

多孔耦合型太赫兹波导定向耦合器的设计

孙玉洁^{1,2}, 段俊萍^{1,2}, 王雄师^{1,2}, 张斌珍^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 设计了一种结构紧凑、工作频带较宽、耦合平稳、高方向性的“十字形”多孔耦合的太赫兹波导定向耦合器。基于多孔耦合原理, 利用 HFSS 软件对太赫兹波导定向耦合器进行了模型仿真和结构优化。仿真结果表明: 在 325~475 GHz 带宽范围内, 该多孔耦合太赫兹波导定向耦合器耦合度达到 7.5 ± 0.8 dB, 隔离度达到 30 dB, 即方向性优于 20 dB, 各端口回波损耗小于 -20 dB。通过对该波导定向耦合器进行高温高压模拟仿真, 确定了使用负性光刻胶 SU-8 作为结构材料的可行性, 提出应用 MEMS 工艺在硅衬底上进行加工, 将牺牲层工艺应用到波导腔结构的制作中。利用光刻在直通波导和耦合波导公共宽壁上形成的“十字形”等间距排列耦合孔结构, 可以实现较宽的带宽和良好的耦合平坦度。该方法提高了耦合孔尺寸和位置的精度, 减小了反射损耗, 为太赫兹波导结构的加工提供了新思路。

关键词: 定向耦合器; 太赫兹; 波导; MEMS

中图分类号: TH706 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0125002

Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers

Sun Yujie^{1,2}, Duan Junping^{1,2}, Wang Xiongshi^{1,2}, Zhang Binzhen^{1,2}

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A "cross-shaped" multi-hole terahertz waveguide directional coupler was designed. This compact structure has a large frequency band, stable coupling value and high directivity. The terahertz waveguide directional coupler structure was simulated and optimized with professional electromagnetic simulation software high-frequency structure simulator(HFSS) based on multi-hole coupling principle. The results show that the coupling degree of the terahertz waveguide directional coupler is 7.5 ± 0.8 dB, the isolation is 30 dB, that is, the directivity is higher than 20 dB, and the return loss of each port is less than -20 dB in the range of 325 GHz to 475 GHz. Through high temperature and pressure simulation of the waveguide directional coupler, negative photoresist SU-8 is considered as a suitable material for structure fabrication. The directional coupler is fabricated by micro-electro-mechanical system(MEMS) technology, at the same time, sacrifice layer technology is applied to form the waveguide cavity structure.

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61401405, 51475438); 山西省基础研究项目(2014011021-4)

作者简介: 孙玉洁(1991-), 女, 硕士生, 主要从事 RF MEMS 器件与系统方面的研究。Email: 18434362559@163.com

导师简介: 张斌珍(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事微纳机电系统(MEMS/NEMS)和武器系统恶劣环境下的动态测试技术方面的研究。Email: zhangbinzhen@nuc.edu.cn

The uniformly-spaced coupling holes on the common wall of straight waveguide and coupling waveguide can be achieved by photolithography, therefore a wider bandwidth and a good coupling flatness of the directional coupler were obtained. This method improves the accuracy of the size and position of the coupling holes, reduces the reflection loss, and thus provides a new idea for the processing of terahertz waveguide structures.

Key words: directional coupler; terahertz; waveguide; MEMS

0 引言

太赫兹波包含了频率从 0.1~10 THz 的电磁波, 介于毫米波和红外线之间^[1], 相比其他频段的电磁波, 太赫兹波具有许多优越的性质, 如太赫兹波具有较高的空间分辨率和时间分辨率, 可以穿透大部分干燥的非金属和非极性物质^[2-3], 这使得它在测量、通信、雷达、材料分析等领域具有广阔的应用前景, 是近年来科学研究的热点领域。在太赫兹领域中, 太赫兹定向耦合器作为一种具有方向性的功率分配器^[4], 在功率放大器、矢量网络分析仪等方面都有应用, 其中波导型定向耦合器因为具有宽频带、高方向性等特点, 在大功率系统中的应用方面, 越来越受到人们的关注。

