

# X 波段重频过模返波振荡器实验研究

吴洋<sup>1)2)†</sup> 金晓<sup>2)</sup> 马乔生<sup>2)</sup> 李正红<sup>2)</sup> 鞠炳全<sup>2)</sup> 苏昶<sup>2)</sup> 许州<sup>2)</sup> 唐传祥<sup>1)</sup>

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)

(2010年3月16日收到; 2011年1月19日收到修改稿)

根据两腔振荡器和返波管的特点研制了过模结构返波振荡器, 该器件主要由调制腔和换能腔(慢波结构)两部分组成. 调制腔既是电子束的预调制腔, 也是微波谐振反射腔, 它同换能腔形成一个过模微波谐振腔, 经调制腔调制后的电子束在换能腔中实现束波能量转换. 根据加速器的电子束参数(束压为 1 MV, 束流为 20 kA)设计了一个 X 波段的高功率微波器件, 2.5 维粒子模拟程序模拟得到微波频率为 8.25 GHz, 输出功率为 5.70 GW. 用超导磁体作为引导磁场, 单次运行输出微波功率为 5.20 GW, 微波频率为  $(8.25 \pm 0.01)$  GHz; 脉冲重复频率 30 Hz 运行时, 输出微波功率为 5.06 GW, 脉冲宽度为 13.8 ns.

**关键词:** 两腔振荡器, 返波振荡器, 多波切连科夫发生器

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

## 1. 引言

电子束产生受激辐射可分为切连科夫辐射、韧致辐射和渡越辐射三类. 利用切连科夫辐射的器件有磁控管、返波振荡器(BWO)<sup>[1]</sup>、行波管<sup>[2]</sup>等; 利用韧致辐射的器件有回旋管和虚阴极振荡器<sup>[3]</sup>等; 利用渡越辐射的器件有速调管<sup>[4]</sup>和渡越振荡器<sup>[5]</sup>等. 其中 BWO 器件在 X 波段高功率微波研究中最具有代表性, 早在 20 世纪 70 年代, 相对论返波振荡器(RBWO)就成为最早的由强流相对论电子束驱动的微波器件<sup>[6-8]</sup>. 传统的 RBWO 依靠低于工作频率的截止颈对电磁波进行反射, 形成工作模式起振的正反馈通路, 从而实现器件的单模工作. 但由于其尺寸较小, 受慢波叶片表面射频击穿以及强流相对论电子束的空间电荷限制流的影响, RBWO 在重复频率、高功率和长脉冲条件下运行面临很多问题. 增大器件相互作用区的尺寸, 采用过模结构的 RBWO 被视为有效提高器件功率容量、抑制脉冲缩短的较理想的发展方向<sup>[9-12]</sup>. 相互作用区半径的增加可以有效降低慢波叶片表面的电场强度, 同时由于器件尺寸的增大, 可以传输的相对论电子束流强增高, 更有利于充

分利用加速器提供的功率, 实现高功率、高效率的微波辐射. 发展此类器件的核心是模式控制和抑制模式竞争, 保证器件在单模状态下工作<sup>[13]</sup>.

基于加速器的电子束参数(束压为 1 MV, 束流为 20 kA)采用过模结构的 RBWO 进行微波器件设计, 在结构上分为反射腔、漂移段和周期结构能量提取段. 谐振反射腔是过模器件模式选择的核心, 通过调整其结构参数使其对工作频率的电磁波反射系数较高而对其他频率的电磁波反射系数较低, 提高工作模式的  $Q$  值. 另一方面, 反射腔内建立的微波场能对束流进行预调制, 降低工作模式的起振电流. 通过能量提取段改变微波腔中微波场分布, 使结构利于器件在高效率和极高功率条件下稳定工作, 实现对非工作模式的抑制和提高束波转换效率. 2.5 维全电磁粒子模拟程序模拟得到微波频率为 8.25 GHz, 微波输出功率为 5.70 GW; 实验上得到输出的微波频率为  $(8.25 \pm 0.01)$  GHz, 微波功率为 5.20 GW.

