

文章编号: 1001-4322(2009)12-1871-04

新型径向边加载渡越时间振荡器*

臧杰锋, 刘庆想, 林远超, 丁艳峰, 王彬蓉

(西南交通大学 理学院, 成都 610031)

摘 要: 根据渡越时间效应 3 维理论研究, 设计了一种工作于 6.1 GHz 的新型径向边加载渡越时间振荡器。为增强电子束在谐振腔中的横向摆动, 部分加大了高频结构中金属圆筒端部的宽度, 以增大横向电场的分布区域。3 维理论分析表明, 该器件的效率可以超过 50%。粒子模拟研究表明, 该器件在 170 kV, 18 kA 的电子束激励下, 平均输出功率达到 1.6 GW, 束波相互作用效率为 52.3%。

关键词: 渡越时间振荡器; 边加载; 径向; 渡越时间; 横向摆动

中图分类号: TN122 **文献标志码:** A

随着分离腔振荡器(SCO)^[1]、超级后加速管^[2]和三腔渡越时间振荡器^[3]等器件的提出, 渡越时间效应器件所具有的高功率、高效率、频率单一等特点受到越来越多研究者的重视。径向三腔渡越时间振荡器^[4]的低阻抗特性使渡越时间效应器件的输出功率可得到进一步提高。随着渡越时间效应器件中电子束的注入能量越来越高, 谐振腔中的高频场的场强振幅也越来越大, 形成慢波结构的栅网由于耐压能力较低将成为渡越时间效应器件发展的瓶颈。本文提出了一种新型径向边加载三腔渡越时间振荡器。该器件利用边加载金属圆筒代替径向三腔渡越时间振荡器中的栅网, 左右两组圆筒之间的间隙为电子束通道, 同时也是微波的耦合通道。数值模拟表明: 该结构具有类似三腔 $2\pi/3$ 模的高频场分布, 其谐振频率主要是由加载的金属圆筒长度和两个圆筒之间的径向距离决定。利用渡越时间效应器件的 3 维大信号理论^[5], 对该器件的束波相互作用过程进行了理论分析, 并利用 2.5 维 PIC 粒子程序进行了粒子模拟验证。

1 高频结构

图 1 给出了新型径向边加载三腔渡越时间振荡器结构示意图。它对径向边加载三腔渡越时间振荡器的金属圆筒 1 和 3 的端部进行了适当加宽, 增大横向(轴向)场。同时由于端部的加宽将会降低第 2 腔与第 1 腔和第 3 腔的耦合度, 使得第 2 腔的纵向(径向)场减小, 因此只选择对第 1 和第 3 圆盘的端部进行加宽, 并在第 2 腔中加入补偿结构, 减小端部加宽对第 2 腔中纵向场的影响, 上下两组圆盘之间任为电子束通道。由三腔高频特性分析^[6-7]知: 1, 4 和 2, 3 两组圆筒分别决定一组谐振频率。由于不能保证上下两组圆筒激励的谐振模式的初始相位一致, 因此为避免模式竞争, 设计中仍采用轴向长度不等的圆筒。

图 2 是由粒子模拟程序获得的该径向边加载三腔渡越时间振荡器高频场分布。图 3 是电场 E_r 在电子束通道中心位置处的沿径向的分布。图 4 是 E_z 在电子束通道中心位置处的沿径向的分布。图中, E_r, E_z, z 均作了归一化处理。

2 3 维理论与束波相互作用分析

已知电子束进入谐振腔的初始运动方向为径向, 设谐振频率为 ω 的谐振腔纵向驻波场分布为 $E_r(z, r, t) = f_r(z, r) \cos(\omega t + \phi)$, 其中 ϕ 为电子初始入射相位; 横向电场分布为 $E_z(z, r, t) = f_z(z, r) \cos(\omega t + \phi)$ 。由于驻波场中电场与磁场仅有能量交换而无能量流动, 因此电场与磁场的相位相差 $\pi/2$ 。设角向磁场分布为 f_B , 并令 $\bar{f}_B = f_{BC}$, 这里 c 为真空中光速, 则角向磁场为 $B_\phi(z, r, t) = \bar{f}_B(z, r) \cos(\omega t + \phi + \pi/2)/c$ 。

