

0.6 THz 三次谐波回旋管的研究

马春燕,袁学松,韩 煜,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: 太赫兹回旋管是一类基于电子回旋受激辐射机理的快波器件,同时也是目前最具发展前景的高功率太赫兹辐射源.本文根据回旋管的线性理论和自治非线性理论对三次谐波、工作频率 0.6 THz 的回旋管进行了研究,重点讨论了引导中心分别为 0mm 的实心回旋电子注和 0.315mm 的空心回旋电子注的模式竞争.通过分析比较,发现工作频率在 0.6THz、三次谐波的众多模式中 TE₃₇ 模是一比较理想的工作模式,它不仅具有相对较高的功率输出,而且还有相对较少的模式竞争.本文中的设计采用 55kV/1.0A,电子注的速度横纵比为 1.5,在工作磁场 7.86T 下,数值计算结果表明输出功率达 4.73kW.

关键词: 回旋管;太赫兹;高次谐波

中图分类号: TN129

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 03-0495-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.014

Study of a 3rd-Harmonic 0.6 THz Gyrotron

MA Chun-yan, YUAN Xue-song, HAN Yu, YAN Yang

(Terahertz Science and Technology Research Centre, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Gyrotrons are high power millimeter-wave and terahertz radiation sources and have a broad range of applications to terahertz science and technology. The research of 0.6THz gyrotron with an axis-encircling electron beam operating in the TE₃₇ mode and third harmonic is presented according to the linear theory and nonlinear self-consistent theory of gyrotrons. And mode competition with the electron guiding center radii of 0mm and 0.315mm has been studied, respectively. The gyrotron operation at 55kV beam voltage and 1A beam current can generate 4.73kW output power at the frequency of 0.6 THz.

Key words: gyrotron; terahertz; high-harmonics

1 引言

太赫兹辐射是 0.1 ~ 10THz 的电磁辐射,从电磁频谱上看,太赫兹波段两侧的红外和微波技术已经非常成熟,然而由于太赫兹技术缺乏有效的产生和检测方法,使得发展还不够成熟.但是近年来,由于太赫兹技术在许多领域,如:断层成像技术、细胞水平的成像、无标记的基因检查,以及宽带通信等领域有广泛的应用需求,从而加快了太赫兹技术的发展^[1].随着太赫兹技术的迅速发展,对源的要求也越来越高,太赫兹辐射源也逐渐成为限制太赫兹科学技术迅速发展的瓶颈.回旋管作为目前输出功率最大的太赫兹辐射源器件^[2~4],已成为多数发达国家争先发展的领域,日本 FuKui 大学研制的 FU CW III 太赫兹回旋管,采用二次谐波,频率已达 1THz,输出功率可达百瓦级^[5~6];俄罗斯也报道了其工作频率达 1THz 的实验研究^[7~9];美国也进行了大量的

研究,报道了其在太赫兹频率的实验研究^[10];我国也对回旋管进行了大量的研究^[11~12],但多集中在微波毫米波频段.众所周之,采用一次谐波达到 1THz 时需要 40T,这样高的磁场,在现有的技术条件下是较难实现的,而回旋管的工作频率通常与谐波次数和工作磁场的乘积成正比,因此为了实现较小的磁场达到更高的频率,采用高次谐波是一个较好且可行的办法,如果采用三次谐波工作状态则可以将磁场强度减低为一次谐波的 1/3.当然,随着采用高次谐波的工作模式,模式竞争问题也突现出来.本文针对上述问题,根据回旋管的线性理论和自治非线性理论对三次谐波、工作频率为 0.6THz 的回旋管进行了研究,其工作模式采用 TE₃₇ 模,工作电流为 1.0A,工作电压为 55kV,电子注的横纵速度比 $\alpha = 1.5$,相互作用区引导磁场为 7.86T 注波相互作用效率为 8.61%,其输出功率达 4.73kW.

