

全三维 110 GHz 和 220 GHz 同轴腔双注回旋管数值模拟研究*

夏蒙重[†] 鄢扬 刘大刚 王平 黄培培 刘腊群 王辉辉

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2013 年 5 月 15 日收到; 2013 年 6 月 20 日收到修改稿)

为了打破传统单注回旋管只能产生较低功率的局限性, 本文基于自主研发的 PIC 粒子模拟软件 CHIPIC 对 110 GHz 和 220 GHz 同轴腔双注回旋管进行全三维数值模拟研究. 在理论分析同轴双电子注电子枪设计模型和初始参数的基础上通过 CHIPIC 对其进行优化设计, 得到了具有横纵速度比为 1.0, 最大速度零散约为 5.4% 的高性能电子束; 并将此优化后的双阳极双注电子枪取代传统回旋管数值模拟时采用的回旋发射进行 110 GHz 和 220 GHz 双注回旋管整管的数值模拟, 并采用 MPI 四进程并行计算, 最终获得了具有双频分别为 110 GHz 和 220 GHz、模式为 TE₀₂ 模、平均输出功率约在 70 kW、效率达到 8.75% 的高性能双注回旋振荡管.

关键词: 同轴腔双注回旋管, 同轴双电子注电子枪, 横纵速度比, 速度零散

PACS: 13.40.DK, 13.40.Em, 02.70.Bf, 05.20.-a

DOI: 10.7498/aps.62.191301

1 引言

回旋管作为在毫米波、太赫兹波段输出功率最大的电真空器件, 特别是在受控热核聚变和太赫兹科学技术等方面具有很高的学术价值和极其重要的应用价值. 在可控热核聚变 ITER 计划中, 对于辅助加热的回旋管的输出功率要求必须达到 MW 级以上, 这就使得在回旋管工作模式的选取上必须采用高阶模式, 以增大腔体的功率容量, 而另一方面工作在高阶模式又极易导致严重的模式竞争. 经国内外专家十几年的研究发现采用同轴内开槽结构是可以较好的抑制模式竞争的, 同时也能够提高输出功率, 因为同轴结构与相应的管状结构相比较具有更高的空间电荷限制流, 同时在模式选择上也较管状结构更加灵活. 目前在 ITER 计划中辅助加热是采用单注回旋管, 它的输出功率都较低, 为了进一步提高输出功率同轴腔双电子注回旋管被提出. 对于同轴腔双电子注回旋管由于采用高阶模式和内开槽结构, 这就给双电子注与场发生能量

交换提供了很好的保证, 同时内外导体的存在也为双电子注之间的静电位平衡提供了保障^[1-3].

在同轴腔双电子注回旋管的设计实验过程中, 同轴双电子注电子枪是其中的关键部件, 它所提供的双注电子注的性能直接影响到整管的输出功率和效率, 随着回旋管向更高频率、更短波长方向发展, 对电子枪的性能提出了更高的要求, 尤其在 ITER 计划的实施过程中, 需要大功率、连续波输出, 这就对该同轴双注电子枪所产生的电子束提出了更高的要求. 本文对同轴双电子注电子枪的设计模型及基本设计方法进行了介绍, 这些模型、方法和公式都是回旋管电子枪快速准确设计的技术基础. 根据 TRADE-OFF 方程组得到双电子注双阳极磁控注入式电子枪初始参数的基础上通过 CHIPIC 对其进行优化, 得到了具有横纵速度比为 1.0, 最大速度零散约为 5.4% 的高性能电子束; 并将此优化后的双阳极双注电子枪取代传统回旋管数值模拟时采用的回旋发射进行 110 GHz 和 220 GHz 双注回旋管整管的数值模拟, 并采用 MPI 四进程并行计算, 最终获得了具有双频分别为 110 GHz

* 国家自然科学基金(批准号: 11175040)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: xmjzq@126.com

