



·高功率微波技术·

# 用于 X 波段模块化相对论速调管放大器在线测量的 紧凑型定向耦合器设计\*

何昌杰, 张 威, 巨金川, 许流荣, 曹鸿昌

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 高功率微波技术研究所, 长沙 410073)

**摘 要:** 为实现模块化相对论速调管放大器功率、频率和相位的在线测量, 对紧凑型高定向性高带宽的定向耦合器进行了仿真和实验研究。利用小孔耦合理论和相位叠加原理进行理论分析, 设计了一种双孔紧凑型定向耦合器, 在此基础上采用主、副波导正交连接, 耦合孔沿轴向和角向二维分布的方法, 进一步缩短了耦合器的长度。通过电磁仿真对耦合器各参数进行优化, 模拟结果表明: 当中心频率为 10 GHz 时, 普通双孔定向耦合器对  $TM_{01}$  模式的耦合度为  $-60.68$  dB, 在 250 MHz 的带宽内定向性大于 20 dB, 此时耦合区长度为 3.49 cm。改进型定向耦合器对  $TM_{01}$  模式的耦合度为  $-58.1$  dB, 在 300 MHz 的带宽内定向性大于 20 dB, 此时耦合区长度仅为 1.8 cm(约  $0.6\lambda$ )。耦合器的冷腔实验测量结果与仿真结果符合较好。

**关键词:** 高功率微波; 相对论速调管放大器; 定向耦合器; X 波段

中图分类号: TN231.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220370

## Design of compact directional coupler for X-band relativistic triaxial klystron amplifier

He Changjie, Zhang Wei, Ju Jinchuan, Xu Liurong, Cao Hongchang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** To realize the on-line measurement of power, frequency and phase of modular relativistic triaxial klystron amplifier, a compact directional coupler with high directivity and bandwidth is simulated and experimentally studied. Based on the theoretical analysis of the pinhole coupling theory and the phase superposition principle, a dual-hole compact directional coupler is designed. On this basis, the main and auxiliary waveguides are connected orthogonally, and the coupling holes are distributed along the axial and angular directions, which further shortens the length of the coupler. The parameters of the coupler are optimized by electromagnetic simulation. The simulation results show that when the center frequency is 10 GHz, the coupling degree of the ordinary dual-hole directional coupler to the  $TM_{01}$  mode is  $-60.68$  dB, and the directivity is greater than 20 dB in the bandwidth of 250 MHz, and the coupling area length is 3.49 cm. The coupling degree of the improved directional coupler to the  $TM_{01}$  mode is  $-58.1$  dB, and the directivity is greater than 20 dB in the bandwidth of 300 MHz. At this time, the length of the coupling zone is only 1.8 cm (about  $0.6\lambda$ ). The cold cavity experimental results of the coupler are in good agreement with the simulation results.

**Key words:** high power microwave, triaxial klystron amplifier, directional coupler, X-band

三轴相对论速调管放大器(TKA)具有高功率、高效率、频率及相位可控等特点, 是高功率微波相干合成的理想器件之一<sup>[1-3]</sup>。多个 TKA 模块相干合成时, 各 TKA 输出微波频率一致, 相位差恒定是实现高效率合成的关键因素, 因此准确高效地测量各 TKA 输出微波的功率、频率和相位是开展空间相干功率合成的重要支撑手段。在实验中, 通常通过测量远场辐射微波来获取器件输出微波的参数, 但是在多模块同时工作时, 远场方法只能获取合成微波的信号, 无法分辨各个模块的频率与相位, 严重制约多模块合成效果的优化提升。

\* 收稿日期: 2022-10-23; 修订日期: 2023-03-02

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金项目(SKL2021ZR04)

联系方式: 何昌杰, hechangjie98@126.com;

