

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

高功率高效率速调管输出耦合器的优化与设计

陆志军 周祖圣 肖欧正 李晓

Optimization and design of high-power high-efficiency klystron output coupler

Lu Zhijun, Zhou Zusheng, Xiao Ouzheng, Li Xiao

引用本文:

陆志军, 周祖圣, 肖欧正, 李晓. 高功率高效率速调管输出耦合器的优化与设计[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36: 103002. doi: 10.11884/HPLPB202436.240155

Lu Zhijun, Zhou Zusheng, Xiao Ouzheng, Li Xiao. Optimization and design of high-power high-efficiency klystron output coupler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 103002. doi: 10.11884/HPLPB202436.240155

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240155>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

波导型高功率微波输能窗的研究进展

Research progress of high-power waveguide window

强激光与粒子束. 2021, 33: 023001-1-023001-13 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200257>

一种可调耦合度型高功率输入耦合器的设计

Design of variable fundamental power coupler

强激光与粒子束. 2019, 31: 053003-1-053003-4 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180258>

BEPC II 直线加速器速调管的反射保护

Reflection protection of BEPC II linear accelerator klystron

强激光与粒子束. 2019, 31: 025101-1-025101-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180276>

Ka波段回旋行波管高效率输入耦合器设计

Design of Ka band gyro-TWT high purity input structure

强激光与粒子束. 2023, 35: 083002-1-083002-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220287>

高功率高效率开口波导阵列天线设计与实验

Design and experiment of open waveguide array antenna with high power and high efficiency

强激光与粒子束. 2024, 36: 073005-1-073005-11 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230421>

大功率速调管收集极高效强迫风冷散热系统的设计

Design of high efficiency forced air cooling heat dissipation system for collector of high-power klystron

强激光与粒子束. 2022, 34: 063001-1-063001-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210576>



·高功率微波技术·

高功率高效率速调管输出耦合器的优化与设计*

陆志军^{1,2}, 周祖圣¹, 肖欧正¹, 李 晓^{1,2}

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院 高能物理研究所 东莞研究部, 广东 东莞 523803)

摘 要: 输出耦合器作为速调管关键部件, 其性能直接关系到速调管的整体表现。然而, 耦合器故障却是速调管及多种真空电子设备中最为常见的问题之一, 特别是在高连续波功率运行场景下, 这一问题更为突出。针对连续波 650 MHz/800 kW 高效率速调管, 对输出耦合器进行优化设计, 并在单注和多注速调管耦合器测试方面取得了重要突破: 单注速调管输出耦合器在连续波模式下的测试功率已达到 690 kW 以上, 为了进一步增加功率容量, 采用 T-bar 结构过渡, 并对耦合器进行优化设计, 使陶瓷附近电场分布更均匀; 而多注速调管矩形波导窗输出耦合器最高测试功率达到全驻波 115 kW。此外, 通过对耦合器的结构、材料以及散热方式进行分析与优化, 积极探索提升耦合器功率容量的多种可能途径, 进一步增强了速调管的稳定性和可靠性。

关键词: 速调管; 输出耦合器; 高功率测试; T-bar; 矩形窗

中图分类号: TN122; O572.21[†]

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240155

Optimization and design of high-power high-efficiency klystron output coupler

Lu Zhijun^{1,2}, Zhou Zusheng¹, Xiao Ouzheng¹, Li Xiao^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Dongguan Research Department, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523803, China)

Abstract: Microwave vacuum electronic devices play a crucial role in various fields such as scientific research and industry. Particularly, the klystron has been essential in nuclear fusion research, high-energy physics experiments, and industrial radiation processing. The output coupler, a key component of the klystron, directly impacts its overall performance. However, coupler failures are among the most common issues in klystrons and various vacuum electronic devices, especially prominent in scenarios involving high continuous wave power operation. For the development of a high-efficiency tunable 650 MHz/800 kW continuous wave klystron, optimization design of the output coupler was conducted. Significant progress was achieved in the testing of the output couplers for single-beam and multi-beam tunable klystrons. In continuous wave mode, the test power of the output coupler for the single-beam tunable klystron has exceeded 690 kW. To further increase power capacity, a T-bar transition structure was employed, and the coupler was optimized to achieve a more uniform electric field distribution near the ceramic. Additionally, the rectangular waveguide window output coupler for the multi-beam tunable klystron achieved a maximum test power of 115 kW in full standing wave conditions.

