文章编号: 2095-4980(2014)01-0024-04

大功率太赫兹回旋管的腔体分析与模拟

雷文强,蒋 艺,胡林林,马国武,孙迪敏

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:以 0.3 THz 回旋管为研究对象,对 TEoo 模回旋管腔体进行理论分析和起振电流的计算, 以避免模式竞争的出现。对选取的电参数进行粒子模拟仿真,在 10 kV 和 300 mA 条件下得到 TEoo 模输出、平均输出功率为 152 W 及输出频率为 299.5 GHz 的模拟结果,并对不同磁场和不同电流情 况下输出功率进行了分析,为太赫兹回旋管的研制提供参考。

关键词: 0.3 THz 回旋管; 模式竞争; TE06模式输出; 粒子模拟仿真

中图分类号: TN124 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201401.0024

Analysis and simulation of RF cavity in high power terahertz gyrotron

LEI Wen-qiang, JIANG Yi, HU Lin-lin, MA Guo-wu, SUN Di-min (Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Terahertz(THz) gyrotron is one of the specially developed high power THz radiation resources, and have important applications in biology, physic and faraway exploration. The cavity structure and physical mechanism of a 0.3 THz low voltage gyrotron for TE₀₆ mode is analyzed. The start-oscillation current is calculated to suppress mode competition. The beam-wave interaction parameters are chosen in Particle-In-Cell(PIC) simulation. TE₀₆ mode appearance, the output power of 152 W and output frequency of 299.5 GHz are obtained by beam-wave interaction simulation at 10 kV and 300 mA. Finally, output power in different magnetic fields and work currents is analyzed, which can provide important reference for the development of terahertz gyrotron.

Key words: 0.3 THz gyrotron; mode competition; TE_{06} mode appearance; Particle-In-Cell simulation

太赫兹(THz)波处于毫米波与红外线之间,大多数 THz 源的输出功率在毫瓦或微瓦量级。在雷达、远距离探测、生物医学以及材料、国家安全等技术领域的应用上,则需要瓦级或百瓦级以上的辐射源。因此研制大功率的太赫兹辐射源器件成为国内外学者的研究热点^[1]。太赫兹回旋管是目前国际上重点开发的高功率 THz 辐射源,已在生物、医学和安全等领域有着重要的应用价值。回旋管是一类基于电子回旋谐振受激辐射机理的快波器件,特别是在毫米和亚毫米波段,能产生高脉冲峰值功率与连续波功率。它是目前最具有发展前景的高功率 THz 辐射源^[2]。在核磁共振光谱学实验中要求输出功率在几瓦到几百瓦,美国马里兰大学在 330 GHz 连续波回旋管输出 100 W 功率的研究成功了,并用于核磁共振中的动态核极化实验^[3]。日本 FuKui 大学在 12 T 磁场的条件下研制的 630 GHz 回旋管,用于红外光谱检测的发射源^[4]。俄罗斯应用物理所已研制出 1 THz 的回旋管,脉冲工作输出 5 kW^[5],用于安检设备。本文以低电压下 0.3 THz 回旋管为研究对象,对回旋管的腔体结构、工作模式以及腔体的起振电流进行分析,在 10 kV 和 300 mA 的条件下进行粒子模拟仿真,得到稳定的输出频谱和平均输出功率 152 W 的结果,注-波互作用效率 5%。并对不同的磁场和电流情况下的输出功率进行优化设计,为太赫兹源的初期测试和制造提供有意义的参考价值。

1 腔体模式选择和分析

回旋管的工作模式通常根据需要的工作频率和腔体尺寸大小来选择,既要能稳定工作,避免发生模式竞争, 又能适合加工和大功率的传输,而不至于腔体打火击穿。回旋管的工作模式大多是圆电模式(TE_{0n})或者是边廊 模式(TE_{mn},m>n)。圆电模式具有腔体损耗小,容易单模工作的特点。 考虑到 0.3 THz 的频率较高, 腔体尺寸太小, 不容易加工等特点, 所以选择了较高阶的工作模式, 通过分析, 选择为 TE₀₆模式工作。

回旋管腔体的色散方程为:

$$\omega^2 - k_{l/}^2 c^2 - k_c^2 c^2 = 0 \tag{1}$$

电子回旋脉塞的谐振条件:

$$\omega - k_{\mu}v_{a} - s\omega_{a} = 0 \tag{2}$$

式中: ω 为本征模的谐振频率; ω, 为回旋谐振频率; c 为光速; k_{//}和 k_c为传播常数和截止波数; v_z为纵向速度; s 为回旋谐波次数。根据色散匹配条件,在一定腔体尺寸下选择合适的电子电压、回旋速度比以及工作磁场大小等参数,使电子与腔体谐振色散曲线相切,从而达到匹配的目的。

