

文章编号: 1001-4322(2003)04-0363-04

# 一种新型的高功率高频率同轴渡越时间振荡器\*

杨温渊, 丁 武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 提出了一种高频率和高功率的渡越时间振荡器, 并且对其进行了理论和数值研究。这种振荡器采用同轴结构, 功率容量大, 不需要外加引导磁场聚焦电子束, 波束相互作用区短, 保持了传统渡越时间振荡器在结构上的简单性和输出信号的稳定性; 运用电压为 225kV 和电流为 11kA 的电子束进行模拟, 在 X 波段获得了峰值功率为 1.4GW, 频率为 8.335GHz 的微波输出。

**关键词:** 同轴结构; 渡越时间振荡器; 数值模拟

**中图分类号:** TN751.2      **文献标识码:** A

渡越时间振荡器(TTO)是基于电子束渡越时间不稳定性的一种器件。它不需要外加引导场, 具有结构简单和输出信号单色稳定等优点<sup>[1~4]</sup>。近年来, 随着脉冲功率技术的发展, 人们可以利用强流相对论电子束来产生高功率微波(HPM)<sup>[1,5]</sup>。这给传统的渡越时间振荡器以新的推动力, 使得 TTO 成为产生高功率微波的一个比较有吸引力的源<sup>[1~3]</sup>。我们知道, 基于渡越时间不稳定性的高功率微波源器件的输出频率都比较低。因此, 研究如何提高这类器件的频率和输出功率以满足未来的应用是非常有意义的。

本工作提出了一种具有高频率和高输出功率的大半径同轴渡越时间振荡器。它不需要外加引导磁场且功率容量大, 电子束调制和能量提取分开进行, 以提高器件的效率和便于调节参数, 但器件的总长度仍然很短。通过选取适当的工作参数, 可以在 X 波段获得 GW 级的微波输出。文章对提出的同轴 TTO 模型做了详细的物理分析, 给出了模拟结果并对此进行了总结。

## 1 模型的物理分析

图 1 给出了同轴 TTO 的结构示意图。它由调制腔(I)、提取腔(II)和输出区(III)三部分组成。点 *o* 是图形的原点, 点 *A* 是模拟中的一个观察点。腔 I 两侧是金属箔, 其余的壁为理想的金属导体。L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 分别是腔 I 和 II 的纵向长度, r<sub>1</sub> 和 r<sub>2</sub> 是整个振荡器的内外半径。r<sub>g</sub> 是提取腔输出出口的径向宽度, r = r<sub>2</sub> - r<sub>1</sub> 是振荡器的径向宽度, 它比 r<sub>1</sub> 和 r<sub>2</sub> 要小的多。III 区右边的阴影部分是模拟专用的吸收边界。

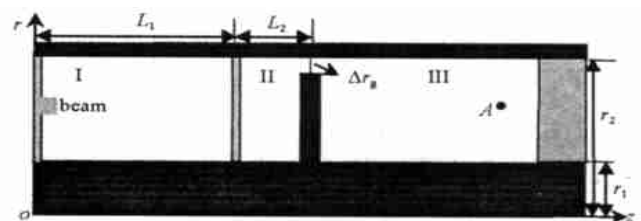


Fig. 1 Schematic drawing of the proposed coaxial TTO

图 1 同轴 TTO 的结构示意图

具有一定能量(电压和电流)和宽度  $r_b$  ( $r_b = r_{b2} - r_{b1}$ ) 的环形电子束在通过腔 I 的过程中, 与腔中被激发的 TM<sub>010</sub> 相互作用, 电子束的能量和相位将会得到较大的调制, 被调制的电子束在进入腔 II 后在适当的条件下迅速释放能量, 产生强的微波辐射。这里 r<sub>b1</sub> 和 r<sub>b2</sub> 分别是电子束的内外径。

