2018年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2018)05-0767-06

140 GHz 共焦波导结构回旋行波管放大器

李志良,冯进军,刘本田,张 杨

(中国电子科技集团公司 第十二研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要:为减少太赫兹回旋器件模式密度和降低模式竞争问题,利用具有模式选择特点的共 焦波导结构作为140 GHz回旋行波管(Gyro-TWT)的高频互作用系统。在理论分析基础上,建立注波 互作用计算模型并对其进行数值计算;通过对共焦波导高频场分布、衍射损耗、耦合系数以及注 波互作用效率等输出参量的分析,选择HEoo作为工作模式,确定了140 GHz Gyro-TWT放大器的基本 结构和工作参数,并利用注波互作用非线性理论进行分析。模拟结果表明:在注电压为35 kV,注 电流2 A,速度比为0.75时,该高频结构在140 GHz频点获得12 kW峰值输出功率,17.1%电子效率和 38 dB饱和增益,3 dB带宽达到6 GHz。

140 GHz confocal waveguide Gyrotron-Traveling Wave Tube amplifier

LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian, ZHANG Yang

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

Abstract: For reducing mode density and lowering the risk of spurious mode competition in THz gyrotron, the mode-selective confocal waveguide system is adopted for high frequency circuit of 140 GHz HE₀₆ mode confocal waveguide Gyrotron Traveling Wave Tube(Gyro-TWT) amplifier. Based on the analysis of RF system, the theoretical analysis about electron beam and waves interaction is presented. The structure and operating parameters of the gyro-TWT are determined by analysis of field distribution, diffraction loss, coupling coefficient and interaction between electron beam and wave. Nonlinear theory is utilized to calculate the amplifier, and nonlinear analysis shows that the interaction circuit can generate a saturated peak power of 12 kW, corresponding to a saturated gain of 38 dB, an efficiency of 17.1%, and a 3 dB bandwidth of 6 GHz at 140 GHz when utilizing a 35 kV, 2 A electron beam with 0.75 of the ratio of the transverse velocity to the longitudinal velocity.

Keywords: Gyrotron-Traveling Wave Tube(Gyro-TWT) amplifier; confocal waveguide; 140 GHz; nonlinear theory

回旋行波管(Gyro-TWT)放大器是一种具有高效率、高平均及脉冲功率和较宽带宽特点的微波和毫米波源, 相比其他真空器件具有无可比拟的优越性,在毫米波雷达、通信、电子对抗和空间碎片探测等领域有广泛应用前 景^[1-2]。Gyro-TWT工作在太赫兹频段时,因高频结构尺寸变小,采用传统的在光滑圆波导中加载衰减材料来对 寄生振荡进行抑制的方法变得难以实现,而如果采用本身就具有模式选择特性的高频互作用结构,将会极大减小 模式密度和降低模式竞争发生的可能性^[3]。鉴于共焦波导这一新型结构具有模式选择等特点,本文采用 HE₀₆ 作 为共焦波导高频互作用系统的工作模式,利用理论分析及注波互作用计算程序对 140 GHz Gyro-TWT 进行了数值 计算,得到其具体设计方案,从而为太赫兹 Gyro-TWT 的研制打下技术基础。

1 理论分析

共焦波导结构是一种新型的开放式互作用系统,图1为其结构示意图,由2个曲率半径为R。的反射镜面组

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-06-12

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(9140C050201150C05021);科技部国家磁约束核聚变能发展研究专项资助项目(2013GB11003)

成,其中虚线圆为电子束位置即引导中心半径,用 R_b 表示,而镜面间的距离为 L_1 ,镜面的宽度为2a,当 $R_c=L_1$ 时,该结构称为共焦波导。

根据共焦波导结构中 HE_{mn}模的标量本征函数方程^[3-5]:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{w(y)}} \exp\left[-ik_t y - \frac{1}{2} \frac{x^2}{w^2(y)} - i\frac{1}{2} \frac{k_t x^2}{R(y)} + i\frac{1}{2} \arctan\frac{y}{k_t w_0^2}\right]$$
(1)

