

S波段长脉冲相对论速调管放大器中杂模振荡导致的脉冲缩短抑制研究

陈昭福 黄华 常安碧 许州 何琥 雷禄容 胡进光 袁欢 刘振帮

Investigation and suppression of pulse shortening problem caused by non-working mode self-excitation in an S-band long pulse relativistic klystron amplifier

Chen Zhao-Fu Huang Hua Chang An-Bi Xu Zhou He Hu Lei Lu-Rong Hu Jin-Guang Yuan Huan Liu Zhen-Bang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 238402 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.238402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238402>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于离轴高增益速调管的X波段高功率合成技术研究

占昌和, 李天明, 蒙林, 李正红, 吴洋, 邵剑波

2014, 63(23): 238405. 全文: [PDF](#) (700KB)

0.14THz基模多注折叠波导行波管的理论与模拟研究

颜胜美, 苏伟, 王亚军, 徐翱, 陈樟, 金大志, 向伟

2014, 63(23): 238404. 全文: [PDF](#) (1139KB)

基于三端口网络模型的折叠波导行波管注波相互作用理论研究

颜卫忠, 胡玉禄, 李建清, 杨中海, 田云先, 李斌

2014, 63(23): 238403. 全文: [PDF](#) (713KB)

X波段同轴多注相对论速调管放大器的初步实验研究

刘振帮, 金晓, 黄华, 陈怀璧, 王淦平

2012, 61(23): 238402. 全文: [PDF](#) (3535KB)

X波段长脉冲同轴多注相对论速调管放大器的分析与设计

刘振帮, 金晓, 黄华, 陈怀璧

2012, 61(12): 128401. 全文: [PDF](#) (2229KB)

S波段长脉冲相对论速调管放大器中杂模振荡导致的脉冲缩短抑制研究

陈昭福[†] 黄华 常安碧 许州 何琥 雷禄容 胡进光 袁欢 刘振帮

(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, 绵阳 621900)

(2014年6月6日收到; 2014年7月11日收到修改稿)

研究了相对论速调管放大器中的脉冲缩短问题. 分析表明杂模振荡是引起脉冲缩短的重要原因. 利用粒子模拟对振荡的模式进行了分析, 研究了振荡的机理, 在粒子模拟中利用吸收介质对杂模实现了有效的抑制. 最后, 在实验中解决了相对论速调管放大器中的脉冲缩短问题, 在输出微波峰值功率约为920 MW时将脉宽由77 ns提高到137 ns.

关键词: 相对论速调管放大器, 脉冲缩短, 杂模振荡

PACS: 84.40.Fe

DOI: 10.7498/aps.63.238402

1 引言

相对论速调管放大器(relativistic klystron amplifier, RKA)是一种基于速度调制原理将电子束动能转化为微波能量的高功率微波放大器件, 能够产生GW级的微波脉冲辐射. 由于RKA具有相位和幅度稳定等特点, 在近年来得到了广泛的发展与应用^[1]. 在RKA中, 脉冲缩短问题会影响输出微波能量, 降低其微波输出性能, 进而限制RKA的发展和应用, 是必须解决的问题^[2]. 脉冲缩短的机理比较复杂, 腔间场耦合引起的杂模振荡、电子回流对束波互作的不利影响等都可能造成脉冲缩短^[3-5]. 本课题组在研究S波段RKA中也遇到了比较严重的脉冲缩短现象, 输出微波的脉宽明显低于电子束脉宽. 本文通过理论分析、粒子模拟和实验研究, 分析了杂模振荡造成脉冲缩短的机理, 研究了在漂移管中加载吸收介质抑制杂模振荡的方法, 最终在实验中解决了脉冲缩短问题, 取得了较长脉冲的微波输出.

