

W 波段扩展相互作用速调管放大器的模拟与设计

吴洋^{1)2)3)†} 许州²⁾ 周霖²⁾ 李文君²⁾ 唐传祥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, 绵阳 621900)

3) (高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2012 年 5 月 21 日收到; 2012 年 6 月 14 日收到修改稿)

扩展相互作用速调管放大器是一种高功率、高频率的毫米波放大器, 具有广阔的应用前景. 本文基于电磁模拟软件和三维 PIC 模拟软件, 对工作在 W 波段扩展相互作用速调管放大器进行了设计和仿真. 在电子注电压 30 kV, 电流 8 A 的条件下, 器件的输出微波功率 43 kW, 频率 96.8 GHz, 增益 49.3 dB, 效率 18%.

关键词: W 波段, 扩展相互作用速调管, PIC 模拟, 束波相互作用

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

1 引言

受微波电子系统对微波源的需要牵引, 真空电子器件的频率正逐步扩展到毫米波频段. W 波段是毫米波大气窗口之一, 频率介于微波和光波之间, 兼有微波和红外的优点, 目前已在雷达、制导、电子对抗等方面得到大量应用^[1]. 受固态器件输出功率的限制, 更高功率量级的应用仍采用真空器件, 应用较多的有折叠波导行波管^[2,3]、回旋管^[4]、带状注速调管^[5,6]和扩展相互作用速调管 (EIK)^[7,8]. 其中发展折叠波导行波管面临的主要技术问题是器件内自激振荡的抑制; 而毫米波回旋管对电子注的品质以及磁场位形依赖性很高; 发展带状注速调管仍需要解决带状电子注的成形、聚焦和长距离稳定传输等问题. 相比与其他类型的毫米波器件, EIK 既具有传统速调管的高功率、高效率、自激振荡易于抑制等优点, 又具有磁场简单、结构紧凑和易于加工等技术优势, 具有广阔的应用前景.

本文首先采用电磁模拟软件对 W 波段 EIK 的高频结构进行了冷腔设计, 然后利用全三维粒子模拟软件进行了整管的三维仿真. 三维 PIC 模拟结果

为: 电子束电压 30 kV, 电流 8 A, 磁场 0.5 T, 注入微波功率 500 mW, 输出微波功率 43 kW, 增益 49.3 dB, 效率 18%.

2 扩展相互作用速调管的基本原理

速调管放大器采用高频谐振腔对电子束进行速度调制, 电子束在漂移管中将速度调制转换为密度调制, 从而在输出腔中实现微波输出. 谐振腔对电子束的速度调制可以表示为

$$v = v_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{M \cdot V_{\text{gap}}}{V_0} \sin \left(\omega t_0 + \frac{\theta_d}{2} \right) \right], \quad (1)$$

其中 t_0 是电子进入到谐振腔的时刻, θ_d 是电子的直流渡越角, V_0 是电子束的直流电压, V_{gap} 是谐振腔的间隙电压. (1) 式中 M 为电子束与谐振腔间隙场间的耦合系数, 其定义为

$$M = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E_z(z) e^{j\beta_e z} dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E_z(z)| dz}, \quad (2)$$

其中, $\beta_e = \omega/v_0$.

当忽略空间电荷效应, 漂移管内的谐波电流为

$$I_1(z) = 2I_0 J_1 \left(\frac{1}{2} \frac{M \cdot V_{\text{gap}}}{V_0} \frac{\omega}{v_0} z \right), \quad (3)$$

† E-mail: wuyang851219@gmail.com

从 (3) 式可以看出, 束流的调制深度依赖于间隙电压和耦合系数, 即 $M \cdot V_{\text{gap}}$.

对于速调管的输入腔, 间隙电压 V_{gap} 可表示为

$$V_{\text{gap}} = \sqrt{\frac{8P_g \rho Q_{\text{ext}}}{\left(1 + \frac{Q_{\text{ext}}}{Q_{\text{bl}}}\right)^2 + Q_{\text{ext}}^2 \delta^2}} \propto \sqrt{\rho} \propto \sqrt{d}, \quad (4)$$

其中 P_g 是注入微波功率, Q_{ext} 和 Q_{bl} 分别是输入腔的外观品质因数和有载品质因数, $\delta = f/f_0 - f_0/f$, ρ 是输入腔的特性阻抗, 其正比于间隙长度 d . 因此, 可以定义束波相互作用因子 χ 为,

$$\chi = M \cdot \sqrt{d}, \quad (5)$$

χ 反映了电子束与谐振腔的相互作用强度, χ 越高, 谐振腔对电子束的调制效果越好.

