

高增益相对论速调管放大器相位特性的模拟与实验研究

吴洋 许州 谢鸿全 李正红 马乔生

Simulation and experimental study of phase characteristics in high-gain relativistic klystron amplifier

Wu Yang Xu Zhou Xie Hong-Quan Li Zheng-Hong Ma Qiao-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

介质涂覆位置对双S弯排气系统电磁散射特性影响研究

Electromagnetic scattering characteristics of double S-shape exhaust nozzle with different coating medium parts

物理学报.2015, 64(2): 024103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024103>

开孔矩形腔体电磁泄漏特性的解析研究

Analytical formulation for electromagnetic leakage from an apertured rectangular cavity

物理学报.2014, 63(21): 214103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214103>

含泡沫面元模型的海面电磁散射研究

Research on the facet model of electromagnetic scatterings from rough sea surface with foams

物理学报.2014, 63(21): 214104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214104>

早期乳腺肿瘤的超宽带微波稳健波束形成成像检测系统

Ultra-wideband microwave robust Capon beamforming imaging system for early breast cancer detection

物理学报.2014, 63(19): 194102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194102>

含卷浪 Pierson-Moscovitz 谱海面电磁散射研究

Modeling and electromagnetic scattering from the overturning wave crest

物理学报.2014, 63(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164102>

高增益相对论速调管放大器相位特性的模拟与实验研究*

吴洋^{1)2)†} 许州¹⁾ 谢鸿全³⁾ 李正红¹⁾ 马乔生¹⁾

1)(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

2)(高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

3)(西南科技大学理学院, 绵阳 621010)

(2014年9月10日收到; 2014年11月1日收到修改稿)

为实现高功率微波的相干功率合成, 开展了S波段高增益相对论速调管放大器输出微波相位特性的粒子模拟和实验研究, 粒子模拟与实验结果均表明电子回流是影响输出微波相位特性的主要因素. 在有效控制电子回流的情况下, 实验实现输出微波相位抖动小于 $\pm 10^\circ$, 锁相时间达90 ns. 以此计算, 若相位抖动在 $\pm 10^\circ$ 内满足均匀分布, 十台该高增益相对论速调管放大器的功率合成效率将大于99%.

关键词: 相对论速调管放大器, 相位特性, 功率合成, 回流电子

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Dk

DOI: 10.7498/aps.64.084102

1 引言

随着高功率微波(HPM)技术的发展, 单个器件的输出功率越来越接近其理论限制^[1,2], 但目前单个器件的输出功率还不能完全满足其任务需求, 因此突破单个器件输出功率的限制是当前HPM研究中急需解决的问题. 在目前的技术水平下, 可行的技术路线就是多台HPM源的相干功率合成^[3]. 为实现多台HPM源的相干合成, 必须精确控制每个源的输出频率和相位^[4], 但实际上, HPM源的相位控制远比传统电真空器件困难^[5,6]. 在HPM器件中, 输出微波幅度和相位稳定的相对论速调管放大器(RKA)是功率合成的首选器件之一^[7], 近年来得到广泛而深入的研究. 输出微波相位作为功率合成最重要的参数之一, 直接关系到功率合成的效率. 文献^[8]主要从理论上研究了电压波动对RKA相位的影响; 文献^[9]借助粒子模拟软件全面分析了输出微波相位随电压、束流、电子束前沿等电子

束参数以及腔体和漂移管长度等几何参数的变化. 但是这些分析都是考虑电子束参数、结构参数变化对工作模式束波相互作用过程的影响, 并未考虑非工作模式自激振荡对器件输出微波相位的影响. 对于RKA, 尤其是高增益RKA, 由于工作流强较高, 自激振荡问题十分严重, 自激振荡严重影响工作模式的束波相互作用过程, 破坏输出微波相位的稳定性. 要开展基于RKA的功率合成, 就必须研究自激振荡对输出微波相位的影响. 本文利用粒子模拟软件研究了高增益RKA自激振荡对输出微波相位的影响, 并与实验结果进行了对比, 证明电子回流是影响高增益RKA输出微波相位的主要因素. 在有效控制电子回流的情况下, 器件输出微波在90 ns范围内的相位抖动可以达到小于 $\pm 10^\circ$ 的水平.