可以得到如图 2 所示 HE₀₆模的横向场分布,为一种类高斯模式。式中: $k_t = (n + m/2 + 1/4)\pi/L_1$ 是横向波数; w_0 是 y=0 处高斯束腰大小; w(y)为任意 y 处高斯束腰大小; R(y)为波前曲率半径。



Fig.1 Curved mirror geometry of confocal waveguide 图 1 共焦波导镜面结构

Fig.2 Transverse field contours of HE₀₆ mode 图 2 HE₀₆模的横向场分布

在共焦波导结构中,相对于高次模式,低次模式的传输损耗较大,但高次模式的互作用效率较低。综合考虑 后,最终选择 HE₀₆模式作为互作用模式。计算了一些与 HE₀₆模式临近模式的衍射损耗率,结果如图 3 所示,可 以看出,其中 HE₁₅和 HE₂₄模式,其衍射损耗非常大,无法在共焦波导内传输,HE₀₅模式应是 HE₀₆模式的主要 竞争模式,而 HE₀₅模式可通过改变磁场得到抑制。



共焦波导 Gyro-TWT 是利用工作于 HE_{mn}模式的波导模与电子注回旋模式之间的相互作用产生注波互作用耦合,从而产生高功率相干辐射输出。其色散关系可以分别由下面两式表示:

$$\omega^2 - k_z^2 c^2 - k_t^2 c^2 = 0 \tag{2}$$

$$\omega = k_z v_z + s\Omega \tag{3}$$

式中: ω 为波的角频率; k₂为轴向波数; Ω 为相对论电子回旋频率; s 为谐波次数。图 4 为根据上式获得的共焦 波导回旋行波管工作在 HE₀₆模式的色散曲线图,由此可以得出:在注电压为 35 kV,电子横向纵向速度比为 0.75, 共焦波导半径取 0.69 cm 时,耦合最强点处的工作磁场与相切磁场之比为 0.998,计算可得互作用磁场为 4.95 T。

由文献[2]可得用于衡量电子束与电磁波耦合的强弱 L_s关系式,从而获得 HE_{mn}模式与电子注 s 次谐波作用强度的耦合关系,即 L_s随 R_b的变化如图 5 所示。由图可见,当引导中心取 1.9 mm 时,注波耦合较强。同时在小

gain rate/(dB·cm⁻¹)

信号范围内,给出单位长度的线性增益与频率的关系如图 6 所示,单位长度增益约 3.5 dB。由此可得:如获得 50 dB 增益,约需 15 cm 左右互作用长度。综合上面各参数,140 GHz HE₀₆ Gyro-TWT 主要设计参数如表 1 所示。



图 5 HE₀₆模式耦合系数与引导中心关系图

2 注波互作用非线性数值计算与分析

根据文献[6-7]给出的 Gyro-TWT 的单粒子理论作为非线性自治理论,可得:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dz'} = -2\frac{(1-w)^{\frac{s}{2}}}{1-bw} \operatorname{Re}\left(Fe^{-i\theta_{s}}\right) \\ \frac{d\theta_{s}}{dz'} = \frac{1}{1-bw} \left[w\overline{\mu} - \overline{\Delta} - s\left(1-w\right)^{\frac{s}{2}-1} \operatorname{Im}\left\{iFe^{-i\theta_{s}}\right\}\right] \\ \frac{dF}{dz'} = -I_{b}^{'}\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{2\pi}\frac{(1-w)^{\frac{s}{2}}}{1-bw} e^{i\theta_{s}}d\left(\theta_{0}\right) \end{cases}$$
(4)



图 6 单位长度线性增益与频率变化图

表 1 140 GHz HE₀₆ 共焦波导结构回旋行波管设计参数 Table 1 Design parameters for the 140 GHz HE₀₆

confocal waveguide Gyro-1 w I	
parameters	value
beam voltage U _b /kV	35
beam current $I_{\rm b}/{\rm A}$	2
velocity ratio α	0.75
operating mode	HE_{06}
confocal radius R _c /mm	6.9
guiding center radius R _b /mm	1.9
width of mirror 2a/mm	5
magnetic field B_0/T	4.95

