

X波段新型低阻抗高功率微波源的模拟研究

闫孝鲁 张晓萍 李阳梅

Particle-in-cell simulation of a new X-band low-impedance high power microwave source

Yan Xiao-Lu Zhang Xiao-Ping Li Yang-Mei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 138402 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.138402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于粒子模拟和并行遗传算法的高功率微波源优化设计

Optimal design of high-power microwave source based on particle simulation and genetic algorithms

物理学报.2013, 62(16): 168402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.168402>

基于相对论返波管的全三维PIC/PSO数值优化研究

Numerical optimization study of PIC/PSO for RBWO

物理学报.2013, 62(13): 138401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.138401>

基于伽辽金级数的空间电荷场计算模型

The calculation model of space-charge field based on the Galerkin series

物理学报.2012, 61(14): 148401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.148401>

X波段新型低阻抗高功率微波源的模拟研究*

闫孝鲁¹⁾²⁾ 张晓萍^{1)†} 李阳梅¹⁾

1)(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

2)(测量通信总体研究所, 北京 100094)

(2016年3月4日收到; 2016年3月31日收到修改稿)

提出了一种新型低阻抗高功率微波源, 能在单个器件内产生两束锁相的相干高功率微波, 对两束相干微波进行功率合成有望在单个高功率微波器件中实现更高的功率输出. 粒子模拟结果显示, 在电压 687 kV、磁场 0.8 T 时, 该微波源整体阻抗 36 Ω , 两束微波的频率都为 9.72 GHz, 输出功率分别为 1.20 GW 和 2.58 GW, 功率效率分别为 28% 和 30%; 两束输出微波之间频率抖动小于 ± 3 MHz, 相位差抖动小于 $\pm 3^\circ$.

关键词: 高功率微波源, 低阻抗, 粒子模拟, 功率合成

PACS: 84.90.+a, 85.45.-w

DOI: 10.7498/aps.65.138402

1 引言

为了进一步提高高功率微波 (HPM) 器件的输出功率, 低阻抗高功率微波源的研究一直是高功率微波技术领域的热门方向^[1]. 低阻抗高功率微波源能够实现与脉冲功率驱动源的阻抗匹配, 达到提高 HPM 器件注入电功率的目的. 然而目前束波转换效率较高的 O 型器件 (如相对论返波振荡器、相对论渡越时间振荡器等) 都属于高阻抗微波源, 器件阻抗一般大于 100 Ω , 限制了其向更高输出功率发展^[2]. 目前能够有效降低 O 型器件阻抗的方法主要有三种: 一是采用径向电子束发射, 增大发射面积^[3-5]; 二是在器件内部加入内导体, 采用同轴结构^[6-9]; 三是利用单脉冲功率源驱动多电子束, 增大发射束流^[10,11].

然而单纯地降低阻抗不仅会导致束波转换效率的降低, 更容易导致器件内部的射频击穿. 本文提出的新型低阻抗 HPM 源内包含两个子微波源, 在提高了整体功率容量的同时, 还保证每个子微波源工作在高阻抗状态下, 保证了较高的功率效率. 而且两个子微波源并联, 降低了器件整体的阻抗, 提高了注入电功率. 如果进一步将两个子微波源输

出的微波进行功率合成, 则能够在单管内实现更高的功率输出.

2 结构模型与工作原理

该新型低阻抗 HPM 源采用双同轴环状电子束阴极, 利用单个脉冲功率源驱动双电子束降低器件整体阻抗^[12-14]. 模拟结构如图 1 所示, 该器件由一个类多波切伦科夫振荡器 (MWCG) 和一个类三同轴速调管放大器 (TKA) 组成, 二者共用同一个引导磁场. 多波切伦科夫振荡器 (即内子微波源) 结构包括: 内同轴环状阴极、预调制腔、双段慢波结构、提取腔、同轴收集极和同轴输出波导; 三同轴速调管放大器 (即外子微波源) 结构包括外同轴环状阴极、注入腔、漂移段、三间隙提取腔和同轴输出波导.

