

· 物理电子学 ·

高功率过模返波管中模式控制研究

廖旭, 李正红

(西南科技大学理学院 四川 绵阳 621010)

【摘要】采用过模结构, 克服常规返波管(BWO)中截止径的限制, 提高器件内径, 有效地降低同等功率条件下器件内表面的强场, 使其低于器件内表面的强场击穿阈值, 可以克服器件内表面的强场击穿问题。根据BWO的振荡机理, 引入过模反射腔, 并使其同相应的慢波结构匹配, 克服了过模结构中的模式竞争问题, 提高了电子束同慢波结构相互作用效率。从理论和模拟两个方面研究了过模返波管中的模式控制, 设计了一个X波段输出功率接近10 GW、效率约50%的过模返波管器件。

关键词 返波管; 高功率微波; 模式竞争; 模式控制

中图分类号 TN102

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.015

Study on Mode Control in an Over-sized Backward Wave Oscillator

LIAO Xu and LI Zheng-hong

(Science College, Southwestern University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621010)

Abstract Internal field emission breakdown in the electro-dynamic structures of high-power microwave devices can seriously limit the devices' output power and pulse duration. Increasing the diameter of the electro-dynamic structure beyond the cut-off radius can reduce these internal fields to below critical breakdown levels, but may introduce mode competition as unwanted side effects. An over-sized backward wave oscillator with rectangular profile corrugations is designed to produce TM₀₁ high power microwave radiation without mode-competition. The slow wave structure and the reflector are matched to achieve mode selection and enhance interaction efficiency. The physical mechanism for mode selection is explored both in theoretical investigation and particle in cell simulation.

Key words back-ward wave oscillator; high power microwave; mode-competition; mode-control

近年来, 由于像Tesla^[1-2]这样具备重复频率能力脉冲功率技术的提高, 窄带高功率微波器件也取得了很好的发展^[1-2]。随着微波器件输出功率的不断提高, 由于器件内表面的强场击穿而导致的微波脉冲缩短问题, 使微波输出在电子束结束之前很快终止, 并且限制微波输出功率的进一步提高。采用过模结构, 克服常规BWO中截止径的限制, 提高器件内径, 有效地降低同等功率条件下器件内表面的强场, 使其低于器件内表面的强场击穿阈值, 从而克服器件内表面的强场击穿问题^[3-4]。然而在过模结构中, 尽管器件的功率容量得到了提高, 但是模式竞争问题不仅影响器件的运行, 而且降低束波相互作用效率^[5-6]。因此使器件在单一模式在运行是影响过模返波管正常工作的重要物理因素。本文从理论和模拟两个方面研究了过模返波管中的模式控制, 根据BWO的振

荡机理, 引入过模反射腔, 使其与相应的慢波结构匹配, 不仅克服了过模结构中的模式竞争问题, 而且也提高了电子束同慢波结构相互作用效率, 由此设计了一个X波段输出功率接近10 GW、效率50%的过模返波管器件。

1 器件结构

1.1 器件结构及其等效电路

微波器件主要由谐振反射腔和慢波结构两部分组成, 如图1所示。电子从阴极发射后, 穿过谐振反射腔和慢波结构, 最后终止于慢波结构后器件壁。束波相互作用主要发生在慢波结构区, 在慢波结构区电子动能转化为微波能, 其中的一部分微波反馈到谐振反射腔, 实现对电子束的调制, 其他的微波通过后面输出端口向外辐射。

收稿日期: 2010-06-07; 修回日期: 2010-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(10347009); 四川省教育厅重点科研项目(09ZA128)

作者简介: 廖旭(1961-), 男, 副教授, 主要从事电磁场及微波理论方面的研究。

器件的等效电路如图2所示。电子束在谐振反射腔得到速度调制，当其进入慢波结构区时，电子束已经充分聚集，它们可与慢波结构有效地作用产生相应的微波。因此在慢波结构区，微波的产生由电子束与慢波结构之间的耦合、进入慢波结构区时电子束的调制深度和慢波结构区的微波场强度等3个因素来决定。同时由于在谐振反射腔和慢波结构之间的漂移区也有很强的微波场，因此器件的谐振特性与慢波结构之间还存在差别。器件结构的主要参数如表1所示。

