

〈太赫兹技术〉

宽频太赫兹非对称主副波导定向耦合器设计

董兰宵¹, 南雪莉¹, 刘昊炀², 段启凯¹, 董金峰¹

(1. 山西大学 自动化与软件学院, 山西 太原 030051; 2. 山西大学 电力与建筑学院, 山西 太原 030051)

摘要: 基于微型无人机雷达、精确制导武器雷达及无线通信终端设备的应用前景, 设计了一种非对称主副波导定向耦合器。该耦合器采用主副波导为不同形状的等间距多孔耦合结构, 将主矩形波导 TE10 模的信号耦合到副圆形波导 TE11 模中, 利用相位叠加原理使得隔离端口相位达到反向相消的效果, 能够得到良好的耦合度和隔离度。该耦合器中心频率为 400 GHz, 相对带宽为 40 GHz, 结果表明, 定向耦合器耦合度达到 $-13.8 \sim -12.8$ dB, 实现了弱耦合效果且耦合度稳定性较好, 隔离度优于 -24.5 dB, 直通插入损耗为 $-3 \sim -2.5$ dB, 性能良好。

关键词: 非对称波导; 太赫兹; 定向耦合器; 耦合度; 隔离度

中图分类号: TN814 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)09-0986-05

Broadband Terahertz Asymmetric Primary and Secondary Waveguide Directional Coupler Design

DONG Lanxiao¹, NAN Xueli¹, LIU Haoyang², DUAN Qikai¹, DONG Jinfeng¹

(1. School of Automation and Software, Shanxi University, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the application prospects of micro drone radar, precision guided weapon radar, and wireless communication terminal equipment, an asymmetric primary and secondary waveguide directional coupler is designed. The coupler uses an equally spaced porous coupling structure with different shapes of main and secondary waveguides, and the signal of the TE10 mode of the rectangular waveguide is coupled to the TE11 mode of the secondary circular waveguide. The isolated port achieves the effect of reverse cancellation, and good coupling and isolation can be obtained using the principle of phase superposition. The center frequency of the directional coupler and the relative bandwidth are 400 and 40 GHz, respectively. The results show that the coupling degree of the directional coupler is approximately -13.8 to -12.8 dB, which achieves a weak coupling effect and has a good coupling stability. The isolation is better than -24.5 dB, the through insertion loss is approximately -3 to -2.5 dB, and the performance is good.

Key words: asymmetric waveguide, Terahertz, directional coupler, coupling, isolation

0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 频率为 $0.1 \sim 10$ THz (对应的波长范围是 $3000 \sim 30$ μ m)^[1], 处于电磁学和光学交汇的频域位置。

目前, 由于国内外军事发展趋势及对通信速率需求的不断增长, 无线通信的载波必将会进入太赫兹的波谱范围, 作为电磁波谱中有待进行全面研究的最后一个频

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-04-11。

作者简介: 董兰宵 (1997-), 女, 硕士研究生, RF 射频器件设计。E-mail: dlxjynky@163.com。

通信作者: 南雪莉 (1987-), 女, 博士, 副教授, 主要从事 MEMS 射频器件及系统、先进制造技术等方面的研究。E-mail: nanxueli@sxu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (6180031506)。

率窗口, 对该领域的研究为未来在高新技术竞争中取得领先地位具有举足轻重的作用。

定向耦合器作为相控阵雷达系统和无线通信系统信号发射、功率合成与分流的核心部件^[2], 其重量轻型化、体积微型化已成为微波射频领域各界科学家争相研究的热点。而太赫兹波器件相比于微波器件体积更小、重量更轻, 具有更大的传输容量, 定位更加准确, 保密性更好, 且相比于光波, 太赫兹波可以在

极其恶劣的烟雾、沙尘环境中应用，抗干扰能力强，能量效率较高，这些特性使得太赫兹定向耦合器在微型无人机雷达、精确制导武器雷达、无线通信终端设备^[3-5]等领域具有广阔的应用前景。