内外子微波源拥有相同的工作频率. 当阴极加载电压时, 内子微波源中所产生的部分微波会经二极管泄露到外子微波源中, 作为其注入信号, 根据放大器工作原理, 外子微波源输出微波的频率和相位严格依从于注入信号, 从而在单个微波器件内实现两束锁频锁相的相干微波的输出.

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2015AA8037074A) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangxiaoping@nudt.edu.cn

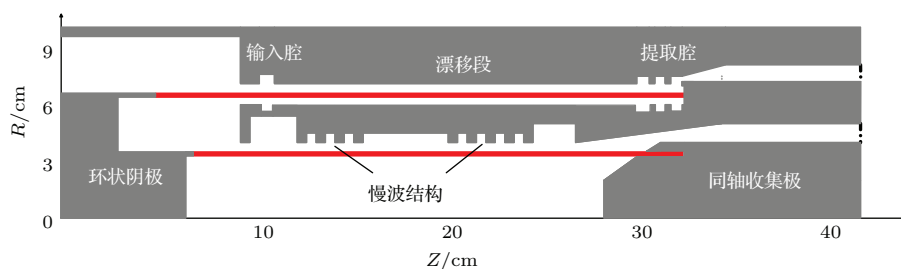


图1 (网刊彩色) 新型低阻抗大功率微波源结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of the new low-impedance HPM source.

3 内外子微波源结构的特殊设计

该新型微波器件中的内子微波源类似于多波切伦科夫振荡器, 但其采用了一个独立的同轴电子束收集极. 由图1可见, 外子微波源电子束收集在约33 cm处, 而内子微波源的工作区域结束在约27 cm处. 因为内外子微波源共用同一个引导磁场, 若要使内子微波源电子束在输出波导壁上收集, 则其收集位置必然大于33 cm. 在提取腔之后到电子束被收集的这段空间内, 束波相互作用所产生的微波会把部分能量交还给电子束, 从而导致器件工作效率的降低, 而同轴收集极则可以很好地解决这一问题. 此外, 因为内子微波源的主要工作模式是 TM_{01} , 而同轴收集极的输出模式是TEM, 所以还将同轴收集极设计成 TM_{01} -TEM模式转换器.

该新型微波器件中的外子微波源虽然基于三同轴速调管放大器的工作原理, 但其结构也与三同轴速调管放大器不尽相同^[15]. 如图1所示, 外子微波源没有独立的注入波导, 其注入信号通过注入腔上游的电子束通道耦合进注入腔, 该注入方式能在一定程度上避免注入腔场分布的角向不对称. 普通速调管放大器要求注入信号被电子束无反射地完全吸收, 而该微波器件的外子微波源则要求注入信号大部分被反射. 因为从内子微波源泄漏的信号功率可达百兆瓦量级, 大部分未被电子束吸收的信号功率会以TEM模式泄漏进同轴漂移段中, 使注入腔和提取腔之间相互耦合, 造成外子微波源无法正常工作. 因此, 本文将外子微波源的注入腔设计成TEM反射腔, 合理选择反射系数, 使透射功率能够被外子微波源匹配吸收, 抑制注入信号向漂移段泄漏, 保证其工作稳定. 同理, 外子微波源的提取腔中产生的微波功率也在GW量级, 为了抑制输出

腔微波向漂移段泄漏, 三间隙提取腔中的第一个间隙也被设计为TEM反射腔^[16,17]. 注入腔与提取腔第一间隙对于TEM模式微波的反射系数如图2所示, 注入腔在9.72 GHz(内外子微波源的工作频率)的反射系数为97.8%, 提取腔第一间隙在9.72 GHz的反射系数为98.4%, 且二者在9.67—9.77 GHz频率范围内的反射系数都在90%以上, 此时外子微波源可以稳定工作.

