

两腔高功率微波振荡器研究

李正红 孟凡宝 常安碧 黄 华 马乔生

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2004 年 8 月 31 日收到 2005 年 3 月 11 日收到修改稿)

对一种新型两腔振荡器进行了理论和数字模拟研究. 这种结构中的调制腔实现电子束速度调制, 调制后的电子束在通过两腔之间一个微波场较弱的区间时实现电子束群聚, 然后在换能腔实现电子能量到微波能量的转换, 并通过输出结构输出. 同时, 调制腔和换能腔之间存在微波耦合, 换能腔中的一部分微波能量可以耦合到调制腔, 形成一个正反馈回路, 在一定条件下实行微波振荡. 设计了一个 X 波段的器件, 理论效率为 29.4%, 2.5 维 Particle in Cell (PIC) 程序模拟的效率为 28%, 微波频率为 9.42 GHz, 微波输出功率为 2.25 GW.

关键词: 高功率微波, 微波腔, 模式, 自洽方程

PACC: 4100, 0200

1. 引 言

在高功率微波 (HPM) 器件中所关心的是束波转换效率和微波功率, 这与束波相互作用中电子束的群聚和换能过程密切相关^[1]. 很多高功率微波器件 (如返波管^[2]、行波管^[3]、相对论速调管振荡器^[4]、虚阴极振荡器^[5]等) 的设计通常也是以此为依据. 如果以微波腔作为微波器件, 其特点是微波场分布只决定于微波腔边界, 与电子束无关, 电子束只影响微波场的幅度和相位. 在微波腔中电子束与微波场的相互作用, 与摇摆器中电子束与自由电子激光辐射场^[6]的相互作用类似, 微波场影响电子的运动, 同时电子束作为电流源也产生辐射影响微波场, 是一个闭环系统. 微波腔通常是具有复杂形状的圆柱腔, 不同形状微波腔的场分布不同, 不同场分布的微波腔与电子束之间的相互作用也不同 (如单腔管^[7]、分离腔振荡管^[8]等). 为了实现较高的束波转换效率和微波功率, 本文提出了一种两腔振荡器, 并从理论上研究电子束的调制、群聚和换能三个过程, 该结构可以获得较高的束波转换效率和微波功率.

2. 理论和模型

2.1. 结构及其工作模式场分布

两腔振荡器结构图如图 1 所示, 其工作模式为

TM 模. 图 2 为两腔振荡器作用区场分布, 图中实线为模拟结果, 虚线为近似场分布. 由图 2 可以看出, 在作用间隙微波场分布可以近似为均匀场^[9]. 图 3 为两腔振荡器作用区近似场分布. 作用区近似场分布可以表示为

$$E_z(z) \approx \begin{cases} E_1 & (0 < z < d_1), \\ 0 & (L < z < d_1 + L), \\ -E_2 & (d_1 + L < z < d_1 + L + d_2), \end{cases} \quad (1)$$

式中 E_1, E_2 由微波腔的具体结构决定. 这里 $E_z(z)$ 为归一化场强 $E(r)$ 在作用区的 z 向分量,

$$\int_V E^2(r) dr = 1,$$

式中 V 为微波腔体积.

微波腔中实际场强 E^0 与归一化场强 E 的关系为

$$E^0 = \alpha_0 E, \quad (2)$$

式中 α_0 为微波场幅度, E^0 的单位为 MV/cm, E 的单位为 $m^{-3/2}$.

因此, 根据微波腔中储能和作用区某一点的实际场强 E^0 可以得到该点归一化场强 E_1 ,

$$E_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{W}} E_1^0, \quad (3)$$

式中, W 为作用区 ($0 < z < L_1$) 中实际场强为 E_1^0 时的微波腔储能, 单位为 J; ϵ_0 为真空介电常数.

