

0.42 THz 频率连续可调同轴回旋管

雷蕾, 刘頔威*, 鄢扬

(电子科技大学物理电子学院太赫兹研究中心, 四川成都 610054)

摘要:作为目前工作在太赫兹频段输出功率最大的辐射源之一回旋管的功率可达数十千瓦。传统太赫兹回旋管一般为点频工作,难以满足动态核极化核磁共振等多方面技术需要。采用机械调节的方式,实现了带宽为 2 GHz 中心频率为 0.42 THz 二次谐波频率连续可调同轴回旋管。通过非线性理论分析发现,在不改变工作磁场条件下,在调节带宽范围内,可实现大于 8 kW 的功率输出。

关键词:太赫兹;频率连续可调;同轴回旋管;高功率

中图分类号:TN129 **文献标识码:**A

Continuous frequency tunable 0.42 THz coaxial gyrotron

LEI Lei, LIU Di-Wei*, YAN Yang

(Terahertz Science and Technology Research Centre of the School of Physical Electronics,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: As one of the high-power radiating sources in terahertz region, the output power of gyrotrons is up to several tens of kilowatts. The traditional terahertz gyrotrons are difficult to meet the needs of nuclear magnetic resonance using the dynamic nuclear polarization technique, for working in a fixed frequency. In this paper the continuous frequency tunable 0.42 THz coaxial gyrotron with 2 GHz bandwidth by mechanical tuning has been studied. The results show that the output power can keep over 8 kW level in the tuning bandwidth with unchanged operating magnetic field.

Key words: frequency continuous tunable, terahertz, coaxial gyrotron, high power

PACS: 84.40. Ik, 87.50. U-, 31.15. xr, 02.60. Cb

引言

回旋管是基于电子回旋谐振受激辐射机理的一种快波真空电子学器件,不需要传统真空电子学器件所需的慢波结构。与传统电真空器件相比,回旋管可实现高频率、高功率、高效率输出。回旋管是目前工作在太赫兹频段功率最高的真空电子器件,功率可达数十千瓦,回旋管最诱人也是最具发展前景方向之一就是作为毫米波和亚毫米波源^[1-4]。太赫兹回旋管可广泛应用于电子自旋共振、等离子体电子回旋加热、太赫兹通信、气象雷达和非线性光谱^[5-6]。

传统太赫兹回旋管一般为点频工作,难以满足

动态核极化核磁共振、等离子体电子回旋加热抑制磁流体不稳定性等多方面技术需要。工作频率可调也将使回旋管具有更广泛的应用前景和价值。实现回旋管频率可调的主要方法有:1、机械调节:(1)在回旋管同轴谐振腔中,将内导体设计为具有较小倾角的锥形体,纵向移动内导体改变谐振腔内外半径比,从而改变谐振腔特征值^[7];(2)将谐振腔纵向分割为两部分,调节分部的间距^[8]。与第(2)方法相比,第(1)种方法能够有效地避免电磁泄漏。2、改变加速电压^[9]。3、调节工作磁场^[10]。4、谐波转换^[11],即从基波转换到高次谐波。本文利用机械调节第(1)方法,选用模式作为工作模式,实现了带宽为

收稿日期:2012-08-03,修回日期:2013-06-03

Received date: 2012-08-03, revised date: 2013-06-03

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CB933603);国家自然科学基金(60877058, U1134006, 61101041);中央高校基本科研业务费(ZYCX2011J041)

Foundation items: Supported by National Key Basic Research Program of China (2013CB933603), National Natural Science Foundation of China (60877058, U1134006, 61101041), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYCX2011J041)

作者简介 (Biography): 雷蕾(1987-),男,湖南永州人,硕士研究生,主要研究领域为太赫兹技术。E-mail: lleichina@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: dwliu212220@163.com

