



·高功率微波技术·

## 采用组合引导磁场的多注二极管设计\*

王淦平<sup>1,2</sup>, 李春霞<sup>1</sup>, 金 晓<sup>1</sup>, 黄 华<sup>1</sup>, 刘振帮<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088)

**摘 要:** 分析了采用单一同轴磁场时强流相对论多注阴极的侧端发射问题, 研究了在不同磁场内半径和多注漂移管长度情况下多注电子束的传输效率。研究发现: 由于引导磁场尺寸有限, 高压下多注阴极杆及多注阴极柱的电子束发射是影响多注电子束传输效率的主要因素, 且该部分电子束对多注漂移管入口管壁的轰击直接影响了多注速调管的重频能力。设计了采用永磁铁和同轴磁场组合工作的强流相对论多注二极管, 理论分析和模拟计算证明: 基于组合磁场的多注二极管可明显减弱甚至抑制多注阴极发射球头以外的电子束发射, 并且组合磁场的磁场位形和强度可满足强流相对论多注电子束的高效、稳定传输。

**关键词:** 组合磁场; 强流相对论多注电子束; 传输效率; 多注速调管

中图分类号: TN62

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190436

## Multi-beam diode based on combined magnetic system

Wang Ganping<sup>1,2</sup>, Li Chunxia<sup>1</sup>, Jin Xiao<sup>1</sup>, Huang Hua<sup>1</sup>, Liu Zhenbang<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** This paper analyses the electron emission from cathode stick and multi-beam cathode rod of MBK and investigates the transport efficiency with different radius and drift tube length. The results show that with compact constructure the electron emission from cathode stick and rod under high voltage affect the multi-beam transmission efficiency obviously. Especially, the beam bombing on the wall of tube will degenerate the repetition capacity of multi-beam klystron. To resolve these problem, a combined magnetic system is designed and fabricated, which can reduce the stick and rod emission by pulling the multi-beam cathode out of the high electric zone. Then a multi-beam diode with combined magnetic system is designed. Calculation and simulation results show that beam emission from the cathode stick and the rod can be decreased evidently, furthermore the cathode stick can be removed. In addition, the magnetic distribution can ensure high efficiency and stability of multi-beam transport. At present, the multi-beam diode with combined magnetic system is being experimented.

**Key words:** combined magnetic system; intense relativistic multi-beam; transmission efficiency; multi-beam klystron

在高功率微波(HPM)器件中,多注速调管放大器(MBK)具有高功率、高效率、相位和幅度稳定等特点<sup>[1-4]</sup>,其采用的多电子束并行技术,既提高了每注电子束的群聚效率,又保证了总传输束流的强度,有效解决了相对论速调管放大器(RKA)在高频情况下束流强度与器件效率之间的矛盾<sup>[5]</sup>。目前,国内外研制的MBK都采用热阴极作为电子束源,由于热阴极发射束流能力的限制,器件的最大输出微波功率约100 MW<sup>[6-9]</sup>。为了实现GW量级的微波输出,自2011年中国工程物理研究院应用电子学研究所开展了基于冷阴极的相对论MBK的研究,目前已实现了频率9.4 GHz、脉宽大于100 ns、功率达吉瓦量级的微波输出<sup>[10-14]</sup>。

在吉瓦级MBK的实验中,由于受到磁场尺寸的限制,阴极杆及多注阴极柱表面电场强度明显高于金属材料表面电子发射阈值,通过仿真分析该部分发射的电流强度大于1 kA。这部分电子在磁场的引导下会形成回流从而造成束流损失,更重要的是,阴极杆和多注阴极柱发射的电子将破坏多注电子束位形,导致束斑明显畸变,当畸变的多注电子束进入多注漂移管时,大量高能电子将会轰击漂移管壁,这会降低束流的传输效率甚至束流引入失败。

\* 收稿日期:2019-11-25; 修订日期:2020-02-12

基金项目:国家高技术研究计划项目

作者简介:王淦平(1983—),男,博士研究生,副研究员,主要从事脉冲功率技术; wanggpcaep@163.com。

为了实现无畸变高传输效率的多注电子束, 本文介绍了一种采用组合引导磁场的多注二极管, 并通过仿真分析验证了将多注阴极拉出强电场区可明显减小甚至抑制阴极杆和多注阴极柱的束流发射。

## 1 螺线管引导磁场结构

实验采用的 MBK 二极管区域的结构如图 1 所示, 其中阴极杆、多注阴极柱和多注阴极头为多注阴极的主要组成部分。为了实现密度大、刚性好、通过率高的多注电子束, 采用完全浸没电子源, 即多注阴极位于均匀磁场区域。当外加高压脉冲时该区域内的电场强度通常远大于不锈钢电子发射阈值, 导致阴极杆和多注阴极柱的束流发射, 图 2 为模拟束斑, 其中蓝色部分即为杆、柱产生的束斑。当多注电子束进入多注漂移管时, 杆、柱发射的电子束会轰击管壁造成束流的损失。由于电子束能量高, 当大量的电子轰击管壁时会导致等离子体的产生, 导致真空环境的污染和器件结构的损伤。

