

太赫兹矩形波导与共面波导耦合结构设计

杨恒泽 刘川玉 武京治 王艳红

Design of coupled structure of terahertz rectangular waveguide and coplanar waveguide

EL SCOPUS

Yang Hengze, Liu Chuanyu, Wu Jingzhi, Wang Yanhong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210733

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多孔耦合型太赫兹波导定向耦合器的设计

Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers 红外与激光工程. 2017, 46(1): 125002 https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0125002

高掺铒硅基氧化钽脊形光波导

Silicon-based tantalum pentoxide ridge waveguide with high erbium concentration 红外与激光工程. 2017, 46(8): 821002 https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0821002

基于耦合腔的太赫兹垂直传输结构

Terahertz vertical transition structure based on coupling cavity 红外与激光工程. 2020, 49(6): 20190566 https://doi.org/10.3788/IRLA20190566

消除模间干涉现象的光纤光栅模式转换器

Mode converter based on fiber grating to eliminate intermode interference phenomenon 红外与激光工程. 2018, 47(12): 1222001 https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1222001

基于波导结构的集成式太赫兹共焦成像系统

Integrated terahertz confocal imaging system based on THz waveguides 红外与激光工程. 2019, 48(S2): 98 https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S219001

用于半导体激光器的高效率复合波导结构

High efficiency composite waveguide structure for semiconductor laser 红外与激光工程. 2017, 46(11): 1106006 https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1106006

太赫兹矩形波导与共面波导耦合结构设计

杨恒泽1,2, 刘川玉1,2, 武京治3,4, 王艳红3,4

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 南通智能光机电研究院, 江苏 南通 226000;

3. 中北大学信息与通信工程学院,山西太原 030051;

4. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051)

摘 要:太赫兹 (THz) 波位于微波与红外光波之间,现有微波和光波段波导技术应用正在向 THz 波 段拓展。但是,由于水汽对 THz 波的强吸收及制造工艺等原因,THz 器件主要是平面结构,而 THz 源 及其传输需要用矩形波导。因此,矩形波导与共面波导之间的转换结构成为决定元件和系统性能的关 键部分。该设计利用脊波导进行阻抗匹配及电磁场模式转换,实现 THz 波矩形波导到共面波导的高 效率耦合。结果表明,在 0.2~0.4 THz 频段内,该转换结构的传输系数 (S₂₁) 高于-3 dB,可以对 THz 电 磁场进行高效率转换。该结果可用于太赫兹分子探测、太赫兹通信等领域,为 0.2 THz 以上太赫兹的 模式转换提供了一种可行方案。

关键词:太赫兹耦合结构; 脊波导; 模式转换 中图分类号:TN814 文献标志码:A DOI: 10.3788/IRLA20210733

Design of coupled structure of terahertz rectangular waveguide and coplanar waveguide

Yang Hengze^{1,2}, Liu Chuanyu^{1,2}, Wu Jingzhi^{3,4}, Wang Yanhong^{3,4}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Nantong Institute of Intelligent Opto-Mechatronics, North University of China, Nantong 226000, China;

3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Terahertz (THz) wavelength lies in between millimeter waves and infrared waves in the electromagnetic spectrum. The existing optical waveguide and microwave millimeter waves waveguide technologies can be applied to the THz band. Because of the strong absorption of THz waves by water vapour and the limitation of manufacturing processes, THz devices were mainly planar structures and rectangular waveguides were commonly used for THz source and transmission. Therefore, the conversion structure between rectangular waveguides and coplanar waveguides has plays an indispensable role in determining the performance of components and systems. In recent research, the ridge waveguide has been used for impedance matching and electromagnetic field mode conversion to accomplish the high-efficiency coupling between THz wave rectangular waveguides and the coplanar waveguides. According to the simulation of CST microwave studio, the results show that the transmission coefficient (S_{21}) of the conversion structure is higher than -3 dB in 0.2-0.4 THz frequency band,

作者简介:杨恒泽,男,硕士生,主要从事太赫兹波导方面的研究。

收稿日期:2021-11-08; 修订日期:2022-01-20

导师简介:王艳红,女,副教授,博士,主要从事纳米等离子体光学等方面的研究。

which show that the ridge waveguide converts the THz electromagnetic field with high efficiency. The performance of the conversion structure breaks the restriction of frequency which is below 0.2 THz before. This designed structure can be used in various fields, such as terahertz molecular detection and terahertz communication, and it also provides a feasible solution for terahertz mode conversion above 0.2 THz. **Key words:** terahertz coupled structure; ridge waveguide; schema transformation

