

文章编号: 1001-4322(2002)01-0095-04

径向渡越时间振荡器的数值模拟*

贾云峰, 刘永贵, 李传胪

(国防科技大学 理学院 定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 用 2.5 维 PIC 程序对径向渡越时间振荡器进行了数值模拟, 给出了产生微波的详细物理图像, 得出了输出微波功率与提取口大小、腔的径向间距、场模式之间的关系。模拟得到了峰值功率约 500MW, 频率 5GHz 的 TEM₁ 波, 起振时间 15ns, 峰值效率大于 30%。

关键词: 渡越时间效应; 径向渡越时间振荡器; 高功率微波源; PIC 方法

中图分类号: TN 732.2 **文献标识码:** A

1994 年美国的 Phillips 实验室的 M. J. Aman 由速调管放大器能产生高效率这一特点出发, 提出了径向速调管放大器的概念^[1], 将轴向的电子发射改为径向发射。由于径向发射面大, 空间电荷效应小, 空间极限电流大, 因此能实现无外加引导磁场运行, 大大实现了器件的小型化。1995 年, Aman 又将径向速调管的放大工作状态改为振荡器工作状态。同时, 用 MAGIC 和 SOS 程序对器件进行了模拟计算^[2], 得到了很好的结果, 证明了径向速调管的设想是切实可行的, 而且大有前途。根据他的设想和模拟, 径向速调管工作在振荡状态时, 具有不需外加磁场、不需输入射频信号、对电子束质量要求不高、频率固定、饱和功率高、(模拟得到的)效率高、阻抗低等优点; 缺点在于起振较慢。

1995 年 M. J. Aman 用 MAGIC 程序得出的模拟结果^[2]是: 束电压 150kV, 二极管阻抗 20Ω, 输入直流功率 220MW, 输出微波为 TM₀₀₃ 模, 频率 23.4GHz, RMS 功率 150MW, RMS 效率 68%, 整个器件为圆柱结构, 长 12cm, 半径 12cm。另外, 用三维 SOS 程序模拟时没有发现非角向对称的模式。1999 年北京应用物理与计算数学的吴中发也做了径向速调管的模拟工作^[3], 在束电压 500kV、电流 50kA 情况下, 得到了 3.2GW 周期平均微波功率, 微波频率 6GHz, 电子效率 12.8%, 文章中未提到微波的模式。本文中用 2.5 维的 PIC 粒子模拟程序, 对该类型的振荡器作了细致的粒子模拟, 得到了较详细的物理图像和结果, 发现了一些对指导实验很有价值的规律。

1 物理机制

1.1 一维高频间隙的渡越时间效应的线性理论^[4,5]

在假设小扰动和忽略空间电荷效应的情况下, 一维高频间隙的渡越时间不稳定性的线性理论表明, 当电子的渡越时间 t 与谐振腔本征场的振荡周期 T 满足一定关系时, 会产生渡越时间不稳定性, 导致电子束把能量交给谐振腔的本征场, 高频场增长后反过来调制电子束使束群聚, 群聚的电子束经过类似于速调管的提取腔时输出微波。正因为如此, Aman 称之为径向速调管; 事实上, 它是一种径向的渡越时间振荡器。相对论条件下, 一维间隙中电子束的直流渡越角与束场能量交换之间的关系为^[3,4]

$$\Delta P = \frac{2}{\beta_0} \frac{I_m}{e} m_0 c^2 A^2 f(\theta_0) \quad (1)$$

式中: $\theta_0 = \omega r_0 / 2$ 为直流渡越角; $f(\theta_0) = [\theta_0 \cot \theta_0 - (\beta_0^2 + 1) / 2] \sin^2 \theta_0$; $A = (eV_0 / m_0 c^2) (c / \omega t)$ 。

在非相对论条件下, 一维间隙中电子束的直流渡越角与束场能量交换之间的关系为

$$\Delta P = (1/2) m_0 (eE_m / \omega m_0)^2 (I/e) (2 - 2\cos\theta_0 - \theta_0 \sin\theta_0) \quad (2)$$

