

# 双间隙输出腔中形成单腔管振荡的可能性分析

李晓鹏, 林福民

(广东工业大学物理与光电工程学院, 广东广州 510006)

**摘要:** 本文采用解析方法推导了  $2\pi$  模双间隙输出腔中电子注的小信号导纳公式, 并根据双间隙输出腔形成单腔管振荡的条件, 得到了单腔管振荡的起振电流计算公式. 利用三维仿真方法定量计算了加载矩形波导的  $2\pi$  模双间隙输出腔的线路导纳, 并以此确定  $2\pi$  模双间隙输出腔形成“单腔管振荡”的起振电流和振荡频率. 计算结果表明: 在电子注加速电压一定的情况下, 电子注电流增大到一定程度, 双间隙输出腔将会形成危害性较大的单腔管振荡; 而且双间隙输出腔的单腔管振荡频率与电子注加速电压和电子注电流存在复杂的关系. 与此同时, 我们采用 MAGIC 粒子模拟程序进一步验证了双间隙输出腔中产生单腔管振荡的可能性问题, 并得出其起振电流值, 这一粒子模拟结果与解析计算结论基本相吻合. 这些关于双间隙输出腔中有害的单腔管振荡形成过程和规律的研究结论, 对于改善速调管双间隙腔输出电路的稳定性将具有重要意义.

**关键词:** 双间隙输出腔; 电子注导纳; 线路导纳; 单腔管振荡; 单腔管起振电流; 单腔管振荡频率

**中图分类号:** TN122+.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 02-0357-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.024

## Analysis of Possibility of Forming Monotron Oscillation in the Double-Gap Output Cavity

LI Xiao-peng, LIN Fu-min

(School of Physics&Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** The admittance expressions of small signal electron beam in the  $2\pi$ -mode double-gap output cavity are derived by analytic method in this paper, and a formula of starting oscillation current is obtained based on the condition of forming monotron oscillation in a double-gap output cavity. The circuit admittance of a  $2\pi$ -mode double-gap output cavity loaded with rectangular waveguide is calculated quantitatively by 3D simulation method, then the starting oscillation current and the frequency of monotron oscillation in the  $2\pi$ -mode double-gap output cavity are determined. These calculations results show that under the condition of invariant accelerative voltage of electron beam, when beam current is increased to a certain value, a harmful monotron oscillation will be brought on in the double-gap output cavity. Moreover, the monotron oscillation frequency has complicated relationships with the accelerative voltage and the current of electron beam. Meanwhile, the possibility of forming monotron oscillation in the double-gap output cavity has been demonstrated further using the MAGIC PIC simulation program, and the starting oscillation current is obtained. The results of particle simulation are consistent with the results of analytic method. These research conclusions about forming process and regularities of harmful monotron oscillations in a double-gap output cavity will have a vital significance for improving the stability of double-gap cavity output circuits of klystrons.

**Key words:** double-gap output cavity; the electron beam admittance; the circuit admittance; monotron oscillation; the starting oscillation current of monotron; the frequency of monotron oscillation

## 1 引言

速调管双间隙输出回路是从 20 世纪 60 年代开始发展起来的一种大功率速调管宽带技术<sup>[1~6]</sup>, 如今已成为高功率速调管展宽带和提高功率的重要技术手段. 近年来, 随着大功率微波器件向宽频带方向发展, 双间

隙输出腔被广泛应用于宽带多注速调管中<sup>[7~9]</sup>. 由于双间隙腔输出回路中经常出现寄生振荡问题, 因此双间隙耦合输出腔的稳定性问题一直是研制者的研究重点<sup>[10~14]</sup>.

