

# 高功率微波器件中脉冲缩短现象的粒子模拟<sup>\*</sup>

宫玉彬<sup>1)†</sup> 张 章<sup>1)</sup> 魏彦玉<sup>1)</sup> 孟凡宝<sup>2)</sup>  
范植开<sup>2)</sup> 王文祥<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (电子科技大学大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 成都 610054)

<sup>2)</sup> (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2004 年 1 月 14 日收到, 2004 年 3 月 25 日收到修改稿)

脉冲缩短是高功率微波器件的一个普遍现象, 它阻碍了输出微波能量的进一步提高, 是高功率微波研究领域  
中急待解决的问题. 以相对论返波管作为研究对象, 运用粒子模拟的方法, 研究了器件表面的爆炸发射、电子束电  
压和电流的脉动对输出微波性能的影响, 从中得到了一些有益的结论, 指出由强电场引起的慢波系统表面的爆炸  
发射是产生脉冲缩短的重要因素, 电子束电流和束电压的脉动也会引起脉冲缩短, 并提出了相应的克服方法.

关键词: 高功率微波器件, 相对论返波管, 脉冲缩短, 粒子模拟

PACC: 8760G, 4180D, 7970

## 1. 引 言

所谓高功率微波 (HPM) 源, 一般是指峰值功率  
超过 100MW, 频率在 1—300GHz 的微波器件, 如相  
对论返波管、相对论速调管、虚阴极器件等, 它们广  
泛用于国防、航天、通讯科技等领域<sup>[1, 2]</sup>. 为了让高功  
率微波源高效率地输出高能量微波, 上世纪 70 年代  
以后研究者着力于提高微波源的输出功率, 但当峰  
值功率达到 1GW 后, 想进一步提高就比较困难, 因  
为这会受到其系统能力的限制, 因此, 现代的高功率  
微波源更侧重于延长微波脉冲工作时间, 以获取更  
高的微波能量<sup>[3]</sup>. 但研究发现, 此方法又面临脉冲缩  
短 (也称脉冲短接) 的问题, 即微波实际输出的射频  
脉冲宽度小于电子注的脉冲宽度, 特别是当脉冲峰  
值功率大于 1GW 后, 随着脉冲功率的进一步增加,  
其射频脉冲宽度会进一步缩短, 因此输出能量常常  
最终会大致趋于一常数<sup>[4, 5]</sup>, 从而大大限制了高功率  
微波源的效率以及能量输出. 只有搞清楚脉冲缩短  
形成的原因以及是否可以避免, 如果可以又应如何  
避免等关键问题, 才能有效提高源的输出效率以及

微波输出能量<sup>[6]</sup>.

脉冲缩短现象首先是由 Mesyats 和 Voronkev 等  
人提出的. 1995 年, 美国将它作为一个重要课题开  
始研究, 近几年来这一问题已引起各国学者的广泛  
关注, 美、俄等国的学者还进行了大量的实验, 取得  
了一些有价值的成果<sup>[4]</sup>.

相对论返波管是结构简单、最为重要和有实际  
应用价值的高功率微波器件之一, 文献 [7, 8] 对相对  
论返波管中填充惰性气体或由于真空度不高, 而残  
留中性背景气体时, 管内的气压对脉冲宽度的影响  
进行了研究. 本文将对由于返波管内的强电场所引  
起的管壁上产生爆炸发射, 以及电子束电压和电流  
脉动对脉冲宽度和输出微波性能的影响进行研究,  
探讨高功率微波器件内引起脉冲缩短的主要因素,  
以便在实际器件的设计过程中加以控制.

## 2. 物理模型

本文采用粒子模拟的方法研究相对论返波管内  
强电场引起的管壁爆炸发射, 以及电子束参量的脉  
动对脉冲缩短现象的影响.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 10276011) 及霍英东教育基金会高等院校青年教师基金 (批准号: 81007) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: ybgong@uestc.edu.cn

采用的物理结构模型如图 1 所示:中间为波纹型慢波结构,其平均半径、周期长度、波纹深度分别为 1.65, 1.5 和 0.6cm,波纹周期数为 10 个;左端所接的光滑圆波导做截止波导,半径为 1.25cm,长为 3cm;右端为漂移段和收集极;一有限厚度环形电子注从器件左端注入,其内外半径分别为 0.4 和 0.8cm;磁场简化为只有纵向分量的均匀磁场,大小为 1T,模拟过程中,选取电子注电压为 1MV,电流为 1kA,它们均为矩形脉冲,脉冲宽度为 40ns。