2 GHz、中心频率为 0.42 THz 的二次谐波频率连续可调同轴回旋管,分析了内导体左右纵向移动时谐振频率、品质因数和输出功率的变化。

1 理论分析

与圆柱谐振腔相比,同轴腔可在工作模式很好地克服模式竞争,并能有效解决散热和回旋管电子注电压下降问题.本文所研究的同轴开放式谐振腔如图 1 所示,包括输入渐变段、中间均匀段和输出渐变段.表 1 给出了同轴谐振腔的具体参数.自洽非线性理论忽略空间电荷效应,同时考虑了电磁场对电子的作用和电子对电磁场的反作用,是分析回旋管注波相互作用的一种较好的方法.注波相互作用自洽非线性方程组^[12-13]:

$$j\mu\omega\epsilon \frac{\partial V_{mn}}{\partial t} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_{mn}^2\right)V_{mn} + \frac{\partial^2 V_{mn}}{\partial z^2} = j\mu\omega C_{mn}I$$

$$\frac{\mu_{mn}}{R_{in}} Z_{m-l} \left(\frac{\mu_{mn}}{R_{in}} R_e\right) \frac{1}{2^l (l-1)!} \left(\frac{c\mu_{mn}}{\eta B_0 R_{in}}\right)^{l-1} \left(\frac{1}{\gamma_n \beta_{z0}} P^n\right), \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dz} + j\left(\frac{\Omega}{c\beta_z} - \frac{\Omega_0}{\gamma c\beta_z}\right)P = -\frac{\eta}{c^2 \beta_z} \sum_{mn} C_{mn} V_{mn}$$

$$\frac{\mu_{mn}}{R_{in}} Z_{m-l} \left(\frac{\mu_{mn}}{R_{in}} R_e\right) \frac{1}{2^l (l-1)!} \left(\frac{c\mu_{mn}}{R_{in} \eta B_0}\right) (P^*)^{l-1}, \quad (2)$$

$$Z_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R_{in}}\right) = J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R_{in}}\right) N'_m(\mu_{mn}) - N_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R_{in}}\right) J'_m(\mu_{mn}), \quad (3)$$

$$C_{mn} = \frac{1}{\sqrt{\pi \left[\left(\frac{\mu_{mn} R_{out}}{R_{in}}\right)^2 - m^2 \right]^2 \left(\frac{\mu_{mn} R_{out}}{R_{in}}\right) - \pi(\mu_m^2 - m^2) Z_m^2(\mu_{mn})}}, \quad (4)$$

式中, ω 为角频率, c 为光速, I 为电子注电流, η 为荷质比, γ 为相对论因子, V_{mn} 为模式电压, k_{mn} 为横向波数, P 为动量, $\mu_{mn} = k_{mn} R_{in}$, β_z 为电子纵向速度与光速比, R_{in} 和 R_{out} 分别为内外半径, R_e 为电子注引导中心半径, l 为谐波次数。

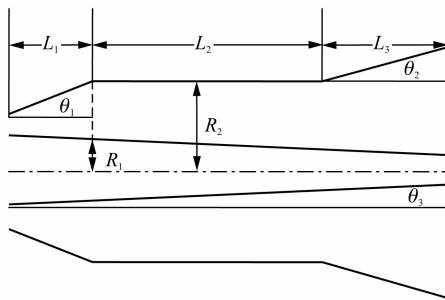


图 1 同轴谐振腔剖面
Fig. 1 The profile of coaxial resonator

表 1 同轴谐振腔参数

Table 1 Parameters of the coaxial resonator

L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	R_1/mm	R_2/mm	$\theta_1/\text{度}$	$\theta_2/\text{度}$	$\theta_3/\text{度}$
7	12	10	0.7	2.75	5	2	-0.1