和 220 GHz、模式为 TE₀₂ 模、平均输出功率约在 70 kW、效率达到 8.75% 的高性能双注回旋振荡管。

2 设计模型

在电子回旋脉塞器件中, 同轴腔双电子注如图 1 所示, 由于双电子注内外导体的电位相同, 即

$$\Phi(0) = \Phi(R_w) = 0, \quad (1)$$

内外导体间的静电势为 [4,5]

$$\Phi(r) = -(A_1 T_1 + A_2 T_2) \frac{\ln(r/R_{in})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{in} \leq r \leq R_{11}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Phi(r) = & \Phi(R_{11}) + \frac{A_1}{R_{b1}^2} \\ & \times [r^2 - R_1^2(1 + 2\ln(r/R_{11}))] \\ & - (A_1 T_1 + A_2 T_2) \frac{\ln(r/R_{11})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{11} \leq r \leq R_{12}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi(r) = & \Phi(R_{12}) + 2A_1 \ln(r/R_{12}) \\ & - (A_1 T_1 + A_2 T_2) \frac{\ln(r/R_{12})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{12} \leq r \leq R_{21}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi(r) = & \Phi(R_{21}) + 2A_1 \ln(r/R_{21}) \\ & + \frac{A_2}{R_{b2}^2} [r^2 - R_{21}^2(1 + 2\ln(r/R_{21}))] \\ & - (A_1 T_1 + A_2 T_2) \frac{\ln(r/R_{21})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{21} \leq r \leq R_{22}, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi(r) = & \Phi(R_{22}) + 2A_1 \ln(r/R_{22}) \\ & + 2A_2 \ln(r/R_{22}) \\ & - (A_1 T_1 + A_2 T_2) \frac{\ln(r/R_{22})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{22} \leq r \leq R_w, \quad (6) \end{aligned}$$

其中

$$A_1 = I_1 / (4\pi\epsilon_0 v_1'),$$

$$A_2 = I_2 / (4\pi\epsilon_0 v_2'),$$

$$R_{b1}^2 = R_{12}^2 - R_{11}^2, R_{b2}^2 = R_{22}^2 - R_{21}^2,$$

$$T_1 = 1 + 2\ln(R_w/R_{12}) - 2\frac{R_1^2}{R_{b1}^2} \ln(R_{12}/R_{11}),$$

$$T_2 = 1 + 2\ln(R_w/R_{22}) - 2\frac{R_2^2}{R_{b2}^2} \ln(R_{22}/R_{21}),$$

式中 I_1 和 I_2 分别是电子注 1 和电子注 2 的电流, v_1' 和 v_2' 分别是电子注 1 和电子注 2 的注入速度. 由 (1)–(6) 式可得到, 对于一根电子注, 其静电势为

$$\Phi_n(r) = -A_n T_n \frac{\ln(r/R_{in})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{in} \leq r \leq R_{n1}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi_n(r) = & \Phi_n(R_{n1}) + \frac{A_n}{R_{bn}^2} \\ & \times [r^2 - R_{n1}^2(1 + 2\ln(r/R_{n1}))] \\ & - A_n T_n \frac{\ln(r/R_{n1})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{n1} \leq r \leq R_{n2}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_n(r) = & \Phi_n(R_{n2}) + 2A_n \ln(r/R_{n2}) \\ & - A_n T_n \frac{\ln(r/R_{n2})}{\ln(R_w/R_{in})}, \quad R_{n2} \leq r \leq R_w, \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $n = 1, 2$.

通过与单注同轴电子回旋脉塞器件中的静电势相比较, 发现同轴腔双电子注电子回旋脉塞器件中的静电势可表示为两根电子注静电势之和

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (10)$$

在同轴腔双电子注电子回旋脉塞器件中, 由于两根电子注的加速电压相同, 横纵速度比一致, 因此两根电子注之间的相互作用可以忽略, 两根电子注将受各自的静电势 Φ_n 加速.

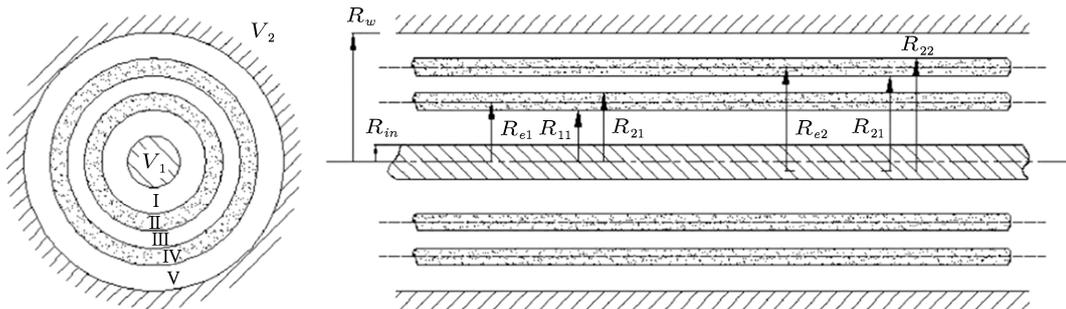


图 1 同轴腔双电子注示意图

因此, 虽然有大量的设计参数需要考虑, 可以根据磁控注入式电子枪设计的 TRADE-OFF 方程组对每根电子注分别计算其初始参数, 然后再进行优化设计.