## 2. 器件的束波能量转换效率分析和粒子模拟

过模结构 RBWO 结构<sup>[14]</sup>如图 1 所示, 其工作

† E-mail: wuyang851219@gmail.com

模式为横磁波(TM)模. 图2为过模结构RBWO作用区场分布, 图中实线为模拟结果, 虚线为近似场分布. 作用区近似场分布可以表示为

$$E_z(z) \approx \begin{cases} E_1 & (0 < z < d_1), \\ 0 & (d_1 < z < d_1 + L), \\ -E_2 \sin(kz) & (d_1 + L < z < d_1 + L + d_2). \end{cases} \quad (1)$$

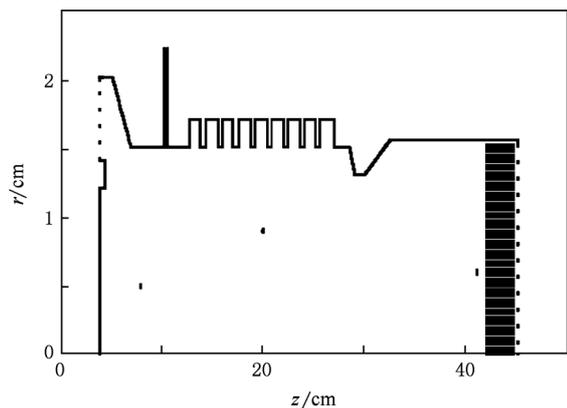


图1 过模结构RBWO模拟结构示意图

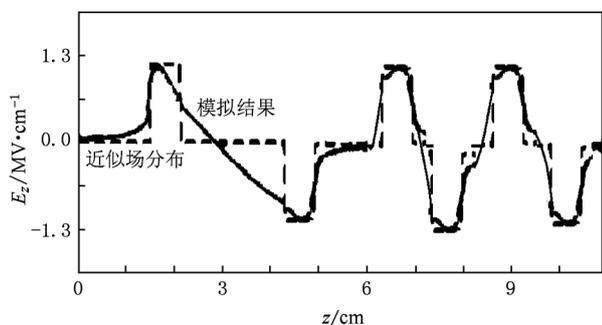


图2 过模结构RBWO作用区电场分布

只考虑工作模式, 微波腔中电子的一维运动方程为

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{e}{m_0 c^2} \alpha_0 E_z(z) \sin(\varphi + \beta) + \frac{e}{m_0 c^2} E_z^{\text{sc}}, \quad (2a)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (2b)$$

式中  $\alpha_0$  为微波场幅度,  $\alpha_0 E_z(z)$  为实际微波场电场,  $E_z^{\text{sc}}$  为空间电荷场的轴向分量,  $m_0$  为电子静止

质量,  $c$  为真空光速,  $\gamma$  为电子相对论速度因子,  $\lambda$  为微波波长,  $\varphi = \omega t$ . 方程(2)的初始条件( $z = 0$ )为

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2},$$

$$\varphi = \varphi_0.$$

这里  $v_0$  为电子进入微波腔时的速度,  $\varphi_0 = \omega t_0$  为电子注入相位.

微波腔中第  $n$  个电子束段中电子在  $t$  时刻的运动状态为  $(\gamma_n, \varphi_n)$ , 忽略空间电荷场的作用时, 方程(2)的一级近似解为

$$\varphi \approx \varphi_0 + k' V_1 L \sin(\varphi_0 + \beta) + \varphi_s,$$

$$\gamma \approx \gamma_0 + V_1 \sin(\varphi_0) - V_2 \sin(\varphi_0 + k' V_1 L \sin(\varphi_0) + \varphi_s).$$

这里

$$V_1 = \frac{e \alpha_0 E_1 d_1}{m_0 c^2};$$

$$V_2 = \alpha_0 E_2 I R,$$

其中  $I$  为电子束流强,  $R$  为换能腔的束波相互作用阻抗;

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)^3}};$$

$\varphi_s$  为电子在漂移段内的平均渡越相位,

$$\varphi_s \approx \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\gamma_0}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)}}.$$