2 腔体设计与模式选择

对于工作在高次谐波频率上的回旋管,有以下关系式:

$$\omega \approx s\omega_c \quad (1)$$

其中: ω 是场的角频率, $\omega_c = eB/m\gamma$ 是电子的回旋频率, e, m, γ 分别是电子的电荷, 质量和相对论因子, s 是谐波次数, B 是磁场. 通过式(1)来确定磁场. 由于回旋管中的工作频率与构成腔体的波导的截止频率非常接近, 有如下关系式:

$$\omega = \nu_{n,p}c/a \quad (2)$$

其中, a 是腔体半径, c 是光速, $\nu_{n,p}$ 是 $J'_n(\xi) = 0$ 的第 p 个根. 通过式(2)来确定腔体半径.

太赫兹回旋管是一种快波器件, 可以工作在高阶模式, 但是当工作模式的阶数过高后, 其模式竞争就会非常严重; 另一方面为了使工作频率达到 0.6THz, 工作模式的阶数又不能太低, 否则腔体尺寸太小难于加工. 综合以上因数考虑, 并结合回旋管线性理论和冷腔计算程序, 采用三段式结构, 包括输入渐变段、中间均匀段和输出渐变段. 如图 1 所示.

电子回旋脉塞的不稳定性机理是电场的角向分量与电子注发生相互作用, 因此我们选择 TE 模式. 根据

大回旋电子注与工作模式 $TE_{n,p,1}$ 发生相互作用的耦合强度如式(3)^[7], 小回旋电子注与工作模式 $TE_{n,p,1}$ 发生相互作用的耦合强度如式(4)^[13]:

$$G_{\text{large}} = \frac{J_{n-s}^2(v_{n,p}R_0/a)}{J_n^2(v_{n,p})(v_{n,p}^2 - n^2)} \quad (3)$$

$$G_{\text{small}} = \frac{4(v_{n,p}r_c)(v_{n,p}R_0)}{(v_{n,p}a)^2} \cdot \frac{[J'_n(v_{n,p}r_c)J_{n-s}(v_{n,p}R_0)]^2}{\left(1 - \frac{n^2}{v_{n,p}^2a^2}\right) J_n^2(v_{n,p}a)} \quad (4)$$

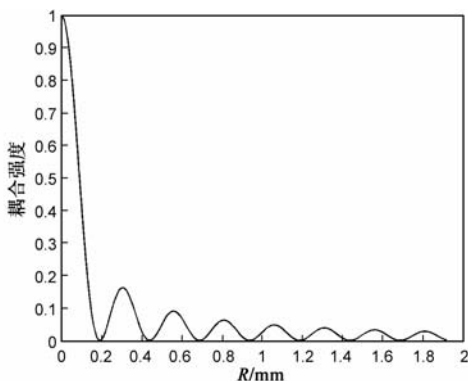


图2 大回旋公式计算出的耦合强度图

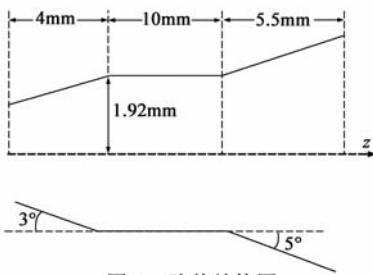


图1 腔体结构图

式中 $J_n(\xi)$ 是贝赛尔函数, $k = \omega/c$ 是波数, R_0 是引导中心半径. 由式(3)可知, 为了提高耦合强度, 谐波次数应在 $n = s$ 的谐波(即 3 次谐波)上. 考虑到腔体尺寸, 我们选择了 TE_{37} 模, 采用式(3)、(4)分别计算的 TE_{37} 模注波耦合强度与引导中心半径变化的关系图如图 2、3 所示. 由图可知小回旋计算公式在电子引导中心半径小于电子注回旋半径时计算结果是存在误差的.

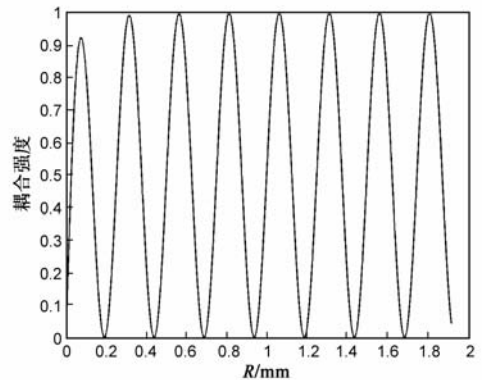


图3 小回旋公式计算出的耦合强度图

3 模式竞争的分析

根据回旋管的线性理论可以得到不同模式工作时的起振电流, 通过调节磁场和腔体尺寸等参数, 可以使工作模式的起振电流比其他竞争模式的起振电流小, 从而抑制模式竞争. 本文中重点研究分析了引导中心半径 $R_0 = 0$ 的实心回旋电子注和引导中心半径 $R_0 = 0.315$ mm 的空心回旋电子注的模式竞争. 对于第一种情况采用大回旋电子注的回旋管起振电流表达式 I_{large} ^[14]