2 脉冲缩短现象

S波段RKA的结构如图1所示, 工作频率为2.88 GHz. 其中, 高频系统由3个谐振腔组成, 包括输入腔、中间腔和输出腔. 输入微波通过输入腔的矩形波导注入到输入腔并对电子束进行速度调制, 电子束在后面的漂移管中群聚, 经过中间腔的再调制后, 高度群聚的电子束进入输出腔中, 部分动能转换为高频场能量并输出到外接负载, 实现利用电子束的能量放大微波能量的目的^[6].

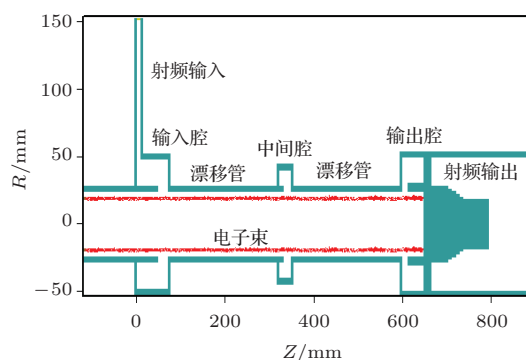


图1 S波段RKA的结构

[†] 通讯作者. E-mail: chenzhaof@gmail.com

实验中, 电子束电压为 716 kV, 电流为 5.9 kA, 电子束电压和电流的脉冲半高全宽均约为 190 ns, 电子束内半径为 18 mm, 电子束外半径为 21 mm, 漂移管半径为 24 mm, 聚焦磁场为 1.1 T. 电子束交变电流由漂移管壁上的磁探针测量, 测量时不接 RKA 输出腔, 在磁探针所在漂移管后接法拉第筒, 法拉第筒可以测得所在位置电子束电流. RKA 输出微波经模式变换器和天线辐射到空间后由接收天线测量, 其中模式变换器具有滤波作用. 中间腔后漂移管中电子束的交变电流波形如图 2 所示, 其中基波电流分量由交变电流滤波得到. 电子束交变电流中除了基波电流分量外, 还有较大的 3.60 GHz 杂频分量, 其中杂频分量主要集中在包络的后半部分, 基波电流分量在杂频分量出现后迅速减小. 输出到空间辐射场的微波波形如图 3 所示, 输出微波脉宽为 77 ns. 对比图 3 中的电子束电流波形和输出微波检波波形, 可以看出输出微波脉宽远低于电子束电流脉宽, 出现了明显的脉冲缩短现象. 结合图 2 中杂频出现导致基波电流分量脉宽较窄的现象可知, 输出微波脉冲缩短的原因是在电子

束的调制过程中出现了杂模振荡. 由于图 2 中电子束交变电流是在没有 RKA 输出腔的情况下测得的, 可以判断杂频分量产生在输入腔与中间腔之间.

3 脉冲缩短的机理分析

为了分析脉冲缩短的原因, 通过三维粒子模拟软件 CHIPIC 对 S 波段 RKA 进行了研究. 粒子模拟采用图 1 所示模型的输出腔左侧部分 (不包含输出腔), 左右两侧的漂移管端口以及输入波导入口均设为吸收边界, 电子束电压为 700 kV (图 4), 电流为 6 kA (图 5), 模拟中电子束参数和各腔谐振频率与实验参数基本一致. 在粒子模拟中监测输入腔和中间腔的间隙电压, 发现在约 120 ns 处开始出现杂频分量, 杂频分量的频率为 3.58 GHz, 与实验结果基本一致. 中间腔间隙电压波形如图 6 所示, 频谱如图 7 所示.

