

X波段同轴多注相对论速调管 放大器模拟研究

刘振帮^{1,2}, 黄 华², 金 晓², 陈怀璧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高功率微波技术重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 设计了工作在 X 波段的同轴多注相对论速调管放大器, 建立了带输入、输出波导结构的三维整管模型, 采用三维电磁粒子模拟软件对其高频特性进行了优化设计, 对电子束经过输入腔后的束流调制、注入微波吸收情况、中间腔对束流的调制以及输出腔的微波提取情况进行了模拟研究. 在输入微波功率为 70kW, 电子束束压为 600kV, 束流为 5kA, 轴向引导磁感应强度为 0.6T 的条件下, 输出微波功率达到了 1.3GW, 效率为 43%, 增益为 42dB, 在较低的输入微波功率和较小的轴向引导磁感应强度的情况下, 模拟实现了 X 波段 RKAGW 级的微波功率输出.

关键词: 相对论速调管放大器; X 波段; 同轴多注; 粒子模拟

中图分类号: TN62 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 06-1198-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.024

Particle Simulation of X-Band Coaxial Multi-Beam Relativistic Klystron Amplifier

LIU Zhen-bang^{1,2}, HUANG Hua², JIN Xiao², CHEN Huai-bi¹

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

2. Institute of Applied Electronics, Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: The three-dimensional whole tube model for an X-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier is designed. With the integrated model, the high frequency characteristic analysis and the tube are presented. A three-dimensional full electromagnetic particle in cell code is used to simulate the absorption of injected microwave, and the fundamental harmonic modulated current when electron beams propagate through the input cavity and idler cavity gaps have also been simulated. A 1.3GW averaged microwave power over the oscillator period is generated by simulation with 600kV electron beam voltage, 5kA current and 0.6T leading magnetic induction intensity, the frequency is 9.37GHz and the efficiency is 43%.

Key words: relativistic klystron amplifier; X-band; coaxial multi-beam; particle in cell

1 引言

相对论速调管放大器(Relativistic Klystron Amplifier, RKA)是一类重要的高功率微波器件,具有高功率、高效率、相位和幅度稳定等优点^[1],在新型加速器、高功率雷达、新型通信系统等领域都有广泛的应用^[2,3].但是随着应用需求的发展,常规结构 RKA 在向更高峰值功率与工作频率的方向发展时出现了一些无法克服的困难,对于广泛应用的常规结构 RKA,其效率进一步提高的空间已经非常小,因此要提高输出功率,只有增加 RKA 的工作电压和电流,但是高工作电压会带来高压击穿、更多 X 射线的产生、电源复杂度提高等问题.而高工作

电流会降低整管效率,产生较大的空间电荷作用力,从而需要更强的聚焦磁场,并会增加噪声和阴极负载^[4].另一方面,RKA 的工作机理要求其各个谐振腔之间的微波被漂移管隔断,即漂移管须对工作频率处的微波截止,因此高频段 RKA 的漂移管半径很小,又由于空间电荷限制流,对一定半径尺寸的漂移管存在传输束流的上限值,即限制了常规结构 RKA 往更高工作频率方向发展^[5].为了提高 RKA 的工作频率和输出功率以及转换效率,本文分析与设计了工作在 X 波段的同轴多注 RKA,采用多个低导流系数的电子注并行工作,可以在较低工作电压水平下获得较高的总导流系数^[6],同时采用同轴谐振腔,使谐振腔的体积做得较大,电子束不

必集中于谐振腔中心通过,可以增加阴极的有效发射面积,并提高功率容量,在获得高功率的同时,还具有工作电压低、效率和增益高的特点.采用三维电磁粒子模拟软件对工作频率为 9.37GHz 的同轴多注 RKA 的高频系统进行优化设计,模拟实现了 X 波段 RKAGW 级的微波功率输出.

2 高频系统的冷腔结构设计

采用单间隙单重入结构同轴腔作为微波输入结构,输入腔谐振频率设计为 RKA 的工作频率 9.37GHz,工作模式为同轴 TM01 模式.由于在输入腔的某一侧开了耦合孔后,输入腔内的电磁场受到扰动,输入腔间隙上的电场不再轴对称且沿角向变得不均匀,设计采用 $5/4\lambda$ 的输入腔(λ 为器件的工作波长),以增大耦合孔与输入腔束波相互作用间隙的距离,使输入腔间隙处的电场沿角向尽量均匀,以使得每一束电子束在输入腔间隙处受到的调制相同.中间腔采用环形结构的同轴腔,工作模式为同轴 TM01 模式.为了抑制调制束流高次谐波的不断增长,输入腔与中间腔采用不同的结构,两者具有相同的主模谐振频率,但具有不同的高次模谐振频率.输出腔采用同轴双间隙结构,是为了降低输出间隙处的电场强度,提高输出微波的功率,输出腔的谐振频率也设计为 RKA 的工作频率 9.37GHz.各个谐振腔工作模式的谐振频率和外观品质因数如表 1 所示,模拟计算设定腔体的材料为不锈钢.

