

文章编号:1001-9014(2005)04-0317-04

28GHz 二次谐波回旋振荡管的自洽非线性计算

曹晓琴^{1,2}, 刘濮鲲¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:中等功率的连续波回旋管在工业领域有着重要的应用前景. 本文对工作在 28GHz 频率的工业应用回旋振荡管进行了自洽非线性计算. 结果表明, 在二次谐波工作条件下, 选取 TE₀₂ 模式, 当电压为 32kV、电流为 6A 时, 可以获得连续波输出功率 ~50kW, 效率 ~28%.

关键词:回旋管; 二次谐波; 自洽非线性计算

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A

SELF-CONSISTENT NONLINEAR COMPUTATION OF A 28GHZ GYROTRON AT THE SECOND HARMONIC

CAO Xiao-Qin^{1,2}, LIU Pu-Kun¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Gyrotron oscillators with CW moderate power have an important foreground in the industrial field. In this study, a self-consistent nonlinear computation was carried out for a 28GHz CW technology gyrotron. The result shows that a 28GHz technology gyrotron operating at the TE₀₂ mode and second harmonic can obtain an output power of 50kW and efficiency of 28% for beam current 6A and beam voltage 32kV.

Key words: gyrotron; second harmonic; self-consistent nonlinear computation

引言

回旋管是一种新型毫米波器件,它在短波长、高平均功率方面具有其它器件不能比拟的优越性,因而在受控热核聚变的等离子体加热、毫米波雷达、材料处理和等离子体化学等领域有着广泛的应用^[1]. 以材料的高温处理为例,由于毫米波的波长短,集均匀性、渗透性和方向性为一体,与 2.45GHz 的微波相比,其与物质相互作用的温度均匀性更好、升温速率更快、致密性更好、烧结温度更低、材料品质更高,因而在纳米材料的制备、低损耗特殊介质材料和功能性陶瓷的烧结、特殊材料的改进以及陶瓷-陶瓷和陶瓷-金属焊接等方面都具有独特的作用. 然而,回旋管的工业应用的主要障碍是如何像微波炉中所用的磁控管一样,实现简单、高效、廉价、易用和长寿命.

自从俄罗斯科学院应用物理研究所研制出第一

支专门为商业应用设计的 10kW、30GHz 回旋振荡管^[2]以后,美国瓦里安公司(物理国际公司)^[3]和日本三菱电机公司^[4]也先后研制出 10kW、28GHz 工业应用回旋管. 总的来看,近年来国外的一些回旋管实验在 30GHz 频率附近的低功率(<10kW)已取得了令人鼓舞的结果^[5-8].

由于中等功率(25kW~50kW)回旋管在先进陶瓷烧结和材料处理等领域有着重要的应用前景,所以本文将所讨论的工业应用回旋管的设计目标定为输出功率:40~60kW(连续波)

电子注电压:30~40kV

电子注电流:6A

工作频率:28GHz

拟采用二次谐波,这样在相同的工作频率下,所需的磁场强度可降至基波工作情况下的一半. 工作电压应足够低,以避免超量 X 射线屏蔽的要求,同时也

收稿日期:2004-08-09,修回日期:2005-01-27

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(60125104)

作者简介:曹晓琴(1975-),女,安徽泾县人,中国科学院电子学研究所博士研究生,主要从事毫米波回旋管振荡器的研究.

Received date: 2004-08-09, revised date: 2005-01-27

是为了降低电源的造价.如今,在世界范围内的大量回旋管系统的应用情况已经证明,这种回旋管在工业、技术和科学研究领域都具有广阔的应用前景,文献^[9-14]中已经对此作了详细的介绍.

本文首先研究了该种工业应用回旋管的工作模式选择问题,然后,通过自洽非线性理论对回旋管内的电子注-波相互作用进行计算,获得了优化的设计计算结果.

