Q 值,可以降低输出腔中微波场,控制电子回流,3) 改变电子束同调制腔和第一个中间腔的作用距离,降低电子束同结构前端的耦合,极大提高这种自激振荡的起振电流阈值,使其远远高于工作电流. 图3结构的高次模起振阈值电流为 12 kA,高于器件工作流强 7.5 kA.

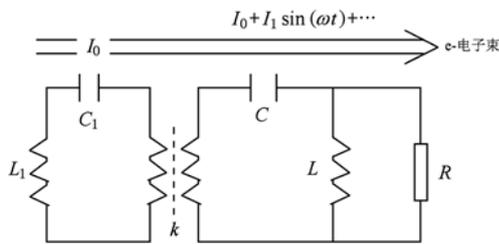


图6 高次模自激振荡的正反馈电路模型

图7 结构就是未采取高次模抑制措施的速调管结构,高次模的起振阈值电流为 5 kA,图8 时流强在 7 kA 条件下高次模在该微波器件结构中的分布图,图9 高次模干扰下电子束调制深度在结构中随传输距离的变化曲线,图10 高次模干扰下微波输出随时间的变化曲线,由于高次模中间腔作用间隙会感应相应的微波场,该微波场会严重干扰电子束的正常调制和群聚(如图9),最后造成微波脉冲缩短(图10). 图11 为高次模干扰下中间腔中微波场的频率分析图,由图可以看出,在中间腔中除了注入微波的频率 2.850 GHz,还有高次模的微波频率

(4.3 和 4.4 GHz),漂移段对这两个高次模的微波都不截止.

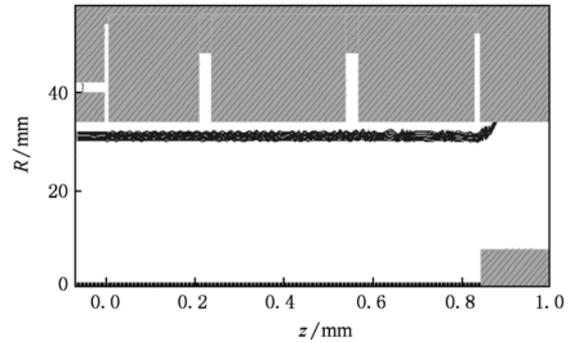


图7 未采取高次模抑制措施的速调管结构图

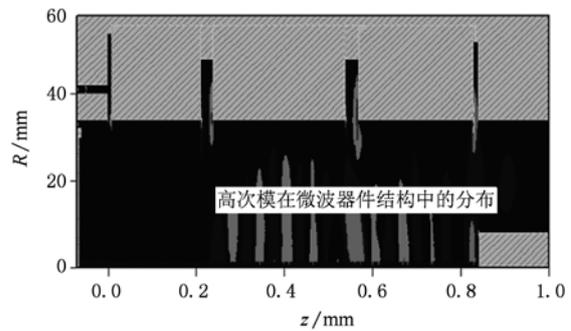


图8 高次模在微波器件结构中的分布图(流强7kA)