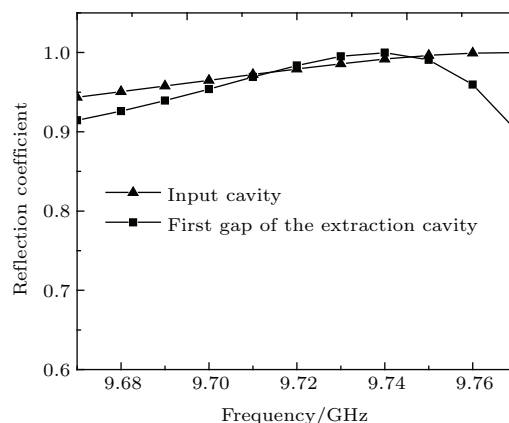


图2 注入腔和提取腔第一间隙的TEM模式反射系数

Fig. 2. The TEM mode reflection coefficients of the input cavity and the first gap of the extraction cavity.

4 模拟结果与分析

模拟计算使用2.5维全电磁仿真软件MAGIC, 模拟结果如图3和图4所示. 该器件中, 内外环状电子束的中心半径分别为35 mm和65 mm, 厚度均为2 mm, 内子微波源慢波结构波纹深度5 mm, 外子微波源漂移段长度180 mm.

在二极管电压687 kV、磁场0.8 T的情况下, 内子微波源的束流为6.3 kA, 平均输出功率为1.20 GW, 输出频率为9.72 GHz, 功率效率为28%; 外子微波源的束流为12.6 kA, 平均输出功率为2.58 GW, 输出频率为9.72 GHz, 功率效率为30%.

该新型高功率微波器件整体阻抗仅为 36Ω , 在电压 687 kV 时, 总注入功率达到 13 GW , 并且保证了整体较高的束波转换效率.

对输出微波进行分析, 结果如图 5 所示. 两输出微波频率稳定在 9.72 GHz , 频率抖动小于 $\pm 3 \text{ MHz}$; 相位差稳定在 145° , 相位差抖动小于

$\pm 3^\circ$. 分析结果表明, 该新型器件内外子微波源输出微波之间锁频锁相效果良好, 适合进一步进行功率合成, 有潜力在单个微波器件内实现更高的功率输出. 该条件下的电场分布如图 6 所示, 可知最大轴向场强产生在外子微波源的提取腔中, 约为 900 kV/cm , 未超过射频击穿阈值 (1 MW/cm).

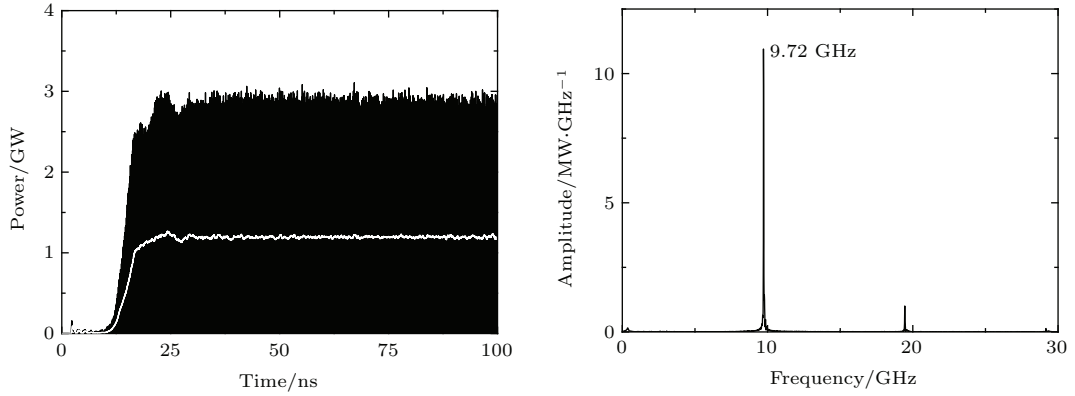


图 3 内子微波源的输出功率和输出频率

Fig. 3. The output power and spectrum of the inner sub-source.