式中: $\theta_0 = \omega r_0$ 为直流渡越角; E_m 为最大交流电场; c 为光速; I 为束电流。

* 收稿日期: 2001-04-12; 修订日期: 2001-07-26

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题 (863-410-7)

作者简介: 贾云峰 (1975-), 男, 在读博士生, 主要从事高功率微波方面的研究。



由(1)式、(2)式可以看出,当间隙间距 d 变化时,束电子有时从高频场中得到能量,有时失去能量,束和场的能量交换呈振荡特性,这就是渡越时间效应。根据此原理,30年代 I Miller 和 Liewellyn 提出了单腔管(又称为渡越时间振荡器)的概念,并通过实验证明了单腔管能输出微波^[6,7],但是效率很低,只有 0.2%。目前所进行的单腔管研究^[8,9]多采用低束压小束流,这从一定程度上限制了功率水平。

1.2 谐振腔理论^[10]

径向渡越时间振荡器的示意图如图 1,由于电子具有 r 方向的速度,与电子束相互作用的是 E_r 分量,因此优先产生的是 TEM_p 模。根据理论分析,要产生所需频率的微波,必须满足下述条件:

(1) 谐振腔的腔长满足 $l = p\lambda/2, p = 1, 2, \dots$; (2) 谐振腔的径向距离与谐振腔本征场的振荡周期满足一定关系,以产生渡越时间不稳定性; (3) 二极管区、群聚腔、提取腔的频率要一致; (4) 要有匹配的提取负载; (5) 发射电子束流的空间电荷效应不能太大,以避免形成虚阴极或是改变电子的渡越时间。

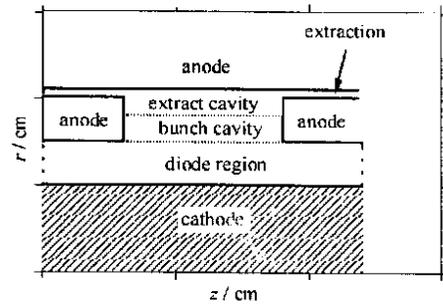


Fig. 1 Schematic of radial transit time oscillator

图 1 径向渡越时间振荡器结构示意图

2 数值模拟结果

在电子束电压 200kV,束电流为 8kA 条件下模拟得到的典型电子群聚图、相空间图、电场分布图、电场分布的三维图、提取腔中电场随时间的变化、束电流随时间的变化、输出微波功率及频谱示于图 2 至图 9。可以看出,电子束由于渡越时间效应在空间形成了良好的群聚。相空间图显示,电子束没有形成虚阴极,表明产生微波的机制是渡越时间效应;有的电子得到能量,但大多数电子失去能量,总的效果是产生了高频场,电子束正是在这个高频场下产生了群聚。电场只有 E_r 分量,是很规则的 TEM_1 模,交变场幅度超过了二极管区直流电场的幅度。起振时间约为 15ns,饱和时间约为 30ns。输出微波频谱特性相当好。这些结果与文献[2,3]大体相当,下面详细介绍我们得到的一些规律性认识。