波导结构是能够低损耗引导电磁波定向传输的导行系统结构, 目前已有工作应用于 0.1~1 THz 频段的标准金属矩形波导^[5-6], 可以满足部分太赫兹低频段电路系统的需要。然而, 金属在太赫兹频段具有较大的导体损耗, 并且随着工作频率的升高, 波导的尺寸将会大大减小, 所需要的加工精度也随之提高, 因此传统的机械加工很难满足太赫兹频段器件的加工需求。

射频微机械系统 (RF MEMS, Radio Frequency Micro-Electro-Mechanical System) 技术的出现为太赫兹器件的设计和加工提供了新途径^[7]。RF MEMS 器件具有小型化、低损耗、可集成性等优异性能, 可取代部分微波器件应用到毫米波、多频段、雷达系统中, 在民用和军事领域都有着良好的应用前景。太赫兹器件结构尺寸微小, 在制作时极易引起表面不平整和结构不连续的问题, 导致器件性能恶化, 而 MEMS 工艺恰好可以解决这个问题, 可以将公共壁做到微米级, 使耦合孔的厚度效应不显著^[8], 同时也可以保证微米级别耦合孔的加工精度, 大大提高了耦合器的耦合性能。

文中设计了一款中心频率为 0.4 THz 的波导定向耦合器, 通过 HFSS 软件对耦合器的结构参数进行了仿真优化。该耦合器波导长 560 μm , 高 280 μm , 耦合孔高 30 μm , 在中心频率为 0.4 THz 处耦合度达到 8.2 dB, 方向性达到 30 dB, 工作带宽 150 GHz, 各端口回波损耗小于 -20 dB, 隔离度达到 30 dB, 插入损耗小于 1 dB, 驻波比小于 1.035。提出采用 MEMS 工艺来加工波导定向耦合器, 采用 SU-8 负性光刻胶作为结构材料, 通过仿真软件模拟器件在高温高压下的变形和应力, 验证了工艺的可行性。该器件具有加工精度高、结构紧凑、定向性好、工作带宽大、低损耗等优点, 为具有波导结构的太赫兹器件加工提出了新的方法。

1 多孔耦合原理

如图 1 所示, 定向耦合器主要由输入端口 1、直通端口 2、耦合端口 3 和隔离端口 4 组成的, 4 个端口的信号功率分别为 $P_1 \sim P_4$ 。在理想情况下, 从输入端输入的信号一分为二传输到端口 2 和端口 3 输

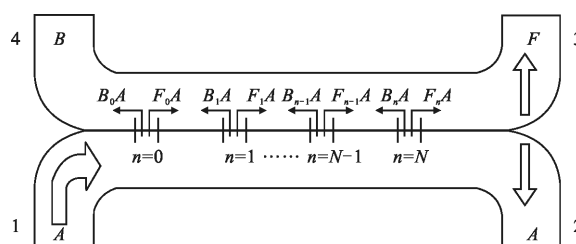


图 1 多孔耦合示意图

Fig.1 Schematic of multi-hole coupling

出, 不能进入端口 4; 一般情况下, 输出端口输出的信号和输入端口输入的信号相比是有衰减的^[9], 隔离端口有小部分信号输出。单孔耦合的频带较窄, 通过增加耦合孔数目, 利用小孔之间的衍射效应, 可以有效增大带宽。在直通波导和耦合波导的公共壁上

开 n 个等间距的小孔, 在主波导中输入波的振幅设为 A , 假设小孔耦合很弱, 则主波导输出的直通波的振幅几乎是相同的。所以可以近似的假定每个小孔处的输入场的振幅是相等的, 但每个小孔场的相位是不同的。

输入信号经过每个小孔都会激励起一个前向波和反向波, 由于耦合孔等间距排列, 因此前向波分量的传输通道长度是一样的。根据相位叠加理论^[10], 可以推出正向波振幅和反向波振幅分别为:

$$F = Ae^{-j\beta Nd} \sum_{n=0}^N F_n \quad (1)$$

$$B = A \sum_{n=0}^N B_n e^{-j\beta nd} \quad (2)$$

式中: d 为相邻两个小孔间的距离, 相位参考点选取在第一个小孔 $n=0$ 处, 那么 n 个分量的传输长度即为 $2n\beta d$ 。

S 参数用来表征定向耦合器的性能, 其表达式为:

$$S_{mm} = 10 \lg(P_m/P_n)$$

式中: $S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}$ 和 S_{34} 分别代表回波损耗, 插入损耗, 耦合度, 隔离度和方向性。