Key words: klystron, output coupler, high-power test, T-bar, rectangular window

真空微波器件在粒子加速器、雷达系统、医疗设备、广播电视等领域有着广泛的应用, 涵盖军事和民用领域。高功率耦合器在真空微波电子学领域, 特别是在高能物理实验中扮演着至关重要的角色。这些耦合器具有高功率容量、优异的电气性能以及紧凑的结构, 适用于各种大功率需求。在高能加速器连续波(CW)应用中, 耦合器必须能够有效地传输高功率微波, 同时尽量减小传输到目标设备的损耗。同时, 耦合器还必须具备特殊的热稳定性, 以确保器件在高能加速器连续波运行期间的可靠性和稳定性, 因为陶瓷材料的温度会随着传输功率提高而上升。

* 收稿日期: 2024-05-11; 修订日期: 2024-07-22

基金项目: 中国科学院高能物理研究所基金谢家麟基金项目 (E4546JU2)

联系方式: 陆志军, luzj@ihep.ac.cn。

通信作者: 周祖圣, zhousz@ihep.ac.cn。

耦合器的研制涉及多个领域,包括高功率微波技术、功率耦合技术、材料、机械和工艺等。目前国内在高功率耦合器领域的研究起步较晚,尤其是在材料方面,如陶瓷材料、陶瓷成型和焊接工艺、陶瓷镀膜等方面与国外仍存在较大差距。这些方面的研究限制了我们对于更高功率耦合器的研制探索。

随着高能物理研究所(IHEP)联合国内外研究机构提出环形正负电子对撞机(CEPC)以来^[1],一系列关于功率源、超导谐振腔和磁铁等重点研究工作不断推进。CEPC 预研的重点研究项目之一是发展高功率和高效率速调管技术,考虑到 CEPC 束流功率预计将超过 60 MW,提高效率对于减少功耗和节约整体项目成本至关重要。设计初期,速调管的效率目标被设定为 80%^[2-3]。目前,大多数运行中的速调管的最高效率约为 65%。此外,目前国内缺乏能够承受持续波功率水平高达 800 kW 的速调管和耦合器,CEPC 预研为国产高功率耦合器研究提供了便利。为了解决这些挑战,IHEP 成立了高效率速调管研发团队,成功研制出测试效率超过 70% 的高效率速调管^[2]。本文介绍了高效率高功率速调管输出耦合器的研制进展情况,包括单注速调管和多注速调管两种不同的耦合器类型,设计和测试结果,以及遇到的问题和未来进一步提升性能的建议。

1 高效率 650 MHz 速调管耦合器类型

在当前高能加速器技术领域,高能物理研究所研发的高效率速调管技术已取得了显著进展,主要分为单注速调管和多注速调管两种类型。针对不同结构的速调管,其高功率耦合器的设计方案和技术路线也有明显的区别。对于单注速调管(如图 1 所示)输出耦合器,其核心在于实现高功率的稳定输出。基于国内外丰富的研制经验,结合耦合孔尺寸,我们采用同轴磁耦合方式进行功率输出^[3]。这种设计方式要求耦合器不仅能够承受高达 800 kW 的连续波功率,还需确保在极端工作环境下能够长期稳定运行,对于陶瓷材料的选择、二次电子倍增效应、热设计以及结构强度都提出了极高的要求。

多注速调管的结构设计则更为复杂,如图 2 所示,其采用了两侧对称耦合输出功率的方式^[4]。整管输出功率 800 kW,每个耦合器需承受 400 kW 的连续波功率。值得注意的是,由于多注速调管的输出腔尺寸较大,其输出耦合开口的横向尺寸与用于 650 MHz 传输功率的 WR1500(381 mm×190.5 mm)矩形波导相当。因此,在输出耦合器的设计上,本文采用了矩形波导窗口,这不仅简化了结构,还有效提高了功率传输效率。