工作频率 0.3 THz 对应自由空间波长 λ =1 mm, 自由空间波长 与腔体半径 R_0 的关系为:

$$R_0 = \frac{\chi_{mn}\lambda}{2\pi} \tag{3}$$

式中 χ_{mn} 是 m 阶 Bessel 函数的导数 $J'_{m}(x)$ 的第 n 个零点。

通过电子回旋脉塞注-波耦合系数^[6]的公式可以选择合适的电子注引导中心半径 *R*_b,第 *s* 次谐波的电子注-波耦合系数为:

$$C_{\rm BF} = \frac{J_{m\pm s}^2(\chi_{mn}R_{\rm b}/R_{\rm 0})}{(\chi_{mn}^2 - m^2)J_m^2(\chi_{mn})}$$
(4)

由此计算得到 TE₀₆模式的电子注-波耦合系数见图 1。图 1表明, *R*_b/*R*₀ 的比值逐渐增大的同时, 耦合系数的值在逐渐减小, 耦合系数减少, 在腔体内的互作用强度就相对较弱, 起振的时间会相对较晚, 耦合系数大的起振比较容易。最后选择两者的比值为 0.277, 这样电子枪的设计也比较容易。

腔体结构采用标准的三段式结构谐振腔,包括输入渐 变段、中间均匀段和输出渐变段。输入渐变段是一段截止 段,目的是防止高功率反向传输进入电子枪中。输出渐变 段是一段开放腔体,使得输出得到更好的匹配,微波反射 较小,不影响腔体中互作用结果。腔体结构见图 2。

由色散曲线方程(1)和谐振方程(2)可 知,工作模式应选在截止条件附近,所以 腔体半径根据式(3)取 3.12 mm 附近。通过 计算注-波耦合系数,当 R_b 为 0.864 mm 时,波与场间有较好的能量交换。通过大 量冷腔参数的优化计算,最后选定腔体的 结构参量。选取 $L_1=L_3=8$ mm, $L_2=12$ mm, 对整个结构进行 CST 建模,得到图 3 所示 的仿真结果。通过图 3,从结构的径向方 向上看,电场方向一共变化了 6 次,从而 判断设计腔体结构在冷腔下的本征模式 为 TE₀₆模,谐振频率 299.84 GHz。



Fig.1 Beam-wave coupling coefficients of TE₀₆ mode 图 1 TE₀₆模式的电子注-波耦合系数





2 起振电流选择

Fig.3 Field distribution of TE₀₆ mode in cold-test simulation by CST 图 3 CST 模拟的 TE₀₆模场分布

回旋单腔管属于开放式谐振腔,往往存在多个模式起振,此时频率接近的两模式之间存在模式竞争,导致输 出功率不稳定,互作用效率下降。因此合理选择起振电流,以及对应的工作磁场大小,是回旋振荡管设计中非常 关键的一步。

基波作用条件下,根据起振电流的计算公式^[7],可以给出电子注半径、电压和纵横速度比,由此确定起振工作电流和外加静磁场等参量,为粒子模拟注-波互作用奠定基础。起振电流 *I*_{st}的计算见式(5):

$$I_{\rm st} = 1.68 \times 10^4 \, \frac{\gamma I_{\rm stN}}{Q} \, \beta_{\perp}^4 \frac{L}{\lambda} \frac{(v_{mn}^2 - m^2) J_m^2(v_{mn})}{J_{m\pm 1}^2(k_{\perp}R_{\rm b})}$$

(5)

式中: $I_{\text{stN}} = \frac{4}{\pi\mu^2} \frac{e^{2x^2}}{\mu x - 1}$, $x = \frac{\mu\Delta}{4}$, $\mu = \pi \frac{\beta_{\perp}^2}{2\beta_{//}} \frac{L}{\lambda}$, $\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left(1 - \frac{\Omega_{\text{se}}}{\gamma \omega} \right)$, Q_{se} 为非相对论下的电子回旋频率; γ 为相对论因子; Q为品

质因数; β_{\perp} 和 $\beta_{\prime\prime}$ 分别为电子的横向速度和纵向速度对光速的比值; k_{\perp} 为横向传播常数。

在电压为 10 kV,电子引导中心半径为 0.864 mm,电子 横纵速度比为 1.5 时,得到图 4 的起振电流与工作磁场之间 的关系图。

在选择起振电流时,存在 TE₀₆模、TE₂₆模、TE₄₅模和 TE₇₄模等,相邻模式之间在注波互作用时存在模式竞争。为 了避免腔体内的模式竞争,达到 TE₀₆模起振,而其他模式不 起振,需要在工作磁场和起振电流之间选择合适的参数。选 择电流过小,导致起振时间相应变长,甚至不起振。因此需 要综合优化模拟参数,并使用粒子模拟软件进行验证,得到 设计指标。



