

文章编号: 2095-4980(2015)03-0365-04

W波段二次谐波回旋行波管放大器

李志良, 冯进军, 刘本田, 王峨峰, 曾旭, 张杨

(中国电子科技集团公司 第12研究所 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 北京 100015)

摘要: 采用谐波工作的回旋管相互作用磁场比基波磁场降低了 $1/s$, 可降低整管磁场设计难度, 具有较大的应用前景。通过对 W 波段二次谐波回旋行波管高频介质加载结构、模式竞争和注波相互作用研究, 确定了该放大器的工作参数。非线性模拟表明, 当应用 100 kV, 20 A, $\alpha=1.2$ 的电子注时, 该回旋管可在 91 GHz 频率处产生 465 kW 的输出功率和 49 dB 的增益结果。并且, 基于耦合波理论, 讨论了一个轴对称半径微扰的 $TE_{02} \sim TE_{01}$ 输出模式变换器, 效率在 95% 以上时, 其带宽达到 4 GHz。

关键词: 回旋行波管放大器; W 波段; 二次谐波; 模式变换器

中图分类号: TN129

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0365

W-band second-harmonic gyrotron TWT amplifier

LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian, WANG Efeng, ZENG Xu, ZHANG Yang

(Vacuum Electronics National Laboratory, The 12th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: Harmonic operation is of special significance due to its low magnetic field operation, and the magnetic field of the s th harmonics gyrotron at a given frequency is reduced by a factor of s for operation. By using an interaction circuit with dielectric loaded, the operating parameters of the W band TE_{02} mode second harmonic gyrotron Traveling-Wave Tube (gyro-TWT) amplifier are determined by analysis of dielectric loaded, mode competition and interaction between electron beam and wave. Nonlinear analysis shows that the amplifier can generate a saturated peak power of 465 kW with a gain of 49 dB at 91 GHz when utilizing a 100 kV, 20 A, $\alpha=1.2$ electron beam. Based on coupled mode theory, a $TE_{02} \sim TE_{01}$ mode converter within a tapered waveguide radius is discussed and a bandwidth about 4 GHz is obtained when the conversion efficiency exceeds 95%.

Key words: gyrotron Traveling-Wave Tube; W-band; second harmonic; mode converter

回旋行波管放大器是一种高效率、高脉冲及平均功率, 并有较宽带宽的微波和毫米波源。在通信、毫米波雷达、电子对抗和空间碎片探测等领域有广泛的应用前景^[1-2]。而回旋管工作在谐波条件, 可大大降低工作磁场, 譬如, 工作在给定频率的 s 次谐波回旋管所需磁场比在基波时减小 $1/s$, 从而大大降低了所需磁场的大小和制管费用^[3], 成为研究的热点。文献[2]中给出了 W 波段 TE_{02} 模二次谐波回旋行波管研究结果, 在注电压和注电流分别为 100 kV 和 25 A 条件下, 于 91.4 GHz 频率处获得 600 kW 峰值功率, 24% 效率。而文献[4]中介绍了 95 GHz 三次谐波回旋振荡管, 获得 50 kW 输出功率, 30% 效率, 该管被用于主动防御系统。本文选择 TE_{02} 作为工作模式, 对 W 波段二次谐波回旋行波管的注波相互作用及输出模式变换器进行了模拟和设计。

1 理论分析

回旋行波管是利用工作于圆波导中的 TE_{mn} 模式与电子回旋模式之间的相互作用产生注波耦合, 其色散关系可以分别由下面两式表示:

$$\omega = k_z v_z + s\Omega \quad (1)$$

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-11-26

基金项目: 科技部项目——国家磁约束核聚变能发展研究专项(2013GB110003)

$$\omega^2 - k_z^2 c^2 - \omega_{\text{cut}}^2 = 0 \quad (2)$$

式中: ω 和 ω_{cut} 分别为波的角频率和波导截止角频率; k_z 为轴向波数; $\Omega = eB / (\gamma m_0)$ 为相对论电子回旋频率。图 1 给出了 W 波段二次谐波 TE_{02} 模回旋波管的色散曲线, 由图可以得出在注电压和速度比分别为 100 kV 和 1.2, 相互作用半径取 3.78 mm 时, 耦合最强点处的工作磁场 $B_0 = 0.99B_g$, 其中 B_g 为满足电子回旋波色散曲线与波导模色散曲线相切所需的磁场。