1.1 单注速调管输出耦合器

在高能所正式研究 650 MHz 高效率速调管之前,国内还没有这么高连续波功率的耦合器研制经验。为了能够实现 800 kW 的连续波功率长期稳定运行。我们参考了国外 L 波段的速调管输出耦合器设计经验,包括 CTED、CPI 等厂商 L 波段的速调管输出耦合器设计^[5-8]。输出腔功率耦合出口尺寸是内径 33.4 mm、特性阻抗为 50 Ω 的同轴线,经过一段渐变结构,减缓腔内 X-射线对陶瓷的影响。这种结构简单,便于加工(图 3)。陶瓷表面镀 TiN 膜后,二次电子倍增几率低。

详细的设计分析参考文献[3]。在模拟中,我们采用陶瓷处内外导体通过水冷却的方式,其中冷却水温 22 $^{\circ}\text{C}$,流

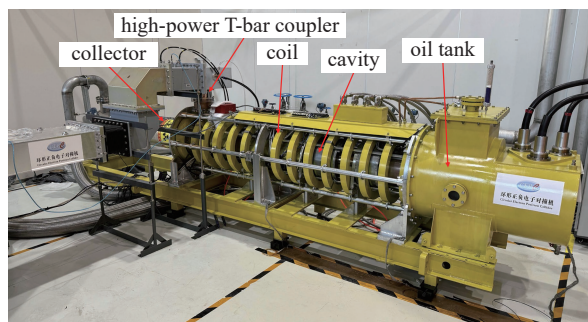


Fig. 1 650 MHz/800 kW single-beam klystron

图 1 650 MHz/800 kW 单注速调管

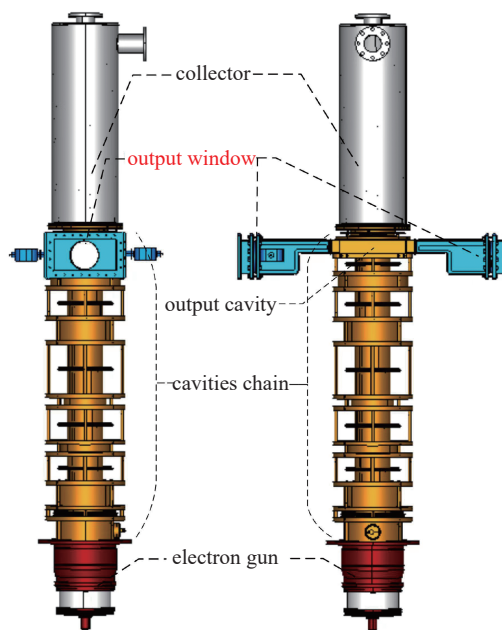


Fig. 2 Schematic of multi-beam klystron and the output coupler

图 2 多注速调管与输出耦合器示意图

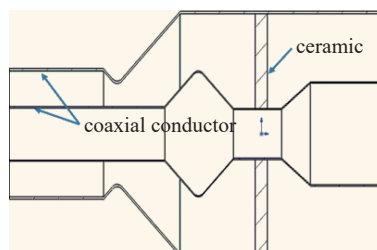


Fig. 3 Schematic of the single-beam klystron output coupler

图 3 单注速调管输出同轴耦合器示意图

速 0.4 m/s, 为了贴近一般情况, 采用较保守的对流换热系数约 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 小于其他设计中理想的计算情况 $5000 \sim 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。不考虑其他因素对陶瓷的影响, 模拟中得到的陶瓷温度最高约 33°C , 最大热应力约 15 MPa , 如图 4 所示。