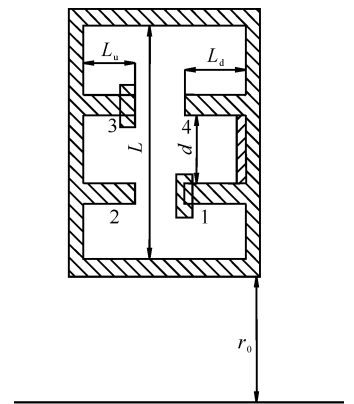
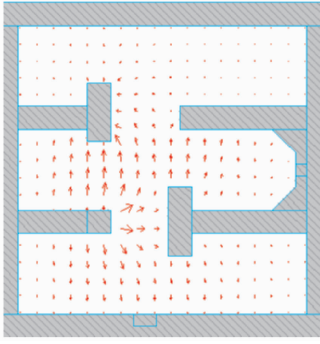
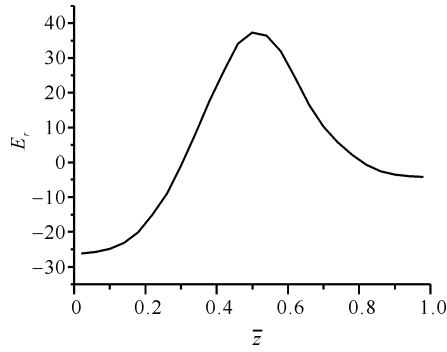
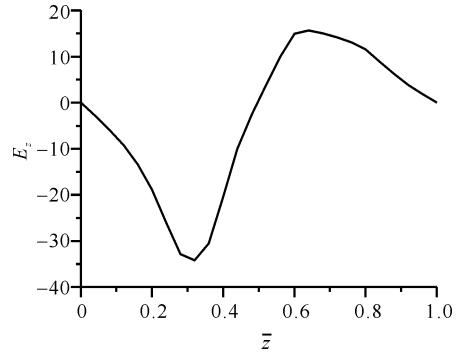


Fig. 1 Structure of the cavity
图 1 谐振腔结构示意图

* 收稿日期: 2009-02-13; 修订日期: 2009-09-03
作者简介: 臧杰锋(1980—), 男, 江苏东台人, 博士研究生, 讲师, 主要从事高功率微波器件研究; zjf_12345@126.com。

Fig. 2 Vector E_z of quasi- $2\pi/3$ mode图 2 类 $2\pi/3$ 模 E_z 矢量图Fig. 3 E_r radial distribution of quasi- $2\pi/3$ mode图 3 类 $2\pi/3$ 模 E_r 径向分布示意图Fig. 4 E_z radial distribution of quasi- $2\pi/3$ mode图 4 类 $2\pi/3$ 模 E_z 径向分布示意图

假定在 t 时刻, 电子径向动量与轴向动量分别为 p_r , p_z , 总动量为 p 。径向动量的变化率由角向磁场与径向电场决定, 即

$$\begin{aligned} \frac{dp_r}{dt} &= qB_\theta v_z + qE_r = -q\bar{f}_B \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \frac{v_z}{c} + qf_r \cos(\omega t + \phi) = \\ &= -q\bar{f}_B \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \frac{p_z}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} + qf_r \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m 表示电子的静止质量; v_z 为电子轴向速度; q 为电子电量。

同理, 轴向动量变化表示为

$$\begin{aligned} \frac{dp_z}{dt} &= qf_z \cos(\omega t + \phi) + q\bar{f}_B \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \frac{v_r}{c} = \\ &= qf_z \cos(\omega t + \phi) + q\bar{f}_B \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \frac{p_r}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

电子轴向运动轨迹表示为

$$\frac{dz}{dt} = \frac{p_z c}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \quad (3)$$