1 工作模式选择

我们首先讨论工作频率为 28GHz 的工业应用二次谐波回旋振荡管的工作模式的选择问题.这是一个非常重要的、在设计时必须首先考虑的问题.所设计的工作频率相应于自由空间波长 10.71mm.由于在一般情况下电子回旋脉塞不稳定性机理使得 TE 模比 TM 模有效得多,所以一般采用 TE 模式.对工作在 TE_{mn} 模的回旋管,自由空间波长与腔壁半径 R_0 的关系为

$$R_0 = \frac{x_{mn}\lambda}{2\pi}. \quad (1)$$

此处 x_{mn} 是 m 阶 Bessel 函数的导数的第 n 个零点.二次谐波工作的优化电子注半径为^[15]:

$$R_b = \frac{x_{m\pm 2j,i}\lambda}{2\pi}. \quad (i = 1, 2, 3, \dots < n) \quad (2)$$

选择标准的三段结构谐振腔,包括输入渐变段、中间均匀段和输出渐变段.输入渐变段是一截止段,目的是防止高频功率反向传输进入电子枪中.如果输入渐变段的长度为 50mm,倾角为 $1 \sim 3^\circ$,则导致在谐振腔的入口处半径要减小 1.5mm 左右.电子注的厚度约为 1.5mm,故 $R_0 - R_b$ 应当至少要有 3mm.根据候选模式及其所对应的 Bessel 零点、腔体半径与电子注半径,TE_{2,1}、TE_{0,1}、TE_{1,2} 等模式就可以被排除掉.

为评估模式的稳定性,将电子注半径分别对几个主要的候选模式优化后,计算回旋管的起振电流^[7].图 1 和图 2 分别给出了电子注半径对二次谐波 TE₀₂⁽²⁾ 和 TE₅₁⁽²⁾ (上标数字表示谐波数)模式优化的起振电流随磁场的变化曲线.从图中可以看出,TE₄₁⁽²⁾ 和 TE₁₂⁽²⁾ 模、TE₆₁⁽²⁾ 和 TE₀₁⁽¹⁾ 模靠得太近,可能产生难以解决的模式竞争问题.而 TE₂₂ 模的起振电流则太大.因此,TE₄₁、TE₆₁ 和 TE₂₂ 模均不合作工作模式.

在模式选择时,我们一般考虑采用较低的模式,其优点在于所有部件可以较小,从而在降低造价方面具有明显的作用.特别是较小的电子注半径允许

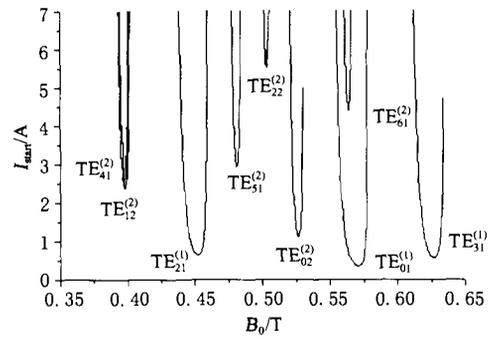


图 1 起振电流 I_{start} 随磁场 B_0 的变化曲线.此处电子注半径对二次谐波 TE₀₂ 模优化, $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$, $R_e = 5.21\text{mm}$

Fig. 1 Starting current I_{start} as a function of magnetic field B_0 for various modes with beam radius R_e optimized for the TE₀₂ mode, where $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$ and $R_e = 5.21\text{mm}$

使用内径孔较小的磁体,从而减小磁体的体积和重量.在剩下的模式当中,较低模式只有 TE₀₂ 和 TE₅₁ 模.从图 1 和图 2 可以看出,二次谐波 TE₀₂ 模面临的主要竞争模式是基波的 TE₀₁ 模,而二次谐波 TE₅₁ 模面临的主要竞争模式是基波的 TE₂₁ 模.比较而言,TE₀₂⁽²⁾ 模与 TE₀₁⁽¹⁾ 模的间隔比 TE₅₁⁽²⁾ 模与 TE₂₁⁽¹⁾ 模的间隔要稍大,而且 TE₀₂⁽²⁾ 模对应的电子注半径为最小.因此,我们选择 TE₀₂ 模作为工作模式.

2 谐波回旋振荡管的自洽非线性计算模型

在所谓的绝热近似下,描述任意次回旋谐波的

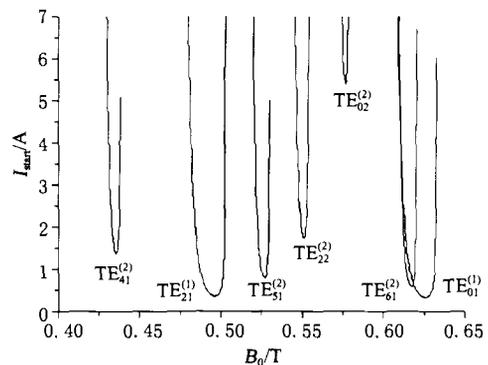


图 2 起振电流 I_{start} 随磁场 B_0 的变化曲线.此处电子注半径对二次谐波 TE₅₁ 模优化, $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$, $R_e = 7.16\text{mm}$.

