

# 基片集成波导宽带四路滤波功分器的设计

王 旭 孟令琴 吕丹丹

(上海大学特种光纤与光接入网省部级共建重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 根据基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)和传统矩形波导的等效关系,设计了一款基于 SIW 结构小型化的宽带四路滤波功分器。通过同轴线在波导中心馈电,输出端口采用微带输出的方式,且输出等幅同相。四排金属孔将波导平均分成 4 个腔,腔体中同时存在 3 种模式(TE<sub>101</sub>/TE<sub>102</sub>/TE<sub>201</sub>),实现三模带通;利用感性孔的微扰抑制高次模(TE<sub>202</sub>),提高阻带性能。实测工作带宽不小于 2.5 GHz,中心频率 10 GHz。该四路滤波功分器具有体积小、制作简单、方便与其他电路集成等优势。

**关键词:** 基片集成波导;滤波功分器;同轴线;三模带通

**中图分类号:** TN626 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Design of broadband four-way filter power divider based on substrate integrated waveguide

Wang Xu Meng Lingqin Lv Dandan

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** According to the equivalent relation between the substrate integrated waveguide and conventional rectangular waveguide, a compact wideband four-way equal filter power divider is designed based on substrate integrated waveguide (SIW). The design uses coaxial feed in the center. SIW-to-microstrip transitions are used for the output ports with equal amplitude and phase. The four-row metal holes are used to divide the waveguide into four cavities on average. In the pass-band, there are three modes (TE<sub>101</sub>/TE<sub>202</sub>/TE<sub>303</sub>) in the cavities, which can realize tri-mode bandpass. The high order mode(TE<sub>202</sub>) is suppressed by the perturbation of the inductive hole, and the stop band performance is improved. Measured results of the filter power divider have shown that the bandwidth is more than 2.5 GHz at centre frequency of 10 GHz. The four-way filter power divider has the advantages of small size, simple manufacture, easy integration with other circuits, etc.

**Keywords:** substrate integrated waveguide(SIW); filter power divider; coaxial line; tri-mode bandpass

## 1 引言

随着微波与毫米波技术的发展,现代通信系统对集成电路尺寸的提出了更高的要求,微波元件的集成化、小型化成近年来的研究热点和趋势<sup>[1-2]</sup>。滤波器和功分器都是微波通信系统中重要的组成部分。在追求小型化过程中,滤波器和功分器融合在一起,既可以减小电路尺寸,降低加工成本,又可以减小插入损耗,迎合了现代集成电路发展的趋势。

正因为滤波功分器的诸多优点,滤波功分器的研究越来越引起国内外学者的广泛关注。很多学者做了基于微带结构的滤波功分器的研究<sup>[3-5]</sup>,这种结构虽易于集成,但是品质因数低,传输功率低,且插入损耗随着频率的升高而变

大,尤其在毫米波频段。波导结构的功分器虽然具有低损耗、宽带传输、高功率等优点,但是器件的体积较大,成本较高,且不易与其他电路集成<sup>[6-7]</sup>。基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)同时具备传统波导和平面微带的优点,所以被广泛应用于各种微波元件中<sup>[8]</sup>。基片集成波导滤波功分器逐渐成了近几年的研究热点,文献[9]利用多层基片集成波导加载感性通孔构成二路滤波功分器,实现两输出端口 180°反相。在文献[10-11]通过加载蚀刻缺陷地结构(defected ground structure, DGS)实现二路滤波功分性能,具有良好的带外抑制。然而,多数基片集成波导滤波功分器的研究是基于二路等功分,四路滤波型的等功分器研究很少。本文基于 SIW 设计了宽带四路滤波功分器,并进行仿真、加工、测试。设计采用中心同轴馈电和

感性孔微扰的结构,中心频率 10 GHz,相对带宽达到 25%。同轴线传输 TEM 模波,在 SIW 腔体中激励起 TE 模,比如 TE101、TE102/TE201、TE202 等。通过调节感性孔的位置,可以对腔体中模式进行不同程度的扰动,从而达到输入匹配和改善阻带性能的目的。