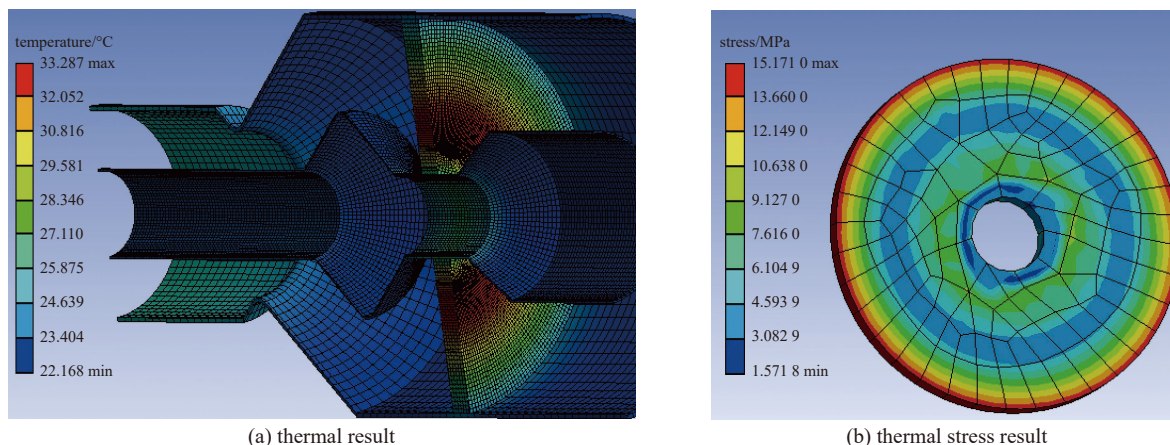


Fig. 4 Thermal and thermal stress analysis of the single-beam klystron output coupler

图 4 单注速调管输出耦合器温度和应力分析

1.2 多注速调管矩形波导耦合器

为了提高速调管效率, 高能物理研究所同时开展连续波 800 kW 高效率多注速调管研究。多注速调管输出耦合器采用矩形波导窗, 这是国内在这个频段和功率水平从未有过的设计和经验^[9]。我们参考了国内外矩形波导耦合器的设计^[10-11], 其中, 盒型窗是最常用的矩形波导窗之一^[10-11]。不过由于盒型窗的最小直径要大于矩形波导长边, 满足矩形波导窗的陶瓷半径大于 381 mm。这会导致盒型窗有以下劣势: 一方面大直径陶瓷制造困难, 造价很高; 另一方面, 大尺寸陶瓷损耗大、发热高, 冷却困难。同时, 国内外都没有尺寸这么大还能保证膜层厚度均匀的陶瓷窗镀膜机器。这种情况下, 采用类似于陶瓷尺寸更小矩形波导窗是最好的选择。矩形波导窗结构和装配图如图 5 所示^[12], 这种结构可以使陶瓷尺寸减小到 88 mm 左右。同时, 为了进一步降低陶瓷温度, 对比不同陶瓷性能, 除了设计和加工了一套氧化铝陶瓷耦合器之外, 我们还采用氧化铍陶瓷同样加工了一套耦合器^[4, 12]。陶瓷外焊接了一圈带有冷却通道的铜圈, 铜圈内通过冷却水的方式对陶瓷进行冷却, 同时, 为了防止冷却不足, 可以在波导空气侧对陶瓷进行强制对流风孔。在 400 kW 的运行功率模拟中, 只有冷却水的冷却设计已经能够满足运行要求, 其中陶瓷的温升和应力如图 6^[12] 所示。