Fig. 2 Starting current I_{start} as a function of magnetic field B_0 for various modes with beam radius R_e optimized for the TE₅₁ mode, where $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$ and $R_e = 7.16\text{mm}$

单模回旋管振荡器工作的自洽方程组为^[8]

$$u_z \cong \text{constant}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dP/dz + i \frac{\omega}{c\beta_{\phi 0}} \left(\frac{\gamma}{s\gamma_0} - \frac{\Omega_0}{\omega_{mn}\gamma_0} \right) P \\ = -i \left(\frac{V_{\max}}{1022kV} \right) \frac{\gamma}{u_{z0}} \frac{C_{mn} G_{mn} k_{mn}}{(s-1)!} \left(\frac{ick_{mn} P^*}{2\Omega_0} \right)^{s-1} f_{mn}(z), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} d^2 V_{\max} f_{mn}(z)/dz^2 + \left[\frac{\omega_{mn}^2}{c^2} - k_{mn}^2(z) \right] V_{\max} f_{mn}(z) \\ = -z_0 I_0 \frac{\omega_{mn}}{cu_{z0}} \frac{C_{mn} G_{mn} k_{mn}}{(s-1)!} \left(\frac{-ick_{mn}}{2\Omega_0} \right)^{s-1} \langle P^s \rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $P = iu_{\perp} \exp(-i\Lambda)$, u_{\perp} 是电子的归一化速度 \vec{u} 的横向分量, $\vec{u} = \vec{p}/m_0c = \gamma \vec{v}/c$, $\Lambda = (\omega/s)t - \Omega\tau - \varphi$, V_{\max} 是 TE_{mn} 的场幅, $\Omega = eB_0/m_0\gamma_0 = \Omega_0/\gamma_0$ 为电子回旋频率, $\langle \dots \rangle$ 代表初始回旋相位 Λ_0 的平均值.

在谐振腔的两端, 函数 $f_{mn}(z)$ 必须满足辐射边界条件, 即

$$df_{mn}/dz|_{z=0} = ik_z(z)f_{mn}(z), \quad (8)$$

$$df_{mn}/dz|_{z=L} = ik_z(z)f_{mn}(z). \quad (9)$$

式中 $k_z = \sqrt{\omega_{mn}^2/c^2 - k_{mn}^2}$. 输出功率由坡印廷矢量决定:

$$\begin{aligned} P_0 = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\int (\vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{s}) \right] = \frac{V_{\max}^2}{2\mu_0\omega} \\ \left[f_1(Z_{\text{out}}) \frac{df_R(Z_{\text{out}})}{dz} - f_R(Z_{\text{out}}) \frac{df_1(Z_{\text{out}})}{dz} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

式中, f_R 和 f_1 分别是场的纵向分布函数的实部和虚部. 根据能量守恒定律, 输出功率又可表示为

$$P_0 = \eta_e U_0 I_0. \quad (11)$$

此处 η_e 为电子注-波相互作用效率. 可利用以上公式来对自洽计算结果进行监控. 但如果把欧姆损耗考虑在内, 输出功率必须乘上一个系数, 即

$$P_{\text{out}} = \frac{Q_t}{Q_{\text{diff}}} P_0. \quad (12)$$

此处, $Q_t = Q_{\text{diff}} Q_{\text{ohm}} / (Q_{\text{diff}} + Q_{\text{ohm}})$ 为总的品质因数, 而

$$Q_{\text{diff}} = \frac{\omega\epsilon_0 V_{\max}^2}{2P_0} \int_{Z_{\text{in}}}^{Z_{\text{out}}} |f_{mn}(Z)|^2 dz, \quad (13)$$

$$Q_{\text{ohm}} = R_0 \delta^{-1} \left(1 - \frac{m^2}{X_{mn}^2} \right). \quad (14)$$

分别为绕射和欧姆品质因数. 式中 $\delta = \sqrt{2/\omega_0\mu\sigma}$ 为趋肤深度, σ 为传导率.

