

文章编号:1001-9014(2012)02-0127-05

小回旋三次谐波 0.52 THz 回旋管

袁学松, 马春燕, 韩煜, 鄢扬

(电子科技大学 太赫兹科学技术研究中心, 四川 成都 610054)

摘要:为了发展大功率高效率太赫兹辐射源,对小回旋电子注激励三次谐波太赫兹电子回旋脉塞进行了研究,分析了不同参数情况下的模式竞争. 研究表明,采用近轴小回旋电子注能够实现三次谐波单模振荡. 在此基础上设计了一只 0.52 THz, TE₃₇ 模三次谐波回旋管,数值计算表明,该回旋管在工作磁场为 6.98 T 下输出功率可以达到 3.7 kW. 对产生近轴小回旋电子注的高磁压缩比磁控注入式电子光学系统进行的粒子模拟研究结果表明,该电子枪能够产生满足实验要求的 65 kV/2.5 A, 横纵速度比为 1.24, 引导中心半径 0.35 mm 的小回旋电子注,其纵向速度离散 6.6%, 横向速度离散 6.1%.

关键词:回旋管; 太赫兹; 高次谐波; 模式竞争

中图分类号: TN128 **文献标识码:** A

A 0.52THz third harmonic little-orbit gyrotron

YUAN Xue-Song, MA Chun-Yan, HAN Yu, YAN Yang

(Terahertz S&T Research Center, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A third harmonic little-orbit gyrotron oscillator is investigated theoretically in order to develop high power and efficiency terahertz (THz) radiation sources. Mode competition with different electron-beam parameters have been investigated in a 0.52 THz third harmonic TE₃₇ mode gyrotron oscillator, which can generate 3.7kW of RF power at resonant magnetic field 6.98T. In addition, a high magnetic compression ratio magnetron injection gun (MIG) with 65 kV/2.5 A has been developed. PIC simulation results show that the velocity ratio of electron beam is 1.24, the average beam radius in the cavity is 0.35 mm. The spread of perpendicular and parallel velocities are 6.1% and 6.6%, respectively.

Key words: gyrotron; terahertz; high-harmonic; mode competition

PACS: 84.40.1k

引言

近年来随着太赫兹科学技术的迅速发展,对于太赫兹辐射源技术参数要求也愈来愈高^[1]. 回旋管作为一种太赫兹辐射源器件,已在太赫兹雷达、远程通信及热核聚变等方向有较大应用前景,受到国内外同行的广泛关注. 俄罗斯^[2]、日本^[3]、美国^[4]等进行了大量的研究,国内也有相关单位在对太赫兹回旋管进行研究^[5-6]. 根据回旋管工作原理可知,当回旋管工作在一次谐波 1THz 时,所需的工作磁场约为 40 T,如此高的工作磁场实现起来非常困难. 如果采用 l 次谐波工作方式,工作磁场则可以降低到一次谐波所需的 l 分之一,当然采用高次谐波工

作又会带来新的问题:模式竞争. 目前国际上在回旋管的研究报道中一般多采用二次谐波工作,为了进一步降低磁场,俄罗斯应用物理研究所在 PRL 上报道了他们采用三次谐波工作的回旋管^[7-8],该方案虽然能够较好的解决模式竞争,但其所需的电子光学系统非常复杂. 此外由于采用大回旋绕轴运动电子注,在空间电荷限制电流的作用下,电子注的电流也很难提高,这直接影响了太赫兹回旋管的输出功率. 另一方面除了上述报道的大回旋三次谐波太赫兹回旋管以外,其它高次谐波太赫兹回旋管多数采用小回旋电子注二次谐波工作方式. 为了能够更好的解决三次谐波太赫兹回旋管的工作问题,避开大回旋电子光学系统研制的复杂性和局限性,文中对小回

收稿日期:2011-06-12,修回日期:2011-12-23

Received date: 2011-06-12, revised date: 2011-12-23

基金项目:国家自然科学基金(61101041,60877058);中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2009J048)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61101041,60877058) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. ZYGX2009J048)

作者简介:袁学松(1980-),男,安徽合肥人,讲师,博士,主要研究领域为大功率毫米波、太赫兹辐射源. E-mail: yuanxs@uestc.edu.cn.