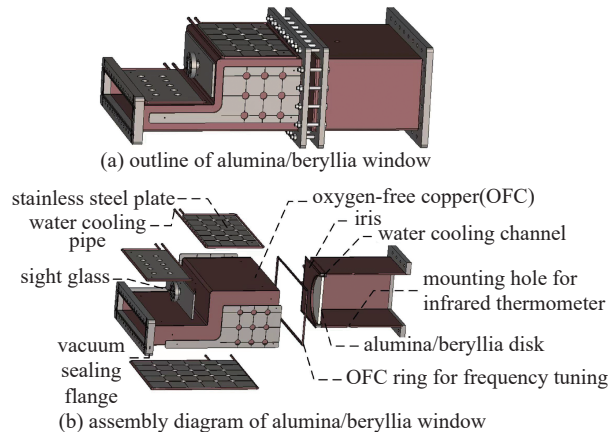


Fig. 5 Structure diagram of multi beam klystron output coupler

图 5 多注速调管输出耦合器结构图

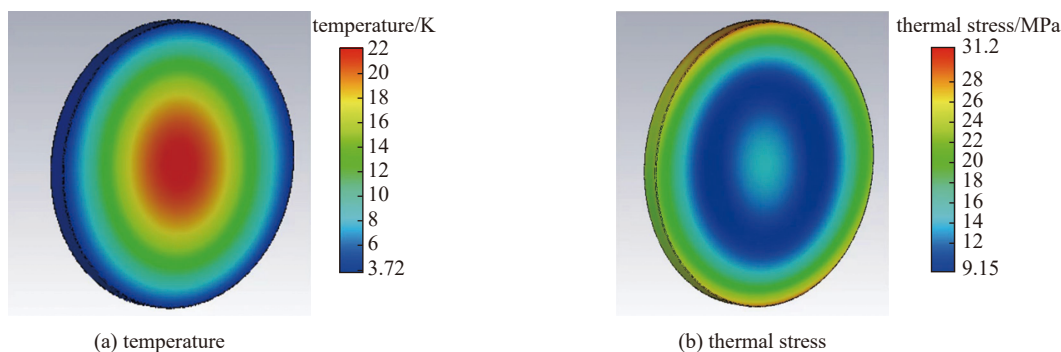


Fig. 6 Temperature increase and thermal stress of ceramic

图 6 陶瓷温升和应力分布

2 耦合器测试

耦合器冷测是为了获得耦合器的功率传输参数如 S_{11} 、 S_{21} 和驻波比 (VSWR) 等。通常耦合器的两个端口不一致, 为了使测量结果可靠, 测量前两个端口需要校准, 这就需要将两个测量端口转换成一样的接口。同轴耦合器测量中, 我们将两个同轴耦合器通过连接段连接到一起, 通过矢量网络分析仪, 测量 S 参数, 测量结果如图 7 所示, 两个耦合器的插入损耗 S_{21} 约为 -0.01 dB, 驻波比 $\rho_{\text{VSWR}} = 1.06$, 耦合器的传输参数优良, 耦合器的功率损耗很小。

多注速调管的输出耦合器两个端口尺寸也不一样, 我们同样采用给中间加入过渡段的方法测量。其中, 在运行频率点 650 MHz 处氧化铝陶瓷耦合器 S_{11} 约 -35 dB, 氧化铍陶瓷耦合器 S_{11} 约 -27.5 dB, 结果如图 8^[12] 所示。氧化铍陶瓷耦合器的 S_{11} 参数相对差一些, 这种情况在进一步精确测量氧化铍陶瓷的相关参数之后再行模拟分析可以有效解决。