两腔振荡器的模拟结果为: 频率 $f_0 = 9.42$ GHz,

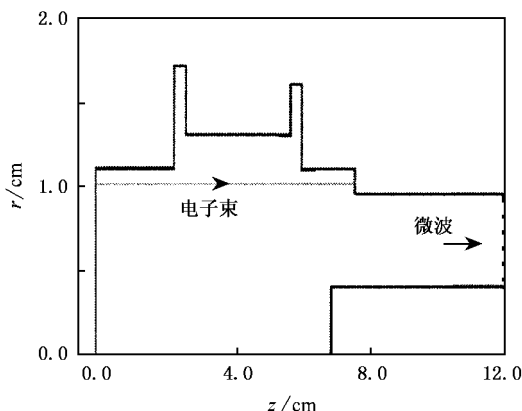


图1 两腔振荡器结构示意图

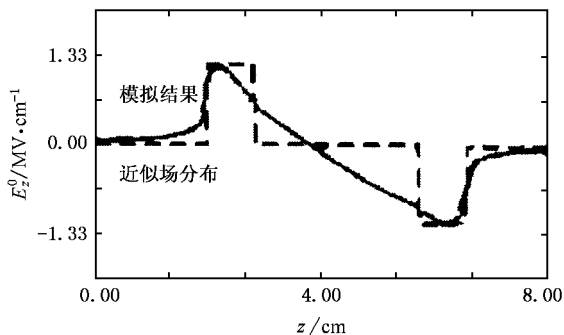


图2 两腔振荡器作用区场分布

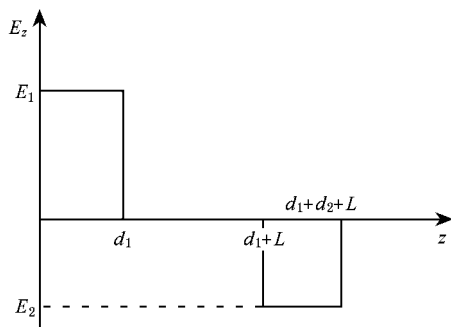


图3 两腔振荡器作用区近似场分布

在作用区 $0 < z < d_1$ 的实际场强 $E_1^0 = 7 \text{ MV/cm}$ 时,微波腔中的储能 $W = 1.2 \text{ J}$; 同时在作用区 $L + d_1 < z < L + d_1 + d_2$ 的实际场强 $E_2^0 = 7 \text{ MV/cm}$ (如图2)。由此根据(3)式可得 $E_1 = E_2 = 769$ 。

2.2. 电子运动方程

只考虑工作模式,微波腔中电子的一维运动方程为^[10]

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{e}{m_0 c^2} \alpha_0 E_z(z) \sin(\varphi + \beta) + \frac{e}{m_0 c^2} E_z^{\text{sc}} \quad (4a)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (4b)$$

式中 α_0 为微波场幅度, $\alpha_0 E_z(z)$ 为实际微波场, E_z^{sc} 为空间电荷场的轴向分量, m_0 为电子静止质量, c 为真空光速, γ 为电子相对论速度因子, λ 为微波波长, $\varphi = \omega t$ 。

方程(4)的初始条件($z = 0$)为

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2},$$

$$\varphi = \varphi_0,$$

这里 v_0 为电子进入微波腔时的速度, $\varphi_0 = \omega t_0$ 为电子注入相位。

微波腔中第 n 个电子束段中电子在 t 时刻的运动状态为 (γ_n, φ_n) , 忽略空间电荷场的作用时, 方程的一级近似解为

$$\varphi \approx \varphi_0 + k' V_1 L \sin(\varphi_0 + \beta) + \varphi_s, \quad (5)$$

$$\gamma \approx \gamma_0 + V_1 \sin(\varphi_0) - V_2 \sin(\varphi_0 + k' V_1 L \sin(\varphi_0) + \varphi_s), \quad (6)$$

这里 β 为电子进入微波腔时的微波相位,

$$V_1 = \frac{e \alpha_0 E_1 d_1}{m_0 c^2},$$

$$V_2 = \frac{e \alpha_0 E_2 d_2}{m_0 c^2},$$

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)}},$$

$$\varphi_s \approx \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\gamma_0}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)}}.$$

在相对论微波器件中, 电子进入微波腔时的速度接近光速, 忽略初始速度分散度的影响^[11], 将初始电子束近似为单能束, 同时利用数学关系

$$e^{ix \sin \varphi} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(x) e^{im\varphi}$$