3 初始参数设计方法

由 Baird 和 Lawson 所给出的磁控注入式电子枪初始结构设计的 TRADE-OFF 解析方程组形式如下所示 [6,7]:

$$\mu = \left[(r_{g0}/r_{L0})^2 - 1 \right]^{-1/2}, \quad (11)$$

$$f_m = (\mu r_c / r_{L0})^2, \quad (12)$$

$$(d_{ac}/r_c) = d_f \mu / \cos \phi_c, \quad (13)$$

$$(l_s/r_c) = I_0 / (2\pi J_c r_c^2), \quad (14)$$

$$\left[\frac{eV_a}{(m_0 c^2)} \right] = \frac{\ln(1+d_f \mu)}{\ln(1+2\mu)} \cdot \left\{ \left[1 + 4 \frac{(1+\mu)^2}{(1+2\mu)^2} \times \frac{(\gamma_0^2 - 1)}{f_m \cos^2 \phi_c \cdot \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2}} \right]^{-1/2} - 1 \right\}, \quad (15)$$

$$E_c = \frac{V_a \cos \phi_c}{r_c \ln(1+d_f \mu)}, \quad (16)$$

$$(\Delta r_g / r_{L0}) = \frac{(l_s/r_c) \sin \phi_c}{\mu(1+\mu^2)^{1/2}}, \quad (17)$$

$$(J_c/J_L) = J_c \left\{ \frac{k_1}{2k_2} \left[(1+4V_a k_2/k_1^2)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{-3/2}, \quad (18)$$

其中

$$k_1 = 5.6872 \times 10^3 \left[r_c \ln(1+d_f \mu) / \cos \phi_c \right]^{4/3} \cdot \left[1 + \frac{2}{15} \ln(1+d_f \mu) \cdot \frac{11}{450} \ln^2(1+d_f \mu) + \frac{437}{11375} \ln^3(1+d_f \mu) + \dots \right],$$

$$k_2 = 2.9356 \times 10^2 \left[r_c \ln(1+d_f \mu) / \cos \phi_c \right]^{8/3} \cdot \left[\frac{1}{14} + \frac{6}{175} \ln(1+d_f \mu) + \dots \right].$$

本文正是使用 (11)—(18) 式以求得此 110 GHz 和 220 GHz 双阳极磁控注入式电子枪初始参数如表 1 所示, 其中: U_0 为双电子注阳极电压; I_b 为双电子注电子束电流; B_c 为阴极磁场; f_m 为磁压缩比; U_{cont} 为双电子注控制极电压; r_c 为双电子注阴极半径; d_{ac} 为双电子注阴极、控制极间距; r_g 为双电子注回旋中心半径.

4 基于 PIC-FDTD 全三维同轴双注电子枪数值模拟研究

传统数值模拟软件在网格划分时采用 Yee 网格, 而 Yee 网格对曲面目标边界进行网格划分时容易导致严重的阶梯近似误差. 为此, 本文在自主研发的 CHIPIC 软件平台上实现了共形 FDTD 网格划分技术, 并在此基础上对同轴双注电子枪进行全三维的数值模拟 [8].

共形网格和传统 Yee 网格的划分不同之处如图 2 所示.

表 1 110, 220 GHz 双阳极磁控注入式电子枪的初始参数

U_0/kV	I_b/A	B_c/T	f_m	U_{cont}/kV	r_c/mm	d_{ac}/mm	r_g/mm
40	10	0.175	23.9	20	21.75—22.5	4.95	4.85—5.53