0 引 言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内 的电磁波^[1]。THz 波具有透射能力强、频率范围宽、 信噪比高^[2]、单光子能量低^[3]等特点,近年来被广泛 运用到物体成像^[4]、宇宙探测^[5]、分子探测^[6]、移动通 信^[7]等各种领域。

由于很多生物大分子及 DNA 的旋转及振动能级 处于 THz 波段, 所以可以利用 THz 辐射来对病变生 物体及病变标志物进行探测。目前大量研究表明,可 以在共面波导^[8](CPW)上制作谐振结构,病变生物体 及病变标志物和正常生物体通过谐振结构会导致 THz 波产生不同的振幅、波形和时延。通过对生物分 子 THz 吸收谱的研究得到其振动及构象变化信息,可 以对相关疾病做出早期诊断。目前由于水汽对 THz 波的强吸收及制造工艺等原因, 引导 THz 传输到 共面波导主要依赖天线和矩形波导^[9]。相较于天线传 输,矩形波导结构简单、机械强度更大。矩形波导与 共面波导在直接馈电的情况下,矩形波导中电磁波主 要以 TE 模、TM 模传输, 而共面波导传输 TEM 模, 因 此存在动量和模式不匹配的问题。在这种情况下,矩 形波导到共面波导的转换^[10]成为近年来研究的热 点。实现低插入损耗且可用于现有电路和芯片封装 的转换结构具有重要的研究意义和应用潜力。

目前的转换结构主要基于 E 面探针、线键合探 针、贴片天线、金属脊和缝隙耦合设计,且已经取得 许多研究成果。2016年,Dong Yunfeng^[11-14]等人首次 使用线键合实现 U 波段矩形波导到共面波导转换; 2018年,分别利用线键合探针和贴片天线在 110~ 166.3 GHz、118.8~161 GHz 实现插入损耗为 2 dB 的转 换结构; 2019年,利用金属脊结构在 122.5~156.5 GHz 实现插入损耗小于 3 dB 的转换结构; 2020年,Tang Wenxuan^[15]等人利用金属脊结构在 12~18 GHz 实现矩形 波导到表面等离子体的过渡; 2021年,H. Aliakbarian^[16] 在 91.2~113.2 GHz 实现插入损耗为 1.8 dB 的转换。 虽然目前转换结构的研究工作被大量报道,但关 于矩形波导到共面波导转换结构的设计主要集中在 0~80 GHz 的低频段或低于 0.17 THz 的 THz 频段且带 宽较窄,无法满足 0.2 THz 以上的使用需求。鉴于此, 文中利用脊波导进行阻抗匹配及电磁场模式转换设 计了一种过渡结构。结果表明,通过三阶金属脊逐级 过渡,可以使电磁波在 240~350 GHz 全频段实现插入 损耗小于 3 dB 的转换。

1 转换结构设计

1.1 设计理论

脊波导以阻抗渐变的形式实现矩形波导到共面 波导的转换。矩形波导电磁场传输特性由波阻 抗^[10]Z_{TE}描述。

矩形波导中传输 TE₁₀模时的波阻抗可表示为:

$$Z_{TE_{10}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \tag{1}$$

式中: $\eta_0 = 377 \Omega$ 为自由空间波阻抗; λ_0 为中心频率波长;a为矩形波导宽边尺寸。

为了解决波导间的匹配及转换问题, Southworth^[17]提出电压功率定义的特征阻抗 Z_{OVP} 作为矩形波导等效特性阻抗。

$$Z_{OVP} = \frac{2b}{a} Z_{TE_{10}} \tag{2}$$

该设计矩形波导在 WR-3.4 标准矩形波导的基础 上进行重新设计,其中 $a = 711.2 \ \mu m$ 、 $b = 355.6 \ \mu m$,中 心频率 $f_0 = 295 \ \text{GHz}$, $\lambda_0 = 1.02 \ \text{mm}$, $Z_{OVP} = Z_{TE_{10}} = 539 \ \Omega_{\circ}$ 要保证与共面波导 50 Ω 的特性阻抗匹配,必须在矩形 波导与共面波导之间加入适当的阻抗变换器。