张 威, weizhang09@126.com。

定向耦合器在线测量是对高功率微波源工作状态进行实时监测的有效手段,通过在线取样测量,可以独立获取各个高功率微波源输出微波信号的功率、频率和相位等信息<sup>[4-7]</sup>。在高功率微波领域,定向耦合器通常聚焦于高功率容量、高定向性和高带宽等问题,不考虑空间结构的限制。其中,2013年国防科技大学白珍博士设计了一种X波段高功率微波选模定向耦合器,该耦合器使用了切比雪夫等间距孔分布。在中心频率为9.4 GHz时,模拟结果显示对 $TM_{01}$ 模的耦合度为-54 dB,在400 MHz的带宽内定向性大于35 dB<sup>[7]</sup>。该装置采用两组六孔耦合结构,不考虑法兰与连接段,仅耦合区的轴向长度(第一个耦合孔前端与最后一个耦合孔末端之间的距离)就大于45 cm。2018年,电子科技大学喻寄航等人设计了一种X波段高功率微波宽带选模定向耦合器,该耦合器在9.0~9.8 GHz的带宽范围内,耦合度为(-59.8±1) dB,定向性大于30 dB<sup>[8]</sup>。其同样采用了两组六孔切比雪夫分布的设计方法,仿真结果显示,该器件耦合区长度大于45 cm。上述高功率微波在线测量装置在设计时兼顾了耦合度、定向性、带宽等性能,但是轴向长度过长,不能满足模块化TKA对耦合器的紧凑化需求。

模块化TKA集成度高,空间尺寸尤其是轴向长度非常有限,此外,多模块大规模合成也对各个模块的体积提出了较高的要求。因此对用于测量的耦合器提出了以下特殊要求:模块化TKA集成度高,轴向空间非常有限,耦合器的轴向尺寸越紧凑越好;为防止出现射频击穿,耦合器的功率容量需要达到GW量级;为了防止反射微波的干扰,定向性需达到20 dB以上;随着未来宽带TKA的发展,对耦合器的工作带宽也提出了一定要求。

综合考量诸多因素,本文通过理论分析和电磁仿真,设计了一种用于X波段模块化相对论速调管放大器在线测量的紧凑型定向耦合器。

## 1 理论分析

定向耦合器的研制基于小孔耦合理论<sup>[9-10]</sup>。当小孔尺寸远小于微波场的导波波长时,可以等效为电偶、磁偶极子的组合。主波导中的微波信号通过小孔向副波导辐射电磁场。根据惠更斯原理和相位叠加原理,结合边界条件,可以得到小孔耦合理论。

在图1的多孔耦合示意图中,相距 $d_n(n=1,2,3,\dots)$ 的两个孔为一对对称孔。对称孔位置对称、形状大小相同。设3对对称孔的耦合强度分别为 $a_1^+$ ,  $a_2^+$ 和 $a_3^+$ ,其中‘+’, ‘-’分别代表向 $z$ 轴正负方向传输的波。可以得到耦合到矩形波导中波的归一化总强度

$$A^\pm = \left| \sum_{n=1}^3 a_n^\pm \cos \varphi_n^\pm \right| \quad (1)$$

式中:  $\varphi_n^\pm = (\beta_2 \mp \beta_1)d_n/2$ ;  $d_n = 2 \sum_{i=1}^n s_n - s_1 (n=1,2,3)$ ; 主波导(圆波导)和副波导(矩形波导)中电磁场的纵向波数分别为 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 。通过调节各耦合孔之间的间距 $S_1, S_2$ 和 $S_3$ 使之满足

$$\begin{cases} \varphi_n^+ = (\beta_2 - \beta_1)d_n/2 = p\pi \\ \varphi_n^- = (\beta_2 + \beta_1)d_n/2 = (q + 1/2)\pi \end{cases} \quad (p, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

