

径向三腔渡越时间振荡器数值模拟*

臧杰锋, 刘庆想, 朱 静, 林远超

(西南交通大学 理学院, 成都 610031)

摘 要: 基于渡越辐射机理结合径向结构的低阻抗特性, 提出了一种新型的低阻抗高功率微波器件——径向三腔渡越时间振荡器, 它由 3 个等间距的边耦合同轴腔组成, 径向运动电子束与谐振腔中的角向均匀模式场相互作用。采用 PIC 粒子模拟程序进行了模拟研究。在电子束能量 450 keV、束流 60 kA 且无外加引导磁场的条件下, 当结构参数网长为 4.8 cm, 腔间距为 1.4 cm, 电子发射面为 0.8 cm, 内径为 8 cm 时, 获得了平均功率 7.4 GW, 频率 4.1 GHz 的微波输出, 效率达 27.4%, 阻抗 7.5 Ω 。通过粒子模拟给出了束波互作用效率随电子束电压、电流以及谐振腔间距的变化曲线, 电子束电压对输出微波频率的影响曲线以及不同谐振频率与最佳谐振腔间距的对应曲线, 这些曲线表明该器件具有渡越时间效应的基本特征, 属于渡越辐射器件, 且具有对电子束质量要求不高的特点。

关键词: 高功率微波; 渡越辐射; 渡越时间振荡器; 径向谐振腔; 高频磁场

中图分类号: TN122 **文献标识码:** A

为提高微波器件的输出功率, 一种方法是提高电子束的电流(即降低器件的阻抗), 而径向结构器件结构紧凑, 电子发射面大, 空间电荷效应小, 阻抗低, 空间电荷限制流大^[1], 束波互作用效率比轴向结构器件更高。1996 年, M. J. Arman 提出了径向加速器^[2], 通过粒子模拟它在 250 kV, 10 kA 的条件下获得了峰值功率大于 500 MW 的微波输出; 1999 年, 吴中发等对径向速调管振荡器进行了数值模拟研究, 其电压为 500 kV, 电流 50 kA^[3]; 2006 年, 李少甫等对径向强流速调管振荡器进行了数值模拟, 其阻抗为 16.7 Ω (500 kV, 30 kA)^[4]。提高微波器件的输出功率的另一种方法是提高束波互作用效率。随着脉冲功率技术的发展, 基于渡越时间效应的强流相对论高功率微波器件越来越受到人们的重视。B. M. Marder 研究了一种被称为分离腔振荡器(SCO)^[5]的器件, 它是用来调制强流相对论电子束的; 1992 年 R. B. Miller 等人成功研制了超级后加速管^[6]。这两种器件都是基于渡越时间效应的器件, 它们都采用等幅反向的 π 模驻波场, 其束波互作用效率比利用单一驻波场的渡越时间振荡器更高。随后, 中国工程物理研究院研究了三腔谐振腔的渡越时间效应, 其研究结果表明三腔 $2\pi/3$ 模场的渡越时间效应将比两腔 π 模场的渡越时间效应具有更高的效率, 并据此提出了三腔渡越时间振荡器^[7]。三腔渡越时间振荡器在 C 波段产生了 400 MW 的微波输出, 束波转换效率约 17%(500 kV, 5 kA), 在 L 波段的束波转换效率甚至达到 30%。

我们把三腔渡越时间效应和径向结构结合起来, 提出了径向三腔渡越时间振荡器, 该器件将工作于径向三腔的 $2\pi/3$ 模, 可以不加引导磁场。本文对该器件进行了粒子模拟, 以验证其特性。

1 物理结构

如图 1 所示, 所设计的径向三腔渡越时间振荡器是由 3 个等间距的边耦合同轴腔组成, 即它的输出也是同轴结构。同轴腔内部的金属网把腔体分为 4 个部分, 栅网长度决定了各腔之间的耦合, 这也是决定振荡器谐振频率的主要因素之一。该结构具有轴对称性, 并假设电子束的发射也是均匀的, 则与电子束发生相互作用的模式是角向均匀模。我们提出了一种近似方法对该结构的角向均匀模式进行数值求解^[8], 由于这些模式具有 E_θ 分量, 我们把它们定义为