旋三次谐波太赫兹回旋管进行了理论和模拟研究,探讨了小回旋电子注激励下三次谐波工作模式单模振荡的条件.同时还对用于产生近轴小回旋电子注的高磁压缩比磁控注入式电子光学系统进行了研究.通过传统磁控注入式电子枪基础上进一步提高磁压缩比以降低电子注引导中心半径,来保证三次谐波太赫兹回旋管的单模振荡.

1 小回旋三次谐波太赫兹回旋管注波相互作用研究

关于回旋管注波相互作用的研究通常有回旋管线性理论、非线性理论和粒子模拟三种方法.对于高次谐波太赫兹回旋管而言,由于其工作在高频率和高阶模式状态,一般粒子模拟软件很难适用.回旋管线性理论是以动力学理论为基础,由弗拉索夫方程求解电子在平衡态下的扰动分布函数,再利用扰动分布函数求解扰动电流密度,最后根据扰动电流密度求解麦克斯韦方程组得出色散方程,耦合注波系数及起振电流等,利用线性理论可以快速求得回旋管部分设计参数,如谐振腔波导半径,工作磁场范围,电子注位置等,此外根据不同模式的起振电流还可以初步研究模式竞争问题.回旋管非线性理论则是一种较完备的方法,它将三维注波相互作用方程化简为一维标量方程后再求解,与粒子模拟软件相比极大的提高了计算效率,而与线性理论相比它不仅考虑电子注通过谐振腔时整个注波相互作用过程,还考虑了电子注对高频场的反作用,因此回旋管非线性理论计算模拟精度相对较高.

根据电子回旋脉塞不稳定性机制,回旋电子注主要与高频电场的角向分量发生相互作用,因此在研究回旋管时通常选择 TE 模式作为工作模式^[11].根据回旋管线性理论可知,电子注与高频场发生相互作用的耦合强度表达式为

$$C_o = \frac{J_{n-s}^2(k_{n,p}R_0)}{J_n^2(v_{n,p})(1 - n^2/v_{n,p}^2)}, \quad (1)$$

式中 s 表示谐波次数, $v_{n,p}$ 表示 n 阶贝塞尔函数导数的第 p 个根, $k_{n,p} = v_{n,p}/R_{out}$, R_0 为电子注引导中心半径.由式 1 可知当 $n = s$ 时,耦合系数 C_o 的分子为零阶贝塞尔函数,其数值相对较大,故可以选择 TE_{3n} 模作为工作模式.另外根据文献[9]可知回旋振荡器件的工作频率通常处在谐振腔波导的截止频率附近,因此根据先前相关实验条件作者选择结构简单的三段式圆波导谐振腔,其中间均匀

段圆波导半径 $R_{out} = 2.2 \text{ mm}$, 对应圆波导 TE_{37} 模截止频率为 523.6 GHz , 图 1 中给出了回旋管的整体结构示意图.

根据式(1)计算出的注波耦合系数随半径的变化图见图 2. 由图 2 可知电子注引导中心半径可以取耦合系数峰值点位置,如 $R_0 = 0 \text{ mm}$ 、 0.35 mm 、 0.64 mm 等,通常当电子引导中心半径越靠近波导轴线时,模式竞争越弱,相应回旋电子注的产生也越难.由文献[10]可知当电子注引导中心半径为零时,模式竞争相对较弱,对于工作模式 TE_{37} 模只有二次谐波 TE_{25} 模有可能参与模式竞争.但此时传统的电子光学系统已不能满足要求,必须采用大回旋电子光学系统.为了避免采用上述复杂大回旋电子光学系统,必须将电子注引导中心半径增大,由图 2 可知随着引导中心半径的增大耦合系数将逐渐降低,因此文中主要研究 R_0 为 0.35 mm 和 0.64 mm 两种情况下的模式竞争.