可以使向 $z$ 轴正方向传输的场同相相干增强,同时使向 $z$ 轴副方向传输的场反向相干相消,从而实现微波的定向传输。

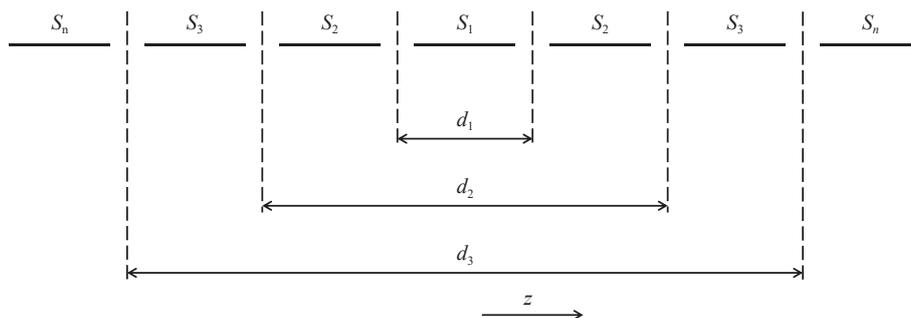


Fig. 1 Porous coupling model

图1 多孔耦合模型

## 2 仿真模拟

设计定向耦合器首先要选择合适的主、副波导尺寸。主波导应与TKA输出端匹配,即半径为35 mm的圆波导

(与已搭建高功率微波平台上 TKA 输出端半径一致)。副波导选用 X 波段常用的标准矩形波导 BJ-100(22.86 mm×10.16 mm)。

## 2.1 传统双孔定向耦合器

倍兹孔耦合器(单孔耦合)是结构最简单的耦合器,通过调节耦合孔到矩形波导窄壁的距离可以实现一定的定向耦合。但其带宽极窄,定向性不高,难以实际应用在高功率微波的在线测量当中。传统多孔耦合器能够通过增加孔的数量,以及调节孔半径、孔间距等参数来优化耦合度、定向性和带宽等性能,但孔数目的增加又会几倍数地增大耦合器的体积,给实验的实际操作带来不便,所以通过更少的孔来实现耦合器的性能需求是一种设计思路。

想要实现一定带宽的定向耦合,至少需要设置两个耦合孔。即可使得所需要模式的相位在副波导内正向相干增强或者反向相干相消<sup>[7,11]</sup>

$$S = \begin{cases} \left| \frac{\lambda_s \lambda_m}{\lambda_s - \lambda_m} \right| i_m^+ & (i_m^+ = 1, 2, 3, \dots) \\ \left| \frac{\lambda_s \lambda_m}{\lambda_s + \lambda_m} \right| \left( i_m^- + \frac{1}{2} \right) & (i_m^- = 0, 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_m$  是主波导中  $TM_{01}$  模的导波波长;  $\lambda_s$  是副波导中  $TE_{10}$  模的导波波长。因  $\lambda_m$  和  $\lambda_s$  的差别不是很大,使耦合模式的相位在副波导中正向相干增强的话,孔间距  $S$  将会非常大,所以一般使用反向相干相消的方法。

根据理论计算可得,孔间距  $S=26.3$  mm。通过 CST 仿真软件的 optimizer 功能对耦合孔半径,波导公共壁厚度,孔间距,倒角大小,转弯波导转弯半径等参数进行综合优化,得出了该耦合器的耦合度和隔离度曲线。图 2 结果表明,在 9.8~10.2 GHz 的频带范围内,所设计的双孔定向耦合器耦合度稳定在  $(60 \pm 1)$  dB 以内,定向性在 250 MHz 的带宽内大于 20 dB,在一定带宽内实现了良好的耦合性能,此时耦合区总长度约为 3.49 cm。

## 2.2 改进型双孔定向耦合器

传统定向耦合器设计时一般通过优化孔径、孔距、孔数来调节耦合度、方向性和带宽等参数,这三个变量都是在主波导的轴向上进行优化设计,不可避免地导致器件轴向长度的增加,与耦合器紧凑化的期望相矛盾。为解决这一难题,本文设计了一种耦合孔二维分布的新型高定向性高带宽紧凑型的定向耦合器。

该耦合器的主、副波导尺寸同第 2.1 节,将主副波导正交连接可以大大缩短耦合器的轴向尺寸,在主波导与副波导宽壁连接处形成的公共壁上沿  $dx$ 、 $dz$  方向开耦合孔,优化设计后,被这些小孔激励的波分量能够背向相消。

在该耦合器中,微波信号在主波导中沿  $dx$  方向传播,在副波导中沿  $dz$  方向传播,可以通过在  $dx$ 、 $dz$  两个方向调节小孔的位置来优化耦合特性。并且可以通过在  $dz$  方向上增加耦合孔的数目来拓展耦合器的带宽,为耦合器的设计提供了充分的可调变量,有效地缩短耦合器的轴向长度。

