

文章编号: 1001-4322(2011)12-3363-04

## 基于漏波波导 X 波段高功率微波天线的实验\*

李佳伟, 黄文华, 张治强, 黄惠军, 王康懿, 梁铁柱, 陈昌华, 方进勇

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 在确定天线数值模型的基础上, 结合高功率微波天线的真空需要与实验装置情况, 设计并加工了 X 波段基于漏波波导的高功率微波天线, 对该天线分别进行低功率和高功率条件下的性能指标测试。在低功率条件下天线测试结果表明: 在 9.6 GHz 下天线增益为 26.3 dBi, 天线方向图与数值模拟结果一致。在 SI-NUS881 加速器上利用返波管进行了天线高功率测试, 实验结果表明: 天线功率容量大于 200 MW, 高功率测试方向图、低功率测试方向图和数值模拟取得较为一致的结果。

**关键词:** 高功率微波; 漏波波导; 方向图; 功率容量

**中图分类号:** TN015

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3788/HPLPB20112312.3363

高功率微波(HPM)天线是将 HPM 源产生的电磁波定向辐射到自由空间的器件, 完成从传输线到自由空间的阻抗变换, 使微波能量汇聚到目标。HPM 天线是高功率微波系统的重要部分, 密切影响系统性能。高功率微波天线的设计在保证天线电性能的同时要重点研究天线在短脉冲和高功率条件下的微波传输与发射问题。微波天线种类繁多, 应用广泛, 但适用于 HPM 发射的并不多。国内外报道较多的有 Vlasov 天线, CO-BRA 天线等<sup>[1-2]</sup>, 但是这些天线在功率容量、表面共形等方面仍存在一定困难。为了适应新的 HPM 应用需求, 文献[3]研究了基于漏波波导的天线用于 HPM 发射的可行性。在文献[3]理论和数值模拟设计的基础上, 本文主要对天线进行工程设计和加工, 并开展了一系列性能指标测试和考核实验研究, 旨在验证天线的设计方案和在 HPM 条件下使用的可行性。

### 1 天线结构设计

基于漏波波导的 HPM 天线的数值模型如图 1(a)所示<sup>[3]</sup>, 天线采用标准 WR-90 波导馈电, E 面喇叭的渐变结构把输入的行波近似等幅同相地馈入到漏波波导中。波导漏波结构由 3 个波导腔体、60 根导体圆柱(其中直径 2 mm 50 根, 1 mm 10 根)和支撑介质的翼面组成, 辐射口面为 800 mm×53 mm。

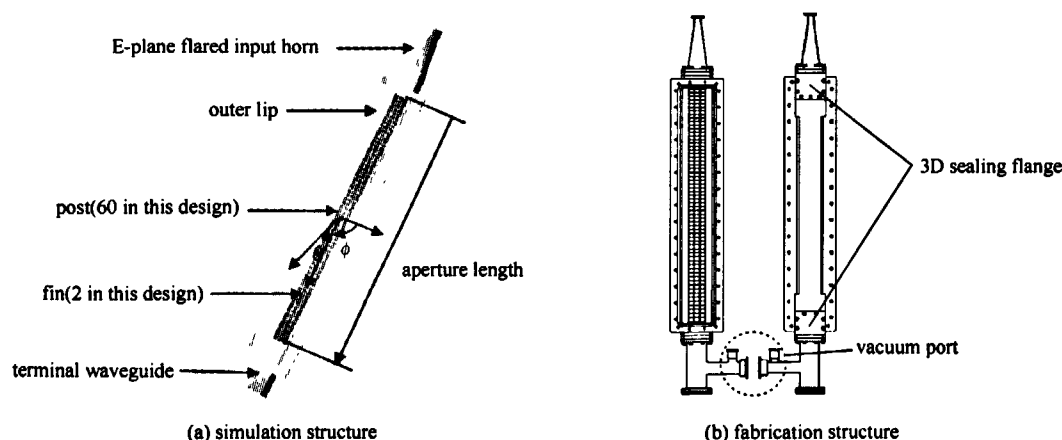


Fig. 1 Simulation structure and fabrication structure

图 1 天线数值模型与加工结构

在天线结构设计中, 考虑加工的可行性和天线可扩展性, 把天线结构分为 3 部分: E 面喇叭、漏波结构和末端负载部分。为了保证加工精度和整体气密性, 漏波结构和密封法兰采用整体机械加工结构, 结合部分采用 O 型圈密封, 如图 1(b)所示。天线窗口采用有机玻璃介质面。金属圆柱采用铜线校直和表面镀银处理保证精

\* 收稿日期: 2011-05-08; 修订日期: 2011-09-28

作者简介: 李佳伟(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率微波辐射技术研究; jwlee@mail.ustc.edu.cn.