其中 $J_m(x)$ 为 m 阶 Bessel 函数^[12]。

当微波场幅度为 α_0 时, 电子束中电子相对论因子的平均变化为

$$\begin{aligned} \overline{\Delta\gamma} &= \gamma_0 - \bar{\gamma}, \\ &= -V_2 J_1(k' V_1 L) \cos(\varphi_s). \end{aligned} \quad (7)$$

根据能量守恒定律, 可得束波转换效率为

$$\eta = \frac{\overline{\Delta\gamma}}{\gamma_0 - 1}. \quad (8)$$

束波互作用饱和时, $V_1 + V_2 \approx \gamma_0 - 1$, 同时在微

波腔的设计中可以使得 $\cos(\varphi_s) = 1$, 则由(7)(8)式可得

$$\eta = \frac{V_2 J_1(\alpha)}{V_1 + V_2} = \frac{E_2 d_2 J_1(\alpha)}{E_1 d_1 + E_2 d_2}, \quad (9)$$

式中 $\alpha \approx k' V_1 L$ 为与微波腔场强有关的微波腔作用因子, d_1 和 d_2 分别为两腔有效作用长度(见图3).

由(9)式可以看出, 当 $\alpha \approx 1.5$ 时, 束波转换效率 η 达到一个理想值, 则相互作用饱和状态下的理想束波转换效率为

$$\eta = 0.588 \frac{E_2 d_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2}. \quad (10)$$

由(10)式可以看出, 束波转换效率在 29.4%—58.8% 之间. 当 $E_2 d_2 \gg E_1 d_1$ 时, 束波转换效率达到最大, 其值为 0.588; 而当 $E_2 d_2 = E_1 d_1$ 时, 束波转换效率为最小, 其值为 0.294. 图4为 $E_2 d_2 \gg E_1 d_1$ 时, 束波转换效率随微波腔中微波腔作用因子的变化曲线, 当 $\alpha = 1.5$ 时, 束波转换效率为理想状态值.

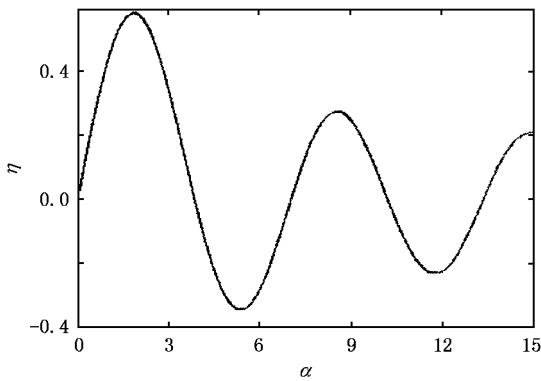


图4 束波转换效率 η 随微波腔作用因子 α 的变化曲线

3. 电子束与微波场相互作用的自洽方程

虽然这种振荡器的理论效率可以达到 58.8%, 而作为高功率微波器件要考虑微波输出功率. 在微波腔中微波场分布决定电子束与腔之间的相互作用. 当微波频率 ω 接近工作模式频率 ω_0 时, 电子束对微波场的作用可以表示为^[13,14]

$$\frac{\omega_0 \alpha'_0}{Q} + (\omega_0^2 - \omega^2 - 2\omega\beta'_0) \alpha_0 = \frac{\omega}{\epsilon_0} JJ_1 \cos(\beta_0 - \beta_1), \quad (11a)$$

$$2\omega\alpha'_0 + \frac{\omega_0 \alpha_0 \beta'_0}{Q} + \frac{\omega_0 \omega}{Q} \alpha_0 = \frac{\omega}{\epsilon_0} JJ_1 \sin(\beta_0 - \beta_1), \quad (11b)$$

式中, Q 为品质因子, α_0 和 β_0 为微波场幅度和相位, 而 JJ_1 和 β_1 表示电子束对微波场的影响,

$$JJ_1 e^{i\beta_1} = \int_L I_1(z) E_z(z) dz,$$

其中

$$I_1(z) = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i\varphi(z)} d\varphi_0.$$

这里, $\varphi(z) = \omega t$ 为电子在 t 时刻的相位, I_0 为电子束进入微波腔时的流强.

