

文章编号: 2095-4980(2020)01-0112-04

模式抑制器在 Ku 波段在线测量系统中的应用

张立刚, 谭维兵, 李小泽, 朱晓欣, 胡祥刚

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 在 Ku 波段低磁场相对论返波管中, 由于阴极发射的角向不均匀性, 产生的微波除了 TM_{01} 模, 还有主模 TE_{11} 等其他微波模式。由于目前设计的圆波导耦合器只能测量 TM_{01} 模式功率, 其他微波模式存在会导致在线微波波形异常, 给在线测量带来困难。本文设计了一种模式抑制器, 其结构由 5 个腔组成。通过数值模拟和实测结果得出: TM_{01} 模在频率 14.8~15 GHz 衰减小于 0.1 dB, 而对其他模式, 如主模 TE_{11} 模式微波能够全反射。模式抑制器置于相对论返波振荡器(RBWO)与圆波导耦合器之间, 实验观察在线输出微波与辐射场波形一致, 微波功率符合较好。

关键词: 高功率微波; 模式抑制器; 在线测量; 圆波导耦合器

中图分类号: TN820.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018034

Mode suppressor applied in Ku-band online measurement system

ZHANG Ligang, TAN Weibing, LI Xiaoze, ZHU Xiaoxin, HU Xianggang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: There are many other modes besides TM_{01} mode in Ku-band relativistic backward wave oscillator working at low magnetic field due to inhomogeneous emission of explosive cathode. The circular couplers currently used are for pure TM_{01} mode only. The measurement will be disturbed by other modes and the waveform obtained will be abnormal, which will make measurement difficult and inaccurate. A mode suppressor consisting of five cavities is designed in this paper. The attenuation coefficient of the mode suppressor is lower than 0.1 dB for TM_{01} mode between 14.8 GHz and 15 GHz according to the simulation and measurement results. Other modes are total reflective for comparison. The mode suppressor is placed between Relativistic Backward Wave Oscillator(RBWO) and coupler in the experiment. The waveforms obtained from coupler as well as the output power are consistent well with that from radiation field, indicating beneficial effect of the proposed mode suppressor.

Keywords: High-Power Microwave(HPM); mode suppressor; microwave measurement; coupler

高功率微波(HPM)在线取样测量是对 HPM 应用系统工作状态进行实时监测的必要技术手段。通过在线取样测量, 可以实时获取 HPM 源的功率、脉宽、频率等信息, 已成为 HPM 测量中必不可少的诊断手段。传统的在线探针法及单模 HPM 器件均受功率容量的限制, 不能满足 HPM 测量的需求。多孔圆波导耦合器用于各波段在线测量系统中, 能够实时监测微波源输出功率, 其工作原理为: HPM 源产生 TM_{01} 模式的微波在圆波导传输线中传输, 耦合孔耦合一部分功率进入标准矩形波导, 并激励起 TE_{10} 模式的取样微波, 在耦合端口处测量取样微波的功率, 经过计算得到圆波导传输线中 HPM 功率。圆波导耦合器通过增大孔径尺寸、小孔倒角等办法, 大幅提高了功率容量, 取得比较理想的实验结果^[1], 广泛用于 HPM 源在线微波功率测量中。国内各单位开展了广泛的理论和实验研究^[2-10]。

在 Ku 波段低磁场返波管中, 由于阴极发射的角向不均匀性等原因, 会激励起圆波导主模 TE_{11} 模^[1,11-12]。实验中, 在线测量微波波形出现异常, 微波功率测量结果不确定度大, 其原因可能是没有抑制主模 TE_{11} 模。在以前圆波导耦合器的研制中, 只考虑了 TM_{01} 模式微波, 没有考虑 TE_{11} 模式可能会对测量造成影响, 导致在线微波测量不准。

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-08-24

作者简介: 张立刚(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高功率微波测量。email:yihui2119@163.com

因此本文设计了一种由 5 个腔组成的模式抑制器，实现了对 TE_{11} 模的全反射，而对微波源产生的 TM_{01} 传输无影响，能够抑制 TE_{11} 模式微波对在线测量造成的影响。