度。末端负载采用矩形波导末端加短路面,为后续的 HPM 吸收体留有接口。由于到达末端负载的归一化功率仅为 2.27%<sup>[3]</sup>,由短路面产生的反向行波对天线方向图影响可以忽略。由于 HPM 实验的真空要求,末端采用一段开口波导与真空系统相接。

2 天线测试实验与结果

根据天线的结构设计,我们加工了一个基于漏波波导的 HPM 天线,如图 2 所示,并且分别进行了低功率和高功率条件下的性能指标测试。天线低功率测量实验装置如图 3 所示。

在天线  $H$  面方向图测试中 Anritsu MG3692A 信号源产生频率为 9.6 GHz,信号功率  $G_s=20$  dBm 的连续波,由标准增益喇叭向相距  $R=16$  m 的被测天线发射信号,天线转台以固定速度旋转,用 Anritsu MS2668C 频谱分析仪测得方向图,如图 4 所示,扫描得到天线最大辐射方向  $\theta_m=38.7^\circ$ ,天线接收到最大功率  $P_r=-43.26$  dBm,线缆衰减为  $L=-33.6$  dB,标准增益喇叭在 9.6 GHz 下增益  $P_t=20.04$  dB。计算天线增益  $G=20\times\lg(4\pi R/\lambda)+P_r-P_t-G_s-L=26.3$  dB。天线测试数据见表 1,  $\theta_{3dB}$  为 3dB 波瓣宽度。

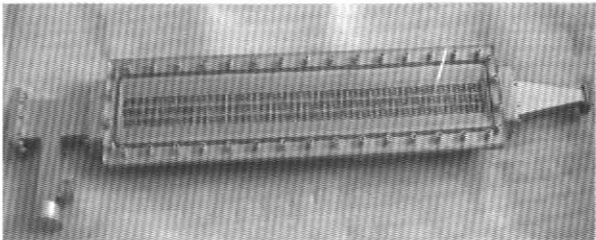
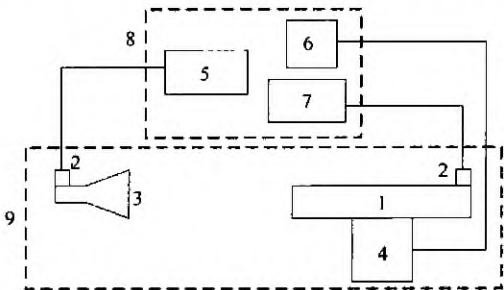


Fig. 2 HPM antenna based on leaky waveguide  
图 2 基于漏波波导的高功率微波天线



1. HPM antenna; 2. adaptor; 3. standard gain horn; 4. rotation platform;  
5. signal generator; 6. platform controller; 7. spectrum analyzer;  
8. shielded measurement room; 9. anechoic chamber;

Fig. 3 Schematic of low power experimental setup

图 3 天线低功率测试实验布局

表 1 低功率条件下天线测试数据

Table 1 Measured values in low power experiment					
	$G$ /dBi	$\theta_m$ /( $^\circ$ )	$\theta_{3dB}$ /( $^\circ$ )	side-lobe level/dB	aperture efficiency/%
measured	26.3	38.7	3.3	-11	77.3
modeled	26.2	39.0	3.3	-10.9	76.3

在天线性能调试测试满足设计要求之后,对天线进行了短脉冲条件下的方向图测试和高功率下功率容量考核实验。天线高功率实验装置原理框图如图 5 所示。由 SINUS881 脉冲功率系统驱动返波管产生 HPM 脉冲,经过双弯型  $TM_{01}$ - $TE_{11}$  模式转换器和  $TE_{01}$ - $TE_{10}$  圆矩转换输入到待测天线中,装置照片见图 6。天线内真空度为  $5\times10^{-3}$  Pa。HPM 辐射场测量装置由标准增益喇叭天线、波导定向耦合器、波导衰减器、同轴衰减器和检波器组成,实验在微波暗室内进行。以逐点测量的方式对天线  $H$  面方向图进行了抽样测试。