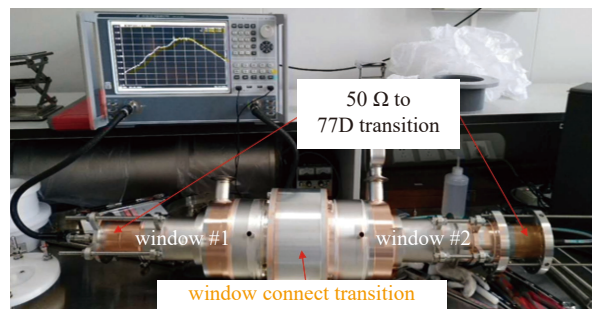


Fig. 7 S-parameter test of single-beam klystron output coupler

图 7 单注速调管耦合器冷测结果

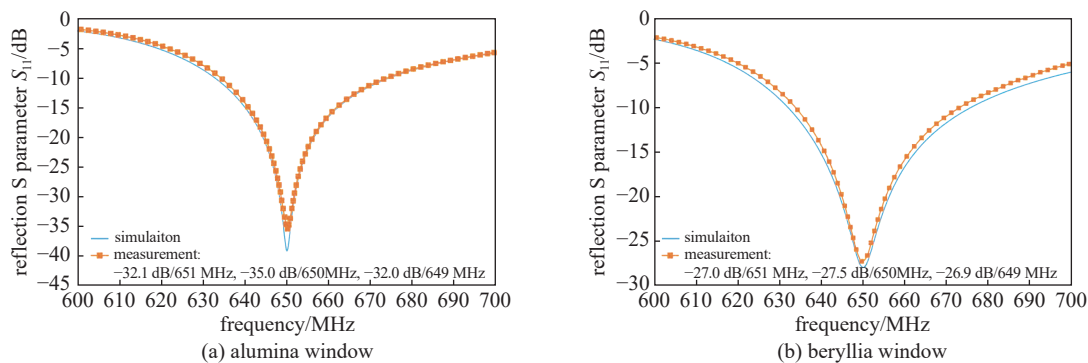


Fig. 8 S_{11} test of multi-beam klystron output coupler

图 8 多注速调管耦合器 S_{11} 测试结果

由于国内 650 MHz 频率没有运行功率超过 400 kW 的功率源, 只有一套 150 kW 左右的固态放大器供我们测试, 并不能完全满足耦合器的测试要求。同时, 由于单注速调管研制进展要求, 我们将耦合器与腔体一起钎焊并放入排气炉烘烤排气, 之后, 耦合器和速调管一起在高能所速调管高功率测试平台进行高功率老练(见图 1)。详细的测试过程在参考文献 [13], 在 650 MHz 工作点, 单注速调管测试最高功率达到 690 kW, 最高测试效率超过 70%, 再继续提升连续波功率时发现真空泄露, 其中陶瓷表面没有明显二次电子倍增和打火情况。然而, 进一步解剖后发现真空侧陶瓷有细微裂纹, 通过讨论与研究分析, 我们认为这是由于陶瓷表面温度不均匀导致陶瓷内部产生巨大的热应力导致陶瓷破裂。为了解决这个问题, 采用 T-bar 替代门钮结构为同轴波导和矩形波导的过渡结构。同时对冷却结构进行优化, 采用陶瓷窗处内导体通过冷却水, 外导体和空气侧陶瓷表面采用风冷却的方式进一步降低陶瓷温度梯度^[14]。在新设计中, 我们考虑了各种导致陶瓷损耗升高的因素, 因此模拟分析中, 在 800 kW 连续波运行条件下, 陶瓷最高温度达到 80 °C, 最大应力 88 MPa 左右, 不过陶瓷温度分布均匀, 最大应力也远小于陶瓷可承受应力值(如图 9 所示)。

多注速调管耦合器高功率测试则是通过采用过渡段连接两个耦合器、真空侧抽取真空的方式完成高功率测试(如图 10^[12] 所示)。通过 150 kW 固态放大器提供功率, 为了提高测试功率, 我们进行全驻波测试。其中, 行波测试功率最高达到连续波 143 kW(固态放大器可提供最高功率), 驻波测试功率达到 115 kW, 同时通过短路活塞, 将波腹(即最高 4 倍功率 460 kW)位置调整到陶瓷窗处, 以检验耦合器陶瓷窗的真实可承受功率。耦合器在 115 kW 功率点没有明显打火和真空变差的情况。综合测试情况, 氧化铍陶瓷散热性能有明显提升, 陶瓷表面温度梯度更小, 同时氧化铍陶瓷耦合器放气率比氧化铝陶瓷更低一些^[12]。

高功率测试结果表明, 高功率耦合器国产化虽然有比较好的进展, 但我们仍需要进一步的研究和足够多的测试数据。速调管输出耦合器结构优化仍然有很大的空间, 针对不同应用场景采用不同的结构和优化, 尤其要注意对陶瓷本身进行多重保护, 防止陶瓷受到二次电子倍增效应、高热应力和腔间隙产生的 X-射线的影响。从我们的

