

多波切仑柯夫振荡器的设计*

舒挺 刘永贵

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 采用 $2\frac{1}{2}D$ 相对论全电磁模粒子模拟程序, 对多波切仑柯夫振荡器进行了设计, 给出了一套结构参数。模拟结果表明: 所设计的器件在较宽的运行条件下 ($U_d = 300 \sim 500\text{kV}$, $I_b = 0.45 \sim 10\text{kA}$, $\tau_p = 10 \sim 10^2\text{ns}$) 能产生相干微波, 微波频率位于 X 波段 ($\sim 10\text{GHz}$), 辐射效率在 10% 左右, 最大输出功率约 300MW。

关键词 多波切仑柯夫振荡器, 粒子模拟, 高功率微波

分类号 TN129

Design of a Multiwave Cerenkov Generator

Shu Ting Liu Yonggui

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The configuration for a Multiwave Cerenkov Generator is designed with the help of a $2\frac{1}{2}D$ fully electromagnetic relativistic Particle-in-Cell (PIC) simulation code. Good performance of the well configured device is showed by simulation under a wide range of operation conditions ($U_d = 300 \sim 500\text{kV}$, $I_b = 0.45 \sim 10\text{kA}$ and $\tau_p = 10 \sim 10^2\text{ns}$). The microwave is generated in X-band ($\sim 10\text{GHz}$) with radiation efficiency in the order of 10%. The power level is approximately 300MW for its maximum.

Key words Multiwave Cerenkov Generator, particle simulation, high power microwave

1 引言

多波切仑柯夫振荡器, 简称 MWCG (Multiwave Cerenkov Generator)^[1], 其基本电动力学结构为 2 级空间周期相同的慢波结构之间连接一段光滑的漂移管, 并外加强轴向导引磁场(参见图 1)。MWCG 的工作原理如下: 在第 1 级慢波结构中, 电子束与同步慢波相互作用, 获得适当的速度调制; 在漂移区主要是快波场, 束波相互作用较弱, 电子束在漂移过程中将速度调制转化为密度调制, 形成电子预群聚; 在第 2 级慢波区, 预群聚的电子束与同步慢波有效地相互作用, 从而产生高功率相干微波。

近十多年来, 俄罗斯学者对 MWCG 进行了细致的实验研究, 结果令人鼓舞^[2,3]; 近年来, 美国学者也对 MWCG 进行了实验研究, 但结果非常不理想^[4]。线性理论^[2,3]不能很好地展示束波作用的物理图象, 尤其是无法描述波饱和过程, 因此, 不能给出器件的微波辐射效率, 难于对 MWCG 的结构设计提供指导。MWCG 的几何结构与束波作用均非常复杂, 非线性理论尚未建立。由于缺乏对 MWCG 物理过程的深入了解, 上述实验都是经验性的。这正是美实验结果不佳之重要原因。其它国家在 MWCG 方面的研究尚未见报导。

2 粒子模拟

等离子体粒子模拟^[5]是研究复杂几何位形中束波非线性相互作用的有效方法。它采用“巨粒子”代

* 国防强辐射重点实验室基金资助项目

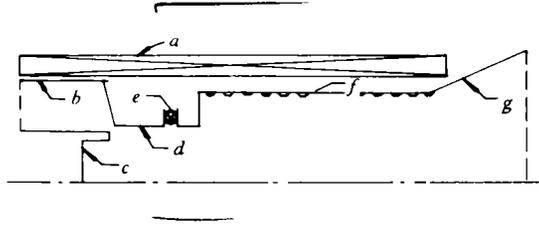
1997年6月23日收稿

第一作者: 舒挺, 男, 1965年生; 讲师

替大量(约 10^9 个)运动状态相近的微观粒子,运用时域差分(FDTD)法求解 Maxwell 方程组及 Lorentz 力方程,从而可借助计算机模拟实际物理过程。文献中至今未见用粒子模拟法研究 MWCG 的报导。我们采用 $2\frac{1}{2}D$ 相对论全电磁模粒子模拟方法研究 MWCG 并得到初步结果^[6]。在此基础上,采用粒子模拟法对 MWCG 进行了设计。