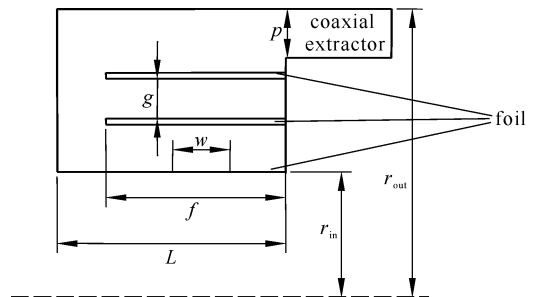


Fig. 1 Structure of radial three-cavity oscillator

图 1 径向三腔渡越时间振荡器结构示意图

* 收稿日期: 2007-06-13; 修订日期: 2008-01-18

作者简介: 臧杰锋(1980—), 男, 江苏东台人, 博士生, 助教, 主要从事高功率微波器件研究; zjf_12345@126.com。

$TM_{l,m,n}$ 模, 其中 l, m, n 分别表示 E_ρ 在径向、角向和轴向的半周期数。参考文献[8]给出了各模式下, 径向三腔结构特有模 $\pi/3$ 模和 $2\pi/3$ 模的谐振频率和场分布。其中 $2\pi/3$ 模场的形式是各腔的场的相位依次相反, 上下两腔的振幅与半径成反比, 中间腔的场分布也是与半径成反比, 平均振幅为上下两腔之和(如图 2 所示), 它与轴向三腔结构的 $2\pi/3$ 模类似。

轴向宽度为 w 的电子束从同轴腔内表面处的金属网进入腔体与振荡器的本征模($2\pi/3$ 模)相互作用。在径向三腔渡越时间振荡器中随着电子束的径向运动, 电荷密度降低。因此与轴向三腔渡越时间效应振荡器相比, 它的空间电荷效应小, 在相同间距的栅网可以引导的电流更大, 且电荷密度降低还使得电子束电势能降低, 可以转化为微波的动能增大, 从而可以进一步提高束波互作用效率。下面将用 2.5 维 PIC 程序对径向三腔渡越时间振荡器进行数值模拟。

2 模拟结果与分析

在模拟中采用给定参数的电子束, 且不考虑腔壁的热损耗, 即假定 Q 值为无穷大。这样设定的原因是它不会影响我们对该器件特性的认识, 同时会使模拟简化, 模拟结果更具有针对性。根据高频特性分析的结果, 我们设计了 C 波段径向三腔渡越时间振荡器, 主要参数为: 电子束能量 450 keV, 束电流 60 kA, 网长 $f=4.8$ cm, 腔间距 $g=1.4$ cm, 电子发射面宽度 $w=0.8$ cm, 内径 $r_{in}=8$ cm。图 3 为同轴输出口处电压随时间的变化波形, 图 4 是傅里叶分析后所得的频谱。由图 3、图 4 可以看出, 该器件频谱比较单一, 即有很好的频率选择性, 中心频率为 4.1 GHz。图 5 为输出微波功率随时间的变化波形, 该器件脉冲的平均功率为 7.5 GW(见图 6), 束波转换效率为 27.4%。