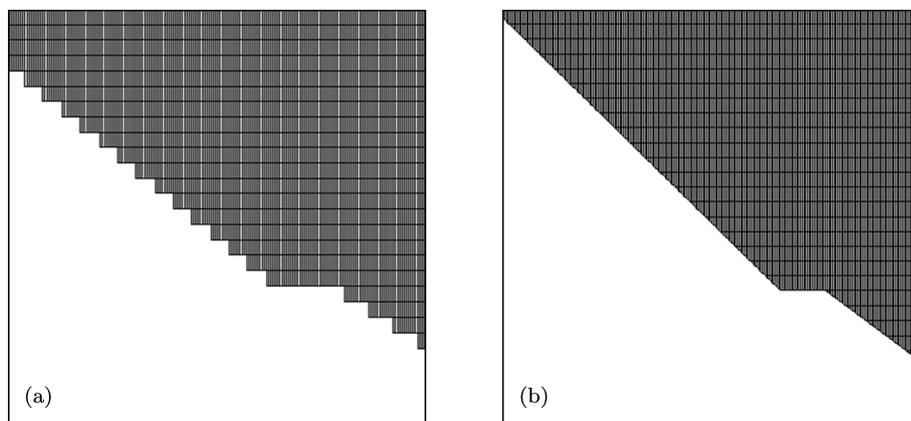


图 2 倾斜曲面矩形与共形网络部分对比 (a) 传统 Yee 网络; (b) 共形网络

由于磁控注入式电子枪的阴极区磁场 B_c 对电子束性能的影响是至关重要的^[9], 因此本文专门针对阴极区的曲面边界进行了共形网格处理, 其数值模拟结果如图 3 和图 4 所示.

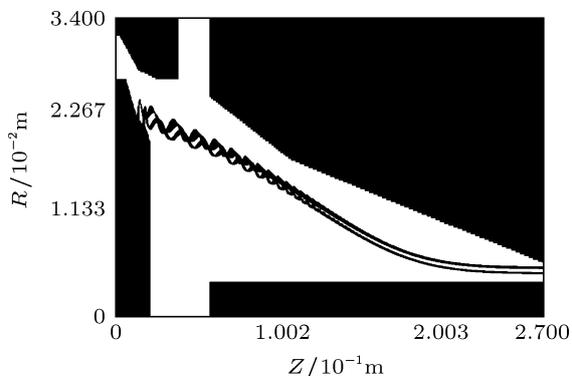


图 3 同轴双柱双阳极磁控注入式电子枪结构及粒子

由图 3 可以看出, 该同轴双注双阳极磁控注入式电子枪在阴极上设置了两个电子注射带用于发射两束电子注, 在电子枪阳极区中心安置一根连接在高频相互作用结构上的同轴内导体, 阳极与内导

体的电势相同. 由图 4 数据显示并结合公式^[10-12]

$$\alpha = \frac{V_r}{V_z}, \quad (19)$$

$$\Delta\beta_{\perp\max} = (\beta_{\perp\max} - \bar{\beta}_{\perp}) / \bar{\beta}_{\perp}, \quad (20)$$

其中, α 为电子束横纵速度比; V_r 为横向速度; V_z 为纵向速度; $\Delta\beta_{\perp\max}$ 为最大速度零散; $\beta_{\perp\max}$ 为最大横向速度; $\bar{\beta}_{\perp}$ 为平均横向速度. 可以得到该双注电子枪的横纵速度比约为 1.0, 最大速度零散约为 5.4%, 符合 110 GHz 和 220 GHz 同轴腔双注回旋管对电子束的要求.

5 110 GHz 和 220 GHz 回旋管系统数值模拟研究

图 5 为 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管整管结构剖面示意^[4], 从图中可以看出该回旋管同轴内导体是通过金属支架固定的, 它在电子枪区域被截断. 由于采用的工作模式为对称模 (TE₀₂ 模), 因此通过调节支架的宽度是可以很好地