该设计采取阶梯脊形转换结构,根据切比雪夫阻抗变换器^[18]设计原理,转换结构阻抗由539~50Ω 阻抗变换比为R=0.09。最大驻波系数ρ_{max}设为1.1。 可求出坐标变换待定系数 h、p 及脊波导最小阶数 n。

$$h \le \frac{\rho_{max} - 1}{2\sqrt{\rho_{max}}} = 0.05 \equiv h_{max} \tag{3}$$

$$p = \cos\left(\frac{\pi}{1 + \lambda_{max}/\lambda_{min}}\right) = 0.29 \tag{4}$$

$$n \ge \frac{\operatorname{arcosh}\left(\frac{|1-R|}{2h_{max}\sqrt{R}}\right)}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{1}{p}\right)} = 2.2$$
(5)

故最小阶数为3,考虑到计算误差及制造工艺复杂度本设计选取阶梯脊数为3。相较于基于渐变线阻抗变换器^[10]设计的三角形过渡结构,脊波导可以避免电路谐振问题,适用于宽带电路且加工容错率更高、结构刚度更强易于保存运输。

图 1 为脊波导截面图。a、b 分别为矩形波导宽 边和窄边,阶梯脊厚度为th,脊到底壁距离为d。d 值 较小时,电磁场能量集中于脊下,等效阻抗较低,可与 共面波导匹配连接;当d 增大时,等效阻抗增加可连 接矩形波导。通过改变阶梯脊的高度及宽度可以将 矩形波导的特性阻抗变换到与共面波导匹配的 阻抗。



图 1 金属阶梯脊截面图 Fig.1 Section of metal ladder ridge

1.2 设计方案

文中设计的矩形波导到共面波导转换结构由矩 形波导和脊波导两部分组成,转换结构结合共面波导 示意图如图 2(a) 所示,转换结构细节图、几何参数图如 图 2(b)、(c) 所示。矩形波导材料为铜,其内截面尺寸 为 711.2 μm×355.6 μm。共面波导由 *h*=40 μm 石英基 底 (*c*=3.75, μ=1) 背敷接地板和表面刻蚀的信号线及 两条地线组成,其中接地板、信号线和地线材料均为 金且厚度为 *c*=0.4 μm,信号线宽为 36 μm,地线宽为 78 μm,信号线与地线间隙为 4 μm,共面波导长为 4 mm。转换结构中脊波导与矩形波导相连,由三段 金属脊构成,脊的长度为 *Li*(i=1,2,3), 距下壁高度为 *di*(i=1,2,3), 厚度为 *th*。



- 图 2 矩形波导到共面波导转换模型。(a)转换结构整体模型图; (b)转换结构金属脊细节图;(c)金属脊与共面波导结合部分几 何参数
- Fig.2 Rectangular waveguide-to-coplanar waveguide conversion model.
 (a) Conversion structure diagram of the overall model; (b) Detail diagram of metal ridge of conversion structure; (c) Partial geometric parameters of metal ridges combined with coplanar waveguides

文中使用有限积分软件 (CST) 进行模拟仿真。 THz 波以 TE 模由矩形波导一端入射经过转换结构转 换为 TEM 模后进入共面波导,在共面波导另一端加 相同的转换结构并检测传输系数以表征该结构的转 换性能。通过仿真对转换结构金属脊的各个参数进 行调整,确定最优结构。

2 转换结构性能分析

2.1 阶梯脊高度对转换结构性能影响

脊波导第一脊到波导底壁距离 d1 直接影响转换 结构的传输性能。对 d1 分别取 25、35、45、55 μm 进 行仿真分析。其余结构参数设定如下:第一脊长度 L1=145 μm,第二脊长度 L2=140 μm,第三脊长度 L3= 240 μm,第二脊距底壁高度 d2=70 μm,第三脊距底壁 高度 d3=180 μm,脊厚度 th=140 μm。

在 240~350 GHz 频率内,转换结构的仿真结果

(S₂₁参数)如图 3 所示。当 d1 超过 45 μm 后传输系数 明显下降; d1=25 μm 时,高频段传输系数下降;当 d1=35 μm 时,转换结构会获得较好传输效率和工作 带宽。已知共面波导上层金膜距波导底壁高度为 40.8 μm,故第一脊要略低于共面波导金膜。对仿真结 果进行对比后,文中选取 d1 为 35 μm。