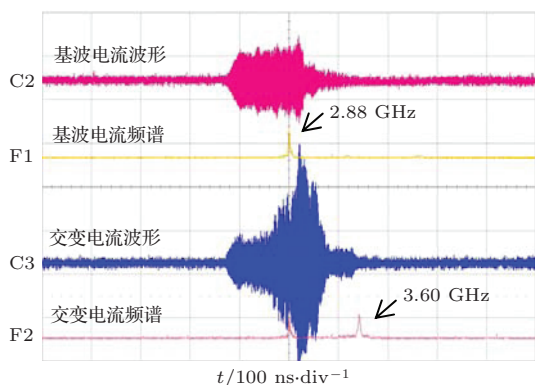


图 2 脉冲缩短时的交变电流波形及频谱

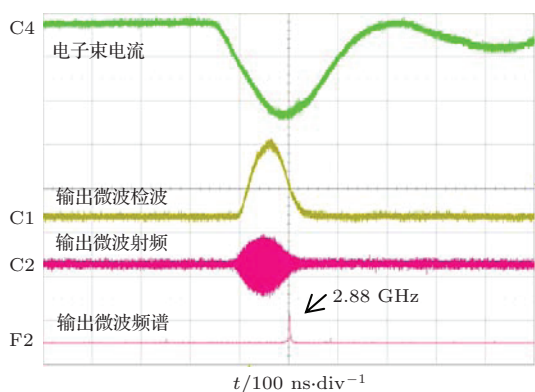


图 3 脉冲缩短时的输出微波波形

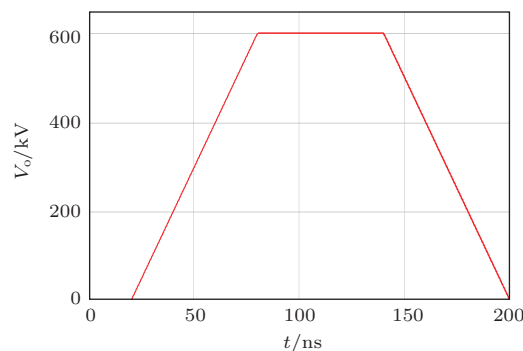


图 4 电子束电压 V_0 波形

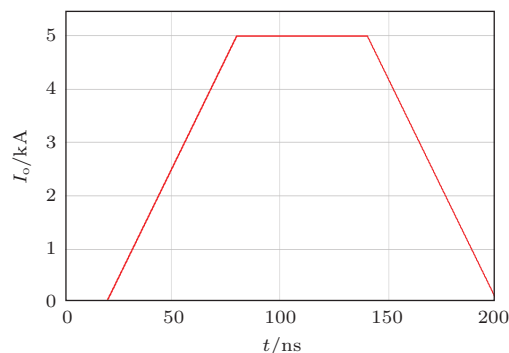


图 5 电子束电流 I_0 波形

利用电磁仿真软件 CST 对杂模进行分析, 采用的模型及边界条件与粒子模拟相同, 得到的杂模场分布如图 8 所示. 其中杂模的谐振频率为

3.61 GHz, 与实验结果基本一致. 杂模场在输入腔和中间腔间隙均为 TM_{11} 模式, 在漂移管中以 TE_{11} 模式传输, 导致输入腔和中间腔之间出现了场耦合, 形成一个激发杂模的正反馈回路, 振荡原理与两腔振荡器相同. 电子在输入腔被调制, 在中间腔激励起微波场, 该中间腔中的部分微波场泄漏到输入腔, 从而进一步调制电子束, 形成振荡.