图 3 为双孔定向耦合器的仿真模型,将其作为基础研究对象验证设计思路的正确性。在端口 1 注入  $TM_{01}$  模式的微波信号,该信号从端口 2 输出,小部分信号通过耦合孔耦合到副波导中,根据方程(4)中列出的耦合原理,可以大致确定耦合孔的参数。

$$\begin{cases} A^+ = a_1^- + a_2^- e^{-j(\beta_1 dx + \beta_2 dz)} \\ A^- = a_1^+ e^{-j\beta_1 dz} + a_2^+ e^{-j\beta_2 dx} \end{cases} \quad (4)$$

在方程(4)中,  $A^+$ 、 $A^-$  为端口 3 和端口 4 的信号强度,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为主波导和副波导中的相位常数。可以看出通过调节  $dx$ 、 $dz$  可以控制微波相位在副波导中的叠加,从而控制端口 3、4 的输出信号,在耦合器性能的优化中起到关键作用。为了追求耦合器在轴向方向的结构紧凑,我们可以主要调整  $dz$  来实现耦合器的理想性能。

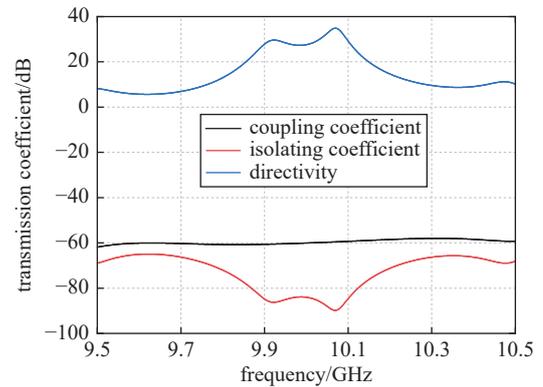


Fig. 2 Transmission coefficient of the directional coupler with two holes

图 2 双孔定向耦合器的传输系数

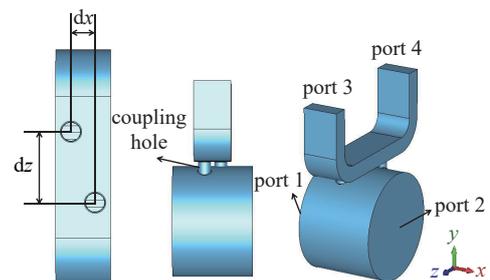


Fig. 3 Structural diagram of cross coupler

图 3 十字型耦合器结构示意图

在电磁仿真软件 CST microwave studio 中,对  $dx$  和  $dz$  的值进行模拟优化。 $dx$  的取值不能使两孔发生重叠且不能超出副波导宽壁的范围,结合工程实践,初步取  $dx=10$  mm,改变  $dz$  的取值,方向性随  $dz$  的变化而变化,如图 4(a) 所示,当其为 30 mm 时达到最大值。取  $dz=30$  mm,小范围改变  $dx$  的取值(保证耦合器的紧凑性),耦合器方向性的变化如图 4(b) 所示,可知  $dx=10$  mm 为最优取值。