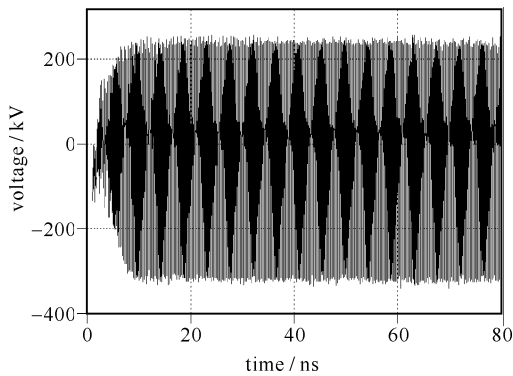


Fig. 3 Voltage at extractor vs time
图 3 输出口电压随时间变化的曲线

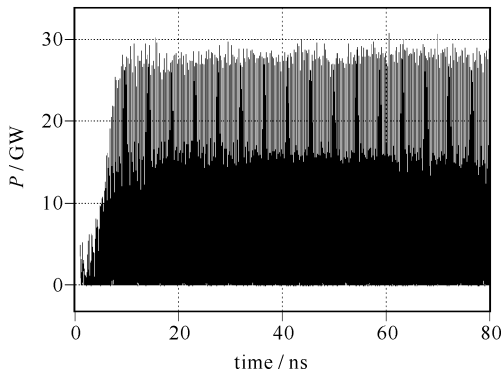


Fig. 5 Power of wave at extractor vs time
图 5 输出微波的功率随时间变化的曲线

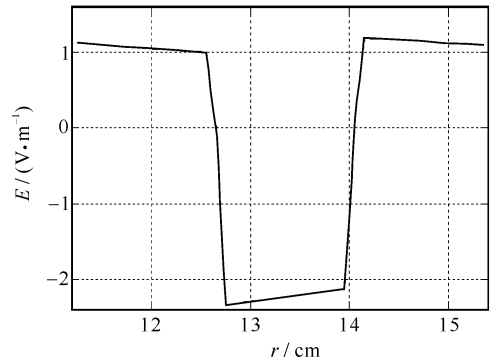


Fig. 2 Radial distribution of radial electric field of $2\pi/3$ mode
图 2 $2\pi/3$ 模的径向电场的径向分布

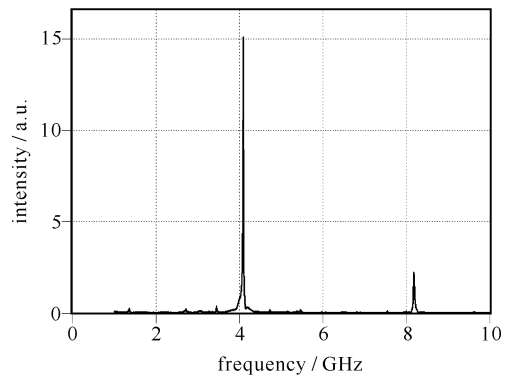


Fig. 4 Frequency spectrum of output wave
图 4 输出微波的频谱

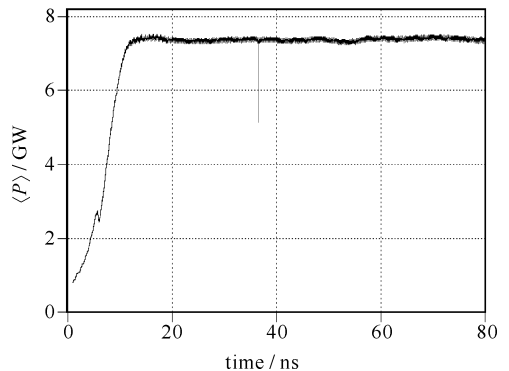


Fig. 6 Average power of output wave
图 6 输出微波的平均功率

图 7 和图 8 是电子在某一稳定振荡时刻径向速度 E_r 的相空间图和动能的相空间图。它们表明,经过径向三腔的调制,大部分电子失去动能,失去的动能转化为微波能量且电子在到达谐振腔外壁时能散度小,有利于耦合提取。图 7 还表明仅有少数电子被反射,并未形成虚阴极。图 9 是在第 3 腔观测到的径向电流随时间变化的曲线,它表明电子在第三腔中已经被强烈地调制。图 7~图 9 表明该器件具有高效率。

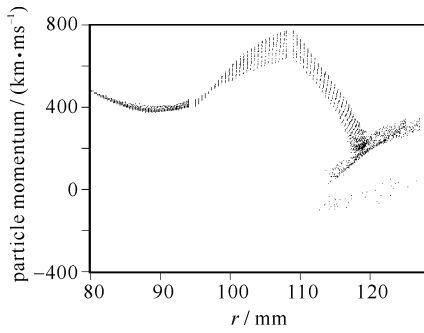


Fig. 7 Phase-space of e-beam in oscillator

图 7 谐振腔中电子相空间图

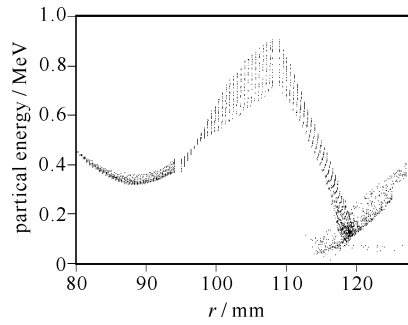


Fig. 8 Energy of e-beam along radius in oscillator

图 8 谐振腔中电子能量分布

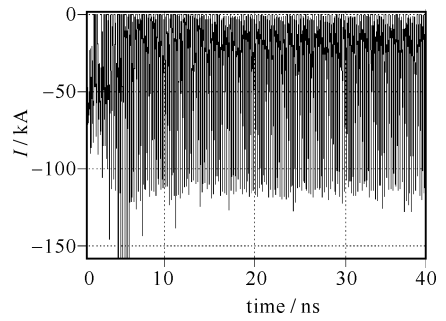


Fig. 9 Electron beam current in third cavity

图 9 第 3 腔中电子束电流

为了研究该器件对电子束质量的要求,我们分别通过设定电流改变电压和设定电压改变电流的方法对该器件进行模拟,结果如图 10 所示。模拟结果表明该器件对电子束质量要求不高,电压电流在较大范围内变化时对束波互作用效率影响不大,且频率稳定,见图 11。