式中各物理量含义见文献[6-7]。式(4)即为描述注波互作用过程中的演化方程。

通过求解该理论所对应的非线性微分方程组,可以对共焦结构 Gyro-TWT 的注-波互作用过程进行理论计算和分析,研究该类回旋行波管的场振幅、相位、电子能量、输出功率、电子效率和增益等特性参量的变化情况。

为分析共焦波导结构 Gyro-TWT 的高频场强在互作用区间的分布,利用式(4),计算出 Gyro-TWT 的高频场 强、相位参量和归一化电子能量沿互作用区间的变化情况^[8-9]。对于 HE₀₆模基波 Gyro-TWT,当采用表 1 中设计 参数时,高频场归一化振幅、相位失谐参量和归一化电子能量沿互作用长度的变化曲线如图 7~图 9 所示。图 7 为高频场归一化振幅沿互作用长度的变化曲线,由图可知,Gyro-TWT 的高频场强沿电子注运动方向正向增长, 从而造成在电子注群聚较好时对应高频场强比较强,在电子注刚进入互作用区时高频场强比较弱。图 8 为电子的 缓变相位 θ_s随轴向距离的变化,图中曲线代表宏电子,经过近似线性变化后,出现群聚效应。图 9 为归一化能 量随轴向距离的变化,可以看出,当达到饱和时,归一化能量大于 0 的宏电子占多数,因此,对于大多数电子来 说,它们向场交出能量使其放大。图 10 和图 11 分别为饱和输出功率、增益与轴向距离关系,由图可见,利用非 线性理论计算该管在 140 GHz 频率处获得 12 kW 峰值输出功率,38 dB 的增益。

在选定上述设计参数时,分析了不同参数对输出功率的影响(图 12~图 13),从而可以确定最佳束压和输入功率为 35 kV 和 1 W,此时输出功率达到 12 kW。由图 13 可以看出,随着注入功率的增大,输出功率在开始阶段 会线性增大,后来会逐渐达到饱和,如果注入功率继续增大,则输出会逐步降低,这是因饱和效应所致。

10

5

0

-5

-10

-15

-20

0

50

100

 $\theta_{\rm s}/{\rm rad}$

150





通过注波互作用非线性理论来计算该共焦波导结构 Gyro-TWT 的性能,图 14~图 16 中清楚地显示输出功率、 增益和电子效率随频率的影响。对于 0%横向速度零散的理想情况,峰值功率为 12 kW 时,饱和增益计算可得 38 dB, 17.1%的效率和 3 dB 带宽为 6 GHz(约 8%)。



3 结论

本文以 HE₀₆为工作模式,对 140 GHz 波段基次谐波 Gyro-TWT 的场分布、衍射损耗、耦合系数以及注波互作用进行了系统的理论研究。通过理论分析,给出一个 140 GHz HE₀₆模 Gyro-TWT 的数值模拟结果:在注电压为 35 kV,注电流为 2 A,电子注横向与纵向速度比为 0.75 时,该互作用结构能够产生 12 kW 峰值输出功率,6 GHz 带宽, 17.1%电子效率和 38 dB 饱和增益。

参考文献:

- NGUYEN K T,CALAME J P,PERSHING D E,et al. Design of a Ka-band gyro-TWT for radar applications[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2001,48(1):108-115.
- [2] GRAVEN M,CALAMEJ P,DANLY B G,et al. A gyrotron-traveling-wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002,30(3):885-893.
- [3] JOYE C D. A novel wideband 140 GHz gyrotron amplifier[D]. Boston:Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [4] SIRIGIRI J R. A novel quasioptical gyrotron traveling wave amplifier[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [5] HU W,SHAPIRO M A,KREISCHER K E,et al. 140 GHz gyrotron experiments based on a confocal cavity[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1998,26(3):366-374.
- [6] NUSINOVICH G S,LI H. Theory of gyro-travelling-wave tubes at cyclotron harmonics[J]. International Journal of Electronics, 1992,72(5/6):895-907.
- [7] NUSINOVICH G S,LI H. Large-signal theory of gyro traveling wave tubes at cyclotron harmonics[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1992,20(3):170-175.