2 模拟计算

2.1 模式竞争分析

随着回旋管工作频率的升高,工作磁场强度也要相应升高,磁场造价也将相应提高.采用二次谐波所需磁场仅为一次谐波的一半,可以极大地降低所需工作磁场.但二次谐波竞争模式一般较多,必须选取合适的起振电流加以克服^[14-16].当内导体处于中心位置时,各个模式起振电流如图 2 所示.图 3 给出了工作模式 $TE_{8,5}$ 起振电流随内导体左右移动的变化,当内导体左移时起振电流将右移,内导体右移时则与之相反.由图 3 可知,当选取的工作磁场在 δ_1 之中时,选取较小的工作电流就可以保证在频带范围内工作模式都能起振.多次模拟计算结果表明随着内导体左右移动,竞争模式数量基本不变,各个竞争模式起振电流变化规律与工作模式相同.图 4 给出了当内导体左移 30 mm 时竞争模式二次谐波 $TE_{13,3}$ 模和 $TE_{10,4}$ 模的起振电流和当内导体右移 30 mm 时竞争模式一次谐波 $TE_{4,3}$ 模和二次谐波 $TE_{6,6}$ 模式的起振电流.显然当工作磁场位于 δ_2 之间时可实现回旋管在整个频带范围内单模工作.综合图 2~图 4 可以看出,当选取的工作磁场在 δ_1 和 δ_2 交集之中时,可在较低的工作电流下,实现回旋管在频带范围内单模工作,经过多次计算和优化,选定工作磁场为 $B_0 = 8.145 \text{ T}$.

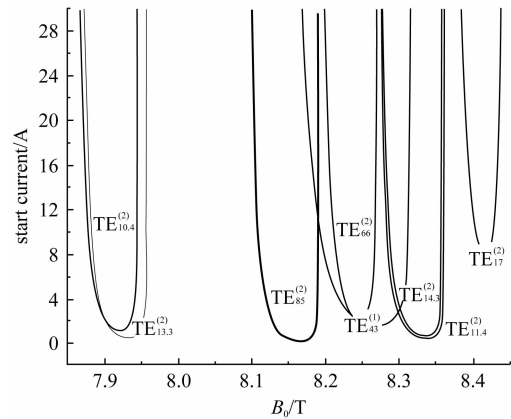


图 2 起振电流图(电子注电压为 40 kV,电子横纵速度比为 2)

Fig. 2 Strat current (beam voltage = 40 kV, velocity ratio = 2)

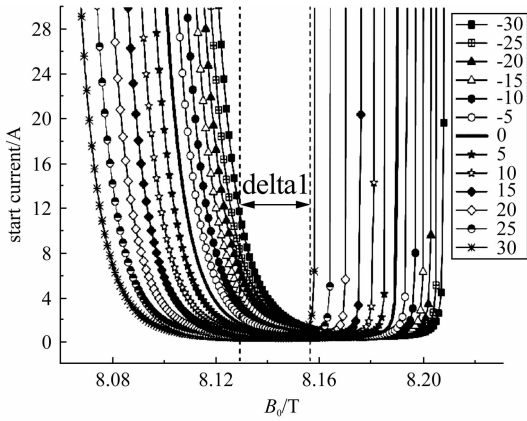


图3 工作模式起振电流随内导体移动变化(“-左移”, “+右移”)
 Fig.3 Operating mode star current with inner conductor shift (“- represent left shift”, “+ represents right shift”)

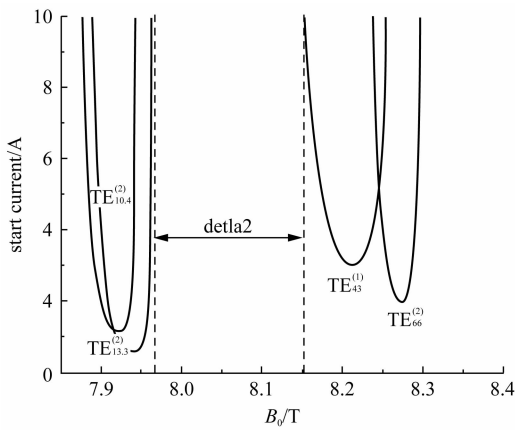


图4 竞争模式电流随内导体移动变化
 Fig.4 Competition mode star current with inner conductor shift

2.2 谐振频率随内导体左右纵向移动变化

在上述模型和讨论的基础上,编写了频率连续可调同轴回旋管数值模拟软件.图5、图6给出了内导体纵向移动时谐振频率和品质因数的变化.

