

文章编号: 1001-4322(2009)03-0395-04

220 GHz 回旋管脉冲磁场系统和 电子枪的设计与实验研究*

傅文杰, 鄢 扬, 袁学松, 黎晓云, 刘盛纲

(电子科技大学 物理电子学院 太赫兹研究中心, 成都 610054)

摘 要: 根据 220 GHz 回旋管的工作要求, 设计了其所需的脉冲磁场系统与电子枪。脉冲磁场系统采用哑铃状结构, 具有均匀区长、电阻小与电感小等优点, 可以在较低电容与电压下获得更高的脉冲峰值磁场, 并分析了其脉冲放电特性。电子枪采用双阳极磁控注入枪, 用 EGUN 对其进行了设计优化, 电子注纵横速度比为 1.53, 速度零散为 3.1%。实验研究表明, 脉冲磁场峰值强度达到 8 T, 电子注电流达到 2 A, 电子电流基本传输到靶片, 控制极与阳极没有截获到电子, 脉冲磁场系统与电子枪工作正常, 达到设计要求。

关键词: 回旋管; 脉冲磁场系统; 电子枪; 太赫兹

中图分类号: TN128 **文献标志码:** A

随着太赫兹技术的迅速发展, 回旋管作为目前太赫兹波段功率最高的辐射源受到广泛重视^[1-3]。在国际核聚变反应堆计划(ITER)的推动下, 110, 140 和 170 GHz 等频率的回旋管输出功率已达 MW 量级, 效率大于 40%^[4-5]。在更高的频率方面, 俄罗斯应用物理研究所(IAP)研制的 650 GHz 回旋管输出功率达 40 kW, 效率 4%^[6], 日本福井大学研制的 300 GHz 回旋管连续波输出功率达 4 kW, 1 THz(二次谐波)回旋管采用 21 T 脉冲磁场系统输出功率达 0.1 kW^[7]。磁场系统与电子枪设计是回旋管设计中的关键技术之一, 电子枪提供的电子注性能的优劣直接影响到回旋管质量的高低, 而磁场的分布又直接关系到电子枪的设计, 因此, 如何设计磁场系统与电子枪以达到回旋管工作要求是回旋管研制中的重要课题。本文针对电子科技大学 220 GHz 单腔回旋管^[8]设计了其磁场系统与电子枪, 并进行了实验研究。

1 脉冲磁场设计

在回旋管中, 电子回旋频率为 f_c , 产生的辐射场的频率 $f_0 \approx n f_c$ 。则电子回旋频率与磁感应强度满足^[9]

$$f_c = n \frac{eB}{2\pi m_e \gamma} \approx n \frac{28 \text{ GHz} B}{\gamma} \quad (1)$$

式中: n 是谐波次数; e 是电子电量; m_e 是电子静止质量; B (单位 T) 是磁感应强度; γ 是相对论因子。由上式可知, 对于基波工作($n=1$)的 220 GHz 回旋管工作磁场需要 8 T 以上的磁感应强度, 永磁体与普通的直流线圈磁场无法达到工作要求, 因此, 我们采用脉冲磁场。脉冲磁场满足^[10]

$$I = \frac{V}{L\omega} \exp(-\frac{R}{2L}t) \sin(\omega t), \quad 0 < t < T \quad (2)$$

式中: I 是放电电流; R 是回路总电阻; L 是回路总电感; C 是总电容; V 是充电电压; ω 是回路自由振荡频率:

$$\omega = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2} \quad (3)$$

220 GHz 回旋管谐振腔长度约为 30 mm, 谐振腔位于磁感应强度最大的位置处, 电子枪位于磁场的漏磁区。普通的回旋管磁场只有一个单线圈, 但是我们发现按照这种结构设计的磁场电阻与电感较大, 在满足谐振腔工作长度的情况下需要极大的充电电压才能达到 8 T 所需

