第 30 卷第 12 期
2018 年 12 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 30, No. 12
Dec., 2018

1.8 T 直流磁体 94 GHz 连续波二次谐波回旋管*

孙迪敏， 卓婷婷， 马国武， 胡林林， 陈洪斌， 孟凡宝

（中国工程物理研究院 应用电子学研究所，四川 绵阳 621900）

摘　要： 首次实现直流磁体 W 波段二次谐波回旋管连续波稳定运行。回旋管工作时所需 1.8 T 磁场由一个水冷直流线圈产生。直流线圈励磁电流为 500 A，功耗 28 kW，内孔直径 66 mm，可直接将回旋管插入内孔中。回旋管内电子束由双阳极磁控注入电子枪产生。采用高效率内置准光模式变换器实现束波分离并输出准高斯波束。研制的回旋管工作频率为 94.08 GHz，腔内工作模式为 TE_{02}。实验中成功实现 5 min 连续稳定运行，输出功率达到 12 kW。电子束电压为 45 kV，电流 1.7 A，对应的输出效率 15.7 %。

关键词： 谐波； 回旋管； W 波段

中图分类号： TN129　　**文献标志码：** A　　**doi**：10.11884/HPLPB201830.180319

毫米波主动拒止系统[1]是一种非致命性高技术武器，在反恐维稳斗争中有着重要应用价值。其核心部件是能连续输出大功率毫米波的 W 波段回旋管。基波回旋管需要 3.5 T 的强磁场，目前只能采用超导磁体才能满足这一需求。基于超导磁体的毫米波拒止系统需维持低温，存在准备时间长（大于 24 h）、机动性差、持续制冷功耗大等问题。

为了降低回旋管对磁场的要求，一种有效的方案是使回旋管工作在电子回旋谐波频率上，这就是所谓的谐波回旋管。谐波回旋管所需的工作磁场与谐波次数成反比。对于 W 波段回旋管，采用三次谐波工作，可以将工作磁场降低到 1.2 T，采用永磁体或者直流线圈都能满足这一要求。但是，三次谐波回旋管效率较低[2-5]，脉冲工作时效率只有 10%左右。采用二次谐波工作，工作磁场约为 1.8 T。若采用普通螺线管线圈供磁，线圈功耗将达到 100 kW 以上，这是无法接受的。可喜的是，可以采用铁磁材料约束线圈磁场，将线圈功耗限制在可以接受的水平内[6-7]。

采用铁磁材料对常规线圈产生的磁场进行约束和引导，能够大幅减少线圈磁场的无效励磁区域。根据这一方法，完成研制的 1.8 T 直流磁体如图 1 所示。内孔直径 66 mm，可以直接用于插装连续波回旋管。励磁电流 500 A 时，中心区域磁场达到 1.8 T，功耗 28 kW。磁场位形分布如图 2 所示，长度 26 mm 均匀区内磁场变化率为±0.25%。线圈内部采用水冷方式充分冷却，直流运行稳定。

Fig. 1　Photo of the 1.8 T solenoid

图 1　1.8 T 直流磁体照片

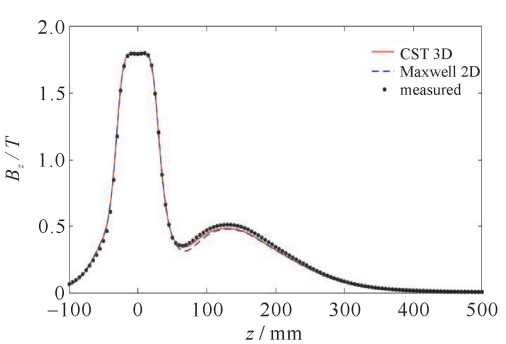

Fig. 2　Magnetic field profile of the solenoid

图 2　直流线圈磁场位形

根据直流磁体的磁场位形，设计并封装的二次谐波回旋管如图 3 所示。回旋电子束由双阳极磁控注入电子枪产生。束波互作用结构为普通开放式谐振腔。为降低管内损耗，采用 TE_{02} 模式工作。采用内置准光模式变换器实现束波分离。模式变换器采用了非规则微扰预聚束辐射器，模式变换效率大于 97%。实验中，电压 45 kV（负高压），电流 1.7 A，工作磁场 1.77 T 时，连续波输出功率达到 12 kW，工作频率为 94.08 GHz。