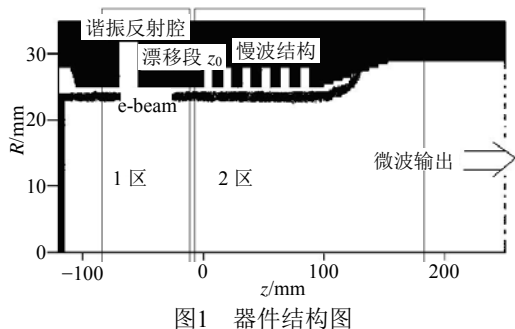


图1 器件结构示意图

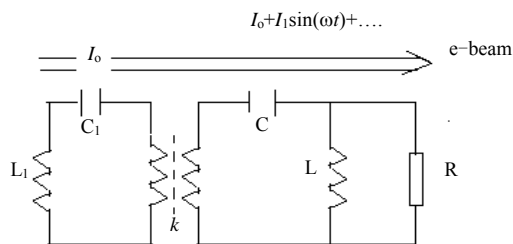


图2 器件等效电路图

表1 器件结构参数

参数	数值
谐振反射腔半径/cm	3.2
谐振反射腔腔长/cm	1.6
漂移段长度/cm	5.4
慢波结构外半径/cm	2.8
慢波结构内半径/cm	2.5
慢波结构外周期/cm	1.6

1.2 谐振反射腔

在过模返波管器件中谐振反射腔有以下作用：

1) 将慢波结构区产生的微波反射回慢波结构区，增强电子束同慢波结构的相互作用；2) 实现对电子束的调制，使电子束进入慢波结构区已经群聚，提高电子束同慢波结构的相互作用效率。谐振反射腔的结构如图3所示，谐振反射腔对微波传输效率(S_{12})对频率的变化曲线如图4所示。

本文通过PIC程序(电子科技大学研发的UNPIC软件)研究了谐振反射腔对微波实现反射的微波过程，PIC程序模拟结果如图5所示。该结果为微波从

左边端口馈入时通道中的微波场分布，入射微波在谐振反射腔被反射，几乎没有微波通过谐振反射腔。微波电场 z 分量沿 z 轴的变化曲线如图6所示，谐振反射腔不仅对微波实现反射，而且还感应一个电场 z 分量很强的微波场，该微波场可以实现电子束的调制。