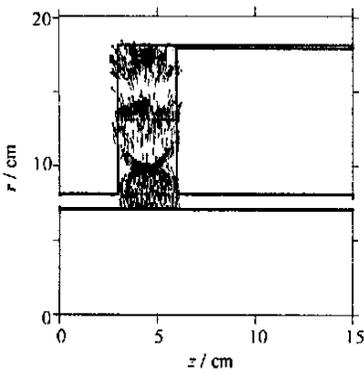


Fig. 2 Bunching of electrons

图 2 电子群聚图

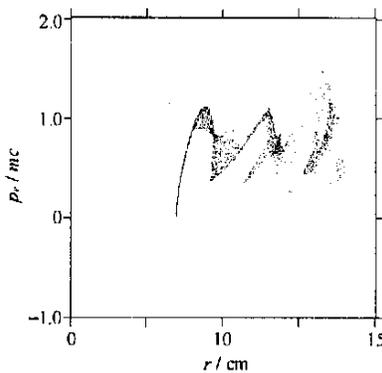


Fig. 3 Electrons in the phase space

图 3 电子相空间图

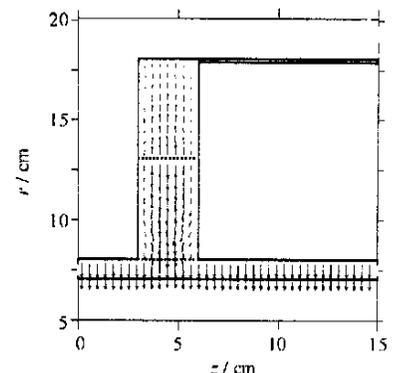


Fig. 4 Vector plot of the electrical field

图 4 电场分布图

2.1 电子束和场的能量交换随直流渡越角的变化

通过改变腔的径向间距可以改变束直流渡越角,得出输出微波功率与腔径向间距之间的关系如图 10,电子束与高频场的能量交换满足公式(1),(2)所揭示的规律,模拟曲线和理论曲线大致相符。

2.2 输出微波随提取口的变化

数值模拟表明,当其它参数不变,提取口增大时,群聚腔中电场变化不大,但提取腔中电场峰值逐渐降低(见图 11),同时,提取腔中的群聚电流峰值也有所降低,说明提取腔促进了电子束的进一步群聚。当提取口从 2mm 增大到 1cm 时,在提取口处的电场峰值下降了约 72%,产生的有效微波功率也降低了 70%,而微波频率和模式不变。当提取口增加到 1cm 时,交变场到达饱和的时间延长了很多,达到了