表 1 腔体参数

	输入腔	中间腔	输出腔
谐振频率/GHz	9.37	9.372	9.37
外观品质因数	110	827	37

3 同轴多注 RKA 注波相互作用模拟及优化设计

X 波段同轴多注 RKA 计算模型如图 1 所示,其中图 1(a)所示为同轴多注 RKA 的纵向剖面图,图 1(b)所

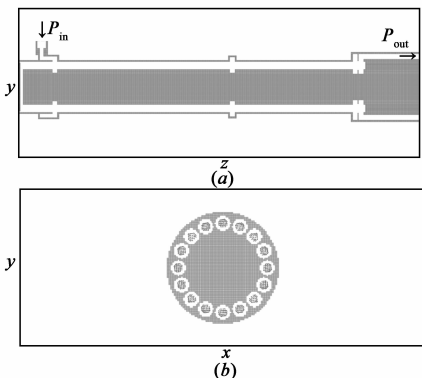


图 1 腔体剖面图及电子束轨迹

示为漂移管的横向剖面图以及束流轨迹,电子束分成了 16 束.该模型将输入输出装置设计在内,与实际的管子结构相符合,是一个较为完整的模型.

3.1 束流调制的粒子模拟

采用图 1 所示的三维整管模型,标准矩形波导内输入微波 P_{in} 的功率为 70kW,其频率为 9.37GHz,微波在矩形波导内为 TE10 模,经过耦合孔注入输入腔,在输入腔束波相互作用间隙激励起工作模式 TM01 模.设定电子束束压为 600kV,束流为 5kA,轴向引导磁感应强度为 0.6T,采用三维电磁粒子模拟计算软件对电子束经过输入腔后的调制情况进行研究.输入腔高频参数的设计应该保证在 RKA 的工作频率处,输入 RKA 的高频能量全部被电子束和谐振腔所吸收.

在微波输入端口监测输入腔输入微波 P_{in} 的吸收情况如图 2 所示,模拟计算中设定输入微波为负方向,当设计的输入腔参数匹配,输入速调管的高频能量全部被电子束和谐振腔所吸收,没有微波反射时,所监测到的输入微波波形在稳定后其幅度包络上限值应为零.可知此时输入速调管的高频能量基本被电子束和谐振腔所吸收,微波反射很小,设计的输入腔参数匹配.在输入腔间隙后 22cm 处得到了 500A 的最大基波调制束流,调制深度为 10%,基波频率为 9.37GHz.

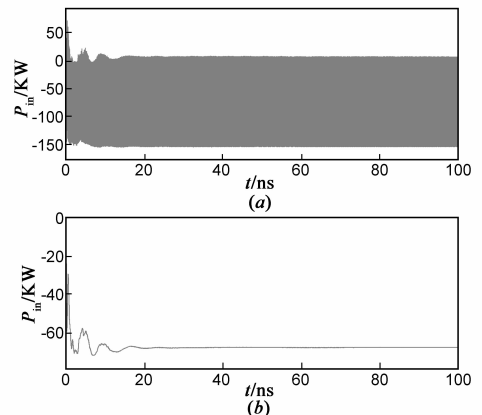


图 2 输入腔输入微波吸收情况

为了增大基波束流调制深度,在输入腔间隙后调制束流最大位置处放置中间腔,对电子束经过中间腔间隙后的调制情况进行模拟.基波调制束流随轴向距离的变化如图 3 所示.由图 3 可以看出电子束在中间腔后 10cm 处产生了 5.7kA 的最大基波调制束流,调制深度达到了 114%,束波相互作用是高度的非线性过程.因此对输出腔的设计要求较高,输出腔须在工作频率点处谐振,若激励起高次模,会使得输出微波频谱不纯,而且输出微波主模功率很低,总体效率就很低^[7].

3.2 同轴多注 RKA 微波提取结构的模拟设计

从束流调制可以看出,由于多注 RKA 高增益的特

点, X 波段同轴多注 RKA 在较低的外部输入微波功率水平下, 采用一个中间腔就可以使束流得到了 114% 的基波调制深度. 输出腔采用同轴双间隙结构, 以减小输出腔作用间隙处的电场强度, 避免间隙电场击穿, 以及提高输出效率. 输出腔内两间隙上的轴向电场方向相反, 工作模式为 π 模场^[8]. 在中间腔间隙后基波束流调制最大位置处放置输出腔进行微波提取模拟, 通过监测输出同轴线右端面的坡印廷面积分得到输出微波 P_{out} 随时间 t 的变化如图 4 所示. 图 5 为输出腔微波输出间隙处电压 V_{out} 随时间 t 的变化以及间隙电压的频谱.

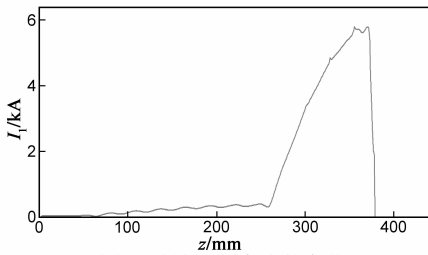


图3 基波调制束流的变化

由图 4、图 5 可以看出, 粒子模拟的输出微波功率为 1.3GW, 效率为 43%, 微波输出稳定且频谱很纯.