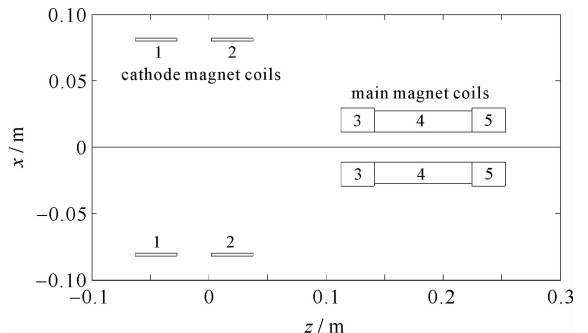


Fig. 1 Structure of pulsed magnet of 220 GHz gyrotron
图 1 220 GHz 回旋管脉冲磁场结构图

* 收稿日期: 2008-06-26; 修订日期: 2008-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(10676110); 国家 973 计划项目

作者简介: 傅文杰(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率电子回旋管器件与太赫兹辐射源研究; fu996@tom.com。

的电流,现有设备很难实现,因此我们提出了图 1 中的哑铃状结构,使用图 1 中 3,4,5 三个主线包延长均匀区长度。这种结构的优点是在延长均匀区长度的同时,增加的电阻与电感不大,在不提高充电电压和电容的情况下能够获得很大的放电电流。缺点是磁场漏磁区较短,磁感应强度下降较快,不利于电子枪的安装与实验。为此我们设置了图 1 中 1 和 2 两个阴极区磁场线包使阴极区的磁场变化较缓,便于实验。表 1、表 2 给出了主要的磁场线包参数。

表 1 220 GHz 回旋管脉冲磁场几何参数

Table 1 Geometrical parameters of pulsed magnet of 220 GHz gyrotron

coil number	inner radius R_i/mm	outer radius R_o/mm	average radius R_{av}/mm	axial length /mm	radial thickness /mm	coil center Z_i/mm
1	80	82.2	81.10	36.0	2.2	-45.0
2	80	82.2	81.10	36.0	2.2	20.0
3	11	29.4	20.20	28.8	18.4	123.4
4	11	27.1	19.05	83.2	16.1	183.0
5	11	29.4	20.20	28.8	18.4	242.6

表 2 220 GHz 回旋管脉冲磁场电参数

Table 2 Electrical parameters of pulsed magnet of 220 GHz gyrotron

charge voltage/V	capacitor bank/ μF	circuit resistance/ Ω	circuit inductance/H	maximum discharged current/A	maximum pulsed magnet induction/T	pulse time /ms
1 500	21 000	≈ 0.158	≈ 1.24	4 024	10.8	≈ 17

图 2 表示磁场沿中心轴线($R=0$)的分布,其中均匀区($\pm 0.5\%$)长度约为 7 cm。从表 2 的结果可知该磁场能够产生 8 T 以上的强磁场,放电时间约为 17 ms,由于单次脉冲回旋管的工作脉宽为 $2 \mu\text{s}$,因此能满足工作要求。

2 电子枪设计

能产生回旋电子注的电子枪有许多种类,其中双阳极和单阳极电子枪应用较为广泛。单阳极磁控注入枪没有控制极,只能通过阴极处的磁场调节来改变电子注的横向能量;双阳极磁控注入枪中电子的横向动量可以方便地利用控制极、阳极电压和阴极区的外部磁场进行调整^[1]。我们选用双阳极磁控注入枪为 220 GHz 回旋管提供所需电子注。

双阳极磁控注入枪的结构如图 3 所示,电子从阴极发射带发出,经过磁场上升区,进入磁场均匀区,互作用区。磁控注入枪的主要工作原理是:在温度限制下的环状阴极产生的空心电子注在倾斜电场与纵向磁场的共同作用下,产生初始的回旋运动。此时,电子的横向能量较小,经过一段纵向磁场缓慢的过渡区,回旋电子注受到绝热压缩,电流密度增大,电子注半径减小,而横向能量逐渐增加。电子注中的电子既有纵向速度 v_z ,又有横向速度 v_\perp 。当电子的横向速度和纵向速度之比 α 达到要求时,电子注进入谐振腔。