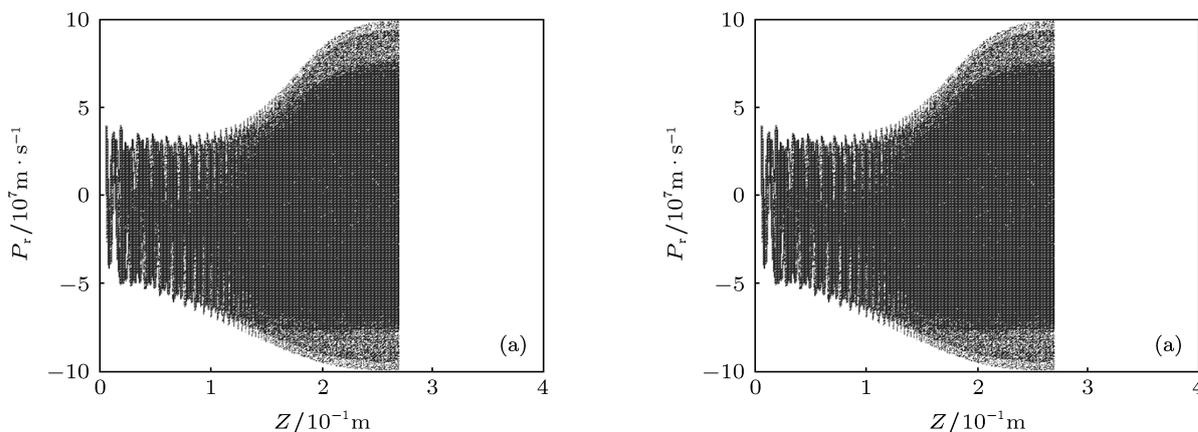


图 4 双阳极磁控注入式电子枪共形网络部分时相空间图 (a) P_r 对 Z 相空间; (b) P_z 对 Z 相空间

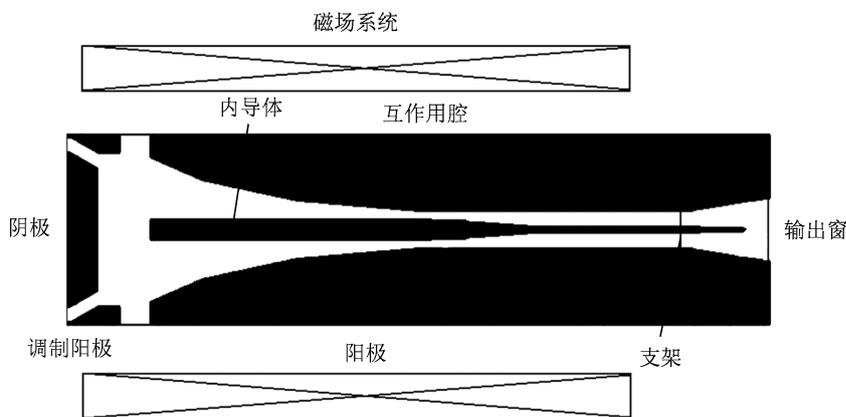


图 5 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管整管结构剖面示意图

减小支架引起的反射. 关于双电子注产生则是通过在阴极表面上增加一个发射带来实现, 调节调制阳极的电压将两电子注同时拉出, 经过互作用区后直接打到阳极上. 在谐振腔的设计上, 作者考虑到当工作频率达到太赫兹波段后, 腔体尺寸相对较小, 因此采用了一种新的设计, 即外导体为一半径不变的圆柱波导, 通过改变内导体半径来形成三段开放式谐振腔, 该相互作用腔具有两个优点, 首先由于外导体为一圆柱波导, 因此加工简单成本较低, 其次由于外导体半径不变, 这可以大大降低边廊模的腔体 Q 值, 有利于抑制模式竞争.

以下为基于 PIC 粒子模拟软件 CHIPIC 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管整管通过 MPI 进行 4 段并行运算的数值模拟结果.

其中图 6 为四段相空间图, 不难看出, 双电子注从阴极出发, 通过调制很好的进入了相互作用腔. 图 7 为整管角向电场的等位图, 在相互作用腔激起了很好的 TE_{02} 模式. 图 8 为角向电场的频谱为 110 GHz 和 220 GHz, 与设计的双注电子枪相符合. 图 9 为功率频谱, 约为 220 GHz 和 440 GHz. 图 10 和图 11