3 器件设计

选定的 MWCG 结构如图 1 所示。选择结构参数时,尽量结合本实验室可能达到的条件,以期能利用所设计的 MWCG 进行实验研究。



a. 磁场线圈 b. 阳极 c. 阴极 d. 准直通孔 e. Rogowski 线圈 f. 微波管 g. 微波喇叭

图 1 MWCG 结构简图

微波管是 MWCG 的核心部件。预期所设计的 MWCG 将运行于 X 波段,即波长 $\lambda \sim 3\text{cm}$ (模拟结果正好如此)。取 $D/\lambda \sim 3$,则可选定 $D = 8.4\text{cm}$ (这样可利用标准黄铜管加工)。实验模拟结果^[6]及俄实验均表明,MWCG 工作于纵向 π 模式附近。据此可估算慢波结构的周期 l ,即 $1 \sim \lambda_g/2$, λ_g 为波导波长。 $v_{ph} = (\lambda_g/\lambda)c$, v_{ph} , c 分别表示慢波的相速度和真空中的光速。束波同步要求: $v_{ph} \leq v_b$, v_b 为电子束的速度。 $U_d = 500\text{kV}$ 时, $v_b = 0.866c$, $\lambda_g = 2.6\text{cm}$,于是取 $l = 1.3\text{cm}$ 。根据大量的具体计算,我们选定: $r_b \approx 3\text{cm}$, $h = 0.4\text{cm}$, $L_1 = 121$, $L_2 = 161$, $L_{dr} = 61$,其中, r_b 为环形电子束内径、 h 为慢波结构的波纹(半圆形)幅度、 L_1 、 L_2 及 L_{dr} 分别为第 1、2 级慢波结构及漂移区长度。例如, $h = 0.3\text{cm}$,其它结构参数与表 1 算例 3 给出的相同时不能产生相干微波。又如,其它结构参数与算例 5 对应相同,当 $L_1 = 101$, $L_2 = 141$, $h = 0.3\text{cm}$ 时, $\eta = 5\%$, $f_0 = 10.3\text{GHz}$;而 $L_1 = 121$, $L_2 = 181$, $L_{dr} = 81$, $h = 0.3\text{cm}$ 时, $\eta = 1.7\%$, $f_0 = 10.3\text{GHz}$ 。 $r_b \approx 3\text{cm}$ 也是选在最佳值附近。

选取电子束流时已保证 $I_b < I_{sc1}$, I_{sc1} 为空间电荷极限电流^[7]。因此,电子束能够在 MWCG 中顺利传输。电子束厚 $\Delta r_b \approx 2\text{mm}$,部分模拟结果如表 1 所示。表中, t_s 表示辐射口波增长至饱和所需的时间,

表 1 结构参数与模拟结果

Case	U_d (kV)	I_b (kA)	r_b (cm)	I_{sc1} (kA)	B_c (T)	t_s (ns)	T. M.	L. M.	f_0 (GHZ)	η (%)
1	300	2	3.1	6.4	1.2	20	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	2
2	350	0.45	2.9	6.9	1.2	50	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	18
3	350	0.45	3.1	7.5	1.2	85	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	19
4	350	0.6	3.2	7.8	1.2	50	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	19
5	350	2	3.1	7.5	1.2	20	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	10
6	400	1.5	3.1	9.3	1.2	35	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	12
7	500	4	3.0	12.6	1.2	25	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	12
8	500	10	3.0	12.6	1.2	15	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	6
9	500	10	3.0	12.6	1.6	10	TM ₀₂	$\sim \pi$	10.0	3

T. M 和 L. M. 分别表示横向和纵向主模式。可见,采用上述结构参数的 MWCG 在较宽的运行条件下($U_d = 300 \sim 500\text{kV}$, $I_b = 0.45 \sim 10\text{kA}$, $\tau_p = 10 \sim 10^2\text{ns}$)均能产生单频微波,且效率在 10% 左右。下面结合算例 2 的部分模拟结果加以说明。