在 200 MW 功率下,测试了在  $R=4$  m 处的功率分布,如图 7 所示,方向图数值模拟结果、低功率测试结果和高功率微波测

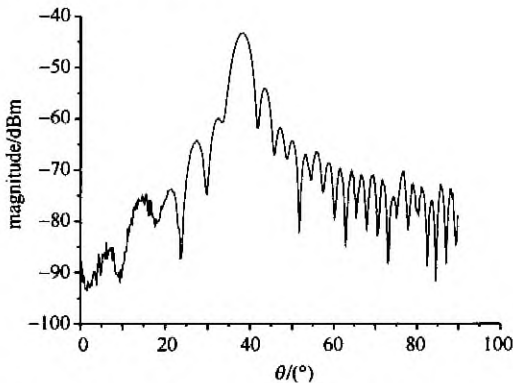
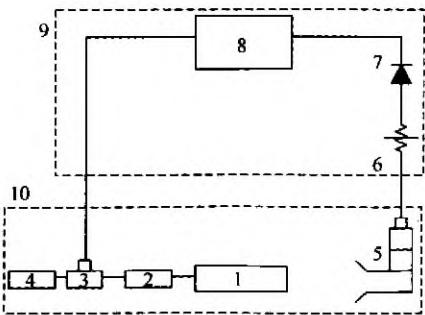


Fig. 4 Radiation pattern in low power experiment

图 4 低功率测试天线功率分布



1. HPM antenna; 2.  $TM_{01}$ - $TE_{11}$ - $TE_{10}$  converter;  
3. directional coupler; 4. HPM source;  
5. standard horn, directional coupler  
and waveguide attenuator;  
6. coaxial attenuator; 7. RF detector;  
8. oscilloscope of 5 GHz;  
9. shielded measurement room; 10. anechoic chamber

Fig. 5 Schematic of high power experimental setup  
图 5 天线高功率测试实验布局示意图

试结果基本一致。图 8 给出了在 200 MW 微波功率下的微波典型波形,在 200 MW 功率下微波在线测量与辐射场测量波形较为一致。实验结果表明:在 9.6 GHz 频率下天线增益大于 26 dBi,口面效率大于 70%,功率容量大于 200 MW。

### 3 结 论

本文在基于漏波导的 HPM 天线的理论分析和数值模拟结果的基础上,进行天线设计加工并对该天线进行了实验研究。实验结果表明:设计的基于漏波波导的 HPM 天线在 9.6 GHz 下增益大于 26 dBi,口面效率大于 70%,功率容量大于 200 MW,实验结果与模拟结果取得了较好的一致性,验证了天线的设计方法和高功率条件下使用的可行性。下一步将基于该天线研究其组阵的可行性,为实现 GW 级 HPM 平面阵列天线探索新的途径。