在相对论微波器件中, 电子进入微波腔时的速度接近光速, 忽略初始速度分散度影响<sup>[15]</sup>, 将初始电子束近似为单能束, 由此可得当微波场幅度为  $\alpha_0$  时, 电子束中电子相对论因子的平均变化为

$$\overline{\Delta\gamma} = \gamma_0 - \bar{\gamma}$$

$$= -V_2 J_1(k' V_1 L) \cos(\varphi_s). \quad (3)$$

根据能量守恒定律, 可得束波转换效率为

$$\eta = \frac{\overline{\Delta\gamma}}{\gamma_0 - 1}. \quad (4)$$

束波相互作用饱和时,  $V_1 + V_2 \approx \gamma_0 - 1$ , 同时在微波腔的设计中可以使得  $\cos(\varphi_s) = 1$ , 则由(3)和(4)式可得

$$\eta = \frac{V_2 J_1(\alpha)}{V_1 + V_2}, \quad (5)$$

式中  $\alpha \approx k' V_1 L$  为与微波腔场强有关的微波腔作用因子. 由(5)式可知, 当  $\alpha \approx 1.5$  时, 束波转换效率  $\eta$

达到一个理想值,则相互作用饱和状态下的理想束波转换效率为

$$\eta = 0.588 \frac{V_2}{V_1 + V_2}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,束波转换效率在 0.294—0.588 之间. 当  $V_2 \gg V_1$  时,束波转换效率达到最大,其值为 0.588;而当  $V_2 = V_1$  时,束波转换效率为最小,其值为 0.294.

基于以上的理论分析,根据电子束参数(束压为 1 MV,束流为 20 kA)设计了一个 X 波段过模结构的 RBWO. 图 3 所示为采用 KARAT 程序的模拟结果. 图 4 所示为微波输出功率  $P_{out}$  随磁感应强度  $B$  的变化.

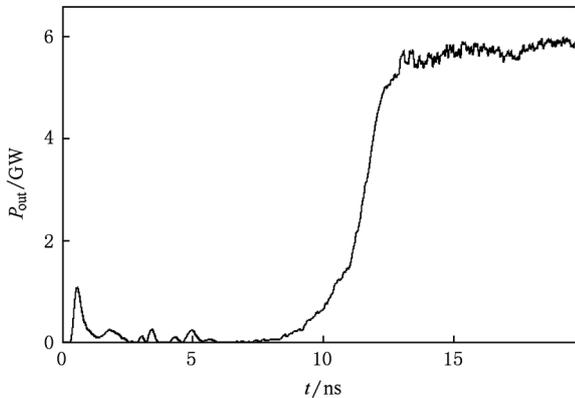


图 3 输出微波功率  $P_{out}$  随时间  $t$  的变化

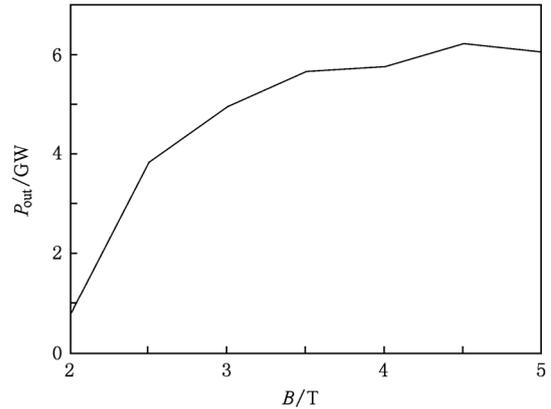


图 4 微波输出功率  $P_{out}$  随磁感应强度  $B$  的变化

### 3. 实验测量方法

实验测量系统如图 5 所示,器件由 20 GW Tesla 型加速器驱动,电子束从阴极发射后在引导磁场约束下通过微波器件产生高功率微波,然后通过辐射喇叭向空间辐射. 输出微波模式为  $TM_{01}$ ,通过末端的输出天线(圆锥形喇叭)向空间辐射. 在实验中,微波测量采用 BJ-100 型开口波导喇叭作为接收天线,输出微波功率通过空间功率密度积分的方法测量. 接收天线在与器件辐射喇叭相心距离为  $R$  的圆周( $R=7$  m)上移动,沿圆周不同角度测得  $N$  个结果,由此根据辐射功率的积分公式得到微波辐射的总功率. 计算辐射功率的公式为

