

# 加载静电电压的同轴回旋管放大器的非线性模拟\*

孔艳岩 张世昌†

(西南交通大学信息科学与技术学院光电子学研究所, 成都 610031)

(2010年10月11日收到; 2010年11月10日收到修改稿)

对一种工作频率为 0.14 THz 的小轨道同轴回旋管放大器进行非线性模拟, 结果表明: 通过加载外部静电电压的方法, 可将回旋管放大器的饱和输出功率提高 19%, 而且电子束横向与纵向速率比以及横向速度离散对输出功率都没有明显影响, 从而可以有效提高回旋管放大器性能.

**关键词:** 回旋管放大器, 静电场, 静电离心聚焦系统, 饱和功率

**PACS:** 52.59.Rg, 84.40.1k, 41.60.Cr

## 1. 引言

回旋管 (gyrotron) 是一种新型高功率、高效率的毫米波、亚毫米波自由电子辐射源, 在国际上得到高度重视与蓬勃发展<sup>[1-4]</sup>. 回旋器件的功率损耗主要来自于腔壁的热损耗. 回旋激励场在圆柱腔 (波导或者开放式谐振腔) 中工作, 因其结构的半径尺寸比较小, 这对器件的散热提出了很高的要求, 而且也给器件的加工制造带来一定的困难. 一个有效的解决办法就是采用工作在高阶模式的大体积高频结构以增加散热面积. 然而, 采用高阶模式的大体积高频结构, 就不可避免的使腔体内本征频谱变得密集, 从而使模式竞争激烈, 工作模式会受到竞争模式的严重干扰. 国际上的理论和实验研究表明: 既能解决腔体散热问题又能有效抑制模式竞争的办法, 是采用大体积同轴结构代替圆柱结构, 因为在圆柱结构中加入内导体轴, 既能保证腔体是大尺寸, 便于散热, 还可以使工作模式附近的模式谱被稀化, 从而降低模式竞争, 确保单模工作<sup>[5-15]</sup>.

静电场在自由电子辐射源中的应用, 许多学者一直在进行探究. Watkins 等人对一种旋束管 (helitron) 进行过理论分析和实验研究<sup>[16]</sup>, 在这种旋束管中引入了径向静电场来取代磁场使螺旋电子聚焦, 这一做法大大减轻了管子的重量并提高了器件效率, 取得了成功. 随后 Pantell 对该器件进行

了小信号分析<sup>[17]</sup>. Barnett 和 Alexeff 等人又将空间非线性静电场引入了非相对论性回旋脉塞<sup>[18,19]</sup>, 其中的工作物质与旋束管一样, 是能量很低的非相对论性电子束. 文献[20-22]对上述静电离心聚焦系统 (CEFS) 中相对论性电子注与波换能过程进行了原理性研究, 并且对静电离心聚焦系统在自由电子脉塞 (ECM)<sup>[20,21]</sup> 和回旋潘尼管<sup>[22]</sup> 中的应用给出了详细的负质量效应分析和动力学线性理论分析, 对有关工程问题也进行了讨论. 另一方面, 在三波互作用机理和两波互作用的自由电子激光中, 周期性静电场可作为摇摆器取代静磁摇摆器, 此时的工作物质为大轨道相对论性电子束<sup>[23-28]</sup>.

为了提高回旋管放大器性能, 本文结合同轴回旋管器件和静电离心聚焦系统各自的优点, 将径向静电场应用于小轨道相对论性电子束同轴回旋管放大器. 这种方法既不同于旋束管或非相对论性回旋脉塞, 也不同于静电摇摆器自由电子激光, 其器件的工作物质采用的是小轨道相对论性电子束. 本文就这一构想进行探索性理论研究.