该 220 GHz 回旋管对电子注的主要参数要求见表 3。

表 3 电子注参数

Table 3 Electron beam parameters

accelerating voltage U_c/kV	beam current I_b/A	velocity ratio α	magnetic field in the cavity B_{cav}/T	guiding center r_b/mm
20	2	1.5	8.05	1.153

电子在电子枪中的运动是绝热压缩过程,根据 Busch 定理^[11]获得电子枪的初始设计参数,见表 4。

电子枪的性能与结构有着很大关系,我们采用电子光学软件 EGUN^[12]对其进行优化,得到最终的几何参

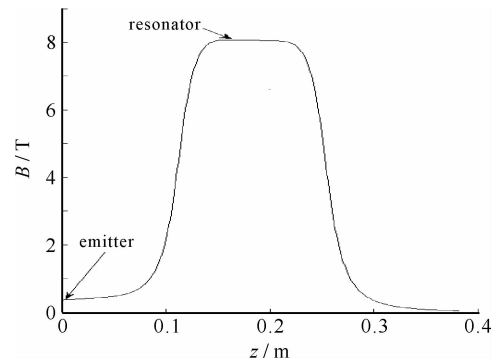
Fig. 2 Distribution of magnetic field on z -axis

图 2 磁场沿中心轴线的分布

数及电子轨迹, 电子注轨迹见图 4。

表 4 电子枪初始设计参数

Table 4 Initial design parameters of electron gun

average radius of the emitter r_c /mm	radial width Δr_c /mm	axial width Δz_c	tilt angle of the emitter $\phi_c/(\circ)$	emitter strip electric field $E_c/(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$
5.3	0.31	1.2	15	58.7

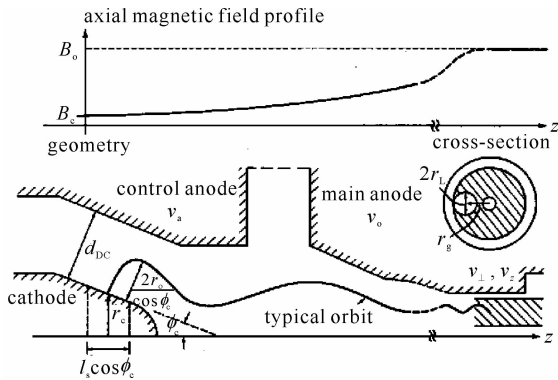


Fig. 3 Structure schematic of a double-anode MIG and axial magnetic field

图 3 双阳极磁控注入枪结构及轴向磁场分布示意图

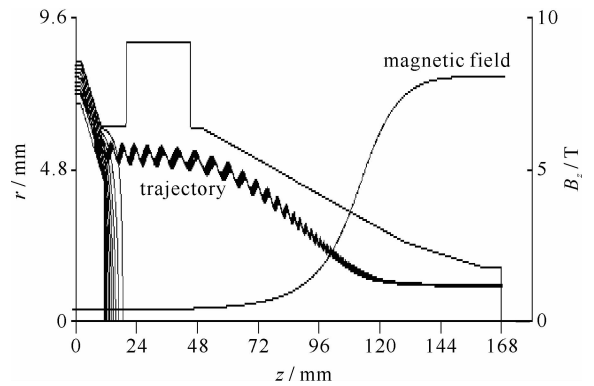


Fig. 4 Electron beam trajectory and magnetic field

图 4 电子注轨迹及磁场分布

优化后的电子枪参数见表 5。

表 5 优化后电子枪参数

Table 5 Optimized parameters of electron gun

control anode voltage U_{mod}/kV	magnetic field in the cathode B_c/T	velocity ratio α	v_{\perp} spread /%	beam radius r_g/mm	beam radial width $\Delta r_g/\text{mm}$
7.3	0.38	1.53	3.1	1.147	0.1

