

具有电介质衬套的多波切仑柯夫振荡器*

舒挺 刘永贵

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 提出了具有电介质衬套的多波切仑柯夫振荡器的概念, 并采用粒子模拟方法对之进行了研究。结果表明: 电介质衬套能使器件在较低二极管电压下正常工作, 同时, 在低电压区的辐射效率明显提高。这对开发多波切仑柯夫振荡器在爆磁压缩产生高功率微波等领域的应用具有参考价值。研究还发现: 微波频率随电介质的介电常数增大而单调下移, 电介质的介电常数及导引磁场的强度均具有最佳值。

关键词 多波切仑柯夫振荡器, 电介质慢波结构, 高功率微波, 粒子模拟

分类号 TN12

Dielectric-lined Multiwave Cerenkov Generators

Shu Ting Liu Yonggui

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

Abstract This paper presents the concept of a Dielectric-lined Multiwave Cerenkov Generator (DMWCG), which is investigated with particle simulation method. It is showed that the DMWCG can operate in a lower diode-voltage range with much higher radiation efficiency as compared with the usual Multiwave Cerenkov Generator (MWCG). This result shows a possible way for the application of the DMWCG into such a field as high power microwave generation with Explosive Magnetic Compression. Also showed through the simulation are both the downshift of the microwave frequency in the presence of the liner and the existence of the optima for the permittivity of the liner as well as for the magnitude of the guiding magnetic field.

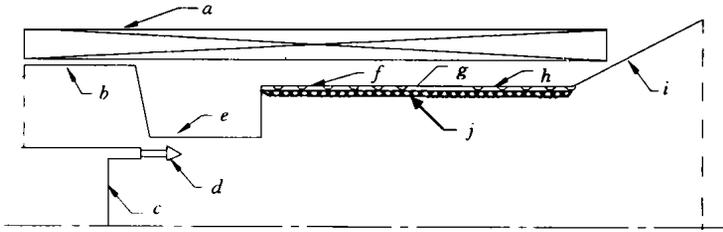
Key words Multiwave Cerenkov Generator, dielectric slow-wave structure, high power microwave, particle simulation

多波切仑柯夫振荡器(Multiwave Cerenkov Generator, 以下简称 MWCG) 具有效率高、功率大、频率稳定的优点, 是一种非常有发展前景的高功率微波器件, 通常在高电压及大电流条件下运行^[1]。本文提出在 MWCG 的慢波结构及漂移管中加入电介质衬套的想法, 以研究 MWCG 在较低电压下应用的可能性。目前, 爆磁压缩(Explosive Magnetic Compression) 装置只能产生较低电压(一般在300kV 左右), 在此条件下为其配置高效率的微波发生器有其现实意义。具有电介质衬套的多波切仑柯夫振荡器(Dielectric-lined Multiwave Cerenkov Generator, 以下简称 DMWCG) 即有可能用于此目的。

1 基本原理与研究方法

DMWCG 的基本结构如图1所示。其基本原理是: 在 MWCG 的慢波结构及漂移管中加入电介质衬套, 使器件中所激励的电磁波进一步慢化, 从而可在较低电压下达到束波同步, 这样即有可能实现较高的微波辐射效率, 获得高功率相干微波输出。另一方面, 电介质衬套的加入还能提高空间电荷极限电流:

* 国家863计划项目资助
1997年12月15日收稿
第一作者: 舒挺, 男, 1965年生, 讲师



a. 导引磁场线圈 b. 阳极 c. 阴极 d. 电子束 e. 准直孔
f. 第一慢波区 g. 漂移区 h. 第二慢波区 i. 喇叭 j. 电介质衬套
图1 DMWCG 的基本结构

$$I_{sc1} = 4\pi\epsilon_0 \frac{mc^3}{e} (\gamma_0^2 - 1)^{\frac{3}{2}} / (2 \ln \frac{R}{r_b} - 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \ln \frac{R\epsilon_r}{r\epsilon_r})$$