对于理想的单间隙腔, 束波相互作用因子 χ 与间隙长度的关系如图 1 所示,

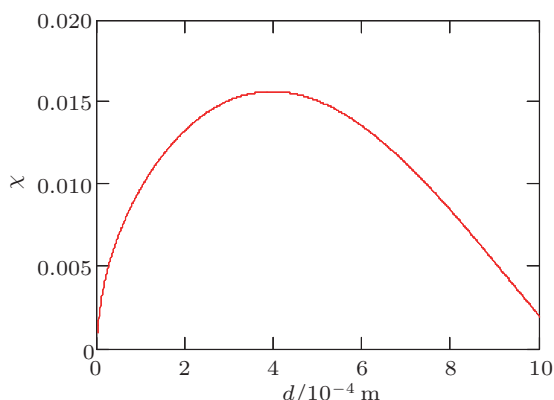


图 1 理想单间隙腔束波相互作用因子 χ 与间隙长度的关系

从图 1 可以看出, 对于电子束电压 30 kV, 工作频率在 W 波段 95 GHz 时, 要求间隙长度为 0.4 mm. 由于间隙长度很短, 器件很容易因间隙电场过高而发生射频击穿.

为提高束波耦合效率, 降低间隙电场, 采用扩展相互作用结构的谐振腔. 以腔数为 N 的单周期腔链为例, 假设其工作于纵向的 m 模式, 即 $\beta_m \cdot p = \frac{m}{N}\pi$, 则间隙内的场可表示为

$$E_z^{(m)} = E_0 \cos(\beta_m z). \quad (6)$$

当 $\beta_m = \beta_e$, 即电子束速度与慢波相速相等时, 有最大的耦合系数, $M_{\text{max}} = \frac{\pi}{4}$. 图 2 是 $\frac{\pi}{2}$ 模式的耦

合系数与电子束 β_e 的关系.

因此, 理论上来说, 保持电子束与慢波相速的同步, 可以通过增加耦合谐振腔链的腔数来提高束波相互作用因子 χ . 这就是在毫米波频段采用扩展相互作用腔作为速调管的高频结构的原因.

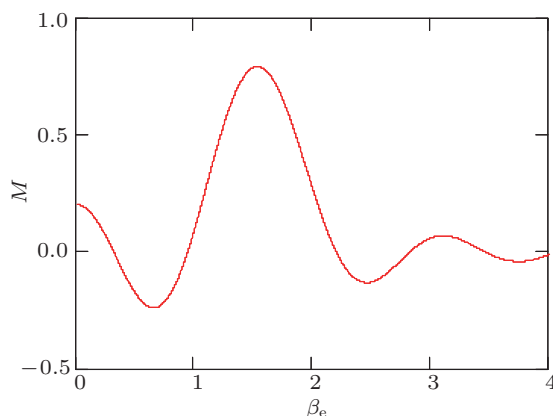


图 2 $\frac{\pi}{2}$ 模式的耦合系数 M 与 β_e 的关系

3 W 波段 EIK 的高频设计

W 波段 EIK 的高频结构采用矩形耦合谐振腔链 (谐振腔壁开双边耦合槽) 加载对工作模式截止的圆柱漂移管 (电子束采用实心的笔形束), 其结构如图 10 所示. 采用这种结构有三个优点: 1) 采用矩形耦合谐振腔链而非传统的圆柱腔链, 使得高频结构在工艺实现上更为容易; 2) 通过改变谐振腔壁的耦合槽的大小, 可以很容易地实现频率调谐; 3) 采用实心笔形束, 保证了电子束长距离稳定传输, 虽然对阴极的发射能力以及聚焦磁场强度提出了较高的要求, 但是仍在工程实现的范围内.

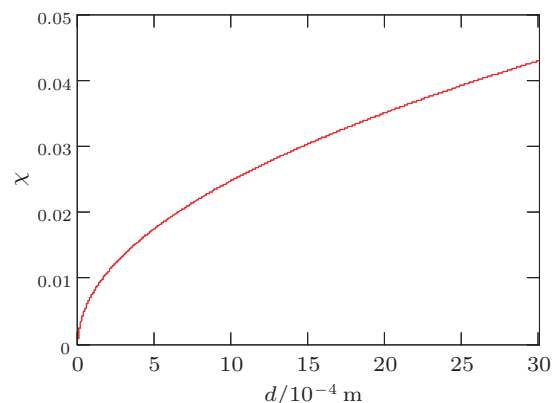


图 3 耦合谐振腔链束波相互作用因子 χ 与间隙长度的关系

3.1 输入腔冷腔特性

输入腔采用对称开双边耦合槽的 5 腔驻波腔链, 注入微波通过与驻波腔链相连的矩形波导馈入到腔体内, 其场分布如图 4 所示. 图 5 是沿轴线的 E_z 分布, 可以确定输入腔工作在纵向的 $\frac{3}{5}\pi$ 模式, 该模式的谐振频率为 96.840 GHz, 与工作频率 96.8 GHz 很接近. 对于 30 kV 的电子束, 该模式的耦合系数是 $M = 0.155$.

