

文章编号: 2095-4980(2024)08-0835-07

基于大回旋电子注的高次谐波回旋行波管

赵其祥¹, 雷朝军², 于新华¹, 高东硕³, 王峨锋³, 曾旭³, 冯进军³

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国人民警察大学 警务装备技术学院, 河北 廊坊 065000;
3. 北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要: 回旋行波管兼具高功率、宽频带特性, 在毫米波高分辨成像雷达、电子对抗等重要军事领域具有广泛的应用前景。基于大回旋电子注的回旋行波放大器可工作于高次谐波状态, 大大降低了工作磁场, 甚至可实现无超导工作, 提高了回旋行波管使用的灵活性和机动性。本文优化设计了一支 Ka 波段二次谐波大回旋行波管, 采用具有介质加载的纵向开槽互作用高频结构有效抑制返波振荡, 提高了器件工作的稳定性。利用三维粒子仿真, 对大回旋行波管注-波相互作用过程进行了模拟。结果表明, 在电子注电压为 70 kV, 电流为 6.5 A 时, 磁场可降低至 0.642 T, 输出功率达到 106.5 kW, 带宽为 2.10 GHz, 最大增益为 35 dB。

关键词: 回旋行波管; 高功率; 大回旋电子注; 雷达

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023299

High-order harmonic Gyrotron Traveling Wave Tubes with large orbit electron beams

ZHAO Qixiang¹, LEI Chaojun², YU Xinhua¹, GAO Dongshuo³, WANG Efung³, ZENG Xu³, FENG Jinjun³

(1.School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;
2.School of Police Equipment Technical, China People's Police University, Langfang Hebei 065000, China; 3.National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: Gyrotron Traveling Wave Tubes(Gyrotron-TWT) have both high power and broadband characteristics, which have broad application prospects in important military fields such as millimeter wave detection and imaging radar, electronic countermeasures, etc. The gyrotron traveling wave amplifier with large orbit electron beams can operate in high-order harmonic state, greatly reducing the operating magnetic field and even achieving superconducting free operation. It can improve the flexibility and maneuverability of Gyrotron-TWT. This paper optimizes and designs a Ka band second harmonic Gyrotron-TWT with large orbit electron beams, which adopts a longitudinal slot interaction high-frequency structure with dielectric loading to effectively suppress backwave oscillation and improve the stability of device operation. The process of beam wave interaction in the Gyrotron-TWT was simulated by using three-dimensional particle simulation software. The results show that at the condition of the electron beam voltage of 70 kV, the current of 6.5 A, the magnetic field can be reduced to 0.642 T, the corresponding output power can reach 106.5 kW, the bandwidth is 2.1 GHz, and the maximum gain is 35 dB.

Keywords: Gyrotron-Traveling Wave Tubes; high power; large orbit electron beams; radar

基于电子回旋脉塞机理的回旋行波管能在毫米波和亚毫米波段产生高功率、宽频带相干电磁辐射, 在高分辨力毫米波成像雷达、通信、电子对抗等重要军事领域具有广泛的应用前景^[1-5]。目前, 理论和工程实现上较为成熟的是小轨道回旋行波放大器(小回旋行波管), 但小回旋行波管在实用性方面还有技术问题需要解决, 特别是小回旋行波管的高强度磁场问题, 需要超导实现引导电子注的强磁场, 极大限制了回旋行波管的应用。由电子

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62361019; 62001280)

回旋脉塞条件($\omega - s\Omega - k_{\parallel}v_{\parallel} = 0$)可知,采用高次谐波($s \geq 2$)工作,可降低工作磁场。但严重的模式竞争会导致小回旋波管相互作用效率和稳定性急剧下降,影响输出功率、效率、带宽等性能。大回旋电子注具有良好的模式选择特性(谐波次数 s 与工作模式 $TE_{m,n}$ 的角向指标 m 必须一致),减小了模式竞争,极大降低了模式竞争风险,成为高次谐波回旋波管研究的重要方向。大回旋波管的这些优点引起了国内外学者的广泛关注。俄罗斯应用物理研究所在 2004 年报道了 Ka 波段二次谐波大回旋波放大器的研究工作,采用螺旋波纹波导结构抑制模式竞争和拓宽工作带宽,其连续波功率为 7.7 kW, 3 dB 带宽为 2.6 GHz,增益为 26 dB,峰值功率更是达到了 180 kW^[6]。2017 年,英国斯塔拉斯克莱德大学对大回旋波管进行了研究^[7],仍采用螺旋波纹波导作为相互作用电路,在 W 波段取得了 3.4 kW 的峰值功率,增益和带宽分别达到了 37 dB 和 5.8 GHz。我国近年来也有学者开展了高次谐波大回旋波管的相关研究,但仅限于对高质量大回旋电子枪、新型模式选择高频相互作用电路的模拟仿真工作,未开展大回旋波管的实验研究工作^[8-10]。