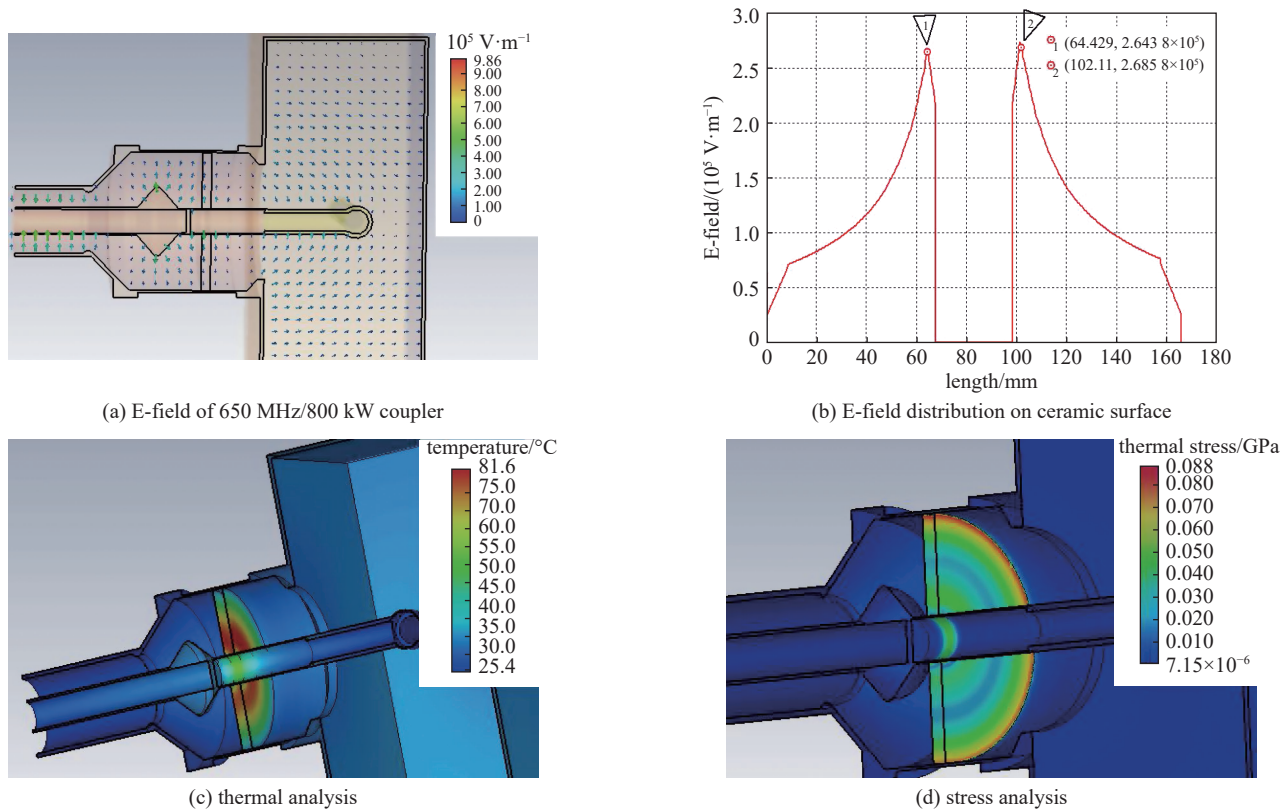


Fig. 9 Analysis results of T-bar coupler

图 9 T-bar 耦合器结构模拟分析

设计加工经验和现有的文献资料,在陶瓷表面做凹槽加工以避免二次电子倍增,采用氧化铍陶瓷降低高功率环境陶瓷温度,结构和冷却设计优化等方式对未来进一步提高耦合器功率容量有明显的帮助。