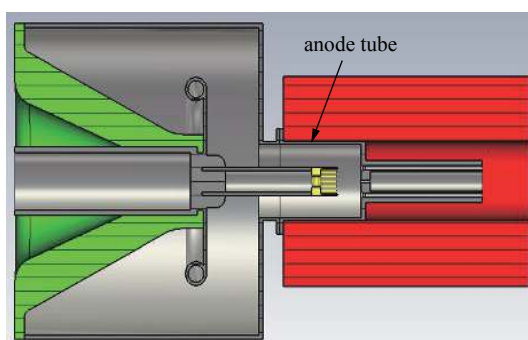


Fig. 1 Multi-beam diode based on solenoid magnetic field

图 1 基于螺线管引导磁场的多注二极管

为了减小杆、柱的束流发射, 可通过增加阳极筒的内径  $R$  的方式在一定程度上减小杆、柱表面电场强度, 但是受限于磁场的尺寸,  $R$  的增加是有限的。从图 3 的模拟结果可以看出, 多注阴极柱区域的表面电场明显高于阴极杆区域, 并且随阳极筒内径的改变变化不明显。在不能抑制阴极杆发射的情况下, 可以根据电子束的运动特性进行结构优化<sup>[14-15]</sup>, 比如采取倾斜阴极柱的方法, 使阴极柱产生的电子束运动到多注阴极头时, 与阴极头产生的电子束在空间位置上重合, 还可以采用渐变阴极杆或增大阴极头的方法, 使阴极杆产生的电子束形成回流杆或杆、柱上产生的电子束被较大的阴极头阻挡, 通过类似的机构优化可在一定程度上提高电子束的传输效率。

## 2 组合引导磁场结构

从上面的分析可知, 虽然采取增大阳极筒半径、倾斜阴极柱及采用渐变阴极杆等方法可以提高束流的传输效率, 但这些方法不能从根本上解决杆、柱的束流发射问题, 特别是在高功率重频运行的情况下, 束流轰击多注漂移管管壁产生的大量等离子体会使真空急剧恶化, 并且等离子体向阳极的扩散会导致二极管阻抗的明显下降。要从根本上解决杆、柱的束流发射, 需要在保证多注阴极头电场强度及引导磁场位形的前提下显著降低杆、柱表面电场强度, 为此设计了永磁+螺线管磁场的组合引导磁场, 如图 4 所示。

图 4 中蓝色部分为径向充磁 (1.4 T) 的永磁体, 采用钕铁硼材料, 该永磁体位于真空腔室中并固定在软磁体 (A3 钢) 基座上; 红色部分为螺线管引导磁场, 其外半径为 170 mm, 长 400 mm, 重量约 63 kg, 与图 1 所示的结构相比, 在相同磁