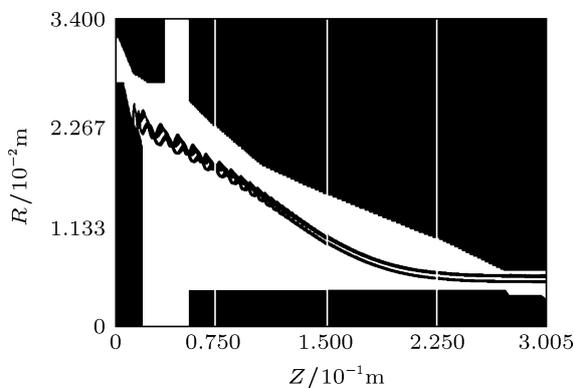


图 6 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管整管四进程计算时的相空间图

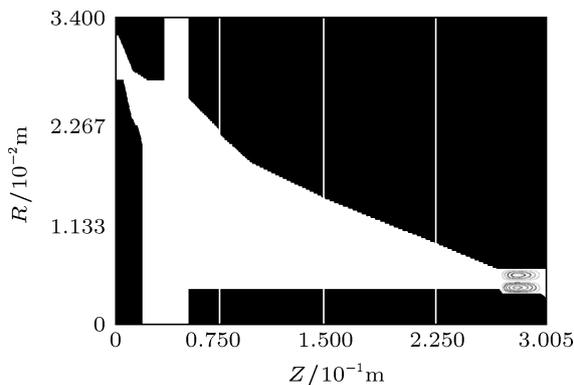


图 7 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管角向电场等位图

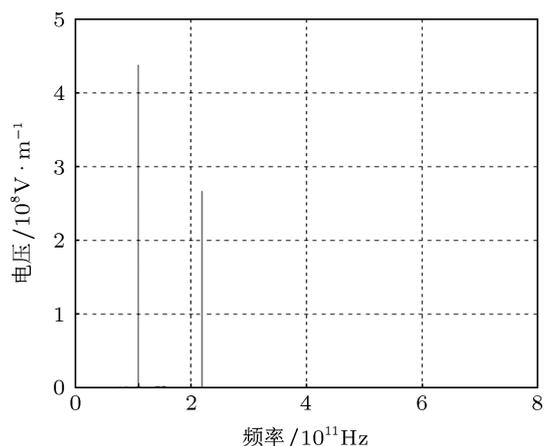


图 8 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管角向电场频谱图

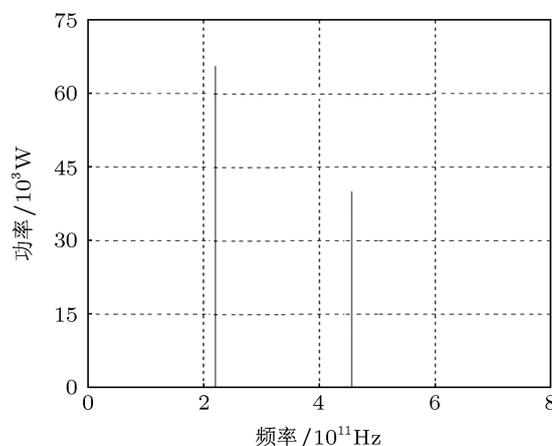


图 9 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管功率频谱图

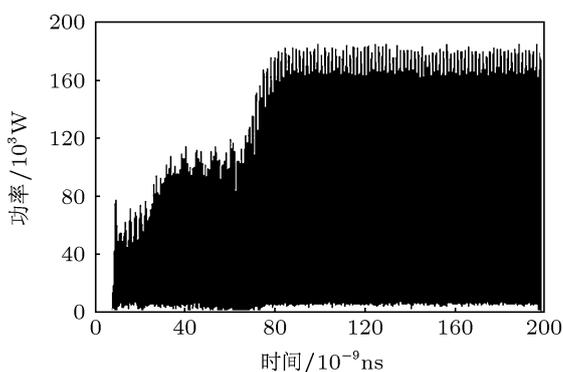


图 10 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管输出峰值功率图

分别为双注回旋管的输出功率和平均功率图, 其平均功率约在 70 kW, 并且都出现了功率的二次递增, 这也是双注回旋管的一个显著特征 [5].

6 结论

本文在理论分析同轴双电子注电子枪设计模型并经由 TRADE-OFF 平衡方程组得到 110 GHz

和 220 GHz 同轴双电子注电子枪的初始参数基础上通过 CHIPIC 对其进行优化设计, 得到了具有横纵速度比为 1.0, 最大速度零散约为 5.4% 的高性能电子束; 并将此优化后的双阳极双注电子枪取代传统回旋管数值模拟时采用的回旋发射进行 110 GHz 和 220 GHz 双注回旋管全管的数值模拟研究, 并采用 MPI 四进程并行计算, 最终在较短时间内获得了具有双频分别为 110 GHz 和 220 GHz、模式为 TE_{02} 模、平均输出功率约在 70 kW、效率达到 8.75% 的高性能双注回旋振荡管.