式中^[2], I_{sc1} 为空间电荷极限电流, ϵ_0 、 c 分别为真空中的介电常数和光速, ϵ_r 为电介质的相对介电常数, e 、 m 、 γ_0 分别为电子的电荷、静止质量和相对论因子, R 、 r_b 、 r_e 、 $R\epsilon_r$ 分别为波导内径、电子束半径及电介质衬套内外径。由此式可见, 电介质衬套的厚度($\Delta r\epsilon_r = R\epsilon_r - r_e$)和相对介电常数 ϵ_r 增大, 则空间电荷极限电流 I_{sc1} 提高, 从而允许传输的电子束流增大。这对产生高功率微波有利。综上所述, 相对 MWCG 而言, DMWCG 则更适用于低电压及大电流的场合, 比如, 爆磁压缩装置中。

DMWCG 几何结构及束波作用均比较复杂, 拟采用粒子模拟方法^[3]进行研究。粒子模拟方法中, 将大量运动状态相近的微观粒子视为一个巨粒子, 使得系统中的粒子数大大减少, 从而可借助计算机通过运用 FDTD 法^[4]求解 Maxwell 方程组及 Lorentz 力方程来跟踪粒子在自洽场中的运动。求解 Maxwell 方程组时, 分别考虑电介质区和真空区, 具体的几何结构则通过相应的边界条件来描述, 因此, 束波作用得到了比较全面的描述, 其中自然包括了非线性效应。

2 结果及其分析

本文研究的 DMWCG 结构参数可分为固定参数和可调参数。固定参数为: $R = 4.2\text{cm}$, $l = 1.3\text{cm}$, $L_1 = 12l$, $L_2 = 16l$, $L_{dr} = 6l$, $h = 4.0\text{mm}$, $r_b = 3.2\text{cm}$, $\Delta r_b = 2\text{mm}$, $R\epsilon_r = R - h$, $\Delta r\epsilon_r = 2\text{mm}$, $L\epsilon_r = L_1 + L_{dr} + L_2$; 可调参数为: $\epsilon_r = 1.0 \sim 10.0$, $B_g = 0.6 \sim 1.2\text{T}$, $U_d = 150 \sim 300\text{kV}$, $I_b = 2 \sim 5\text{kA}$, $\tau_p = 40\text{ns}$ 。其中, l 、 h 分别为慢波结构的波纹周期和幅度, L_1 、 L_2 、 L_{dr} 分别为第一、二慢波区及漂移区的长度, $L\epsilon_r$ 为电介质衬套的长度, Δr_b 、 I_b 分别为电子束的厚度和电流, B_g 为导引磁场强度, U_d 、 τ_p 分别为二极管电压和电子束脉宽。文中对三种情况进行了模拟研究与分析。

首先研究 DMWCG 在低电压下运行的可能性。其可调参数与模拟结果见表1。表中, η 、 f_0 分别为辐射效率和微波频率。文中, 辐射效率定义为辐射功率的时间平均值与注入的电子束功率之比, 微波频率则由时变场分量进行 Fourier 变换得到, 所用时间间隔均为5ns。

表1 DMWCG 的低电压特性

ϵ_r	$U_d(\text{kV})$	$I_b(\text{kA})$	$B_g(\text{T})$	$\eta(\%)$	$f_0(\text{GHz})$
1.0*	200	5	1.2	0.3	×
4.0	200	5	1.2	5.7	6.8
6.0	200	5	1.2	12	6.0
10	200	5	1.2	6.2	4.6
1.0*	150	5	0.8	0.1	×
8.0	150	5	0.8	12	4.4

* $\epsilon_r = 1.0$ 即未加电介质衬套; ×表示无主频(下同)

由表1可见, 不加电介质衬套时, 器件(即 MWCG)在200kV与150kV的二极管电压下均不能正常

工作。加入电介质衬套, DMWCG 则可在低电压条件下激励相干微波, 且辐射效率和微波频率均与衬套的介电常数密切相关。同时, 存在介电常数的最佳值, 其与最大辐射效率相对应。这一结论可由束波同步的实现加以解释。另外, 微波频率随介电常数的增大而单调下移符合文献[5]中由线性理论得到的结果。