对于均匀电子束, 在腔 I 激发渡越时间不稳定性的条件为<sup>[6,7]</sup>

$$1.0 < \beta_1 = \frac{L_1}{v_{z01} T} < 1.4 \quad (1)$$

式中:  $T = 1/f$ ,  $f$  是共振频率;  $v_{z01}$  是在腔 I 入口处电子的初速度。对于进入腔 II 的预群聚电子束, 为了达到提取电子束能量的目的,  $\beta_2$  应该满足<sup>[8]</sup>

$$\beta_2 = \frac{L_2}{v_{z02} T} < 1.0 \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2002-06-16; 修订日期: 2003-02-18

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 杨温渊(1973-), 女, 博士, 目前主要从事高功率微波源器件的理论和数值研究; 北京 8009 信箱 11 分箱; E-mail: yang.wenyuan@mail.iapcm.ac.cn。

$v_{z02}$ 是在腔 II 入口处电子的初速度。 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 的最佳值分别约为 $\beta_{10} = 1.25$ 和 $\beta_{20} = 0.475$ ,由于 $\beta_{20}$ 比 $\beta_{10}$ 小得多,所以腔 II 的长度可以比腔 I 短得多,从而保证了器件的总的相互作用区长度仍然较短。

对于调制腔中的  $TM_{010}$  模,其本征频率可以近似为

$$f_0 / \text{GHz} = \frac{15}{r / \text{cm}} \quad (3)$$

我们首先假设工作频率(热腔频率)等于冷腔频率,即 $f = f_0$ 。由于在波束相互作用的过程中,电子束的负载作用必然会使工作频率有所上升,因此,在实际的设计中需要通过调整腔的长度和电子束的能量来补偿频率的上移以达到束波匹配的目的。

假设 $v_{z01} = v_{z02}$ , $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 取其最佳值,那么工作频率 $f$ ,腔 I 和 II 的纵向长度( $L_1$ 和 $L_2$ )以及电子束的电压 $V$ 将被式(1),(2)和(3)近似决定。由于  $TM_{010}$  模的电场分量  $E_z$  沿  $r$  方向的最大值位于  $r = (r_1 + r_2)/2$  处,为了使相互作用的强度尽可能大,我们取电子束的中心位置  $r_{bc} = (r_1 + r_2)/2$ 。 $r_g$  的值主要由打在腔 II 右壁上的电子束斑直径的大小决定,但也不能太小,以免击穿。

由于工作频率主要由腔的宽度决定,而电子束能量由腔的长度决定,因此在参数调节的时候自由度相对较大。

## 2 模拟结果和讨论

我们运用 2.5 维全电磁 PIC 程序对提出的同轴 TTO 进行了数值模拟。III 区右边界是个电导率随空间位置的变化而变化的吸收边界,它能够有效地吸收入射波的能量。根据前面的分析结果,我们选择如下的工作参数: $r_1 = 28.2 \text{cm}$ , $r_2 = 30.0 \text{cm}$ , $L_1 = 3.3 \text{cm}$ , $r_{b1} = 28.9 \text{cm}$ , $r_{b2} = 29.2 \text{cm}$ , $\beta_1 = 1.25$ , $\beta_2 = 0.475$ , $I = 11 \text{kA}$ ,根据公式(1),(2)和(3), $f_0 = 8.333 \text{GHz}$ , $V = 240 \text{kV}$ , $L_2 = 1.25 \text{cm}$ 。由于公式(1)和(2)都是在非自洽的条件下得到的且假设 $f = f_0$ ,而实际的模拟过程是一个自洽的过程,模拟中考虑了空间电荷作用和自生电磁场的作用,因此为了获得好的结果,在 $L_1$ 和 $f$ 固定的情况下,需要通过模拟对求得的 $V(v_{z01})$ 和 $L_2$ 在小范围内进行调节并优化。