本文针对现阶段国内外研制宽带速调管中存在的寄生振荡问题, 提出把双间隙输出腔看作“加载的单腔

管”,当电子渡越角满足必要条件  $2\pi < \theta < 3\pi$  或  $4\pi < \theta < 5\pi$  等,并且电子注电流超过起振电流时,就可能引发“单腔管振荡”<sup>[15]</sup>.因此,我们采用理论推导和模拟仿真相结合的方法分析了双间隙输出腔产生“单腔管振荡”的可能性,并且计算了双间隙输出腔形成“单腔管振荡”的起振电流.

## 2 双间隙腔中小信号电子注导纳的解析计算

把双间隙输出腔看成“加载的单腔管”,进而我们在计算的过程中需要考虑双间隙输出腔的线路导纳损耗.首先,由于单腔管振荡频率并不同于输出腔的振荡频率,进入双间隙输出腔的电子注并不是按照“单腔管”的振荡频率进行群聚的,这里我们可以认为其为小信号电子注.其次,在单腔管振荡起振之初电子注在输出腔中群聚现象并不是很明显,属于小信号电子注.因此,本文借助小信号理论在解析计算和粒子模拟过程中均采用了直流电子注进行了详细的计算和仿真.设小信号电子注导纳为  $(G_e + jB_e)$ ,对于  $2\pi$  模双间隙输出腔来说,从第一间隙入口至第二间隙出口的总电子注感应电流为:

$$i_f(t) \approx \frac{I_0 v_0 ((\tau_1 + \tau_2))}{d} - \frac{e I_0 V_m}{\omega m d^2} \int_{t-\tau_1}^t (\cos \omega t - \cos \omega t_0) dt_0 - \frac{e I_0 V_m}{\omega m d^2} \int_{t-\tau}^{t-\tau_1-\tau_p} [\cos \omega t - \cos \omega t_0 + \cos \omega(t_0 + \tau_1) - \cos \omega(t_0 + \tau_1 + \tau_p)] dt_0 \quad (1)$$

式中  $\tau_1, \tau_2, \tau_p$  分别表示电子在两个间隙和漂移管中的渡越时间,  $\tau$  为电子总渡越时间.

假设电子注的加速电压为  $V_0$ ,  $2\pi$  模双间隙输出腔中间隙电压的振幅为  $V_m$ ,则电子在第一间隙的运动方程为:

$$d = v_0 \tau_1 - \frac{e V_m}{\omega^2 m d} [\sin \omega(\tau_1 + t_0) - \sin \omega t_0 - \omega \tau_1 \cos \omega t_0] \quad (2)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} \quad (3)$$

式中  $d$  为间隙宽度;  $v_0$  为电子进入第一间隙时的初始速度;  $t_0$  为电子进入第一间隙的时刻.

通过式(2)可以求得:

$$\tau_1 = \frac{\omega^2 m d^2 + e V_m [\sin \omega(\frac{d}{v_0} + t_0) - \sin \omega t_0]}{\omega^2 m d v_0 + e V_m \omega \cos \omega t_0}$$

$$G_e = \frac{I_0}{2V_0} \left\{ \frac{3 + 3\cos(\theta + \frac{\omega L}{v_0}) - 2\cos(2\theta + \frac{\omega L}{v_0}) - 2\theta \cos(2\theta + \frac{\omega L}{v_0}) + \theta \sin(\theta + \frac{\omega L}{v_0}) - 3\cos\theta - \theta \sin\theta - \cos(\frac{\omega L}{v_0})}{\theta^2} \right\} \quad (8)$$

$$B_e = \frac{I_0}{2V_0} \left\{ \frac{2\sin(2\theta + \frac{\omega L}{v_0}) - 2\theta \cos(2\theta + \frac{\omega L}{v_0}) + \theta \cos(\theta + \frac{\omega L}{v_0}) - \theta \cos\theta - 2\theta + 3\sin\theta - 3\sin(\theta + \frac{\omega L}{v_0}) + \sin(\frac{\omega L}{v_0})}{\theta^2} \right\} \quad (9)$$