$$I_{\text{large}} = \left(\frac{I_A}{Q}\right) \left(\frac{\omega}{n\Omega_0}\right) \left(\frac{\gamma_0 L a^2 \omega k^2 \beta_{z0}^2}{16c}\right) \left(1 - \frac{n^2}{v_{n,p}}\right) \cdot \left(\frac{J_n(v_{n,p})}{J'_n\left(\frac{v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_0}\right)}\right)^2 R(x)^{-1} \quad (5)$$

其中:

$$R(x) = \phi G(x) + \left(\frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{z0}}\right) \left(\frac{\omega}{n\Omega_c}\right) \left[\frac{\omega}{kc} - x^2 \left(\frac{kc}{\omega}\right)\right] G'(x),$$

$$\phi = \zeta + \xi + \psi,$$

$$\zeta = 2 - 2x \left(\frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{z0}}\right) \left(\frac{\omega}{n\Omega_c}\right) \left(\frac{kc}{\omega}\right),$$

$$\xi = \left[\left(\frac{an\Omega_c}{\beta_{\perp 0}cv_{n,p}}\right)^2 - 1 \right] \left[\frac{J_n\left(\frac{v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_c}\right)}{J'_n\left(\frac{v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_c}\right)} \right]^2,$$

$$\psi = \left(\frac{2v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_c}\right) \times \frac{J'_n\left(\frac{v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_c}\right)}{J'_n\left(\frac{v_{n,p}\beta_{\perp 0}c}{a\Omega_c}\right)},$$

$$G(x) = \left(\frac{\cos(\pi x/2)}{(1-x^2)}\right)^2,$$

$$x = (\omega - n\Omega_0) \gamma_0 / kv_{z0}$$

对于 $R_0 = 0.315\text{mm}$ 情况则采用小回旋电子注的回旋管起振电流 I_{small} [15]

$$I_{\text{small}} = \frac{4}{\pi\mu^2\mu x - s} e^{2x^2} I_0 \quad (6)$$

其中

$$x = \frac{\mu\Delta}{4}, \mu = \frac{\pi L\beta_{\perp 0}^2}{\lambda\beta_{z0}}, \Delta = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \left(1 - \frac{s\Omega_0}{\omega\gamma_0}\right),$$

$$I_0 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{5/2} \left(\frac{\epsilon_0 mc^3}{e}\right) \frac{\gamma_0 L \beta_{\perp 0}^{2(3-s)}}{Q\lambda} \left(\frac{2^s s!}{s^s}\right)^2 \cdot \frac{(v_{n,p}^2 - n^2) J_n^2(v_{n,p})}{J_{n-s}^2(k_{n,p} R_e)}$$

γ_0 为初始时刻的相对论因子, Ω_0 为非相对论回旋频率, Ω_c 为相对论回旋频率, λ 为自由空间的波长, L 为腔体长度, $G'(x)$ 为 $G(x)$ 的一阶导数, $J_n''(\xi)$ 为 $J_n(\xi)$ 的二阶导数, $k = q\pi/L$, $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0}/c$, $\beta_{z0} = v_{z0}/c$, s 为谐波次数, Q 为谐振腔的品质因数, $k_{n,p} = v_{n,p}/a$, R_e 为电子回旋半径. 由起振电流公式就可以得出每个模式的起振电流随磁场和电压变化的情况, 选择适当的参数就可以达到模式选择的目的.