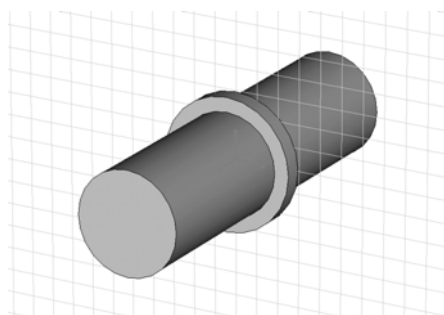


图3 谐振反射腔结构图

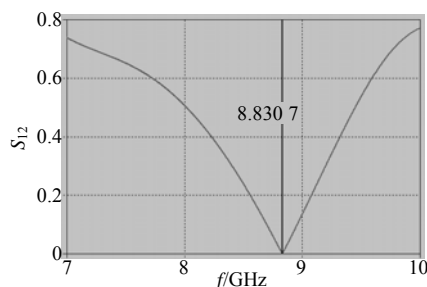


图4 谐振反射腔对微波反射的频率特性

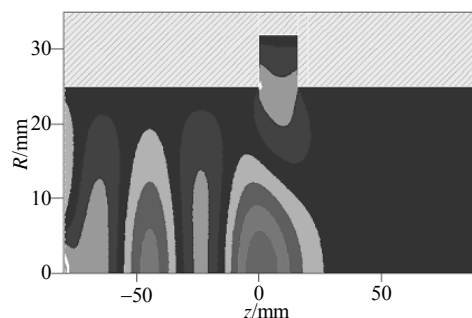


图5 谐振反射腔对微波反射时形成的微波场

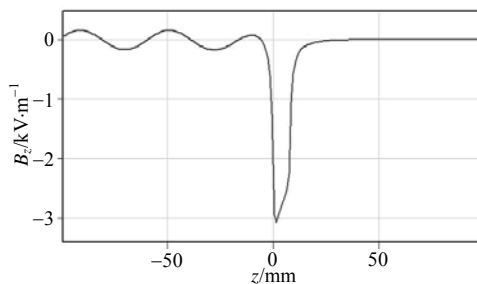


图6 谐振反射腔对微波反射时形成的微波场在电子束路径的场分布

1.3 慢波色散关系

慢波结构 TM_{01} 和 TM_{02} 模的色散曲线如图7所示， TM_{01} 模同800 keV (实验中加速器运行的典型电压值)电子束的交点位置对应纵向模式为 $7/6\pi$ 模，相应的频率为8.5 GHz；而 TM_{02} 模同电子束的交点位置

在纵向模式 $11/6\pi$ 模与 2π 模之间。 TM_{01} $5/6\pi$ 模的场分布如图8所示。

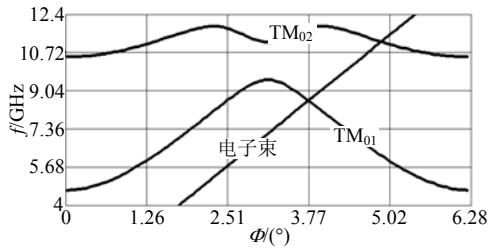


图7 慢波结构色散曲线

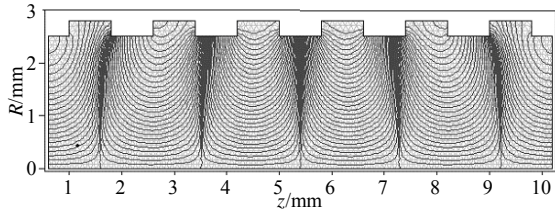


图8 慢波区的微波场分布

1.4 模式控制和束波相互作用研究

模式控制是过模返波管器件中的一个关键问题。与常规返波管相比, 过模返波管的 TM_{01} 中各个纵向模式之间的频率间隔比较大, 相互影响很小, 不具有模式竞争。如图7所示, TM_{01} 模同电子束的交点位置对应纵向模式为 $7/6\pi$ 模, 而其他模式(如 $5/6\pi$ 、 $8/6\pi$ 、 $9/6\pi$ 等模式)的频率与交点位置处对应频率的频率差别较大, 因此过模返波管器件中模式竞争主要在高次模(如 TM_{02} 、 TM_{03} 等)之间, TM_{02} 的 $11/6\pi$ 模接近 TM_{02} 模同电子束的交点位置, 同时由于这两个同电子束同步的模式(TM_{01} 的 $7/6\pi$ 模和 TM_{02} 的 $11/6\pi$ 模)的频率差较大, 所以通过对微波器件的巧妙设计可以克服模返波管器件中的模式竞争问题^[7-8]。

因此, 根据过模返波管器件中的束波相互作用过程, 可以从3个方面来实现微波器件中的模式控制:

- 1) 谐振反射腔设计。使谐振反射腔对微波的反射处于工作频率上, 而对其他频率的反射很小, 见图4。
- 2) 谐振反射腔与慢波结构之间的漂移段设计。通过改变漂移段的长度, 使器件在工作频率上谐振, 增强器件在工作模式下的相互作用。
- 3) 优化器件束波相互作用。由于谐振反射腔作用间隙中很强的微波场, 电子束进入慢波区时已经完全群聚, 这种群聚电子束的相位对慢波区束波相互作用的影响很大, 因此改变群聚电子束的相位可以加强工作模式的束波相互作用, 并压制其他模式, 从而实现微波器件的模式控制。微波器件工作模式的电场分布如图9所示, 慢波结构的模式为 TM_{01} 、 $5/6\pi$ 模。由图可以看出, 谐振反射腔不仅对工作频率的微波有很强的反射, 而且在其作用间隙还有很强的微波场, 该微波场可以实现对电子束的调制和群聚。