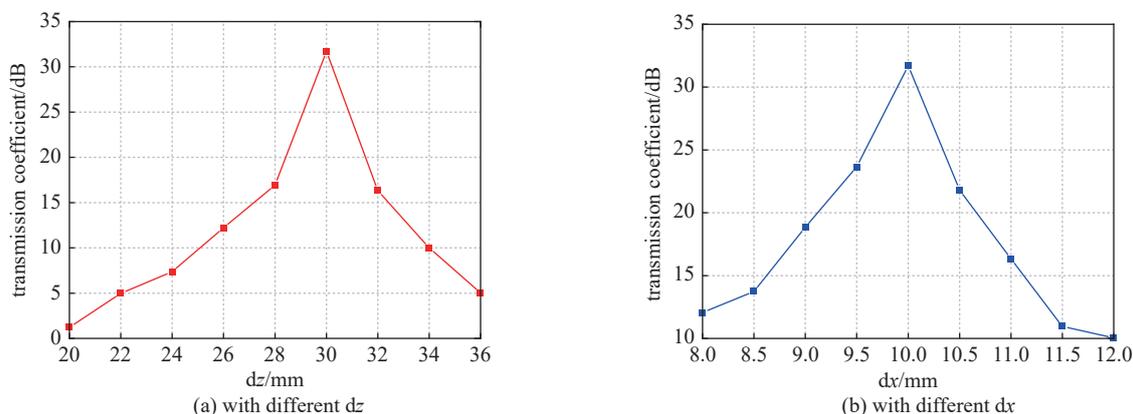


Fig. 4 Directivity of the designed coupler with different  $dx$  and  $dz$

图 4 方向性随  $dx$ 、 $dz$  取值变化曲线

综合考量波导公共壁厚度、倒角大小、转弯波导半径等参数的影响,进一步进行模拟优化,当采用表 1 中的参数时,如图 5 所示,耦合系数在 400 MHz 带宽内平稳变化,在 10 GHz 工作频率下耦合度为  $-58.1$  dB。同时,方向性大于 20 dB 的频率范围约为 300 MHz,为 TKA 的在线测量提供了有利的带宽。更重要的是,孔半径  $r$  为 4 mm,两孔在  $dz$  方向上的距离为 10 mm,耦合区的轴向长度进一步缩短为 1.8 cm,仅为传统定向耦合器的 4%。通过优化连接段和法兰设计,整个耦合器的轴向尺寸仅为 5 cm。

该结构的优势在于可以增加孔数目继续拓展耦合器的带宽,同时不增加耦合器的轴向长度,在紧凑化设计方面具有巨大的优势。

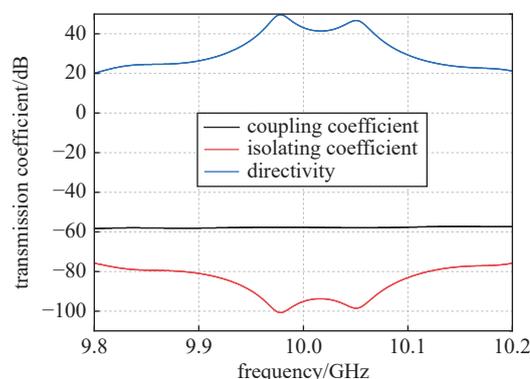


Fig. 5 Simulation results of cross coupler

图 5 十字型耦合器的仿真结果

表 1 耦合器各项参数数值

Table 1 Coupler parameter values

number of holes	$r$ /mm	$dx$ /mm	$dz$ /mm	hole height/mm	bend waveguide/mm
2	4	10	30	3	10

### 2.3 耦合器内部场分布

在 10 GHz 频点处,用  $TM_{01}$  模式激励端口 1,输入功率为 0.5 W,双孔耦合器对应的电场分布如图 6 所示,由图可知此时器件内部场强峰值约为 656 V/m。选取  $E_{max}=50$  kV/mm 作为真空中的击穿场强,计算得出该耦合器的功率容量为 2.9 GW,表明该耦合器可以适应高功率条件下的在线测量需求。

### 3 冷测实验

基于理论和仿真结果,加工了传统型与改进型 X 波段双孔定向耦合器(图 7),并对其进行了冷腔测试。冷测系统如图 8 所示。由矢量网络分析仪产生的微波信号通过  $TM_{01}$  激励器馈入到定向耦合器主波导中,主波导末端匹配负载,由定向耦合器主波导壁上圆孔耦合进入副波导的微波信号

