光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060202

小孔耦合型双通道太赫兹波导定向耦合器设计

潘　武*，李海珠，李永瑞，张　彬

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 提出了一种小孔耦合型双通道太赫兹波导定向耦合器，采用新颖的阶梯结构，将两个单通道耦合器结合，可在双通道内实现相同的耦合输出。研究结果表明，在180～260 GHz的频率范围内，该耦合器的耦合度为10 dB，输出最大误差小于1.6 dB，回波损耗大于25 dB，隔离度大于35 dB，相对带宽达到36%。与传统的太赫兹波导定向耦合器相比，该耦合器能够实现双通道的耦合输出，在太赫兹系统中可用于双通道的功率检测、功率合成与分配。

关键词： 太赫兹；小孔耦合；双通道；波导；定向耦合器；阶梯结构

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0848－06

Design of Pinhole-coupled Dual-channel Terahertz Waveguide Directional Coupler

PAN Wu, LI Haizhu, LI Yongrui, ZHANG Bin

(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A pinhole-coupled dual-channel terahertz waveguide directional coupler was proposed. It adopted a novel ladder structure and combined two single-channel couplers to achieve the same coupling output in two channels. The research results show that in the frequency range of 180～260 GHz, the coupling degree of the coupler is 10 dB, the maximum output error is less than 1.6 dB, the return loss is greater than 25 dB, the isolation degree is greater than 35 dB, and the relative bandwidth is 36%. Compared with the traditional terahertz waveguide directional coupler, this coupler can realize dual-channel coupling output, and can be used for dual-channel power detection, power synthesis and distribution in terahertz systems.

Key words: terahertz; pinhole coupling; dual-channel; waveguide; directional coupler; ladder structure

0　引言

定向耦合器是一种四端口无源器件，常用于系统网络中的功率分配与合成。如今，定向耦合器的工作频率不断提高，已经从微波、毫米波波段过渡到太赫兹波段。太赫兹(Terahertz，THz)是指频率在0.1～10 THz范围内，波长在30～3 000 μm之间的电磁波[1-2]。太赫兹定向耦合器是实现太赫兹系统中功率分配及合成的关键器件，也是当前太赫兹信号源的重要组成部分。

2014年，Zhou等[4]设计了一款工作在340 GHz的太赫兹E面矩形波导定向耦合器，该耦合器采用不同长度的分支波导构成，其隔离度为30 dB，回波损耗大于15 dB。2017年，孙玉洁等[5]设计了一款“十字形”多孔耦合的太赫兹波导定向耦合器，该耦合器在325～475 GHz带宽范围内，耦合度达7.5 dB，隔离度达30 dB，回波损耗大于20 dB。2018年，王颖等[6]设计了一款等差方孔耦合型太赫兹波导定向耦合器，该耦合器在300～500 GHz内耦合度为7.8 dB，回波损耗大于26 dB，隔离度大于30 dB。2019年，Zhang等[7]设计了一款太赫兹五路分支波导定向耦合器，该耦合器在380～460 GHz的频率范围内，回波损耗与隔离度均大于18 dB。上述耦合器无论是分支波导型还是小孔型，都能实现良好的耦合效果，但都

收稿日期：2022－06－02.

*通信作者：潘　武　E-mail：panwu@cqupt.edu.cn

只能实现一个通道内的耦合，在双通道或者多通道内无法满足要求，限制了其在需要多个通道的功率检测或分配场景中的应用。

针对以上问题，本文采用小孔耦合方式，设计了一款工作在太赫兹频段范围内的双通道波导定向耦合器。通过理论计算、结构仿真及优化得到的耦合器能实现中心频率在 220 GHz 的双通道耦合输出。

1　理论分析

定向耦合器的基本结构如图 1 所示，定向耦合器由输入端、直通端、耦合端和隔离端四个端口以及一个耦合结构组成。根据耦合结构的不同，定向耦合器可分为 E 面分支波导耦合器[8]、H 面裂缝波导耦合器[9]及小孔耦合器[10]。