很明显,当内导体左移时谐振频率近似单调线性上升,品质因数呈下降趋势;当内导体右移时谐振频率近似单调线性下降,品质因数呈上升趋势,说明内导体纵向移动可有效实现频率连续可调.

2.3 输出功率随内导体左右纵向移动变化

本文设计的腔体内导体的倾角很小,左右移动可以改变腔体的谐振频率,但腔体的衍射品质因数化不大,注波耦合系数的变化也不大,因此可以保证在较大的频率变换范围内有较高的注波相互作用效率,有较大的功率输出.基于式(1)~式(4),运用MATLAB软件编写了基于时域自洽非线性理论回旋

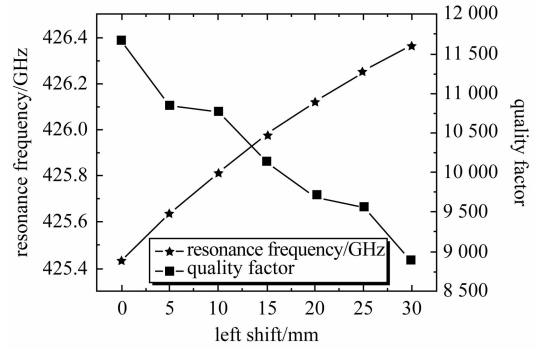


图5 谐振频率和品质因数随内导体左移变化
 Fig.5 Resonance frequencies and quality factors with inner conductor left shift

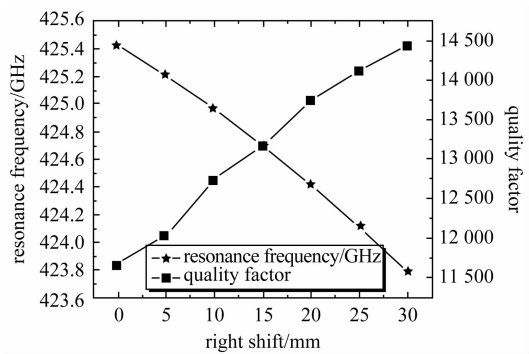


图6 谐振频率和品质因数随内导体右移变化
 Fig.6 Resonance frequencies and quality factors with inner conductor right shift

管仿真平台.表2给出了回旋管的各项工作参数,在不改变工作磁场条件下,图7给出了运用相关仿真平台计算的输出功率随内导体纵向移动的变化.由图7可看出,当内导体左移时,输出功率呈下降趋势,右移时呈上升趋势.在调节带宽范围内,均可实现大于8 kW的功率输出.

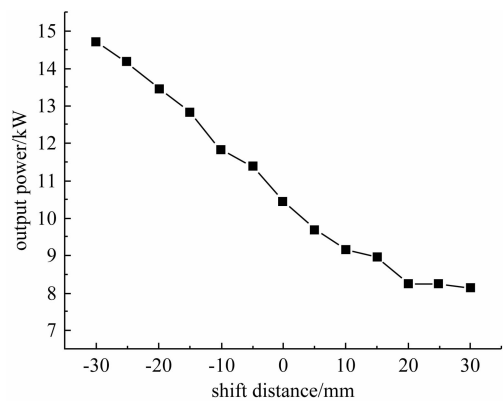


图7 输出功率图(“-”代表左移,“+”代表右移)
 Fig.7 output power (“-” represents left shift, “+” represents right shift)