本文对 Ka 波段二次谐波大回旋波放大器注-波相互作用进行了研究。为有效抑制返波振荡和绝对不稳定性振荡,采用了具有介质加载的纵向开槽波导作为相互作用高频结构并进行优化设计,然后对大回旋波放大器注-波相互作用进行大信号模拟和 PIC 对比仿真。

1 高频相互作用电路的设计

根据大回旋电子注的模式选择特性, s 次谐波的大回旋电子注只与满足 $m=s$ 的 $TE_{m,n}$ 模式发生注-波相互作用。因此,选择 $TE_{2,1}$ 模作为 Ka 波段二次谐波大回旋波放大器的工作模式,相互作用腔半径 $R_{\text{cavity}}=4.29$ mm。电子回旋模式与波导模式发生耦合的色散曲线如图 1 所示。由图可见,点 3 为 $TE_{2,1}^{(2)}$ 模二次谐波大回旋波放大器的工作点,在这个区域中,电子注与前向波能够发生稳定的能量交换。满足返波振荡条件的模式只有点 1 对应的 $TE_{4,1}^{(4)}$ 模和点 2 对应的 $TE_{3,1}^{(3)}$ 模,而最低阶模 $TE_{1,1}^{(1)}$ 与电子回旋共振曲线没有交点,可以不用考虑它的寄生振荡。

工作在 $TE_{m,n}$ 模式状态下的回旋波管,发生绝对不稳定所对应的电磁波频率 ω_s 与传播常数 $k_{z,s}$ 以及起振电流阈值 I_c 满足式(1)^[11]:

$$I_c = 1.152 \times 10^5 \times \frac{\gamma_0 \beta_{z0}^3 x_{mn}^2 K_{mn}}{\beta_{\perp 0}^2 H_{sm}(k_{mn} r_{c0}, k_{mn} r_{L0})} \times \left(\frac{k_{zs}}{k_{mn}} \right)^4 \quad (1)$$

式中: γ_0 为电子相对论因子; β_{z0} 为电子归一化纵向速度; x_{mn} 为 $TE_{m,n}$ 模式的特征根; K_{mn} 为归一化系数; $\beta_{\perp 0}$ 为电子归一化横向速度; H_{sm} 为注-波耦合系数; k_{mn} 为横向截止波数; r_{L0} 为电子拉莫半径; r_{c0} 为电子注引导中心半径。

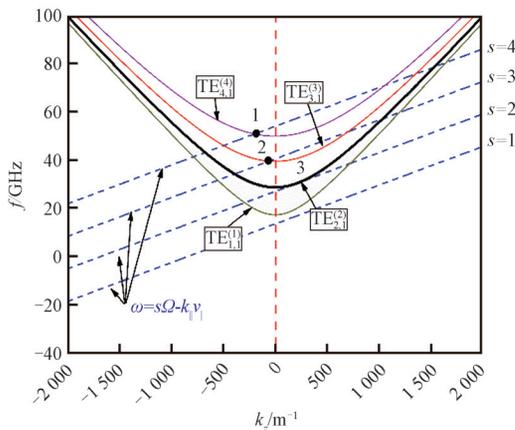


Fig.1 Dispersion curve of the second harmonic gyrotron TWT with large orbit electron beams