只考虑饱和状态时, 则(11)式可以表示为

$$\alpha_0 = \frac{\omega_0 Q}{\epsilon_0} JJ_1 \sin(\beta_0 - \beta_1), \quad (12a)$$

$$\alpha_0 = \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) \epsilon_0} JJ_1 \cos(\beta_0 - \beta_1). \quad (12b)$$

根据电子运动状态可以确定微波场幅度, 当 $\omega = \omega_0$ 时, 由(12)式可得

$$\alpha_0 = \frac{\omega_0 Q}{\epsilon_0} JJ_1. \quad (13)$$

由此可以得出微波腔储能 W ,

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \alpha_0^2. \quad (14)$$

根据微波腔负载品质因子 Q_{ex} 可以得到微波腔的输出功率 P_{out} ,

$$P_{out} = \frac{\omega \epsilon_0 \alpha_0^2}{2Q_{ex}}. \quad (15)$$

4. 束腔相互作用

根据(5)式(11)式中 JJ_1 和 β_1 可以表示为

$$JJ_1 e^{i\beta_1} = iE_2 d_2 I_0 J_1(k' V_1 L) e^{i\varphi_s}. \quad (16)$$

根据(13)式可得

$$\alpha_0 = \frac{QE_2 d_2 I_0}{\omega \epsilon_0} J_0(\alpha). \quad (17)$$

由(17)式可得

$$\alpha = kJ_1(\alpha). \quad (18)$$

这里,

$$k = \frac{I_0 Q E_1 d_1 E_2 d_2 L}{I_A \sqrt{(\gamma_0^2 - 1)^3}},$$

$$I_A = \frac{4\pi m_0 c^3 \epsilon_0}{e}$$

为 Alfvén 电流.

根据 k 可以确定微波腔作用因子 α ,再由(9)式可以确定束波相互作用效率,由(15)式确定微波输出功率. k 与电子束流强有关,在这里定义 k 为束腔相互作用因子,根据要求的 α 值也可以确定电子束流强.

图 5 为微波腔作用因子 α 随束腔相互作用因子 k 的变化曲线.由图 5 可以看出,当 $k > 2$ 时,腔中微波起振,当 k 大于一定值时, α 趋于一个稳定值,且变化很小.

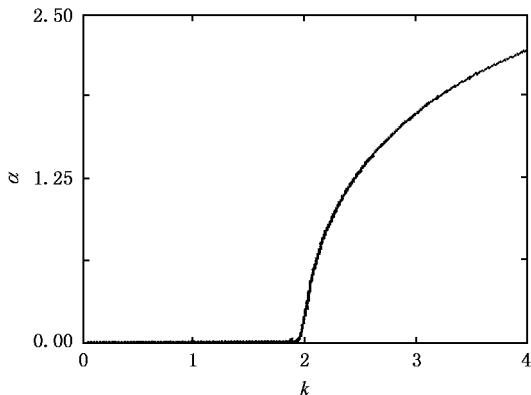


图 5 微波腔作用因子 α 随作用因子 k 的变化曲线

由(9)式可得微波腔幅度 α_0 与其作用因子 α 的关系为

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{m_0 c^2}{e E_1 d_1} \frac{\lambda}{L} \sqrt{(\gamma_0^2 - 1)^3}. \quad (19)$$

根据(15)式可得微波输出功率为

$$P = \frac{\eta_0}{8\pi^3} I_A^2 \frac{\alpha^2}{Q} \frac{\lambda}{(E_1 d_1 L)^2} (\gamma_0^2 - 1)^3. \quad (20)$$

由(9)式可得,当 $\alpha = 1.5$ 时,束波相互作用效率最大(29.4%),由(18)式或图 4 可得 $k = 2.7$. 当电子束束压为 800 kV 时, $\gamma = 2.6$. 根据腔的模拟结果(图 2), $E_1 d_1 = E_2 d_2 \approx \lambda^{-1/2}$, $L \approx 1.2\lambda$, $Q \approx 50$,则由(20)式可得微波输出功率为 2.4 GW;同时由(18)式可得电子束流强为 10 kA,相应的电子束功率为 8.0 GW,则效率约为 30%. 此结果与(9)式给出的束波相互作用效率相符.