## 2 SIW 谐振腔的基本理论

在基片集成波导中的只能传输 TEM<sub>0</sub> 模式的波,主模是 TE<sub>10</sub> 模。这是因为在基片集成波导中,对于 TEM<sub>0</sub> 模来说侧壁的表面电流平行金属通孔在上下金属面之间流动,没有破坏电场分布;对于 TM 模侧壁上的金属孔间距切断了侧壁电流,从而破坏了波导中的电场分布,引起了超强辐射以及反射,因此破坏侧壁电流的模式都不能在基片集成波导中传输,比如 TEM<sub>n</sub> 模和 TM 模<sup>[12]</sup>。图 1 所示为 SIW 结构的示意图。

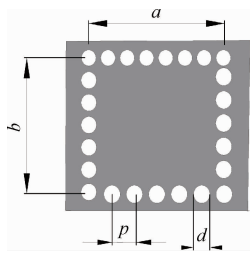


图 1 基片集成波导结构

$a$  和  $b$  分别是基片集成波导腔体的长和宽,  $d$  是金属化通孔的直径,  $p$  是金属化通孔的间距, SIW 腔体中的 TEM<sub>0n</sub> 的谐振频率可由以下公式计算得到<sup>[13]</sup>:

$$f_{TE_{m0n}} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_{eff}}\right)^2} \quad (1)$$

式中:  $c_0$  是真空中光速,  $\epsilon_r$  是介质的相对介电常数,  $W_{eff}$  和  $L_{eff}$  是 SIW 谐振腔的有效宽度和有效长度。SIW 谐振腔的尺寸大小可以通过式(2)计算得到。

$$W_{eff} = a - \frac{d^2}{0.95p} \quad L_{eff} = b - \frac{d^2}{0.95p} \quad (2)$$

## 3 四路滤波功分器的设计

传统结构的多路功分器,在多数情况下是通过  $N$  级一分为二功分器的级联方式实现  $2^N$  路功分器。这种级联方式通常会造成分功器的尺寸较大,插入损耗较高<sup>[14]</sup>。本文选择基片集成波导的中心作为馈电位置,用同轴线进行底馈。同轴线传输 TEM 模式波,TEM 波具有轴对称性,所以为能量均分提供理论依据。利用金属化通孔,将基片集成波导平均分成四个腔体,实现能量平均分配,由于对称结构具有良好的相位和幅度一致性。从图 2 所示的电路结构可知,能量经同轴线从中心输入,然后被金属化孔分配到 SIW 腔中,从一角经微带线馈出。由于输出端是微带结构,所以易于其他电路集成。

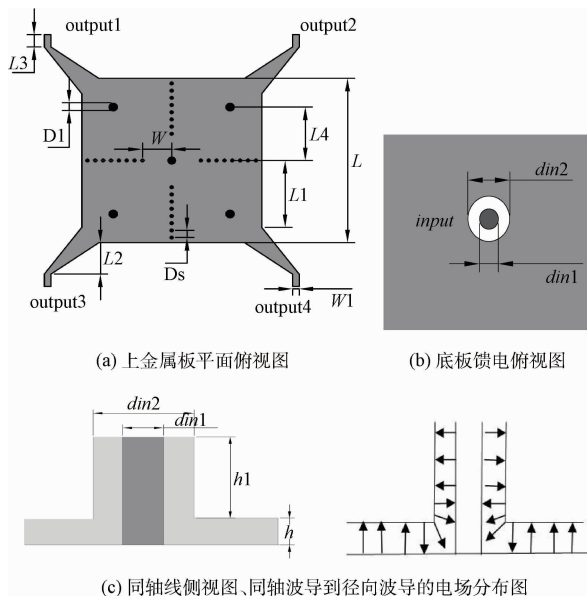


图 2 电路的结构

根据 SIW 腔体多模理论,能量从一个角馈入,从对角输出,在整个腔体中可以同时存在几种模式的波。不同模式的波对应不同的谐振频率,所以在一个腔中,存在多个谐振频率。如图 3 所示,腔体中不同模式的电场分布图。