3 互作用模拟与分析

使用三维粒子模拟代码模拟单腔回旋振荡管的电子互作用过程,能够得到一些定量的计算结果,并指导实际 的工程设计。

电子注回旋半径为 0.864 mm,电子注工作电压为 10 kV,电子注电流为 300 mA。模拟 40 ns 后,微波达到 稳定输出,输出模式 TE₀₆模,即在角向存在 6 次变化分布,没有其他模式干扰,与 CST 软件的冷腔模拟结果一致,见图 5。



在输出段端口处观测其坡印廷功率流分布,见图 6,并对输出段端口处的电场分布进行傅里叶变换,得到频 谱输出,见图 7。由图 6 可知,微波在 40 ns 之后达到稳定输出,平均功率输出在 152 W 左右,电子效率 5%;

输出功率在 40 ns 后稳定输出 TE₀₆ 波,功率输出稳定,没有出现扰 动现象。由图 7 可知,输出端口的电场分布经过 FFT 变换后,得到 输出频率 299.5 GHz,达到 0.3 THz 回旋管的设计指标。输出频谱比 较稳定,没有 TE₂₆等其他模式对互作用干扰。电子注在腔体中运动 时表现为对腔体频率的微扰,因此热腔振荡频率与冷腔计算的谐振 频率之间有一定的偏移。

对不同工作磁场和不同电流条件下的输出功率进行比较,见图 8。当磁场为10.93 T,电流为0.3 A时,输出功率最大为152 W,而 磁场低于或高于10.93 T时,输出功率都要小些。



工作磁场为 10.93 T 时,对不同电流条件下的输出功率 情况进行比较。可以发现,当工作磁场为 10.93 T,电流为 0.35 A 时,输出功率为 164 W。但电流大于 0.35 A 时,输出 功率不稳定,有其他频率的场输出,干扰了 TE₀₆模式的正常 输出。最后选择 0.3 A,10.93 T 的工作条件作为回旋管的工作 点进行设计。

4 结论

在 10 kV,300 mA 的条件下,设计和模拟了工作在 TE₀₆ 模式下输出频率为 0.3 THz,平均输出功率为 152 W 的回旋 单腔振荡管,并优化设计了不同工作磁场和不同工作电流条 件下的输出功率情况。



图 8 不同工作磁场和不同电流条件的输出功率对比

在低电压低电流条件下,太赫兹回旋管能够产生激发辐射,并保持较高的电子效率,同时能够减少电子枪尺 寸,以及供电电源系统、冷却系统的大小,更进一步减少微波管工作条件的复杂性,是迈向小型化回旋管的重要 的一步,也为太赫兹回旋管的实现奠定基础。

参考文献:

- [1] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-198. (LIANG Meiyan, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-198.)
- [2] Kasugai A,Sakamoto K,Takahashi K,et al. Steady-state operation of 170GHz-1MW gyrotron for ITER[J]. Nuclear Fusion, 2008,48(5):054009.
- [3] Sirigiri J R, Shapiro M A, Temkin R J. Wideband Continuous Frequency Tunable 330 GHz Gyrotron Oscillator[C]// 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves/12th International Conference on Terahertz Electronics. Karlsruhe, Germany: [s.n.], 2004:621-626.
- [4] Shimizu Y,Makino S,Ichikawa K,et al. Development of a submillimeter wave gyrotron using a 12 T superconducting magnet[J]. Physics of Plasmas, 1995,2(6):2110-2116.
- [5] Glyavin M Y,Luchinin A G,Rodin Y V. Generation of 5 kW/1 THz coherent radiation from pulsed magnetic field gyrotron[C]// Conf. Dig. Joint 35th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and Terahertz Waves. Roma,Italy:[s.n.], 2010:1-3.
- [6] 刘盛纲,李宏福,王文祥,等. 微波电子学导论[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (LIU Shenggang,LI Hongfu,WANG Wen xiang, et al. Introduction to Microwave electronics[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1985.)
- [7] 刘濮鲲,Borie E,Thumm M. ISM 频率中等功率回旋管的选模问题[J]. 红外与毫米波学报, 2002,21(4):289-292. (LIU Pukun,Borie E,Thumm M. Mode selection of a moderate power gyrotron operation at the ISM frequency[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2002,21(4):289-292.)

作者简介:



雷文强(1972-),男,重庆市人,博士,副 研究员,主要从事真空电子学和太赫兹技术的 相关研究.email:leton@163.com.

马国武(1981-),男,四川省凉山州人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件的研究.

蒋 艺(1983-),男,成都市人,硕士,研究实 习员,主要从事大功率太赫兹器件的设计工作.

胡林林(1979-),男,湖北省荆州市人,硕士, 副研究员,主要从事高功率微波器件、大功率THz 电真空器件及信号测量方面的研究.

孙迪敏(1987-),男,湖南省娄底市人,博士, 主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件的研究.