

文章编号: 1005-5630(2020)05-0001-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.05.001

太赫兹介质波导与金属波导模式转换的设计

梁昌沛

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为实现太赫兹介质波导与金属波导之间模式的转换, 设计了一种低损耗、高耦合效率的锥形波导耦合器。通过有限时域差分法(FDTD)对该结构的传输效率进行了仿真优化。仿真结果表明: 锥形波导耦合器在 170~220 GHz 频段, 其基模的传输损耗极低; 在 190~200 GHz 频段, 其 TM 基模的传输损耗接近无。该功能器件可以用于集成太赫兹芯片的耦合。

关键词: 太赫兹; 介质波导; 金属波导; 耦合
中图分类号: TN 814+.5 **文献标志码:** A

Design of mode conversion between terahertz dielectric waveguide and metal waveguide

LIANG Changpei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To realize the mode conversion between the terahertz (THz) dielectric waveguide and the metal waveguide, we design a low-loss, high coupling efficiency tapered waveguide coupler. We have simulated and optimized the transmission efficiency of this structure by the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the transmission loss of the fundamental mode is extremely low when the frequency is 170-220 GHz, and TM fundamental mode near lossless transmission at 190-200 GHz. This functional device can be used for coupling of integrated THz chips.

Keywords: terahertz; dielectric waveguide; metal waveguide; coupler

引 言

太赫兹波是频率在 0.1 ~ 10 THz 之间的电磁波, 介于微波与红外之间^[1-3]。目前太赫兹波已广泛应用于安检、高速通信、分子光谱等领域^[4-5], 然而, 由于太赫兹波长较长, 使得现有的太赫兹光学元件体积较大, 不易集成。因此, 迫切地需

要研发低损耗、高性能的太赫兹集成器件, 而小色散的低损耗介质波导是集成器件的关键^[6-8]。

为实现太赫兹波源从金属矩形波导到介质波导之间的传输, 大多数的太赫兹介质波导通常需要连接到太赫兹矩形金属波导或者太赫兹天线。因此, 需要一种低损耗、高耦合效率的介质波导耦合器来实现介质波导模式到金属矩形波导模式的转换。常见的耦合器主要是通过锥形结构和光

收稿日期: 2020-04-28

作者简介: 梁昌沛 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为集成光电子器件。E-mail: 1797098149@qq.com

栅结构来实现高效的耦合和模式的转换：陈佳敏等^[9]对锥形结构的光学耦合特性进行了研究；Wilson等^[10]设计了一种锥形波导光学定向耦合器；Luo等^[11]提出并演示了一种基于绝缘硅平台的模分复用系统双模耦合器；Sahu^[12]为了减小耦合长度，提出了一种基于一般干涉的锥形波导结构的多模干涉耦合器；Liu等^[13]设计了一种基于全蚀光子晶体结构的高效率大带宽绝缘硅光栅耦合器；Yang等^[14]提出了一种基于非对称亚光栅结构和垂直耦合的高性能、紧凑型的二元闪耀光栅耦合器；Saha等^[15]设计了一种基于转移硅纳米薄膜的高效衍射光栅耦合器；杨彪等^[16]对硅基光栅耦合器的研究进展进行了详细的介绍；Xu等^[17]提出了一种使用部分刻蚀亚波长光栅耦合器的超密集高效硅基偏振分频器；Cheng等^[18]提出了一种锥形混合等离子体波导的宽带高消光比模转换器；Sun等^[19]提出了一种用于激光器与倒锥形波导对接耦合的耦合器。这些光栅结构虽然增加了片上测试的容易度，但是使得制作工艺更加复杂，而锥形耦合结构可以较好地解决这一问题，同时能达到很高的耦合效率。金属矩形波导需要连接太赫兹集成电路，接受或者发射太赫兹波，目前大部分的太赫兹器件设计是基于100~700 GHz的波源^[20-23]。对于集成金属波导，研究人员已制备出了微加工的矩形金属波导^[24]，测试结果表明，在100 GHz时其衰减常数为0.04 dB/λ。Chow等^[25]使用su-8光刻胶制作了矩形金属波导，其工作频率为110~170 GHz、140~220 GHz和220~325 GHz时，相应的衰减