图 1 二次谐波大回旋波管色散曲线

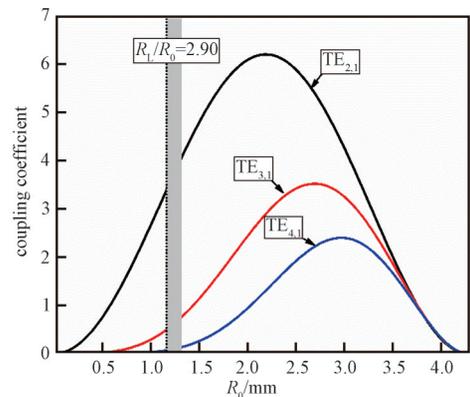


Fig.2 Beam-wave coupling coefficient of Ka band second harmonic large orbit gyrotron TWT

图 2 Ka 波段二次谐波大回旋波管注-波耦合系数

对于大回旋工作状态,式(1)中 $s=m$, $r_{c0}=0$, $r_{L0}=1.24$ mm,大回旋电子注与波导模式注-波耦合系数如图 2 所示。可以看出,工作模式 $TE_{2,1}^{(2)}$ 与大回旋电子注的耦合最强,竞争模式的耦合较弱,这样有利于抑制模式竞争。利用 Matlab 编制程序,可得到各模式绝对不稳定性起振电流(I_s)随工作磁场、横纵速度比等参数的变化。图 3 为 $U_0=70$ kV、 $R_{\text{cavity}}=4.29$ m、 $r_{L0}=1.24$ mm 时,绝对不稳定性的起振电流随横纵速度比 α ($\alpha = v_{\perp 0}/v_{\parallel 0}$) 的变化图。随着横纵速度比的增加,起振电流降低;随着磁场失谐率 B_0/B_g (B_0 为工作磁场, B_g 为切点磁场) 的增加,起振电流降

低。综合考虑工作电流为 10 A，要保证 30% 余量远离绝对不稳定性，则绝对不稳定起振电流应该大于 15 A，因此，取 $B_0/B_g = 0.98 (B_0 = 0.6367 \text{ T})$ ，纵横速度比为 1.0。在此条件下，主要竞争模式 $TE_{3,1}^{(3)}$ 和 $TE_{4,1}^{(4)}$ 的起振电流都远大于 15 A。可见，大回旋高次谐波工作可有效提高模式绝对不稳定性的起振电流，为实现大功率微波辐射提供可能。

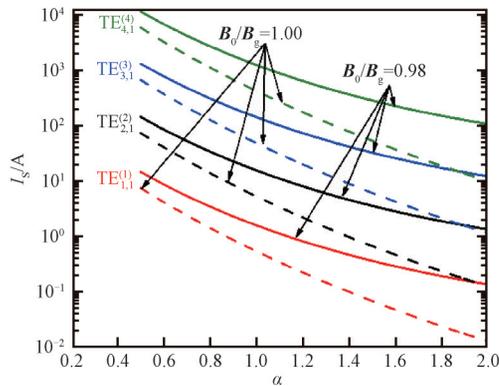


Fig.3 Starting current of the absolute instability varying with the pitch factor α

图3 模式绝对不稳定性起振电流随纵横速比的变化

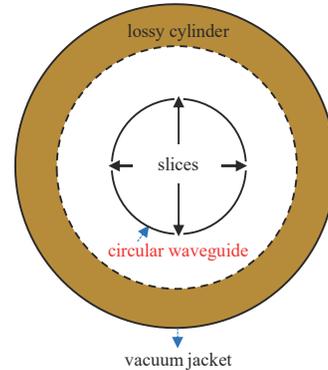


Fig.4 The interaction circuit of Ka band second harmonic Gyrotron-TWT with large orbit electron beams

图4 Ka波段二次谐波大回旋行波管高频结构示意图

从图 1 可以看出，三次竞争模式 $TE_{3,1}^{(3)}$ 和四次谐波 $TE_{4,1}^{(4)}$ 与电子回旋模式相交于传播常数的负值区 ($k_z < 0$)，此时反向传播的电磁波与电子注形成内部的反馈通道，引起返波振荡。为有效抑制 $TE_{3,1}^{(3)}$ 的寄生振荡，选择如图 4 所示的模式选择电路。该圆波导电路被 4 个切片分割，每个切片之间的间距为 $R/5$ (R 为圆波导的半径)，在外部真空套内壁涂上损耗材料，吸收从切片辐射出来的电磁波。由于在角向被分隔成 4 部分，因此角向指数为奇数的模式能够得到较好的抑制。利用 CST-PIC 仿真，当高频电路的长度为 42 cm 时， $TE_{3,1}^{(3)}$ 模在该高频电路中的衰减为 28.2 dB，返波振荡能够得到抑制。但 $TE_{4,1}^{(4)}$ 模的衰减不明显 (2.5 dB)，因此需研究该模式返波振荡的抑制。