若双间隙输出腔要形成“单腔管振荡”,则电子注

$$\approx \frac{d}{v_0} - \frac{e V_m}{\omega m v_0^2} \cos \omega t_0 + \frac{e V_m}{\omega^2 m d v_0} [\sin \omega(\frac{d}{v_0} + t_0) - \sin \omega t_0] \approx \frac{d}{v_0} - M \left[ \frac{d}{v_0} \cos \omega t_0 - \frac{1}{\omega} \sin \omega(\frac{d}{v_0} + t_0) + \frac{1}{\omega} \sin \omega t_0 \right] \quad (4)$$

其中  $M = e V_m / \omega m d v_0$  为小信号条件下的一阶无穷小量,且近似计算只需保留一阶小量.

假设双间隙输出腔的中间漂移管长度为  $L$  和电子进入漂移管的初始时间为  $t_1 = t_0 + \tau_1$ ,则电子穿过漂移管的渡越时间为:

$$\tau_p = \frac{L}{v_0 - \frac{e V_m}{\omega m d} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_0)} \approx \frac{L}{v_0} \left[ 1 + \frac{e V_m}{\omega m d v_0} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_0) \right] \approx \frac{L}{v_0} \left[ 1 + M (\cos \omega(t_0 + \frac{d}{v_0}) - M (\frac{d}{v_0} \cos \omega t_0 - \frac{1}{\omega} \sin \omega(\frac{d}{v_0} + t_0) + \frac{1}{\omega} \sin \omega t_0)) - \cos \omega t_0 \right] \approx \frac{L}{v_0} + \frac{ML}{v_0} \left[ (\cos \frac{\omega d}{v_0} - 1) \cos \omega t_0 - \sin \frac{\omega d}{v_0} \sin \omega t_0 \right] \quad (5)$$

电子在第二间隙中的运动方程为:

$$d = [v_0 - \frac{e V_m}{\omega m d} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_0)] \tau_2 - \frac{e V_m}{\omega^2 m d} [\sin \omega(\tau_2 + t_0 + \tau_1 + \tau_p) - \sin \omega(t_0 + \tau_1 + \tau_p) - \omega \tau_2 \cos \omega(t_0 + \tau_1 + \tau_p)] \quad (6)$$

由式(6)可得:

$$\tau_2 \approx \frac{d + \frac{e V_m}{\omega^2 m d} [\sin \omega(\frac{2d+L}{v_0} + t_0) - \sin \omega(\frac{d+L}{v_0} + t_0)]}{v_0 - \frac{e V_m}{\omega m d} [\cos \omega(t_0 + \frac{d}{v_0}) - \cos \omega t_0 - \cos \omega(t_0 + \frac{d+L}{v_0})]} = \frac{d}{v_0} + M \left[ \frac{d}{v_0} (\cos \omega(t_0 + \frac{d}{v_0}) - \cos \omega t_0 - \cos \omega(\frac{d+L}{v_0} + t_0)) + \frac{1}{\omega} (\sin \omega(\frac{2d+L}{v_0} + t_0) - \sin \omega(\frac{d+L}{v_0} + t_0)) \right] \quad (7)$$

本文我们已知电子在单个间隙中满足直流渡越角为  $\theta = \omega(d/v_0)$ .由于  $1 \gg V_m/V_0$ ,则我们可以假定  $\tau' = \tau_1 + \delta\tau'$ ,且  $\delta\tau' \ll \tau'$ .其中  $\tau'$  为第一间隙电子实际渡越角.同理,可求第二间隙电子实际渡越角为  $\tau''$ .

联立式(1)~(7),利用三角函数按小参量  $\omega d\tau$  展开成幂级数法并且略去幂次大于1的项,我们可以得出电子注电导和电纳分别为:

导纳就必须满足以下条件:

$$0 < G_{tot} \leq -G_e \quad (10)$$

$$B_{tot} + B_e = 0 \quad (11)$$

其中  $(G_{tot} + jB_{tot})$  为双间隙腔输出电路的线路导纳.