* **收稿日期：**2018-11-13；　**修订日期：**2018-12-06
基金项目：国家重点研发计划课题（2016YFC0800308）
作者简介：孙迪敏（1987—），男，博士研究生，主要从事毫米波回旋管研究；sundimin@tsinghua.org.cn。

5 min 连续运行实验波形如图 4 所示。图中黄色信号为阴极电压，蓝色信号为控制极电压，红色信号为发射电流，绿色信号为检波信号。从图中可以看出，回旋管运行稳定。

Fig. 3 Photo of the harmonic gyrotron

图 3 谐波回旋管照片

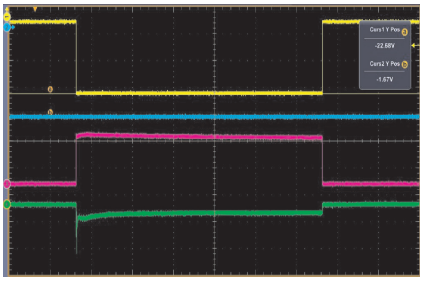

Fig. 4 Oscilloscope traces of 5 min operation

图 4 5 min 连续波运行波形

这是国际首次实现直流线圈供磁的 W 波段回旋管连续波运行。1.8 T 直流线圈采用铁磁材料具有屏蔽磁场的作用，外部磁场很弱，有效降低了对车载环境的磁场屏蔽要求。图 3 中二次谐波回旋管长度不足 1 m，降低了装车的空间要求。直流磁体供磁 W 波段连续波回旋管的成功研制，将紧凑型无超导车载毫米波主动拒止系统的应用开发推进了一大步。

参考文献：

[1] Neilson J M, Read M, Ives R L. Design and assembly of a permanent magnet gyrotron for active denial systems[C]//Dig 35th Int. Conf. on Infrared Millimeter and Terahertz Waves. 2010: 1-2.

[2] Li H, Xie Z L, WangW, et al. A 35-GHz low-voltage third-harmonic gyrotron with a permanent magnet system [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2003, 31(2):264-271.

[3] Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, Seitaro Mitsudo, etc. A high harmonic gyrotron with an axis-encircling electron beam and a permanent magnet [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2003, 32(3):903-909.

[4] 孙迪敏，胡鹏，马国武等. W 波段三次谐波回旋管实验研究[J]. 强激光与粒子束，2013，25(9)：2177-2178. (Sun Dimin, Hu Peng, Ma Guowu, et al. Experimental study on W-band third harmonic gyroton. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(9): 2177-2178).

[5] 孙迪敏，马国武，黄银虎，等. TE_{02}模式 95 GHz 三次谐波回旋管实验[J]. 强激光与粒子束，2015，27：070101. (Sun Dimin, Ma Guowu, Huang Yinhu, et al. Experimental study on 95 GHz, TE_{02} mode third harmonic gyroton. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 070101).

[6] Dmitri B, Roey B M, Einat M. Design of 95 GHz gyrotron based on continuous operation copper solenoid with water cooling[J]. Rev Sci Instr, 2004, 85: 074702.

[7] Pilossof M, Einat M. 95-GHz gyrotron with room temperature dc solenoid[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2018, 65(8): 3474-3478.

A 94 GHz continuous operation second harmonic gyroton with 1.8 T solenoid

Sun Dimin, Zhuo Tingting, Ma Guowu, Hu Linlin, Chen Hongbin, Meng Fanbao

(*Institute of Applied Electronics*, *CAEP*, *P. O. Box* 9 19-1016, *Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The continuous operation of a W-band gyrotron without superconduct magnet was realized. The gyrotron operated at the second harmonic cyclotron frequency. Its operational frequency was 94.08 GHz and the operating mode was TE_{02}. The required 1.8 T magnetic field was generated by a DC solenoid cooled by water. The power consumption of the solenoid was 28 kW and the driving current was 500 A. The inner bore diameter was 66 mm. The gyrating electron beam was generated by a triode magnetic injection gun. A high efficiency internal quasi-optical mode converter was used to separate the wave from the electron beam. In the test, 5 min stable operation was realized. The output power was 12 kW with an electron beam of 45 kV, 1.7 A. The output efficiency was 15.7%.

Key words: harmonic; gyrotron; W-band

PACS: 84.40.lk; 84.40.Fe