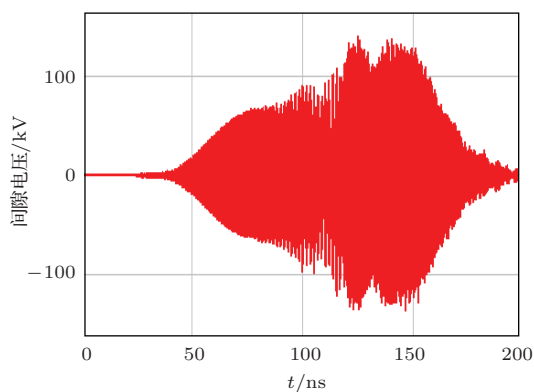


图6 中间腔间隙电压波形

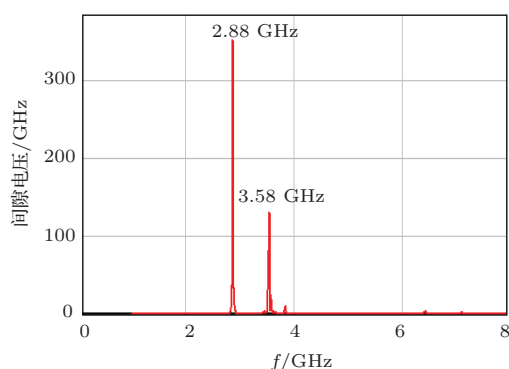


图7 中间腔间隙电压频谱

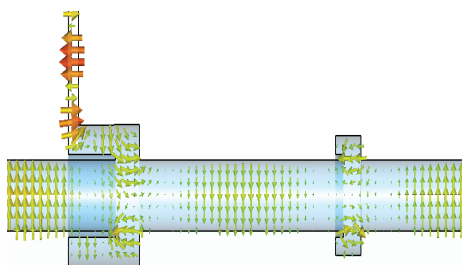


图8 杂模的电场分布

输入腔和中间腔之间的场耦合相当于形成了一个双间隙谐振腔, 可以用单腔理论进行分析. 微波腔中的实际场强为 $A(t)E_z(r, z)$, 其场激励方程

可表示为^[7-9]

$$\frac{d^2 A(t)}{dt^2} + \omega_0^2 A(t) + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dA(t)}{dt} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{d}{dt} \int_V j_z(r, z, t) E_z(r, z) dV, \quad (1)$$

式中, Q 为腔体品质因数, 表征腔内储能损耗的大小; ω_0 为杂模的本征频率.

在稳态情况下(1)式可以表示为

$$(\omega_0^2 - \omega^2) A \sin \varphi + \frac{\omega \omega_0}{Q} A \cos \varphi = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{d}{dt} \int_L I(z, t) E_z(z) dz. \quad (2)$$

在忽略渡越效应和空间电荷效应的情况下, 经过输入腔调制的电子束在中间腔处的基波电流可以用贝塞尔函数表示为^[9]

$$I_1(z, t) = 2I_0 J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\beta_0^3 \gamma_0^3} \frac{eV_1}{m_0 c^2} L \right) \times \cos \left(\varphi - \frac{\omega}{\beta_0 c} z \right), \quad (3)$$

式中, I_0 为电子束电流; 输入腔的间隙电压 $V_1 = AE_1 d_1$, 其中 E_1 为输入腔的归一化间隙场强; L 为中间腔和输入腔间距; β_0 表示电子速度; γ_0 表示电子能量.

当谐振时, $\omega_0 = \omega$, 令

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\beta_0^3 \gamma_0^3} \frac{eV_1}{m_0 c^2} L, \quad (4)$$

可以解得场强幅值^[7]

$$A = \frac{2I_0 Q}{\omega_0 \varepsilon_0} J_1(\alpha) E_2 d_2 \sin \left(\frac{\omega L}{\beta_0 c} \right), \quad (5)$$

式中 E_2 为中间腔的归一化间隙场强. 引入相互作用因子 K , 令

$$\alpha = K J_1(\alpha), \quad (6)$$

联解(5)和(6)式可得

$$K = -8\pi \frac{eI_0 Q}{4\pi \varepsilon_0 m_0 c^3} \frac{E_1 d_1 \cdot E_2 d_2}{\beta_0^3 \gamma_0^3} L \sin \left(\frac{\omega L}{\beta_0 c} \right),$$

可以看出 K 是一个与双间隙腔(输入腔、中间腔组合而成)的品质因数 Q 以及输入腔和中间腔间隙距离 L 有关的参数. 由(6)式可得 α 和相互作用因子 K 之间的变化关系如图9所示.