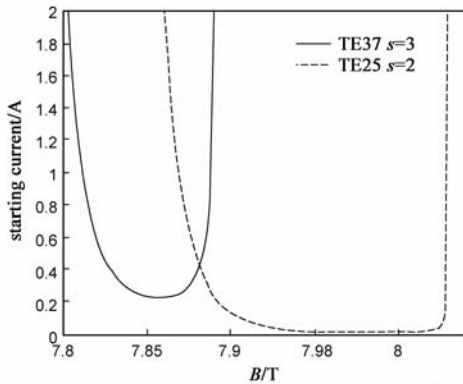


图4 引导中心半径为0mm时起振电流随磁场变化图

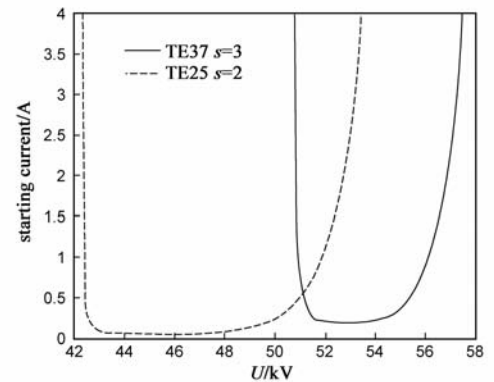


图6 引导中心半径为0mm时起振电流随电压变化图

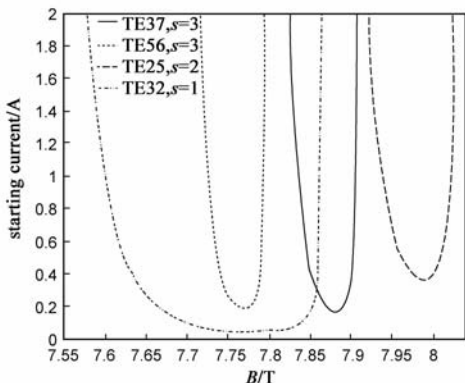


图5 引导中心半径为0.315mm时起振电流随磁场变化图

将相关数据代入式(5)、(6)计算, 得到了引导中心半径 R_0 分别为 0mm 和 0.315mm 时, 起振电流与磁场的

关系, 如图 4 和图 5 所示, 以及起振电流与电压的关系, 如图 6 和图 7 所示.

图 4 与图 5 是在工作电压固定为 55kV 时, 速度横纵比固定为 1.5 的条件下, 所作的起振电流随磁场变化的关系图. 由图可知, 当引导中心半径为 0mm 时, 相互作用区的引导磁场为 7.85T ~ 7.9T 时, TE₃₇ 模的起振电流较小, 容易起振, 而主要竞争模式 TE₂₅ 模的起振电流较大, 不易起振, TE₂₅ 模的起振电流在磁场范围为 7.91T ~ 8.02T 内较小; 当引导中心半径为 0.315mm 时, 相互作用区的引导磁场为 7.865T ~ 7.9T 时, TE₃₇ 模起振电流较小, 而主要竞争模式 TE₃₂ 模的起振电流较大, TE₃₂ 模起振电流最小值所对应的磁场在 7.78T 附近, 因此可以通过调整磁场大小来较好的抑制模式竞争. 因此本文中的设计所采用的引导中心半径为 0mm, 此时竞争模式相对较少.

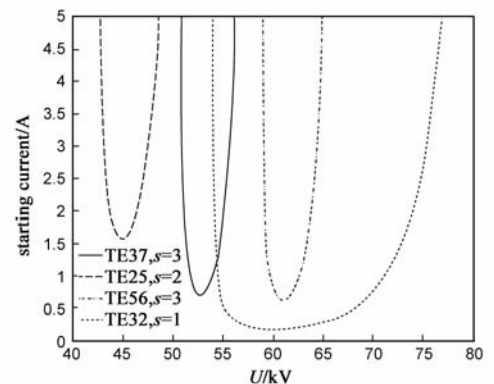


图7 引导中心半径为0.315mm时起振电流随电压变化图

图 6 与图 7 是在相互作用区磁场固定为 7.86T 的条件下, 所作的起振电流随电压变化的关系图. 引导中心半径为 0mm 时, 在电压 51.7kV ~ 56kV 内, 起振电流较小; 引导中心半径为 0.315mm 时, 在电压 51.5kV ~ 54.5kV 内, 起振电流较小. 比较可知, 随着引导中心半径的增大, 起振电流相对较小所对应的电压的变化范围越来越小, 所以模式竞争越来越严重. 当电压过低或

者过高时,起振电流就变得很高,使所需要的工作模式不能起振.