## 2. 非线性模拟的理论模型

非线性理论<sup>[3,15,29-32]</sup> 是研究电子回旋脉塞中电子束与高频场相互作用的一种常用理论方法, 它可以描述电子在电磁场中的运动状态以及电磁场与电子之间相互作用过程, 能够给出关于饱和机理的描

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60871023) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200806130012) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: sczhang@home.swjtu.edu.cn

述及效率的计算,因此被广泛的运用在对相关器件的设计计算中. 本文采用自洽非线性理论来研究加载静电电压的同轴回旋管放大器. 这种方法需要联合求解具有电子束源的波动方程和电子运动方程. 其中,相对论电子的运动方程,遵从闵可夫斯基方程

$$\frac{d(\gamma m_0 \mathbf{v})}{dt} = -|e|\left(\mathbf{E} + \frac{1}{c}\mathbf{v} \times \mathbf{B}\right), \quad (1)$$

此处  $\gamma, m_0, \mathbf{v}$  和  $e$  分别表示相对论能量因子,电子静质量,电子速率和电子电量,  $t$  表示时间,  $c$  为真空中的光速,  $\mathbf{E}, \mathbf{B}$  指分布在波导中的电场和磁场,除  $\text{TE}_{m,n}$  射频场和纵向导引磁场  $B_0$  外,还应包括由静电电压  $V_0$  产生的径向电场  $E_{0,r}$ . 假定内导体接地而外导体加静电电压  $V_0$ ,则

$$E_{0,r} = \frac{-V_0}{r \ln(R_{\text{out}}/R_{\text{in}})}, \quad (2)$$

此处  $R_{\text{out}}$  为外导体半径,  $R_{\text{in}}$  为内导体半径.

于是,电子运动方程的具体形式为

$$\frac{d(\gamma m_0 \mathbf{v})}{dt} = -|e|\left[\left(\mathbf{E}_{\text{rf}} + \mathbf{E}_{0,r}\right) + \frac{1}{c}\mathbf{v} \times \left(\mathbf{B}_{\text{rf}} + \mathbf{B}_0\right)\right], \quad (3)$$

式中  $\mathbf{E}_{\text{rf}}, \mathbf{B}_{\text{rf}}$  为  $\text{TE}_{m,n}$  模式对应的射频电磁场.

假设射频电磁场幅值  $f(z)$  在纵向上的分布为

$$f(z) = A(z) e^{i[k_z z + \delta(z)]}, \quad (4)$$

其中,  $A(z)$  为波振幅,  $\delta(z)$  为互作用过程中波相位的变化. 由有源波动方程在圆柱坐标系下展开,用来描述场在电子束作用下的演化<sup>[14]</sup>

$$\frac{dA(z)}{dz} = A'(z), \quad (5)$$

$$\frac{d\delta(z)}{dz} = \delta'(z), \quad (6)$$

$$\frac{d[A'(z)]}{dz} = S + A(z)[k_z + \delta'(z)]^2 - k_z^2 A(z), \quad (7)$$

$$\frac{d[\delta'(z)]}{dz} = \frac{\{T - 2A'(z)[k_z + \delta'(z)]\}}{A(z)}, \quad (8)$$

其中电磁波—电子束相互作用耦合量为

$$S = \frac{-8|I_b|}{NK_{mn}c} \sum_{j=1}^N \frac{1}{v_j} \left[ k_c Z'_m(k_c r_j) v_{\theta j} \cos \Phi_j + \frac{m}{r_j} Z_m(k_c r_j) v_{rj} \sin \Phi_j \right], \quad (9)$$

$$T = \frac{8|I_b|}{NK_{mn}c} \sum_{j=1}^N \frac{1}{v_j} \left[ k_c Z'_m(k_c r_j) v_{\theta j} \sin \Phi_j - \frac{m}{r_j} Z_m(k_c r_j) v_{rj} \cos \Phi_j \right], \quad (10)$$

$$Z_m(k_c r) = J_m(k_c r) - \frac{J'_m(k_c R_{\text{out}})}{N'_m(k_c R_{\text{out}})} N_m(k_c r), \quad (11)$$

$$\Phi_j = k_z z - \omega t_j + m\theta_j + \delta_{(z)}, \quad (12)$$

$$K_{mn} = (k_c^2 R_{\text{out}}^2 - m^2) Z_m^2(k_c R_{\text{out}}) - (k_c^2 R_{\text{in}}^2 - m^2) Z_m^2(k_{mn} R_{\text{in}}), \quad (13)$$