下面首先来确定 $V$ 和 $L_2$ 的最佳值。通过对具有不同电压的电子束穿过腔 I 的电流调制情况进行比较(240kV 附近, $\beta_1 = 1.25$ ),得到 $V$ 在 210~280kV 之间( $\beta_1 = 1.2 \sim 1.3$ )电子束可以得到较好的群聚。通过调节腔 II 的长度 $L_2$ (1.25cm 附近),结果显示 $L_2$ 在 1.05~1.32cm 之间( $\beta_2 = 0.4 \sim 0.5$ )能够获得高效率的微波输出。在下面的模拟中取 $V = 225 \text{kV}$ 和 $L_2 = 1.3 \text{cm}$ ,模拟的主要结果如下。

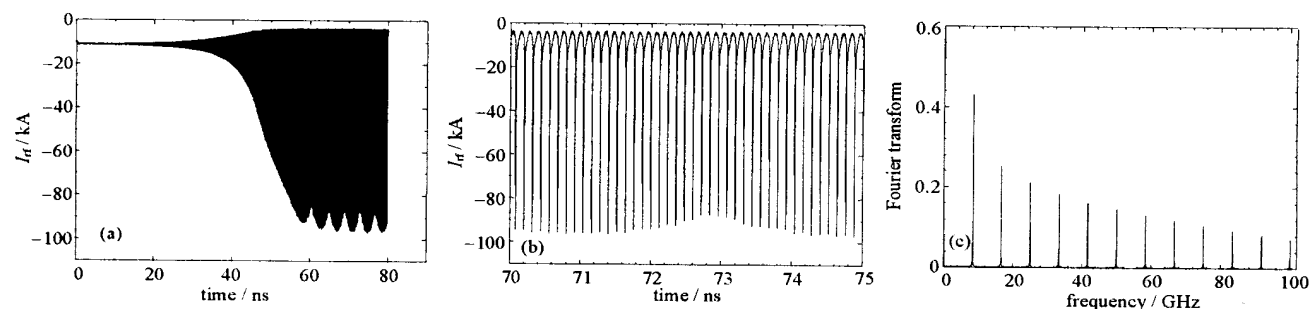


Fig. 2 (a) and (b) time plot of the beam current  $I_r$  crossing cavity I; (c) the Fourier transform of (a) and (b)

图 2 (a)和(b)为穿过腔 I 的电子束的电流随时间的变化曲线;(c)调制电流的傅里叶变换图

图 2(a)和 2(b)给出了穿过腔 I 的电子束的电流随时间变化的曲线。图 2(c)是相应的傅里叶变换图,给出了电流调制的频谱。从图 2(a)和(b)可以看到:电流被强烈调制,调制电流的峰值达到直流分量的 8 倍,调制电流包括了所有的谐波分量。图 2(c)给出了调制电流的前 12 次谐波分量,从图中可以看出,高次谐波分量降低得比较慢,第 5 次谐波分量超过了一次谐波分量的 37%,第 10 次谐波分量超过了一次谐波分量的 18%,这可能是同轴 TTO 的特点之一。一次谐波的频率为 $f = 8.335 \text{GHz}$ 。

图 3(a)是在观察点 A 看到的电场分量  $E_r$  随时间变化的曲线。图 3(b)是相应的傅里叶变换图,给出了场的振荡频率。可以看到, $E_r$  的振幅随着相互作用时间  $t$  而增长,直至饱和,振荡频率 $f = 8.335 \text{GHz}$ 。 $r_g$  两端的电压为 14kV(50kV/cm),该值远低于微波击穿电压。另外我们看到,热腔的共振频率和冷腔的本征频率比较接近。