3 电子注-波相互作用计算与谐振腔设计

利用上面所建立的模型, 我们可以对谐波回旋管振荡器进行自洽非线性计算, 并在此基础上进行腔体的优化设计. 表 1 给出了谐振频率和品质因数随腔体中间段长度的变化关系. 我们选取 $L_1 = L_3 = 50\text{mm}$, $\theta_1 = 1.5^\circ$, $\theta_2 = 0.0^\circ$, $\theta_3 = 3.5^\circ$, $D_1 = D_2 = 16\text{mm}$. 对 TE₀₂ 模, 腔体半径为 11.96mm.

图 3 给出了不同磁场下, 系统效率随电子注电流变化的曲线. 从图中可以看出, 在电子注电流为 5A~6A 时, $B = 0.5216\text{T}$ 有最好的系统效率, 所以磁场取 0.5216T 较为理想. 图 4 则给出了不同的电子注电压下, 效率随电子注电流的变化关系. 在电子注电流为 5A~6A 时, 电子注电压为 32kV 有最好的系统效率. 而且较低的电压可以减少成本和避免超量 X 射线辐射, 所以最佳电子注电压为 32kV.

由此, 我们确定了最优化的电子注电压和磁场. 取 $L_2 = 80$, $\alpha = 1.50$, 图 5 给出了输出功率和效率与电子注电流的关系. 输出功率随着电子注电流几乎是线性变化, 效率虽然也是随着电子注电流的增大

表 1 频率和品质因数随共振器长度 L_2 的变化关系
Table 1 Frequency and quality factor as a function of resonator length L_2

L_2 (mm)	F (GHz)	Q_{diff}
55	28.071	560.1
60	28.061	676.2
65	28.052	819.9
70	28.045	985.8
75	28.039	1 169.9
80	28.034	1 209.4

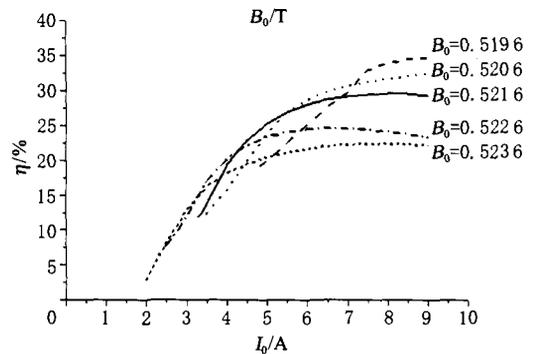


图 3 不同磁场下效率随电子注电流的变化曲线. 此处, $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$, $L_2 = 80\text{mm}$.

Fig. 3 Efficiency versus beam current for various values of magnetic field with $U_0 = 32\text{kV}$, $\alpha = 1.5$ and $L_2 = 80\text{mm}$

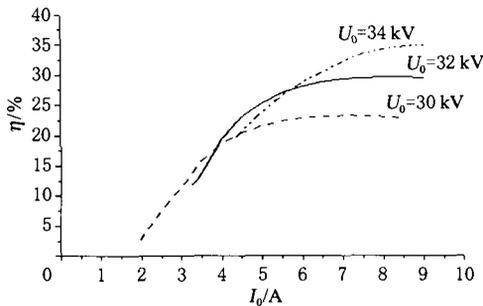


图4 对应不同的电子注电压,效率随电子注电流的变化关系. 此处 $B_0 = 0.5216\text{T}$, $\alpha = 1.5$, $L_2 = 80\text{mm}$

Fig. 4 Efficiency versus beam current for different beam voltages with $B_0 = 0.5216\text{T}$, $\alpha = 1.5$ and $L_2 = 80\text{mm}$.

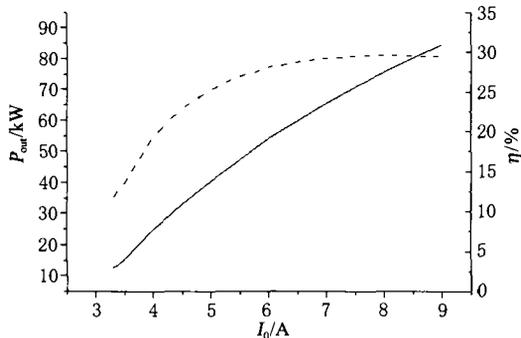


图5 输出功率、效率与电子注电流的关系. 此处 $U_0 = 32\text{kV}$, $B_0 = 0.5216\text{T}$, $\alpha = 1.5$, $L_2 = 80\text{mm}$; 实线对应输出功率, 虚线对应效率

Fig. 5 Output power (solid line) and efficiency (dashed line) as a function of beam current with $U_0 = 32\text{kV}$ and $B_0 = 0.5216\text{T}$, for $L_2 = 80\text{mm}$ and $\alpha = 1.5$.