其次, 在 MWCG 运行的二极管电压下限附近来研究电介质衬套对器件性能的影响。有关结果列于表2。由模拟计算可知, $U_d = 300\text{kV}$ 是所研究的 MWCG 二极管电压下限, 此时, 电子束的速度很慢, 难于与器件中的波模耦合, 辐射效率很低。电介质衬套的加入使得器件中波的相速度减慢, 从而改善了束波同步状态, 辐射效率明显提高, 最大时已超过原来的5倍。同时, 表2再次说明电介质衬套的介电常数存在最佳值, 以及微波频率随介电常数的增大而单调下降。

表2 不同电介质衬套对器件的影响

ϵ_r	$U_d(\text{kV})$	$I_b(\text{kA})$	$B_g(\text{T})$	$\eta(\%)$	$f_o(\text{GHz})$
1.00	300	2	1.2	2.2	10.0
1.50	300	2	1.2	8.3	9.3
1.80	300	2	1.2	12	8.8
2.00	300	2	1.2	11	8.7
2.25	300	2	1.2	9.0	8.2

最后, 研究不同导引磁场强度下, DMWCG 及 MWCG 的性能变化。这样可进一步说明电介质衬套的作用。为使算例更具有实际意义, 采用有机玻璃作介质衬套, 此时, 可取 $\epsilon = 2.25^{[5]}$ 。另外, 取 $U_d = 300\text{kV}$, $I_b = 2\text{kA}$ 。模拟结果如表3所示

表3 不同导引磁场强度时电介质衬套的影响

$B_g(\text{T})$	0.60	0.73	0.91	1.2
$\eta(\%)$	23 0.5*	28 1.5	20 6.9	9.0 2.2
$f_o(\text{GHz})$	8.2 ×	8.2 10.0	8.2 10.0	8.2 10.0

* 同一磁场下, 右列为未加电介质衬套的情形

由此可见, 有机玻璃作介质衬套使器件在 $U_d = 300\text{kV}$ 时的辐射效率提高了3倍(从6.9%提高到28%), 而微波频率只下移了不到20% (从10GHz降低到8.2GHz), 并且降低了对导引磁场强度的要求(从0.73T下降到0.91T)。

表3同时说明, 导引磁场强度对 DMWCG 性能的影响非常大, 而且导引磁场强度存在最佳值。可以这样来解释这一结果: 导引磁场强度太弱时, 不能有效地抑制电子束的径向分散; 太强时则会将电子束限制在过小的径向范围内, 当电子获得较低程度的群聚时即会由于空间电荷效应而沿轴向散开。这些都不利于电子获得适度的群聚, 导致辐射效率下降, 因此, 导引磁场强度必须适当, 才对激励微波有利。实际上, 这一结论及其解释也适用于未加电介质衬套的 MWCG 的情形(见表3)。如果导引磁场强度过低, 电子将由于径向分散而不能形成群聚, 因而不能产生相干微波。这对应表3中 MWCG 在 $B_g = 0.60\text{T}$ 时无单频微波输出的现象。

3 结论

本文对具有电介质衬套的多波切仑柯夫振荡器(DMWCG)进行了原理分析及性能研究, 并同相应的 MWCG 进行了比较, 得到了具有实际价值的结果, 给出了合理解释。研究表明, 电介质衬套能够明显提高器件在低电压下的辐射效率, 同时, 微波频率有一定的下移。文中所研究的 DMWCG 二极管电压 U_d 在150~300kV 的范围内, 辐射效率为10%左右, 最大达到28%, 微波频率位于 X 波段和 C 波段。这对开发 MWCG 在低电压及大电流条件下(如爆磁压缩产生高功率微波领域)的应用有着实际意义。

参考文献

- 1 Bugaev S P et al. Relativistic Multiwave Cerenkov Generators. IEEE Trans. Plasma Sci., 1990, 18(3): 525 ~ 536
- 2 Dawson J M. Particle Simulation of Plasmas. Rev. Mod. Phys., 1983, 55(2): 403 ~ 447
- 3 Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Trans., 1966, AP- 14(3): 302 ~ 307
- 4 Miller R B et al. Vacuum Propagation of Solid Relativistic Electron Beams. J. Appl. Phys., 1976, 47(5): 1897 ~ 1908
- 5 钱宝良. 具有等离子体背景或电介质衬套的返波振荡器: [学位论文]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 1996