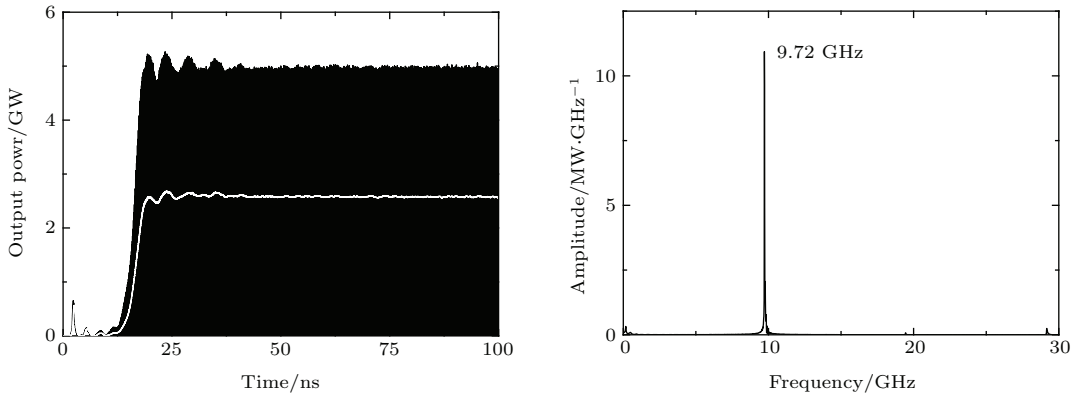


图 4 外子微波源的输出功率和输出频率

Fig. 4. The output power and spectrum of the outer sub-source.

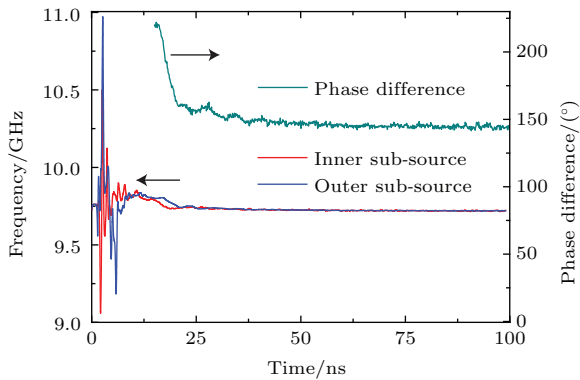


图 5 (网刊彩色) 内外子微波源频率和相位差的时域变化
Fig. 5. (color online) Frequency and phase difference of two sub-source versus time.

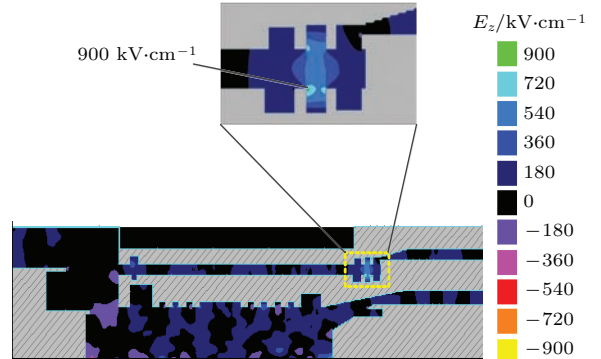


图 6 (网刊彩色) 微波源电场分布图
Fig. 6. (color online) E -field distribution of the microwave source.

考虑到实验条件下二极管电压不稳定, 本文对该新型器件在一定电压范围内的工作情况进行了研究, 模拟结果如图7和图8所示. 二极管电压在665—709 kV范围内变化时, 内外子微波源的功率效率始终大于25%; 且在各个电压之间内外子微波源的中心频率差变化小于100 kHz, 相位差变化小于10°; 在每个电压下频率差抖动小于±5 MHz, 相位差抖动小于±5°. 以上结果表明, 该器件在一定电压变化范围内依然能够保持较高的功率效率和锁相特性.