常数分别为0.5~0.8 dB/λ、0.6~1 dB/λ和1.1~1.6 dB/λ，该结构的制备非常复杂，同时需要高精度的尺寸要求。

本文设计一种太赫兹锥形波导耦合器，通过激励出金属矩形波导的模式，实现介质波导基模模场与金属矩形波导基模模场之间的转换，达到能量高效的传输，由于此锥形介质波导与硅微制造技术兼容，便于加工，无需高精度尺寸要求。

1 结构设计

锥形波导耦合器的材料为高阻硅，硅介质在太赫兹波段具有色散低、折射率大(为3.42)、波导特性好等优点。锥形波导耦合器包含两个部分，前面的部分为脊形波导，长度为 L_1 ，后面部分为锥形波导，长度为 L_2 。其结构如图1所示。当锥形波导耦合器插入到太赫兹矩形金属波导后，脊形波导与矩形金属波导之间存有间距 S 。当太赫兹波从脊形波导传输进入锥形波导中时，锥形波导的长度是影响模式良好过渡的重要参量，同时能量从锥形波导耦合到矩形金属中时，它们之间的间距 S 也会影响能量的传输。

脊形波导横截面如图2所示，该脊形波导的脊宽为 W ，脊高为 H ，衬底高度为 h ，折射率 n_2 为3.42，覆盖层(为空气)折射率 n_1 、 n_3 均为1。Soref等^[26]在1991年提出了SOI脊形波导是否为单模传输的判断式，即

$$t \leq \alpha + \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}, 0.5 \leq x < 1 \quad (1)$$

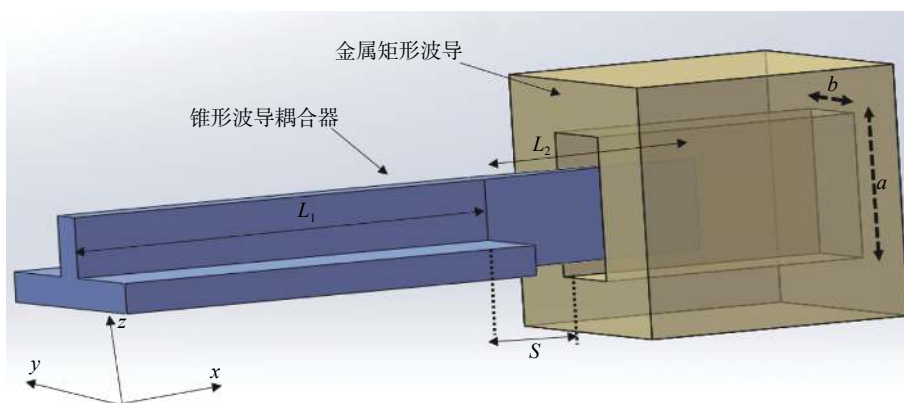


图 1 耦合器结构

Fig. 1 Coupler structure

式中 $t=W/(H+h)$ 。Soref 等利用光束传播法 (BPM) 计算得到 $\alpha = 0.3$ ，并采用差分法 (FDM) 进行模式分析。本文使用仿真软件 FDTD 模拟计算脊形波导和矩形金属波导的基模分布。设置模拟的中心频点为 190 GHz，脊形波导的参数为： $W=0.5\text{ mm}$ ， $H=0.34\text{ mm}$ ， $h=0.13\text{ mm}$ 。图 3 为脊形波导基模模场和矩形金属波导模场的分布图。