根据式(10)我们就可以确定双间隙输出腔满足“单腔管振荡”的起振电流  $I_s$ , 则满足双间隙输出腔形成“单腔管振荡”的条件为:

$$I_0 \geq I_s \quad (12)$$

### 3 双间隙输出腔线路导纳的模拟计算

用于模拟计算的  $2\pi$  模双间隙腔加载矩形波导输出电路的模型如图 1 所示. 其中  $2\pi$  模双间隙腔的半径为 50mm, 漂移管半径为 22mm, 间隙宽度为 6mm, 双间隙腔中耦合壁开了两个弧形耦合槽, 每个耦合槽的弧度和宽度分别为  $70^\circ$  和 10mm, 双间隙腔与矩形波导之间耦合口的尺寸为  $36\text{mm} \times 64.1\text{mm}$ . 采用反射系数相位法<sup>[16]</sup> 求出其外观品质  $Q_{ext}$  为 39.02, 谐振频率  $f_0$  为 1450MHz, 详见图 2.

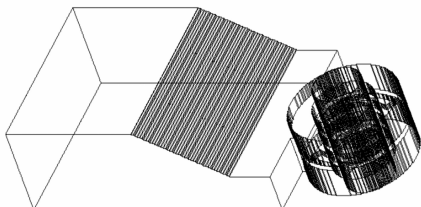


图1  $2\pi$ 模双间隙腔加载矩形波导输出电路

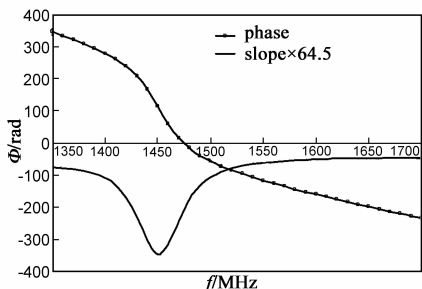


图2 输出端口反射系数相位随频率变化曲线

电子注穿越双间隙腔的相互作用间隙时激发了高频感应电流, 高频感应电流通过谐振腔壁和输出矩形波导, 等效于高频感应电流经过双间隙输出腔的等效间隙阻抗, 所以双间隙输出腔的线路阻抗就是其等效间隙阻抗<sup>[17]</sup>, 采用速调管双间隙腔输出回路三维模拟计算方法<sup>[18,19]</sup> 得到双间隙输出腔的线路导纳如图 3 所示.

### 4 双间隙输出腔的单腔管起振电流

若要使双间隙输出腔形成稳定的“单腔管振荡”, 则必须满足以下关系:

$$G_{\Sigma} = G_e + G_{tot} = 0 \quad (13)$$

$$B_{\Sigma} = B_e + B_{tot} = 0 \quad (14)$$

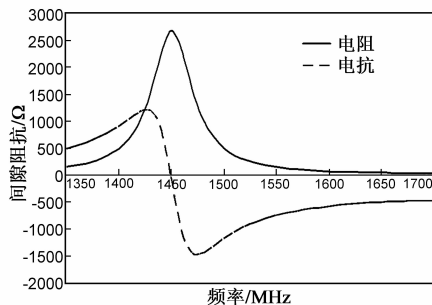


图3 双间隙腔的线路间隙阻抗随频率的变化曲线

以上电导关系式(13)是单腔管稳定振荡过程中能量守恒的体现, 而电纳关系式(14)则决定了单腔管振荡的频率. 在单腔管振荡的初始阶段, 只有  $G_{\Sigma} < 0$ , 才有可能使单腔管振荡逐步增强, 从而形成幅度较强、危害性较大的寄生振荡. 因而  $B_{\Sigma} = 0$  和  $G_{\Sigma} \leq 0$  是可能形成单腔管振荡的前提, 而  $B_{\Sigma} = 0$  和  $G_{\Sigma} = 0$  决定了起振电流的大小.