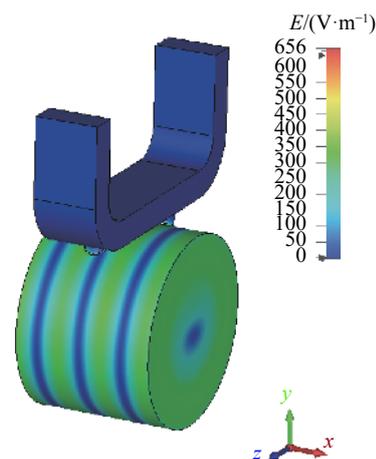


Fig. 6 E-field distribution of the coupler with two holes

图 6 双孔耦合器的电场分布



Fig. 7 Photos of double hole directional coupler

图 7 双孔定向耦合器实物图

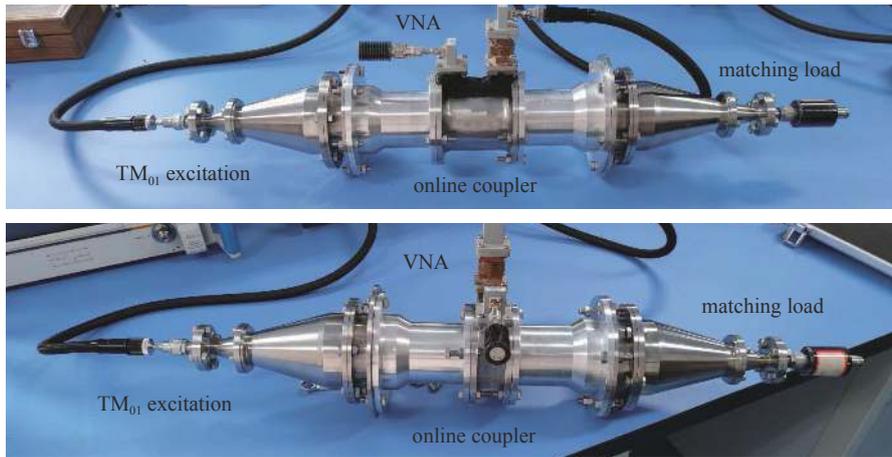


Fig. 8 Cold test system

图 8 冷测系统

传输返回至矢量网络分析仪,由此可以测出该定向耦合器的  $S$  参数(耦合度、隔离度)。

测量结果如图 9 所示,图(a)为传统双孔耦合器,耦合度为  $-59.26$  dB,工作频率为  $10.0$  GHz,方向性为  $22.4$  dB。考虑到模拟中的耦合度为  $-60.68$  dB,方向性约为  $25$  dB,这表明测量和模拟的耦合系数可以相应匹配。此外,耦合度和隔离度曲线在中心频点  $10$  GHz,  $200$  MHz 的带宽范围内相对平滑,此耦合器工作状态稳定。图(b)为改进型双孔耦合器,耦合度为  $60.6$  dB,工作频率为  $10.0$  GHz,方向性为  $25.6$  dB,与模拟结果基本相符。由于隔离端口信号强度很低,隔离度在  $-80 \sim -90$  dB 量级,矢量网络分析仪的动态范围不够,因此测量的方向性与模拟的方向性有一定的差异。虽然测出来的隔离度不是很精准,但是还是可以明显看到方向性是大于  $20$  dB 的,该实验结果具有较强的指导意义。冷测曲线存在一个尖峰,经过反复实验测试,认为是冷测头的影响,尖峰谐振点偏离工作频点  $10$  GHz 较远,在实际在线测量实验中不会影响对工作频点状态的测量。