2 高增益RKA相位特性的粒子模拟

高增益RKA的三维粒子模拟模型如图1所示. 为降低注入微波功率, 此器件在结构上采用了两个

* 国家自然科学基金(批准号: 61271109)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuyang_851219@163.com

中间腔以增强工作模式对电子束的调制. 为抑制高次模式在谐振腔之间的耦合, 器件在两个中间腔之间的漂移管壁加载了微波衰减材料^[10], 微波损耗层的电导率为0.5 S/m, 长8 cm, 厚1.6 cm. 器件输出模式是横电磁(TEM)模, 支撑杆用于同轴内导体的支撑, 同时起导流作用. 为充分利用脉冲功率源的功率, 在粒子模拟中选择电子束参数为电压900 kV, 电流8 kA, 阴极半径3.0 cm, 注入微波频率为2.88 GHz.

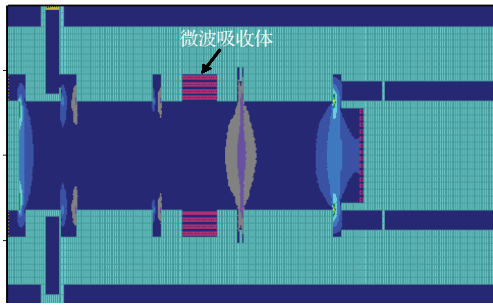


图1 (网刊彩色) 高增益RKA的三维结构和电场分布
Fig. 1. (color online) High gain relativistic klystron amplifier structure and its electric field distribution.

图2是器件在注入微波功率为6 kW时器件输出微波的射频(RF)波形以及输出微波和注入微波的相对相差曲线. 相对相差的定义为

$$\Delta\varphi = 2\pi \int (f_{\text{out}} - f_{\text{in}}) dt, \quad (1)$$

其中, f_{out} 是输出微波频率, f_{in} 是注入微波的频率. 该定义未考虑注入微波的初始相位, 着重考察输出微波和注入微波的相对相位差.

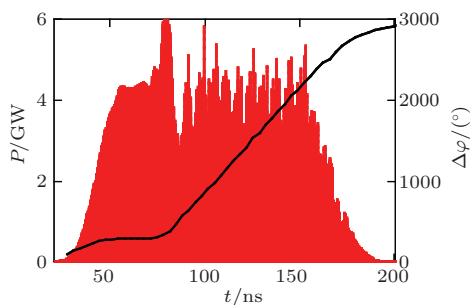


图2 注入微波功率6 kW下输出微波射频波形和相对相差曲线
Fig. 2. RF output power and relative phase difference with input RF power of 6 kW.

从图2可以观察到明显的自激振荡, 起振时间约为70 ns. 输出微波的相对相差在20—50 ns范围内缓慢增加并趋于稳定, 在70 ns后由于高次模

式激励, 相差迅速增大, 表明器件已不能锁频锁相. 图3是输出微波的频谱, 除主频2.88 GHz外, 还存在一个频率稍高的振荡频率2.90 GHz.

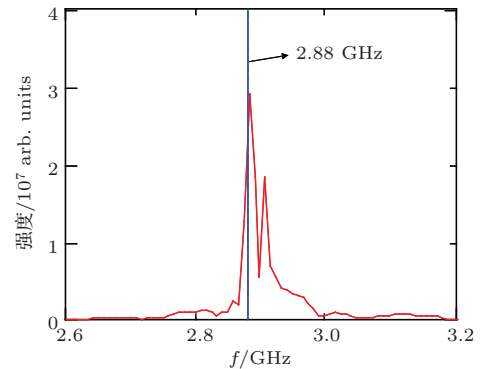


图3 注入微波功率6 kW下输出微波频谱
Fig. 3. Spectrum of RF output power with input RF power of 6 kW.