2 0.4 THz 波导定向耦合器设计仿真

基于多孔耦合原理, 设计了一款多孔耦合波导型定向耦合器, 如图 2 所示。中心频率设置为 0.4 THz, 则综合考虑 WR-2 标准矩形波导口尺寸^[11]和安捷伦网络分析仪测试连接的限制, 将波导口尺寸最后设计为 $0.56 \text{ mm} \times 0.28 \text{ mm}$ 。

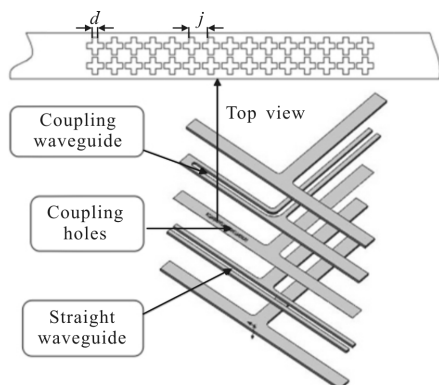


图 2 波导定向耦合器三维模型

Fig.2 3D model of waveguide directional coupler

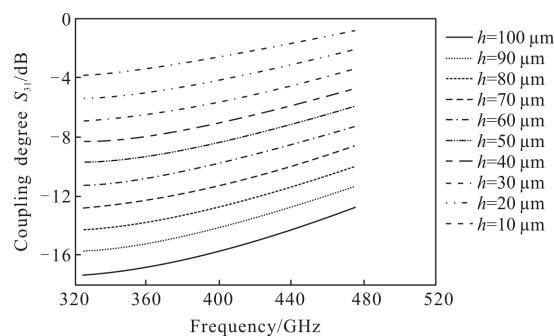
根据上述理论进行建模, 当采用多孔排列, 且耦合孔的尺寸大于孔间距时, 可以通过改变耦合孔形状增加耦合强度。文中采用“十字形”耦合孔, 通过调整耦合孔的大小和间距, 达到了设计要求, 具体参数如表 1 所示。

表 1 多孔耦合器尺寸参数

Tab.1 Size parameter of the multi-hole coupler

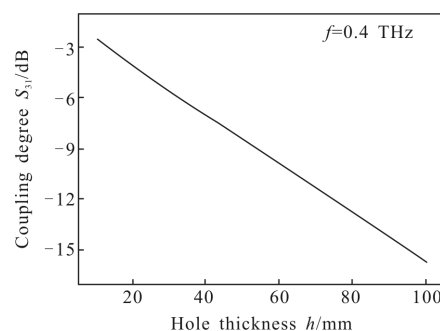
Waveguide length/ μm	Waveguide height/ μm	Coupling hole spacing $j/\mu\text{m}$	Coupling hole size $d/\mu\text{m}$
560	280	252	57

耦合孔对耦合度的影响远大于波导腔的影响, 因此通过 HFSS 仿真, 设置耦合孔厚度从 $10 \mu\text{m}$ 增加到 $100 \mu\text{m}$, 观察耦合度的变化。如图 3 所示, 随



(a) 耦合孔厚度 h 与耦合度 S_{31} 的关系

(a) Relationship between coupling hole thickness h and S_{31}



(b) 中心频率 0.4 THz, 耦合度 S_{31} 与耦合孔厚度 h 的关系

(b) Relationship between S_{31} and hole thickness h at 0.4 THz

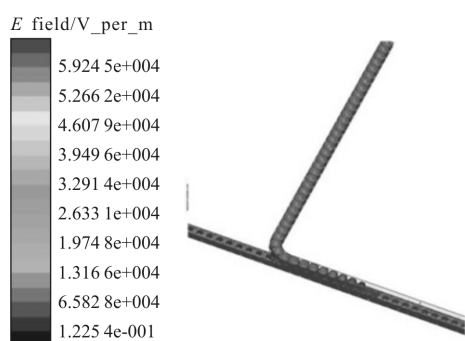
图 3 耦合孔厚度对耦合度的影响

Fig.3 Influence of coupling hole thickness h on coupling degree S_{31}

着耦合孔厚度增加, S_{31} 线性减小, 在中心频率为 0.4 THz 时, 厚度增大 $10 \mu\text{m}$, 耦合度会减小 2 dB。同时耦合孔需要必要的厚度来保证机械性能的稳定