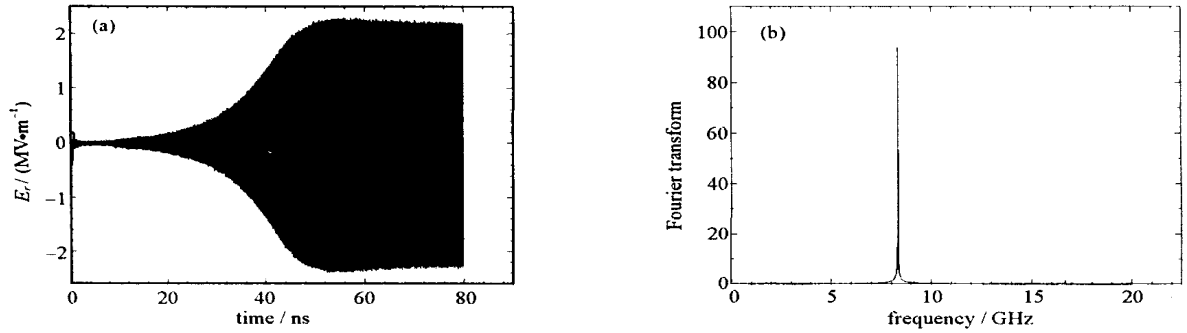


Fig. 3 (a) Time plot of the axial electric field  $E_z$  at the observation point A in the output section; (b) The Fourier transform of (a)  
图 3 (a) 在观察点 A 电场分量  $E_z$  的振幅随时间的变化曲线; (b) 电场  $E_z$  的傅里叶变换图

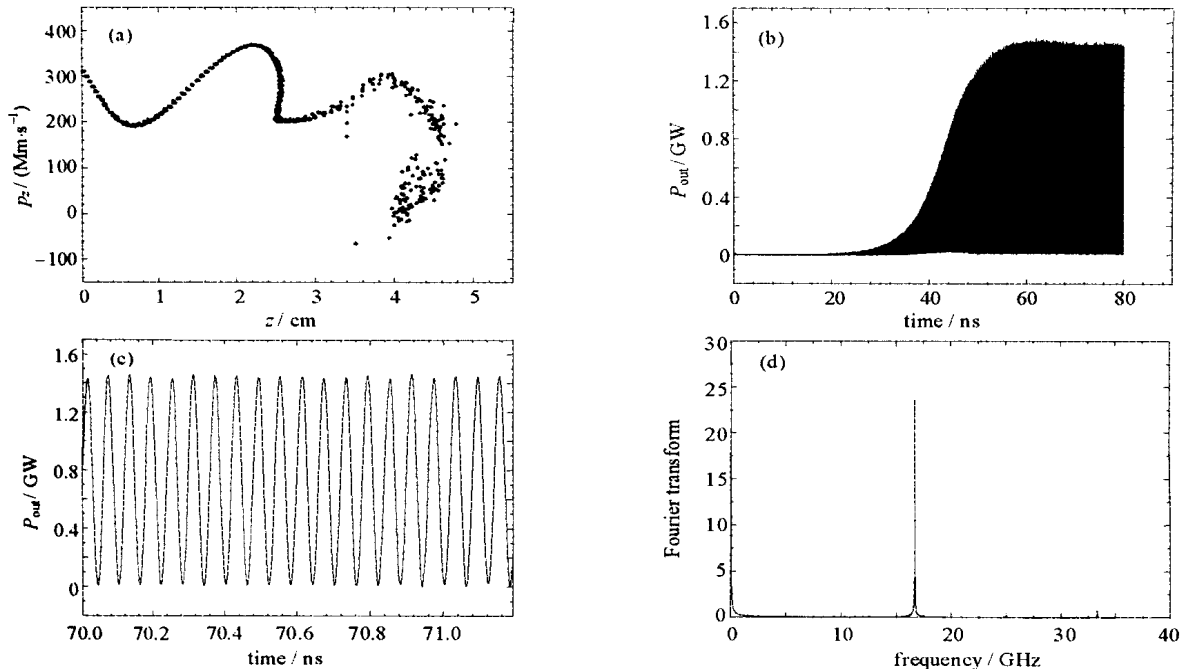


Fig. 4 (a) Phase space plot of particles at saturation,  $p_z$  is the axial momentum,  $t = 52\text{ns}$ ;

(b) and (c) Time plot of the output power  $P_{out}$  of the oscillator; (d) The Fourier transform of (b) and (c)