从图9可以看出, 当 $K \geq 2$ 时 α 和 V_1 会随着 K 的增大而迅速升高. 由(4)式可知, α 与输入腔电压 V_1 成正比, 而 V_1 与腔内场强幅值 A 成正比, 可知 $K \geq 2$ 时腔内场强幅值 A 也会随着 K 的增大而迅速升高, 这说明相互作用因子 $K = 2$ 是两腔振荡器的

起振条件. 因而, 振荡的起始电流可以用如下与腔体品质因数 Q 值有关的公式表示:

$$I_{\text{start}} = -\frac{I_A}{4\pi} \frac{\beta_0^3 \gamma_0^3}{E_1 d_1 \cdot E_2 d} \frac{1}{Q L_1 \sin\left(\frac{\omega L_1}{\beta_0 c}\right)}, \quad (7)$$

式中, I_A 为阿芬电流, $I_A = \frac{4\pi\epsilon_0 m_0 c^3}{e} = 17.1 \text{ kA}$.

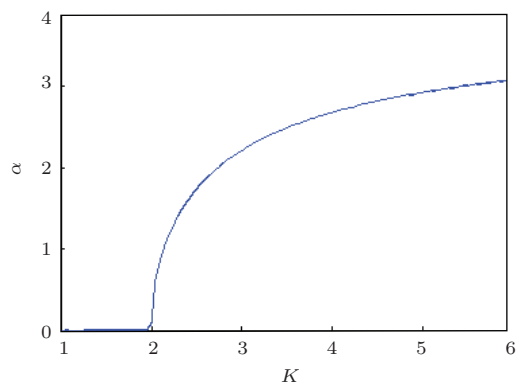


图9 α 与 K 之间的关系

4 脉冲缩短的抑制

由(7)式可以看出, 减小杂模的 Q 值就可以增大振荡的起始电流, 从而抑制杂模振荡导致的脉冲缩短. 由于输入腔和中间腔之间的漂移管对工作模式截止, 因此可以在漂移管加载吸收介质使得杂模场沿漂移管传输过程中迅速衰减, 减小杂模的 Q 值, 且不影响工作模式^[10].

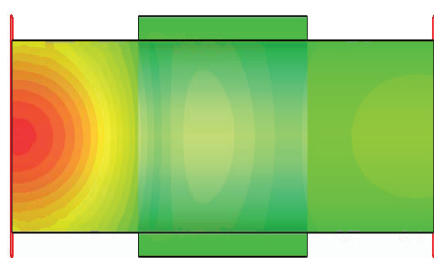


图10 含吸收介质的漂移管模型

在三维模拟程序中建立了漂移管模型, 研究吸收介质对 TE_{11} 模的衰减性能. 漂移管长度和半径分别为 140 mm 和 24 mm, 吸收介质嵌在漂移管壁中, 长度为 60 mm, 厚度为 5 mm. 吸收介质为碳化硅, 介电常数 $\epsilon = \epsilon'(1 - j \tan \delta)$, $\tan \delta$ 为损耗角正切, $\epsilon' = 17.2$, $\tan \delta = 0.095$. TE_{11} 模电场在漂移管中的传输情况如图 10 所示, 可见微波在传输

过程中迅速衰减, 吸收介质对 TE_{11} 模可以有效吸收. 设定漂移管左端注入的微波功率为 P_{in} , 右端输出的微波功率为 P_{out} , 定义吸收介质对微波的吸收率 $F = (P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) / P_{\text{in}}$, 计算了吸收介质长度 l (厚度为 5 mm) 不同时的吸收率如图 11 所示. 由图 11 可见, 长度为 60 mm 的吸收介质对微波的吸收率可以达到 98% 以上.