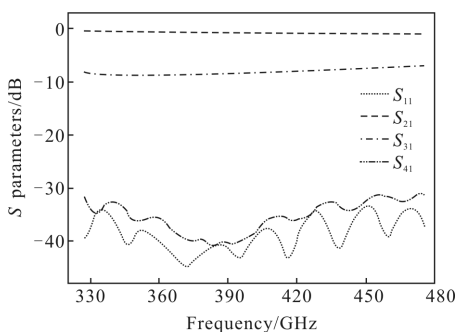
性,所以综合考虑结构强度和器件的耦合性能,耦合孔厚度最终定为 30 μm 。

图 4 中从耦合器的电场分布可以看出,输入信号大部分通过直通波导输出,另外一小部分通过耦合孔耦合到耦合波导,耦合出来的信号电场较小通过耦合端口进行输出,可以用测试仪器直接进行测量。仿真结果表明,该波导定向耦合器在 325~475 GHz 内直通耦合端插入损耗 S_{21} 接近于 0 dB,耦合度 S_{31} 变化幅度较小,波动幅度为 ± 0.8 dB,隔离度 S_{41} 优于 30 dB,端口 1 回波损耗 S_{11} 优于 30 dB。



(a) 耦合器电场分布

(a) Distribution of coupler electric field



(b) 波导定向耦合器 S 参数传输特性

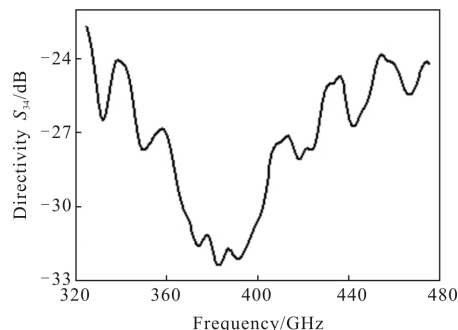
(b) S parameters of the waveguide directional coupler

图 4 定向耦合器电场分布以及 S 参数仿真特性

Fig.4 Electric field distribution and simulation S parameters of directional coupler

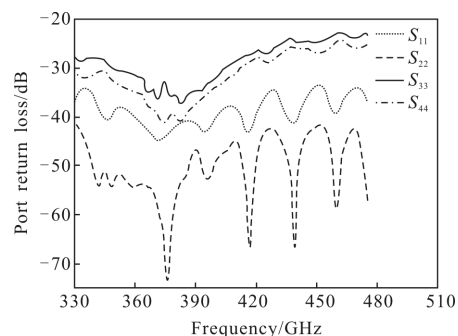
方向性 Directivity 为耦合端和隔离端输出功率之比的分贝数,其表达式为 $S_{34}=10\lg(P_3/P_4)$, S_{34} 越大,反向传输功率越小,耦合器方向性就越好。波导定向耦合器要实现最佳耦合平坦度,相应的方向性和工作带宽就会下降;要实现最佳方向性,就会牺牲耦合平坦度和工作带宽。综合考虑耦合器的工作带宽、耦合度、方向性和插入损耗等因素,通过增加耦合孔的

数目,采用耦合孔等间距分布来增加工作带宽和保证方向性,由图 5 可以看出:该定向耦合器在 325~475 GHz 内方向性始终优于 20 dB。



(a) 波导定向耦合器方向性 S_{34}

(a) S_{34} directivity of waveguide directional coupler



(b) 波导定向耦合器各端口回波损耗

(b) Return loss in each port of waveguide directional coupler

图 5 定向耦合器的特性指标仿真结果

Fig.5 Simulation results of directional coupler characteristic parameters

通过 HFSS 优化分析,最终确定了波导定向耦合器的波导尺寸以及十字耦合孔的大小位置。从仿真结果可以看出,该耦合器应用在太赫兹频段具有良好的耦合平坦度,方向性好,工作带宽大的优势。