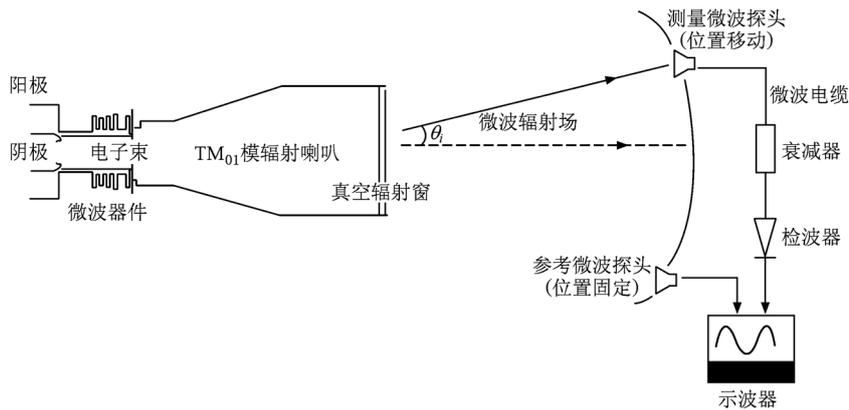


图 5 微波功率测量系统示意图

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{N-1} (p_i + p_{i+1}) \pi R^2 (\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1}) \times 10^{A_i/10} / A_e, \quad (7)$$

式中  $\theta_i$  为接收喇叭与辐射喇叭轴线的夹角,  $p_i$  为接

收天线在第  $i$  个位置的微波检波器给出的微波信号功率,  $A_e$  为接收天线的有效接收面积,  $A_i$  为接收天线与检波器之间的衰减. 图 6 为实验装置照片. 图 7 为微波器件的实物照片.



图6 实验装置照片



图7 微波器件实物照片

#### 4. 实验结果及分析

图8为辐射天线计算模型. 图9为辐射天线计算方向图(只计算了一边), 图10为实验上通过冷测得到辐射天线微波模式为 $TM_{01}$ 时的方向图. 通过对比可知, 计算和冷测的两个方向图一致.