随着定向耦合器应用领域的广泛化，对其结构的要求也越来越多元化。2008年曹乃胜、罗勇等人分析了中心频率为34GHz的圆波导-矩形波导单孔定向耦合器理论与实际测试的差异，得出了设计多孔耦合器参数的理论方法^[6]；2009年Gentili G.G.等人在22GHz频段内设计了一种矩形波导与圆波导之间耦合的四孔定向耦合器，耦合度达到-25dB^[7]；2020年陈卯燕、杨欢等人介绍了一种中心频率为40GHz的圆波导-矩形波导多孔定向耦合器，实现了-20dB的耦合度^[8]。目前，已有研究中有关太赫兹频段非对称主副波导结构的研究相对较少。

综上所述，本文基于小孔衍射理论与相位叠加定理设计了一种太赫兹频段矩形波导-圆波导定向耦合器，仿真实验证明，在太赫兹频率下不同形状波导之间可以达到良好的耦合特性。

1 结构设计

为减小耦合器尺寸，令矩形波导长度 $M=4\text{ mm}$ ，耦合孔采用等间距方形孔，孔数为24个， a 、 b 分别为矩形波导宽边与窄边长度； l 为方形孔边长； p' 为耦合孔的排间距； d' 为孔间距； m 为孔厚度；圆波导长度为 N ；截面半径 $R=b$ 。本文所设计的定向耦合器结构如图1所示。

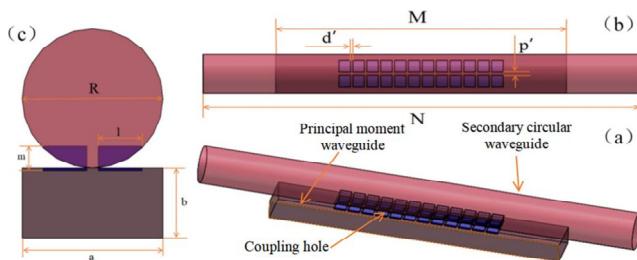


图1 定向耦合器结构(a)三维视图；(b)俯视图；(c)侧视图

Fig.1 Directional coupler structure (a)3D view; (b) Top view;

(c) Side view

通常单孔定向耦合器往往达不到理想的隔离度与方向性，因此本文结合相位叠加原理分析设计了一款多孔定向耦合器，根据期望指标确定耦合器的孔间距与孔尺寸，经过仿真优化得到最终参数值。

由表1可知矩形波导口宽边尺寸 a 与圆形波导口半径 R 均满足截止波长，文中矩形波导 $a>b$ ，波导传输TE₁₀模^[9]， μ_{mn} 为 m 阶Bessel函数导数的第 n 个根，因此可知圆波导主要传输TE₁₁模。

采用非对称波导耦合结构时，主副波导之间的激励模式需使用功率转换公式来计算^[10]。主副波导在耦合孔处产生耦合的必要条件是：在耦合孔位置，主副波导内部需同时存在着电场的法向分量或者磁场的切向分量^[11-12]。由于本文中主矩波导无法向分量，其纵向分量在耦合孔处为零，因此耦合产生在矩波导横向磁场分量与圆波导纵向磁场分量之间，则半径为 R 的圆波导与矩波导之间的耦合系数根据小孔衍射理论^[13]可写为：

$$A_k^{\pm} = \pm \frac{j\omega}{2} (\mu_0 p_v^* H_{2v}^{\mp} H_{1v}^{\pm}) \quad (1)$$

式中：“±”表示副波导中的传播方向。 A_k^{\pm} 分别代表副波导中两个方向的被激励波与激励波的比值； p_v^* 为磁极化率，方形孔磁极化率为 $(\pi l a^3)/16$ ； H_{2v}^{\mp} 、 H_{1v}^{\pm} 分别为主、副波导中磁场归一化功率值。

表1 波导截止波长

Table 1 Waveguide cutoff wavelength

	Main rectangular waveguide	Deputy circular waveguide
Cutoff wavelength	$\lambda < 2a$	$\lambda < 2\pi R/\mu_{mn}$