辐射主频 f_0 是通过空间给定点处时变电磁场分量作 Fourier 变换而得到的。图 2 给出的是喇叭内一点 ($r = 3.8\text{cm}, z = 71\text{cm}$) 在 $t = 45 \sim 50\text{ns}$ 间电场分量的频谱, 可见, $f_0 \approx 10.0\text{GHz}$, 而且辐射电场中 E_r 分量为主, 故辐射横向模式以 TM 模式为主, 这是 0 型器件的基本特征。由于在模拟程序中已假定系统具有轴对称性, 因此, 主模式为 TM_{0n} 模式 (TE_{0n} 模式很弱)。图 3 给出了轴上不同位置处 Poynting 矢量值 S 的径向分布。显然, 在两段慢波区 ($z = 15\text{cm}, 45\text{cm}$), S 在微波管内表面附近取值很大, 而在近轴处则较小, 因此, 管内主要是表面波, 这是慢波器件的显著特征。而在喇叭内 ($z = 71\text{cm}$) S 有双峰, 表明辐射横向主模式为 TM_{02} 模式。

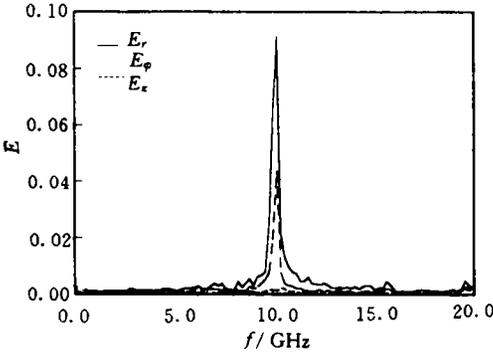


图 2 辐射频谱

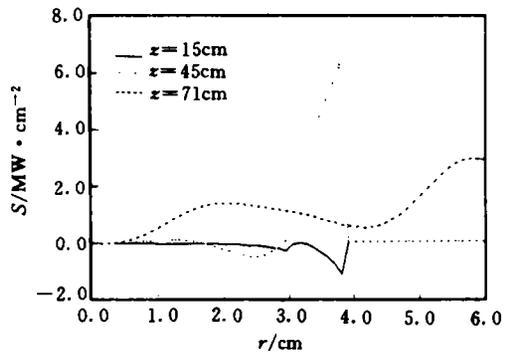


图 3 辐射能流 S 的径向分布

图 4 给出的是 $t = 50\text{ns}$ 时通过 MWCG 横截面的功率 P (定义为 Poynting 矢量对横截面的积分) 随轴向位置 z 的分布。 $P < 0$, 说明该位置处净能流是沿 $-z$ 方向, $P > 0$ 时则为 $+z$ 方向。图 4 显示出在 MWCG 的第 1、第 2 慢波区均有 P 随 z 振荡, 表明慢波器件工作于纵向近截止区, 此处为 π 截止区附近。这与俄罗斯的实验结论是一致的^[2,3]。

粒子模拟法能对器件的微波辐射效率 η 进行计算。采用的算式为:

$$\eta = \frac{1}{\Delta T} \iint_{\Delta T, A} (\mathbf{E} - \langle \mathbf{E} \rangle) \times (\mathbf{H} - \langle \mathbf{H} \rangle) \cdot d\mathbf{a} dt / I_b U_d$$

式中, 分子表示 ΔT 时间内喇叭口处 (截面积为 A) 辐射功率的平均值, 分母为注入电子束功率, $\langle \rangle$ 表示取 ΔT 时间内的平均值, 程序中取 $\Delta T = 5\text{ns}$ 。表中给出的均是饱和时的 η 值。

图 5 描述了 $t = 50\text{ns}$ 时电子在 MWCG 中的空间分布, 清晰地给出了电子群聚过程及在导引磁场作用下运动轨迹的图像, 从而支持了前面关于 MWCG 工作原理的描述, 同时, 也为 MWCG 结构总长度与磁场线圈长度的选取提供了依据。即, 微波管区导引磁场均匀, 随后, 电子在导引磁场作用下打在微波喇叭壁上而被吸收。微波喇叭同时又是电子吸收体。