图 4 (a) 电子在饱和时的相位图,  $t = 52\text{ns}$ ; (b) 和 (c) 输出功率随时间的变化曲线; (d) 输出功率的傅里叶变换图

图 4(a) 是饱和时电子的相位图  $p_z-z$ , 可以看到饱和时电子能量被大量提取, 电子能散度也变得很大。图 4 (b) 和 (c) 给出了器件的输出功率随时间的变化曲线, 饱和时的峰值功率达到 1.4 GW, 输出功率在一个振荡周期内的平均值为 700 MW。从图 4 (c) 和傅里叶变换图 (d) 可以清楚地看到: 射频信号振荡的频率为射频场的 2 倍。这是由于功率是电场和磁场叉乘而得到的。图 4 (b) 和 (c) 中, 辐射场的振幅几乎始终大于 0, 这表明了吸收边界条件的有效性。

我们还对具有不同电流值的电子束进行了计算, 发现输出功率与电子束的电流强度成正比, 而达到饱和所需的时间随电流的减小而变长。实际应用时可根据需要在允许的范围内选取电流值。

在本文提出的同轴 TTO 中, 金属箔具有辅助聚焦的作用, 在高功率微波的产生过程中, 同其它含箔的 HPM 发生器一样可能引起箔的蒸发<sup>[7]</sup>。然而, 如果脉冲长度和重复频率不高, 也就是说, 在占空因子适当的情况下, 由于其简单性以及其它的优点, 同轴 TTO 中在某些领域仍然会具有吸引力。

### 3 结束语

提出了一种高频率和高输出功率的大半径同轴渡越时间振荡器。这种振荡器不需要外加引导磁场聚焦电子束, 波束相互作用区短, 保持了传统渡越时间振荡器在结构上的简单性和输出信号的单色性及稳定性。模拟获得了峰值功率为 1.4 GW 的微波输出, 频率为 8.335 GHz, 效率达 28%。作为产生高功率微波的一个比较有

吸引力的源,有关同轴结构以及其它新结构的渡越时间振荡器的物理问题都值得更进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Joseph A M. Radial acceleration: A new low-impedance HPM source[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1996, **24**(3):964—969.
- [2] Kostov K G, Barroso J J. Computer simulation of a 5.7GHz, 110kW transit-time oscillator[J]. *Int J Infrared & Millimeter Waves*, 1998, **19**(11):1513—1521.
- [3] 贾云峰, 刘永贵, 李传胪. 径向渡越时间振荡器的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1):95—98. (Jia Y F, Liu Y G, Li C L. Numerical simulations of radial transit-time oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1):95—98)
- [4] Barroso J J, Kostov K G, Yovchev I G. A proposed 4GHz, 60kW transit-time oscillator operating at 18kV beam voltage[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1998, **26**(5):1520—1525.
- [5] Miller R B, McCullough W F, Lancaster K T, et al. Super-Reltron theory and experiment[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1992, **20**(3):332—343.
- [6] Marcum J. Interchange of energy between an electron beam and an oscillating electric field[J]. *J Appl Phys*, 1946, **17**(1):4—11.
- [7] 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 Plas Sci*, 1992, **20**(3):312—331.
- [8] Yang W Y, Ding W. The transit time effect of a modulated electron beam[J]. *Int J Infrared & Millimeter Waves*, 2001, **22**(3):421—427.

## A novel high power and high frequency coaxial transit-time oscillator

YANG Werr yuan, DING Wu

( Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009-11, Beijing 100088, China )

**Abstract:** A new structure of high power and high frequency microwave oscillator based on the transit-time instability is proposed and studied numerically in this paper. Due to its coaxial structure with large radius, the oscillator allows larger input and output power and can work at higher frequency. Without external magnetic field being used for beam focusing, it keeps the simplicity of a conventional transit-time oscillator. Using an electron beam of 225kV and 11kA, a stable and monochromatic output with peak power of 1.4GW is achieved by simulation at 8.335GHz with an rms efficiency of 28%.

**Key words:** Coaxial structure; Transit-time oscillator; Numerical simulation