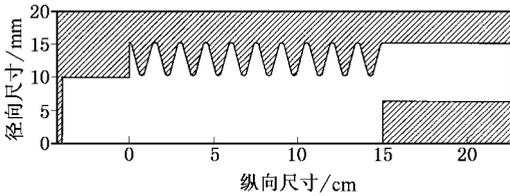
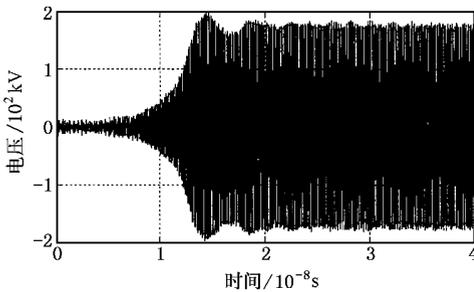
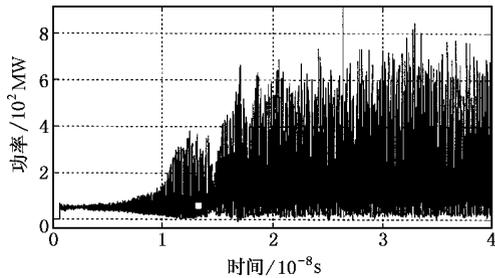


图 1 相对论返波管结构示意图



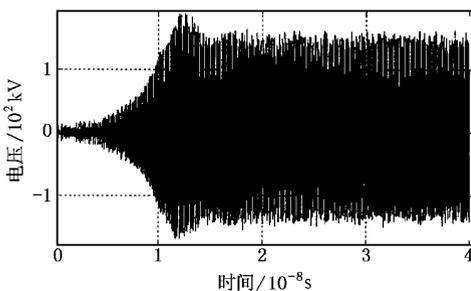
(a) 高频电压



(b) 微波功率

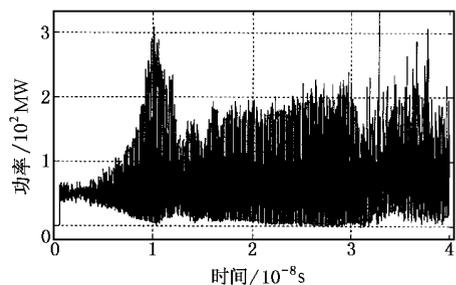
图 2 理想情况下输出微波脉冲的高频电压与微波功率

为了考察相对论返波管由于表面强电场而引起的管壁爆炸发射对输出微波脉冲的影响,可以假设爆炸发射分别发生在管壁的不同区域,如截止波导、慢波结构前端、慢波结构中后部、慢波结构后端以及收集极等处,图 3 至图 6 给出在相同的爆炸发射电流密度



(a) 高频电压

情况下截止波导、慢波系统的前端、中部、后端产生爆炸发射时对输出微波脉冲的影响。模拟时假设金属表面的电场强度为  $1.5 \times 10^4$  kV/cm,荷电粒子的初始能量为 1eV,而爆炸发射产生的荷电粒子的密度不需人为给定,可由 MAGIC 程序自己计算得出。



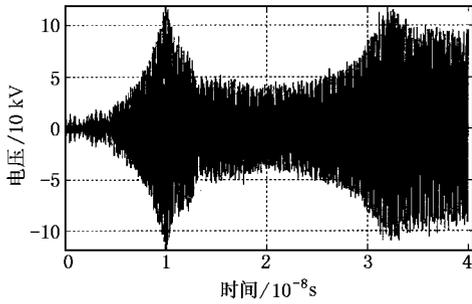
(b) 微波功率

图 3 截止波导处发生爆炸发射时高频电压、输出功率与时间的关系图

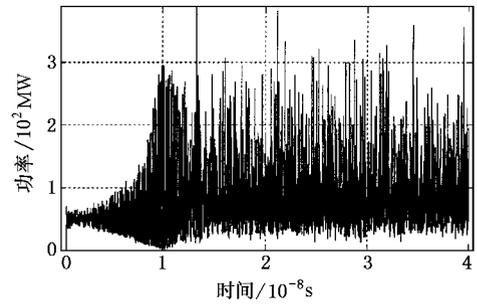
### 3. 管壁爆炸发射对输出微波脉冲的影响

高功率微波器件的真空度是引起脉冲缩短的一个因素,但并不是产生脉冲缩短最重要的因素<sup>[8]</sup>。假设在真空度极高的情况下,管内表面处理不好,光洁度不高,金属表面残留有不洁物,这十分容易在金属表面形成强电场,一般而言,当表面电场幅值达到  $10^4$  kV/cm 就会导致管壁的金属场致发射,场致发射的电子与管壁表面的附着物碰撞,形成等离子体,从而产生爆炸发射,这极有可能引起微波脉冲的崩溃。