3 波导定向耦合器制作工艺选取

由于波导定向耦合器的尺寸均在微米级,特别是耦合孔的尺寸 d 为 57 μm ,采用传统的机械加工,很难满足小尺寸结构的加工精度要求。采用紫外光刻技术发展出的 UV-LIGA 工艺^[22],在成本相对低廉的同时,加工精度可以达到 1 μm 量级,加工的器件尺度在 0.01~10 mm,因此采用 MEMS 工艺来制造该波导定向耦合器。实验选取环氧树脂型负性感光胶 SU-8 作为结构材料,分析该定向耦合器在高

温高压下的变形与应力情况。固化后 SU-8 胶在室温的杨氏模量为 2.1 Gpa,泊松比为 0.252 2,热膨胀系数为 52/k。

3.1 波导定向耦合器的高压性能分析

微波器件在高频段使用时,器件尺寸的改变对信号传输性能影响很大^[13],使用仿真软件进行了整体结构的仿真,分别将施加在上盖的压强设置为 0.1、1、10 MPa,得到的盖片的形变截面图如图 6 所示(由于其他方向变形量较小,因此只看总变形情况)。

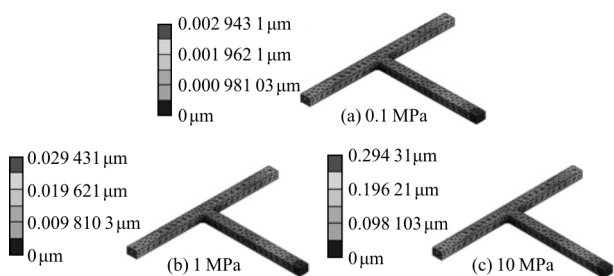


图 6 波导耦合器上盖受压变形分析

Fig.6 Analysis of compression deformation of the upper cover of waveguide coupler

由图可见,当施加压强分别为 0.1、1、10 MPa 时,器件的最大变形产生在耦合端口处,产生的最大形变位移量分别为 2.94、29.4、294.3 nm,由于耦合器的波导高度为 280 μm,施加在盖片上面的力引起的变形线性增加,属于弹性范围内,不会影响器件的高频性能。

由于测试的时候,需要将测试波导口和器件的波导口连接,会对器件的端口施加压力,因此采用仿真软件模拟端口压强分别为 0.1、1、10 MPa 时,器件的变形情况。

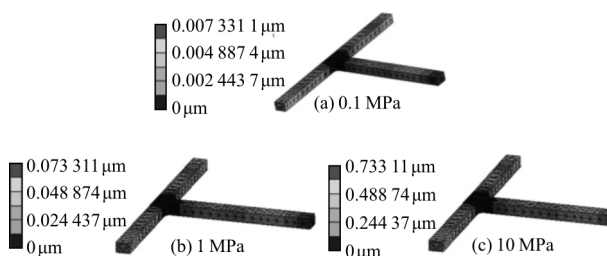


图 7 波导耦合器端口受压变形分析

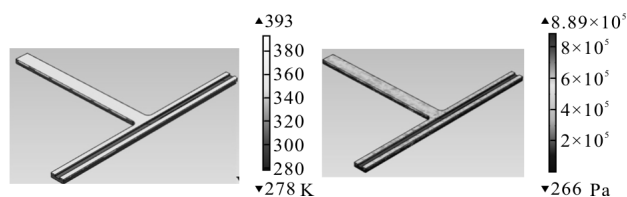
Fig.7 Analysis of compression deformation of each ports of waveguide coupler