RKA中高次模式的自激振荡按照反馈机理大致可以分为两类: 1) 当高次模式的振荡频率高于漂移管截止频率时, 振荡模式在谐振腔之间的耦合是导致自激振荡的主要因素^[11], 该类振荡由于振荡频率明显高于工作模式的频率, 所以在对输出微波的频谱进行傅里叶分析时, 较容易与工作模式相区分, 目前最为通用和有效的抑制办法是在漂移管中加载微波损耗层, 切断或减弱振荡模式的耦合以提高高次模式的起振电流; 2) 当高次模式的振荡频率低于漂移管截止频率时, 电子回流是导致自激振荡的主要因素^[12], 其起振机理与反射速调管类似. RKA通常采用弱相对论电子束, 输出腔的间隙电压接近甚至超过电子束的直流电压, 很容易导致电子的回流. 同时由于回流电子激励起的振荡频率与器件工作频率较接近, 因此在对输出微波的频谱进行傅里叶分析时, 较容易与工作模式混淆.

图4是输出腔前漂移管壁收集电流的波形, 由于回流电子感受到的直流空间电荷电场和空间电荷磁场的作用力均是散焦力, 所以回流电子不能被引导磁场较好地约束, 较易轰击管壁. 从图4可以看到, 当模拟时间超过70 ns后, 管壁将收集到回流电子, 由于发生回流时电子束已是群聚较好的束团, 因此回流电子束也表现出调制特性. 电子回流的时间与器件自激振荡的起振时间一致, 同时自激振荡的频率为2.90 GHz, 远低于漂移管最低模式TE₁₁的截止频率, 不存在腔间耦合, 因此可以确定在该RKA内的自激振荡是由于电子回流引起的.

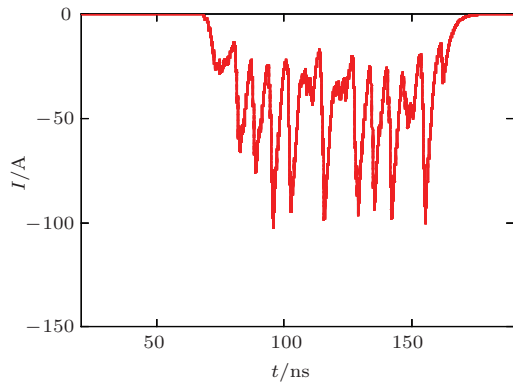


图4 输出腔前漂移管壁收集的回流电流
Fig. 4. Retrograde current collected by drift tube wall before the output cavity.

对于电子回流引起的自激振荡, 可以通过减小注入微波功率以降低输出腔的间隙电场的方式来减弱回流电子的强度, 从而消除或减弱自激振荡对工作模式的影响. 图5是器件在注入微波功率为5 kW时器件输出微波的射频波形和相对相位差曲线. 从图5可以看出, 降低注入微波功率后, 电子回流引起的自激振荡得到明显改善. 器件在输出微波的平顶阶段相对相差保持恒定, 锁相时间约100 ns, 与输出微波的平顶宽度一致. 理论上说, 在电子束电压的上升沿, 由于电子的速度逐渐增大和受多普勒效应的影响, 输出微波的频率将略高于注入微波的频率, 这将导致相对相差逐渐增加; 在电子束的平顶阶段, 输入和输出微波频率完全一致, 相对相差将保持稳定; 在电子束电压的下降沿, 输出微波的频率将略低于注入微波的频率, 相对相差逐渐减小. 图5所示的相对相差曲线在电子束电压的上升沿和平顶阶段与理论符合, 说明器件内无自激振荡发生; 但在电子束电压的下降沿, 相对相差先增加后减小, 与理论不符, 暗示在该阶段可能出现自激振荡.