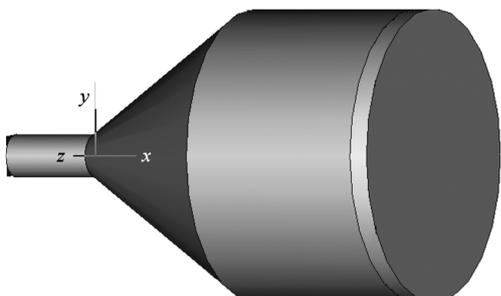


图8 辐射天线计算模型

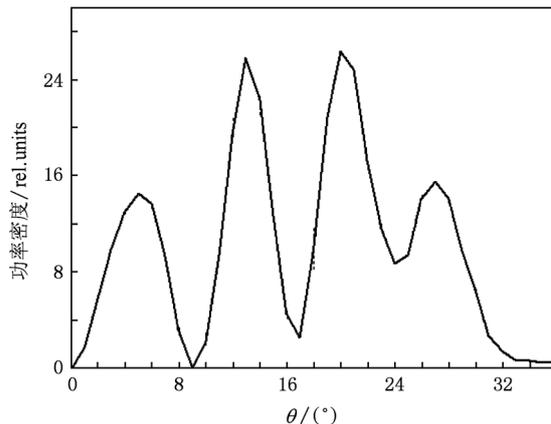


图9 辐射天线计算方向图

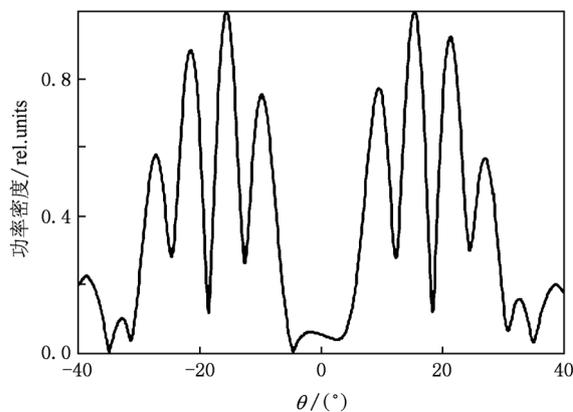


图10 辐射天线冷测方向图

实验中, 在参考点测得的输出微波信号固定(240 mV)的条件下, 在距辐射喇叭相心7 m的圆周上移动开口波导接收天线, 测出辐射微波分布, 测试结果如图11所示. 结合(7)式可得, 参考点微波信号为240 mV时, 微波辐射功率为5.2 GW.

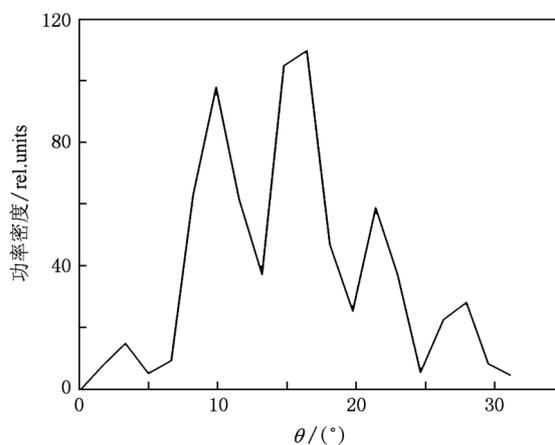


图11 实验测得的典型方向图

图 12 为参考点测得的束流、束压和检波波形, 图 13 示出了基频为 8.0 GHz 时的差频信号波形, 由此可知输出微波频率为  $(8.25 \pm 0.01)$  GHz.

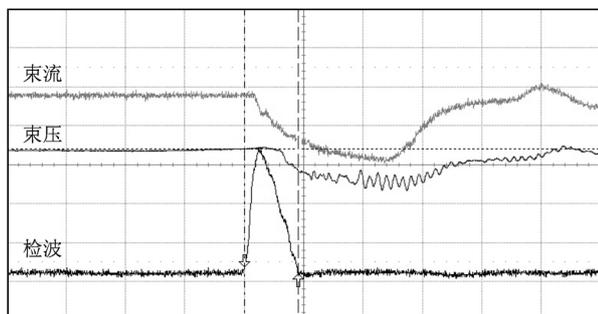


图 12 单次典型微波辐射波形

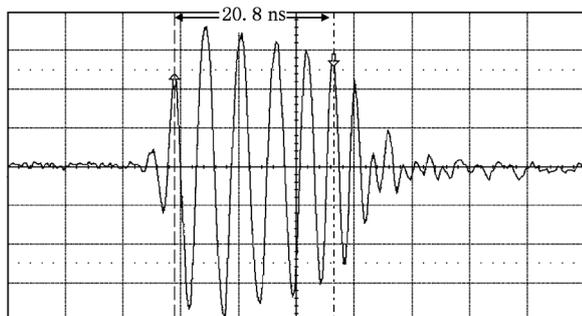


图 13 差频信号波形 基频为 8.0 GHz

图 14 为实验得到的重复频率为 30 Hz 的微波辐射波形序列, 图 15 为微波辐射的叠加波形. 由图 15 可以看出, 器件能稳定工作在重复频率为 30 Hz 条件下, 输出微波信号为 230 mV, 脉冲宽度为 13.8 ns, 微波辐射功率为 5.06 GW.