通过图7可以看出:当施加压强分别为 0.1、1、10 MPa 时,器件的最大变形仍然产生在耦合端口处,

产生的最大形变位移量分别为 7.33、73.3、733.1 nm,仍然是线性增加,在弹性形变内,因此该波导定向耦合器可以在高压环境下使用。

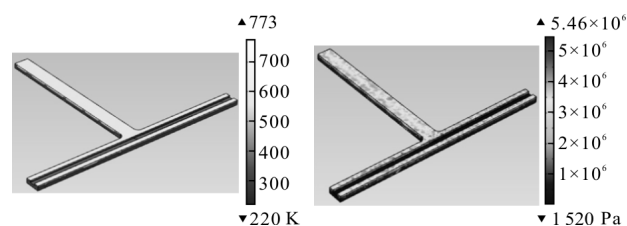
3.2 波导定向耦合器的高温性能分析

文中设计的波导定向耦合器是用 SU-8 胶叠层烘烤制作出来的,由于 SU-8 交联状态下玻璃化转化温度为 494.8 K,因此高温会对器件产生应力,从而导致器件变形,影响传输性能。文中使用仿真软件模拟该结构在温度 100 和 500 °C 时产生的应力情况,如图 8 所示。



(a) 温度为 100 °C

(a) Temperature is 100 °C



(b) 温度为 500 °C

(b) Temperature is 500 °C

图 8 不同温度下波导定向耦合器的温度和应力分布

Fig.8 Different temperatures and stresses distribution of the waveguide directional coupler

温度为 100 °C 时模型如图 8(a) 所示,单方向传热,产生最大应力达到 8.9×10^5 Pa;当温度升高到 500 °C 时,应力急剧增加到 5.5×10^6 Pa。此时器件变形严重,已经严重影响传输性能,并且应力明显的集中在器件边角和最窄只有 81 μm 的耦合孔间隙上,这就要求在工艺中使用较低的温度,同时避免受热不均。升高温度在 100 °C 以内器件尺寸有较小的变化,基本在纳米级别,不会影响器件的传输性能,而 SU-8 胶的烘烤温度最高为 95 °C,因此满足器件的要求。

4 波导定向耦合器的工艺设计

文中提出采用 MEMS 工艺和牺牲层技术相结合的方法对波导定向耦合器进行加工,使用

AZ50XT 作为牺牲层材料填充高度 280 μm 的波导腔。耦合器加工按照 SU-8 工艺的一般流程,具体工艺流程如下:(1) 基片预处理,将硅片分别用丙酮、酒精、去离子水超声波清洗,然后烘干;(2) SU-8 匀胶、光刻、显影形成波导定向耦合器的直通波导腔;(3) 在预留的波导腔内填充正胶 AZ50XT,光刻、显影去除波导腔以外残留的 AZ50XT;(4) 对 SU-8 进行匀胶、光刻,形成耦合孔结构;(5) 对 SU-8 进行匀胶、光刻、显影操作,制作耦合波导腔;(6) 利用 AZ50XT 易溶于丙酮的特性,去除下层光刻胶牺牲层,释放悬空结构;(7) 用 40% 的 KOH 溶液对波导定向耦合器进行器件剥离;(8) 对剥离下来的器件进行正反两侧溅射,使其金属化;(9) 将溅射过金属的上、下盖与上一步金属化的器件进行封装。

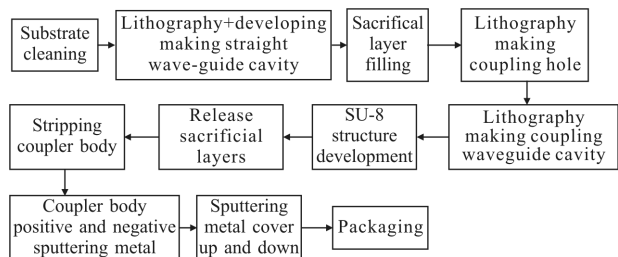


图 9 波导定向耦合器工艺流程图

Fig.9 Processing technology of waveguide directional coupler

溅射金属化具有均匀,致密,厚度可控的优点。太赫兹波导定向耦合器设计工作频率为 0.4 THz,趋肤效应显著,趋肤深度公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

式中: f 为电磁波的频率; μ 和 σ 分别为材料的磁导率和电导率。在 0.32~0.48 THz 内四种常见金属的趋肤深度如图 10 所示,由于耦合器波导内壁厚度需大于 100 nm,且金属 Cu 容易氧化,最终选择溅射金属金。