为了分析双间隙输出腔是否可能形成单腔管振荡, 我们在加速电压为 10kV 的情况下, 取 3 种不同的电子注电流值(3A, 7A, 12A), 分别计算了  $B_{\Sigma}$  和  $G_{\Sigma}$  随频率变化曲线, 如图 4~6 所示.

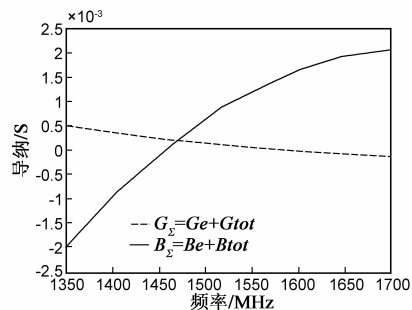


图4 加速电压10kV、电流3A时的线路总电导和线路总电纳

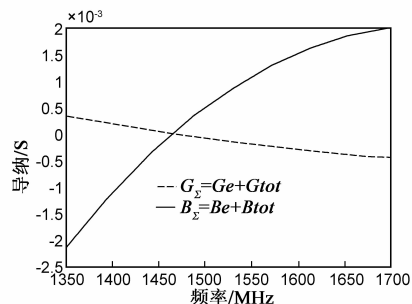


图5 加速电压10kV、电流7A时的线路总电导和线路总电纳

电子注电流为 3A 的图 4 显示, 当  $B_{\Sigma} = 0$  时,  $G_{\Sigma} > 0$ , 这表明双间隙输出腔不可能形成单腔管振荡. 当电子注电流逐步增大至 7A 时, 图 5 显示  $B_{\Sigma} = 0$  时,  $G_{\Sigma} = 0$ , 这表明双间隙输出腔可以形成稳定的单腔管振荡, 振荡频率为 1465MHz, 相应的电子注电流 7A 就是起振电流, 但此时的单腔管振荡可能比较弱, 还不足以形成有危害性的寄生振荡. 若电子注电流进一步增大至

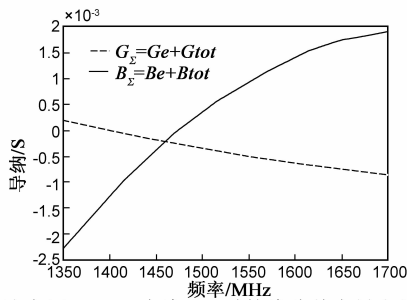


图6 加速电压10kV、电流12A时的线路总电导和线路总电纳

12A,如图6所示,当 $B_{\Sigma} = 0$ 时, $G_{\Sigma} < 0$ ,这时双间隙输出腔将形成单腔管振荡,振荡频率为1475MHz,而且单腔管振荡还会逐步增强,最终形成危害性较大的寄生振荡.由此可见,该双间隙腔输出电路中可能形成单腔管振荡,在电子注加速电压为10kV时,起振电流是7A.为了避免双间隙输出腔形成具有较大危害性的单腔管振荡,在电子注加速电压为10kV时,电子注电流必须小于7A.单腔管振荡的起振电流不仅与双间隙腔输出电路的结构有关,也与电子注加速电压有着复杂的关系,可以先采用式(12)进行估算,再通过模拟计算方法确定.

图5和图6还显示,单腔管振荡的频率与双间隙腔输出电路的原谐振频率 $f_0$ (1450MHz)存在较大偏离,而且随着电子注电流的增大而缓慢增大,也会随电子注加速电压变化,所以单腔管振荡所形成的寄生振荡将很难找到与其频率相同的谐振系统.其次,由于电子注导纳和线路导纳都随频率周期性变化,所以单腔管振荡还存在高次谐波<sup>[20]</sup>,但都与双间隙腔谐振频率相差很远,其影响和危害较小,所以本文不作详细讨论.

