

文章编号: 1001-4322(2002)04-0595-04

圆波导斜劈辐射天线的实验研究*

陈代兵¹, 周海京², 刘庆想¹, 丁 武²

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 为了使三腔渡越管振荡器高功率微波源的输出具有单向波束及线极化的辐射特性, 设计了圆波导斜劈结构的伏拉索夫型天线。着重进行实验研究, 给出了具体设计时应该考虑的因素以及实验情况。通过对圆波导前端模式变换器的同轴内导体长度的调节和鼻锥形状的选择以及各个部分的仔细分析, 最后获得了较好的结果, 证明了该天线的实用性和可靠性。

关键词: 天线; 波导; 辐射; 高功率微波

中图分类号: TN82 文献标识码: A

在高功率微波源的输出端, 大量地运用辐射天线。辐射天线的工程设计方案通常有三种: 模式转换器+普通喇叭、COBRA(Coaxial Beam-Rotating Antenna)和 Vlasov 天线。对于输出模式为 TEM 同轴模或 TM₀₁圆波导模的 HPM 源(如 RKO, MILO, VCO 等等), 其对称型口径场分布的直接辐射将导致环状方向图。为了获得单向波束及线极化的辐射特性, 可选用第三种方案即 Vlasov 天线。Vlasov 天线是利用 Vlasov 准光模式变换器的非对称结构, 将圆波导中的轴对称模转换为非对称的空间辐射场, 再经过一焦线位于波导轴的抛物柱面, 形成线极化的准高斯波束。为了克服阶梯形辐射器由于截面突变, 易于出现高功率击穿的缺陷, 可运用 M. Nakajima 等人提出的具有渐变截面的圆波导斜劈辐射器(亦称 Vlasov-Nakajima 辐射器)^[1]。R. K. Dahistrom 等人对具有不同倾角 α (指劈形端面与 z 轴所成的锐角, 亦称斜切角)的此种辐射器进行了实验研究^[2]。也有文献运用 Kirchhoff-Kottler 口面积分和物理光学方法对圆波导劈形辐射器的辐射场进行了数值分析^[1]。

本文设计了斜切角 $\alpha=30^\circ$ 的圆波导劈形端口辐射天线, 经过调试, 将其运用在三腔渡越管振荡器研究中。在数值分析的基础上, 着重进行实验研究, 给出了具体设计以及实验结果。首先通过对圆波导前端的模式变换器的同轴内导体长度和鼻锥形状的选择, 设计出天线; 再经过冷测调试, 确定了天线的方向图和增益; 最后应用于联合实验, 获得了较好的结果, 证明了该天线的实用性和可靠性。

1 天线及模式变换器模型的选取与数值分析

设计圆波导劈形端口辐射天线时, 模型的选取有四个主要的因素需要考虑, 即: 斜切角的确定; 模式变换器的尺寸; 模式变换器的鼻锥形状的确定; 天线罩的设计。

三腔渡越管振荡器是一种新型的高功率微波器件, 天线的设计必须考虑到高功率的特点。由于圆波导劈形端口辐射天线的开口波导端是一种渐变的结构, 有较高的功率容量, 克服了易于高功率击穿的缺陷。那么斜切角应该取多大呢? 由文献[1, 2]可知, 原则上斜切角越小, 天线的性能越好。但是考虑到实际的运用, 我们选取斜切角为 $\alpha=30^\circ$ 。

由于三腔渡越管振荡器采用同轴耦合输出, 为了不引入由于尺寸的突变而引起的反射, 仍采用内外导体直径分别为: 80mm 和 120mm。

模式变换器的内导体鼻锥形状有三种常见的模型, 如图 1。对于模型 a, 驻波系数很大, 不可取。对于模型 b 和模型 c, 驻波系数总体都会比模型 a 的小。但是, 模型 b 和模型 c 究竟那一种更好, 有待实验去比较。为了在需要的带宽内获得合适的驻波系数, 就需要调节同轴内外导体之间的相对位置, 以减小反射。

天线罩的设计主要从两个方面来考虑, 即: 满足器件工作区真空度的要求, 进行真空密封; 对电磁波是透明的, 不能阻挡波束的发射。天线罩的直径和长度的确定可以用光学的方法来近似处理。

确定天线模型之后, 进行数值分析来确定器件的具体尺寸。本文沿用等效电磁流数值积分和物理光学的方

* 收稿日期: 2001-07-18; 修订日期: 2002-02-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)激光技术领域资助课题(863-410-7)