3 实验研究

为了验证脉冲磁场与电子枪设计, 按照表 1~表 5 给定参数, 分别进行了脉冲磁场测量和电子枪传输特性测试。脉冲磁场测量方法如下: 先用直流稳压电源和高斯计对磁场线圈进行标定, 得到电流与磁感应强度的关系, 然后将电流测量电阻串入放电回路, 通过测量电阻两端电压即可测出放电电流, 根据电流和磁场的标定关系得到磁感应强度。图 5 为 LabView 软件和数据采集卡获得的脉冲磁场电流波形, 经换算其峰值电流对应的磁感应强度约为 8 T, 能达到 220 GHz 回旋管的工作要求。

电子枪传输特性测试装置如图 6 所示。将靶片置于谐振腔所处位置, 靶片与一金属棍相连, 并与管壁绝缘。靶电流、阳极电流与控制极电流分别通过串入 1 Ω 电阻取样。在脉冲磁场峰值到达 8 T 时, 进行 20 kV 高压放电, 观测电子传输到靶片的靶电流以及阳极电流与控制极电流。如果只有靶片截获电流, 而控制极与阳极

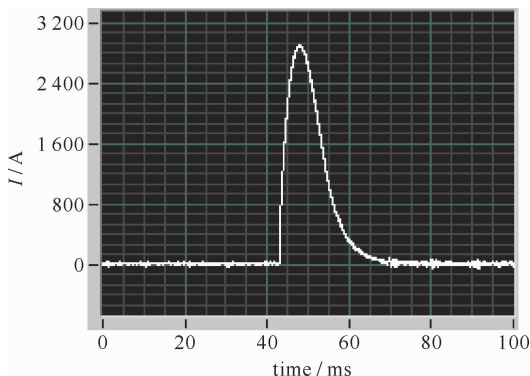


Fig. 5 Current waveform of pulsed magnet

图 5 脉冲磁场电流波形

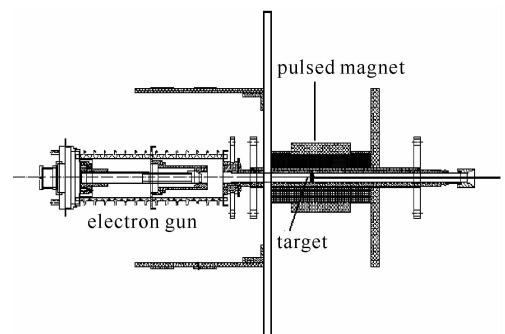


Fig. 6 Schematic of experimental setup

图 6 实验布局示意图

没有截获电流,说明电子注顺利传输,如果控制极与阳极截获电流说明电子注不能顺利传输。图 7 为示波器检测结果,实验结果表明,从阴极发射的电子电流基本传输到了靶片,在控制极与阳极上没有截获到电子,说明电子枪工作正常,达到设计要求。

4 结 论

本文设计的 220 GHz 回旋单腔管脉冲磁场系统采用哑铃状结构,具有均匀区长、回路电阻与回路电感小的优点,系统充电电压 1 500 V、电容 21 000 μF 、回路电阻约 0.158 Ω 、回路电感约 1.24 H 时,实验获得 8 T 以上的脉冲峰值磁场强度。采用 EGUN 设计优化了双阳极磁控注入枪,获得电子注纵横速度比为 1.53、速度零散为 3.1%。实验研究表明电子注电流达到 2 A,电子电流基本传输到靶片,控制极与阳极没有截获到电子,脉冲磁场系统与电子枪工作正常,达到设计要求,为进一步的整管实验打下了基础。