## 5 粒子模拟

图7是电子注直流加速电压为10kV和电子束电流为15A时双间隙输出腔漂移管中的粒子轨迹模拟图<sup>[21~25]</sup>.从图形中我们可以看到,经过双间隙后的电子注出现了较为明显的群聚现象,说明了双间隙输出腔中产生的单腔管振荡模式通过在间隙处激发高频感应场对电子注产生了速度调制,进而在漂移管中出现了电子注的群聚现象.

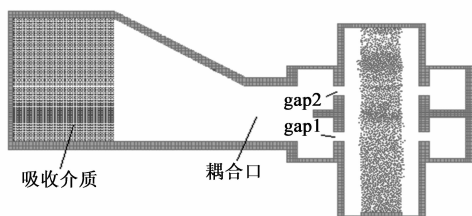


图7 电子注电流为15A时的粒子模拟轨迹

从图8中我们可以看到当直流电子注电流值小于

8A时,双间隙腔输出功率随电子注电流值的增加无明显增加趋势,但是当电子注电流值增加至8A以后,双间隙腔输出功率将随电子注电流值的增加迅速增加,甚至这种增幅还将会更为严重,这一粒子模拟结果与理论分析结论基本相符.而对于图中有功率输出时对应的电流值8A便是双间隙输出腔中形成单腔管振荡的起振电流值,该值与解析计算值基本相吻合.与此同时,我们也得出了起振电流值8A对应的单腔管振荡频率值为1482MHz,并且还得出电子注的单腔管振荡频率随着电子注电流的增加而缓慢增加,这与双间隙腔的谐振频率1450MHz存在32MHz的频差.进而我们通过粒子模拟进一步验证了双间隙腔输出腔中形成单腔管振荡的可能性问题.

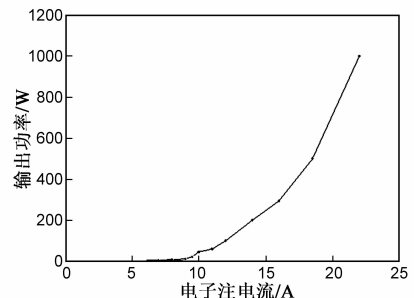


图8 输出功率随电子注电流的变化曲线

## 6 结束语

本文结合解析推导和三维仿真方法定量计算了 $2\pi$ 模双间隙腔输出腔中电子注的小信号导纳和线路导纳,根据单腔管振荡条件讨论了 $2\pi$ 模双间隙腔形成“单腔管振荡”的可能性,并计算了其起振电流.研究表明:在电子注加速电压一定的情况下,电子注电流增大到一定程度,双间隙腔输出腔将会形成危害性较大的单腔管振荡;而且双间隙腔输出腔的单腔管振荡频率与电子注加速电压和电子注电流存在着复杂的关系.为了充分论述这一现象的存在,我们采用MAGIC粒子模拟进一步验证了双间隙腔输出腔中产生单腔管振荡的可能性,并得出其起振电流,这一粒子模拟结果与解析计算结论基本相吻合.这些关于双间隙腔输出腔中形成单腔管振荡的过程和规律的研究结论,对于改善速调管双间隙腔输出电路的稳定性将具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Ding Y G. Recent progress on L-band broadband MBK[A]. Proceedings of Third IEEE Intentional Vacuum Electronics Conference[C]. USA: IEEE, 2002. 296 - 297.
- [2] Wang Y, Ding Y G, Liu P K. Development of an S-band klystron with bandwidth of more than 11% [J]. IEEE Trans, Plasma Science, 2006, 34(3): 572 - 575.