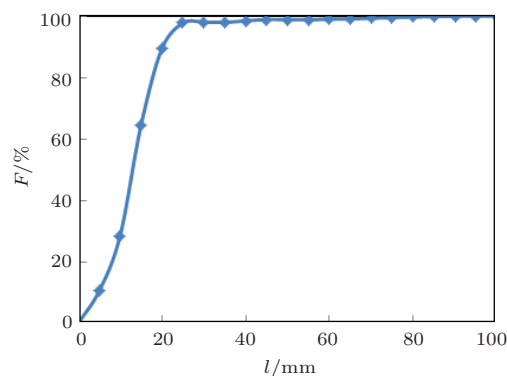


图11 吸收介质长度对衰减的影响

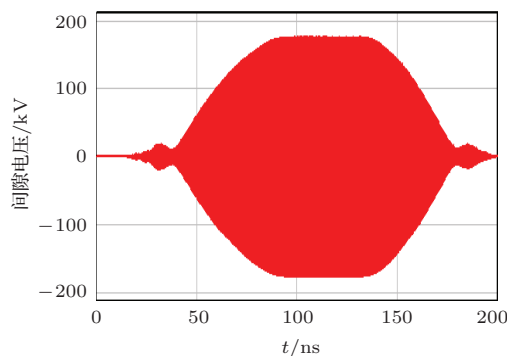


图12 加入吸收介质后, 中间腔间隙电压波形

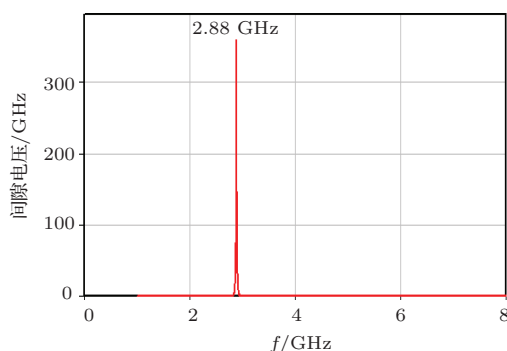


图13 加入吸收介质后, 中间腔间隙电压频谱

在三维粒子模拟程序中建立含有吸收介质的整管模型, 研究吸收介质对杂模振荡的影响. 吸收介质位于输入腔和中间腔之间的漂移管中, 设定吸收介质厚度为 5 mm, 长度为 60 mm, 中间腔间隙电

压波形和频谱分别如图 12 和图 13 所示. 由图 13 可见, 中间腔电场不含 3.58 GHz 杂频分量. 由此可知, 加入吸收介质后, 由于腔间场耦合而导致的杂模振荡得到了有效抑制.

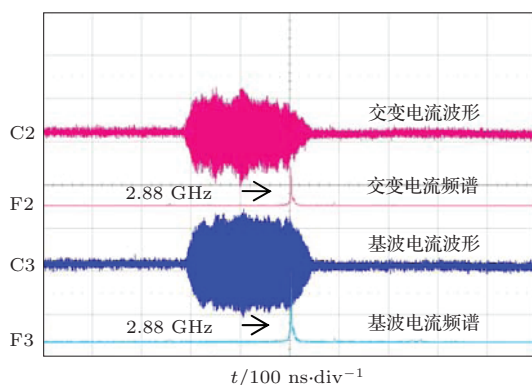


图 14 杂模抑制后的交变电流波形及频谱

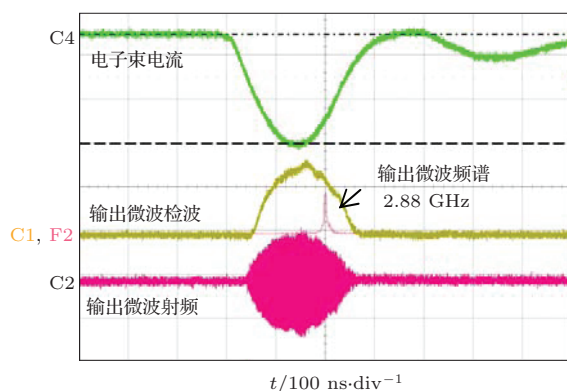


图 15 杂模抑制后的输出微波波形

在实验中研究了吸收介质对脉冲缩短现象的抑制效果. 根据上述脉冲缩短抑制措施的分析, 在图 1 所示的 RKA 结构的输入腔和中间腔之间的漂移管壁上加入吸收介质结晶硅, 结晶硅内半径为 24 mm, 厚度为 5 mm, 长度为 60 mm, 其介电常数和损耗角与模拟参数一致. 实验测得的中间腔后的交变电流波形及其频谱如图 14 所示, 电子束中除了 2.88 GHz 的基波电流分量外, 不存在 3.60 GHz 杂频分量, 滤波后得到的基波电流脉宽比改进前有了明显提高. 输出微波波形如图 15 所示, 输出微波