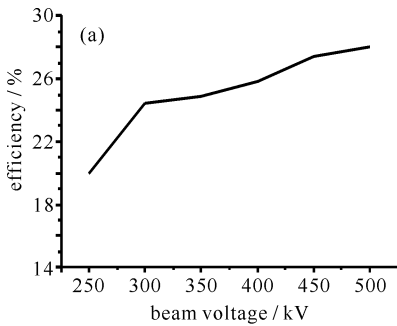


Fig. 10 Efficiency vs beam voltage and current

图 10 束波互作用效率曲线

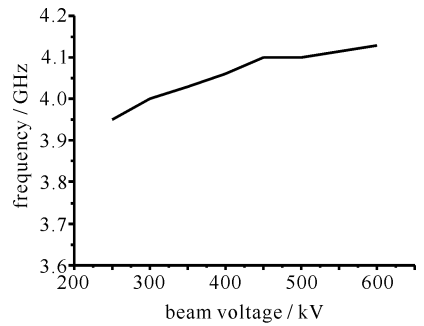
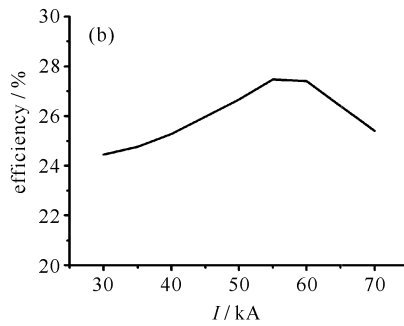


Fig. 11 Frequency of output wave

图 11 输出微波频率的曲线

渡越时间振荡器最重要的特性是束波互作用效率随直流渡越角变化,即随谐振腔中的栅网间距变化。图 12 给出了径向三腔渡越时间振荡器中,输出微波功率随栅网间距的变化曲线,最大输出功率对应的谐振腔间距约为 1.42 cm。由于径向三腔渡越时间振荡器的谐振频率主要是由谐振腔的轴向长度和栅网长度决定,而栅网间距对谐振频率影响很小,因此图 12 中最佳谐振腔间距对应的谐振频率保持在 4.1 GHz 附近,见图 13。由图 12 和 13 可以看出,当谐振腔间距增大或减小都会使得束波互作用效率降低。

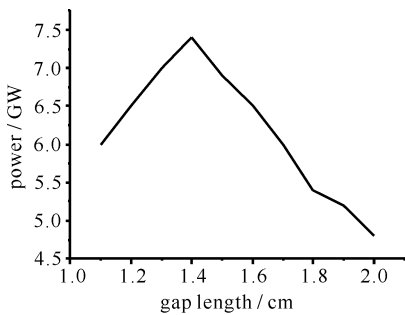


Fig. 12 Power of output wave vs gap length

图 12 输出微波功率随谐振腔间距的变化

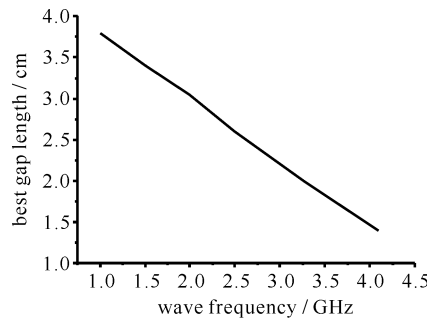


Fig. 13 Best gap lengths vs frequency

图 13 谐振频率与最佳腔间距的关系曲线



Fig. 14 Transverse oscillating of e-beam

图 14 电子束的横向摆动

由图 13 还可以看出最佳腔间距与谐振频率基本成线性变化,根据渡越时间效应小信号理论^[9],渡越时间效应的效率是由直流渡越角决定的,因此在相同的电压(速度)下,不同的谐振频率,谐振腔最佳腔间距也不同。由于束流传输,模式竞争以及起振时间等因素的限制,图 12、图 13 的模拟只给出了曲线的一部分,完整的曲线有待进一步的理论研究。