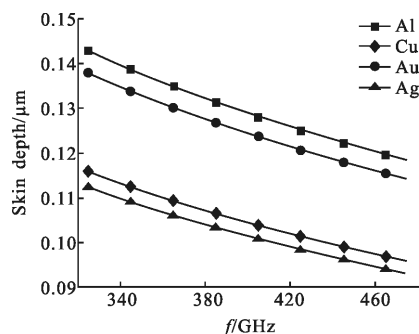


图 10 常见金属趋肤深度

Fig.10 Skin depths of some metal materials

5 结论

文中通过对多孔耦合原理进行分析,设计了一种用于太赫兹频段的“十字形”多孔耦合的波导定向耦合器。利用 HFSS 仿真软件对波导定向耦合器的结构参数进行了优化,分析了耦合孔的厚度对耦合度 S_{31} 参数的影响,仿真发现:中心频率处耦合孔的厚度与耦合度成线性关系。该波导定向耦合器工作带宽为 325~475 GHz,隔离度优于 30 dB,回波损耗小于 -20 dB,驻波比小于 1.035,在 0.4 THz 处耦合度达到 8.2 dB,方向性优于 30 dB,符合高强度耦合、定向性好的特征。通过设置 SU-8 胶的力学参数对该波导定向耦合器进行高温高压模拟仿真,结构变形量均在弹性范围内,提出采用 RF MEMS 工艺来加工,减小了耦合孔尺寸和位置的加工误差,保证了信号传输的方向性,提高了主波导和耦合波导以及弯波导连接部分的平整性,减小了反射损耗,通过溅射金属金来降低趋肤效应对信号传输的影响,为太赫兹波导结构的加工提供了新思路。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Wang Q, Ding J. A cross-guide waveguide directional coupler with high directivity and broad bandwidth [J]. *MWCL, IEEE*, 2013, 23(11): 581-583.
- [2] He Xiaoyang, Zhang Qixia, Yang Chun, et al. Design of terahertz photonic crystal fiber and antenna [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 534-538. (in Chinese)
何晓阳, 张屹遐, 杨春, 等. 太赫兹光子晶体光纤与天线设计(英文)[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 534-538.
- [3] Zhang Jianfa, Yuan Xiaodong, Qin Shiqiao. Tunable terahertz and optical metamaterials [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 349-364. (in Chinese)
张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 349-364.
- [4] Li Hao, Chen Anding, Hong Wei, et al. Investigations on directional couplers based on substrate integrated waveguide [J]. *Journal of Microwave*, 2004, 20(4): 5456. (in Chinese)
李皓, 陈安定, 洪伟, 等. 基片集成波导定向耦合器的仿真与实验研究 [J]. 微波学报, 2004, 20(4): 54356.
- [5] Guan Xiaowei, Wu Hao, Dai Daoxin. Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics -waveguide and integration devices [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 181-195. (in Chinese)

- 管小伟, 吴昊, 戴道铤. 硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 181-195.
- [6] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 51-56.
- [7] Chen Deyong, Cao Mingwei, Wang Junbo, et al. Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1235-1242. (in Chinese)
陈德勇, 曹明威, 王军波, 等. 谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1235-1242.
- [8] Wang X, Zhao P, Yang T. A THz cross-guide waveguide directional coupler with high directivity [C]//2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2014.
- [9] Cao Naisheng. Research and design of hole coupling directional coupler for high power microwave measurement [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008. (in Chinese)
曹乃胜. 用于高功率微波测量的孔耦合定向耦合器研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [10] Marconnet A M, He M M, Sengele S, et al. Microfabricated silicon high-frequency waveguide couplers and antennas [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2009, 56(5): 721-729.
- [11] Kang Xiaoke, Chen Peng, Deng Xianjin, et al. Design method about 0.14 THz power divider based on 3 dB directional coupler [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
康小克, 陈鹏, 邓贤进, 等. 基于 3dB 定向耦合器的 0.14THz 功率分配器设计方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 51-56.