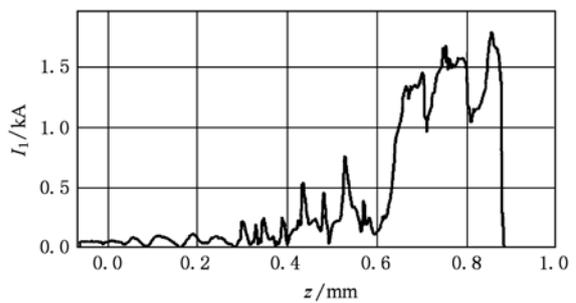


图9 高次模干扰下电子束调制深度在结构中随传输距离的变化曲线

4. 实验结果分析

4.1. 最优形成线电压

实验中,增大 Sinus 加速器的形成线电压,电子束束压升高的同时,电子束流强也要增大. 一方

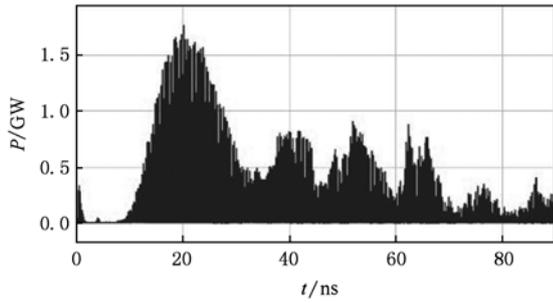


图 10 高次模干扰下微波输出随时间的变化曲线

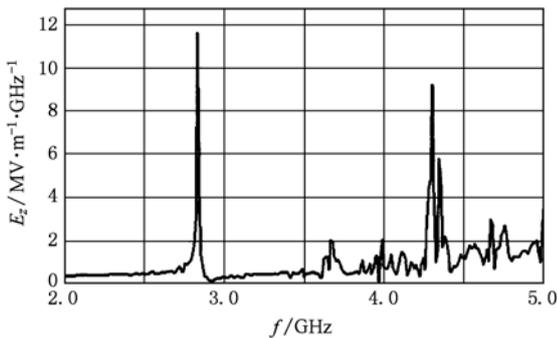


图 11 高次模干扰下中间腔中微波场的频率分析图

面,电子束束压越高,刚度越高,基波调制电流越弱;另一方面,电子束流强越高,输出微波功率越高.因此在固定注入微波功率条件下,存在最优的形成线电压使得输出功率达到最高(如图 12);图 12 是注入微波 50 kW 时,不同形成线电压下的输出微波功率,在形成线电压 0.98 MV 时(形成线电压 $V_0 = 0.98 \text{ MV}$ 对应的电子束参数为:680 kV,8.4 kA),输出功率有最大值 1.42 GW. 图 13 是不同注入微波功率下对应的最优形成线电压曲线,由图可以看出,最优形成线电压随着注入微波功率提高而升高.

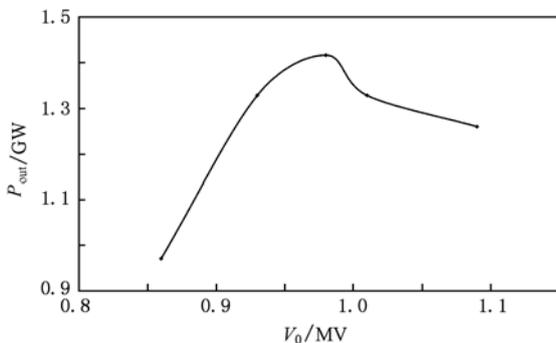


图 12 不同形成线电压的微波输出功率 ($P_{in} = 50 \text{ kW}$)

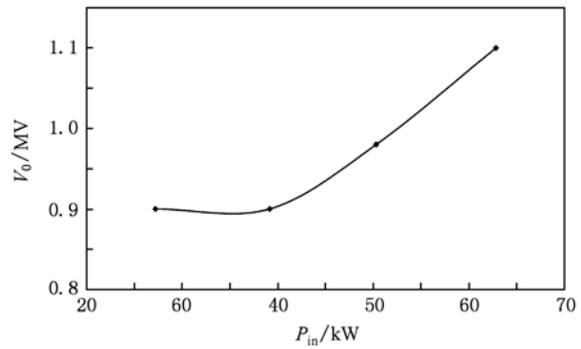


图 13 不同注入微波功率下的最优形成线电压

模拟中馈入微波功率 1 kW 即可有效驱动 RKA 工作,而在实验中的馈入微波功率比模拟时高.一方面,2D PIC 模拟没有考虑输入腔的腔壁损耗;另一方面,电子束电压大于模拟条件,导致电子束的刚度与模拟条件不同;同时实验中输入腔是 3D 结构,馈入微波中只有一部分转化为 2D PIC 模拟中要求的 TM_{01} 模,因此,实验要求的馈入微波功率较之模拟要高.