图6是注入微波功率为5 kW时器件输出微波的频谱, 输出微波的主频为2.88 GHz, 与注入微波频率一致. 从频谱曲线中很难观察到自激振荡的频率, 但是可以看到频谱曲线关于中心频率2.88 GHz不对称, 高频成分明显多于低频成分. 我们对这一问题的解释是: 在电子束电压的下降沿, 由于电子束的动能减小, 导致部分电子发生回流, 从而激励起自激振荡; 但回流随着输出腔间隙电压的减小而迅速减弱, 所以输出微波的相差在电压下降沿表现出先增加后减小的趋势; 同时由于回流持续的时间很短, 自激振荡的强度较弱, 因此在输出微波的频

谱中无法观察到类似于图3明显的自激振荡的特征频率峰.

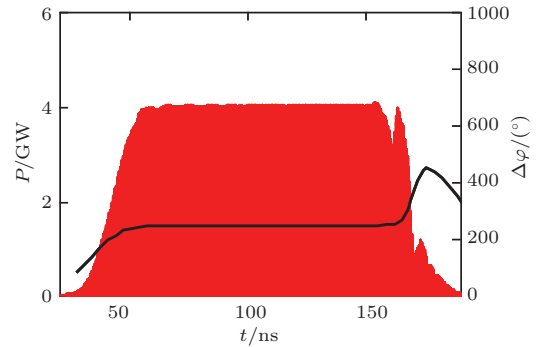


图5 注入微波功率5 kW下输出微波射频波形和相对相差曲线
Fig. 5. RF output power and relative phase difference with input RF power of 5 kW.

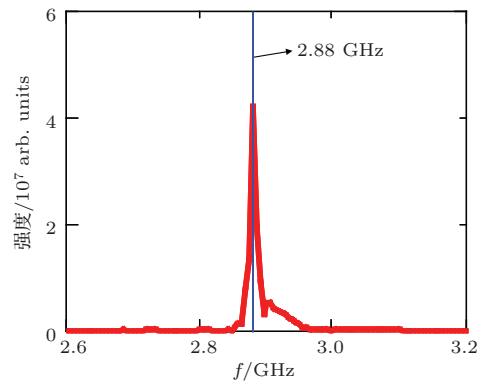


图6 注入微波功率5 kW下输出微波频谱
Fig. 6. Spectrum of RF output power with input RF power of 5 kW.

理论上说, 进一步降低注入微波功率可以完全解决电子回流的问题, 但是注入功率的降低将导致器件输出功率相应降低. 我们放弃恒定微波功率馈入的方式, 而是降低电压下降沿阶段的注入微波功率, 可以实现不影响输出微波功率的前提下解决电子回流的问题. 图7是采用该馈入方式后器件输出微波的射频波形和包络波形, 器件输出功率为1.95 GW, 增益为56.9 dB. 图8是输出微波的时频曲线和相对相差曲线: 在电子束电压上升沿, 输出微波的频率略高于注入微波的频率, 相对相差逐渐增加; 在电子束电压平顶阶段, 输入和输出微波频率完全一致, 相对相差将保持稳定; 在电子束电压的下降沿, 输出微波的频率略低于注入微波的频率, 相对相差逐渐减小. 相差和频率的变化趋势与理论预计完全符合, 说明电子回流引起的自激振荡被完全抑制, 器件锁相时间约为100 ns. 图9是器

件输出微波的频谱, 输出微波的主频为2.88 GHz, 与注入微波频率一致, 同时频谱曲线关于中心频率2.88 GHz 完全对称.

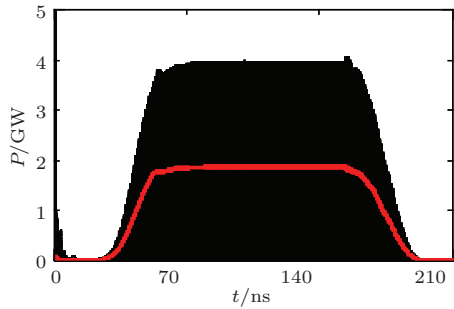


图7 变微波馈入功率下输出微波射频和包络波形
Fig. 7. RF output power and its envelope with variably injected RF power.