设置孔数为 $2n$ 个，且为等间距等耦合强度分布，则副圆波导中被激励波总和为：

$$A^{\pm} = \left| 2A_k^{\pm} \sum \cos[(2k-1)\varphi^{\pm}] \right| \quad (2)$$

$$\varphi^{\pm} = \left| \frac{d}{2} (\beta_1 \mp \beta_2) \right|$$

式中： β_1 、 β_2 分别为矩形波导TE₁₀模式与圆波导TE₁₁模式下的相位常数。

定向耦合器耦合度为：

$$C = 20 \lg |A^+| \quad (3)$$

2 仿真与优化

2.1 参数优化

定向耦合器中心频率为400GHz，带宽为40GHz，矩形波导采用标准波导WR-2(0.508mm×0.254mm)。激励波端口距小孔留部分距离，以保证波传输的稳定性，并假定波导输出端口均连接匹配阻抗。耦合度的数值与稳定性是定向耦合器的重要指标，除耦合孔的尺寸与间距，实际应用中影响耦合器性能的因素还包括孔厚度 m 、排间距 p' 等，频率越高，耦合器越不稳定。

本文将参数优化分为3部分，首先：令耦合孔间距 d' 分别为2μm、12μm，排间距 p' 分别为2μm、12μm、22μm、32μm、42μm、52μm，如图2所示，孔间距 d' 不变时，排间距 p' 每增加10μm，耦合度 S_{31} 幅度变化趋势翻转一次，分别于2~12μm、22~32μm、

42~52 μm 时呈增大趋势, 于 12~22 μm 、32~42 μm 时呈减小趋势, 因此可以得出耦合度 S_{31} 与排间距 p' 不成比例。另外, 耦合度 S_{31} 多数情况下在整个带宽范围内均处于不稳定状态, 只在 $d'=2 \mu\text{m}$ 、 $p'=12 \mu\text{m}$ 和 $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 处达到相对稳定, 耦合度分别为 $-12.4 \sim -10.7 \text{ dB}$ 、 $-13.9 \sim -12.2 \text{ dB}$, 波动范围在 2 dB 以内。

第二步: 取图 2 所示的两种稳定状态, 令孔边长 l 分别为 150 μm 、152 μm 、154 μm 、156 μm 、158 μm 观察耦合性能。如图 3 所示, $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 时耦合度 S_{31} 随着孔边长 l 的增大整体波动性更小。图(a)中 $d'=2 \mu\text{m}$ 、 $p'=12 \mu\text{m}$ 、 $l=158 \mu\text{m}$ 处耦合度 S_{31} 为 $-12.4 \sim -10.7 \text{ dB}$, 极差为 1.7 dB; 图(b)中 $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 、 $l=154 \mu\text{m}$ 处耦合度 S_{31} 为 $-14.3 \sim -12.8 \text{ dB}$, 极差为 1.5 dB; $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 、 $l=156 \mu\text{m}$ 处耦合度 S_{31} 为 $-13.8 \sim -12.8 \text{ dB}$, 极差为 1.0 dB; $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 、 $l=158 \mu\text{m}$ 处耦合度 S_{31}

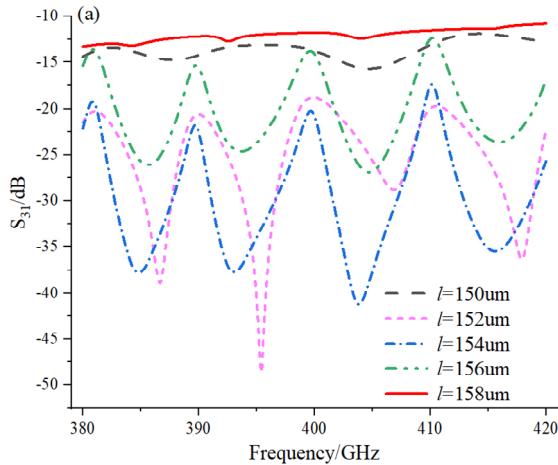


图 3 孔边长 l 对耦合性能的影响 (a) $d'=2 \mu\text{m}$, $p'=12 \mu\text{m}$; (b) $d'=12 \mu\text{m}$, $p'=52 \mu\text{m}$

Fig.3 The effect of hole length l on the degree of coupling (a) $d'=2 \mu\text{m}$, $p'=12 \mu\text{m}$; (b) $d'=12 \mu\text{m}$, $p'=52 \mu\text{m}$