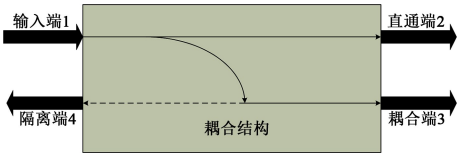


图 1　定向耦合器基本结构示意图

多孔定向耦合器的基本工作原理如图 2 所示，从输入端输入的信号在经过每一个小孔时都会激励起不同振幅的前向波和反向波，在信号向耦合端口传输的过程中，每个小孔产生的波分量传输到下一个小孔的距离均为 $\lambda/4$（四分之一波导波长），此方向的波为同相波，构成同相叠加。而输入信号向隔离端口反向传输的过程中，第 $n+1$ 个小孔产生的波分量总比第 n 个小孔产生的波分量多传输 $\lambda/4$，波分量在此传输过程中存在相消现象，而使隔离端口基本没有信号输出。

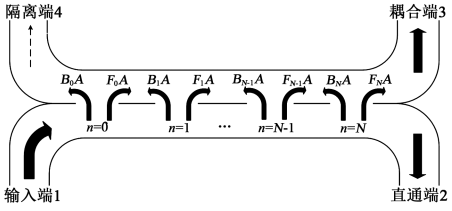


图 2　多孔耦合原理图

根据相位叠加理论，设 F_n 代表第 n 个小孔的前向耦合系数，B_n 代表第 n 个小孔的反向耦合系数，相邻耦合小孔间的距离相等且均为 d，波导相位常数为 β，则输入信号到第 n 个小孔的通道长度为 $2\beta nd$。

正向波、反向波的总振幅分别为

$$F = A\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta Nd}\sum_{n=0}^{N}F_n \tag{1}$$

$$B = A\sum_{n=0}^{N}B_n\mathrm{e}^{-2\mathrm{j}\beta nd} \tag{2}$$

根据上式(1)和(2)可得定向耦合器的耦合度 C 和隔离度 I 为

$$C = -20\lg\left|\frac{F}{A}\right| = -20\lg\left|\sum_{n=0}^{N}F_n\right| \tag{3}$$

$$I = -20\lg\left|\frac{B}{A}\right| = -20\lg\left|\sum_{n=0}^{N}B_n\mathrm{e}^{-2\mathrm{j}\beta nd}\right| \tag{4}$$

令相邻小孔间的距 d 为 1/4 波导波长，即 $d=\lambda/4$，则 $\beta d=\pi/2$，$A_n=ft^n$，$B_n=bt^n$，t 近似为 1，式(3)和(4)可简化为

$$C = -20\lg(f) - 20\lg(N+1) \tag{5}$$

$$I = -20\lg\left(b\left|\sum_{n=0}^{N}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}n\pi}\right|\right) = \begin{cases}\infty, N+1\text{ 为偶数}\\ -20\lg(b), N+1\text{ 为奇数}\end{cases} \tag{6}$$

式中，f 为单个耦合孔的耦合系数，b 为单个小孔后向耦合系数。

2　耦合器结构设计

2.1　单通道定向耦合器结构设计

基于以上设计原理，设计了一款单通道太赫兹波导定向耦合器。其工作频率范围为 180～260 GHz（中心频率为 220 GHz），为实现输入信号的 TE 波单模传输，采用 WR-4 的标准矩形波导，即波导的横截面尺寸为 $a\times b=1.10\ \mathrm{mm}\times 0.55\ \mathrm{mm}$；小孔个数 $N=70$，相邻两个耦合小孔间的距离 d 为 $\lambda/4$，计算得 $d=0.43\ \mathrm{mm}$；采用双排多孔排列形式，波导长度 $L=24.00\ \mathrm{mm}$。

小孔厚度即波导公共壁的厚度，在理想情况下，小孔厚度为 0 时能达到最优的器件性能，但在现有的加工技术下无法满足理论设计要求，考虑到实际机械加工强度，小孔的厚度取 $t=0.30\ \mathrm{mm}$。对波导的宽边作为公共壁进行开孔。取小孔圆心到波导窄壁的距离 $s=0.23\ \mathrm{mm}$。