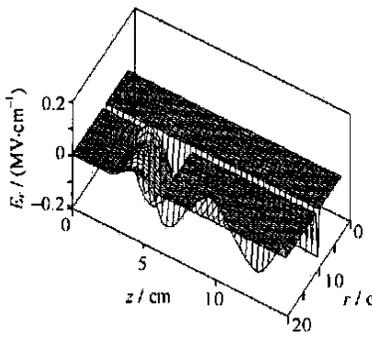


Fig 5 Perspective plot of E_r
图 5 E_r 立体图

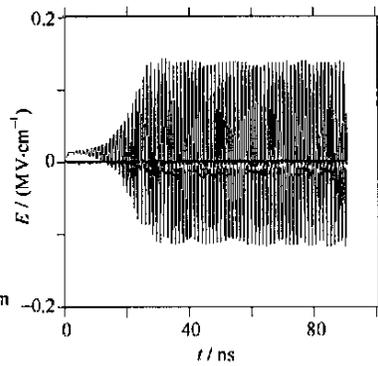


Fig 6 E_r vs time
图 6 电场随时间的变化

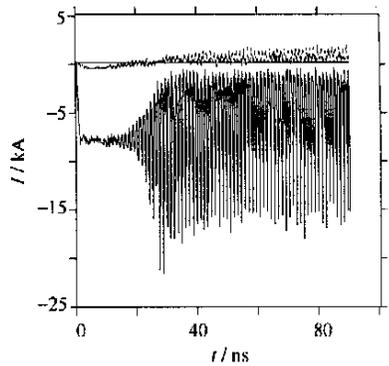


Fig 7 Beam current vs time
图 7 束流随时间的变化

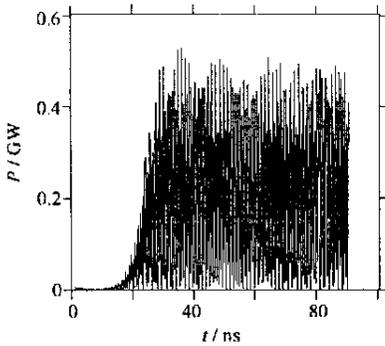


Fig 8 Power vs time
图 8 功率随时间的变化

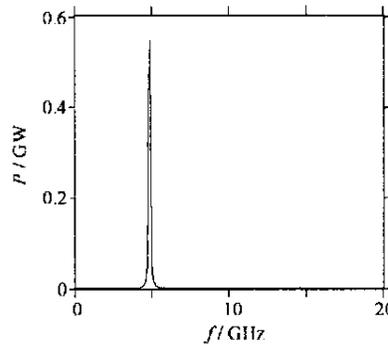


Fig 9 Frequency spectrum of output power
图 9 输出功率的频谱

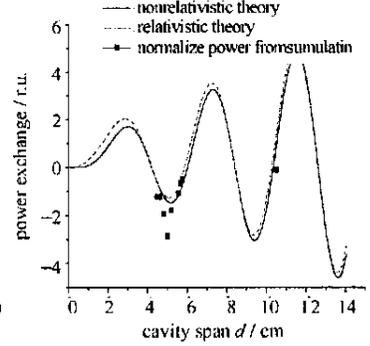


Fig 10 ΔP vs cavity span d
图 10 功率交换与腔径向间距的关系

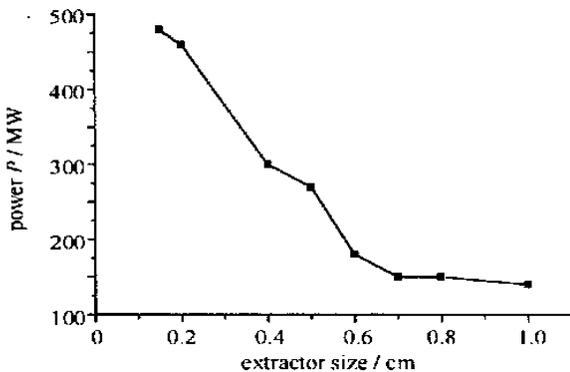


Fig 11 Power vs extractor size
图 11 输出功率随提取口大小的变化

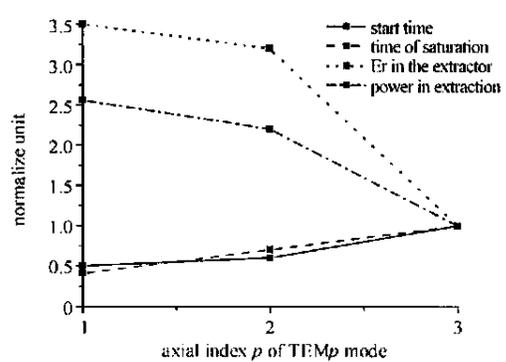


Fig 12 Comparison of different modes
图 12 不同模式的比较

50ns。从数值模拟结果可以看出, 交变场的起振时间主要是由群聚腔决定; 电子束的群聚和调制则是群聚腔和提取腔共同作用的结果, 其中, 群聚腔起主要作用, 但提取腔对电子束的进一步调制作用也不能忽略。交变场的饱和时间与提取口、及提取腔尺寸关系很大; 微波频率和模式只与渡越腔的轴向长度和径向距离有关, 不受提取口的影响。提取口大时, 由于提取腔的 Q 值降低而导致交变场的饱和水平降低, 饱和时间延长, 从而输出微波功率和效率降低。考虑到实际加工时器件的 Q 值更小, 所以设计实际器件时, 应该采用具有较低电阻率的材料, 提取口不能取大, 以尽可能减小提取口对提取腔的破坏作用, 保证提取腔的 Q 值足够大。

2.3 输出微波随微波模式的变化

模拟发现, 虽然产生的微波都是 TEM $_p$ 模, 但是其轴向 (z 向) 半周期数对交变场的产生影响很大。由于产生的微波是用类似于速调管输出腔的间隙提取的, 根据速调管理论, 为了保证相干辐射的有效提