4 注波相互作用

本文主要采用回旋管的自洽非线性理论^[13]对注波相互作用效率进行研究.自洽非线性理论的一个优点就是它考虑了电子注对波导场的反作用,场的幅值是由电子与波相互作用的结果自洽地确定,是一种较为严格和准确的方法.根据电子运动方程和有源波动方程导出以下方程:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f(z)}{dz^2} &= \left[\frac{\omega^2}{c^2} - k_c^2(z) \right] f(z) \\ &= -j\omega\mu_0 \frac{I_0}{\beta_{z0}} \int_s \beta_{\perp 0}(r, t) \cdot E_{10} e^{j\omega t} ds \end{aligned} \quad (7)$$

其中: I_0 为电子注电流.

研究中发现,磁场和电压的变化可以影响到输出功率的大小.因此我们对磁场、电压与注波相互作用效率之间的关系进行了研究.通过大量计算得到了它们的关系曲线,如图8、图9所示.

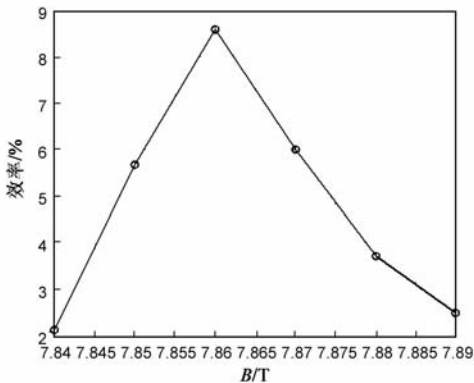


图8 磁场与注波相互作用效率的关系

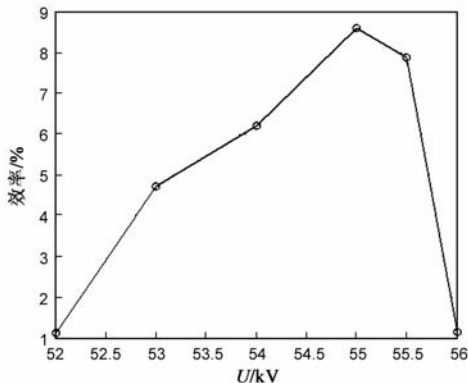


图9 电压与注波相互作用效率的关系

图8是在工作电压固定为55kV的条件下,所作的磁场与注波相互作用效率图.由图可知,注波相互作用效率基本上随着磁场值的升高而降低,但是没有线性关系,其中有些波动.所以,必须通过大量计算,找到场与

电子注的最佳互作用点.我们可以通过上述关系曲线,结合输出功率稳定和起振电流相对低的要求,得到使注波相互作用效率较高且满足要求的磁场值为7.86T.

图9是在工作磁场固定为7.86T的条件下,所作的电压与注波相互作用效率图.由图可知,在一定的电压范围内,注波相互作用效率随电压的增大而增大,这是因为电压的变化会直接影响电子的速度,从而影响到相对论因子和回旋频率,结果导致注波相互作用效率的变化.但超过这个范围后,不管其电压如何变化,注波相互作用效率都呈下降趋势.所以,我们要得到一个较高的注波相互作用效率和较稳定的输出功率,选择一个合适的电压值是非常关键的.考虑到在适当的电压范围内,注波相互作用效率随着电压的升高而增大,所以在许可的范围内,电压应尽量大.经过大量仿真模拟,本文中选取了55kV的工作电压,它不仅具有较高的注波相互作用效率、相对低的起振电流,而且还有较稳定的输出功率.

综合以上分析,结合冷腔计算程序,作者设计的0.6 THz回旋管相关参数如下表1所示.