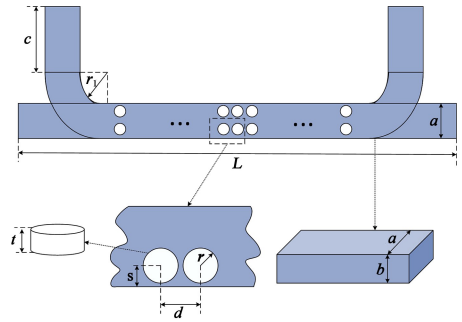
综上所述，单孔定向耦合器的具体结构参数如表 1 所示，结构如图 3(a)所示。

表 1　单通道定向耦合器结构具体参数

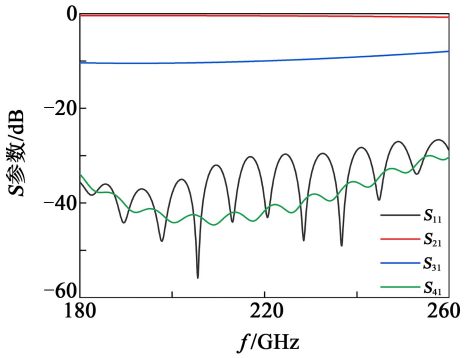
参数	L	t	r	r_1	d	s	c
数值/mm	24.00	0.30	0.21	1.00	0.43	0.23	4.00

在电磁仿真设计软件 CST2020 里建立耦合器

的结构模型并进行仿真分析。仿真 S 参数如图3(b)所示，其中耦合器的回波损耗用 S_{11} 表征，耦合度用 S_{31} 表征，隔离度用 S_{41} 表征。



(a) 单通道定向耦合器结构示意图



(b) 单通道耦合器 S 参数曲线

图3 单通道耦合器结构及相关仿真结果图

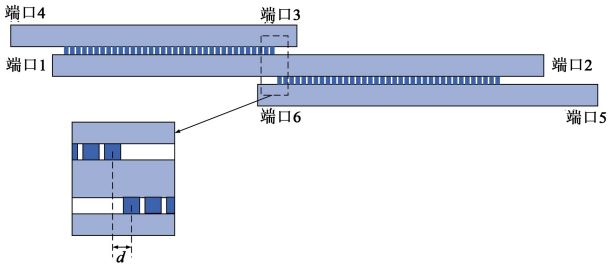
由图3(b)可知，在220 GHz中心频率附近，耦合器的耦合度 S_{31} 为10 dB，回波损耗 S_{11} 大于25 dB，隔离度 S_{41} 大于30 dB。在工作带宽内耦合器具有良好的隔离性、方向性和较小的损耗。

2.2 双通道定向耦合器结构设计

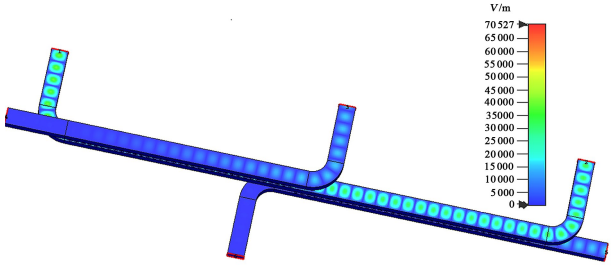
本文采用新颖的阶梯结构，将两个单通道耦合器连接形成双通道耦合器。其中两个单通道耦合器共用一个主波导，即图4(a)所示，端口1与端口2组成的波导。在主波导上下两侧开耦合小孔，形成“阶梯结构”。其中端口3与端口5所在通道为两个耦合通道—双通道，为实现端口3与端口5相同的耦合输出，相应地增加第二个耦合器开孔数量，此处增加4个。

仿真结果如图4(b)与(c)所示，其中 S_{31} 与 S_{51} 表征两个耦合通道的耦合度。在220 GHz的中心频率上，其双通道内的耦合度均为10 dB。隔离度 S_{41} 与 S_{61} 均大于35 dB，回波损耗 S_{11} 大于25 dB。

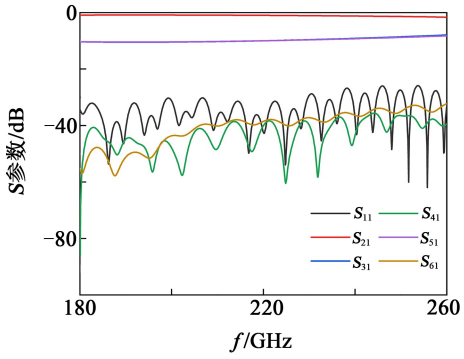
阶梯结构相比于直接级联结构，不仅缩小了耦合器整体体积，利于集成，而且将耦合小孔放置在同一波导的上下两个不同侧壁的方法，为后续设计其他新颖的多孔耦合结构提供了新思路。