根据回旋管线性理论,通过计算不同模式的起振电流大小,可以研究不同模式的竞争强弱,通常起振电流越低,其模式竞争就越强.起振电流计算表达式为^[8]

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

其中

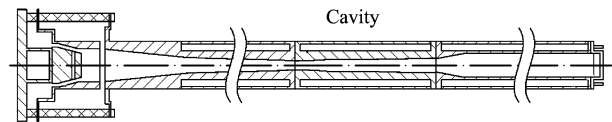


图 1 0.52 THz 回旋管结构示意图
Fig. 1 Structure of the 0.52 THz gyrotron

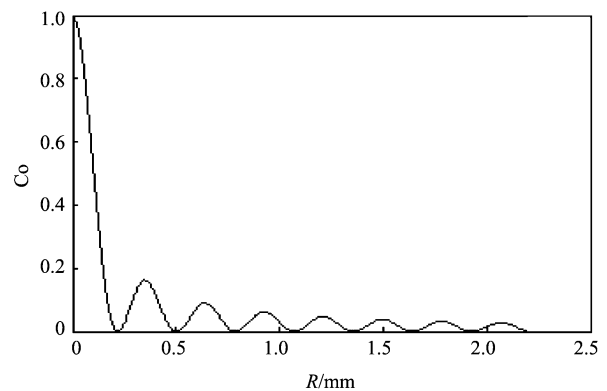


图 2 归一化注波耦合系数随电子注引导中心位置变化图
Fig. 2 Normalized coupling coefficient as a function of beam radius

$$I_0 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{\epsilon_0 m_e c^3}{e}\right) \frac{\gamma_0 L \beta_{\perp 0}^{2(3-s)} \left(\frac{2^s s!}{s^s}\right)^2}{Q \lambda} \cdot (v_{n,p}^2 - n^2) J_n^2(v_{n,p}) / J_{n-s}^2(k_{n,p} R_0)$$

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

$\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0}/c, \beta_{z0} = v_{z0}/0, \lambda$ 为自由空间的波长, L 为腔体长度, γ_0 为初始时刻的相对论因子, Ω_0 为非相对论回旋频率。

根据上式计算出的 0.35 mm 及 0.64 mm 两种情况下的模式竞争如图 3、图 4 所示。在计算中先通过回旋管冷枪计算程序^[9] 计算出谐振腔腔体的绕射品质因数 Q_d 和腔体的固有品质因数即波导壁欧姆损耗引起的品质因素 Q_0 , 再计算出总品质因数 Q_t 带入式(2) 得到不同模式的起振电流随磁场的变化图。

由图 4 可知, 当电子注引导中心半径为 0.35 mm 时, TE₃₇ 模的最低起振电流为 1.5 A, 此时一次谐波 TE₃₂ 模已对工作模式产生了较严重的模式竞争, 但通过调整磁场和工作电流是有可能解决的。而对于电子注引导中心半径为 0.64 mm 时, 在工作模式 TE₃₇ 模的左边一次谐波 TE₃₂ 模的起振电流非常低, 其竞争非常强, 右边二次谐波 TE₂₅ 的起振电流也非常低, 另一方面随着电子注引导中心半径的增大, 三次谐波工作模式 TE₃₇ 模的起振电流也成倍增加, 起振电流最低达到 3A 左右。因此可知当电子注引导中心半径为 0.64 mm 时, 工作模式 TE₃₇ 模由于一次和二次谐波的模式竞争将被完全抑制。所以在三次谐波 0.52THz 回旋管的设计过程中, 电子的引导中心半径最多可以选择 0.35 mm, 即便如此磁场可变的范围也相对较小。相关的设计计算参数见表 1。

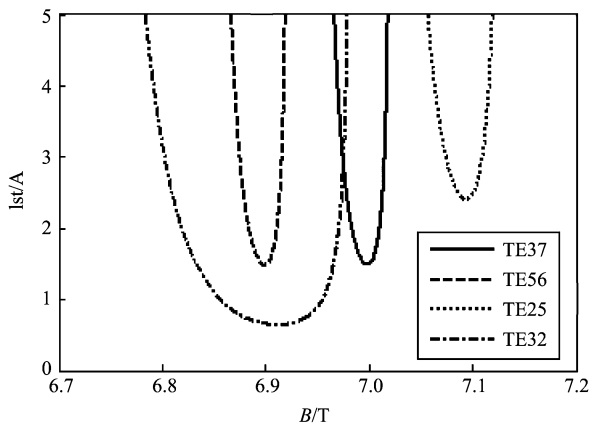


图 3 电子注引导中心半径为 0.35 mm 时不同模式起振电流随磁场变化图

Fig.3 Starting current as a function of magnetic field with different modes ($R_0 = 0.35$ mm)