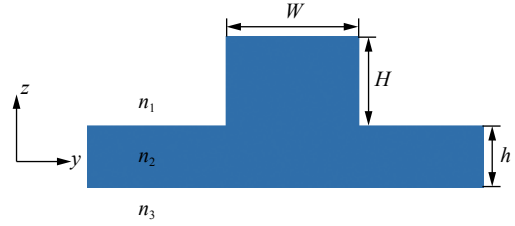
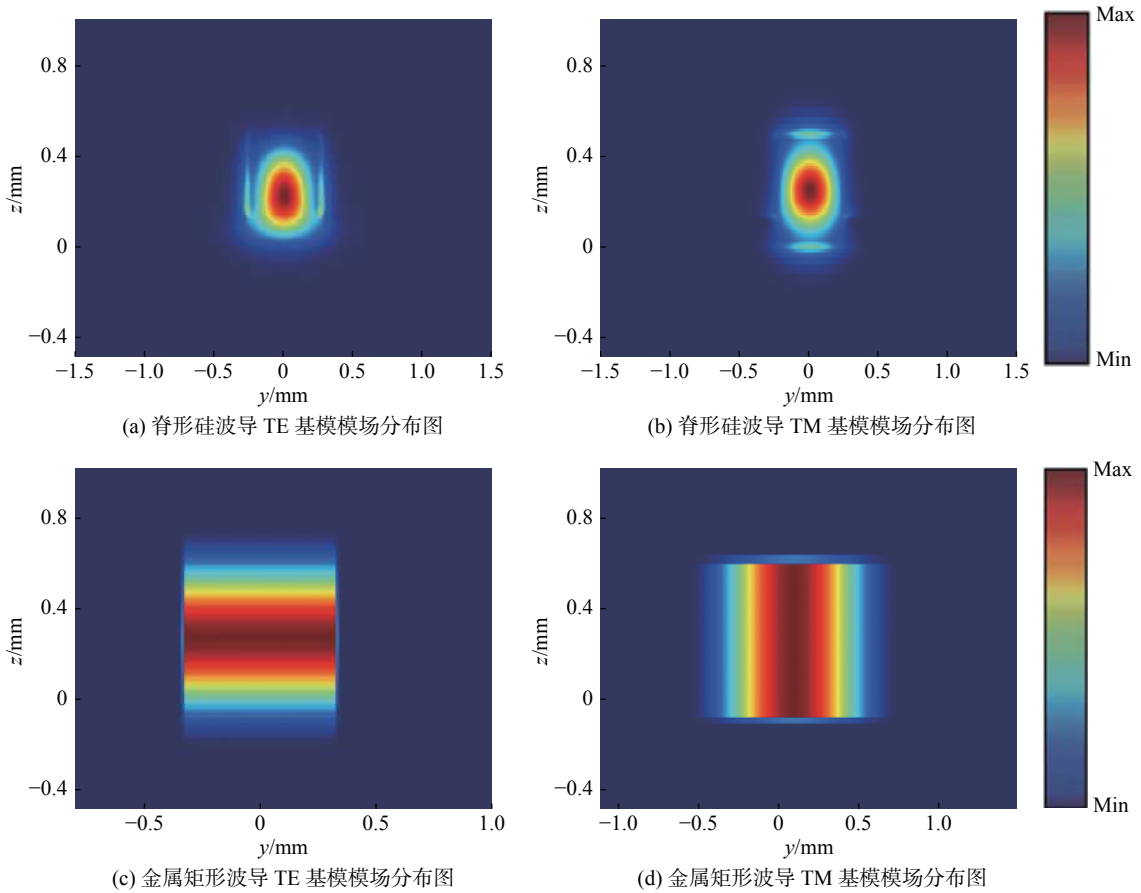


图 2 脊形波导横截面示意图

Fig. 2 Cross section of ridge waveguide



(a) 脊形硅波导 TE 基模模场分布图

(b) 脊形硅波导 TM 基模模场分布图

(c) 金属矩形波导 TE 基模模场分布图

(d) 金属矩形波导 TM 基模模场分布图

图 3 基模模场分布图

Fig. 3 Distribution of fundamental mode field

对于连接介质波导和金属矩形波导的锥形波导结构，在 1977 年米尔顿和伯恩斯提出了锥形介质光波导耦合角度的设计，并提出了一个简单的几何设计规则来保证光在绝热波导中的稳定扩散^[27]。使用这一规则设计锥形波导时，为保证最低阶光学模传输受到波导侧壁约束，应满足的方程式为

$$\theta < \frac{\lambda_0}{2Wn_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中： θ 为锥度的局部半角； λ_0 为真空中的波

长； n_{eff} 为该模式的有效折射率； W 为该锥形波导的宽度。根据此式可以初步确定锥形波导的参数。

2 数值仿真和参数优化

本文使用 FDTD 仿真模拟软件分析锥形波导耦合器传输损耗。当入射光模式为 TE 基模时，会得到一组传输数据；当入射光模式为 TM 基模时，太赫兹金属矩形波导应旋转 90° 来