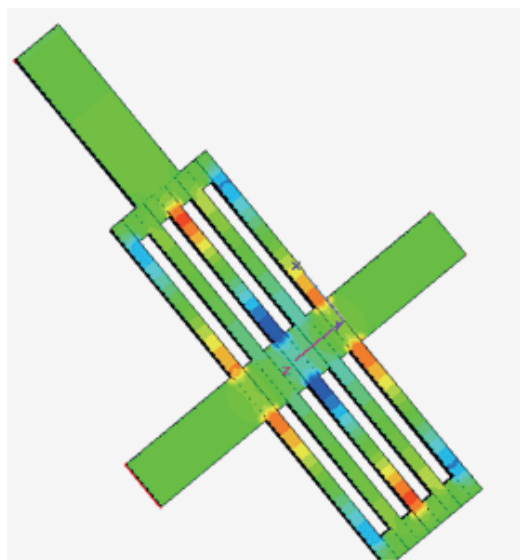


图 4 输入腔的冷腔电场分布

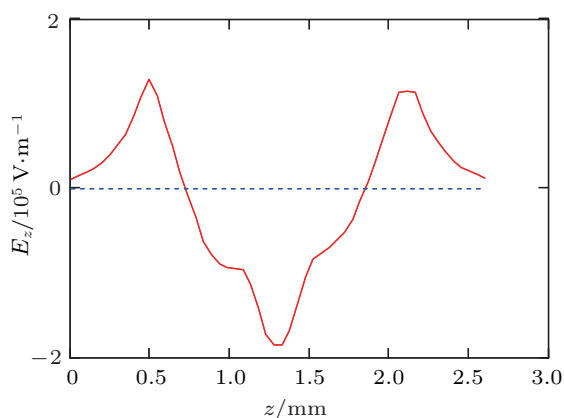


图 5 输入腔 E_z 沿轴线的分布

3.2 中间腔的冷腔特性

中间腔 1 和中间腔 2 采用非对称开双边耦合槽的 3 腔驻波腔链, 其结构和场分布如图 6 所示. 图 7 是沿轴线的 E_z 分布, 可以确定中间腔 1 和 2 均工作在纵向的 π 模式, 其耦合系数 $M = 0.64$.

通过调整耦合槽的大小, 使得中间腔 1 的 π 模式谐振频率为 96.710 GHz, 而中间腔 2 的 π 模式谐振频率为 96.885 GHz, 略高于中间腔 1 的谐振频率.