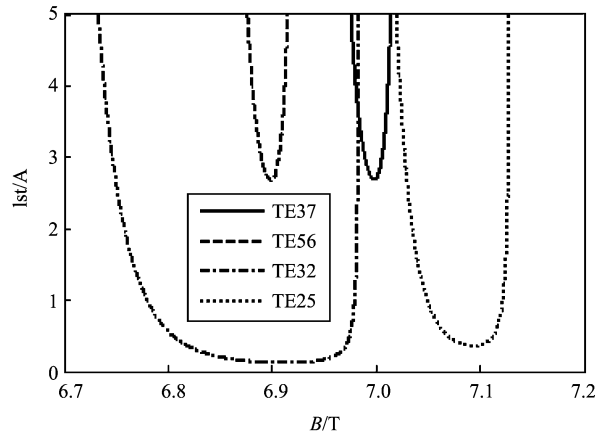


图 4 电子注引导中心半径为 0.64 mm 时不同模式起振电流随磁场变化图

Fig.4 Starting current as a function of magnetic field with different modes ($R_0 = 0.64$ mm)

表 1 三次谐波 TE₃₇ 模 0.52 THz 回旋管参数

Table 1 The parameters of the 3rd-harmonic 0.52 THz gyrotron

谐振腔截止段长度 L_1	5 mm
谐振腔中间段长度 L_2	14 mm
谐振腔输出段长度 L_3	4 mm
谐振腔中间段半径 R_{out}	2.2 mm
谐振腔谐振频率 f	523.7 GHz
谐振腔固有品质因数 Q_0	2.37×10^4
谐振腔绕射品质因数 Q_d	3.46×10^4
谐振腔总品质因数 Q_t	1.41×10^4
电子注引导中心半径 R_0	0.35 mm
注波相互作用区磁场 B	6.98 T
电子注电压 V	65 kV
电子注电流 I	2.5 A
电子注纵横速度比 α	1.25

为了更进一步地研究注波相互作用, 文中还采用了回旋管时域多模非线性理论对模式竞争和注波相互作用过程进行了模拟研究, 根据时域多模非线性注波相互作用方程

$$Q_j P_j = \omega_j W_j = \frac{\omega_j \epsilon_0}{2} F_j^2(t) \int_{z_{in}}^{z_{out}} |f_j(z)|^2 dz, \quad (3)$$

$$\frac{Q_j}{\omega_j} \frac{dP_j}{dt} = \eta_j UI - P_j, \quad (4)$$

式中 j 表示不同模式, Q_j 表示的是谐振腔中模式 j 的总品质因数, P_j 表示电子与模式 j 相互作用的输出功率, $f_j(z)$ 表示模式 j 归一化的冷腔纵向分布, F_j 表示模式 j 的幅值且 $F_j(t)|_{t=0} \rightarrow 0$, 图 5 给出了时域多模非线性理论模拟计算结果。由图 5 可知 TE₃₇ 是能够单模振荡的, 注波相互作用输出功率可以达到 3.7 kW。

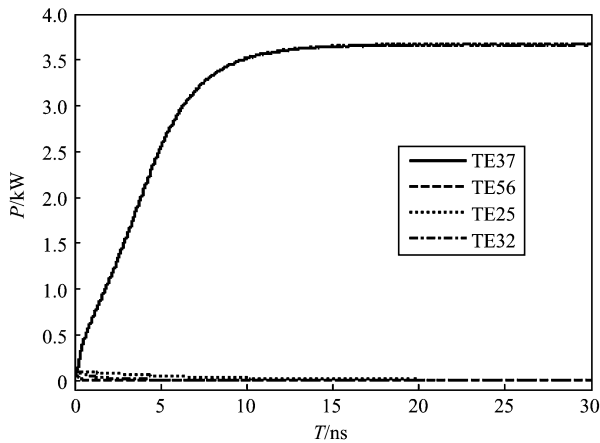


图 5 时域多模非线性理论模拟计算注波相互作用结果
Fig. 5 Mode competition of the 3rd-harmonic 0.52 THz gyrotron based on time dependent multi-mode nonlinear theory