首先,假设相对论返波管的管壁处没有爆炸发射,电子束电压、电流没有脉动,利用三维粒子模拟程序 MAGIC 模拟得到了输出微波的脉冲,这将作为我们分析爆炸发射和电子束脉动得到的结果的参照系,如图 2 所示。

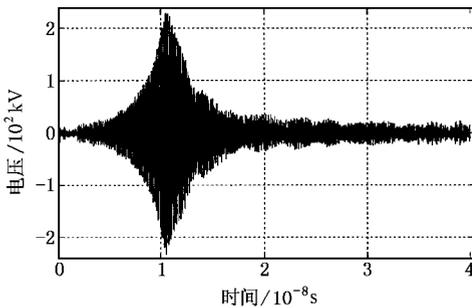


(a) 高频电压

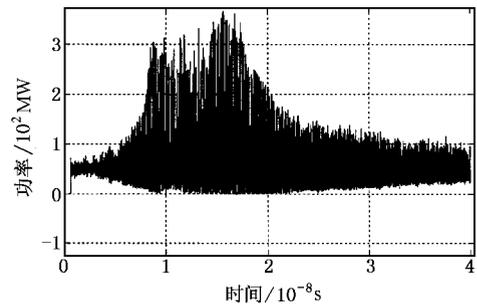


(b) 微波功率

图4 慢波系统前端(第1,2周期)发生爆炸发射时高频电压、输出功率与时间的关系

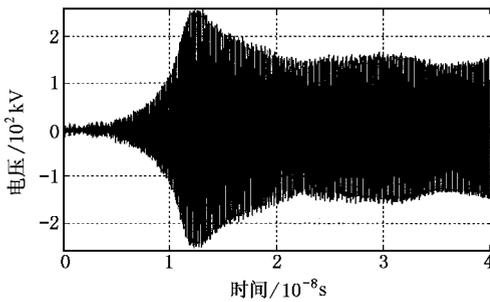


(a) 高频电压

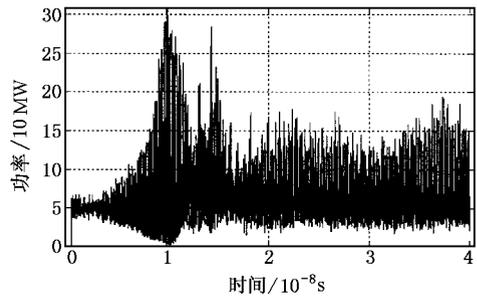


(b) 微波功率

图5 慢波系统中部(第5,6周期)发生爆炸发射时高频电压、输出功率与时间的关系



(a) 高频电压



(b) 微波功率

图6 慢波系统后端(第9,10周期)发生爆炸发射时高频电压、输出功率与时间的关系

由计算结果发现,截止波导附近的爆炸发射对微波输出脉冲宽度和功率影响不大,慢波系统的前端和后端发生的爆炸发射虽然对微波输出功率有较大影响,但对脉冲宽度影响也不大,在慢波结构中部产生的爆炸发射对输出微波脉冲的影响最大,最易导致脉冲缩短,这在图3至图6中得到充分体现.我们认为电子束在慢波系统的中部已得到充分群聚,束波换能比较充分,爆炸发射的粒子流对电子束产生破坏作用,使原本已经群聚了的电子束质量变差,甚至使电子束崩溃,最终导致脉冲缩短,而慢波系统

前端电子束尚未群聚,爆炸发射的粒子流虽然对电子束的质量有影响,但不是致命的,在慢波系统的后端,束波换能已基本完成,电子束本身已经散焦,即使有粒子流的影响,对微波性能也已经不会产生大的影响.因此在实际设计管子的时候,应当充分考虑慢波系统的材料选择,慢波系统的中部应选择那些逸出功大的材料,或者在其表面涂附发射性能差的材料,同时采取措施降低慢波系统的表面电场,以减轻脉冲缩短现象,提高器件的输出能量,改善管子的输出性能.