Fig.3 The simulated transmission coefficient of the conversion structure at different first ridge height d1

通过 d2、d3 进行仿真,结果表明 d2 在 50~70 μm、 d3 在 180~260 μm 范围内可使结构获取高传输效率。 d2 小于 70 μm 时在低频段损耗较大,为实现长工作带 宽本设计选取 d2= 70 μm。d3 大于 180 μm 会减小中 频段传输损耗但在通频带两端损耗会有增加,故 d3 取 180 μm。

2.2 阶梯脊长度 L 对转换结构性能影响

在设定 *d*1 为 35 μm 并保持其他结构参数不变的 情况下,改变第一脊的长度 *L*1 的数值 (分别为 95、 145、195、245 μm)进行仿真,仿真结果如图 4 所示。

从图中可以看出随着 L1 逐渐增大,转换结构的 传输系数逐渐减小,当 L1=245 μm 时在超过 320 GHz 的高频段传输系数明显减小, L1=195 μm 和 L1=145 μm 时转换结构均可达到高传输效率,但 L1=145 μm 在全 频段传输性能更稳定可用带宽更长,文中选取 L1=145 μm 进行进一步研究。

对 L2、L3 进行仿真分析, L2 取 140 µm、L3 在 180~240 µm 范围内不影响结构的高传输效率。L2 过 小会增加高频段损耗、过大增加低频段损耗,L3 取 240 µm 在高频段损耗更小。





Fig.4 The simulated transmission coefficient of the conversion structure at different first ridge length L1

2.3 阶梯脊厚度 th 对转换结构性能影响

阶梯脊厚度 th 在整体转换效果中也起到了重要 作用,保持其余结构参数不变,取 th 分别为 60、100、 140、180 μm 进行参数扫描,对应的转换结构传输系 数如图 5 所示。



图 5 不同阶梯脊厚度 th 下转换结构模拟传输系数

Fig.5 The simulated transmission coefficient of the conversion structure at different step ridge thickness *th*

分析图 5 可以得出,随着阶梯脊厚度的增加转换 结构在低频传输效率提高,高频传输效率下降。文中 选取 *th* =140 μm 进行以获取全频段的高传输效率。

2.4 转换结构整体结构参数分析

综上,得到 THz 矩形波导到共面波导转换结构的 具体参数如表1所示,由此仿真计算得到转换结构的 S 参数如图 6 所示。

结果表明,该转换结构在240~350 GHz 的频带上传输系数高于-3 dB。图 7 为 305 GHz 时矩形波导到共







图 6 转换结构的 S 参数

Fig.6 Simulated S-parameters of the transformation structure



- 图 7 305 GHz 矩形波导到共面波导的模式转换。(a) 电场幅值图;(b) 电场矢量图;(c) 磁场矢量图
- Fig.7 Mode conversion of rectangular waveguide to coplanar waveguide at 305 GHz. (a) Electric field amplitude diagram; (b) Electric field vector diagram; (c) Magnetic field vector diagram

面波导的模式转换图,通过图 7(a)的电场幅值图可以 直观反映电磁波通过转换结构金属脊耦合到共面波 导的过程。图 7(b)、(c)为电/磁场矢量图,在矩形波导中, 可以观察到 TE 模的电磁场分布,在阶梯脊右侧,只有 忽略不计的纵向电磁场分量,表明了 TEM 模的形成。

2.5 误差分析

该转换结构应用于 THz 波段故尺寸在微米尺度, 为研究加工误差对结构转换效率的影响,文中对阶梯 脊圆倒角半径 r 及转换结构与共面波导间距 s 对传输 系数的影响进行了仿真如图 8 所示。



- 图 8 加工误差对转换结构传输系数影响。(a) 圆倒角 r; (b) 转换结构 与共面波导间距 s
- Fig.8 Effect of machining error on transmission coefficient of conversion structure. (a) Circular chamfer r; (b) Spacing between the conversion structure and the coplanar waveguide s

图 8(a) 为阶梯脊圆倒角对转换结构传输系数的 影响。结果表明圆倒角半径 r 由 0 μm 增加到 80 μm 在低频段影响很小,在 280 GHz 以上传输系数会有明 显减小。全频段内 r 小于 40 μm 可保证转换结构的 良好传输特性。图 8(b)为间距 s 对传输系数的影 响。结果表明间距小于 3 μm 不会影响转换效果。