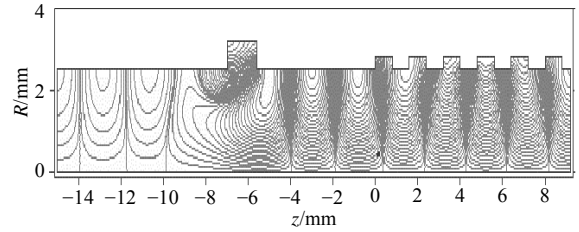


图9 器件工作模式的微波场分布

2 器件优化和模式控制实现

在图2的结构中, 漂移段长度 $z_0=5.4$ cm, 驱动电子束参数为电压1 MV, 流强20 kA时, 结构慢波区的工作模式为 TM_{01} 的 $7/6\pi$ 模(见图7)。电子束通过器件时, 器件内部的微波场分布如图10所示; 电子束调制电流在器件中的变化曲线如图11所示。由图可以看出, 进入慢波结构时电子束已经群聚很充分, 在慢波结构中群聚进一步加强, 然后在换能时不被破坏。微波输出功率随时间的变化曲线, 微波输出功率为9.7 GW, 相应的器件效率为48.5%如图12所示; 出口处微波场电场频谱曲线如图13所示。由图可以看出, 微波输出有两个频率: 1) 工作模式8.68 GHz; 2) 二次谐波(频率为17.3 GHz), 二次谐波的出现说明电子束在慢波结构中已经过群聚。