1 模式抑制器数值模拟

HPM 源产生频率约为 15 GHz，因此设计的模式抑制器中心频率在 15 GHz，频率范围 14.75~15.05 GHz。通过数值模拟优化，得到了模式抑制器主要由 5 个腔组成，如图 1 所示。设计的模式抑制器主波导尺寸与圆波导耦合器尺寸一致，如图 2 所示。优化后的模式抑制器尺寸参数如表 1 所示。

模式抑制器的 S 参数曲线如图 3 所示，中心频率 15 GHz，在频率 14.75~15.05 GHz 满足 TE_{11} 全反射，而 TM_{01} 全传输，模式抑制器的带宽较窄。图 3 中 $S_{1(1),1(1)}$ 、 $S_{1(3),1(3)}$ 为 TE_{11} 和 TM_{01} 的反射系数， $S_{2(1),1(1)}$ 、 $S_{2(3),1(3)}$ 为 TE_{11} 和 TM_{01} 的传输系数。

微波功率传输情况如图 4、图 5 所示，从图中可以看到 TE_{11} 模微波全发射，而 TM_{01} 传输不受影响。

表 1 模式抑制器结构尺寸参数(单位: mm)
Table1 Parameters of mode suppressor(unit: mm)

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	ϕ	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5
10.1	11	10.2	9.8	10.2	10.6	10.2	11.5	10.2	30	39.8	43.2	48.4	42.4	47.8

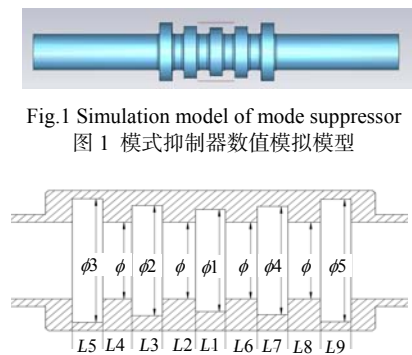


Fig.1 Simulation model of mode suppressor
图 1 模式抑制器数值模拟模型

Fig.2 Structure parameters of mode suppressor
图 2 模式抑制器结构尺寸参数

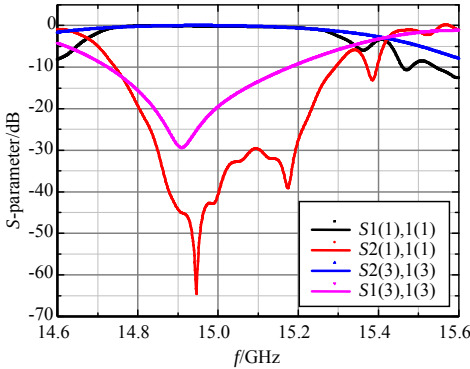


Fig.3 S-parameter of mode suppressor
图 3 模式抑制器 S 参数曲线

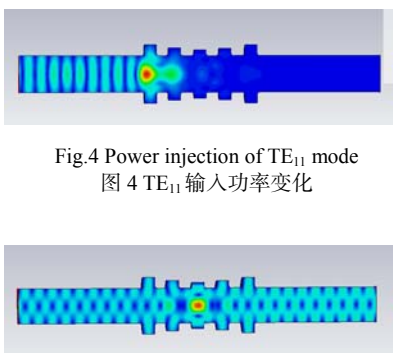


Fig.4 Power injection of TE_{11} mode
图 4 TE_{11} 输入功率变化

Fig.5 Power injection of TM_{01} mode
图 5 TM_{01} 输入功率变化

在频率 15 GHz，微波传输主波导直径 30 mm 的圆波导中传输的模式如表 2 所示。

表 2 圆波导中传输微波模式
Table2 Transmission modes in diameter 30 mm circular waveguide

mode	TE_{11}	TM_{01}	TE_{21}	TE_{01}	TM_{11}	TE_{31}
number pattern	2	1	2	1	2	2

从表 2 中可以看到，一共有 10 个微波传输模式。在模拟中，观察到除了 TE_{21} 模式，其他模式抑制器都不能传输。由于激励的 TE_{21} 模式属高次模，其在微波源产生的较少。因此系统中连接模式抑制器后，能保证圆波导耦合器中传输的模式为 TM_{01} 模。