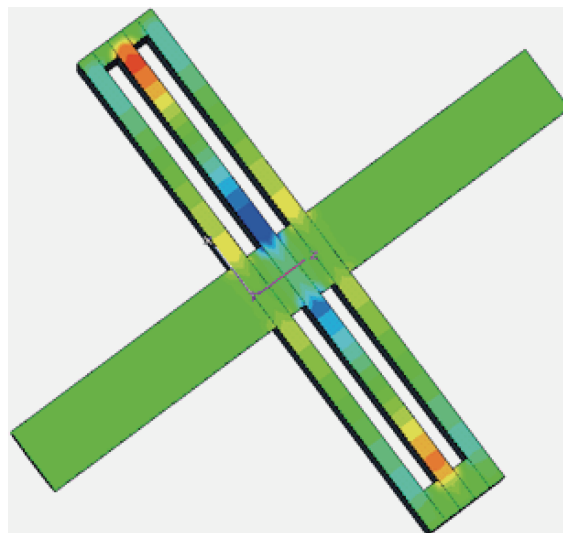


图 6 中间腔的冷腔电场分布

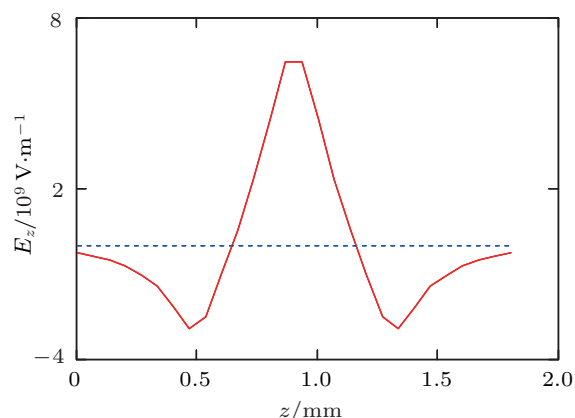


图 7 中间腔 E_z 沿轴线的分布

3.3 输出腔冷腔特性

输出腔采用非对称开双边耦合槽的 5 腔驻波腔链, 其结构和场分布如图 8 所示. 图 9 是沿轴线的 E_z 分布, 可以确定输出腔工作在纵向的 π 模式, 该模式的谐振频率为 96.80 GHz, 与器件的最佳工作频率一致, 有利于从调制电子束中提取动能转换为射频能量输出. 该模式的耦合系数是 $M = 0.743$.

4 W 波段 EIK 的三维粒子模拟

根据前面的高频设计, 建立了 W 波段 EIK 的

三维整管粒子模拟模型如图 10 所示, 在电子束电压 30 kV, 电流 8 A 时, 器件的输出功率为 43 kW, 频率 96.8 GHz, 效率 18%, 增益 49.3 dB, 1 dB 带宽 200 MHz. 图 11 是输出微波功率, 图 12 是输出微波电场的频谱, 图 13 是器件的带宽.