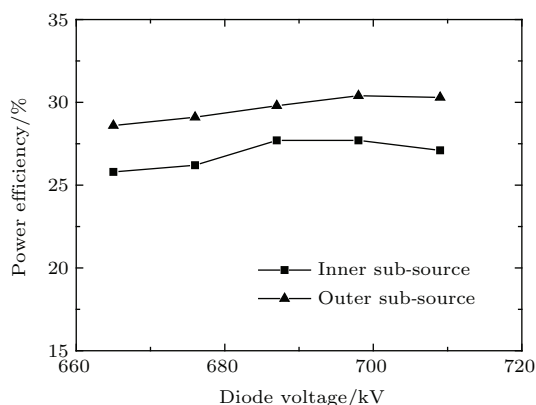


图7 内外子微波源在不同二极管电压下的功率效率
Fig. 7. Power conversion efficiency of two sub-source with the diode voltage.

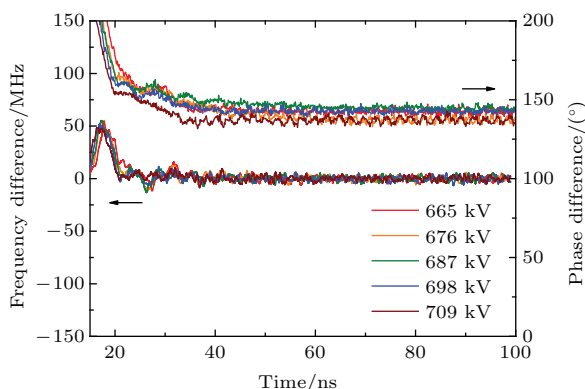


图8 (网刊彩色) 内外子微波源频率差和相位差在不同电压下的时域变化
Fig. 8. (color online) Frequency difference and phase difference between two sub-source versus time in different diode voltage.

5 结 论

本文提出了一种新型X波段低阻抗高功率微波源, 该微波源中包含内外两个子微波源, 其中内子微波源为MWCG, 外子微波源为TKA. 由于外子微波源具有良好的锁相特性, 因此该新型微波

源能够同时输出两路相干高功率微波. 粒子模拟结果表明, 在电压687 kV、磁场0.8 T条件下, 该微波源阻抗仅为36 Ω, 内外子微波源平均输出功率分别为1.20 GW和2.58 GW, 功率效率分别为28%和30%, 频率抖动小于±3 MHz, 相位差抖动小于±3°. 通过以上结果可以得出以下结论: 首先, 该微波源在降低整体阻抗, 提高注入电功率的同时, 保证了每个子微波源工作在高阻抗状态下, 维持了整体较高的功率效率; 其次, 该新型微波源由两个子微波源组成, 功率容量可以比相同频段其他器件高一倍, 在高频段下可以大幅降低器件内部射频击穿的可能; 最后, 该新型微波源能够在一定的电压范围内保证良好的锁相特性, 进一步对两路输出微波进行相干功率合成, 则能够在单管内实现更高的功率输出.