爆炸发射同时要产生电子和质子,现在固定发射区域在慢波系统的中部,分别发射电子和质子,考察爆炸发射产生的电子和质子对输出微波性能的影响.通过大量的数值计算发现,爆炸发射产生的电子可使输出的微波功率产生较大幅度的下降;而爆炸发射产生的质子,即使其发射的密度很大,对输出微波功率的影响仍然很小,只略微使之有所下降.

为了详细分析电子发射和质子发射对输出微波性能的影响,我们先固定发射电子的电流密度,改变质子发射密度,而后再固定质子发射密度,改变电子发射密度,模拟结果如图 7 和图 8 所示.模拟结果表明,实际上对输出微波功率影响最大的是慢波系统表面爆炸发射产生的电子发射密度,而质子的发射密度对输出功率影响不大,对脉冲宽度的影响极为严重.电子发射的密度越大,输出微波的功率值越小;质子发射的密度越大,脉冲宽度越窄.产生这种现象的原因,定性的简单分析即为:发射的电子作为电子负载,必定会吸收微波能量,并且它的存在还改变了注-波耦合,所以肯定会对输出微波功率造成较大影响.而质子由于其质量较电子大得多,所以其对微波吸收的强度较之电子小得多,但由于它能补偿电子流的空间电荷效应,所以它的出现会强烈刺激电子的吸收过程,从而加快微波功率的下降时间,缩短脉冲宽度.

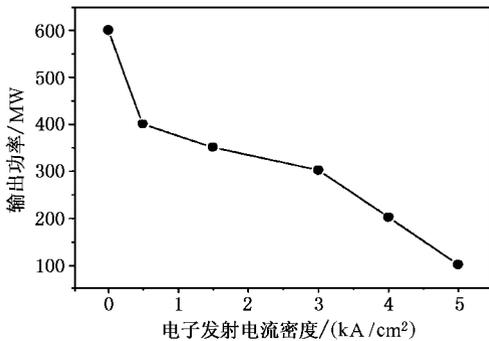


图 7 爆炸发射的电子流对输出功率的影响 质子发射电流密度为 30A/cm<sup>2</sup>

#### 4. 电子束参量脉动对输出微波的影响

所谓的高功率微波器件是利用相对论电子束与电磁波的相互作用,电子释放能量给电磁波的原理工作的,因此电子束参量对输出微波的性能应该有影响,下面来考察电子束加速电压以及束电流的波动对微波输出脉冲宽度的影响.

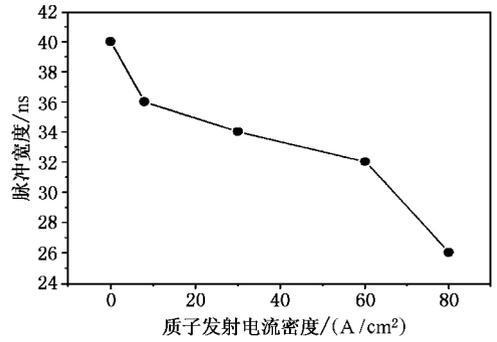


图 8 爆炸发射的质子流对输出脉冲宽度的影响 电子发射电流密度为 1.5kA/cm<sup>2</sup>

我们的方法是,设电子束电流电压与电流均为脉冲宽度为 40ns 的矩形脉冲,然后,先固定电流,使电压呈正弦波动,如图 9 所示,即

$$\begin{cases} I = I_0, \\ V = V_0 + \Delta V_0 \sin(2\pi t/T), \quad 0 \leq t \leq 40\text{ns}, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $I_0 = 1\text{kA}$ ,  $V_0 = 1000\text{kV}$ ,  $\Delta V_0 = V_0 \times 3\%$ , 为电压波动幅度,  $T = 20\text{ns}$ , 为电压波动周期.