电子径向运动轨迹表示为

$$\frac{dr}{dt} = \frac{p_r c}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \quad (4)$$

若设 $g_z = f_z/f_{rm}$ (f_{rm} 表示径向驻波场中电场的最大振幅), 对整个空间的高频场进行归一化处理, 取 $\bar{g}_B = \bar{f}_B/f_{rm}$, $g_r = f_r/f_{rm}$, 则空间高频场强度都可以用最大径向电场来表示。

设谐振腔的径向长度为 L , 以 $V_1 = f_{rm} L$ 描述整个驻波区的高频电压特性。定义电压调制系数为: $A = V_1/V_0$, 其中 V_0 表示电子初始加速电压, 即电子进入驻波场的初始能量为: $W_0 = qV_0$ 。

以电子的径向渡越角 $\theta = \omega t$ 对式(1)~(4)进行改写, 并将电压调制系数代入其中, 得

$$\frac{dp_z}{d\theta} = \frac{W_0 A}{\theta_0 c} \left[g_z \cos(\theta + \phi) + \frac{p_r \bar{g}_B}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}} \cos(\theta + \phi + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (5)$$

$$\frac{dp_r}{d\theta} = \frac{W_0 A}{\theta_0 c} \left[-\frac{\bar{g}_B p_z}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}} \cos(\theta + \phi + \frac{\pi}{2}) + g_r \cos(\theta + \phi) \right] \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{z}}{d\theta} = \frac{1}{\theta_0} \frac{p_z}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \quad (7)$$

$$\frac{d\bar{r}}{d\theta} = \frac{1}{\theta_0} \frac{p_r}{\sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \quad (8)$$

式中: $\theta_0 = \omega L/c$; $\bar{z} = z/L$; $\bar{r} = (r-r_0)/L$ 。

设初始径向动量为 $p_r(0) = 0$, 则电子的初始动量为 $p_r(0) = \sqrt{W_0^2/c^2 + 2W_0 m}$, 对于单个电子, 在特定的场分布下, 经过渡越时间 $\tau(\phi)$ 后, 到达 $r-r_0 = L$ (或 $\bar{r} = 1$) 处的最终动能由 θ_0 , W_0 , A 以及其相应的初始入射相位 ϕ 来决定。其相应的最终动能的表达式为

$$W_s = mc^2 \left\{ \sqrt{1 + \left[\frac{p(\tau)}{mc} \right]^2} - 1 \right\} \quad (9)$$

因此,我们可以对 ϕ 在 $0 \sim 2\pi$ 内取平均来求得电子束在 $r=1$ 处的平均动能

$$\langle W_B \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W_s(\tau) d\phi \quad (10)$$

或

$$\langle W_B \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_{s,k}(L) \quad (11)$$

式中: N 表示在 1 个周期内进入腔体的总的电子数。因此电子的效率可以由下式计算

$$\eta = 1 - \frac{\langle W_B \rangle}{W_0} \quad (12)$$

通过计算式(5)~(11),电子束的效率可以由一个三参数的函数来求得,也即, $\eta = \eta(A, \theta_0, W_0)$ 。如果计算所得的 η 值为正,那么就表示电子失去能量,射频场得到能量。

图 2 给出的高频场分布较为复杂,精确的解析表达式有待深入的解析计算。本文利用粒子模拟获得的场分布曲线的拟合表达式来计算该器件的束波相互作用效率。图 5 是对图 2 结构数值模拟获得的高频场在 $A=6.6$, $W_0=170$ keV 的条件下,束波相互作用效率 η 随直流渡越角 θ_0 变化的曲线。

由图可知,当 $\theta_0=4.1$ 时,束波相互作用效率有极值 $\eta_{\max}=53\%$ 。因此由 $\theta_0=\omega L/c$,可以根据所设计的器件的谐振频率来确定腔体最佳的径向长度。