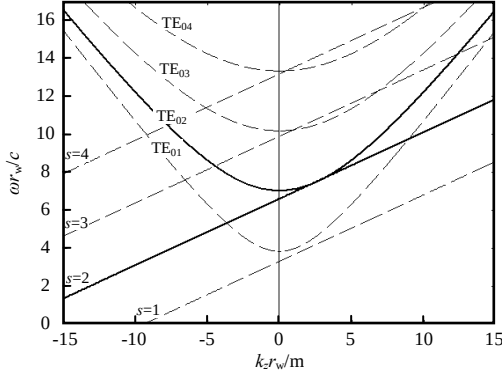


Fig.1 Dispersion curves of gyrotron TWT amplifier
图 1 回旋波管色散曲线

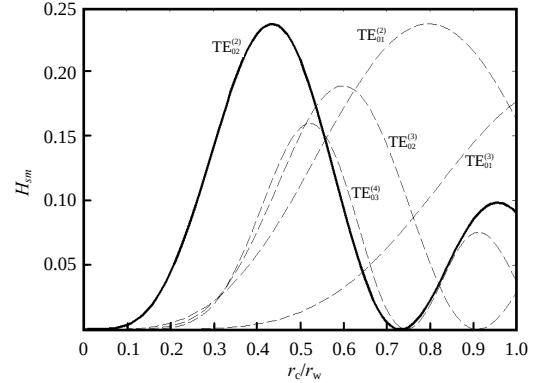


Fig.2 Coupled strength of some modes vs. guiding center radius
图 2 耦合系数与引导中心关系图

根据文献[5]可知 TE_{mn} 模式与电子注 s 次谐波作用强度的耦合系数为:

$$H_{sm} = J_s^2(v_{mn}r_L/r_w)J_{s-m}^2(v_{mn}r_c/r_w) \quad (3)$$

式中: J_s 为 Bessel 函数; v_{mn} 为第一类 m 阶 Bessel 函数的第 n 个导数根; r_c, r_L 和 r_w 分别是电子注引导中心半径、拉莫尔半径和波导相互作用半径。

根据式(3), 可得耦合系数与电子注引导中心半径的关系。由图 2 可见, 当电子注引导中心半径为波导半径的 0.44 倍时, 注波耦合系数达到最大, 即注波相互作用效率最高, 不过, 为了减小竞争模式 $\text{TE}_{01}^{(2)}, \text{TE}_{02}^{(3)}$ 和 $\text{TE}_{03}^{(4)}$ 的相互作用长度, 设计时选取 $0.41r_w$, 但此时工作模 $\text{TE}_{02}^{(2)}$ 耦合系数仍位于最大值附近。

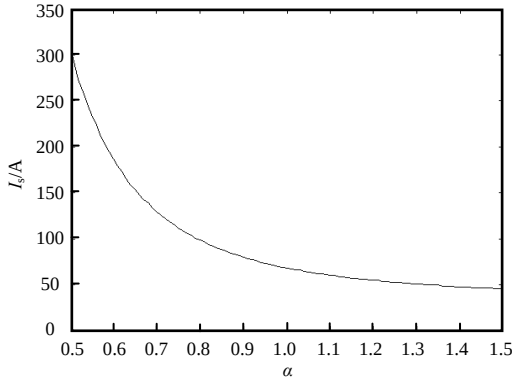


Fig.3 Starting current vs. velocity ratio
图 3 起振电流随电子速度比 α 的变化图

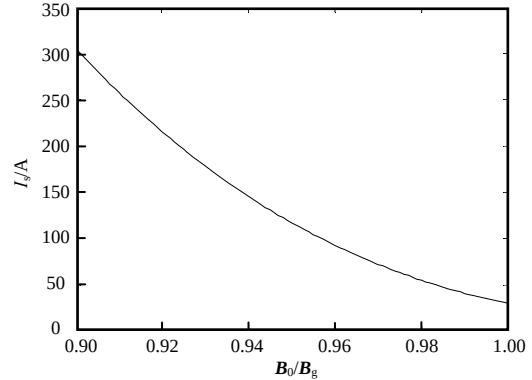


Fig.4 Threshold current vs. magnetic field
图 4 起振电流随工作磁场 B 的变化图

根据绝对不稳定性理论, 影响回旋管

稳定工作的主要是振荡, 工作参数的不合理会使工作点进入绝对不稳定区而产生振荡。而选择合适的工作电流, 可较大幅度地消除振荡的影响, 对于 TE_{mn} 模式, 传导不稳定性转化为绝对不稳定性的临界起振电流 I_s 表达式可参考文献[6]。

$$I_s = \frac{\gamma_0 \beta_z (v_{mn}^2 - m^2) J_m^2(v_{mn}) I_A \epsilon_c}{4 \beta_z^2 [J_{s-m}(v_{mn}r_c/r_w) J_s'(v_{mn}r_L/r_w)]^2} \quad (4)$$