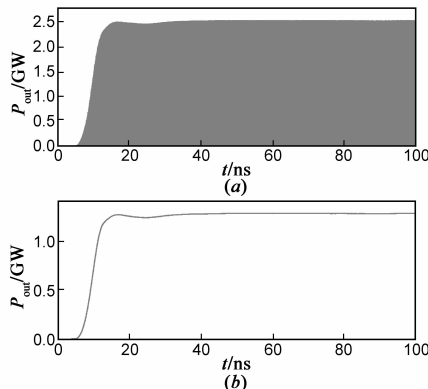


图4 输出微波随时间的变化

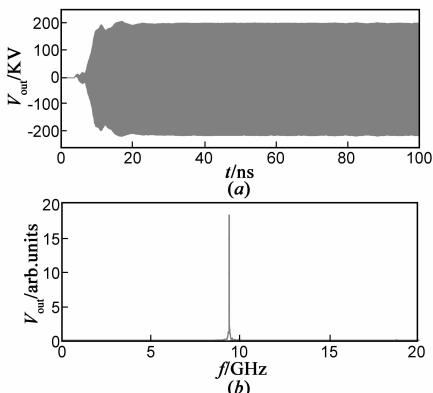


图5 微波输出间隙电压及其频谱

4 结论

分析与设计了工作在 X 波段的同轴多注 RKA, 对管子高频系统进行了冷腔结构分析, 并采用三维电磁粒子模拟软件对相对论电子束经过同轴多注 RKA 输入腔、中间腔间隙后的调制情况进行了模拟, 对腔体参数进行了优化设计. 在输入微波功率为 70kW、电子束束压为 600kV、束流为 5kA、轴向引导磁感应强度为 0.6T 的条件下, 输出微波功率达到了 1.3GW, 效率为 43%, 增益为 42dB, 在较低的输入微波功率和较小的轴向引导磁感应强度的情况下, 模拟实现了 X 波段 RKAGW 级的微波功率输出. 该三维模拟所设计的模型结构完整, 与实际管子结构相符合, 对实际管子的研制具有较大的参考意义, 后续相关的实验研究还在进行中.

参考文献

- [1] Serlin V, Frideman M. Development and optimization of the relativistic klystron amplifier[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1994, 22(5): 692 - 700.
- [2] 江伟华, 张驰. 高功率微波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 293 - 335.
Jiang W H, Zhang Ch. High Power Microwave[M]. Beijing: National Defence Industry Press. 2009: 293 - 335. (in Chinese)
- [3] Robert JBarker, Edl Schamiloglu. 高功率微波源与技术[M]. 刘国治, 周传明, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005. 57 - 63.
- [4] 丁耀根. 多注速调管技术新进展[J]. 真空电子技术, 2002, 8(5): 8 - 14.
Ding Yao gen. The technology development of the multi beam klystron[J]. Vacuum Electronics, 2002, 8(5): 8 - 14. (in Chinese)
- [5] Friedman M, Krall J, et al. Externally modulated IREBs[J]. J Appl Phys 1988, 55(26): 3353 - 3379.
- [6] 张瑞, 王勇. 高功率多注速调管的发展现状[J]. 真空电子技术, 2007, 3(2): 25 - 30.
Zhang Rui, Wang Yong. Development of high peak power multi-Beam klystron[J]. Vacuum Electronics, 2007, 3(2): 25 - 30. (in Chinese)
- [7] 黄华, 罗雄, 雷禄容, 罗光耀. 长脉冲相对论速调管放大器杂频振荡的分析与抑制[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1473 - 1477.
- [8] Huang Hua, Luo Xiong, Lei Lu-rong, Luo Guang-yao. Analysis and suppress of multi-frequency oscillation on long pulse relativistic klystron amplifiers[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1473 - 1477. (in Chinese)
- [8] 雷禄容, 范植开, 黄华, 何璇. 相对论速调管放大器双间隙输出腔的粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1338 - 1342.

Lei Lu-rong, Fan Zhi-kai, Huang Hua, He Hu. Particle simulation of relativistic klystron amplifier double-gap output cavity

[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1338 - 1342. (in Chinese)

作者简介



刘振帮 男, 1986 年 6 月出生于广西省来宾市, 现为清华大学工程物理系博士研究生, 研究方向为高功率微波技术.

E-mail: liuzb08@gmail.com



黄 华 男, 1970 年 10 月出生于重庆合川, 博士, 研究员, 现在中国工程物理研究院应用电子学研究所微波技术部工作, 主要从事高功率微波源研究工作, 获部级科技进步二等奖 5 项, 三等奖 3 项, 在国内外期刊发表论文 20 余篇, 合作专著一本.

E-mail: hhua0457@163.com