匹配入射光的模式。保证其他参数不变，仿真频点设置为 190 GHz，优化矩形金属波导与硅基脊形波导之间的间距 S 。如图 4 所示，三角形点表示的是 TM 基模传输损耗，在间距 $S=2.5$ mm 时获得最好的耦合效果，传输损耗为 -0.087 dB；星形点表示的是 TE 基模传输损耗，在间距 $S=3.0$ mm 时获得最好的耦合效果，传输损耗为 -0.346 dB。

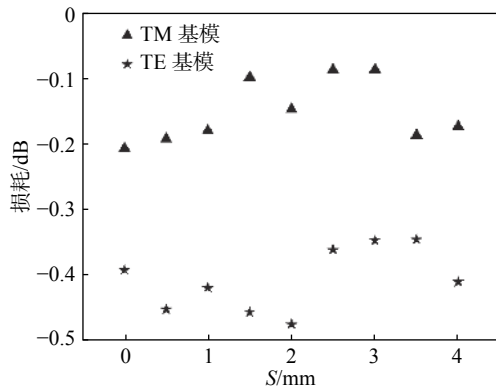


图 4 不同间距 S 的耦合传输图

Fig. 4 Coupling transmission diagram of different spacing S

保持其他参数不变，对锥形波导的长度进行进一步优化。如图 5 所示：TM 模式传输时，锥形波导长度 $L_2=8$ mm 时获得最好的传输效果，传输损耗为 -0.042 dB；TE 模式传输时，锥形波导长度 $L_2=10$ mm 时获得最好的传输效果，传输损耗为 -0.346 dB。

当光以 TE 基模模式传输时，取 $S=2.5$ mm、 $L_2=8$ mm，当光以 TM 基模传输时，取 $S=3.0$ mm、 $L_2=10$ mm，由此可以使波导达到最好的传输效果。保持其他参数不变，对脊形波导的衬底 h 进行优化，可得到脊形波导的总厚度为 0.47 mm。如图 6 所示，无论是 TE 还是 TM 模式，随着衬底 h 的增加损耗也都在增加，在 $h=0.11$ mm 时，TM 和 TE 的传输效果最好，传输损耗分别为 -0.029 dB 和 -0.280 dB。

由此得到锥形波导耦合器的最优结构参数为：TE 基模模式时， $S=2.5$ mm， $L_2=8$ mm， $h=0.11$ mm；TM 基模模式时， $S=3.0$ mm， $L_2=10$ mm， $h=0.11$ mm。其他参数保持初始值，可得到 TE 基模和 TM 基模在 190 GHz 处的电场传