以上各式中,  $I_b$  为电子束电流,  $N$  为电子总数,  $c$  表示光在真空中的速度,  $\omega$  为电磁波角频率,  $m$  为角向模式指数,  $v_{rj}, v_{\theta j}, v_{zj}$  分别为第  $j$  个电子的径向速率、角向速率和轴向速率,  $t_j, r_j, \theta_j$  分别为第  $j$  个电子到达位置  $z$  的时间和其径向、角向位置,  $J_m, J'_m, N_m, N'_m$  分别是  $m$  阶贝塞尔函数和诺伊曼函数及其导数,  $k_c$  为横向波数,  $k_z$  为纵向波数.

将以上波动方程与电子的相对论运动方程联立求解,就可以得到电磁波—电子束非线性相互作用的自洽解.

### 3. 非线性模拟结果

不失一般性,我们所采用参数如下:工作模式

为  $\text{TE}_{28,16}$ , 工作频率  $f = 0.14$  THz, 初始输入功率为  $P_0 = 0.1$  W, 同轴波导外导体半径  $R_{\text{out}} = 2.981$  cm, 内导体半径为  $R_{\text{in}} = 0.795$  cm, 模式的本征值为 87.35, 电子束导引中心半径  $R_c = 1.0$  cm, 横向波数  $k_t = 29.3018$  cm<sup>-1</sup>, 纵向波数  $k_z = 1.5319$  cm<sup>-1</sup>, 纵向导引磁场  $B_0 = 57000$  G, 横纵向速率比  $\alpha = 1.35$ , 电子束电流  $I_b = 50$  A, 加速电压  $V_b = 90$  keV.

模拟结果如图 1 所示, 当外轴所加静电电压  $V_0 = -108$  kV 时, 与不加静电电压 ( $V_0 = 0$ ) 相比, 饱和功率有了明显的提高, 增加了 19%. 而外加静电电压反向, 即  $V_0 = +108$  kV 时, 饱和功率与不加静电电压相比却明显下降.

由此可见, 外导体所加静电电压为负值时, 产生一个正的径向静电场, 该静电场对电子束与波之间

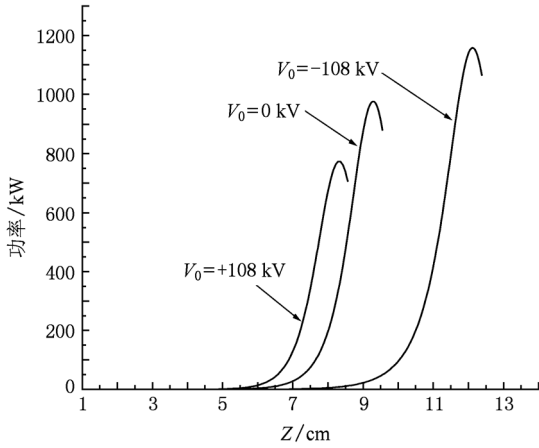


图1 外加静电电压取不同数值时功率的演化曲线

的相互作用起了加强的作用,功率得到增加;而电压反向后,其功能则削弱了束-波相互作用,致使饱和功率减小.