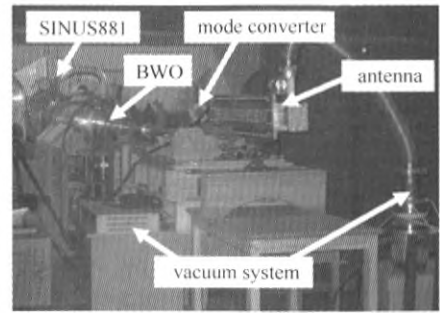


Fig. 6 Antenna HPM experimental setup

图 6 天线高功率实验装置

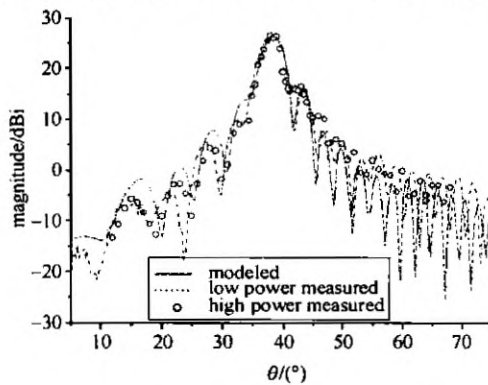


Fig. 7 Measured H-plane power distribution

图 7 高功率测试天线功率密度分布

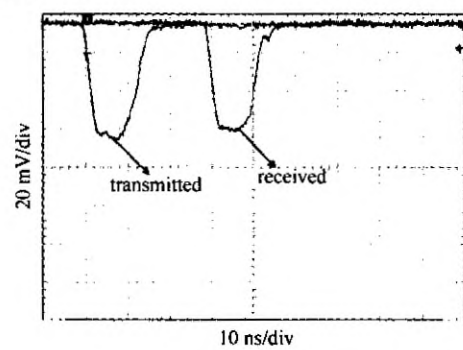


Fig. 8 Waveforms measured by coupler and receiving antenna at 200 MW

图 8 200 MW 下耦合器与接收天线测得的微波典型波形

### 参考文献:

- [1] Vlasov S N, Orlova I M. Quasi-optical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam[J]. *Radiofizika*, 1974, 17(1):148-154.
- [2] Courtney C C, Baum C E. The coaxial beam rotating antenna (COBRA): Theory of operation and measured performance[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2000, 48(2):299-309.
- [3] 李佳伟, 黄文华, 梁铁柱, 等. 基于漏波波导的 X 波段 HPM 天线的设计与模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8):2125-2129. (Li Jiawei, Huang Wenhua, Liang Tiezhu, et al. Design and simulation of an X-band HPM antenna based on leaky waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8):2125-2129)
- [4] Koslover R A. Flat aperture waveguide sidewall emitting antenna: US Patent 7528786[P]. 2007-12-06.
- [5] Goldstone L O, Oliner A A. Leaky-wave antennas I: Rectangular waveguides[J]. *IRE Trans on Antenna and Propagation*, 1959, 7(1):307-319.
- [6] Pozar D M. *Microwave engineering*[M]. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [7] Walter C H. *Traveling wave antennas*[M]. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [8] Honey R C. A flush-mounted leaky-wave antenna with predictable patterns[J]. *IRE Trans on Antenna and Propagation*, 1959, 7(1):320-329.
- [9] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. *High power microwaves*[M]. New York: Taylor and Francis, 2007.
- [10] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 36 单元高功率双层径向线螺旋阵列天线功率容量[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(6):943-946. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, et al. Power capacity of 36-element high helical array antenna fed from double-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6):943-946)
- [11] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. *高功率微波源*[M]. 北京: 原子能出版社, 2007. (Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. *High power microwave sources*. Beijing: Atomic Energy Press, 2007)

## Testing of an X-band HPM antenna based on leaky waveguide

Li Jiawei, Huang Wenhua, Zhang Zhiqiang, Huang Huijun, Wang Kangyi,

Liang Tiezhu, Chen Changhua, Fang Jinyong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** On the basis of the antenna numerical structure, an X-band high power microwave (HPM) antenna based on leaky waveguide was fabricated and tested for the radiation performance and power handling capacity for HPM applications. The experimental results in low power test indicate that, the antenna gain is 26.3 dBi at 9.6 GHz and the agreement of radiation pattern is obtained between measured values and simulation results. The experimental results of radiation pattern of the antenna with X-band BWO driven by SINUS881 indicate that, the power handling capacity is above 200 MW besides reasonable agreement is obtained between measured values and simulation results. The feasibility of the antenna in HPM application is validated.

**Key words:** high power microwave; leaky waveguide; radiation pattern; power handling capacity

---

### 本刊编委再添一位院士

近日,中国科学院和中国工程院公布了 2011 年院士新增选结果,最终产生中国科学院院士 51 名院士和 54 名中国工程院院士。本刊编委张维岩当选为 2011 年中国科学院院士,张维岩目前担任中国工程物理研究院副院长等职务,着力于研究激光聚变与等离子体物理、理论物理,是这一重要前沿领域的开拓者之一。至此,《强》刊现任编委中两院院士达 20 人。

另悉,本刊主办单位中国工程物理研究院赵宪庚院长当选 2011 年中国工程院院士。

《强》刊编辑部

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>