式中: $I_A = mc^3/e = 17 \text{ kA}$, $\epsilon_c = 27 \beta_z^2 k_s^4$, $k_s = \frac{1}{2}(1 + 8 \beta_z^2)^{-1} \left\{ -4 \beta_z s \Omega / \omega_c + [16 \beta_z^2 s^2 \Omega^2 / \omega_c^2 + 2(1 + 8 \beta_z^2)(1 - s^2 \Omega^2 / \omega_c^2)]^{1/2} \right\}$ 。

根据式(4), 图 3 和图 4 分别给出了起振电流与电子速度比 α 和工作磁场 B 之间的关系, 综合其他参数考虑, 选择注电流 20 A。因此, 根据上面的讨论, 可确定出该放大器的基本工作参数, 如表 1 所示。

表 1 W 波段二次谐波 TE_{02} 回旋波管设计参数

beam voltage V_0	beam current I_0	guiding center radius r_0	velocity ratio α	operating mode	circuit radius r_w	magnetic field B_0
100 kV	20 A	$0.41 r_w$	1.2	TE_{02}	3.78 mm	1.76 T

2 数值计算结果

在回旋行波管的设计中,非线性自洽相互作用计算为一种主要方法,可快速给出输出特性。本文利用自编自洽非线性理论计算注波相互作用,图5给出了W波段二次谐波TE₀₂回旋行波管场幅值、相位和输出功率随轴向的变化关系,在末端达到饱和输出。图6给出了饱和输出功率和增益与频率关系,由图可见,利用非线性理论计算获得了465 kW峰值输出功率,23%的效率,49 dB的增益和6%的带宽结果。

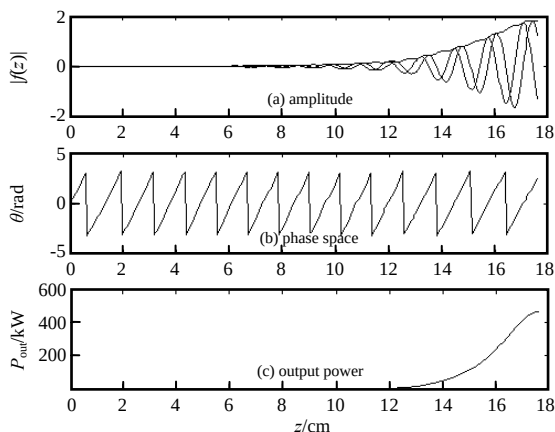


Fig.5 Characteristics of the W-band second-harmonic TE₀₂ gyro-TWT
图5 W波段二次谐波TE₀₂回旋行波管输出特性图

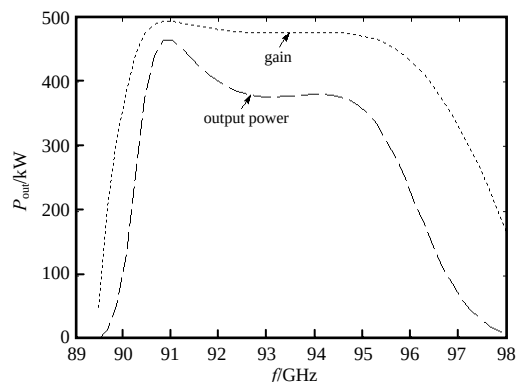


Fig.6 Predicted saturated output power and gain of the W-band second-harmonic TE₀₂ gyro-TWT amplifier vs. frequency
图6 W波段二次谐波TE₀₂回旋行波管饱和输出功率和增益与频率关系图

3 模式耦合器计算

由于TE₀₁模具有低损耗传输,适合远距离能量传输,经常需把回旋管的输出模式TE_{0n}转化为非极化对称TE₀₁模。下面通过采用一种圆波导半径微扰、轴对称变换结构的方式来实现把上述放大器的输出TE₀₂模式转化为TE₀₁模式,并基于耦合波理论的耦合波方程研究半径渐变波导^[7-8]。

$$\frac{dA_i}{dz} = -\gamma_i A_i + \sum_{k \neq i}^n C_{ik} A_k \quad (5)$$

式中: A_i 表示正向与反向传播波的幅值; γ_i 为传播常数; C_{ik} 表示耦合系数。为抑制耦合模式的幅值,提高转换效率,采用下面半径微扰的波导模式变化结构:

$$a(z) = a_0 [1 - \sum_m \varepsilon_m \cos(m\beta_w z)] / (1 - \sum_m \varepsilon_m) \quad (6)$$