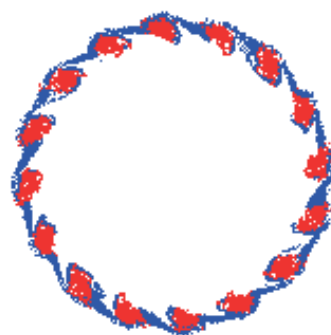


Fig. 2 Simulated electron beam spot

图 2 模拟电子束斑

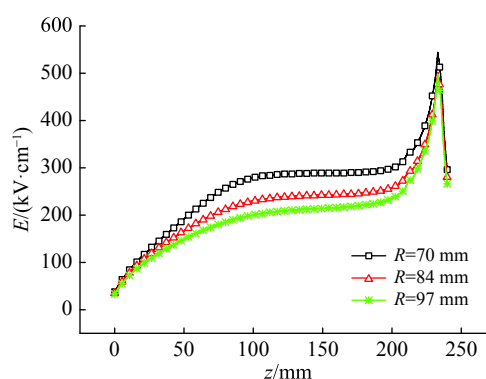


Fig. 3 Surface electric field distribution of the multi-beam cathode

图 3 多注阴极区域表面电场分布

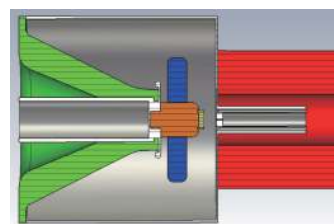


Fig. 4 Multi-beam diode based on combined magnetic field

图 4 基于组合磁场的多注二极管

场强度及分布情况下,组合磁场中的螺线管磁场体积重量及功耗可大幅减小。图4中黄色部分为多注阴极,其位于永磁体和螺线管磁场之间,该区域的磁场为叠加场,磁场大小沿轴向分布难免会存在一定的起伏,设计时通过调整永磁体和螺线管磁场的空间关系及磁场强度,并结合软磁体结构尺寸的优化,可提高轴向磁场的均匀性,优化后的磁场分布如图5所示。基于组合磁场的多注二极管不仅可将多注阴极柱拉出强电场区,还可以略去阴极杆部分,从静电模拟结果(见图6)可知电场主要集中在多注阴极头,多注阴极柱的大部分电场强度低于电子爆炸发射阈值~230 kV/cm。

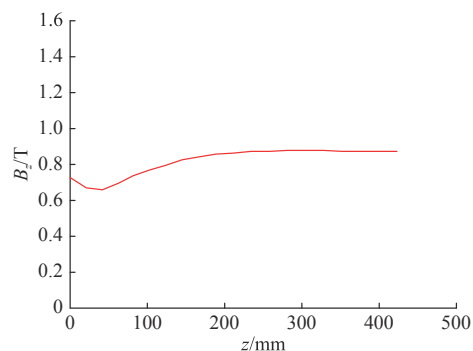
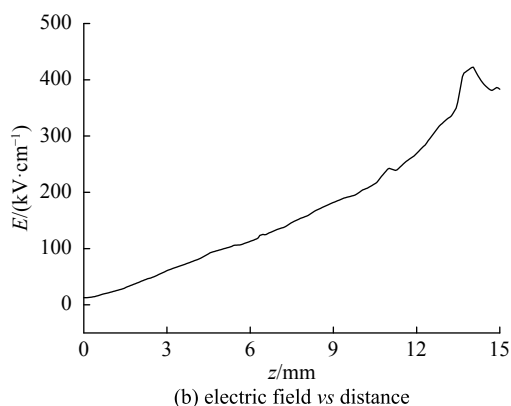
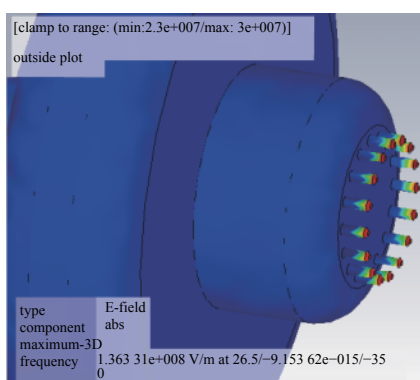


Fig. 5 Distribution of axial component of magnetic field along the axis

图5 磁场轴向分量沿轴线的分布



(a) 3D distribution

(b) electric field vs distance

Fig. 6 Electric field distribution of multi-beam cathode

图6 多注阴极电场分布

### 3 仿真计算

分别针对螺线管引导磁场和组合引导磁场的情况进行了模拟仿真,模拟中二极管电压约600 kV,束流强度约5 kA,引导磁场强度约0.8 T,多注电子束产生后在磁场的引导下进入多注漂移管区域,分别监测多注漂移管入口和出口处的电流,结果见表1。模拟得到的多注电子束束斑如图7所示,由于螺线管引导磁场结构杆、柱存在较强的束流发射,电子束束斑已近似环形,如图7(a)所示,进入多注漂移管时的束流强度约4.36 kA,经过长约200 mm的多注漂移管后束流强度约4.33 kA,可见在轴向磁场的引导下电子束在漂移管内的传输并无明显损失;相比之下永磁结构的杆、柱发射明显减弱,束斑呈多注形状,如图7(b)所示,电子束进入多注漂移管时的束流强度约4.9 kA,束流传输效率明显提高,同样电子束在多注漂移管内传输的损耗很小,漂移管出口处的束流强度约4.88 kA。

表1 多注电子束传输效率

Table 1 Transmission efficiency of multi-beam electron beam

magnetic system type	total current/kA	inport current/kA	export current/kA	transmission efficiency/%
solenoid	5	4.36	4.33	86.6
combined	5	4.90	4.88	97.6

### 4 结论

在先前的GW级强流相对论多注速调管的研究中主要存在电子束品质不高的问题。由于阴极杆和多注阴极柱的发射,电子束束斑畸变明显,当多注电子束引入多注漂移管时会造成电子束轰击漂移管。采用组合引导磁可将多注阴极拉出强电场区,明显减小甚至抑制杆、柱的束流发射。目前正在开展基于组合磁场的强流相对论多注电子束的实验研究工作,由于显著提高了束流品质,有望在相对论多注速调管放大器中实现功率更高、频谱更纯的X波段微波输出。