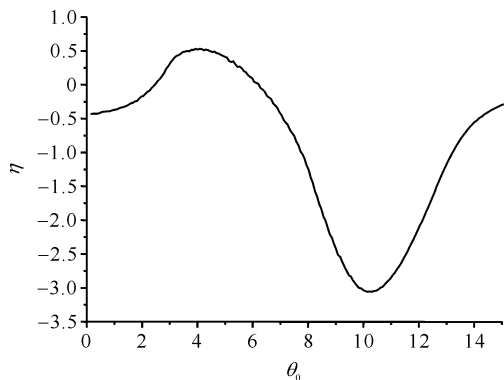


Fig. 5 Beam-wave interaction efficiency vs DC transit angle

图 5 束波相互作用效率随直流渡越角的变化曲线

3 粒子模拟研究

根据高频结构分析以及渡越时间效应理论分析,本文利用粒子模拟程序设计了一种工作于 6.1 GHz 的径向边加载三腔渡越时间振荡器。其主要尺寸为谐振腔内半径 $r_0=11$ cm,左圆筒轴向长度 $L_u=0.8$ cm,右圆筒轴向长度 $L_d=1.2$ cm,谐振腔轴向长度为 3 cm。谐振腔径向高度应设计为 $L=3.2$ cm,模拟设计中调整为 $L=3$ cm。在 170 kV, 18 kA 的电子束激励下该器件获得频率单一(如图 6 所示)、平均功率为 1.6 GW(如图 7 所示)的微波输出,束波相互作用效率为 52.3%。

图 8 为谐振腔中径向电场振幅最大位置处的 E_r 随时间变化的曲线,当束波相互作用状态稳定时,电场最大振幅 $f_{rm}=3.7 \times 10^7$ V/m,因此 $A=V_1/V_0=f_{rm}L/V_0=6.53$ 。

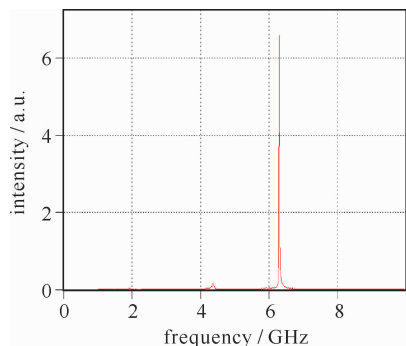


Fig. 6 Frequency spectrum of output wave

图 6 输出微波的频谱

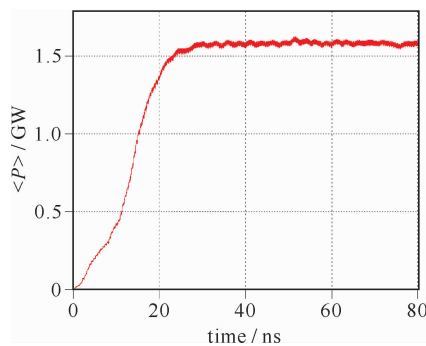


Fig. 7 Average power of output wave

图 7 输出微波的平均功率

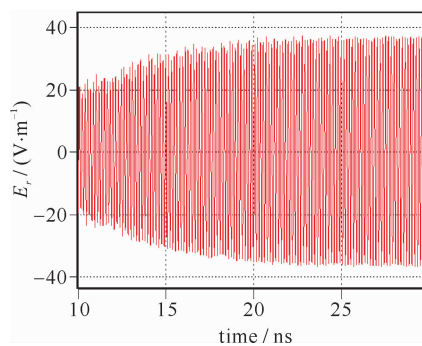


Fig. 8 Field of E_r with the largest magnitude

图 8 最大振幅电场 E_r

图 9 和图 10 是某一稳定振荡时刻电子束在谐振腔中的位置和能量的相空间图。图 9 表明:在该器件中电子束确有剧烈的横向摆动(理论计算时,当电子束接触到加载圆筒或腔壁时都认为电子被吸收),这与该器件的设计思路一致。图 10 表明:经过该器件的调制,电子在到达谐振腔外壁时大部分电子失去动能,并且能散度较小,因此该器件可以具有较高的束波相互作用效率。