采用损耗介质吸收微波能量，可有效增大返波振荡的微波损耗，提高返波振荡起振长度临界值^[12]。利用回旋管小信号理论研究介质加载下 $TE_{4,1}^{(4)}$ 模的起振长度，结果见图 5，其中 $U_0 = 70 \text{ kV}$ ， $R_{\text{cavity}} = 4.29 \text{ m}$ ， $r_{L0} = 1.24 \text{ mm}$ ， $I = 10 \text{ A}$ ， $B = 0.6367 \text{ T}$ 。可以看出，随着电阻率 ρ 的增加，返波起振长度总体呈增加趋势。当电阻率增加到某一特定值之后，起振长度会急剧增长。当 $\rho/\rho_{\text{copper}} \approx 1700$ 时，起振长度达到了 40 cm，大于 $TE_{2,1}^{(2)}$ 放大信号增益达到 40 dB 所需的长度。同时，返波起振频率随电阻率的增加而降低，这是由于电阻率降低，模式的截止频率会下降，而返波振荡工作于截止频率附近的 $k_z < 0$ 区，因此，相应的起振频率也会下降。

采用介质加载高频结构，根据起振电流研究竞争模式 $TE_{3,1}^{(3)}$ 的起振长度随介质的变化情况，如图 6 所示，其中 $U_0 = 70 \text{ kV}$ ， $R_{\text{cavity}} = 4.29 \text{ m}$ ， $r_{L0} = 1.24 \text{ mm}$ 。从图中可以看出，当 $\rho/\rho_{\text{copper}} \approx 1500$ 时，起振长度达到了 40 cm，大于 $TE_{2,1}^{(2)}$ 放大信号增益达到 35 dB 所需的长度。综合考虑增益和返波起振的抑制问题，选择损耗介质的电阻率为 3 200，同时，工作电流为 6.5 A。对比发现，谐波次数越高的模式，返波起振长度随损耗介质的电阻率的变化越明显，即在较低的电阻率下其起振长度就能急剧增加。

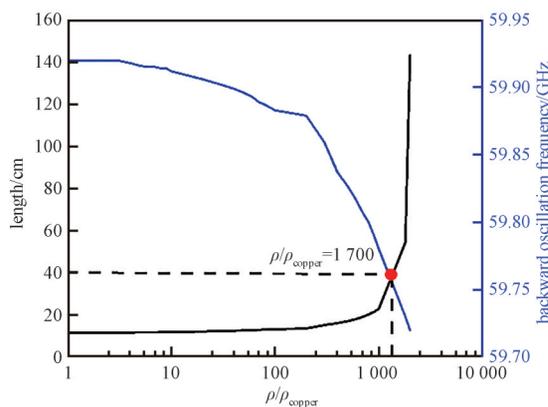


Fig.5 The variation of the length and frequency of the backwave oscillation of $TE_{4,1}^{(4)}$ with the resistivity of the loss

图5 $TE_{4,1}^{(4)}$ 返波起振长度和频率随损耗介质电阻率的变化

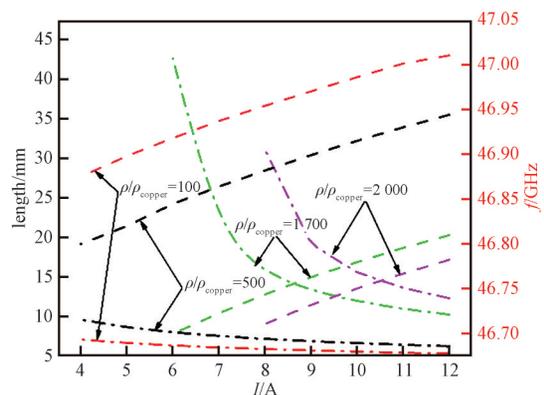


Fig.6 The variation of the length and frequency of the backwave oscillation of $TE_{3,1}^{(3)}$ with beam current