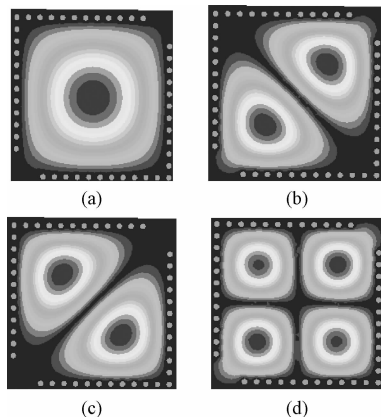


图 3 不同模式的波在谐振腔中的电场分布

TEM 波从同轴线馈入 SIW 中,激励起 TEM<sub>0n</sub> 模式的波。如图 3 所示,SIW 中存在模式的电场分布。图 3(a)是 TE<sub>101</sub> 模的电场分布图;图 3(b)(c)为 TE<sub>102</sub>/TE<sub>201</sub> 模电场分布;图 3(d)为 TE<sub>202</sub> 模电场分布。在通带内传输 TE<sub>101</sub>、TE<sub>102</sub>、TE<sub>201</sub> 三种模式,实现三模带通滤波器。按照图 4(a)所示的电路结构建模仿真,S 参数如图 4(b)所示。

从图 4(b)可知,因为在 SIW 中存在高次模式的波 TE<sub>202</sub> 模,谐振频率约为 16 GHz,SIW 腔体中如果没有感性孔进行微扰,滤波器的插入损耗和回波损耗在 13~

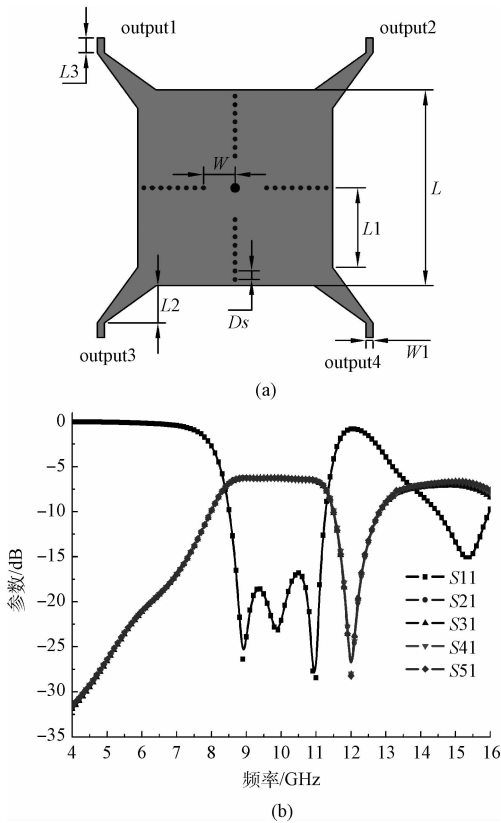


图 4 (a)无感性孔上层金属电路结构;  
(b)无感性孔的 S 参数仿真结果

16 GHz 迅速恶化,阻带特性变差。从图 5(a) S 参数仿真可以看出,通过感性通孔进行扰动电场分布,在不改变通带中心频率的同时,提高了阻带特性。微扰后的带内模式电场分布如图 5(b)所示,在 SIW 中选择合适位置加入一个金属化通孔,金属化通孔微扰了 TE<sub>101</sub> 和 TE<sub>102</sub> 模,谐振频率略微移动;金属化通孔的位置处在 TE<sub>201</sub> 模电场最弱的地方,几乎为零,金属化通孔对这 TE<sub>201</sub> 模式的谐振频率没有影响,所以谐振频率几乎为没有偏移;但是金属化通孔严重扰乱了 TE<sub>202</sub> 高次模的电场,使谐振频点向高频明显移动,拓展了上边频的阻带。通过感性孔的位置微调可以实现输入阻抗匹配,如图 5(a)所示,回波损耗与感性孔位置的关系。

由于馈电位置固定,输入端口处的输入阻抗不容易与 50 Ω 匹配,需要通过一个高度  $h_1$  的同轴线进行阻抗变换来实现宽带匹配。传输线阻抗方程<sup>[15]</sup>:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (3)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (4)$$