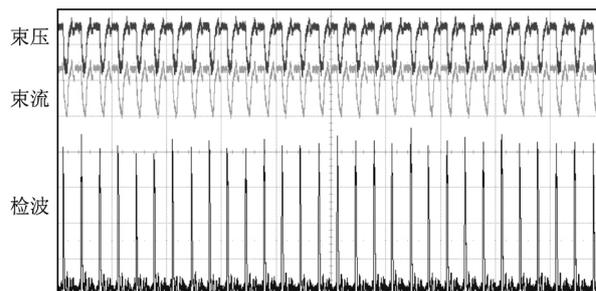


图 14 重复频率为 30 Hz 的微波辐射波形序列

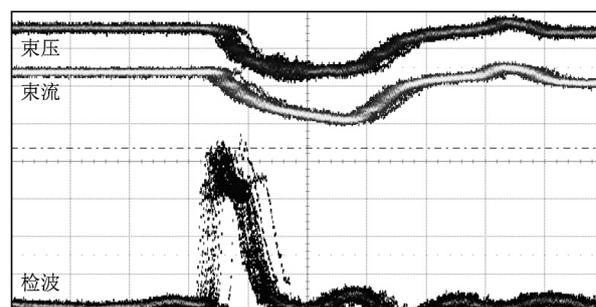


图 15 重复频率为 30 Hz 的微波辐射的叠加波形

## 5. 结 论

本文用群聚的方法研究了高功率微波器件, 克服了常规色散方法中不能反映大信号的不足. 同时由于器件中的电子束是环形电子束并紧贴管壁运动, 束波相互作用长度小于电子束空间电荷波波长, 因而可以忽略空间电荷效应. 尽管此方法并不完整, 但是反映了高功率微波器件中大信号情况下的部分物理过程, 此方法对模拟和实验有很好的指导作用. 在实验中, 微波器件的输出功率为 5.20 GW, 频率为  $(8.25 \pm 0.01)$  GHz, 接近模拟结果.

- [1] Li Z H, Meng F B, Chang A B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3578 (in Chinese) [李正红、孟凡宝、常安碧 2005 物理学报 **54** 3578]
- [2] Shiffler D, Nation J A 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 106
- [3] Freund H P 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 748
- [4] Li Z H, Hu K S, Zhang H 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **13** 99 (in Chinese) [李正红、胡克松、张红 2002 强激光与粒子束 **13** 99]
- [5] 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]
- [6] Nation J A 1970 *Appl. Phys. Lett.* **17** 491
- [7] Kovalev N F, Petelin M I, Raiser M D, Smorgonsky A V, Tsopp L E 1973 *Lett. J. Techn. Phys.* **18** 232
- [8] Carmel Y J, Ivers J, Kribel R E, Nation J A 1974 *Phys. Rev. Lett.* **33** 1278
- [9] Agee F J 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 235
- [10] Buagaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, Klimov A I, Openkin A D, Koshelev V I 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 525
- [11] Buagaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, Popov V A, Vlasov A N 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 518

- [12] Vlasov A N, Shkvarunets A G, Rodgers J C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 550  
[13] Li Z H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 541  
[14] Chen X, Lindsay P A, Zhang J 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 462  
[15] Barroso J J 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 652

## Experimental study on X-band repetitively oversized backward wave oscillator

Wu Yang<sup>1)2)†</sup> Jin Xiao<sup>2)</sup> Ma Qiao-Sheng<sup>2)</sup> Li Zheng-Hong<sup>2)</sup> Ju Bing-Quan<sup>2)</sup>  
Su Chang<sup>2)</sup> Xu Zhou<sup>2)</sup> Tang Chuan-Xiang<sup>1)</sup>

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

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

(Received 16 March 2010; revised manuscript received 19 January 2011)

### Abstract

A new type of high power microwave device is developed based on bitron and backward wave oscillator. The device is composed of two parts: the modulation cavity and the extraction cavity (which is similar to slow wave structure). The modulation cavity acts as electron beam modulator and microwave reflector, which forms a microwave resonator in combination of the extraction cavity. The electron is modulated when it passes through the modulation cavity, and the high power microwave is generated when the modulated beam passes through the extraction cavity. An X-band high power microwave device is designed for a 20 GW accelerator, and the simulation results are frequency 8.25 GHz and output power 5.70 GW. Using superconducting magnet as guiding magnet, a microwave power of 5.20 GW at X-band (frequency  $(8.25 \pm 0.01)$  GHz) is obtained in single pulse mode. The radiation power is 5.06 GW when the repetition rate is 30 Hz, and the pulse length is 13.8 ns.

**Keywords:** bitron, backward wave oscillator, multi-wave Cherenkov generator

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

† E-mail: wuyang851219@gmail.com