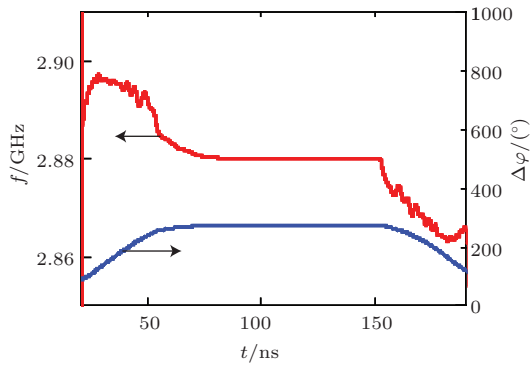


图8 变微波馈入功率下输出微波时频曲线和相对相差曲线
Fig. 8. RF output frequency and relative phase difference with variably injected RF power.

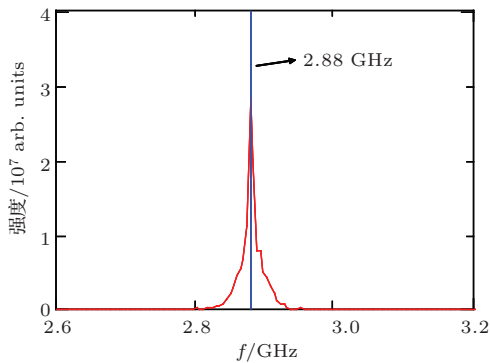


图9 变微波馈入功率下输出微波频谱
Fig. 9. Spectrum of RF output power with variably injected RF power.

3 高增益RKA相位特性的实验研究

实验在LTD加速器平台上开展, 电子束电压为900 kV, 电流为8 kA; 高增益RKA的微波种子源采用S波段大功率多注速调管, 该种子源可以

提供输出功率为1—100 kW连续可调的种子微波, 注入微波频率为2.88 GHz; 器件的引导磁场约为1.2 T, 由螺线管线圈产生. 在实验中, 采用圆锥喇叭天线进行微波辐射, 在喇叭天线的远场区采用BJ-32开口波导作为接收天线, 通过示波器直接采集辐射微波的射频信号. 示波器型号为Lecroy WavePro 740Zi, 可以对射频信号进行快速傅里叶变换处理获得辐射微波的频谱特性, 同时示波器可以对两通道的射频信号(注入微波和辐射微波)进行对比, 得到两通道射频信号的相对相差特性. 实验研究了不同注入微波功率条件下器件输出微波的射频、相位特性. 图10—图12分别是注入微波功率为12 kW时器件输出微波的射频波形、频谱和相对相差曲线. 可以看到, 当注入微波功率较高时, 输出微波频谱中存在一个明显的电子回流自激振荡频率峰, 为2.90 GHz, 频谱中高于注入微波频率2.88 GHz 的频率分量明显多于低频成分; 同时输出微波的相差维持在 $\pm 10^\circ$ 的锁相时间仅有40 ns左右. 实验结果与模拟中注入微波功率为6 kW时的结果较符合.

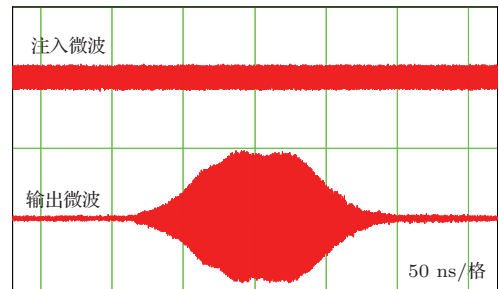


图10 注入功率12 kW下注入和输出微波射频波形
Fig. 10. Waveforms of input and output microwaves with input RF power of 12 kW.