式中: $Z_0$  是同轴线的特性阻抗,SIW 腔体相当于负载  $Z_L$ , $l$  为同轴线长度, $\beta$  为相移常数, $D$  为同轴线外导体直径, $d$  为内导体直径。普通标准的 50 Ω 同轴线需要阶梯阻抗变换,

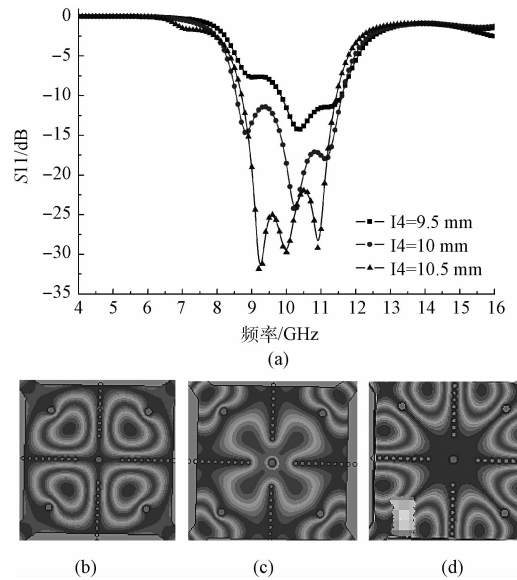


图 5 (a)感性孔位置与传输特性的关系;(b)~(d)分别为存在感性孔时 TE<sub>101</sub>、TE<sub>102</sub>、TE<sub>201</sub> 的电场分布

才能实现电路匹配,安装调试比较复杂。本文阻抗变换是基于厚度 1.5 mm 的 RO4350B 板材优化得到, $h_1 = 1.5$  mm,为方便插入 1.2 mm 的 SMA 探针,内导体直径定为  $d_{in1} = 1.2$  mm,根据式(3)、(4)以及依靠电磁软件优化得到外导体直径,从而实现输入端口 50 欧姆匹配。等效电路图如图 6(a)输入端口的回波损耗与外导体直径  $d_{in2}$  的关系如图 6(b)所示。

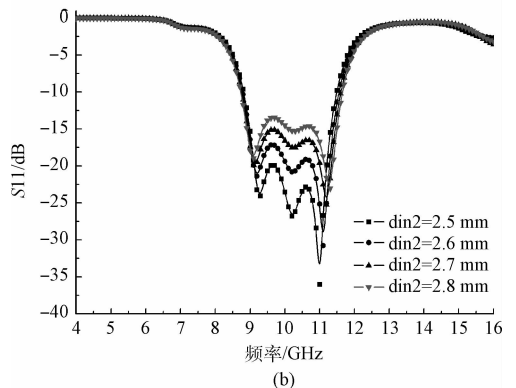
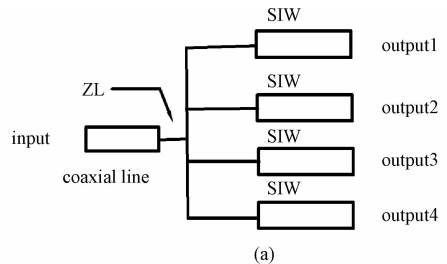


图 6 (a)同轴线外导体直径与回波损耗的关系;(b)等效电路

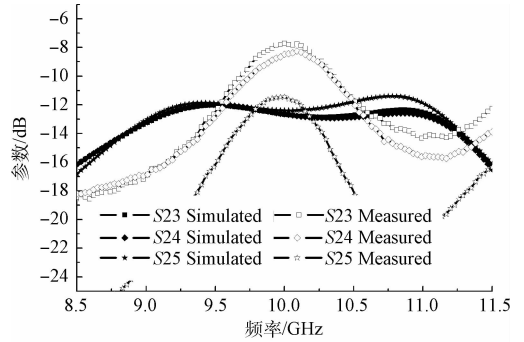
### 4 滤波功分器的仿真与测试结果分析

本文基片集成波导的宽带滤波功分器采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真,按照图 2 所示的结构建立仿真模型。本设计的介质基片材料选择是 Rogers RO4350B,相对介电常数  $\epsilon_r$  为 3.48,损耗正切为 0.0037,厚度  $h=0.508$  mm。加工完成用 HP-8722ES 矢量网络分析仪对滤波功分器进行测试。电路的物理尺寸如表 1,仿真和测试结果如图 7 所示,实物加工如图 8 所示。