第三步: 取 $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 、 $l=156 \mu\text{m}$, 耦合孔厚度决定了副圆波导耦合孔面积, 在保证耦合作用可行前提下令孔厚度 m 从 50 μm 增至 140 μm , 每次增加 10 μm , 观察耦合性能。如图 4 所示, 耦合度 S_{31} 在孔厚度 $m=90 \mu\text{m}$ 处达到稳定, 且孔厚度 m 小于 90 μm 时耦合度 S_{31} 波动性较大, 在达到稳定状态后若继续增加孔厚度, 耦合度参数再次呈波动状态, 虽相比于之前波动性明显减小, 却始终达不到稳定状态, 因此最终可取孔厚度 m 为 90 μm 。

为 $-13.9 \sim -12.6 \text{ dB}$, 极差为 1.3 dB; 由于以上 4 种情况得出耦合度数值差很小, 可根据耦合度稳定性指标选定较为合适的参数, 因此可选择 $d'=12 \mu\text{m}$ 、 $p'=52 \mu\text{m}$ 、 $l=156 \mu\text{m}$ 作为下一步参考尺寸。

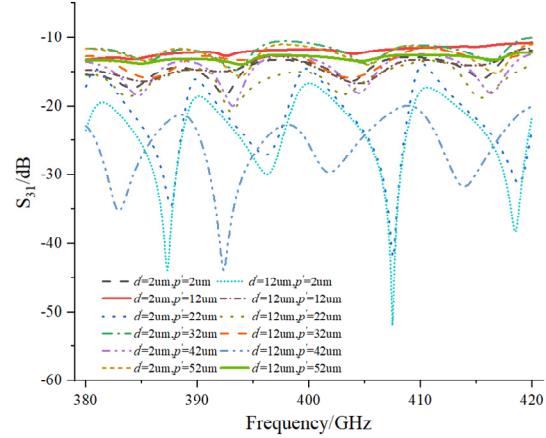


图 2 排间距 p' 对耦合性能的影响

Fig.2 The effect of row spacing p' on the degree of coupling

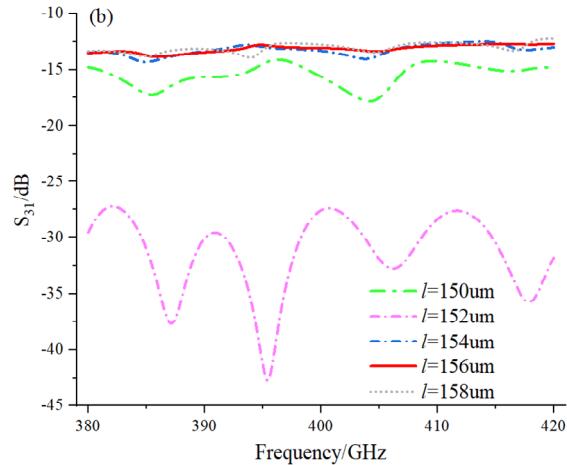


图 3 孔边长 l 对耦合性能的影响 (a) $d'=2 \mu\text{m}$, $p'=12 \mu\text{m}$; (b) $d'=12 \mu\text{m}$, $p'=52 \mu\text{m}$