2 高磁压缩比电子光学系统研究

为了能够较好地解决 0.52 THz 三次谐波回旋管中的模式竞争问题,近轴小回旋电子注被采用.这实际上是将克服模式竞争的困难部分转嫁给了电子光学系统,因此研究设计出符合注波相互作用要求的电子光学系统就显得至关重要.根据回旋管电子光学系统设计原理,其阴极发射面半径与注波作用区电子注引导中心半径的关系式为

$$R_k = \sqrt{f_m (R_0^2 - r_c^2)} \quad (5)$$

$$f_m = B_k / B_0 \quad (6)$$

式中 R_k 表示阴极发射面中心位置半径, f_m 为磁压缩比, r_c 表示电子回旋半径, B_k 表示阴极发射面区域纵向磁场.由上式可知,当电子注引导中心半径较小时,必须采用高磁压缩比的电子光学系统,才能保证阴极尺寸足够大.针对上文研究得出的 0.35 mm 引导中心半径,在磁压缩比为 30 左右时阴极发射面中心半径为 1.8 mm,阴极发射区轴向磁场强度为 0.235 T.采用 2.5 维粒子模拟软件 MAGIC 对电子光学系统进行研究,图 6 给出磁场随轴向位置的变化图,该图磁场分布曲线是根据电子科技大学太赫兹研究中心 9.2 T 超导磁场系统实测曲线拟合出来的.

在研制电子光学系统时作者采用传统双阳极结构,该结构与单阳极电子光学系统相比,可以通过调节调制阳极的电压来有效地调节回旋管电子注横纵速比 α ,控制速度离散等.优化的设计模拟结果如图 7 所示.由图 7(a) 电子运动的轨迹图可知电子注引导中心半径为 0.348 mm,其中阴极发射带宽 1.1

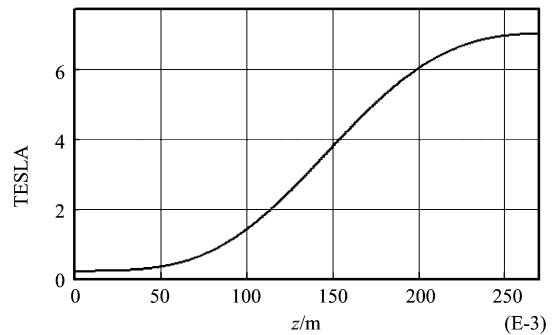


图 6 轴向磁场随轴线变化图
Fig. 6 Axial magnetic field profile on axis

mm,电流发射密度为 20 A/cm².图 7(b) 给出了电子注横向速度与纵向速度比 α 随轴向位置的变化图,由图可知电子在 10.5 kV 调制阳极电压加速下由阴极发射出来后,其横向速度是纵向速度得 4 倍,随后在 65 kV 阳极电压的加速下其纵向速度迅速增加,再经过磁场的绝热压缩后 α 达到 1.24.

关于回旋电子注的速度离散计算结果如图 8 所示.由图可知随着调制阳极电压升高,回旋电子注的横向速度离散变化不大,但纵向速度离散和横纵速

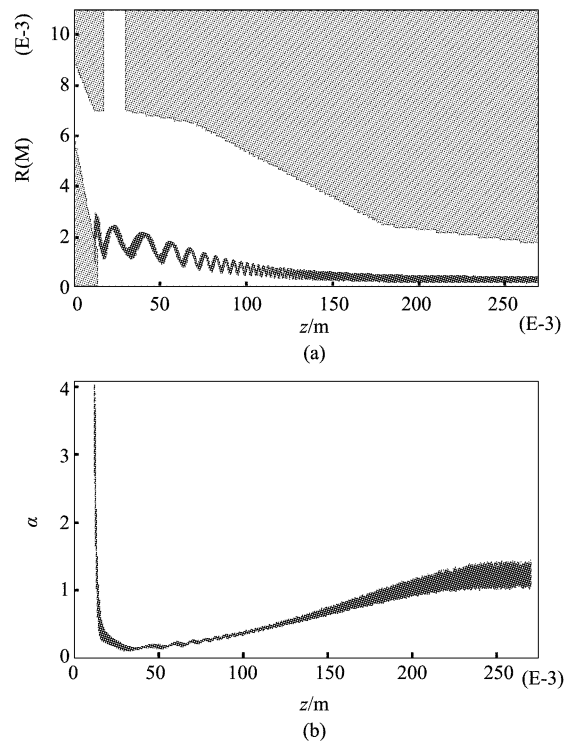


图 7 电子光学系统模拟计算结果 (a) 电子注轨迹图, (b) 电子注横纵速度比随轴向位置变化
Fig. 7 The trajectories of electron beam (a), the ratio of the perpendicular velocity to the parallel velocity of the electron beam on axis (b)