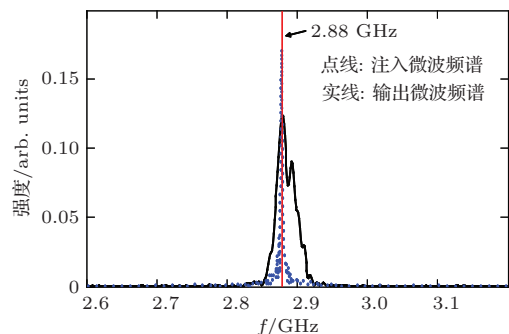


图11 (网刊彩色) 注入功率12 kW下注入和输出微波频谱
Fig. 11. (color online) Spectra of input and output microwaves with input RF power of 12 kW.

图13—图15分别是注入微波功率为10 kW时器件输出微波的射频波形、频谱和相对相差曲线.

输出微波的频谱中已很难观察到回流电子自激振荡的频率峰,但频谱中高频分量仍略多于低频分量;输出微波相差维持在 $\pm 10^\circ$ 的锁相时间达到90 ns左右,但在微波脉冲的后沿相对相差将单调增加,说明在整个脉冲后沿都伴随有回流电子自激振荡,但强度较弱,这与模拟中注入微波功率为5 kW时的相差曲线略有不同.

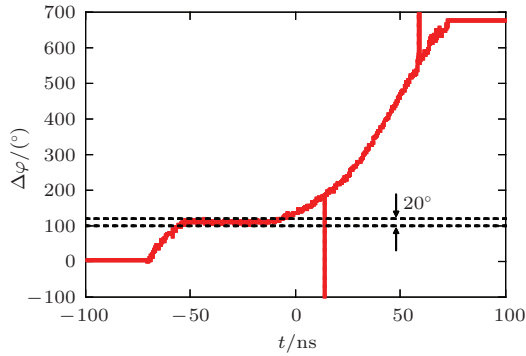


图12 注入功率12 kW下输出微波相对相差曲线
Fig. 12. Relative phase difference curve with input RF power of 12 kW.

模拟差等实际因素.同时,实验中很难实现模拟中采用的变馈入微波功率的方式来改善电子回流,因此,该方法在模拟中的应用更多是验证我们的一些物理分析.总之,通过对器件输出微波的频谱、时频和相位特性的模拟和实验分析,支持了我们的电子回流自激振荡导致器件输出微波相位特性改变的观点,并最终实验实现相位抖动 $\pm 10^\circ$ 、锁相时间90 ns的器件指标.

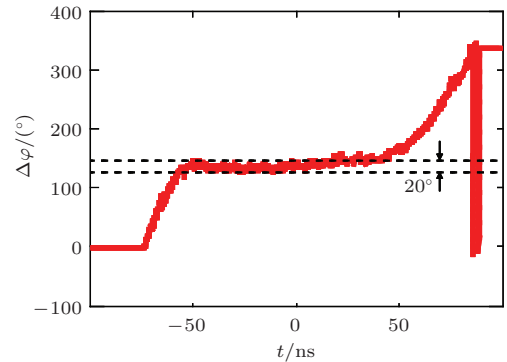


图15 注入功率10 kW下输出微波相对相差曲线
Fig. 15. Relative phase difference curve with input RF power of 10 kW.

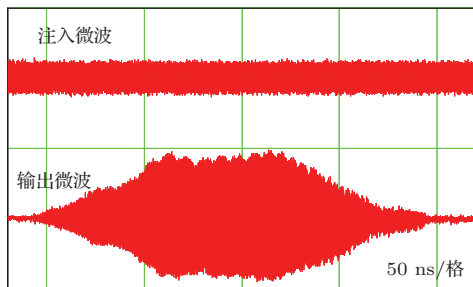


图13 注入功率10 kW下注入和输出微波射频波形
Fig. 13. Waveforms of input and output microwaves with input RF power of 10 kW.

4 结 论

本文开展了自激振荡对高增益RKA输出微波相位特性影响的粒子模拟和实验研究,粒子模拟与实验表明电子回流是破坏高增益RKA输出微波相位稳定性的主要因素.实验获得了相位抖动小于 $\pm 10^\circ$ 、锁相时间90 ns的输出微波.以此计算,若相位抖动在 $\pm 10^\circ$ 内满足均匀分布,10台该高增益RKA的功率合成效率将大于99%,为下一阶段开展多台源的相干功率合成奠定了基础.