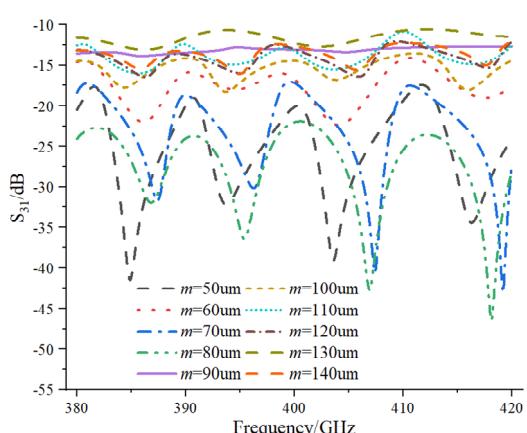


图 4 孔厚度 m 对耦合性能的影响

Fig.4 The influence of hole thickness m on coupling degree

2.2 结果

优化分析后得耦合器参数尺寸如表2所示。

表2 定向耦合器各参数尺寸

Table 2 Dimensions of each parameter of directional coupler

Parameters	N	a	b	p'	l	d'	m
Size/ μm	7000	508	254	52	156	12	90

使用HFSS软件进行仿真,仿真结果如图5和图6所示。 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别为耦合器回波损耗、插入损耗、耦合度、隔离度,则由图5可知回波损耗 S_{11} 优于 -23.5 dB,插入损耗 S_{21} 为 $-3\sim-2.5$ dB,波动范围为 0.5 dB,耦合度 S_{31} 为 $-13.8\sim-12.8$ dB,波动范围为 1 dB,隔离度 S_{41} 优于 -24.5 dB,因此可知耦合器方向性优于 -10.7 dB,符合实际应用背景。

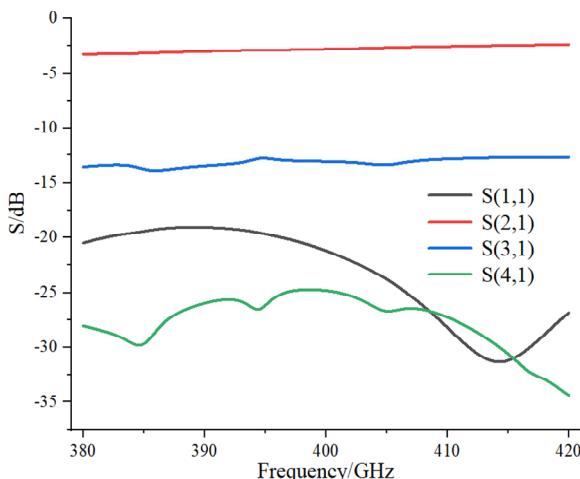


图5 定向耦合器S参数

Fig.5 S parameters of directional coupler

S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} 、 S_{44} 分别是各个端口回波损耗,由图6可知耦合器输入端口 S_{11} 与直通端口 S_{22} 优于 -19 dB,在 $410\text{ GHz}\sim420\text{ GHz}$ 之间达到最优,耦合端口 S_{33} 与隔离端口 S_{44} 在整个频段内优于 -12.5 dB,

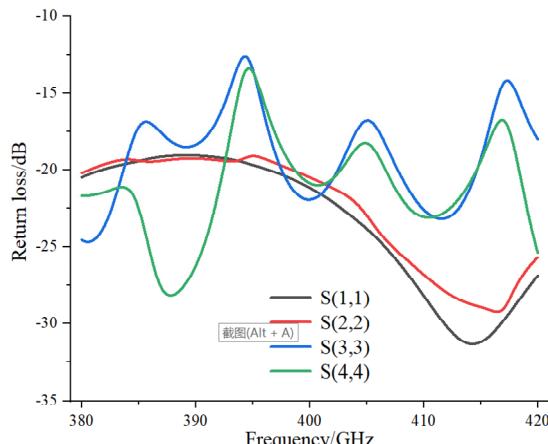


图6 定向耦合器各端口回波损耗

Fig.6 Return loss of each port of the directional coupler

为进一步观察该定向耦合器整体情况,图7中(a)给出耦合器的电场分布,(b)磁场分布图,由图可知副波导中隔离端口输出功率几乎为零,在保证耦合度的同时达到了良好的隔离效果。

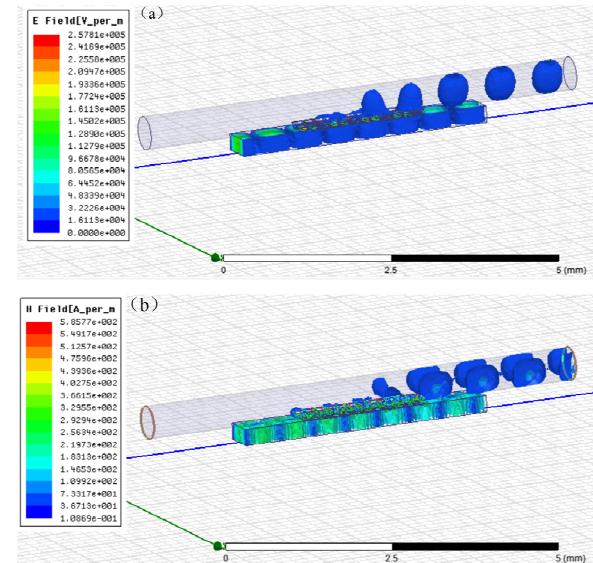


图7 定向耦合器场分布 (a)电场分布; (b)磁场分布

Fig.7 Field distribution of directional coupler (a) electric field distribution; (b) magnetic field distribution