图6 不同电阻率下 $TE_{3,1}^{(3)}$ 返波起振长度和频率随电流的变化

2 注-波相互作用自洽非线性理论研究

自洽非线性理论能够准确描述大回旋行波管中大回旋电子注与高频场相互作用物理过程。利用文献[13]中回旋行波管自洽非线性理论模型，自制模拟程序，对设计的Ka波段二次谐波大回旋行波管的注-波相互作用进行模拟研究，最终优化出热腔工作方案。由于设计的纵向开槽结构对工作模式TE_{2,1}⁽²⁾的衰减较小，采用理想波导代替纵向开槽结果。当电流为6.5A时，相互作用增益随纵向的变化如图7所示，其中U₀=70 kV，R_{cavity}=4.29 m，r_{l0}=1.24 mm。可以看出，注-波相互作用的增益能够达到38 dB。图8为自洽非线性模拟得到的场幅值分布。经过优化，得到如表1所示的设计方案，带宽达到了2.1 GHz，最大增益为40 dB，最大输出功率达到了126 kW。

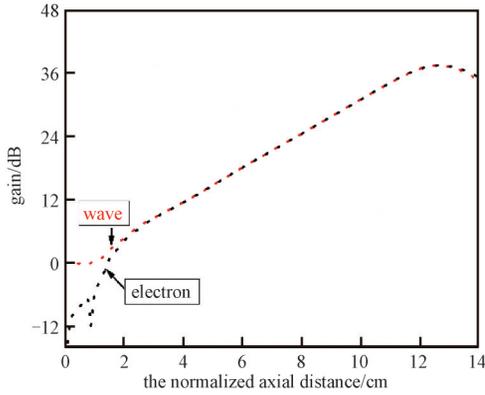


Fig.7 The variation of the gain obtained from the nonlinear self-consistent simulation with the axial distance
图7 自洽非线性模拟得到的增益随纵向位置的分布

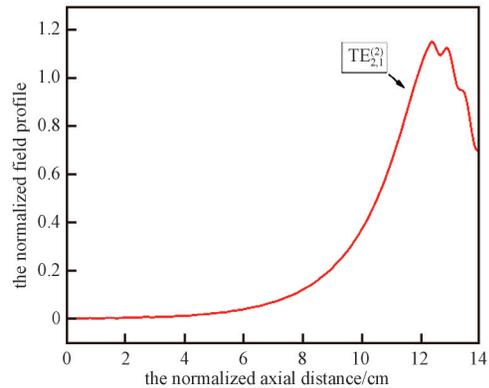


Fig.8 Distribution of field amplitude simulated by self-consistent code
图8 自洽非线性模拟得到的场幅值分布

3 大回旋行波管 CST 模拟

利用 CST-PIC 仿真软件对设计的 Ka 波段二次谐波大回旋行波管进行模拟仿真，仿真模型如图 9 所示。采用吸收材料 ECCOSORB 吸收切片辐射出来的电磁波，线性段两端采用厚度渐变损耗介质减少由于介质突变引起的反射。当电压 U₀ = 70 kV，R_{cavity} = 4.29 mm，I₀ = 6.5 A 时，PIC 仿真得到电场分布如图 10 所示，可以看出，此时的工作模式为 TE_{2,1}⁽²⁾。工作模式输出信号随时间的变化如图 11 所示，当时间 t 大于 10 ns 时，工作模式 TE_{2,1}⁽²⁾ 的输出信号稳定，功率达到 83.68 kW；从频谱可以看出，工作频率为 30.01 GHz，没有其他杂散频率，说明了该大回旋行波管能够稳定工作在二次谐波状态。为验证整体高频结构的稳定性，开展了零驱动稳定性的分析。图 12 为在零驱动下输出端口工作模式和寄生模式的电场信号图。由图可知，各个模式的幅值(W^{1/2})在 100 ns 内功率起伏很小，几乎可以忽略不计，表明了介质加载高频结构整体的稳定性，有损加载的线性段有效抑制住了模式振荡。