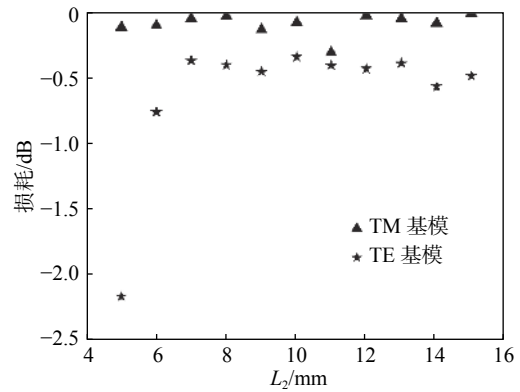


图 5 不同锥形波导长度 L_2 的耦合传输图

Fig. 5 Coupled transmission diagram of different tapered waveguide length L_2

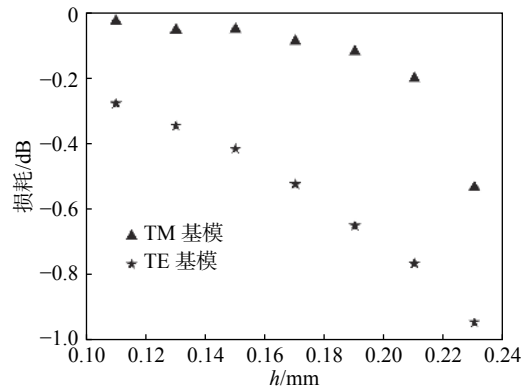


图 6 不同衬底厚度 h 的耦合传输图

Fig. 6 Coupled transfer diagram of different substrate thickness h

输能量图，如图 7 所示。图 8 为锥形波导耦合器的传输图，由图可见：TM 基模传输损耗基本都小于 -0.240 dB，在 190~200 GHz 之间基本可以实现从脊形硅波导基模模式到金属矩形波导基模模式的无损转换；TE 基模的传输损耗基本都小于 -0.950 dB，虽然没有 TM 基模模式的转换效果好，但是传输损耗很低。

3 结 论

本文通过有限时域差分法仿真软件对锥形波导耦合器进行了模拟优化，实现了太赫兹介质波导与金属波导模式的转换。该耦合器对太赫兹波基

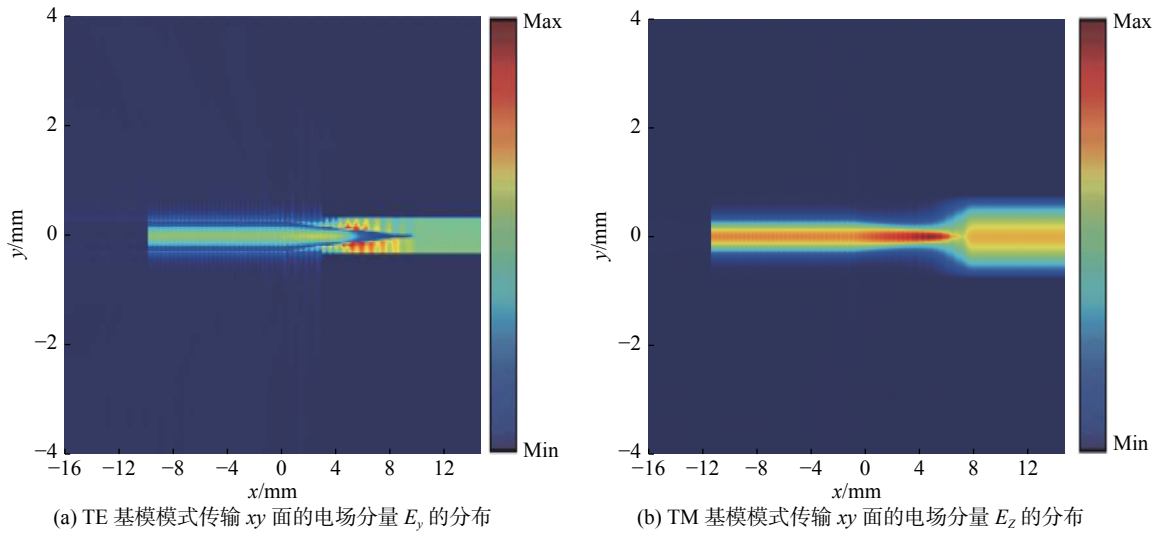


图 7 仿真的电场传输分布图

Fig. 7 Simulated electric field transmission distribution

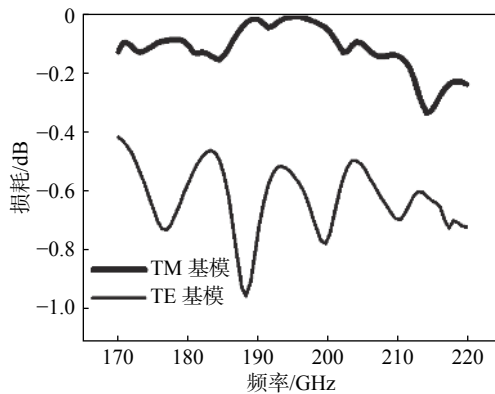


Fig. 8 Broadband transmission of tapered coupler

模的传输损耗很低，在 170~220 GHz 其 TM 基模的传输损耗低于 -0.240 dB，而在 190~200 GHz 其 TE 基模传输损耗低于 -0.950 dB，几乎没有损耗。此锥形波导结构可用于太赫兹通讯系统中，用来实现信号源到芯片之间的传输。