3 结束语

本文设计结果表明在太赫兹频段非对称主副波导定向耦合器可实现弱耦合效果,耦合度达到 $-13.8\sim-12.8$ dB,隔离度优于 -24.5 dB,并讨论了排间距 p' 、孔边长 l 及孔厚度 m 的变化对耦合性能的影响。相比于已有的研究成果,本文设计的定向耦合器不仅提高了传输波的频率,而且打破了传统的对称波导耦合结构,但因其尺寸在微米量级,而加工工艺本身存在误差,因此在加工过程中很难保证等差孔间距的理想状态,若加工精度不够,容易使得相邻两孔合并在一起,直接破坏整体结构,同时增大了加工成本;此外,若因尺寸偏差导致波导壁表面粗糙度增大,则会造成耦合器插入损耗增大,若波导壁厚度太大会造成小孔厚度增大,从而增大耦合度波动性。为改善尺寸偏差对耦合器性能造成的影响,一方面需在实际加工过程中提升制备精度,另一方面,在仿真设计中应考虑耦合器各尺寸的协调性及可行性,例如可增大孔数,减小孔边长,从而达到保证耦合度的同时增大孔间距的目的。对于太赫兹定向耦合器的研究,未来还需要在设计及制备方面更加精进。

参考文献：

[1] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging: modern techniques and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 124-166.

[2] CHIU C L, LIAO Y H. Analysis of a single ring resonator with 2×2 90-degree multimode waveguide turning couplers[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 124-129.

[3] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(I)[J]. *微波学报*, 2010, 26(6): 1-6. Doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.2010.06.014.

ZHENG Xin, LIU Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system(I)[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(6): 1-6. Doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2010.06.014.

[4] 皇甫一江. 太赫兹真空电子器件的发展及其在雷达中的应用[J]. *舰船电子对抗*, 2021, 44(6): 111-116. Doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2021.06.022.

HUANGFU Yijiang. The development of Terahertz vacuum electric devices and their application to radars[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2021, 44(6): 111-116. Doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2021.06.022.

[5] Hirata A, Yamaguchi R, Kosugi T, et al. 10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2009, 57(5): 1102-1109.

[6] 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(4): 637-640.

CAO Naisheng, LUO Yong, WANG Jianxun. Design of aperture-coupling directional coupler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008(4): 637-640.

[7] Gentili G G, Lucci L, Nesti R, et al. A novel design for a circular waveguide directional coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2009, 57(7): 1840-1849.

[8] 陈卯燕, 杨欢, 马军, 等. 一种Q波段多孔耦合型定向耦合器[J]. *微波学报*, 2020, 36(5): 74-77, 82.

CHEN Maoyan, YANG Huan, MA Jun, et al. A Q-band directional coupler based on multi-hole coupling[J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(5): 74-77, 82.

[9] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, et al. Terahertz waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, 17(5): 851-863.

[10] 孙玉洁. 硅基太赫兹波导定向耦合器的设计及制备[D]. 太原: 中北大学, 2017.

SUN Yujie. Design and Fabrication on Silicon-based Terahertz Waveguide Directional Coupler[D]. Taiyuan: North University Of China, 2017.

[11] 宋俊逸. 大功率毫米波过模波导定向耦合器的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

SONG Junyi. Design of Over-moded Waveguide Directional Coupler For High Power Millimeter Wave Transmission Line[D]. Chengdu: School of Electronic Science and Engineering, 2018.

[12] 侯艳茹, 胡卫东, 孙浩. 一种16孔TE21模耦合器的改进设计[J]. *微波学报*, 2020, 36(S1): 263-266.

HOU Yanru, HU Weidong, SUN Hao. An improved design of 16-hole TE21 mode coupler[J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(S1): 263-266.

[13] Bethe H A. Theory of diffraction by small holes[J]. *Physical Review*, 1944, 66(7-8): 163.