取, 电子束必须是良好群聚的, 而且必须在间隙内存在最大拒斥场时通过间隙, 这样束波转换效率才能高。模拟时考虑了 TEM_1 , TEM_2 , TEM_3 三种模式, 虽然都能观察到比较明显的束群聚现象, 产生的微波和交变场却差别很大, 见图 12。在同等条件下, TEM_1 模的输出微波功率和效率都最高。在后两种情况下, 每个群聚块到达提取间隙的周期不等于交变场的周期, 所以, 有些群聚块并没有最有效地失去能量, 有些还会从交变场中得到能量, 降低了输出微波功率水平。同时, 随着 TEM_p 模轴向指数 p 的增加, 交变场的起振时间和饱和时间都大大增加了, 这也是因为群聚块与谐振腔及交变场不能有效地相互作用。定性来看, 在 TEM_1 模情况下, 群聚块更靠近提取间隙, 也保证了提取口与群聚的电子束之间有最强的耦合作用。

3 结 论

数值模拟表明: 无外加磁场、侧向发射、对电子束质量要求不高的径向渡越时间振荡器能输出微波, 微波频率符合理论设计值; 当提取口从 2mm 增大到 1cm 时, 输出微波功率随提取口增大而减小, 与腔的径向间距之间的关系与线性理论基本相符; TEM_1 模输出微波效率最高, 起振和饱和都最快。

参考文献:

- [1] Aman M J. Initial study of a low-impedance high power radial klystron amplifier[A]. Proceeding of the Seventh National Conference on HPM Technology[C]. Monterey CA: 1994
- [2] Aman M J. High power radial klystron oscillator[A]. Proc of SPIE[C]. 1995, 2557: 1—31.
- [3] 吴中发, 王玉芝. 径向速调管振荡器的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 211—214. (Wu Z F, Wang Y Z. Theoretical analyzing and numerical simulation of Radial Klystron Oscillator. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(2): 211—214)
- [4] 吴伯瑜, 张克潜. 微波电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986. (Wu B Y, Zhang K Q. Microwave electronics. Beijing: Electronic industry press, 1986)
- [5] 范植开. 渡越管振荡器的理论研究与原理性试验[D]. 绵阳: 中物院应用电子学研究所, 1999. (Fan Z K. Theoretical research and primary experiment of transitron oscillator, Mianyang: Institute of Applied electronic Physics, 1999)
- [6] 列别捷夫. 成都电讯工程学院译. 超高频电真空器件(上)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1960. 54—63. (Lieberjev. Ultra-high-frequency electric vacuum apparatus(I), Beijing: People's Education Press, 1960. 54—63)
- [7] Jess M. Interchange of energy between an electron beam and an oscillating electrical field[J]. *J App Phys*, 1946, 17: 4—11.
- [8] Barroso J J, Kostov K G. A 5.7-GHz, 100kW Microwave Source Based on the Monotron Concept[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1999, 27(2): 580—586
- [9] Barroso J J. Design Facts in the Axial Monotron[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 2000, 28(3): 652—656
- [10] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994. (Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory on microwave and optoelectronics. Beijing: Electronic industry press, 1994)

Numerical simulations of radial transit-time oscillator

JIA Yun-feng, LIU Yong-gui, LI Chuan-lu

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Employing a 2.5-D PIC code, radial transit-time oscillator, is simulated numerically and the details are presented. The relations between output power and extractor size, radial cavity span and different modes are obtained. The results indicate that with the extractor size decreasing from 1cm to 2mm, the output power increases, and the relation between radial cavity span and output power coincides with that derived from linear theory. Comparison of different modes shows that TEM_1 is the most suitable mode to generate high power microwave. With a 200kV and 8kA electron beam, a 500MW, 5GHz peak output power microwave with mode TEM_1 is generated by simulation. The starting time to oscillate is less than 15ns. The peak efficiency is over 30%.

Key words transit-time effect; radial transit-time oscillator; high power microwave source; PIC simulation