5 结束语

本文基于回旋管线性、自洽非线性理论对工作频率为0.6 THz三次谐波工作模式为TE₃₇模的回旋管进行了研究,重点分析了引导中心半径 R_0 为0mm的实心回旋电子注和引导中心半径 R_0 为0.315mm的空心回旋电子注的模式竞争,研究结果表明当引导中心半径 R_0 为0mm时,虽然模式谱线较密,但模式竞争并不严重,其主要竞争模式为TE₂₅模,同时因为采用了三次谐波,大大减小了所需的磁场强度,使其设计更具工程实用性.通过计算得到了腔体尺寸,起振电流、磁场、电子注引导中心半径、注波相互作用效率等关键参数,并对电子注电流、电子注电压、电子速度横纵比 α 、幅度进行调节,保证了回旋管工作模式单一、稳定的功率输出.此外还研究了磁场和电压变化对回旋管注波相互作用的影响.通过对研究结果的分析,能够更加合理地选择各项参数,达到优化设计的目的.

参考文献

- [1] 刘盛纲.太赫兹科学技术的新发展[A].第270次香山科学会议[C].北京,2005.6-35.
Liu S G. Recent development of terahertz science and technology[A]. Xiangshan Science Conferences of No. 270[C]. Beijing, 2005. 6-35. (in Chinese).
- [2] Hong K D, et al. A 150-600 GHz step-tunable gyrotron[J]. J

表1 0.6THz回旋管参数表

工作模式	TE ₃₇
品质因数	21528
工作电压	55kV
工作电流	1A
冷腔谐振频率	0.6THz
横纵速度比	1.5

- Appl Phys, 1993, 74(15): 5250 – 5258.
- [3] Piosczyk B, et al. A 2-MW, 170-GHz coaxial cavity gyrotron [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2004, 32(3): 413 – 416.
- [4] Piosczyk B, et al. A 1.5-MW, 140-GHz, TE₂₈, 16-coaxial cavity gyrotron[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1997, 25(3): 460 – 464.
- [5] LaAgusu T, et al. Design of a CW 1THz gyrotron (gyrotron Fu Cw III) using a 20T superconducting magnet[J]. Int J Infrared Millim Waves, 2007, 28(1): 315 – 328.
- [6] T Idehara, et al. The first experiment of a THz gyrotron with a pulse magnet[J]. Int J Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(3): 319 – 331.
- [7] V Bratman, et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102: 245101.
- [8] V Bratman, et al. Review of sub-terahertz and terahertz gyrodevices at IAP RAS and FIR FU[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 36 – 43.
- [9] M Yu Glyavin, et al. Generation of 1.5kW, 1THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic Field[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(1): 015101.
- [10] Saito T, et al. Development of a sub terahertz high power pulse gyrotron for collective Thomson scattering[A]. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 33rd International Conference on [C]. Pasadena, CA: IEEE, 2008. 1 – 2.
- [11] 殷勇, 等. 35GHz, TE₀₂₁ 回旋速调管的电磁模拟[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1024 – 1027.
Yin Yong, et al. Electromagnetic simulation of a 35GHz, TE₀₂₁ gyrotron [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1024 – 1027. (in Chinese).
- [12] 袁学松, 等. 大半径同轴谐振腔太赫兹回旋管研究[J]. 电子学报, 2009, 37(2): 334 – 337.
Yuan Xue Song, et al. Theoretical study on a large radius coaxial cavity terahertz gyrotron[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 334 – 337. (in Chinese)
- [13] 刘盛纲. 相对论电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Liu S G. Theory for Relativistic Electronics[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [14] D B Mcdermott, et al. Small-signal theory of a large-orbit electron-cyclotron harmonic maser[J]. Phys Fluids, 1983, 26(7): 1936 – 1941.
- [15] B G Danly, et al. Generalized nonlinear harmonic gyrotron theory[J]. Phys Fluids, 1986, 29(6): 561 – 567.

作者简介



马春燕 女, 硕士. 1980年7月出生于四川德昌. 主要从事于太赫兹回旋管的研究.
E-mail: machunyan.cdut@163.com



袁学松 男, 博士, 讲师. 1980年11月出生于安徽合肥. 主要从事大功率毫米波和太赫兹辐射源方面的理论和实验研究工作.
E-mail: yuanxs@uestc.edu.cn

韩煜 男, 硕士. 1985年12月出生于四川成都. 主要从事于太赫兹回旋管的研究.

鄢扬 男, 工学博士, 教授, 博士生导师. 1965年3月出生, 从事微波电子学、等离子体电子学和太赫兹科学技术方面的理论和实验研究工作, 担任国家 863 强辐射重点实验室太赫兹研究中心副主任.