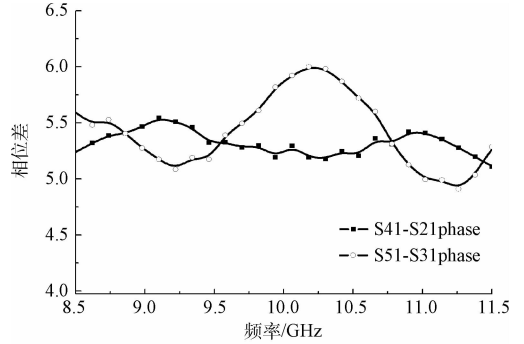
表 1 四路滤波功分器的物理尺寸 (mm)

符号	参数值	符号	参数值
$L$	32	$h1$	1.5
$L1$	3	$w$	3.7
$L2$	6.1	$Ds$	1.4
$L3$	2.4	$W1$	1.15
$din1$	1.2	$L4$	10.5
$din2$	2.5	$D1$	1.5

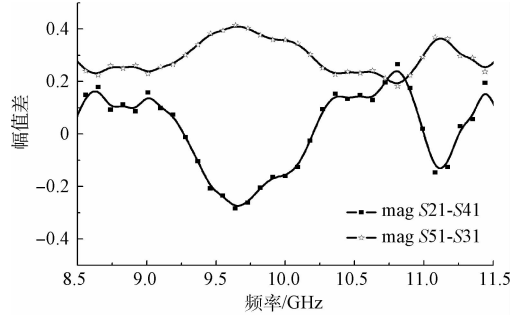
如图 7(a)、(b)所示,该滤波功分器仿真结果为:中心频率 10 GHz,带宽 2.5 GHz(8.7~11.2 GHz),相对带宽达到 25%,带内回波损耗优于 20 dB,插入损耗为  $6.6 \pm 0.2$  dB;实测回波损耗优于 15 dB,插入损耗  $7.2 \pm 0.2$  dB。图 7(c)所示,输出端口之间的隔离度仿真结果小于 -13 dB,



(c) 各输出端口之间仿真与实测的隔离度



(d) 输出端口的实测相位差



(e) 输出端口的实测幅值差

图 7 仿真与实测结果

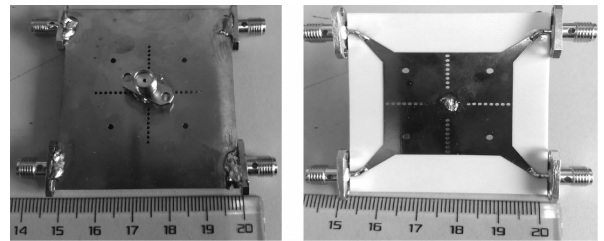
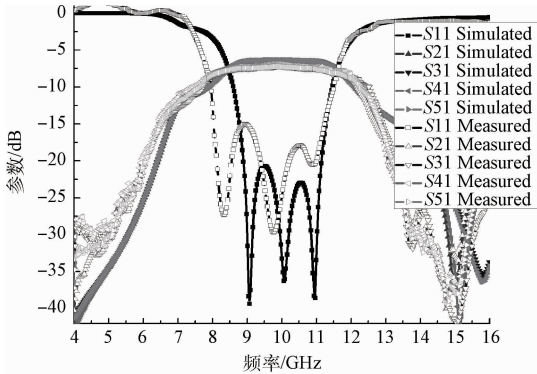
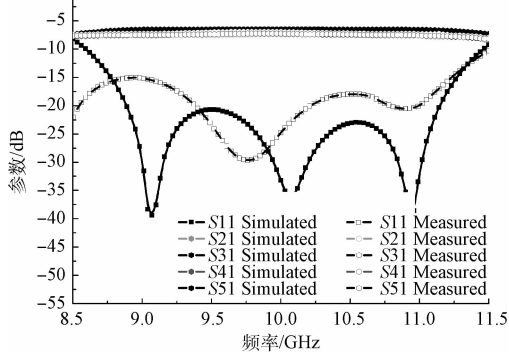