2 模式抑制器标定

模式抑制器加工后，在矢量网络分析仪上进行测试，如图 6 所示，实物照片如图 7 所示。通过 TM_{01} 模激励器在模式抑制器中产生 TM_{01} 模，测试模式抑制器中 TM_{01} 模的传输系数；通过 TE_{11} 模矩圆转换测试 TE_{11} 的传输系数。

模式抑制器的 TM_{01} 和 TE_{11} 模式标定曲线如图 8~9 所示，从图 9 中可以看到， TM_{01} 模在频率 14.8~15 GHz 范围内，传输损耗小于 0.1 dB， TE_{11} 的传输系数小于 -40 dB。从标定结果看，模式抑制器能够实现 TM_{01} 模的全传输， TE_{11} 模全反射。

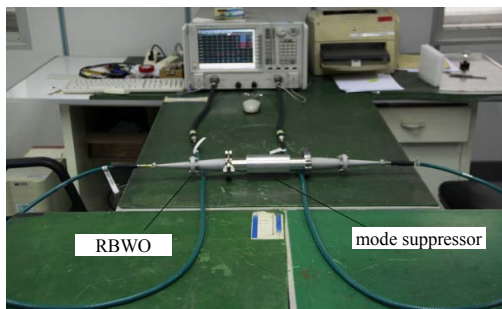


Fig.6 Calibration of mode suppressor
图 6 模式抑制器标定

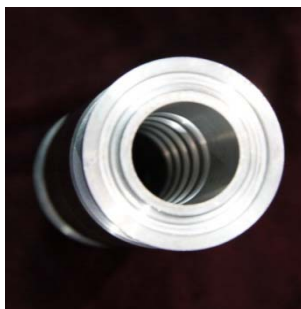


Fig.7 Photo of mode suppressor
图 7 模式抑制器实物照片

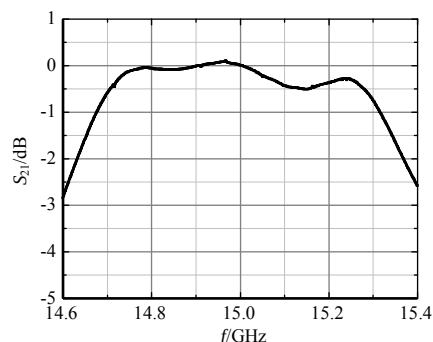


Fig.8 Transmission coefficient of TM_{01} mode
图 8 模式抑制器 TM_{01} 模式的传输系数

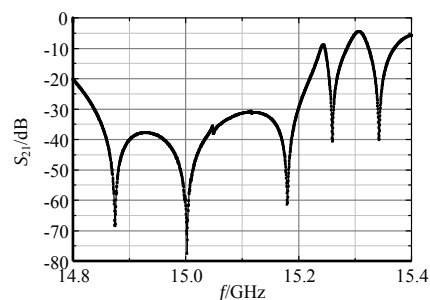


Fig.9 Transmission coefficient of TE_{11} mode
图 9 模式抑制器 TE_{11} 模式的传输系数

3 模式抑制器实验研究

模式抑制器完成标定后进行实验研究。实验中模式抑制器置于相对论返波管与圆波导耦合器之间。测得的实验波形如图 10 所示。在实验中如果不放置模式抑制器,输出的微波波形幅度变大,且波形不稳定,变化很大,无法计算在线微波功率,实验波形如图 11 所示。放置模式抑制器后在线微波输出幅度稳定,波形与辐射场一致(图 12),经计算在线功率与辐射场积分功率符合较好。