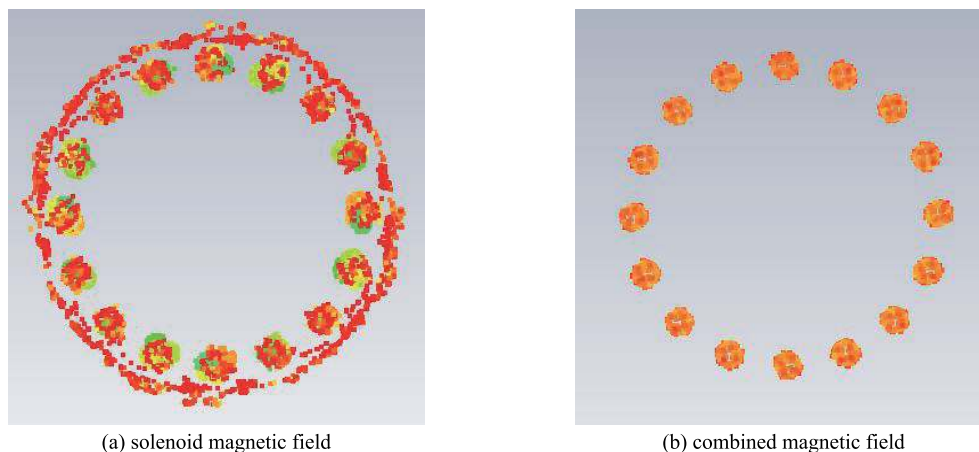


Fig. 7 Simulated beam spots

图 7 模拟束斑

## 参考文献:

- [1] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (Ding Yaogen. Design, Manufacture and application of high power klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010)
- [2] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. New York: IEEE Press, 2001.
- [3] Korolyov A N, Gelvich E A, Zhary Y V, et al. Multiple-beam klystron amplifiers: performance parameters and development trends[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2004, 32(3): 1109-1118.
- [4] 丁耀根, 阮存军, 沈斌, 等. X波段同轴多腔注速调管的研究[J]. 电子学报, 2006, 34(s1): 2337-2341. (Ding Yaogen, Ruan Cunjun, Shen Bin, et al. Study of a X-band coaxial multi beam klystron[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2006, 34(s1): 2337-2341)
- [5] 刘振帮. X 波段多注相对论速调管放大器的理论与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2012: 7-8. (Liu Zhenbang. Theoretical and experimental research on X-band multi-beam relativistic klystron amplifier[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 7-8)
- [6] 王勇, 丁耀根, 刘濮鲲, 等. 高峰值功率多注速调管的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(6): 1133-1136. (Wang Yong, Ding Yaogen, Liu Pukun, et al. Preliminary research of high peak power multi-beam klystron[J]. *High power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6): 1133-1136)
- [7] Frank K, Ivo T. Three-dimensional simulations of frequency-phase measurements of arbitrary coupled-cavity RF circuits[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, 35(11): 2018-2026.
- [8] 张瑞, 王勇. 高峰值功率多注速调管电子光学系统的研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1519-1523. (Zhang Rui, Wang Yong. Electro-optical system in high peak power multi-beam klystron[J]. *High power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(9): 1519-1523)
- [9] Song L, Ferguson P, Ives R L, et al. Development of an X-Band, 50 MW, multiple beam klystron[C]//The 5th International Vacuum Electronics Conference. 2004: 286-287.
- [10] 刘振帮, 金晓, 黄华, 等. X波段相对论速调管放大器同轴双间隙输出腔输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2162-2166. (Liu Zhanbang, Jin Xiao, Huang Hua, et al. Characteristic of X-band coaxial double-gap output cavity of klystron amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2162-2166)
- [11] Liu Zhenbang, Huang Hua, Jin Xiao, et al. Design of an X-band gigawatt multibeam relativistic klystron amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 42(10): 3419-3422.
- [12] Liu Zhenbang, Huang Hua, Lei Lurong, et al. Investigation of an X-band gigawatt long pulse multi-beam relativistic klystron amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 093105.
- [13] Liu Zhenbang, Huang Hua, Jin Xiao, et al. Investigation of the phase stability of an X-band long pulse multibeam relativistic klystron amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 093100.
- [14] 王淦平, 金晓, 黄华, 等. 强流相对论多注电子束在空心圆柱波导中的漂移[J]. 物理学报, 2017, 66: 044102. (Wang Ganping, Jin Xiao, Huang Hua, et al. Angular drift of the high current relativistic multi-beam in the hollow cylindrical waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 044102)
- [15] 李乐乐, 黄华, 刘振帮, 等. 强流多注电子束高效率引入的模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 123003. (Li Lele, Huang Hua, Liu Zhenbang, et al. PIC simulation of high efficient injection of intense relative multi-beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 123003)