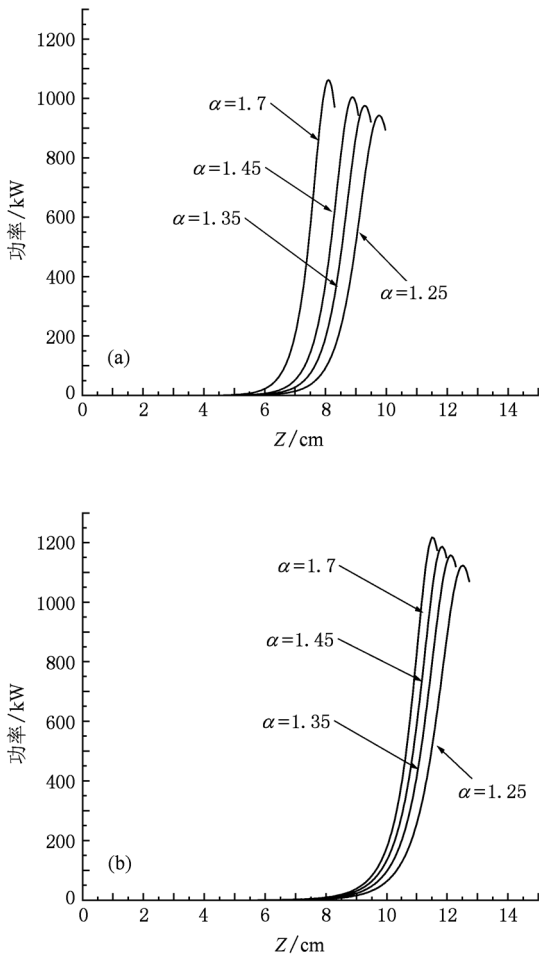


图2 不同横向与纵向速率比情况下功率的演化曲线 (a) 不加电压  $V_0 = 0$ ; (b) 外加静电电压  $V_0 = -108$  kV

现在我们来考虑回旋管放大器主要参数对其饱和功率的影响. 保持其他参数不变,电压仍取  $V_0 = -108$  kV,改变横向与纵向速率比  $\alpha$  的值,观察其对饱和功率的影响. 图2示出了横向与纵向速率比不同取值的情况下,功率的演化曲线. 从图中可以看出,并没有因为外加静电电压的引入,使得功率对横向与纵向速率比更加敏感,而是与不加静电电压的情况类似,没有明显的影响.

如图3所示,取横向与纵向速率比  $\alpha = 1.35$ ,外加静电电压  $V_0 = -108$  kV,改变横向速度离散  $\delta v_t/v_t$  的值,我们可看到外加静电电压同样对横向速度离散没有明显影响.