(a)双通道定向耦合器结构侧视图



(b) 双通道定向耦合器表面电流分布



(c) 双通道定向耦合器的 S 参数曲线

图4 双通道耦合器结构及相关仿真结果

3 结构参数对耦合器性能的影响及器件优化

目前所设计的双通道定向耦合器，其耦合度在中心频率附近为10 dB，但在整个工作频段范围内耦合输出最大误差为2.5 dB，需要进一步优化耦合平坦度。通过讨论耦合器不同结构参数对其性能的影响，调整相关参数，达到器件优化的目的。

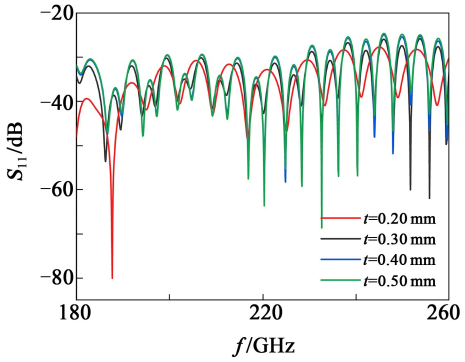
由于两个耦合器结构相同，此处只讨论第一个耦合器的 S 参数，即 S_{11}～S_{41} 的变化。

3.1 小孔厚度对耦合器性能的影响

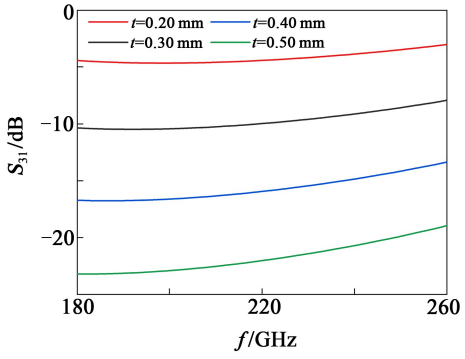
设置小孔厚度 t 变化范围为0.20～0.50 mm，步长为0.10 mm，保持其他结构参数不变，得到 t 的变化对耦合器性能的影响，如图5所示。

由图5可知，小孔厚度 t 从0.20 mm变化到

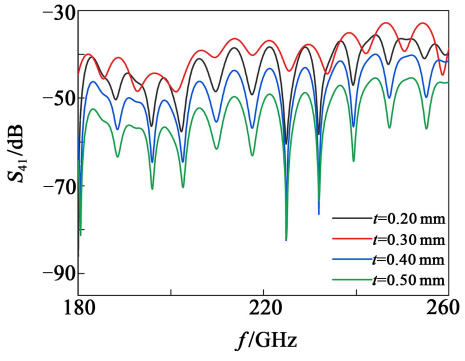
0.50 mm 时，耦合器在 180～260 GHz 范围内的回波损耗 S_{11} 均大于 25 dB，并随 t 的增大而逐渐减小；耦合度 S_{31} 曲线变化趋势基本一致，随 t 的增大而增大，即增大小孔厚度，耦合度增大，但耦合性能降低，这是由于增大了小孔厚度也增加了耦合信号在小孔中传输的长度，导致损耗增大；隔离度 S_{41} 随 t 的增大而逐渐增大。



(a)　小孔厚度 t 变化对 S_{11} 的影响



(b)　小孔厚度 t 变化对 S_{31} 的影响



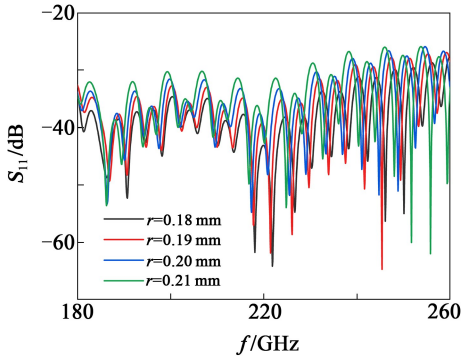
(c)　小孔厚度 t 变化对 S_{41} 的影响

图 5　小孔厚度 t 变化对耦合器性能的影响

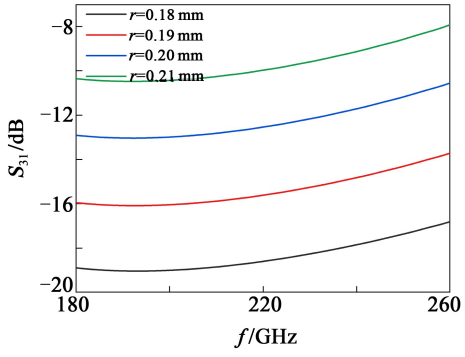
由此可见，调整小孔厚度可以改变耦合器的耦合度和隔离度，但不能明显改变耦合平坦度。