参考文献

- [1] He J T, Zhong H H, Liu Y G 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1111
- [2] Zhang X P 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology)
- [3] Arman M J 1994 *Proceeding of the 7th National Conference on HPM Technology* Monterey CA 1999 p251
- [4] Arman M J 1995 *Proceeding of SPIE*, San Diego CA, July 9 1995 p21
- [5] Arman M J 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 964
- [6] Yang W Y, Ding W 2005 *Phys. Plasmas* **12** 063105
- [7] Yang W Y, Ding W 2002 *Phys. Plasmas* **9** 622
- [8] Cao Y B, Zhang J D, He J T 2009 *Phys. Plasmas* **16** 083102
- [9] Cao Y B, He J T, Zhang J D, Zhang Q, Ling J P 2012 *Phys. Plasmas* **19** 072106
- [10] Ives L, Miram G, Read M, Mizuhara M, Borchard P, Falce L, Gunther K 2003 *Proceedings of the Particle Accelerator Conference* Saratoga CA, May 12–16 2003 p1116
- [11] Varia, K R 1978 *IEEE, MTTT, Int. Microwave Symp. Dig.* 1978 p344
- [12] Li Y M, Zhang X P, Qi Z M, Dang F C, Qian B L 2014 *Phys. Plasmas* **21** 053302
- [13] Li Y M, Zhang X P, Zhang J D, Dang F C, Yan X L 2014 *Phys. Plasmas* **21** 103302
- [14] Bai X C 2007 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology)
- [15] Qi Z M 2015 (Changsha: National University of Defense Technology)
- [16] Qi Z M, Zhang J, Zhong H H, Zhang Q, Zhu D N 2014 *Phys. Plasmas* **21** 073103
- [17] Qi Z M, Zhang J, Zhong H H, Zhu D N, Qiu Y F 2014 *Phys. Plasmas* **21** 013107

Particle-in-cell simulation of a new X-band low-impedance high power microwave source*

Yan Xiao-Lu¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Ping^{1)†} Li Yang-Mei¹⁾

1) (College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

(Received 4 March 2016; revised manuscript received 31 March 2016)

Abstract

High power microwave (HPM) source is attractive in generating gigawatt (GW) class microwaves based on the beam-wave interaction. Generally, HPM source with a high beam-wave conversion efficiency has a higher impedance. To improve the single-tube output power of HPM source, reducing the impedance of the device and increasing its power capacity are necessary. In this paper, a new low-impedance HPM source is proposed and proved to be capable of generating two phase-locked high power microwaves, which makes it promising to realize a higher combined power in a single HPM device.

The new low-impedance HPM device consists of a two-cavity TKA (denoting the outer sub-source in the following) and a multiwave Cerenkov generator (referring to the inner sub-source below) inserted in the TKA inner conductor. These two sub-sources are connected in parallel and share a common magnetic field. A dual-concentric annular cathode is used in this microwave source, which is capable of emitting two concentric annular electron beams and driving the internal and external sub-source simultaneously. The advantages of this device are reducing the impedance and improving the injection electric power. When a voltage pulse is applied to the diode, part of microwaves generated in the inner sub-source will leak into the outer sub-source (i.e., TKA) through the A-K gap. By amplifying the leakage microwaves, the TKA will be easily locked by the inner sub-source. Considering the fact that the microwave source consists of two sub-sources, the power capacity will also be greatly improved.

As a result, particle-in-cell simulation indicates that when the diode voltage is 687 kV and the axial magnetic field is 0.8 T, two microwave beams that have a nearly identical frequency of 9.72 GHz and output powers of 1.20 GW and 2.58 GW respectively, are generated. The corresponding power conversion efficiencies are 28% and 30%, respectively. The frequency difference between these two microwaves fluctuates within ± 3 MHz and their phase difference is not in excess of $\pm 3^\circ$. When the diode voltage changes from 665 kV to 709 kV, frequency difference between the two sub-sources fluctuates within ± 3 MHz and their phase difference fluctuation is within $\pm 5^\circ$ in one voltage burst; the phase difference changes 10° in this voltage range. The impedance of this HPM source is as low as 36Ω .

To sum up, the new HPM source proposed in this paper has a lower impedance and higher power capacity. The phase difference between the inner sub-source and the outer sub-source is very stable and favorable for the coherent power combination, which indicates that the new HPM source promises to realize a higher output power in a single-tube device.

Keywords: high power microwave source, low-impedance, particle-in-cell simulation, power combination

PACS: 84.90.+a, 85.45.-w

DOI: 10.7498/aps.65.138402

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA8037074A).

† Corresponding author. E-mail: zhangxiaoping@mudt.edu.cn