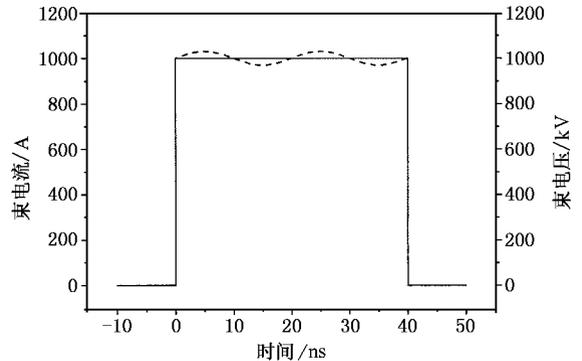
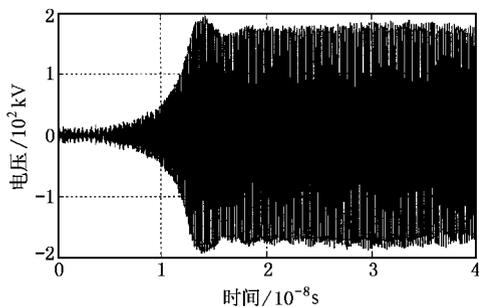


图 9 电子束电流(——)、电压(---)波形图

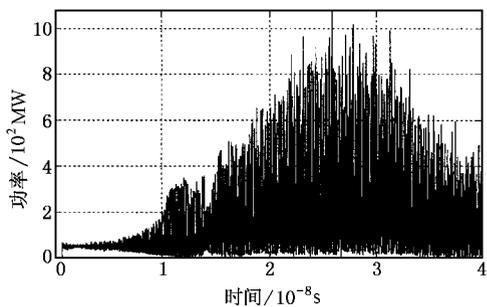
按照以上电子束参数,模拟观测它们对输出微波功率的影响,得到的结果如图 10 所示.

图 2 为理想情况下得到的输出微波性能,亦即电子束电流、电压未发生波动,管壁也没有爆炸发射发生时的微波输出,比较图 2 与图 10 可知,当束电压波动时,微波脉冲功率较早地开始下降,显示出脉冲缩短的迹象,但对峰值输出功率影响不大.

最后,固定电压,电流呈正弦波动(见图 11),同样也改变其幅值和周期,以模拟观测它们对输出微波功率的影响.



(a) 高频电压



(b) 微波功率

图 10 电子束电压波动对输出微波性能的影响

$$\begin{cases} V = V_0, \\ I = I_0 + \Delta I_0 \sin(2\pi t/T), \quad 0 \leq t \leq 40\text{ns}, \end{cases} \quad (2)$$

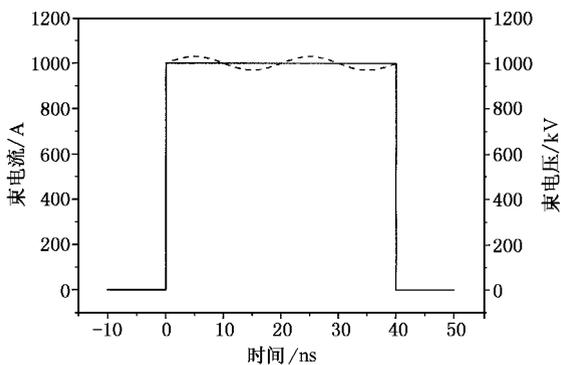


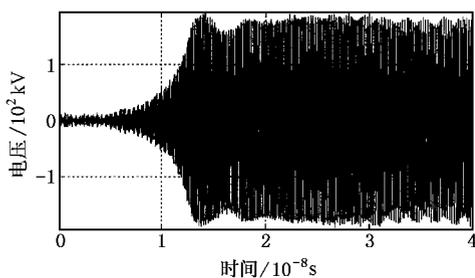
图 11 电子束电流(---)电压(—)波形图

其中  $I_0 = 1\text{kA}$ ,  $V_0 = 1000\text{kV}$ ,  $\Delta I_0 = I_0 \times 3\%$ , 为电压波动幅度,  $T = 20\text{ns}$ , 为电压波动周期.

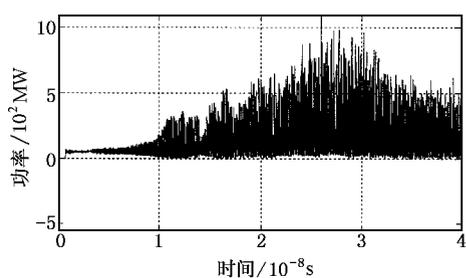
按照以上电子束参数, 模拟观测它们对输出微波功率的影响, 得到的结果如图 12 所示.

比较图 2 与图 12 可知, 当电子束电流波动时, 微波脉冲功率较早地开始下降, 显示出脉冲缩短的迹象, 同时对峰值输出功率影响也很大, 峰值功率大幅下降.