4.2. 二极管阻抗同注入微波功率之间的匹配

实验中,电子束束压越高,刚度越高,要求的微波注入功率越高;电子束流强越高,输出微波功率越高;因此在给定形成线电压,存在二极管阻抗同注入微波功率之间的匹配.实验中,在形成线电压 1.05 MV,电子束阻抗 100Ω ,注入微波功率 62 kW,频率 2.865 GHz 的条件下,改变输出腔前漂移段长度,可以得到输出微波功率与漂移长度的关系(如图 14),典型微波输出波形如图 15. 图 14 为不同漂移长度下器件的输出功率曲线,由图可以看出最佳的漂移长度为 15 cm,输出功率 2.04 GW,增益 45.1 dB. 表 2 为不同注入

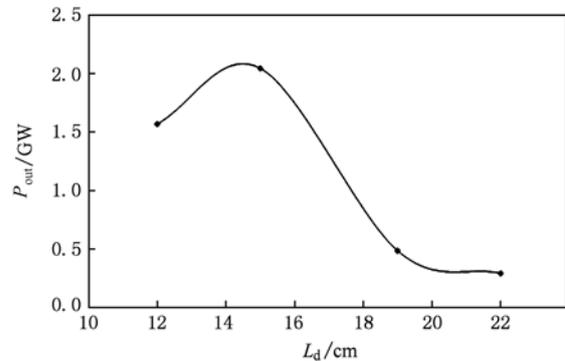


图 14 二极管阻抗匹配时器件的输出功率随漂移长度的变化

微波功率下的输出微波,当注入微波功率降低到 39kW,增益最大(46.7 dB),相应的输出功率为 1.84 GW.

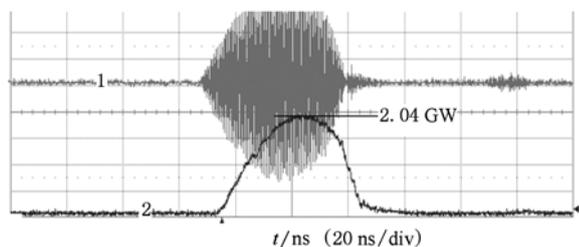


图 15 二极管阻抗优化后的输出波形(1 射频;2 检波)

表 2 不同注入微波下的输出微波参数

形成线 电压 V_0 /MV	V/kV	I/kA	P_{in} /kW	P_{out} /GW	增益/dB	效率/%
1.05	800	8.0	62	2.04	45.1	32
1.00	760	6.9	53	1.88	45.5	36
0.98	750	6.9	39	1.84	46.7	36
0.90	685	4.6	32	0.71	43.3	23
0.86	655	3.7	27	0.52	42.8	22

实验中,在形成线电压、注入微波功率和频率不变的条件下,提高束流,即改变二极管阻抗为 80 Ω ,同样改变输出腔前漂移段长度,可以得到输出微波功率与漂移长度的关系(如图 16),图 16 为二极管阻抗为 80 Ω 时,不同漂移长度下器件的输出功率曲线,从图 16 可以看出,在二极管阻抗 80 Ω 条件下,最佳的漂移长度为 12 cm,输出功率 836 MW;比较图 14 和图 16,可以看出,二极管阻抗为 80 Ω 时,微波输出功率显著降低,说明了二极管阻抗同注入

微波功率之间存在匹配.