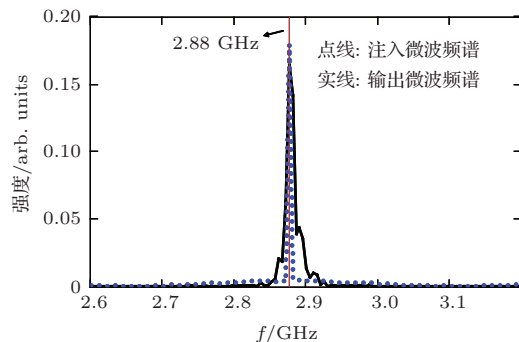


图14 (网刊彩色)注入功率10 kW下注入和输出微波频谱
Fig. 14. (color online) Spectra of input and output microwaves with input RF power of 10 kW.

实验中注入微波功率高于模拟所需的注入功率可能是因为模拟中未考虑馈入波导的衰减、输入窗等连接件的反射以及实验中的电子束品质比

参考文献

- [1] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 525
- [2] Friedman M, Krall J, Lau Y Y, Serlin V 1990 *Rev. Sci. Instrum.* **61** 171
- [3] Benford J, Swegle J, Schamiloglu E 2007 *High Power Microwaves* (2nd Ed.) (New Mexico: CRC Press) p313
- [4] Woo W, Benford J, Fittinghoff D 1989 *J. Appl. Phys.* **65** 861
- [5] Xiao R Z, Chen C H, Song W, Zhang X W, Shun J, Song Z M, Zhang L J, Zhang L G 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 013301
- [6] Teng Y, Song W, Sun J, Xiao R Z, Song Z M 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 043303

- [7] Huang H, Feng D C, Luo G Y 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 384
- [8] Yang Z P, Bian Q Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6141 (in Chinese) [杨振萍, 边清泉 2009 物理学报 **58** 6141]
- [9] Huang H, Guo Y H, Jin X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 035201 (in Chinese) [黄华, 郭焱华, 金晓 2011 物理学报 **60** 035201]
- [10] Wu Y, Xie H Q, Xu Z 2014 *Chin. Phys. C* **38** 017001
- [11] Wu Y, Xu Z, Jin X, Li Z H, Tang C X 2012 *Phys. Plasmas* **19** 023102
- [12] Wu Y, Xu Z, Jin X, Li Z H, Tang C X 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 2762

Simulation and experimental study of phase characteristics in high-gain relativistic klystron amplifier*

Wu Yang^{1)2)†} Xu Zhou¹⁾ Xie Hong-Quan³⁾ Li Zheng-Hong¹⁾ Ma Qiao-Sheng¹⁾

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

2) (*Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Mianyang 621900, China*)

3) (*College of Science, Southwestern University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

(Received 10 September 2014; revised manuscript received 1 November 2014)

Abstract

In order to realize the combination of the coherent high power microwave, an S-band high gain relativistic klystron amplifier with high phase stability is presented and studied theoretically and experimentally. The phase characteristics of the output microwave are explored in particle-in-cell code and experiment. The experimental results accord well with the simulation results, which indicates that the parasitic oscillation excited by retrograde electrons is the main cause of phase variation in the development of high-gain relativistic klystron with high phase stability. When the input RF power is 10 kW, a microwave pulse with about $\pm 10^\circ$ in relative phase difference fluctuation between output and input is obtained in experiment. And the corresponding locking duration is about 90 ns. Accordingly, the expectation of power combination efficiency of 10 high-gain relativistic klystron amplifiers can be achieved to be 99% with continuous uniform distribution of random relative phase difference.

Keywords: relativistic klystron amplifier, phase characteristics, power combination, retrograde electrons

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Dk

DOI: 10.7498/aps.64.084102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271109).

† Corresponding author. E-mail: wuyang_851219@163.com