众所周知, 电子束的电流、电压是描述电子束特征的两个重要的参量, 如果电子束的电流、电压发生波动, 导致优化设计的聚焦磁场失效, 不能很好地约束电子束, 使电子束散焦, 严重时将导致电子束电流的崩溃, 产生严重的脉冲缩短现象.



(a) 高频电压



(b) 微波功率

图 12 电子束电流波动对输出微波性能的影响

### 5. 结 论

本文的研究结果虽然比较初步, 但仍可以从中得到一些有益的结论.

1. 慢波系统表面由于强电场而引起的爆炸发射, 是高功率微波器件中产生脉冲缩短现象的一个

重要原因, 因此, 实际设计管子时, 应充分考虑慢波系统的材料选择, 应选择那些逸出功大的材料, 或者在慢波系统表面涂附发射性能差的材料, 同时采取措施降低慢波系统的表面电场, 以减轻脉冲缩短现象, 提高器件的输出能量, 改善管子的输出性能.

2. 电子束电压、电流的波动对器件的输出性能, 如脉冲宽度、峰值功率、能量等都有较大影响, 所以

器件工作时,应保证电压和电流脉冲的平滑,避免产生大的波动.

高功率微波器件中的脉冲缩短现象是一个复杂的综合性的物理问题,它牵涉到微波电子学、高功率微波技术、等离子体物理等多个领域,在接下来的工

作中,除了对上面模拟分析的几个部分再进行更深入的研究之外,还要研究电子注不稳定性、聚焦磁场、器件内的强电场击穿等对输出微波脉冲宽度的影响.

- [ 1 ] Fang J Y ,Nin H ,Zhang S L and Qiao D J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 911( in Chinese ) [ 方进勇、宁 辉、张世龙、乔登江 2003 物理学报 **52** 911 ]
- [ 2 ] Shao H and Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387( in Chinese ) [ 邵 浩、刘国治 2001 物理学报 **50** 2387 ]
- [ 3 ] Barker R J and Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies*( New York : IEEE ) p78
- [ 4 ] Gobel D M 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 263
- [ 5 ] Benford J and Benford G 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 311
- [ 6 ] Agee F J 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 235
- [ 7 ] Zhang Z , Gong Y B , Wang W X and Xu L 2002 *Proceedings of 5th High Power Microwave Technology* p232( in Chinese ) [ 张 章、宫玉彬、王文祥、胥 磊 2002 第五届全国高功率微波会议论文集,第 232 页 ]
- [ 8 ] Zhang Z ,Gong Y B ,Xu L ,Gong H R and Wang W X 2003 *14th Conference of Chinese Vacuum Electronics Society* p319( in Chinese ) [ 张 章、宫玉彬、胥 磊、巩华荣、王文祥 2003 中国电子学会真空电子学会第十四届学术会议,第 319 页 ]

## Simulation of pulse shortening phenomena in high power microwave tube using PIC method<sup>\*</sup>

Gong Yu-Bin<sup>1)</sup> Zhang Zhang<sup>1)</sup> Wei Yan-Yu<sup>1)</sup> Meng Fan-Bao<sup>2)</sup>  
Fan Zhi-Kai<sup>2)</sup> Wang Wen-Xiang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Key Laboratory of High Power Microwave Devices , University of Electronic Science and Technology of China ,Chengdu 610054 ,China )

<sup>2)</sup>Institute of Applied Electronics ,China Academic of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )

( Received 14 January 2004 ; revised manuscript received 25 March 2004 )

### Abstract

Pulse shortening is an universal phenomenon in high-power microwave tubes , which hinders the improvement of microwave output energy. So far , it is also an unresolved problem in the field of high-power microwave devices. In this paper , the relativistic backward wave tube( RBWO ) is treated as an example to study the pulse shortening phenomena. The influences of explosive emission in the inner surface of RBWO and fluctuation of the relativistic electron beam on the pulse width and output power are investigated by means of the particle-in-cell( PIC ) method. Through the simulation results , some useful conclusions have been drawn. The explosive emission in the surface of the slow wave structure due to intense electric field is one of the most important factors causing pulse shortening in high-power microwave tube. The fluctuation of the electron beam can also lead to pulse shortening. Some methods to overcome pulse shortening are given in this paper.

**Keywords :** high power microwave tube , relativistic backward wave tube , pulse shortening , particle-in-cell

**PACC :** 8760G , 4180D , 7970

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 10276011 ) , and the Fok Ying-Tong Education Foundation for Young Teachers in the Institutions of Higher Education of China( Grant No. 81007 ).