3.2　小孔半径对耦合器性能的影响

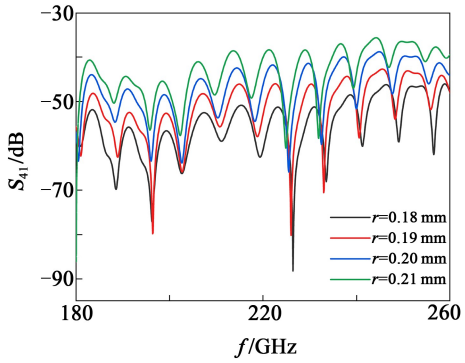
设置小孔半径 r 的变化范围为 0.18～0.21 mm，步长为 0.01 mm，其他结构参数保持不变，得到 r 的变化对耦合器性能的影响，如图 6 所示。



(a)　小孔半径 r 的变化对 S_{11} 的影响



(b)　小孔半径 r 的变化对 S_{31} 的影响



(c)　小孔半径 r 的变化对 S_{41} 的影响

图 6　小孔半径 r 的变化对耦合器性能的影响

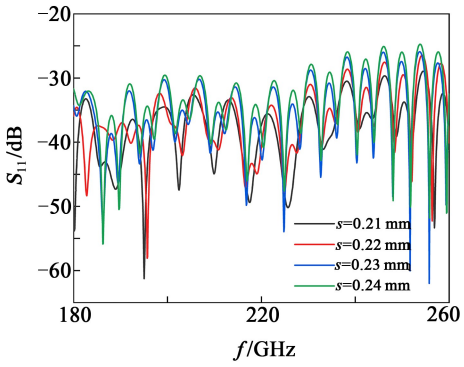
由图 6 可知，随着耦合小孔半径 r 的增大，回波损耗 S_{11} 逐渐减小，其最小值均大于 25 dB；耦合度 S_{31} 随 r 的增大而逐渐减小，则耦合性能逐渐增大，这是由于增大耦合孔孔径提高了传输耦合信号的大小，即提高了耦合性能；隔离度 S_{41} 随 r 的增大而逐渐减小。

因此，在优化耦合器时，可以通过适当增大耦合孔孔径来提高耦合性能，减小耦合度，降低隔离度。但调整耦合孔孔径对耦合平坦度没有明显影响。

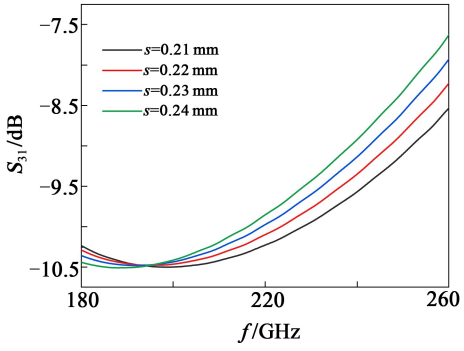
3.3　小孔中心到波导窄壁的距离对耦合器性能的影响

保持耦合器其他结构参数不变，小孔中心到波导窄壁的距离 s 的变化范围为 0.21～0.24 mm，步

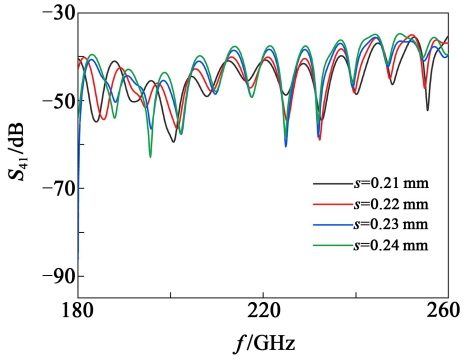
长为 0.01 mm，得到 s 的变化对耦合器性能的影响，如图 7 所示。



(a) 小孔中心到波导窄边壁距离 s 对 S_{11} 的影响



(b) 小孔中心到波导窄边壁距离 s 对 S_{31} 的影响



(c) 小孔中心到波导窄边壁距离 s 对 S_{41} 的影响

图 7 小孔中心距波导窄壁的距离 s 对耦合器性能的影响

由图 7 可知，随着小孔中心到波导窄边壁距离 s 的增大，在 180～260 GHz 的工作频段内，耦合器回波损耗 S_{11} 随着 s 的增大而减小，且最大值均大于 25 dB。耦合度 S_{31} 的曲线在 194 GHz 处相交，在 180～194 GHz 范围内随 s 的增大，耦合度增大；在 194～260 GHz 范围内随 s 的增大，耦合度减小。整体上，随着 s 的增大，耦合度 S_{31} 曲线越陡峭，即耦合平坦度越小；隔离度 S_{41} 随着 s 的增大而减小。