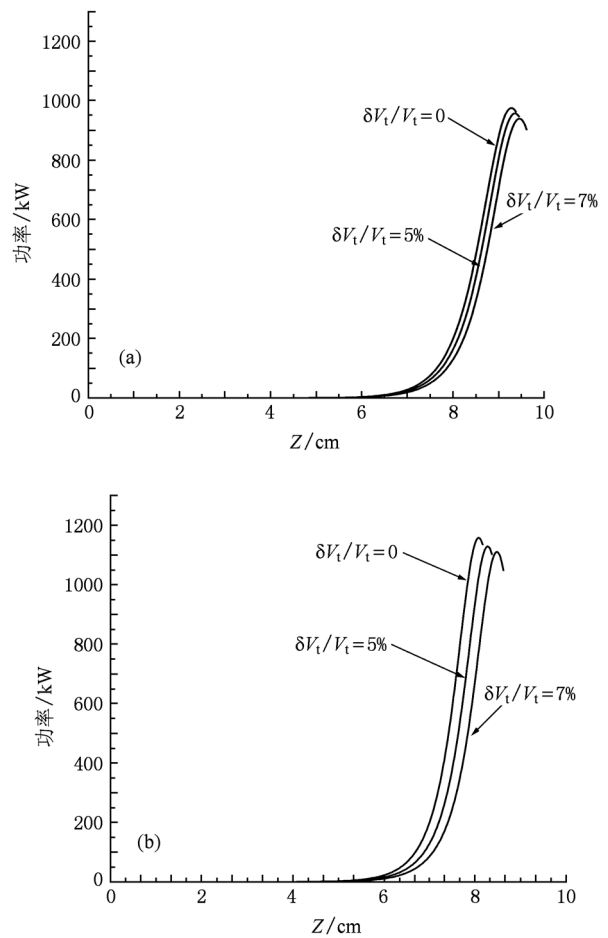


图3 不同横向速度离散情况下功率演化曲线 (a) 不加电压  $V_0 = 0$ ; (b) 外加静电电压  $V_0 = -108$  kV

#### 4. 结 论

本文对一种工作频率为 0.14 THz 的小轨道同轴回旋管放大器建立了理论模型并进行了非线性

模拟. 结果表明:采用内导体接地、外导体接负静电电压的方法,一是可将回旋管的饱和功率提高 19%,二是电子束初始横向速度离散的负面影响被减弱. 对应的物理解释如下. 该径向静电电压生成一个方向指向外的径向静电场,使带负电荷的电子额外获得一个方向指向轴心的电场力,从而改变电子运动状态,如图 4 所示,使束-波相互作用过程中电子束的横向速度相对于没有加静电场的情况更大,纵向速度相对更小,因此,达到最大功率所需要的束-波相互作用区间的长度相对增长,束-波相互作用达到饱和被推迟,从而使最大输出功率得到提高. 另一方面,额外加载的径向静电场对电子产生的电场力的方向由于是指向轴心的,产生驱使电子向轴心运动的趋势,所以,对电子束会产生一种“箍缩”作用,有利于电子束聚束,抑制电子束发散;同时,又由于束-波相互作用区间的长度相对变长了,所以,电子束的初始速度离散状况对后果的影响也就相对减弱了(好比运动员站在起跑时所处或前或后的差别,对百米短跑的结果影响比较大,而对马拉松长跑的结果影响比较小). 而当静电电压反向,即内导体接地、外导体接正电压时,所发生的物理景象正好与外导

体接负电压的情况相反,因而回旋管的饱和功率有明显下降. 本文非线性模拟结果还显示,静电电压的引入并没有改变功率对横向与纵向速率比的敏感程度,没有带来负面影响.

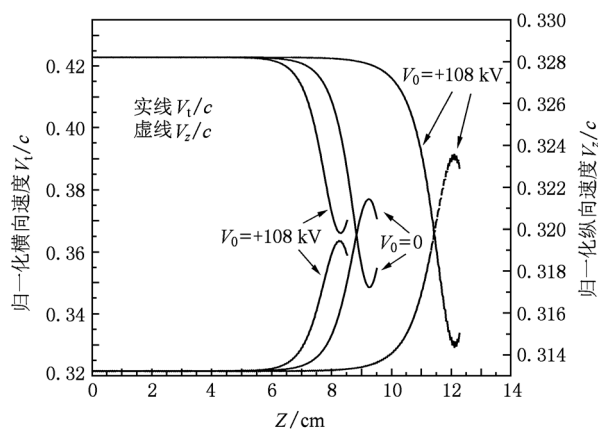


图 4 外加静电电压取不同数值时归一化横向速度  $v_1/c$  (实线) 和归一化纵向速度  $v_2/c$  (虚线) 的演化曲线(此处参量与图 1 相同)

综上所述,在小轨道同轴回旋管放大器中引入内导体接地、外导体接负的外加径向静电电压,可以明显提高回旋管放大器的性能.