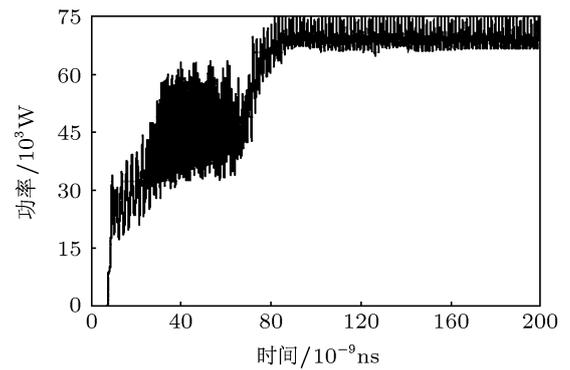


图 11 0.11 THz 和 0.22 THz 同轴腔双电子注回旋管输出平均功率图

- [1] Liu S G 1987 *Theory for relativistic electronics* (Beijing: Science Press) p203 (in Chinese) [刘盛纲, 1987 相对论电子学 (北京: 科学出版社) 第 203 页]
- [2] W. B. Herrmannsfeldt "Electron trajectory program" SLAC Report-226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, California
- [3] Wang C Q 1994 *Finite-Difference Time-Domain Method used for Electromagnetic field calculation* (Beijing: University of Peking Press) p62 (in Chinese) [王长清 1994 电磁场计算中的时域有限差分法 (北京: 北京大学出版社) 第 62 页]
- [4] Fu W J, Yan Y, Yuan X S 2009 *Physics of Plasmas* **16** 023103
- [5] Correa R A, Barroso J J 1993 *Int. J. Electron.* **74** 131
- [6] Dong Ai X 2006 *D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) [董爱香 2006 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [7] Lawson W 1988 *Plasma Science* **16** 2
- [8] Xia M Z, Liu D G, Yan Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 111301 (in Chinese) [夏蒙重, 刘大刚, 鄢扬 2013 物理学报 **62** 111301]
- [9] David J A, Ives R L, Tran H, Bui T, Read M E 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol **36** 156
- [10] Zhao Q, Li H F, Luo Y, Deng X, Yu Shen, Wang L 2004 *High Power Laser And Particle Beams* **16** 764 (in Chinese) [赵青, 李宏福, 罗勇, 邓学, 喻胜, 王丽 2004 强激光与粒子束 **16** 764]
- [11] Wang H J, Li H F, Zhou X L 2000 *High Power Laser and Particle Beams*, **12** 331 (in Chinese) [王华军, 李宏福, 周晓岚 2000 强激光与粒子束 **12** 331]
- [12] Xia M. Z, Liu D. G, Yan Y 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **8** 331 (in Chinese) [夏蒙重, 刘大刚, 鄢扬 2012 强激光与粒子束 **8** 331]

3D numerical simulations of the 110 GHz, 220 GHz coaxial cavity double-beam gyrotron*

Xia Meng-Zhong[†] Yan Yang Liu Da-Gang Wang Ping
Huang Pei-Pei Liu La-Qun Wang Hui-Hui

(*Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054, China*)

(Received 15 May 2013; revised manuscript received 20 June 2013)

Abstract

Since to break the limitation of traditional single anode magnetron injection electron gun can only produce a lower power, this paper, based on an independent research and development of particle simulation software CHIPIC, will take the 110 GHz, 220 GHz coaxial cavity double-beam gyrotron for full three-dimensional numerical simulation study. By theoretical analysis for the initial parameters of the coaxial double-beam electron gun and to optimize the design by CHIPIC, we obtain the high-performance electron beam with the horizontal and vertical velocity ratio of 1.0 and the maximum velocity spread of 5.4%, and use the optimized electron gun to replace the traditional gyrotron emission for numerical simulation of the 110 GHz, 220 GHz gyrotron system, as well as the four-process parallel MPI in computing. Finally we obtain that the double bands are 110 and 220 GHz respectively, a TE₀₂ mode, and the average output power about 70 kW. The efficiency can reach 8.75% for the high performance double-beam gyrotron oscillating tube.

Keywords: coaxial cavity double-beam gyrotron, coaxial double-beam electron gun, horizontal and vertical velocity ratio, velocity spread

PACS: 13.40.DK, 13.40.Em, 02.70.Bf, 05.20.-a

DOI: 10.7498/aps.62.191301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 11175040).

[†] Corresponding author. E-mail: xmjzq@126.com