参考文献：

- [1] LIU H B, ZHONG H, KARPOWICZ N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1514 – 1527.
- [2] HANGYO M. Development and future prospects of terahertz technology[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(12): 120101.
- [3] HARTMANN R R, KONO J, PORTNOI M E. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(32): 322001.
- [4] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(11): 111101.
- [5] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. *Chemical Physics Letters*, 2000, 320(1/2): 42 – 48.
- [6] 黄婉文, 李宝军. 太赫兹波导器件研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(7): 9 – 15.
- [7] XIE J Y, ZHU X, ZANG X F, et al. Terahertz integrated device: high-Q silicon dielectric resonators[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(1): 50 – 58.
- [8] DIWA G, QUEMA A, ESTACIO E, et al. Photonic-crystal-fiber pigtail device integrated with lens-duct optics for terahertz radiation coupling[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15): 151114.1 – 151114.3.
- [9] 陈佳敏, 邓传鲁, 王廷云, 等. 锥形光波导耦合特性研究 [J]. *半导体光电*, 2018, 39(2): 225 – 228, 233.
- [10] WILSON M G F, TEH G A. Tapered optical directional coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1975, 23(1): 85 – 92.
- [11] LUO Y C, YU Y, YE M Y, et al. Integrated dual-mode

- 3 dB power coupler based on tapered directional coupler[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23516.
- [12] SAHU P P. Compact multimode interference coupler with tapered waveguide geometry[J]. *Optics Communications*, 2007, 277(2): 295 – 301.
- [13] LIU L, PU M H, YVIND K, et al. High-efficiency, large-bandwidth silicon-on-insulator grating coupler based on a fully-etched photonic crystal structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 051126.
- [14] YANG J B, ZHOU Z P, JIA H H, et al. High-performance and compact binary blazed grating coupler based on an asymmetric subgrating structure and vertical coupling[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2614 – 2617.
- [15] SAHA T K, ZHOU W D. High efficiency diffractive grating coupler based on transferred silicon nanomembrane overlay on photonic waveguide[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(8): 085115.
- [16] 杨彪, 李智勇, 肖希, 等. 硅基光栅耦合器的研究进展 [J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184214.
- [17] XU Y, XIAO J B. Ultracompact and high efficient silicon-based polarization splitter-rotator using a partially-etched subwavelength grating coupler[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27949.
- [18] CHENG Z, WANG J, YANG Z Y, et al. Broadband and high extinction ratio mode converter using the tapered hybrid plasmonic waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 4900608.
- [19] SUN B G, CAI C Z, NI H J, et al. Coupler for butt-coupling between edge-emitting lasers and inverted Si taper waveguide[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, 33(9): 1950074.
- [20] LI S, TONG C J, LU X C, et al. Design of slow-wave structure in 220GHz high-power millimeter wave source[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Shenzhen: IEEE, 2012: 1–4.
- [21] TANG Y, MA S Y, PAN P, et al. Progress in development of a 346GHz BWO[C]//Proceedings of 2016 IEEE 9th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies. Qingdao: IEEE, 2016: 254–256.
- [22] LI X Y, YU J J, WANG K H, et al. 120Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375GHz-500GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California United States: OSA, 2018: M4J.4.
- [23] TANG Y N, SHI L, XIE W Q, et al. Research on the 650GHz folded waveguide BWO[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 644-650: 4099 – 4102.
- [24] YAP M, TAI Y C, MCGRATH W R, et al. Silicon micromachined waveguides for millimeter and submillimeter wavelengths[C]//Proceedings of Third International Symposium on Space Terahertz Technology: Symposium. Ann Arbor: NASA, 1992: 316–323.
- [25] CHOW W H, CHAMPION A, STEENSON D P. Measurements to 320 GHz of millimetre-wave waveguide components made by high precision and economic micro-machining techniques[C]//Proceedings of 2003 High Frequency Postgraduate Student Colloquium. Belfast, Ireland: IEEE, 2003: 90–93.
- [26] SOREF R A, SCHMIDTCHEN J, PETERMANN K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(8): 1971 – 1974.
- [27] FU Y F, YE T, TANG W J, et al. Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper[J]. *Photonics Research*, 2014, 2(3): A41 – A44.

(编辑: 刘铁英)