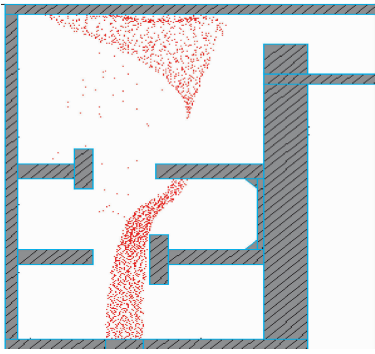


Fig. 9 Status of E-beam at some time

图 9 某一时刻电子束运动状态

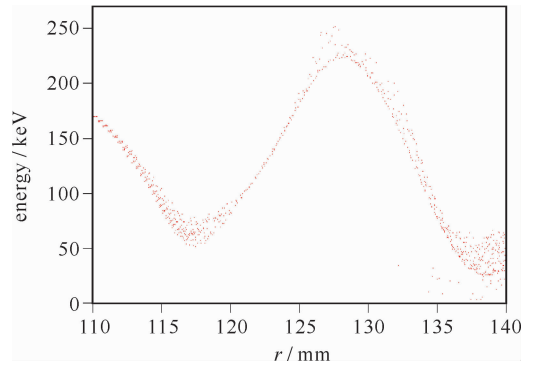


Fig. 10 Energy of E-beam along radius in oscillator

图 10 谐振腔中电子能量沿径向分布

4 结 论

本文根据渡越时间效应的 3 维理论研究,设计了一种新型径向边加载三腔渡越时间振荡器。粒子模拟研究表明,在 170 kV, 18 kA 的环形电子束激励下,该器件可获得 1.6 GW 的平均输出功率,束波相互作用效率达到 52.3%,具有高效率、低阻抗的特点。粒子模拟结果与 3 维理论结论吻合得较好。

参考文献:

- [1] 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 Transactions on Plasma Science*, 1992, **20**(3):312-331.
- [2] Miller R B, McCullough W F, Lancaster K T, et al. Super-relatron theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1992, **20**(3):332-343.
- [3] 范植开,刘庆想,于爱民,等. C 波段三腔渡越时间效应振荡器的理论与实验[J]. 中国科学:G 辑, 2003, **33**(6):515-531. (Fan Zhikai, Liu Qingxiang, Yu Aimin, et al. Theory and experiments of the C-band three cavities transit time oscillator. *Science in China: Series G*, 2003, **33**(6):515-531)
- [4] 臧杰锋,刘庆想,朱静,等. 径向三腔渡越时间振荡器数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(3):473-475. (Zang Jiefeng, Liu Qingxiang, Zhu Jing, et al. Numerical simulation of radial three-cavity transit time oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3):473-475)
- [5] Barroso J J. Design facts in the axial monotron[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(3):652-656.
- [6] 范植开,刘庆想,刘锡三,等. 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**(3):491-496. (Fan Zhikai, Liu Qingxiang, Liu Xisan, et al. Analytic research on the high frequency structure of the three-cavity transit-time tube oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(3):491-496)
- [7] 臧杰锋,刘庆想,林远超,等. 径向三腔渡越时间振荡器高频特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(12):2046-2050. (Zang Jiefeng, Liu Qingxiang, Lin Yuanchao, et al. High frequency characteristics of radial three-cavity transmit time oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12):2046-2050)

New side-appending radial three-cavity transit time oscillator

Zang Jiefeng, Liu Qingxiang, Lin Yuanchao, Ding Yanfeng, Wang Binrong
(School of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A new side-appending radial three-cavity transit time oscillator is proposed based on the 3D single particle theory of transit time effects. For enhancing the transverse swing of the beam in the cavity, some annuluses' ends are widened, and so the transverse fields can be strengthened. The 3D theory demonstrates that, the oscillator can obtain an efficiency higher than 50%. Numerical simulation indicates that, it can produce an average power of 1.6 GW at 6.1 GHz with the beam-wave interaction efficiency of 52.3%, when excited by a 170 kV, 18 kA radial electron beam.

Key words: transit time oscillator; side-appending; radial; transition time; transverse swing