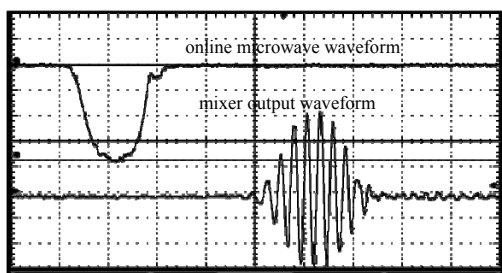


Fig.10 Experimental waveform with mode suppressor
图 10 放置模式抑制器后实验波形

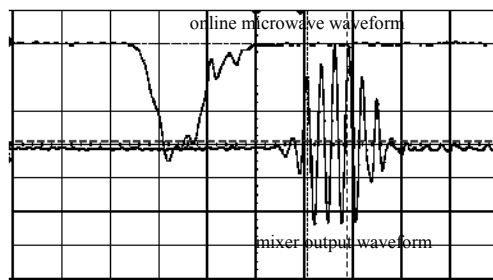


Fig.11 Experimental waveform without mode suppressor
图 11 放置模式抑制器前实验波形

4 结论

模式抑制器应用在 Ku 波段低磁场相对论返波管调试中,在线输出微波幅度稳定,波形与辐射场波形一致,测得在线功率与辐射场功率符合较好。根据波长关系推算,模式抑制器结构尺寸也可以直接用于其他波段低磁场相对论返波管实验研究中,同时也可用于大过模返波管输出模式较多情况的在线测量系统中。

参考文献:

- [1] 张立刚,宋志敏,李小泽,等. X 波段宽度圆波导耦合器设计[J]. 现代应用物理, 2015,6(2):98-101. (ZHANG Ligang, SONG Zhimin, LI Xiaozhe, et al. Design of a broad band circular coupler at X-band[J]. Modern Applied Physics, 2015, 6(2):98-101.)
- [2] 刘国,罗勇,王建勋,等. 高功率圆波导多孔阵列定向耦合器设计[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(2):417-422. (LIU Guo, LUO Yong, WANG Jianxun, et al. Design of high power circular multi-aperture array directional coupler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(2):417-422.)

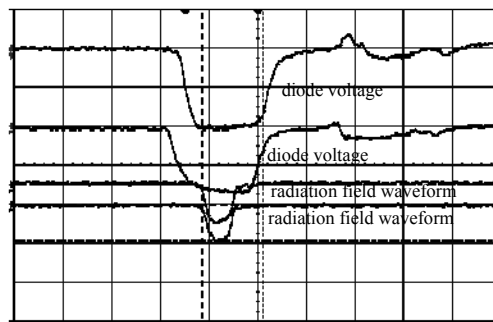


Fig.12 Radiation field waveform
图 12 辐射场波形

- [3] ZHANG Jun,JIN Zhenxing,ZHONG Huihuang,et al. Recent advance in long-pulse HPM sources with repetitive operation in S-, C-, and X-bands[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011,39(6):1438-1445.
- [4] 唐涛,巩华荣,王文祥. 过模波导定向耦合器设计的探讨[J]. 真空电子技术, 2014,6(5):5-8. (TANG Tao,GONG Huarong, WANG Wenxiang. The consideration of the directional coupler with overmoded waveguide[J]. Vacuum Electronics, 2014, 6(5):5-8.)
- [5] 白珍. 过模 O 型 Cerenkov 高功率微波源输出模式诊断方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2012. (BAI Zhen. Research on the diagnosis methods of the output modes generated by overmoded O-type Cerenkov High Power Microwave source[D]. Changsha,Hunan,China:National University of Defense Technology, 2012.)
- [6] 白珍,李国林,张军. X 波段高功率微波选模定向耦合器[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(7):1747-1750. (BAI Zhen,LI Guolin,ZHANG Jun. X-band high power microwave mode-selective direction coupler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(7):1747-1750.)
- [7] WANG Wenxiang,GONG Yubin,YU Guofen,et al. Mode discriminator based on mode-selective coupling[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(1):55-63.
- [8] 谢处方,饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. (XIE Chufang,RAO Kejin. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing:High Education Press, 2006.)
- [9] 曹乃胜,罗勇,王建勋. 圆波导-矩形波导小孔耦合定向耦合器设计[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(4):637-640. (CAO Naisheng,LUO Yong,WANG Jianxun. Design of aperture-coupling directional coupler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(4):637-640.)
- [11] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2009. (WANG Wenxiang. Microwave engineering technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2009.)
- [11] CHEN Zaigao. Research on effect of emission uniformity on X-band relativistic backward oscillator using conformal PIC code[J]. Physics of Plasmas, 2016,23(7):073115.
- [12] ZHANG Dian,ZHANG Jun,ZHONG Huihuang,et al. Asymmetric modes decomposition in an overmoded relativistic backward wave oscillator[J]. Physics of Plasmas, 2014,21(9):093102-1-5.