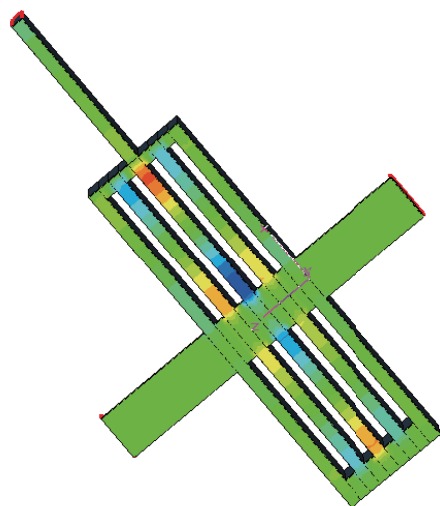


图 8 输出腔的冷腔电场分布

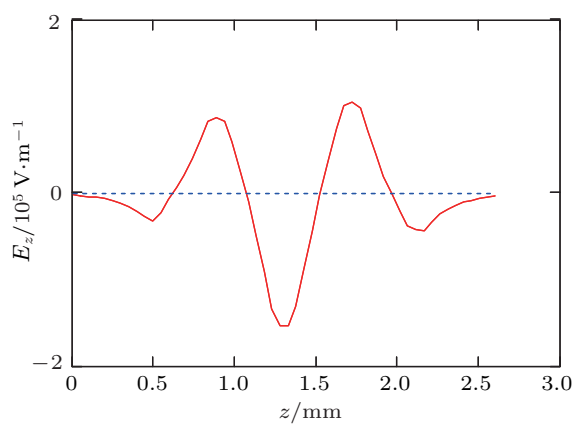


图 9 冷腔 E_z 沿轴线的分布

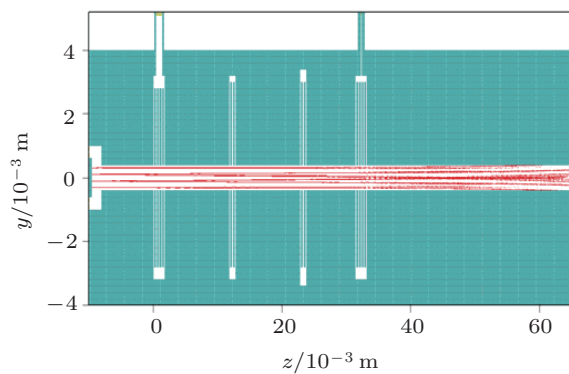


图 10 器件 PIC 模拟模型

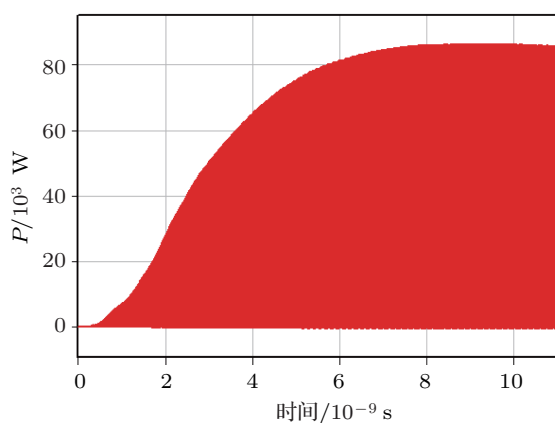


图 11 输出微波功率

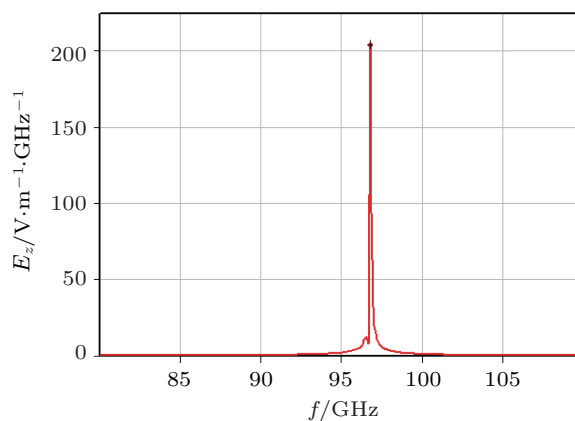


图 12 输出微波电场频谱

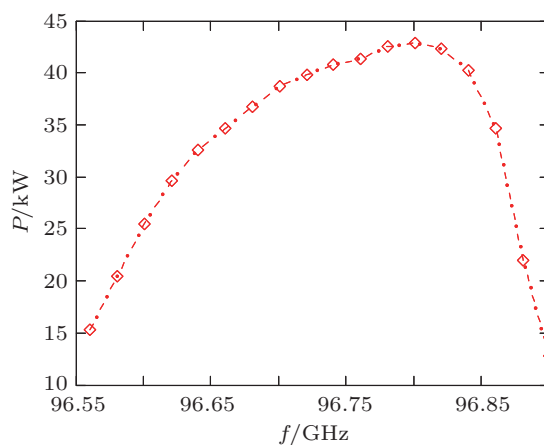


图 13 器件的工作带宽

5 结论

本文利用三维 PIC 程序建立了一套 W 波段扩展相互作用速调管放大器模型, 在 96.8 GHz, 0.5 W

的输入微波下, 实现了 43 kW 的微波输出, 增益达到 49.3 dB, 效率 18%. 模拟结果对器件的设计、优

化和实际的工艺实现具有指导意义, 为进一步研发更效率的毫米波器件打下了基础.

- [1] Roitman A, Berry D, Steer B 2005 *IEEE Transactions on Electron devices* **52** 895
- [2] Feng J J, Hu Y F, Cai J, Wu X P, Tang Y 2010 *Vacuum Electronics* **2** 27 (in Chinese) [冯进军, 胡银富, 蔡军, 邬显平, 唐烨 2010 真空电子技术 **2** 27]
- [3] Cai J, Feng J J, Liao F J, Huang M G, Wu X P 2006 *Acta Electronica Sinica* **34** 2342 (in Chinese) [蔡军, 冯进军, 廖复疆, 黄明光, 邬显平 2006 电子学报 **34** 2342]
- [4] Lai G J, Liu P K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4515 (in Chinese) [来国军, 刘濮鲲 2007 物理学报 **56** 4515]
- [5] Scheitrum G 2005 7th *Workshop on High Energy Density and High Power RF*
- [6] Ruan C J, Wang S Z, Zhao D, Ruan W, Wang Y, Xie J X 2010 *Vacuum Electronics* **2** 8 (in Chinese) [阮存军, 王树忠, 赵鼎, 阮望, 王勇, 谢敬新 2010 真空电子技术 **2** 8]
- [7] Zhong Y, Ding H B, Wang S Z, Ruan C J, Liang Y, Liu W X 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 3055 (in Chinese) [钟勇, 丁海兵, 王树忠, 阮存军, 梁源, 刘文鑫 2011 强激光与粒子束 **23** 3055]
- [8] Day W R 1966 *Proc of IEEE* **54** 539

Simulation and design of a W-band extended interaction klystron amplifier

Wu Yang^{1)2)3)†} Xu Zhou²⁾ Zhou Lin²⁾ Li Wen-Jun²⁾ Tang Chuan-Xiang¹⁾

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

2) (Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

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

(Received 21 May 2012; revised manuscript received 14 June 2012)

Abstract

Extended interaction klystron amplifier is a very important high power millimeter wave source with many actual and potential applications. Based on the electromagnetic simulation software and 3D PIC code, a W-band extended interaction klystron amplifier is designed. In the PIC simulation, when the beam voltage is 30 kV and current is 8 A, the device can generate a 43 kW output power at 96.8 GHz with an efficiency of 18% and a gain of 49.3 dB.

Keywords: W-band, extended interaction klystron, PIC simulation, beam-wave interaction

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

† E-mail: wuyang851219@gmail.com