

C波段相对论磁控管的三维粒子模拟研究

赵林¹⁾ 钱宝良 李锐 杜广星

(国防科学技术大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 利用场论的方法推导了6腔扇形腔结构相对论磁控管的色散关系,并用牛顿迭代法对色散关系进行了求解,得到了色散关系曲线.利用三维PIC粒子模拟,对该结构的相对论磁控管分别进行了冷腔和热腔研究,冷腔研究得到了 π 模谐振频率为2.42GHz,与本文理论推导的色散关系有很好的 consistency.在热腔情况下,电子能量为437keV,电子束流为12.2kA,外加磁场为0.6T,模拟得到了频率为4.5GHz,平均峰值功率为0.96GW的C波段的高功率微波输出,分别通过相空间图和不同腔内射频场随时间的变化曲线可以确定器件工作在 2π 模,效率约为18%,且频谱纯净.当进一步对参数进行优化后,在注入的电子能量和电子束流分别为1.05MeV和20.7kA,外加磁场为0.7T时,得到平均功率达到约4.4GW,频率为4.37GHz微波输出,效率约为20%.

关键词 相对论磁控管 高功率微波 C波段 色散关系 粒子模拟

1 引言

在过去的几十年里,随着高功率微波技术的发展,人们对高功率微波源的研究越来越重视,相对论磁控管作为一种高功率微波源,在军事和民用方面均得到了较广泛的应用,如雷达、通信、等离子体烧蚀等^[1-3].目前对相对论磁控管进行研究的主要研究机构有俄罗斯的托姆斯克研究所、高尔基应用物理所、俄罗斯科学院,美国的MIT、斯坦福大学、海军实验室和PI公司,以及中国的成都电子科大等.这些科研机构的研究成果,在理论、计算机模拟和工程应用等方面都极大地推动了相对论磁控管的发展.但由于相对论磁控管中束一波作用过程的复杂性,例如,作用过程后期这种过程便变得高度非线性和等离子体的产生等原因,使得相对论磁控管的研究仍有许多问题需要解决.目前相对论磁控管的实验研究所得到的高功率微波还主要集中在S及C波段,如何利用相对论磁控管在更低的波段内得到高功率微波的输出仍是一个需要解决的问题,如何提高相对论磁控管的效率也是目前急需解决的问题.

本文主要用场论的方法研究了C波段扇形腔结构的相对论磁控管的色散关系并用三维粒子模拟的方法研究了该结构相对论磁控管的输出特性.目前国内对C波段相对论磁控管的报道不多,因此,对C波段相对论磁控管的研究有助于相对论磁控管研究工作在国

的进一步开展.同时如何获得更高的功率也是目前急需解决的问题之一.

2 色散关系推导与数值计算

图1为扇形腔结构相对论磁控管示意图,其中 R_a , R_c 和 R_h 分别为阳极半径,谐振腔半径和阴极半径, 2α 为谐振腔腔角.

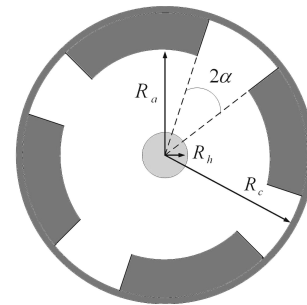


图1 扇形腔结构相对论磁控管示意图

本文对色散关系的推导过程借鉴了文献[4]所提出的方法.首先假设波函数为

$$\psi(x, t) = \psi(r) \exp[i(l\theta - \omega t)], \quad (1)$$

式中 ω 为本征频率, l 为角向波数, r 为径向变量.由于考虑在轴向是均匀的,所以轴向波数 k 在这里被省略了.

根据Maxwell方程, 当只考虑电子束很稀薄, 且只在阴极附近的情况或不考虑电子束的情况时, 电流项可以忽略. 于是可得到方程

$$\left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} - \frac{l^2}{r^2} + \frac{\omega^2}{c^2}\right) E_z(r) = 0, \quad (2)$$

解方程可得

$$E_\theta(R_a^+) = -i[J_1(\eta) - J_1(\zeta)N_1(\eta)/N_1(\zeta)], \quad (3)$$

$$E_\theta(R_a^-) = -i \sum_j b_j \frac{d}{dx} Z_j(x) \Big|_{x=\eta} \exp(ij\theta), \quad (4)$$