综上所述，通过调整小孔中心离窄边的距离可对耦合器的耦合平坦度进行调整与优化。对耦合器的结构参数加以调整，将原设计 $s=0.23$ mm 修改为 $s=0.21$ mm，得到图 8 所示最终器件优化性能。

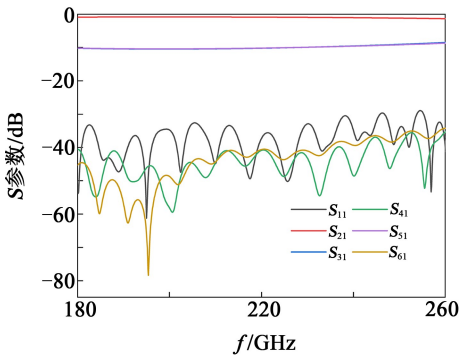


图 8 优化后的双通道定向耦合器 S 参数曲线

优化后的双通道太赫兹波导定向耦合器，双通道内的耦合度在中心频率范围附近为 10 dB，在整个工作带宽范围内耦合输出最大误差小于 1.6 dB，回波损耗大于 25 dB，隔离度大于 30 dB，相对带宽达到 36%。

4 结论

本文研究设计的小孔耦合型双通道太赫兹波导定向耦合器，利用两个单通道耦合器阶梯式的结合形成了双通道耦合结构。该耦合器工作性能良好，隔离度高，回波损耗小。相比于传统的分支波导型与 H 面裂缝波导型耦合器不仅拓展了工作带宽，并且在工作频带内实现了双通道的耦合输出，为系统中双通道或多通道的功率分配、合成提供了新的解决思路。

参考文献：

[1] Hosako I, Sekine N, Patrashin M, et al. At the dawn of a new era in terahertz technology[J]. Proc. IEEE, 2007, 95(8): 1611-1623.

[2] Ye Q, Yang C. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. Chinese Optics, 2012, 5: 1-11.

[3] Deng X, Dong G, Dai X, et al. Compact full Ka-band waveguide directional coupler based on rectangular aperture array with stairs[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 745.

[4] Zhou Y F, Hu J, Liu S, et al. A terahertz-band branch waveguide directional coupler based on micro-machining[C]// 2014 IEEE Inter. Conf. on Communiction Problem-Solving, 2014: 223-226.

[5] 孙玉洁，段俊萍，王雄师，等. 多孔耦合型太赫兹波导定向耦合器的设计[J]. 红外与激光工程，2017，46(1)：255-261.
Sun Yujie, Duan Junping, Wang Xiongshi, et al. Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 255-261.

[6] 王　颖，张斌珍，段俊萍，等. 等差方孔耦合型太赫兹波导定向耦合器设计[J]. 仪表技术与传感器，2018，421(2)：62-65.
Wang Ying，Zhang Binzhen，Duan Junping，et al. Design on arithmetic square hole terahertz waveguide directional coupler [J]. Instrument Technique and Sensor，2018，421(2)：62-65.

[7] Zhang B，Niu Z，Wang J，et al. Four-hundred gigahertz broadband multi-branch waveguide coupler [J]. IET Microwaves，Antennas & Propagation，2020，14(11)：1175-1179.

[8] Liu S，Hu J，Zhang Y，et al. Silicon micromachined waveguide quadrature-hybrid coupler at terahertz frequency band[J]. J. Infrared，Millimeter，Terahertz Waves，2015，36(8)：709-719.

[9] Wang Xin，Zhang Binshen，Wang Junlin，et al. 100 GHz waveguide band-pass filter employing UV-LIGA micromachining process[J]. Microelectronics J.，2017，69：101-105.

[10] Sun Y，Duan J，Wang X，et al. Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers[J]. Infrared and Laser Engineering，2017，46(1)：0125002.

作者简介：

潘　武(1966—)，男，四川省大英县人，博士，教授，主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究；

李海珠(1999—)，女，重庆市人，硕士研究生，研究方向为太赫兹功率分配与合成器件。