作者简介: 陈代兵(1975-), 男, 硕士生; 绵阳 919-1015 信箱; E-mail: renture@263.net。

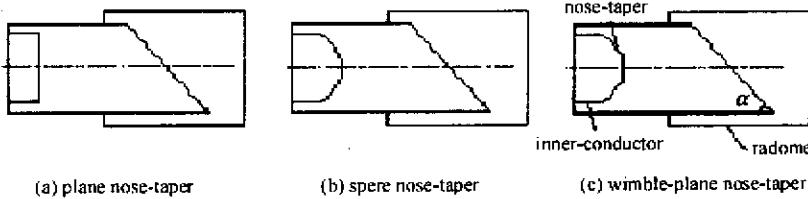


Fig. 1 Schetck of the three types of models

图 1 三种模型示意图

法来求解,最后确定出天线以及模式变换器模型的尺寸。

2 实验调试及结果

经数值计算设计出的天线,在实际的运用之前,还必须对天线前端的模式变换器进行必要的调试。

2.1 测试用阻抗变换器的设计

设计阻抗变换器的目的主要是:一方面是实现阻抗从 50Ω (网络分析仪的微波信号输出电缆)到 24.33Ω (天线输入端)的过渡,实现阻抗匹配;另外一方面是实现不同内外直径的同轴线之间的过渡连接。阻抗变换元件有很多种,根据需要并考虑实际情况,选用直线式渐变线阻抗变换器。

2.2 天线的驻波系数的标定

众所周知,天线(输入端)的驻波系数直接影响着天线的辐射效率。减小天线的驻波系数,就意味着可以有更多的能量从天线辐射出去,而不是反射回腔体。

用校准好的矢量网络分析仪(型号为 HP8720C)

输出扫频信号,带宽是: $3.6 \sim 4.0\text{GHz}$,中心频率为 3.8GHz 。调试的原则是:改变圆波导前端模式变换器的内导体鼻锥的形状(球面或锥平面)和调节内导体的长度,使得整体驻波系数小,中心频率的驻波系数较小、频带较宽。

先后采用球面鼻锥和锥平面鼻锥进行测试。结果发现,球面鼻锥的驻波系数从总体上要比锥平面鼻锥的驻波系数明显的偏高。锥平面鼻锥比球面鼻锥更好的原因可以用反射相干相消来解释。通过调试,确定了模式变换器的锥平面鼻锥和内导体的长度。典型的驻波系数测试结果如图 2。从图也可以看出,该天线的驻波系数可以做得很小。

2.3 天线的方向图的测试

由于在天线驻波系数的标定中,已将天线调试到较佳的状态。所以在测试方向图时,只要连接好后,便可测试。偏向角 θ 定义为在平面内主瓣中心轴与天线主轴之间的夹角,也可以指辐射方向与波导轴之间的夹角。

待测天线在水平面内从 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 旋转,可以测出 E 面和 H 面的方向图。实验测试的数据结果如表 1,

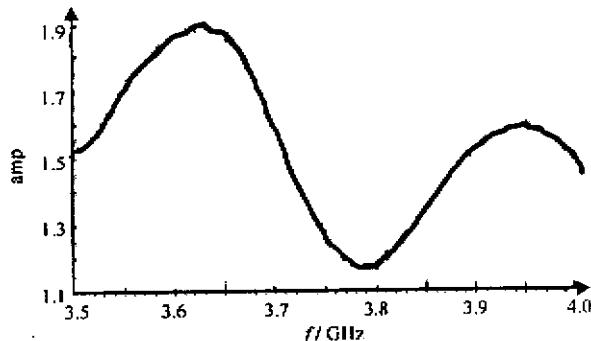
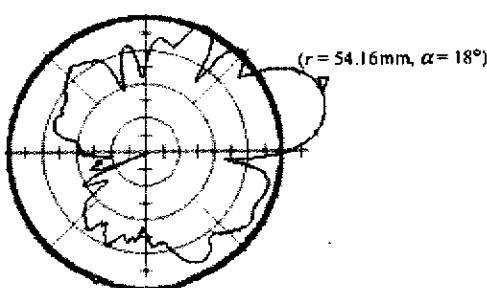
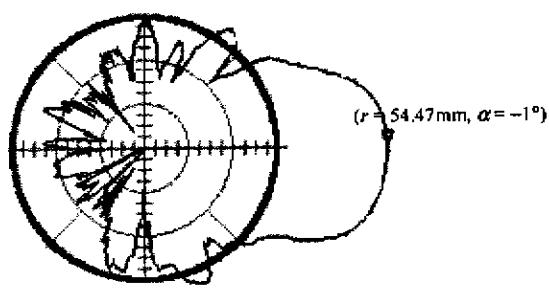


Fig. 2 Measurement results of VSWR vs frequency

图 2 典型的驻波系数的测试结果

Fig. 3 Far-field patterns of the antenna (E plane)
万方数据
图 3 天线的远场方向图(E 面)Fig. 4 Far-field patterns of the antenna (H plane)
图 4 天线的远场方向图(H 面)

选 $f=3.8\text{GHz}$ 的一组方向图, 示于图 3, 图 4。

表 1 待测天线的测试结果

Table 1 Measurement results of the antenna

f/GHz	E-plane		H-plane		gain of E-plane/dB
	beam-width/(°)	$\theta/(°)$	beam-width/(°)	$\theta/(°)$	
3.60	21.23	24	34.63	0	14.06
3.65	20.83	23	33.83	-2	14.08
3.70	18.86	20	34.61	-1	13.88
3.75	17.91	19	34.84	0	14.54
3.80	18.46	18	33.51	-1	14.19
3.85	17.14	18	31.52	-1	14.43
3.90	18.07	17	30.92	-1	13.87
3.95	17.38	17	30.68	-5	13.85
4.00	17.52	17	31.11	-1	13.78