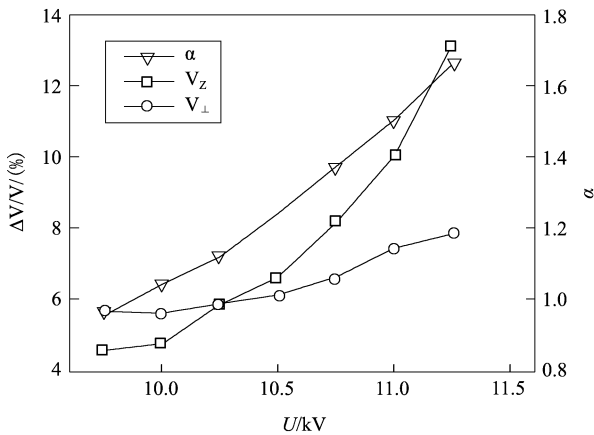


图 8 调制阳极对电子注参数影响变化图
Fig. 8 Sensitivity of design to control anode voltage

度比 α 则迅速增大,对于调制阳极电压为 10.5 kV 时,纵向速度离散为 6.6%,横向速度离散为 6.1%.

3 结论

对采用小回旋电子注激励三次谐波太赫兹电子回旋受激辐射的可行性进行了详细的理论、模拟研究,分析计算了不同参数下的三次谐波太赫兹回旋管中模式竞争. 研究表明,采用小回旋电子注激励三次谐波单模振荡是可行的,但必须采用近轴小回旋电子注来抑制模式竞争. 当然近轴小回旋电子注的产生相对于大回旋电子注而言,其磁场系统相对简单,同时能够获得更大的工作电流和输出功率. 为此文中进一步采用粒子模拟软件对用于产生近轴小回旋电子注的高磁压缩比电子光学系统进行了模拟研究,研究表明,三次谐波太赫兹回旋管所需的近轴小回旋电子光学系统能够很好地实现. 上述研究表明,在太赫兹频段要实现三次谐波大功率电子回旋受激辐射,并不一定要采用复杂的大回旋电子光学系统,同时该成果也为下一步进行实验研究提供理论基础和技术参考,对推动我国太赫兹

科学技术特别是大功率太赫兹辐射源技术的发展起到了积极作用。

REFERENCES

- [1] LIU Sheng-Gang. Recent development of terahertz science and technology[J]. *China Basic Science* (刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展. *中国基础科学*), 2006, **8**(1): 7-12.
- [2] Glyavin M Y, Luchinin A G., Golubiatnikov G Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(1): 015101.
- [3] Idehara T, Tsuchiya H, Watanabe O, 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.
- [4] Hornstein M K, Bajaj V S, Griffin R G, et al. Continuous wave operation of a 460 ~ GHz second harmonic gyrotron oscillator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, **34**(3): 524-533.
- [5] Yan Y, Liu S G, Li X Y, et al. Development and experiment of 0.22 THz gyrotron[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(4): 522-526.
- [6] YUAN Xue-Song, YAN Yang, LIU Sheng-Gang. Theoretical study on a large radius coaxial cavity terahertz gyrotron[J]. *Acta Electronica Sinica* (袁学松, 鄢扬, 刘盛纲. 大半径同轴谐振腔太赫兹回旋管研究. *电子学报*), 2009, **37**(2): 334-337.
- [7] Bratman V L, Kalynov Y K, Manuilov V N. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(24): 245101.
- [8] Bratman V L, Kalynov Y K, Manuilov V N, et al. Submillimeter-wave large-orbit gyrotron[J]. *Radio physics and Quantum Electronics*, 2005, **48**(10): 731-736.
- [9] YUAN Xue-Song, YAN Yang, ZHONG Ren-Bin, et al. Design of a 220 GHz gyrotron oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams* (袁学松, 鄢扬, 钟任斌, 等. 220GHz 回旋单腔管的设计. *强激光与粒子束*), 2007, **19**(10): 1677-1679.
- [10] Bratman V L, Fedotov A E, Kalynov Y K, et al. Moderately relativistic high-harmonic gyrotrons for millimeter/submillimeter wavelength band[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(2): 456-461.
- [11] 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.