5.2.5 维 PIC 程序模拟

采用图 1 所示结构的振荡器,由环形电子束(800 kV,10 kA)驱动,引导磁场为 4.5 T 时,得到图 6—图 9 所示 2.5 维 Particle in Cell (PIC) 程序的模拟结果.输出模式为 TM_{01} .图 6 为输出处微波电场随时间的变化

图.图 7 为输出处电场的频谱,微波频率为 9.42 GHz.图 8 为输出处微波功率随时间的变化图,微波功率为 2.25 GW.图 9 为束波相互作用效率随时间的变化曲线,可以看出其最高效率约为 28%. 通过对计算和模拟结果的比较可知,微波腔的设计频率与模拟频

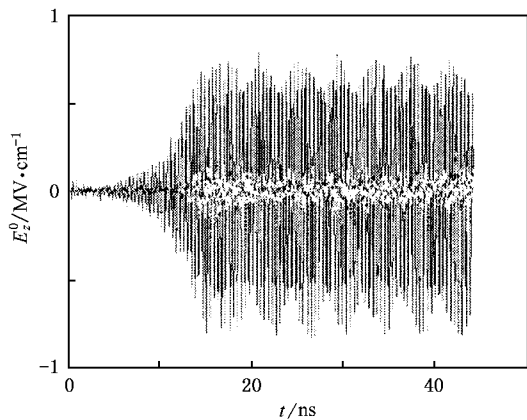


图 6 输出处微波电场随时间的变化

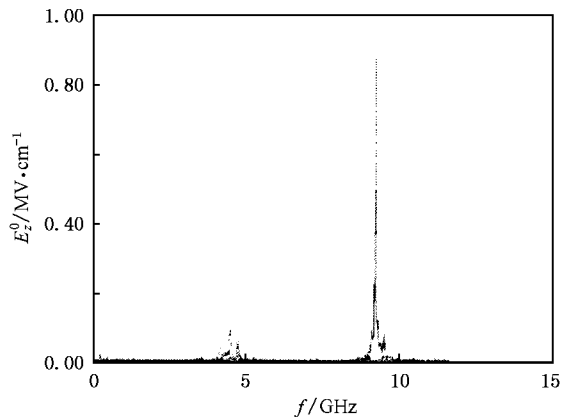


图 7 输出处电场的频谱

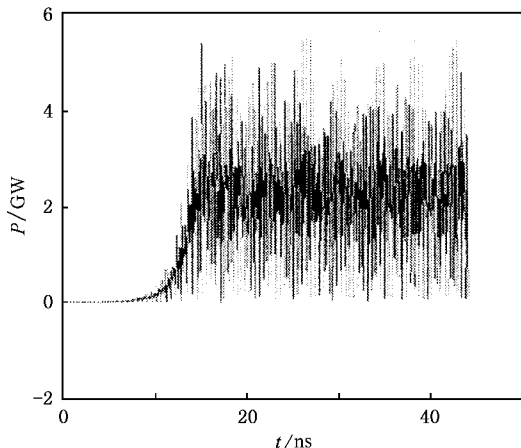


图 8 输出处微波功率随时间的变化

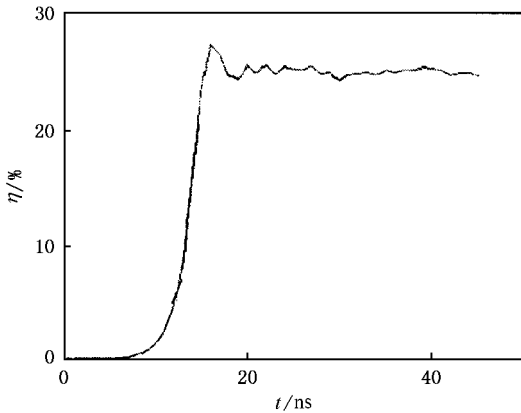


图9 束波相互作用效率 η 随时间 t 的变化曲线

率一致,同时微波输出功率和效率低于理论值,主要原因是在理论设计中忽略了空间电荷效应的影响。

6. 结 论

通过分析可以看出,两腔振荡器的理论设计值与数字模拟结果相符,与其他高功率微波器件相比,不仅结构简单、而且在效率和功率方面也具有一定的优势。

在一限定电子束参数和脉冲宽度下,通过改变微波腔结构可以更进一步提高微波效率。然而随着效率的提高,向最大理论效率(58.8%)逼近的同时,在2.5维PIC程序模拟中会出现起振时间也随之提高,由于受到电子束脉冲宽度的限制,实际应用中所产生的有效微波能量也将相应减少。因此,如要达到更高效率或接近58.8%的最大理论效率,还需要克服微波起振时间和束流脉冲宽度问题。

- [1] Li Z H , Hu K S , Zhang H 2002 *High Power Laser and Particle Beam* **14** 99 (in Chinese) [李正红、胡克松、张 红 2002 强激光与粒子束 **14** 99]
- [2] Vlasov A N , Shkvarunets A G , Rodgers J C *et al* 2000 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **28** 550
- [3] Freund H P 2000 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **28** 748
- [4] Huang H , Fan Z K , Tan J *et al* 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 1129 (in Chinese) [黄 华、范植开、谭 杰等 2004 物理学报 **53** 1129]
- [5] Chen X , Lindsay P A , Zhang J 2000 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **28** 462
- [6] Hui Z X , Yang Z H 1990 *Free Electron Laser* (Beijing : Science Press) p296 (in Chinese) [惠钟锡、杨振华 1990 自由电子激光 (北京 科学出版社) 第 296 页]
- [7] Barroso J J 2000 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **28** 652
- [8] Brant H E 1996 *IEEE Trans . Plasma Sci .* **24** 924
- [9] Zhu M , Wu H S 1987 *Acta Electron . Sin .* **48** (in Chinese) [朱敏、吴鸿适 1987 电子学报 **48**]