在模拟过程中还出现了一些目前不能理解的现象,例如在稳定振荡的条件下,电子束在轴向出现剧烈摆动,见图 14,其摆动频率与输出微波频率一致。当利用外加磁场把电子束限制在径向运动时,发现束波互作用效率会明显下降,甚至不能起振。另外,在该器件具有最大束波互作用效率时,电子束并不处于由高频特性分析所获得的电场最大的位置(图 14 中虚线位置),而是要偏离最大位置一定的距离。

3 结 论

基于渡越辐射的高效率和径向电子束结构的低阻抗特性,提出了一种新型的高功率微波器件径向三腔渡越时间振荡器。通过调整电子束电压、电流、腔间距和腔长等参数进行模拟研究,验证了该器件满足渡越时间效应的基本特征,其束波互作用机制是渡越辐射,或者是以渡越辐射为主,并获得了一些主要的特征曲线。模拟结果表明径向三腔渡越时间振荡器具有低阻抗、高效率,且输出微波频率单一稳定,对电子束质量要求不高等特点。在电子束能量 450 keV、电流 60 kA 且无外加引导磁场的条件下获得了频率为 4.1 GHz、平均功率为 7.4 GW 的微波输出,效率 27.4%,阻抗 7.5 Ω 。

参考文献:

- [1] 吕建钦. 带电粒子束光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004:305-307. (Lü J Q. Electrified particle beams optics. Beijing: Higher Education Press, 2004:305-307)
- [2] Arman M J. Radial acceletron, a new low-impedance HPM source[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1996, **24**(3):964-969.
- [3] 吴中发, 王玉芝. 径向速调管振荡器的理论设计与数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(2):211-214. (Wu Z F, Wang Y Z. Theoretical design and numerical simulations of radial klystron oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2):211-214)
- [4] 李少甫, 杨中海. 新型高功率径向强流速调管振荡器[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11):1888-1892. (Li S F, Yang Z H. Radial klystron oscillator driven by intense relativistic electron beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11):1888-1892)
- [5] Marder B M, Clark M C, Bacon L D, et al. The split-cavity oscillator: a high-power e-beam modulator and microwave source[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1992, **20**(3):312-331.
- [6] Miller R B, McCullough W F, Lancaster K T, et al. Super-relatron theory and experiments[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1992, **20**(3):332-343.
- [7] 范植开, 刘庆想, 于爱民, 等. C 波段三腔渡越时间振荡器的理论与实验[J]. 中国科学(G 辑), 2003, (6):515-531. (Fan Z K, Liu Q X, Yu A M, et al. Theory and experiments of the C-band three cavities transit time oscillator. *Science in China (Series G)*, 2003, (6):515-531)
- [8] 臧杰峰, 刘庆想. 径向三腔渡越时间振荡器高频特性分析[C]//四川省电子学会高能电子学专业委员会第四届学术交流会议论文集. 2005: 296-300. (Zang J F, Liu Q X. High frequency characters analyses of the radial three-cavity transit time oscillator//The Fourth Symposium of High Power Electrons Institute of Sichuan Province of China. 2005:296-300)
- [9] 范植开, 刘庆想. 三腔渡越管振荡器高频结构的解析研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(4):491-496. (Fan Z K, Liu Q X. Analytic research on the high frequency structure of the three-cavity transit-time tube oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(4): 491-496)

Numerical simulation of radial three-cavity transit time oscillator

ZANG Jie-feng, LIU Qing-xiang, ZHU Jing, LIN Yuan-chao

(School of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A new low-impedance of HPM source called radial three-cavity transit time oscillator is proposed based on the transition radiation and the low-impedance character of the radial structure. The oscillator is consisted of three side-coupling coaxial cavities which have the same cavity height. Circle symmetrical models are designed to effect with the electrons which moving in the radial direction. Through the PIC simulation, A C-band oscillator is designed, and the average operation power of 7.4 GW at 4.1 GHz is obtained, when excited by a 450 keV, 60 kA radial electron beam, with an impedance of 7.5 Ω . The vital character lines are obtained by simulation. Analysis result reveals that the oscillator has the basic characters of the transit time effect, and is of a transition radiation oscillator which has traits as follows: low impedance, high efficiency, less modes competition and low requirement for the characters of the electron beam.

Key words: High power microwave; Transition radiation; Transit time oscillator; Radial cavity; High-frequency magnetic field