图 8 加工实物图正反面



(a) 插入损耗和回波损耗的仿真和实测结果



(b) 在通带内仿真和实测

实测输出端口间的带内隔离度总体小于 -10 dB,图 7(d)图实测各个输出端口在通带内的相位差小于  $6^\circ$ ,图 7(e)图实测各输出端带内的幅值相差在  $\pm 0.4$  dB,实测结果和仿真结果略有偏差。造成实测与仿真误差原因是介质的损耗、导体的损耗以及测量误差等。频率较高时,SAM 的焊点对测量结果影响也很大;另外同轴馈线与介质板焊接不紧凑,介质板与同轴线之间缝隙也会造成误差。各个输出端的参

数不同是由加工和焊接造成的。实测与仿真结果基本吻合。

## 5 结 论

本文分析了基片集成波导腔体的多模传输特性以及感性孔对模式的微扰,设计了小型化的宽带四路滤波功分器。输出带宽 2.5 GHz,幅度、相位具有良好的一致性,微带输出结构易与其他平面电路集成;感性孔微扰改善了阻带性能;相比于文献[9-11],结构尺寸较小。仿真结果验证了滤波功分器的有效性,实物测试结果说明设计具有工程价值。该结构设计简单、加工成本低,可广泛应用于微波电路系统中。

## 参考文献

- [1] 祝君豪, 孟令琴, 任龙, 等. 基于共面波导的 1/4 波长 SIR 带通滤波器[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6):109-112.
- [2] 严冬, 汪朋, 李帅永, 等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):2372-2380.
- [3] LIU W Q, WEI F, SHI X W. A compact tri-band power divider based on triple-mode resonator[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 138(10):283-291.
- [4] CHAU W M, HSU K W, TU W H. Wide-stopband wilkinson power divider with bandpass response[J]. Electronics Letters, 2014, 50(1):39-40.
- [5] ZHU H, ABBOSH A M, GUO L. Wideband four-way filtering power divider with sharp selectivity and wide stopband using looped coupled-line structures[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2016, 26(6):1-3.
- [6] SONG K, FAN Y, ZHANG B. Ku-band multiway rectangular waveguide power divider[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 52(11):2560-2563.
- [7] GUO L, LI J, BA T, et al. A compact five-port waveguide structure and its application as a three-way power divider[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11):024702-16.
- [8] 周景超, 孟令琴, 任龙, 等. 双模双通带基片集成波导滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6):4-7.
- [9] HUI J N, FENG W J, CHE W Q. Balun bandpass filter based on multilayer substrate integrated waveguide power divider[J]. Electronics Letters, 2012, 48(10):571-573.
- [10] MOZNEBI A R, AFROOZ K. Compact filtering power divider based on half mode substrate integrated waveguide [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2016, 61:55-62.
- [11] KHAN A A, MANDAL M K. Miniaturized substrate integrated waveguide (SIW) power dividers[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2016, 26(11):1-3.
- [12] 李荣强, 杜国宏, 唐军. 过模基片集成波导腔体滤波器设计[J]. 微波学报, 2014, 30(3):93-96.
- [13] HUANG T H, CHANG C S, CHEN H J, et al. Simple method for a K-band SIW filter with dual-mode quasi-elliptic function response[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2007, 49(6):1246-1249.
- [14] SONG K, CHEN F, ZHANG F, et al. Ka-band four-way power combiner based on multi-layer substrate integrated waveguide[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(3):1703-1711.
- [15] 贾建科. 基于 MWO 的 Wilkinson 功率分配器的研究与设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(8):58-60.

## 作者简介

王旭, 1990 年出生, 上海大学硕士研究生, 主要研究方向为基片集成波导结构的滤波功分器。

E-mail: wangxuedu@163.com

孟令琴, 1965 年出生, 副教授, 博士, 主要研究方向毫米波新技术。

E-mail: menglq@shu.edu.cn