- [3] Abe D K, Pershing D E, Wright E L, Ngugen K T, Wood F N, Myers R E, Eisen E L, Levush B. Experimental results from a high-power broadband 18-beam klystron [A]. Proceedings of 2010 International Vacuum Electronics Conference [C]. USA: IEEE, 2010. 37 – 38.
- [4] Zhaochuan Zhang, Yaogen Ding, Bin Shen, Honghong Gu, Jing Cao, Haibing Ding. Research progress on the S-band high-power broadband multi-beam klystron [A]. Proceedings of 2011 International Vacuum Electronics Conference [C]. USA: IEEE, 2011. 313 – 314.
- [5] Nguyen K T, Wright E L, Pershing D E, Abe D K, Petillo J J, Levush B. Broadband high-power 18-beam S-band klystron amplifier design [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 2009, 56(5): 883 – 890.
- [6] 林福民, 丁耀根. L 波段多注速调管同轴线滤波器宽带输出回路的研究和设计 [J]. 电子与信息学报, 2004, 26(5): 813 – 819.  
Lin F M, Ding Y G. The research and design of a coaxial filter broadband output circuit for L-band multiple beam klystron [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(5): 813 – 819. (in Chinese)
- [7] 丁耀根, 朱允淑. 多注速调管高次模谐振腔的研究 [A]. 中国电子学会真空电子学分会第十届学术年会论文集 [C]. 北京: 中国电子学会真空电子学分会, 1995. 77 – 80.  
Ding Y G, Zhu Y S. Study of higher-order mode cavity in the multiple-beam klystrons [A]. Proceedings of the 10th academic conference [C]. Beijing: Vacuum Electronics Branch of the Chinese Institute of Electronics Academic Conference, 1995. 77 – 80. (in Chinese)
- [8] 沈斌, 丁耀根, Aleksandr N. Sandalov, Vladimir E. Rodjakin, Aleksandra N. Chashurina. 超宽带多注速调管的模拟研究 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 180 – 184.  
Shen B, Ding Y G, Aleksandr N. Sandalov, Vladimir E. Rodjakin, Aleksandra N. Chashurina. Theoretical investigations of the super broadband multiple beam klystron amplifier [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(1): 180 – 184. (in Chinese)
- [9] 刘志刚, 张赵传, 丁耀根, 等. 三重叠模双间隙耦合腔型输出回路的仿真设计 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1177 – 1182.  
Liu Z G, Zhang Z C, Ding Y G, et al. Simulation and design of three-mode overlapped two-gap coupled cavity type output circuit. high power [J]. Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1177 – 1182. (in Chinese)
- [10] 林福民, 丁耀根. 速调管耦合双间隙输出回路的绝对稳定性判据 [J]. 真空电子技术, 2004, (2): 10 – 12.  
Lin F M, Ding Y G. Criterion of absolute stability of output circuit with coupling two-gap cavity of klystron [J]. Vacuum Electronics, 2004, (2): 10 – 12. (in Chinese)
- [11] Krietenstein B, Ko K, Lee T, Becker U, Weiland T, Dohlus M. Spurious oscillations in high power klystrons [A]. Proceedings of 1995 Particle Accelerator Conference [C]. Germany: 1995. 1533 – 1535.
- [12] 全亚民, 丁耀根. 双间隙耦合腔中自激振荡问题的分析和模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1699 – 1703.  
Quan Y M, Ding Y G. Analysis and simulation of self-excitation in double gap coupling cavity [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1699 – 1703. (in Chinese)
- [13] 黄华, 罗雄, 雷禄容, 罗光耀, 张北镇, 金晓. 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.  
Huang H, Luo X, Lei L R, Luo G Y, Zhang B Z, Jin X. Analysis and suppress of multi-frequency oscillation on long pulse relativistic klystron amplifiers [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1473 – 1477. (in Chinese)
- [14] 张开春. 太赫兹扩展相互作用振荡器的矩形耦合腔特性研究 [J]. 电子学报, 2011, 39(3): 632 – 635.  
Zhang K C. Study of characteristic of rectangular coupled-cavity slow-wave structure for extended interaction oscillator in terahertz band [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 632 – 635. (in Chinese)
- [15] Gregory N. Suvorov, Michael Read, Liqun Song. Excitation of “monotron” oscillations in klystrons [J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(11): 4893 – 4903.
- [16] 林福民, 王志勇, 黄焕辉. 反射系数相位法计算谐振腔外观品质因数的局限性 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1399 – 1404.  
Lin F M, Wang Z Y, Huang H H. Limitation of  $Q_{ext}$  calculation method based on reflectance phase [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(9): 1399 – 1404. (in Chinese)
- [17] 林福民, 袁文蛟. 矩形  $\pi$ -TM<sub>310</sub> 双间隙加载同轴滤波器型宽带输出电路研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(3): 726 – 730.  
Lin F M Yuan W J. Research on broadband output circuit of rectangular  $\pi$ -TM<sub>310</sub> mode double gap cavity loaded by coaxial line filter [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 726 – 730. (in Chinese)
- [18] 林福民, 丁耀根, 刘铁山, 孙小欣. 宽带速调管滤波器加载输出腔间隙阻抗的频率特性的模拟计算方法 [J]. 电子与信息学报, 2003, 23(12): 1688 – 1694.  
LIN Fu-min, DING Yao-gen, Liu T S, Sun X X. A simulation method for computing the gap impedance varying with frequency of output cavity loaded with a filter [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 23(12): 1688 – 1694. (in Chinese)
- [19] 林福民, 丁耀根, 张志强, 黄云平. 速调管双间隙腔的间隙阻抗矩阵频率特性的模拟计算方法 [J]. 电子与信息学报, 2004, 26(9): 1480 – 1486.  
LIN Fu-min, DING Yao-gen, Zhang Z Q, Huang Y P. Simula-