其中 $\eta = \omega R_a/c$, $\zeta = \omega R_c/c$, E_θ 为轴向的电场, 而函数 $Z_j(x)$ 定义为

$$Z_j(r) = J_j(r) + G_j N_j(r), \quad (5)$$

$$G_j = \begin{cases} -J_j'(\lambda)/N_j'(\lambda), & j \neq l, \\ G - J_j'(\lambda)/N_j'(\lambda), & j = l, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\lambda = \omega R_h/c$, $j = s + mN$, m 为任意整数, $s = 0, 1, \dots, N-1$, N 为谐振腔的数目, G 可由边界条件确定, 由于篇幅有限, 这里对 G 的表达式暂不进行讨论, b_j 可由下面的边界条件确定

$$\int_0^{2\pi} d\theta E_\theta(R_a^-) \exp(-ij\theta) = E_\theta(R_a^+) \sum_{u=0}^{N-1} \int_{2\pi u/N-\alpha}^{2\pi u/N+\alpha} d\theta \exp(-ij\theta), \quad (7)$$

最后再利用边界条件

$$\int_{2\pi u/N-\alpha}^{2\pi u/N+\alpha} d\theta B_z(R_a^-) = 2\alpha B_z(R_a^+), \quad (8)$$

可以得到相对论磁控管的色散关系为

$$0 = D(\omega, l) = \sum_{m=-n}^n \frac{J_j(\eta)N_j'(\lambda) - J_j'(\lambda)N_j(\eta)}{J_j'(\eta)N_j'(\lambda) - J_j'(\lambda)N_j'(\eta)} \left(\frac{\sin j\alpha}{j\alpha}\right)^2 - \frac{\pi}{N\alpha} \frac{J_0(\eta)N_1(\zeta) - J_1(\zeta)N_0(\eta)}{J_1(\zeta)N_1(\eta) - J_1(\eta)N_1(\zeta)}. \quad (9)$$

对上式利用牛顿迭代法进行数值求解可得到扇形腔结构相对论磁控管的色散关系曲线, 如图2. 从图中

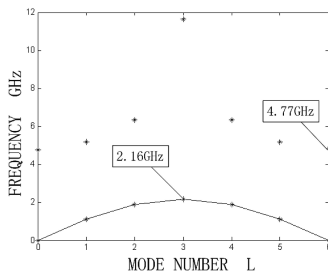


图2 色散关系曲线

可以看到, π 模和 2π 模对应的工作频率分别为2.16GHz和4.77GHz.

3 粒子模拟结果与分析

根据色散特性, 选取相对论磁控管进行模拟的结构参数为 $R_a=2.11\text{cm}$, $R_c=4.11\text{cm}$, $R_h=1.58\text{cm}$, $2\alpha=20^\circ$ 以及长度为 $h=7.2\text{cm}$, 磁场为0.6T. 图3为模拟模型的结构图和输出结果.

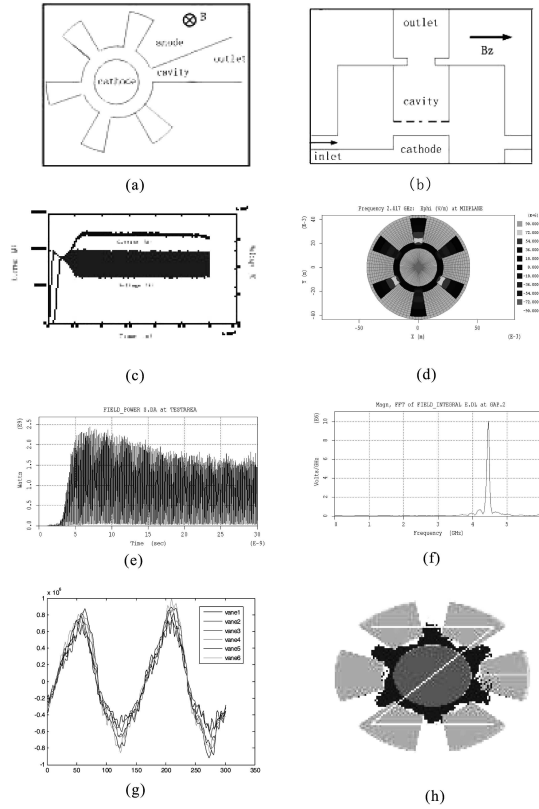


图3 模拟结构图及输出结果

图3(a)和(b)分别为模型的轴向和径向的结构图; (c)为输入的电压和电流曲线, 从该图可以得到注入的电子能量为437keV, 电子束流为12.2kA; (d)为冷腔模拟得到的 π 模的频率, 可以看到, 在该结构参数下, π 模的频率约为2.42GHz, 这与色散关系曲线(图2)的 π 模的工作频率2.16GHz有很好的—致性; (e)为输出功率曲线, 根据曲线可以计算出输出的平均功率约为0.96GW; (f)为频谱图, 可以看到输出微波的频率为4.5GHz, 这与前面利用场论方法推导得出的色散关系曲线(图2)的 2π 模的工作频率4.77GHz符合得较好; (g)为某一段时间内, 分别在6个谐振腔中观测到的电场曲线, 从图中可以看到, 6个谐振腔中的电场具有相同的相位, 因此, 可以确定, 该结构参数下的相对论磁控管工作在 2π 模式下; (h)为相空间图, 可以看到电子云层群聚成6个轮辐, 而该相对论磁控管有6个谐