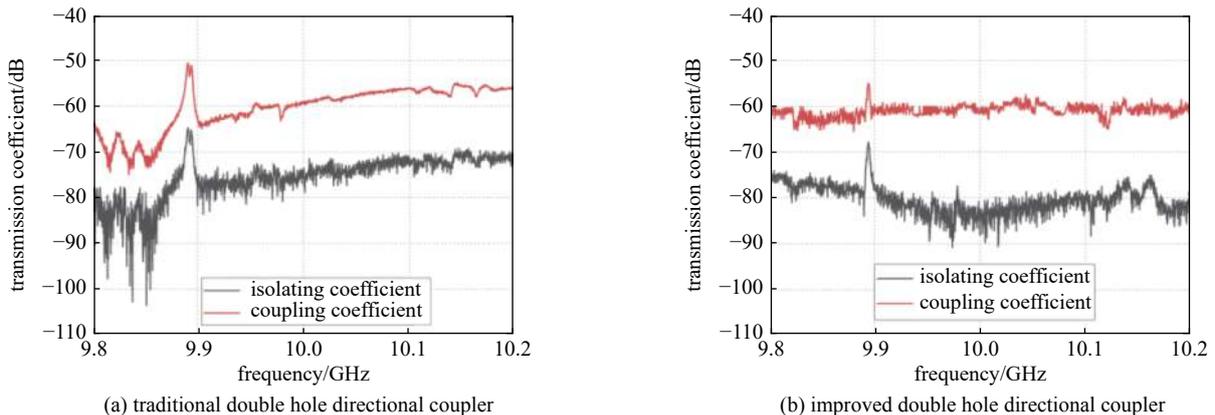


Fig. 9 Cold chamber test results

图 9 冷测结果

#### 4 改进型多孔定向耦合器的拓展研究

增加耦合孔的数量是增大定向耦合器工作带宽的主要方法之一。当使用四个耦合孔,保持原耦合区  $x$  方向长度不变,将耦合孔半径改为 3 mm 时,方向性大于 15 dB 的带宽可达到 700 MHz,如图 10 所示,这对未来宽带 TKA 的发展是有利的。显然,通过增加孔数目,改变孔半径,  $dx$ 、 $dz$  的取值,可以继续仿真优化设计。

#### 5 结论

本文设计的在线测量装置与传统高功率微波在线测量装置相比,将耦合通道的耦合孔阵列由常用的轴向一维分布孔,改成了轴向角向二维分布,在工作频带(9.85~10.15 GHz)内实现了-58 dB 的耦合度和 20 dB 的定向性,且达到了 2 GW 的功率容量。满足带宽、定向性、功率容量等性能需求的同时,显著缩短了高功率定向耦合器的轴向尺寸,实现了器件的紧凑化。在一定程度上克服了针对 X 波段相对论速调管放大器设计定向耦合器存在的几个难点,为相对论速调管放大器的在线诊断提供了一种有效的方法。

#### 参考文献:

- [1] Rostov V V, Elchaninov A A, Romanchenko I V, et al. A coherent two-channel source of Cherenkov superradiance pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 224102.
- [2] Ju Jinchuan, Zhang Jun, Qi Zumin, et al. Towards coherent combining of X-band high power microwaves: phase-locked long pulse radiations by a relativistic triaxial klystron amplifier[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30657.
- [3] Zhang Wei, Ju Jinchuan, Zhang Jun, et al. A high-gain and high-efficiency X-band triaxial klystron amplifier with two-stage cascaded bunching cavities[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 123118.
- [4] 孙钧, 胡咏梅, 张立刚, 等. 圆波导定向耦合器在高功率微波测量中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 063040. (Sun Jun, Hu Yongmei, Zhang Ligang, et al. Application of circular waveguide couplers in high power microwave measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 063040)
- [5] 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)
- [6] 刘义. 高功率微波功率测量相关技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. (Liu Yi. Analysis of correlative technology on power measurement of high power microwave[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010)
- [7] 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)
- [8] 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 directional coupler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1747-1750)
- [9] 喻奇航, 宫玉彬, 王战亮, 等. X波段高功率宽带选模定向耦合器[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 023003. (Yu Jihang, Gong Yubin, Wang Zhanliang, et al. X-band high power broadband mode-selective directional coupler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 023003)
- [10] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006. (Xie Chufang, Rao Kejin. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006)
- [11] 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.

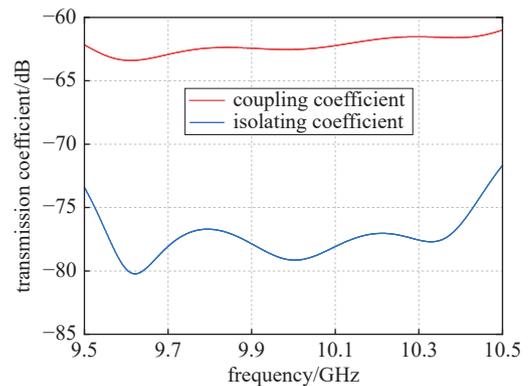


Fig. 10 Simulation results of four hole cross coupler

图 10 四孔十字型耦合器的仿真结果