输出功率随频率的变化如图 13 所示，可以看出，峰值输出功率达到了 106.5 kW，3 dB 带宽为 2.1 GHz，相互作用效率大于 20%。输出功率随频率的变化如图 14 所示，由增益图看出，在靠近截止频率附近，随着工作频率的升高，增益急剧升高，在 29.5 GHz 附近达到了极大值，其峰值功率为 106.5 kW。进入到高频率点时，增益由于电子注与微波的失谐作用有着明显的下降。



Fig.9 CST simulation model of Ka band second harmonic gyrotron-TWT with large orbit electron beams
图9 Ka波段二次谐波大回旋行波放大器 CST模型

表1 Ka波段二次谐波大回旋行波管工作参数

Table1 The operating parameters for Ka band second harmonic Gyro-TWT with large orbit beams

parameters for Gyro-TWT	values of parameters
beam voltage U ₀ /kV	70
beam current I ₀ /A	6.5
applied magnetic field B ₀ /T	0.6367
pitch factor α	1.0
radius of the cavity R _{cavity} /mm	4.29
length of linear section L ₁ /mm	230
length of nonlinear section L ₂ /mm	110
resistivity of the loss σ/(S/m)	362
operating bandwidth/GHz	29.0-31.1
maximum output power/kW	126
maximum gain/dB	40

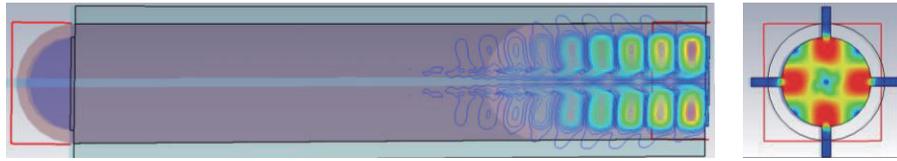
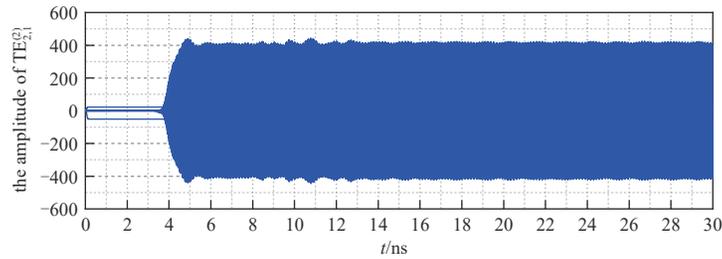
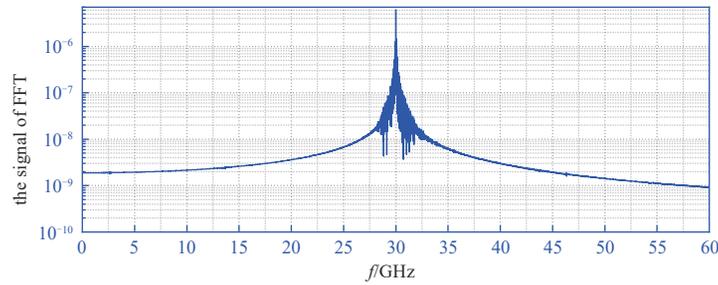


Fig.10 The distribution of electric field simulated by PIC
图 10 PIC 仿真得到的电场分布



(a) variation of the signal of $TE_{21}^{(2)}$ with time



(b) the spectrum $TE_{21}^{(2)}$

Fig.11 Beam-wave interaction result from PIC simulation
图 11 PIC 仿真注-波相互作用结果

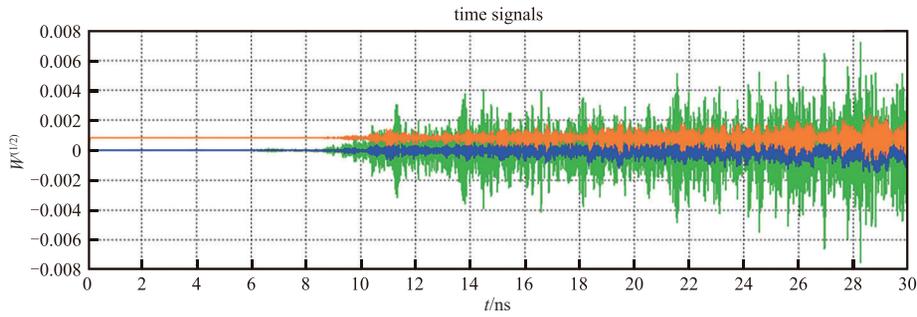


Fig.12 The variation of mode amplitude with time under zero-driving
图 12 零驱动下模式幅值随时间的变化