- [1] Flyagin V A, Gaponov A V, Petelin M I, Yulpatov V K 1977 *IEEE Trans. on Microwave Theory And Techniques* **25** 514
- [2] Li H F, Du P Z, Yang S W, Xie Z L, Zhou X L, Wan H R, Huang Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 312 (in Chinese) [李宏福、杜品忠、杨仕文、谢仲怜、周晓岚、万洪蓉、黄勇 2000 物理学报 **49** 312]
- [3] Du C H, Liu P K, Xue Q Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4612 (in Chinese) [杜朝海、刘濮鲲、薛谦忠 2010 物理学报 **59** 4612]
- [4] Du C H, Liu P K, Xue Q Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 048703
- [5] Gantenbein C, Borie E, Dammertz G, Nickel H U, Piosczyk B, Thumm M 1994 *IEEE Trans. on Plasma Science* **22** 861
- [6] Kartikeyan M V, Iatrou C T, Thumm M 2001 *IEEE Trans. on Plasma Science* **29** 57
- [7] Piosczyk B, Braz O, Dammertz G., Iatrou C T, Kern S, Kuntze M, Mobius A, Thumm M, Flyagin V A, Khishnyak V L, Malygin V, Pavelyev A B, Zapevalov V E 1997 *IEEE Trans. on Plasma Science* **25** 460
- [8] Advani R, Hogge J P, Kreischer K E, Pedrozzi M, Read M E, Sirigiri J R, Temkin R J 2001 *IEEE Trans. on Plasma Science* **29** 943
- [9] Hogge J P, Kreischer K E, Read M E 1996 *IEEE International Conference on Plasma Science* Boston, USA, August 3—5, 1996 p268
- [10] Nusinovich G S, Read M E, Dumbrajs O, Kreischer K E 1994 *IEEE Trans. on Electron Devices* **41** 433
- [11] Zhang S C, Thumm M 2000 *IEEE Trans. MTT* **48** 8
- [12] Zhang S C 1999 *Asia Pacific Microwave Conference* Singapore, 30 Nov. -03 Dec. 1999 p833
- [13] Zhang S C, Thumm M 1999 *Asia Pacific Microwave Conference* Singapore, 30 Nov. -03 Dec. 1999 p836
- [14] Zhang S C, Ouyang Z B, Qiu C R, Zhang H B, Jin J B 2004 *IEEE Trans. Plasma Science* **32** 981
- [15] Zhang S C 2004 *Phys. Plasmas* **11** 3969
- [16] Watkins D A, Wada G 1958 *Proc. IRE* **46** 1700
- [17] Pantell R H 1960 *IRE Trans. On ED* **7** 22
- [18] Barnett L R, Alexeff I 1979 *IEDM Tech. Digest* Washington D. C., Dec. 1979 p168
- [19] Alexeff I, Dyer F 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 351
- [20] Liu S G, Zhang S C, Yang Z, Cheng X, Ouyang Z B 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 3621
- [21] Zhang S C 1986 *Int. J. Infrared and Millimeter Waves* **7** 1497
- [22] Zhang S C 1988 *Acta Electronica Sinica* **16-1** 93
- [23] Gover A 1979 *Free-Electron Generators of Coherent Radiation* (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) p701
- [24] Bekefi G, Shefer R E 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 5158
- [25] Riyopoulos S 1997 *Phys. Rev. E* **56** 4710

- [26] Zhang S C 2009 *Phys. Plasmas* **16** 093107
- [27] Zhang S C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 053102
- [28] Zhang S C 2010 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13** 090701
- [29] Zhang S C 1994 *Free Electron Laser* (Chengdu: Southwest Jiaotong University Press) pp77—98 (in Chinese) [张世昌 1994 自由电子激光导论 (成都:西南交通大学出版社)第 77—98 页]
- [30] McDermott D B, Chong C K, Luhmann N C, Chu K R, Dialetis D 1994 *IEEE Trans. on Plasma Science* **22** 920
- [31] Yu S, Li H F, Xie Z L, Huang Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1979 (in Chinese) [喻 胜、李宏福、谢仲怜、黄 勇 2001 物理学报 **50** 1979]
- [32] Dawn T Y, Chen H C, Chen J M 1998 *Phys. Plasmas* **5** 529

## Nonlinear simulation of a coaxial gyro-amplifier with external electrostatic voltage<sup>\*</sup>

Kong Yan-Yan Zhang Shi-Chang<sup>†</sup>

(*Institute of Photoelectronics, School of Information Science and Technology,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

(Received 11 October 2010; revised manuscript received 10 November 2010)

### Abstract

A proposal is presented to enhance the saturation output power of a small-orbit coaxial gyro-amplifier by employing an external electrostatic voltage. Nonlinear simulations show that improved saturation output power increases 19 % for a transverse electric mode at a frequency of 0.14 THz. Both the ratio of the electron-beam transverse velocity to the axial velocity and the spread of transverse velocity do not cause obvious influence on the saturation power. Therefore the performance of gyro-amplifier is effectively improved.

**Keywords:** gyro-amplifier, electrostatic field, centrifugal electrostatic focusing system, saturation power

**PACS:** 52.59.Rg, 84.40.Ik, 41.60.Cr

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60871023) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200806130012).

† Corresponding author. E-mail: sczhang@home.swjtu.edu.cn