3 结 论

文中利用脊波导进行阻抗匹配及电磁场模式转 换,结合背敷接地板的常规共面波导,设计了一种在 240~350 GHz 波段可将矩形波导 TE 模转换为共面波 导 TEM 模的转换结构。利用 CST 仿真软件对转换结 构阶梯脊高度、长度及厚度等几何参数对耦合器传 输性能的影响进行分析,最终确定了转换结构的最优 设计。此外还对加工过程中可能存在的阶梯脊圆倒 角和装配导致转换结构与共面波导产生间隙的误差 进行分析,结果表明圆倒角半径低于 40 μm、间隙在 3 μm 内对结构的影响可以忽略不计。基于此得到了 在 240~350 GHz 全波段传输系数大于-3 dB 的转换结 构。突破了以往转换结构可用带宽窄、普遍应用于 200 GHz 以下的限制。该转换结构具有结构简单、加 工容错率高的特点,结合共面波导可用于 THz 分子探 测、信息传输等领域。

参考文献:

- Wang Yuye, Chen Linyu, Xu Degang, et al. Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 1-18. (in Chinese)
- [2] Liu Xinyuan, Zeng Haomin, Tian Xin, et al. Transmission simulation and safety analysis of terahertz radiation in skin [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 999-1007. (in Chinese)
- [3] He Jingwen, Dong Tao, Zhang Yan. Development of metasurfaces for wavefront modulation interahertz waveband
 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201033. (in Chinese)
- [4] Gao Xiang, Liu Xiaoqing, Dai Zijie, et al. Integrated terahertz confocal imaging system based on THz waveguides [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S219001. (in Chinese)
- [5] Li Jing, Zhang Wen, Miao Wei, et al. Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 112-130. (in Chinese)
- [6] Xie Lijuan, Yao Yang, Ying Yibin. The application of terahertz spectroscopy to protein detection: a review [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, 49(6): 448-461.

- [7] Lian Yuxuan, Feng Wei, Ding Qingfeng, et al. 340 GHz wireless communication receiving front-ends based on AlGaN/GaN HEMT terahertz detectors [J]. *Infrared and Laser Engineerin*, 2021, 50(5): 20210202. (in Chinese)
- [8] Liu Zewen, Xuan Yun, Lei Xiaofeng, et al. Design and measurement of RF-MEMS CPW on HRS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 158-164. (in Chinese)
- [9] Meng Fanyi, Wu Qun, Fu Jiahui, et al. Transmission characteristics of a rectangular waveguide filled with anisotropic metamaterial [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9): 5476-5484. (in Chinese)
- [10] Li Gang. Researches on design and simulation technology of waveguide-to-microstrip transitions [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [11] Dong Yunfeng, Johansen T K, Zhurbenko V. Rectangular waveguide-to-coplanar waveguide transitions at U-band using eplane probe and wire bonding[C]//2016 46th European Microwave Conference, 2016: 5-8.
- [12] Dong Yunfeng, Zhurbenko V, Hanberg P J, et al. A D-band rectangular waveguide-to-coplanar waveguide transition using wire bonding probe [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(1): 63-79.
- [13] Dong Yunfeng, Zhurbenko V, Hanberg P J, et al. A D-Band Rectangular Waveguide-to-Coplanar Waveguide Transition Using Metal Ridge[C]//2019 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2019: 1050-1053.
- [14] Dong Yunfeng, Johansen T K, Zhurbenko V, et al. A rectangular waveguide-to-coplanar waveguide transition at D-band using wideband patch antenna[C]//2018 48th European Microwave Conference, 2018: 1045-1048.
- [15] Tang Wenxuan, Wang Jiangpeng, Yan Xiaotian, et al. Broadband and hzigh-efficiency excitation of spoof surface plasmon polaritons through rectangular waveguide [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8(410): 582692.
- [16] Aliakbarian H, Radiom S, Tavakol V, et al. Fully micromachined W-band rectangular waveguide to grounded coplanar waveguide transition [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(5): 533-540.
- [17] Southworth G C. Principles and applications of waveguide transmission [J]. *Bell System Technical Journal*, 1950, 29(3): 295-342.
- [18] Zhou Yue, Zhang Guofeng. Design method of chebyshev transformer [J]. *College Physics*, 2012, 31(11): 29-31. (in Chinese)