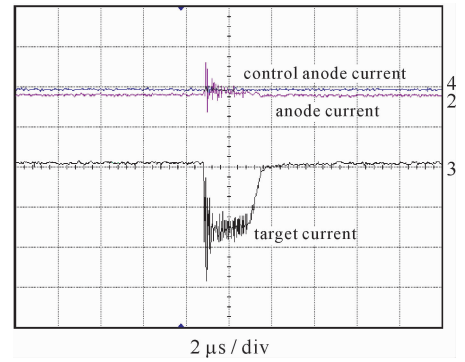


Fig. 7 Experimental results

图 7 实验测试结果

参考文献:

- [1] Hong K D, Brand G F, Idehara T. A 150~600 GHz step-tunable gyrotron[J]. *J Appl Phys*, 1993, **74**(8):5250-5258.
- [2] Chu K R. The electron cyclotron maser[J]. *Rev Modern Phy*, 2004, **76**(2):489-540.
- [3] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, **1**:7-12. (Liu Shenggang. Recent development of terahertz science and technology. *China Basic Science*, 2006, **1**:7-12)
- [4] Piosczyk B, Braz O, Dammertz G, et al. A 1.5-MW, 140-GHz, TE_{28,16}-coaxial cavity gyrotron[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1997, **25**(3):460-469.
- [5] Piosczyk B, Dammertz G, Dumbrajs O, et al. A 2-MW, 170-GHz coaxial cavity gyrotron[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2004, **32**(2):413-417.
- [6] Flyagin V A, Luchinin A G, Nusinovich G S. Submillimeter-wave gyrotron: theory and experiment[J]. *Int J Infrared and Millimeter Waves*, 1983, **4**:629-637.
- [7] Idehara T, Tsuchiya H, Watanabe O, et al. The first experiment of a THz gyrotron with a pulse magnet[J]. *Int J Infrared Millim Waves*, 2006, **27**(3):319-331.
- [8] 袁学松, 鄢扬, 傅文杰, 等. 220GHz 回旋单腔管的设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(10):1677-1679. (Yuan Xuesong, Yan Yang, Fu Wenjie, et al. Design of a 220 GHz gyrotron oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10):1677-1679)
- [9] Edcombe C J. Gyrotron oscillator: their principle and practice[R]. Washington D C: Taylor & Francis, 1993.
- [10] 张裕恒. 脉冲强磁场系统最佳设计的理论[J]. 物理学报, 1980, **9**:1121-1123. (Zhang Yuheng. Theory of optimum designing for the systems of pulse strong magnetic field. *Acta Physica Sinica*, 1980, **9**:1121-1123)
- [11] Baird J M, Lawson W. Magnetron injection gun(MIG) design for gyrotron applications[J]. *Int J Electronics*, 1986, **61**(6):953-967.
- [12] Herrmannsfeldt W B. Electron trajectory program[R]. Stanford University, SLAC-226, 1979.

Design and experimental study of pulsed magnet and electron gun of 220 GHz gyrotron

Fu Wenjie, Yan Yang, Yuan Xuesong, Li Xiaoyun, Liu Shenggang

(College of Physical Electronics, University of Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: According to the requirement of 220 GHz gyrotron designed by University of Science and Technology of China, a pulsed magnet system and electron gun have been designed. The pulsed magnet system is dumbbell-shaped with the advantages of long uniform district, little resistance and inductance. It can obtain a high peak pulsed magnetic field with small inductor and capacitor. A double-anode magnetron injection gun has been designed and optimized by EGUN for the gyrotron. The electron beam velocity ratio is 1.53, and the velocity spread is 3.1%. The experimental results show that, the peak magnet field of the pulsed magnet system was 8 T, the electron beam current reached 2 A, the electrons were transported to the target, and few electrons were not sent to the control anode and anode, which means the pulsed magnet system and the electron gun work well, and satisfy the design requirement of the gyrotron.

Key words: gyrotron; pulsed magnet; electron gun; terahertz