由图 4 及图 5 可见, 粒子模拟法能给出揭示 MWCG 物理实质的清晰图像。这是实验法及线性理论法均不能实现的。

MWCG 采用磁绝缘无箔二极管, 阴阳极间距可调。实验时由 Rogowski 线圈测量束流。

4 结论

粒子模拟法用于研究 MWCG 能够得到较实验法和线性理论法更清晰完整的物理图像, 能对器件的频率和效率进行计算, 因此可用于对 MWCG 进行分析与设计, 对实验具有重要的指导作用。

采用粒子模拟法设计了一套 MWCG。模拟结果表明: 它在较宽的运行条件下, 能够实现基于 MWCG 的微波辐射, 微波频率 $f_0 \approx 10\text{GHz}$ (X 波段), 辐射效率 $\eta \approx 2 \sim 19\%$, 最大辐射功率达 300MW ; MWCG 工作于纵向 π 模式附近, 横向主模式为 TM_{02} , 其辐射频率 f_0 基本不变; 辐射效率 η 与二极管电压 U_d 、电子束流 I_b 、电子束半径 r_b 、导引磁场 B_g 、波纹幅度 h 以及慢波结构的长度 L_1, L_2 等密切相关。因此, 参数优化非常必要, 有待深入研究。

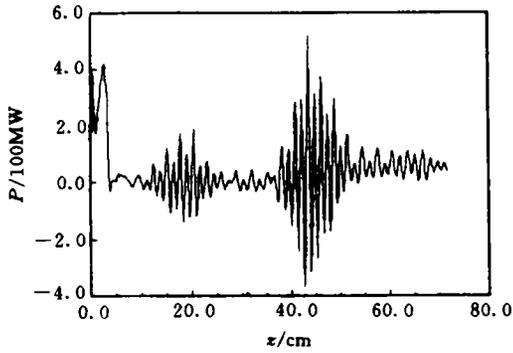


图4 功率P的纵向分布

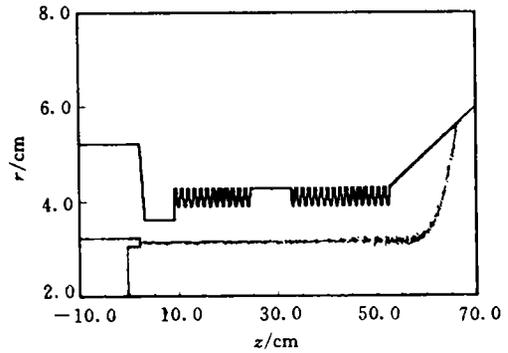


图5 电子的空间分布

我们将对所设计的 MWCG 进行加工,以期能在我国首次进行 MWCG 实验,同时,将把实验和模拟结果加以比较分析,并进一步对结构参数进行优化。由此达到对 MWCG 的深入了解。限于篇幅,有关结果将另文报导。

致谢 在选定器件结构及运行参数时曾与钱宝良博士、张亚洲教授、凌根深副教授、彭向阳讲师、刘存华工程师、刘金亮工程师进行了有益的讨论,谨此致谢!

参考文献

- 1 Bugaev S P, Kanavets V I, Klimov A I, *et al.* Relativistic Multiwave Cerenkov Generator. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1983, 9(11): 596
- 2 Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, *et al.* Relativistic Multiwave Cerenkov Generators. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1990, 18(3): 525
- 3 Deichuli M P, Koshelev V I, Piskunov V M. Interaction of a Relativistic Electron Beam and an Electromagnetic Field in Oversized Slow-wave Structures near the High-frequency Edge of the Transmission Band. *J. Comm. Tech. Electr.*, 1996, 41(2): 208
- 4 Adler R, Rich-Sand R, Hacker F, *et al.* Recent Multiwave Cerenkov Generator Experiments. *SPIE*, 1994, 2154: 306
- 5 Dawson J M. *Rev. Mod. Phys.*, Particle Simulation of Plasmas, 1983, 55(2): 403
- 6 Shu Ting, Liu Yonggui. Particle Simulation of a Millimeter Wave Multiwave Cerenkov Generator Producing Gigawatt Power Levels. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1998, 19(3)
- 7 Miller R B and Straw D C. Vacuum Propagation of Solid Relativistic Electron Beams. *J. Appl. Phys.*, 1976, 47(5): 1897