功率约为 920 MW, 半高全宽为 137 ns. 对比图 3 和图 15 可知, 杂模抑制后的输出微波脉宽得到了明显提升, 脉冲缩短问题得到了减轻.

5 结 论

本文研究了 S 波段 RKA 的脉冲缩短问题. 研究表明输入腔和中间腔的场耦合导致的杂模振荡是脉冲缩短的主要原因. 通过分析杂模的产生机理, 提出了采用加载吸收介质对杂模振荡进行抑制的方法, 优化了吸收介质的长度, 在粒子模拟中实现了脉冲缩短抑制, 并在实验中得到了验证. 在电子束电压为 716 kV、电流为 5.9 kA 的实验条件下, 输出微波峰值功率为 920 MW, 脉宽为 137 ns.

参考文献

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E 2007 *High Power Microwaves* (New Mexico: CRC Press) p313
- [2] Agee F J 1998 *High Power Microw. Sources* **26** 235
- [3] Chen Y D, Jin X, Li Z H, Wu Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 228501 (in Chinese) [陈永东, 金晓, 李正红, 吴洋 2012 物理学报 **61** 228501]
- [4] Roybal W T 2005 *Ph. D. Dissertation* (America: University of New Mexico) p102
- [5] Zhang Z H, Shu T, Zhang J, Liu J, Zhu J 2012 *High Power Laser Particle Beams* **23** 2989 (in Chinese) [张泽海, 舒挺, 张军, 刘静, 朱俊 2012 强激光与粒子束 **23** 2989]
- [6] Xie J L, Zhao Y X 1966 *Klystron Bunching Theory* (Beijing: Science Press) p32 (in Chinese) [谢家麟, 赵永翔 1966 速调管群聚理论 (北京: 科学出版社) 第 32 页]
- [7] Li Z H, Meng F B, Chang A B, Huang H, Ma Q S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3578 (in Chinese) [李正红, 孟凡宝, 常安碧, 黄华, 马乔生 2005 物理学报 **54** 3578]
- [8] Luo J R, Cui J, Zhu M, Guo W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067803
- [9] Ding Y G 2010 *Design, Manufacture and Application of High Power Klystron* (Beijing: National Defense Industry Press) p356 (in Chinese) [丁耀根 2010 大功率速调管的设计制造和应用 (北京: 国防工业出版社) 第 356 页]
- [10] Ma Z, Cao C T, Liu Q F, Wang J B 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 038401

Investigation and suppression of pulse shortening problem caused by non-working mode self-excitation in an S-band long pulse relativistic klystron amplifier

Chen Zhao-Fu[†] Huang Hua Chang An-Bi Xu Zhou He Hu Lei Lu-Rong
Hu Jin-Guang Yuan Huan Liu Zhen-Bang

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 6 June 2014; revised manuscript received 11 July 2014)

Abstract

We have investigated the pulse shortening problem of relativistic klystron amplifier. It is shown that non-working mode self-excitation is an important cause of pulse shortening. Theoretical and numerical analyses show the mechanism of non-working mode self-excitation caused by the coupling between cavities. By the use of radio frequency absorbers, the problem of non-working mode self-excitation can be solved. In the experiment, the RF output power is 920 MW, the output power pulse width of the device can be increased from 77 ns to 137 ns.

Keywords: relativistic klystron amplifier, pulse shortening, non-working mode self-excitation

PACS: 84.40.Fe

DOI: 10.7498/aps.63.238402

[†] Corresponding author. E-mail: chenzhaof@gmail.com