式中: ε 为微扰幅度,且 $\beta = \beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\lambda_B \approx \beta_w = 2\pi/\lambda_w$; λ_B 为2个相互作用模式的拍波长; $\lambda_w = (1+\delta)\lambda_B$ 为优化后的扰动周期,变换器总长度 $L = N\lambda_w$ 。采用上述优化变化结构,即可实现TE₀₂~TE₀₁的高效率转换。

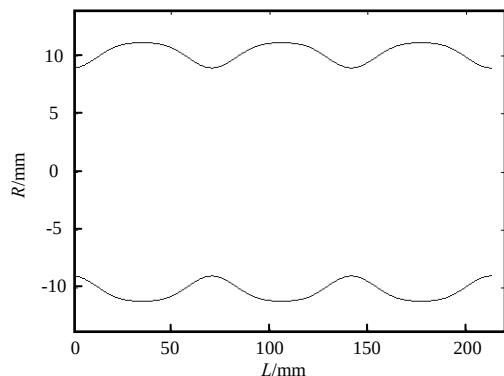


Fig.7 Geometry structure of TE₀₂-TE₀₁ mode converter
图7 模式变换器几何结构图

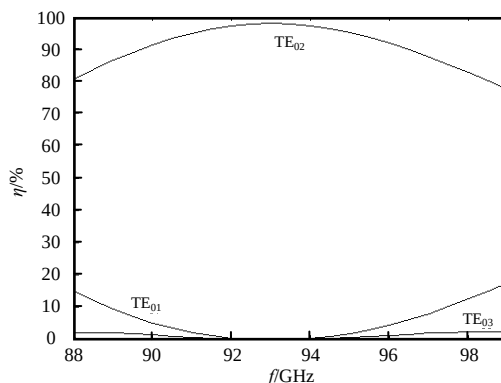


Fig.8 Power conversion efficiency as a function of frequency
图8 转换效率频响曲线

本文选择93 GHz作为中心频率,波导半径为9 mm的TE₀₂~TE₀₁模式变换器进行了数值计算和优化分析,设计的几何结构如图7所示。图8给出了模式变换器转换效率频响曲线,由图可见转换效率在95%以上时,带宽达到4 GHz,可满足工程效率及带宽需求。

4 结论

本文以 TE_{02} 为工作模式,对 W 波段二次谐波回旋行波管的注波相互作用进行了系统的理论研究。通过数值分析,给出了一个 W 波段二次谐波 TE_{02} 模回旋行波管的模拟结果,获得 465 kW 输出功率,23%的效率,49 dB 的饱和增益和 6%的带宽结果。而且,利用耦合波理论设计了一个 $TE_{02} \sim TE_{01}$ 模式变换器,获得效率在 95%以上时,带宽达到 4 GHz。

参考文献:

- [1] Tsai W C. Absolute instabilities in a high-order-mode gyrotron traveling-wave amplifier[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 70(5): 7269–7270.
- [2] WANG Q S, Huey H E, McDermott D B, et al. Design of a W-band second-harmonic TE_{02} gyro-TWT amplifier[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 2232–2237.
- [3] McDermott D B, Balkcum A J, Luhmann N C J. 35 GHz 25 kW CW low-voltage third-harmonic gyrotron[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 24(3): 613–619.
- [4] Neilson J, Read M, Ives L. Design of a permanent magnet gyrotron for active denial systems[C]// 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009). Busan, Korea: IEEE, 2009: 1–2.
- [5] Chu K R, LIN A T. Gain and bandwidth of the gyro-TWT and CARM amplifiers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16(2): 90–104.
- [6] Davies. Conditions for absolute instability in the cyclotron resonance maser[J]. Physics of Fluids B Plasma Physics, 1989, 1(3): 663–669.
- [7] Thumm H L M. Mode coupling in corrugated waveguides with varying wall impedance and diameter change[J]. International Journal of Electronics, 2007, 71(5): 827–844.
- [8] Thumm H L M. Study on mode coupling coefficients in curved corrugated circular waveguides[J]. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Wave, 1991, 11(6): 543–549.

作者简介:



李志良(1979–),男,安徽省宿州市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波和太赫兹回旋器件.email:lizhiliang100@163.com.

冯进军(1966–),男,山西省运城市人,博士,研究员,主要研究方向为真空电子器件的研究,包括真空微电子器件、毫米波行波管、空间行波管、高功率回旋器件、微加工技术和太赫兹真空辐射源等。

刘本田(1972–),男,河南省安阳市人,博士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

王峨锋(1968–),男,云南省峨山县人,博士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

曾旭(1984–),男,福建省永定县人,硕士,工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

张杨(1989–),男,山西省大同市人,助理工程师,研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。