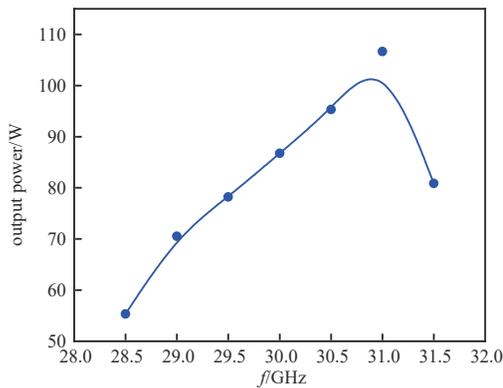


Fig.13 The output power vs. different frequencies
图 13 输出功率随频率的变化

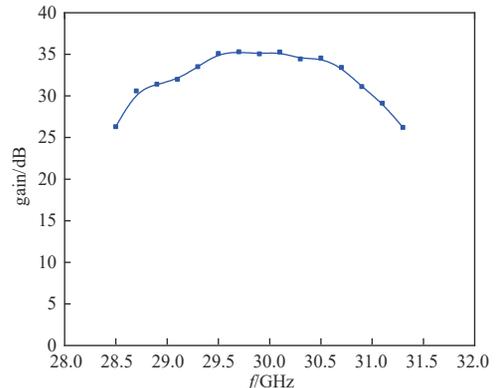


Fig.14 The gain vs. different frequencies
图 14 增益随频率的变化

4 结论

本文针对应用对无超导工作的要求,设计了Ka波段二次谐波大回旋行波放大器相互作用系统。采用具有介质加载的纵向开槽相互作用高频结构有效抑制返波振荡;利用小信号理论、大信号理论和三维粒子仿真,对大回旋注-波相互作用、模式竞争等进行了计算和分析。结果表明,在电子注为70 kV,电流为6.5 A,磁场为0.642 T的工作条件下,峰值输出功率达到了106.5 kW,带宽为2.1 GHz,最大增益为35 dB。

参考文献:

- [1] 刘濮鲲,杜朝海.毫米波回旋行波放大器的发展评述[J].微波学报,2013,29(增1):33-42. (LIU Pukun,DU Chaohai. Review of the gyrotron traveling-wave-tube amplifier development[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(Z1):33-42.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.2013.z1.009.
- [2] 孙荣棣,黄军,栾镛.新型宽带大功率毫米波回旋行波管发射机[J].现代雷达,2009,31(7):84-86. (SUN Rongdi,HUANG Jun, LUAN Di. A new broad band high power millimeter-wave gyro-TWT transmitter[J]. Modern Radar, 2009,31(7):84-86.) doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2009.07.019.
- [3] 郑文杰,吴振华,张晓秋艳,等.第46届国际红外毫米波与太赫兹会议综述:太赫兹辐射源的最新研究进展[J].太赫兹科学与电子信息学报,2023,21(11):1403-1412. (ZHENG Wenjie, WU Zhenhua, ZHANG Xiaoqiuyan, et al. Review of the 46th international conference on infrared millimeter waves and terahertz: recent research advances in terahertz radiation sources[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(11):1403-1412.) doi:10.11805/TKYDA2022042.
- [4] 李志良,冯进军,王峨峰,等.Ka波段二次谐波回旋行波管放大器的研究[J].真空电子技术,2010(2):41-44. (LI Zhiliang, FENG Jinjun, WANG Efeng, et al. Study of Ka-band second-harmonic wave gyrotron traveling wave tube amplifier[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):41-44.) doi:10.3969/j.issn.1002-8935.2010.02.008.
- [5] 郝保良,魏义学,陈永利,等.微波功率行波管器件的发展和应[用][J].真空电子技术,2018(1):10-18. (HAO Baoliang, WEI Yixue, CHEN Yongli, et al. Development and application of microwave power traveling wave tubes[J]. Vacuum Electronics, 2018(1):10-18.) doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2018.01.02.
- [6] SAMSONOV S V, DENISOV G G, BOGDASHOV A A, et al. Recent activity and results on gyro-TWT at the IAP[C]// 2023 the 24th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Chengdu, China: IEEE, 2023: 1-2. doi:10.1109/IVEC56627.2023.10157649.
- [7] THUMM M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2007:FZKA 7392[R]. Karlsruhe: FZKA, 2008. doi:10.5445/IR/270070735.
- [8] 唐勇,罗勇,徐勇. Ka波段螺旋波导回旋行波管大回旋电子枪的研究与设计[J].真空科学与技术学报,2014,34(12):1329-1335. (TANG Yong, LUO Yong, XU Yong. Design of cusp gun for Ka-band helical waveguide gyro-traveling wave tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014,34(12):1329-1335.) doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2014.12.09.
- [9] LU Ruiqi, LYU You, ZHAO Qixiang, et al. Theoretical design of a Ka-band helically corrugated waveguide gyro-TWT based on axis-encircling electron beam[C]// Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference. Guilin, China: IEEE, 2023: 1-3. doi:10.1109/CSRSWTC60855.2023.
- [10] 武新慧.大回旋电子束形成技术及其应用研究[D].成都:电子科技大学,2013. (WU Xinhui. Study of the forming technology and application of large orbit electron beam[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [11] HARRIET S B, MCDERMOTT D B, GALLAGHER D A, et al. Cusp gun TE/sub 21/second-harmonic Ka-band gyro-TWT amplifier[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,30(3):909-914. doi:10.1109/TPS.2002.802151.
- [12] KOU C S, WANG Q S, MCDERMOTT D B, et al. High-power harmonic gyro-TWTs-part I: linear theory and oscillation study[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1992,20(3):155-162. doi:10.1109/27.142815.
- [13] CHU K R, CHEN Hanying, HUNG C L, et al. Theory and experiment of ultrahigh-gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999,27(2):391-404. doi:10.1109/27.772266.

作者简介：

赵其祥(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹科学、高功率真空器件、超材料、回旋管等。
email:zxqi@guet.edu.cn.

雷朝军(1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高功率真空器件。

于新华(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率真空电子器件。

高东硕(1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率真空电子器件。

王峨锋(1968-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率真空器件。

曾旭(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高功率真空器件。

冯进军(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率真空器件。

(上接第 827 页)

- [12] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R B, et al. Optoelectronic frequency-modulated continuous-wave terahertz spectroscopy with 4 THz bandwidth[J]. Nature Communications, 2021,12(1):1-11. doi:10.1038/s41467-021-21260-x.
- [13] KONG Deyin, WU Xiaojun, WANG Bo, et al. High resolution continuous wave terahertz spectroscopy on solid-state samples with coherent detection[J]. Optics Express, 2018,26(14):17964-17976. doi:10.1364/OE.26.017964.
- [14] ASHWORTH P C, PICKWELL-MACPHERSON E, PROVENZANO E. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer[J]. Optics Express, 2009,17(15):12444-12454. doi:10.1364/oe.17.012444.
- [15] FAN Shuting, PARROTT J E P, UNG B, et al. Calibration method to improve the accuracy of THz imaging and spectroscopy in reflection geometry[J]. Photonics Research, 2016,4(3):A29-A35. doi:10.1364/PRJ.4.000A29.
- [16] SUHANDY D, SUZUKI T, OGAWA Y, et al. A quantitative study for determination of sugar concentration using attenuated total reflectance terahertz(ATR-THz) spectroscopy[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2011,5(3):90-95. doi:10.1016/S1881-8366(12)80020-6.
- [17] HIRORI H, YAMASHITA K, NAGAI M, et al. Attenuated total reflection spectroscopy in time domain using terahertz coherent pulses[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004(43):10A. doi:10.1143/JJAP.43.L1287.

作者简介：

方兴(2000-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像。email:xingfang@zju.edu.cn.

张鹿(1993-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为光子太赫兹通信与感知、光子 AI 计算、光通信与光网络。

张红旗(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为光子太赫兹通信。

杨作民(1998-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹雷达与成像。

吕治东(1999-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化。

余显斌(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹光子学、光纤通信、毫米波/太赫兹技术及其应用。