振腔, 可以进一步说明该相对论磁控管工作在 2π 模式下:

$$\eta = \bar{P}_{\text{out}} / P_{\text{in}}. \quad (10)$$

根据公式 (10) 可以大概估算出本文所研究的相对论磁控管模拟得到的效率大约为 18%.

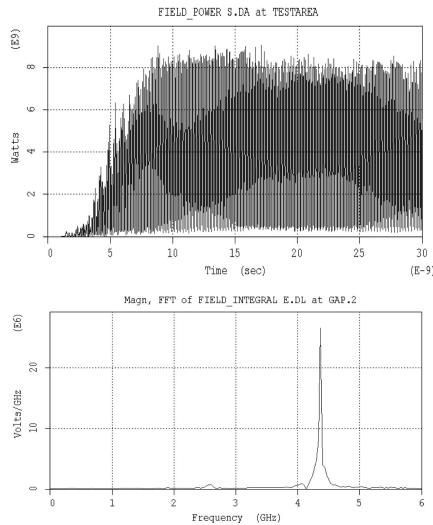


图 4 模拟输出的微波功率及频谱

当进一步对参数进行优化后, 在注入的电子能量和电子束流分别为 1.05MeV 和 20.7kA 时, 平均功率达到约 4.4GW, 频率为 4.37GHz 微波输出, 效率约为 20%, 如图 4.

4 结论

本文利用场论的方法推导了 6 腔扇形腔结构相对论磁控管的色散关系, 并用牛顿迭代法对色散关系进行了求解, 得到了色散关系曲线. 利用三维 PIC 粒子模拟, 对该结构的相对论磁控管分别进行了冷腔和热腔研究, 冷腔研究得到了 π 模谐振频率为 2.42GHz, 与本文理论推导的色散关系有很好的的一致性. 在热腔情况下, 电子能量为 437keV, 电子束流为 12.2kA, 外加磁场为 0.6T, 模拟得到了频率为 4.5GHz, 平均峰值功率为 0.96GW 的 C 波段的高功率微波输出, 分别通过相空间图和不同腔内射频场随时间的变化曲线可以确定器件工作在 2π 模, 效率约为 18%, 且频谱纯净. 当进一步对参数进行优化后, 在注入的电子能量和电子束流分别为 1.05MeV 和 20.7kA 时, 得到平均功率达到约 4.4GW, 频率为 4.37GHz 的微波输出, 效率约为 20%.

参考文献(References)

- 1 Robert J. Barker, Edl Schamiloglu. High-Power Microwave Sources and Technologys. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)
(Robert J. Barker, Edl Schamiloglu. 高功率微波源与技术. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- 2 LI T M. Theoretical and Experimental Research of Relativistic Magnetron. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005 (in Chinese)
(李天明. 相对论磁控管的理论与实验研究. 成都: 电子科技大学, 2005)
- 3 Lebedev N B. Microwave Electronics. Beijing: National Defence Industry Press, 1982
- 4 Han S. Uhm. A Kinetic Theory of the Extraordinary-Mode Perturbations in Cylindrical Relativistic Magnetrons[J]. Phys. Fluids, 1992, B4(3): 740—749

Three Dimensional PIC Simulation of a C-Band Relativistic Magnetron

ZHAO Lin¹⁾ QIAN Bao-Liang LI Rui DU Guang-Xing

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

Abstract The dispersion relation of a conventional 6-vane relativistic magnetron is derived and numerically calculated, which is employed to analyze the operating frequency of the device. Initial results of three-dimensional particle-in-cell simulation show that an average output microwave power of about 0.96GW at 4.5GHz is obtained at the beam energy of 437keV and current of 12.2kA when the externally applied magnetic field is about 0.6T. The efficiency is about 18%. An average output power of microwave about 4.4GW at 4.37GHz is also obtained at the beam energy of 1.05MeV and the current of 20.7kA when the structure parameters are improved. The efficiency is about 20%.

Key words relativistic magnetron, high-power microwave, C-band, dispersion relation, particle simulation

Received 7 January 2008

1) E-mail: zldlut@yahoo.com.cn