- [10] Wang S H , Luo Z H , Luo Y X 1980 *Principle of Linac for Proton* (Beijing : Atomic Energy Press) p143 (in Chinese) [王书鸿、罗紫华、罗应雄 1980 质子直线加速器原理 (北京 原子能出版社) 第 143 页]
- [11] Wu H S 1986 *Principle of Microwave Electronics* (Beijing : Science Press) p250 (in Chinese) [吴鸿适 1986 微波电子学原理 (北京 科学出版社) 第 250 页]
- [12] Liang K M 1978 *Mathematics and Physics Method* (Beijing : People ' s Education Press) p364 (in Chinese) [梁昆森 1978 数学物理方法 (北京 : 人民教育出版社) 第 364 页]
- [13] Li Z H , Meng F B , Hu K S 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 3627 (in Chinese) [李正红、孟凡宝、胡克松 2004 物理学报 **53** 3627]
- [14] Li Z H , Huang H , Meng F B 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1564 (in Chinese) [李正红、黄 华、孟凡宝 2005 物理学报 **54** 1564]

Investigation of bitron as a high power microwave oscillator

Li Zheng-Hong Meng Fan-Bao Chang An-Bi Huang Hua Ma Qiao-Sheng
(*Institute of Applied Electronics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 ,China*)
(Received 31 August 2004 ; revised manuscript received 11 March 2005)

Abstract

Bitron , as a new type of high-power microwave device , is studied in this paper. The parameters (such as microwave power and its efficiency) based on the theoretical analysis has been realized on 2.5D Particle in Cell (PIC) simulation code. This device is composed of two parts : a modulation cavity and an output cavity. Coupling exists between these two cavities , so the oscillation occurs under certain conditions. X band bitron is designed in this paper , and its theoretical efficiency is 29.4% . The process is also realized by 2.5 PIC simulation code , with an efficiency 28% , microwave frequency 9.42 GHz , and the power output 2.25 GW.

Keywords : high power microwave , RF cavity , mode , self-consistent equation

PACC : 4100 , 0200