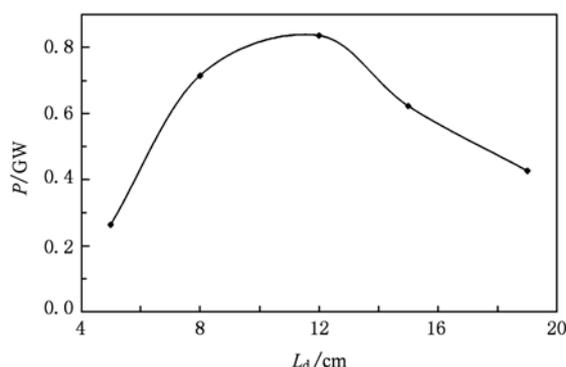


图 16 二极管阻抗不匹配时器件的输出功率随漂移长度的变化

5. 结 论

实验中,输出微波包络平坦,未观测到明显的脉冲缩短现象,尽管输出微波频率与输入微波频率之间有差别,但是变化一致,说明高增益器件中最关心的自激振荡问题被抑制,实验上研究了加速器形成线电压、二极管阻抗以及漂移长度对输出微波功率的影响,注入微波 62 kW,二极管阻抗为 100 Ω 状态下,最高微波输出为 2.04 GW,增益 45.1 dB,效率 32%;当注入微波降低到 39 kW 时,增益达到最大,即 46.7 dB,相应的微波输出为 1.84 GW. 尽管 46.7 dB 相对于常规的放大器并不高,但是 kW 级的注入微波驱动数 kA 的强流相对论电子束,在实验上实现 GW 级的微波输出,使高功率微波的功率合成更容易实现.

[1] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High - Power Microwave Sources and Technologies* (New York: IEEE) Chap 3

[2] Benford J, Swegle J 1992 *High Power Microwave* Second Edition (New York, London: Taylor & Francis Group)

[3] Huang H, Meng F B, Chang A B, Ma Q S, Zhang Y H, Gan Y Q, Chen D B, Luo M, Gong S G 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1291 (in Chinese) [黄 华、孟凡宝、常安碧、马乔生、张永辉、甘延清、陈代兵、罗 敏、龚胜刚 2004 强激光与粒子束 **16** 1291]

[4] Huang H, Fan Z K, Tan J, Ma Q S, Gan Y Q, Chang A B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄 华、范植开、谭杰、马乔生、甘延青、常安碧 2004 物理学报 **53** 1129]

[5] Agee F J 1998 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **26** 235

[6] Friedman M, Fernsler R, Slinker S, Hubbard R, Lampe M 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1214

[7] Lau Y Y, Friedman M, Krall J 1990 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **18** 553

[8] Li Z H, Huang H, Chang A B, Meng F B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1564 (in Chinese) [李正红、黄 华、常安碧、孟凡宝 2005 物理学报 **54** 1564]

[9] Li Z H, Chang A B, Ju B Q, Zhang Y H, Xiang F, Zhao D L, Gan Y Q, Liu Z, Su C, Huang H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2603 (in Chinese) [李正红、常安碧、鞠炳全、张永辉、向 飞、赵殿林、甘延青、刘 忠、苏 昶、黄 华 2007 物理学报 **56** 2603]

Experimental study on a high power microwave amplifier driven by low rf power*

Wu Yang^{1)2)†} Xu Zhou²⁾ Xu Yong²⁾ Jin Xiao²⁾ Chang An-Bi²⁾ Li Zheng-Hong²⁾ Huang Hua²⁾
Liu Zhong²⁾ Luo Xiong²⁾ Ma Qiao-Sheng²⁾ Tang Chuan-Xiang¹⁾

1) (*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

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

(Received 24 December 2009; revised manuscript received 26 May 2010)

Abstract

In order to suppress high order mode self-oscillation in a high gain amplifier, some special procedures, such as decreasing the coupling between beam and rf field in the forepart of the amplifier, are taken such that the tube works in a fully amplified state in an operation range. In simulation, the rf output power is 1.7 GW with a beam of 7.5 kA at 750 kV when input power is 6.8 kW and the corresponding gain is 53.9dB. Based on the results from 2D PIC simulation, the experiment is performed on the Sinus accelerator. In experiment, the amplifier is driven by a beam of 8 kA at 800 kV, and the maximum output power is 2.04 GW when input power is 62 kW; the maximum gain reaches 46.7dB when the input reduces to 39 kW, the corresponding output power is about 1.84 GW. Both the simulation and the experiment prove that a kW-level rf power can drive the tube to generate a GW-level output power.

Keywords: high power microwave, microwave device, high gain, mode control

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Bq, 52.59.Ye

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10347099) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 863-803-403).

† E-mail: wuyang851219@gmail.com