而增加,但当电子注电流到了6A以后,效率变化的就很慢了.当电子注电流为5A~6A时,能获得40.37~53.81kW的输出功率和25.23%~28.02%的工作效率.

4 结语

本文对工作在28GHz频率的二次谐波工业应用回旋振荡管进行了研究.从各可能的候选模式对应的腔体半径、电子注半径、起振电流随磁场的变化曲线等方面的研究表明,较低的 TE_{02} 模式对应的电子注半径最小,而且面临的模式竞争问题也最小,因此是最佳的工作模式;利用自洽非线性理论,对工作在 TE_{02} 模的28GHz二次谐波回旋振荡管中的电子注-波相互作用进行了数值模拟与分析,对高频腔体结构进行了优化设计.结果表明,在工作磁场为0.5216T,电子注电压为32kV,电子注电流为6A时,

可以获得连续波输出功率~50kW,效率~28%.

REFERENCES

- [1] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2003, Scientific Report FZKA 6957[R]. Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 2004
- [2] Felch K, Danly B G, Jory H R, et al. Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices[J]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(5): 752—781.
- [3] Paton B, Sklyarevich V E, Shevelev M V. Gyrotron radiation provides tool for new capabilities in coating products of various materials[J]. *Industrial Heating*, **61**(1): 53—55.
- [4] Kikunaga T, Asano H, Yasojima Y, et al. A 28 GHz gyrotron with permanent magnet system [J]. *Int. J. Electronics*, 1995, **79**: 655—663.
- [5] Link G, Feher L, Thumm M, et al. Sintering of advanced ceramics using a 30-GHz, 10-kW, CW industrial gyrotron [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999, **27**: 547—556.
- [6] Hirota M, Brito M E, Hirao K, et al. *Microwave Sintering of Silicon Nitride With rare Earth Sesquioxide Additions*, *Ceramic Transactions* [M]. In: Clark DE, Suttin WH, Lewis DA, eds, *Microwave: Theory and Application in Materials Processing IV*, San Diego, USA: Acs Publishing, 1997, **80**: 515—522.
- [7] Borie E, Jodicke B. Comments on the linear theory of the gyrotron [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1988, **16**: 116—121.
- [8] Liu P-K, Borie E, Kartikeyan M-V. Design of a 24GHz, 25-50kW technology gyrotron operating at the second harmonic [J]. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2000, **21**(12): 1916—1942.
- [9] Bykov Yu V, Goldenberg A L, Flyagin V A. *The Possibilities of Material Processing by Millimeter Wave Radiation* [M]. In: W. B. Snyder Jr., W. H. Sutton and D. L. Johnson, eds. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Pittsburgh, USA: Materials Research Society, 1991, **189**: 41—42.
- [10] Bykov Yu V, Sorokin A A. *Millimeter Wave Applicators for Technological Gyrotron Setups* [M]. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas*. Russia: Nizhny Novgorod, 1993, S46
- [11] Bykov Yu V, Semenov V E. *Processing of material using microwave radiation* [M]. In: A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein, eds. *Applications of High Power Microwaves*. Boston: Artech House, 1994, 319—352.
- [12] Sklyarevich V, Detkov A, Shevelev M, et al. *Interaction Between Gyrotron Radiation and Powder Materials* [M]. In: R. I. Beatty, W. H. Sutton and M. F. Iskander, eds. *Materials Research Society Symposium Proceedings*. Pittsburgh, USA: Materials Research Society, 1992, **269**: 163—169.
- [13] Bykov Yu, Ereemeev A, Glyavin M, et al. 24—84GHz gyrotron system for technological microwave application [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(1): 67—71
- [14] Shoji Miyake. Millimeter-wave materials processing in Japan by high-power gyrotron [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2003, **31**(5): 1010—1015.
- [15] LIU Pu-Kun, Borie E, Thumm M. Mode selection of a moderate power gyrotron operating at the ISM frequency [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘濮鲲, Borie E, Thumm M. ISM 频率中等功率回旋管的选模问题. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(4): 289—292.