表 2 回旋管工作参数

Table 2 Operating parameters of gyrotron

工作磁场	8.145 T	横纵速度比	2
工作电压	40 kV	R_e	1.313 mm
工作电流	8 A		

3 结论

利用纵向移动具有一定倾角的同轴谐振腔内导体的方式,实现了带宽为 2 GHz、中心频率 0.42 THz 二次谐波频率连续可调同轴回旋管。基于回旋管自洽非线性理论,编写了频率连续可调回旋管模拟软件,分析了谐振频率和输出功率随内导体左右纵向移动的变化。由图 5、图 6 可以看出,当内导体左移时谐振频率将近似单调线性上升,右移时谐振频率将近似单调线性下降。由图 7 可看出,在不改变工作磁场条件下,带宽范围内,均可实现大于 8 kW 的功率输出。本方法物理实验的关键在于内导体调节以及内导体调节时回旋谐振腔内真空度的保证。相关实验拟采用步进电机对内导体进行左右调节,同时为了保证调节时回旋谐振腔的真空度,整个回旋管将置于动态系统中。

REFERENCES

- [1] Chu K R. The electron cyclotron maser [J]. *Rev Modern Phy*, 2004, **76**(2): 489 - 540.
- [2] YAN Yang, LIU Sheng-Gang, LI Xiao-Yun, *et al.* Design and demonstration of a 0.2 THz gyrotron oscillator [J]. *Chinese Science Bulletin* (鄢扬, 刘盛纲, 黎晓云, 等. 0.22 THz 回旋管振荡器的研制与实验. *科学通报*), 2009, **54**(4): 522 - 526.
- [3] Du C H, Liu P K. Beam-wave coupling strength analysis in a gyrotron traveling-wave tube amplifier [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*. 2010, **31**(6): 714 - 723.
- [4] Bratman V, Glyavin M, Idehara T, *et al.* Review of subterahertz and terahertz gyrodevices at IAP PAS and FIR FU [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, **37**(1): 36 - 43.
- [5] Notake T, Saito T, Tatematsu Y, *et al.* Development of a novel high power sub-THz second harmonic gyrotron [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2009, **103**(22): 225002.
- [6] Bratman V L, Glyavin M Y, Kalynov Y K, *et al.* Terahertz gyrotrons at IAP RAS; status and new designs [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2011, **32**: 371 - 379.
- [7] Ioannidis Z C, Dumbrajs O, Tigelis I G. Linear and non-linear inserts for genuinely wideband continuous frequency tunable coaxial gyrotron cavities [J]. *Int J Infrared Milli Waves*. 2008, **29**: 416 - 423.
- [8] Brand G F, Gross M. Continuously tunable, split-cavity gyrotrons [J], *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1985, **6**(12): 1237 - 1254.
- [9] Dumbrajs O, Nusinovich G S. Theory of a frequency-step-tunable gyrotron for optimum plasma ECRH [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1992, **20**(4): 452 - 457.
- [10] Koppenburg K, Dammertz G, Kuntze M, *et al.* Fast frequency-step-tunable high-power gyrotron with hybrid-magnet-system [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, **48**(1): 101 - 107.
- [11] Idehara T, Ogawa I, Mitsudo S, *et al.* Development of frequency tunable medium Power gyrotrons (Gyrotron FU Series) as submillimeter wave radiation sources [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(2): 340 - 354.
- [12] Liu D W, Yan Y, Liu S G. Time-dependent multi-mode nonlinear theory of dual-frequency operation coaxial gyrotron with two electron beams [J]. *Fusion Eng. Des.* 2012, **87**(9): 1533 - 1535.
- [13] Liu D W, Yuan X S, Liu S G. Coupled-mode theory of coaxial gyrotron with two electron beams [J]. *Fusion Engineering and Design*. 2008, **83**(4): 606 - 610.
- [14] 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.
- [15] Du C H, Liu P K, Xue Q Z, *et al.* Effect of a backward wave on the stability of an ultrahigh gain gyrotron traveling-wave amplifier [J]. *Physics of Plasmas*. 2008, **15**(123107): 1 - 8.
- [16] YUAN Xue-Song, MA Chun-Yan, FU Wen-Jie, *et al.* Multi-mode high harmonic operation in a terahertz gyrotron [J], *J. Infrared Millim. Waves* (袁学松, 马春燕, 傅文杰, 等. 高次谐波太赫兹回旋管的多模工作. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 342 - 347.