3 结 论

本文介绍了国产化高功率高效率速调管输出耦合器的研制进展。经过一系列努力,我们成功制造了 650 MHz 单注高效率速调管以及相应的高功率耦合器。耦合器的传输性能好,最大测试功率超过 690 kW。为了使耦合器测试功率进一步提升,本文采用 T-bar 作为同轴和矩形波导过渡结构,并采用陶瓷窗内导体通过冷却水,外导体和空气侧陶瓷表面强制风冷的方式进一步降低陶瓷温度。另外,为了满足多注速调管运行要求,我们首次在国内研究高功率矩形波导窗,并分别加工了一个氧化铝陶瓷和氧化铍陶瓷耦合器进行对比测试。从温度梯度和二次电子倍增效应测试结果分析,氧化铍陶瓷在未来高功率耦合器研制中有更广阔的应用空间。

致 谢 感谢昆山国力大功率器件工业技术研究院李永明副院长团队给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Gao Jie. CEPC technical design report: accelerator[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2024, 8(1): 1-1105.
- [2] Zhou Zusheng, Chen Y, Chi Yunlong, et al. Progress on CEPC 650 MHz klystron[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36: 2142011.
- [3] Lu Zhijun, Fukuda S, Zhou Zusheng, et al. Design and development of radio frequency output window for circular electron-positron collider klystron[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27: 118402.
- [4] Wang Shengchang, Fukuda S, Lu Zhijun, et al. Design study and modeling of multi-beam klystron for circular electron positron collider[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1026: 166208.

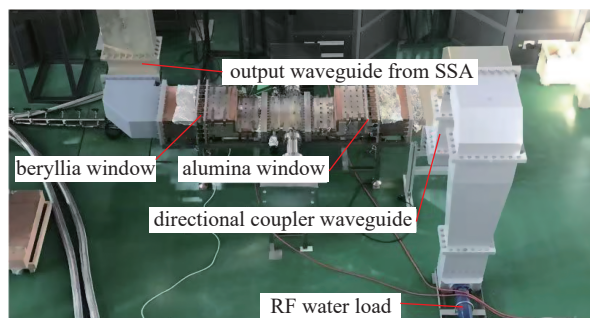


Fig. 10 High-power test platform of multi-beam klystron output coupler

图 10 多注速调管输出耦合器高功率测试平台

- [5] Saito Y. Breakdown phenomena in rf windows[J]. AIP Conference Proceedings, 1995, 337(1): 373-382.
- [6] Vyas S, Shekhawat N, Maurya S, et al. Computer simulation and analysis of 350-MHz high-power coaxial RF window and T-bar transition[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2012, 40(10): 2693-2698.
- [7] Naito F, Sakai H, Yoshimoto S, et al. The input coupler for the KEKB ARES cavity[C]//Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference. 1998: 776.
- [8] Huang Tongming, Pan Weimin, Ma Qiang, et al. High power input coupler development for BEPCII 500MHz superconducting cavity[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2010, 623(3): 895-902.
- [9] 丁耀根. 大功率速调管的技术现状和最新进展[J]. 真空电子技术, 2020(1): 1-25. (Ding Yaogen. Technical status and latest progress of high power klystrons[J]. [Vacuum Electronics](#), 2020(1): 1-25)
- [10] Ko S K, Lee B Y, Lee K O, et al. First operating test of the 700 MHz 1 mw prototype klystron for a proton accelerator[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2006, 38(8): 779-784.
- [11] Rimmer R A, Koehler G, Saleh T, et al. A high-power L-band RF window[C]//PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 01CH37268). 2001: 921-923.
- [12] Wang Shengchang, Zhou Zusheng, Lu Zhijun, et al. Development of RF windows for 650 MHz multibeam klystron[J]. [Nuclear Science and Techniques](#), 2023, 34: 136.
- [13] Xiao Ouzheng, Fukuda S, Zhou Zusheng, et al. Design and high-power test of 800-kW UHF klystron for CEPC[J]. [Chinese Physics B](#), 2022, 31: 088401.
- [14] Lu Zhijun, Zhou Zusheng, Xiao Ouzheng, et al. Study and analysis of high-power coupler failure due to asymmetric electric field distribution[J]. [Vacuum](#), 2024, 227: 113406.