通过测试, 得到了实心单向波束的方向图, 说明了该天线有很好的方向性。从表 1 可以看出: 当频率从 3.6GHz 到 4.0GHz , 主波瓣宽度变化不大(测试结果表明, 幅度变化也不大), 说明该天线性能稳定, 具有实用性。而 E 面内的偏向角则从 24° 到 17° 的不等距变化, 规律是: 频率升高, 偏向角从大变小, 与理论公式相符。但是实际测试值比计算值略小一些, 这是由于波导外延部分的慢波效应引起的^[1]。

偏向角 θ 对于 E 面来说, 是有意义的。它表明了斜切角 $\alpha=30^{\circ}$ 斜劈形天线的主瓣中心在所劈的方向上的偏向, 表示了辐射的方向。而在 H 面, 偏向角很小, 理论值应该为 0。

H 面的主瓣宽度明显地宽于 E 面主瓣宽度, 这可以从表 1 和图 3、图 4 得到。而且, 通过测试比较, H 面方向图的旁瓣明显要低于 E 面的方向图的旁瓣。

2.4 天线增益的测试

按照天线增益的定义, 直接测试天线的增益是比较复杂和困难的。为了测试待测天线的(最大)增益, 我们用间接的方法来测试, 即用已知最大增益的标准天线对待测天线进行标定。在相同的频率、相同的入射功率下, 设 $G_{\text{tx}}, G_{\text{ts}}$ 分别为接收端的待测天线与标准天线的增益(G_{ts} 是已知的), 可以得出待测天线的最大增益为

$$G_{\text{tx}}(\text{dB}) = G_{\text{ts}}(\text{dB}) + \text{待测天线主瓣幅度}(\text{dB}) - \text{标准天线主瓣幅度}(\text{dB})$$

计算出天线的最大增益见表 1。从表 1 可以看出, 在 $3.6\sim 4.0\text{GHz}$ 的频率范围内, E 面的增益的变化幅度小于 1dB , 因此增益变化的曲线比较平坦。这对要求一定带宽的天线设计是有利的, 同时也说明了天线的增益与频率有关。而在 H 面, 变化就稍微大一些。由于旋转平面没有经过天线最大增益的方向, 所以 H 面的结果只是粗略地表示了 H 面相对增益的情况, 不能用于比较准确地计算天线的最大增益。但 E 面测试还是较准确的, 天线的增益大约是 14dB 。

2.5 联合实验

将测试后的天线应用在 C 波段三腔渡越管振荡器的研究中, 进行联合实验。在天线的辐射方向上放上测试探头, 通过功率标定, 获得了峰值功率大于 300MW 的微波信号, 说明了该天线的辐射功率能力可以超过 300MW , 能够应用到 C 波段三腔渡越管振荡器的实验研究中。

3 小 结

本文设计了圆波导劈形端口辐射天线, 经过实验研究, 最后获得的较好结果是: 驻波系数小于 1.2、实心单向波束、增益约为 14dB ; 天线辐射功率可以超过 300MW , 证明了该天线的实用性和可靠性, 为三腔渡越管振荡器的研究提供了有利条件。

参考文献:

- [1] 钟哲夫. 圆波导劈形端口辐射器的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6):733—736. (Zhong Z F. Numerical analysis of a circular waveguide bevel cut radiator. *High power laser and particle beams*, 1999, 11(6):733—736)
- [2] Dahlström M, Adwin L J, et al. Reflector design for an X-band Valsov antenna[J]. *Int Sym Digest IEEE AP*, 1990:968—971.
- [3] Maci S, Ufimtsev P Y, Tiberio R. Equivalence between physical optical and aperture integration for radiation from open-ended waveguides

[J]. *IEEE Tran on Antenna and Propagation*, 1997, **45**(1):183—185.

- [4] 周海京, 丁 武, 刘庆想. VLASOV 天线的研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(3): (Zhou H J, Ding W, Liu Q X. Research on Vlasov-type Antenna. *High power laser and particle beams*, 2002, **14**(3):)

Experimental research of a circular waveguide bevel cut radiation antenna

CHEN Dai-bing¹, ZHOU Hai-jing², LIU Qing-xiang¹, DING Wu²

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P.O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, P.O. Box 8009, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to have the high-power-microwave(HPM) source of the three-unit transit-time tube oscillator(TTTO) has the character of unidirectional beam and line polarization, a circular waveguide bevel cut radiation antenna is designed. Experimental research is the emphatic part. Experiment condition as well as factors that should be considered during the design is presented. The length of the coaxial inner-conductor has been regulated, and the form of the nose taper has been choosed, which belong to the modes convertor in the front of the circular waveguide. Then, the better results are finally presented. The reliability and practicality of this antenna have been proved.

Key words: antenna; waveguide; radiation ; high power microwave(HPM)

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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),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>