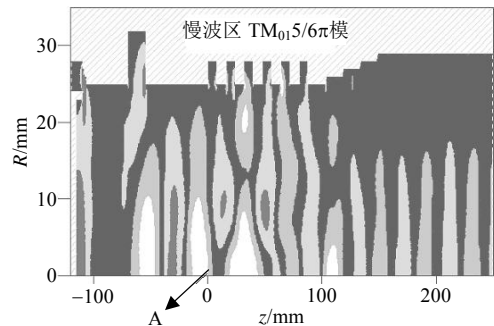


图10 电子束通过器件时的微波场分布

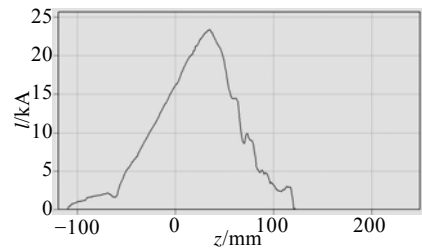


图11 电子束调制电流在器件中的变化曲线

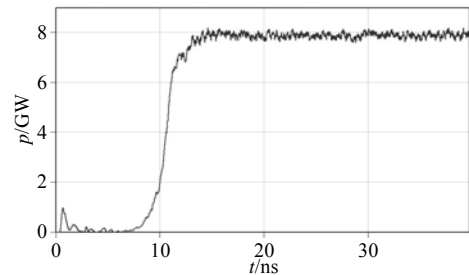


图12 微波输出功率随时间的变化曲线

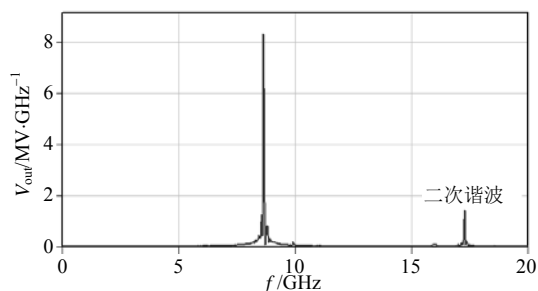


图13 出口处微波电场的频谱

结构中观察点A处微波场电场的频谱曲线如图10所示,由图可以看出,除了工作模式及其二次谐波,在频谱曲线还有另外两个频率的微波,其频率分别为9.9 GHz和10.73 GHz,分别对应 TM_{02} 中 $7/6\pi$ 和 2π 模,而这两个模式很接近 TM_{02} 模式色散曲线同电子束的交点位置(见图7)。因此尽管驱动电子束流强大大低于起振电流,在器件中也激励了非工作模式(TM_{02} 中 $7/6\pi$ 和 2π 模)。单纯从起振的观点,模式竞争理论上可以通过提高非工作模式的起振电流来实现,然而在模拟中发现当充分群聚的电子束通过慢波结构时,也会激励非工作模式,如图14所示。为

了进一步研究这种非工作模式对器件工作模式的影响,用具有一定初始调制的电子束进行模拟,其初始调制深度为0.02,频率为靠近 TM_{02} 模式色散曲线同电子束交点位置的 2π 模频率,即10.73 GHz。器件工作模式的起振电流为14 kA。

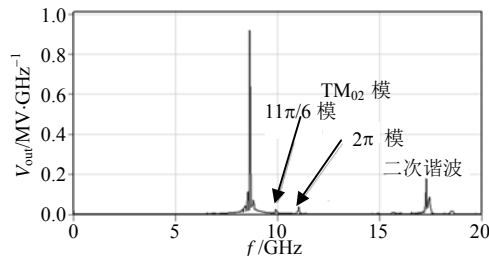


图14 器件内部监察点A处微波电场的频谱

不同流强下的微波输出如表2所示,当流强大于16 kA时,电子束初始调制对工作模式的影响可以忽略;而当流强小于16 kA时,由于模式竞争使得器件微波输出功率相当小。由此可以看出,随着流强提高,初始调制的影响减小,这是由于随着流强提高,慢波结构与谐振反射腔之间的反馈(见图2)过程在加强。

表2 在一定初始调制(调制频率10.73 GHz)和不同电子束流强下的微波输出功率

参 数	数 值							
电子束流强/kA	10	12	14	16	18	20	20	
有初始调制	微波功率/GW	0.68	3.10	4.10	7.50	9.0	9.70	9.50
	微波频率/GHz	11.03	11.03	11.03	11.03	8.63	8.59	8.58
无初始调制	微波功率/GW	0	0	8.20	8.50	9.20	9.70	9.50
	微波频率/GHz		0	8.69	8.66	8.63	8.59	8.58

3 结 论

根据过模返波管器件中慢波结构同谐振反射腔之间的反馈过程,研究了影响工作模式工作的各种因素,并由此设计了一个能够在驱动电子束为1 MV、20 kA的条件下克服模式竞争的过模返波管器件,微波输出功率为9.7 GW,频率8.68 GHz,相应的效率为48.5%。

参 考 文 献

- [1] LI Zheng-hong. Investigation of an oversized backward wave oscillator AS a high power microwave generator[J]. Applied Physics Letter, 2008, 92(1): 054102.
- [2] KOROVIN S D, MESYATS G A, PEGEL I V, et al. High power microwave sources[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2004, 28(4): 2691.
- [3] AGEE F J. Pulse shortening in high power microwave sources[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26(2): 234.

- [4] SAVILOV A V, BESPALOV P A, RONALD K, et al. Discrete monotron oscillator[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(5): 113104.
- [5] LI Zheng-hong. Bitron[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communication. Beijing, China: IEEE, 2005.
- [6] KLIMOV A I, KURKAN I K, POLEVIN S D, et al. A multigigawatt X-band relativistic backward wave oscillator with a modulating resonant reflector[J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(3): 235-237.
- [7] LI Zheng-hong, MENG F B, CHANG A B. Investigation of Bitron a high power microwave oscillator[J]. Acta Phy, 2005, 54(8): 3578.
- [8] 李正红,孟凡宝,常安碧. 两腔高功率微波振荡器研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3578.
- [8] LI Zheng-hong. Mode control in an over-sized backward wave oscillator[J]. Physics of Plasma, 2009, 16(5): 02317.

编辑 黄 莘