tion computation method for calculating the impedance matrix of double gap cavity of klystron[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(9): 1480 – 1486. (in Chinese)

- [20] 林福民, 沈斌, 丁耀根. 矩形  $\pi$ -TM310 模双间隙腔加载同轴滤波器型宽带输出电路的实验研究[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2884 – 2889.  
Lin F M Shen B, Ding Y G. Experimental study of broadband output circuit of rectangular  $\pi$ -TM310 mode double-gap cavity loaded by coaxial line filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2884 – 2889. (in Chinese)
- [21] 陈希, 刘盛纲, 谢文楷. 离子通道的暂态特性及其粒子模拟[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 61 – 63.  
Chen X, Liu S G, Xie W K. The transient performance of ion channel and its modelling [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 61 – 63. (in Chinese)
- [22] Sprehn, D, Neubauer, M, Scheitrum, G, Steele, B. MAGIC code development for klystron applications at the klystron department at SLAC[A]. Proceedings of Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. USA: IEEE, 2004: 354 – 355.
- [23] Jang, L B, Choi, G W, Jang, S M, Lee, Y D, Choi, J J, Lee, K O, Ching, K H. Simulations of a 1MW, 700MHz klystron using MAGIC PIC-code[A]. Proceedings of Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. USA: IEEE, 2004. : 124 – 125.

- [24] 朱兆君, 贾宝富, 罗正祥, 杨赤如. 螺旋线行波管的粒子模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(1): 10 – 17.

Zhu Z J, Jia B F, Luo Z X, Yang C R. Particle simulation of helical traveling-wave tube [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, 27(1): 10 – 17. (in Chinese)

- [25] Lin Fu-Min, Liu Hai-Xu. Design formulae of unsymmetrical double-gap output cavities of klystrons [J]. International Journal of Electronics, 2011, 98(5): 617 – 630.

#### 作者简介



**李晓鹏** 男, 1987 年 3 月出生于山东省菏泽市. 硕士研究生, 目前主要从事大功率微波器件和微带天线等研究.

E-mail: lixiaopeng062419@163.com



**林福民(通讯作者)** 男, 1964 年 12 月出生, 于广东省汕头市. 教授, 博士, 目前主要从事物理电子学、射频电路与天线、电磁场与微波技术等研究.

E-mail: linfumin@gdut.edu.cn