光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032101

耦合度可切换的太赫兹分支波导定向耦合器

潘 武，秋 森*，张 振*，叶 宽，黄 磊，黎人溥
（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘 要： 提出了一种耦合度可切换的太赫兹分支波导定向耦合器，该耦合器的耦合度可在3和10 dB之间进行切换。通过控制前四条分支表面二氧化钒薄膜的电导率，实现耦合度的切换。仿真结果表明，在180～250 GHz的频率范围内，当二氧化钒电导率为2×10^5 S/m时，耦合度为(3±0.6) dB，隔离度与回波损耗大于17 dB；当二氧化钒电导率为10 S/m时，耦合度为(10±0.7) dB，隔离度大于18 dB，回波损耗大于20 dB。耦合器在两种耦合状态下均表现出优异的性能，符合设计预期。

关键词： 太赫兹；太赫兹耦合器；耦合度可切换
中图分类号： TN622 **文章编号：** 1001－5868(2024)05－0738－06

Terahertz Branching Waveguide Directional Coupler with Switchable Coupling Degree

PAN Wu, QIU Sen, ZHANG Zhen, YE Kuan, HUANG Lei, LI Renpu
(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: This study proposes a terahertz branching waveguide directional coupler with a switchable coupling degree. The coupling degree is switched by controlling the conductivity of the vanadium dioxide film on the surface of the first four branches. The simulation results demonstrate that within the frequency range of 180～250 GHz, the coupling degree is (3±0.6) dB. The isolation and return losses exceed 17 dB when the vanadium dioxide conductivity is 2×10^5 S/m. Similarly, for a vanadium dioxide conductivity of 10 S/m, the coupling degree is (10±0.7) dB. The isolation and return losses are >18 and 20 dB, respectively. The coupler performs exceptionally well under both coupling states, satisfying the design expectations.

Key words: Terahertz; terahertz coupler; switchable coupling

0 引言

太赫兹波是指频率在0.1～10 THz(波长为30～3 000 μm)范围内的电磁波，在电磁波谱中的位置介于微波和红外之间。太赫兹波具有高带宽的特点，许多材料在太赫兹波段内具有特征光谱。因此，太赫兹波在超宽带无线通信、安全检测和医学诊断等领域具有广阔的应用前景[1-2]。

定向耦合器是将电磁波信号按一定的比例进行分配的器件。太赫兹定向耦合器在太赫兹波段将功率进行分配与合成，在太赫兹通信、太赫兹成像和太赫兹雷达等方面具有广泛的应用，是一种重要的太赫兹功能器件。目前，研究人员在太赫兹定向耦合器方面开展了一系列的研究工作。2015年，Liu等[3]设计了一款基于短缝Riblet型耦合结构的波导10 dB定向耦合器，工作频带为325～400 GHz，平均插入损耗为0.5 dB，平均隔离度优于25 dB。2018年，王颖等[4]设计了一个双“田”字型的太赫兹

收稿日期：2024－03－21.
基金项目：重庆邮电大学基金项目(A2020-557)；重庆市博士后科学基金项目(cstc2021jcyj-bsh0194)；重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202200602).
* 通信作者：秋 森，张 振

波导定向耦合器，该耦合器在 313～383 GHz 频率范围内耦合度为(6.3±0.2) dB，隔离度大于 20 dB，平均插入损耗为 0.6 dB，回波损耗大于 20 dB。2020 年，Zhang 等[5]设计了一种新型 3 dB 五分支耦合器，在 380～460 GHz 频率范围内，回波损耗和隔离度均大于 18 dB。上述耦合器耦合效果良好，但耦合度会随着耦合器结构参数的确定而固定，无法改变。

二氧化钒(VO_2)是一种具有独特的金属-绝缘相变特性的材料。2006 年，Jepsen 等[6]发现当环境温度为 340 K(67 ℃)左右时，VO_2 的电导率会发生五个数量级的显著突变，同时发生绝缘态到金属态的可逆相变。基于 VO_2 的相变特性，研究者们开展了吸收-极化转换器[7]、宽带-窄带转换吸收器[8]和可调宽带吸收器[9]等器件的研究，旨在实现太赫兹器件功能的集成化。VO_2 在太赫兹吸收器中的应用为太赫兹功能器件的发展提供了新的思路和新的方法。

本文设计了一款耦合度可切换的太赫兹分支波导定向耦合器。该耦合器可以通过控制前四条分支表面二氧化钒薄膜的温度，从而改变其相变状态，实现耦合度在 3 dB 和 10 dB 之间的切换。

1　理论分析

图 1 为传统的五分支波导定向耦合器，它由输入端、直通端、耦合端、隔离端四个端口及中间的五条分支线组成。

该耦合器的工作原理是，信号从端口 1 进入主波导后，一部分从端口 2 直通输出，另一部分通过分支线进入副波导，分别到达端口 3 和端口 4。由于信号经过不同分支线到达端口 3 和端口 4 的传输距离不同，因此相位存在差异。在端口 3，信号发生同相迭加，实现耦合输出；在端口 4，信号发生反相相消，理想情况下端口 4 没有输出。端口 3 和端口 4 之间的相位差为 π/2，端口 2 和端口 3 相位相同。

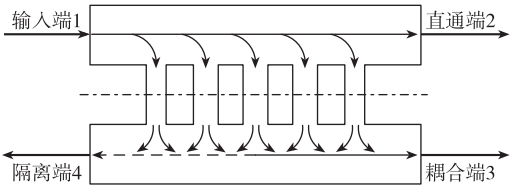


图 1　五分支线耦合器

传统的分支线耦合器设计方法[10]可以通过计算得出与耦合度对应的两侧分支线和中间分支线的宽度，但计算过程复杂，并且只在低频下计算结果较为准确，当频率上升到毫米波和太赫兹波时，电路的几何尺寸急剧减小，计算结果准确性较差，需要进行修正。

文献[11]基于模匹配法和奇偶模分析，考虑到节点和不连续面中基模和高次模之间的相互作用，提出了一种简单直观的分支线耦合器设计方法，耦合器的结构参数可由以下方程获得。

$$S_{31}=\left[\frac{w_1+w_2+w_3+\cdots+w_n}{\lambda}\right]^{1.7} \tag{1}$$

式中，n 表示耦合器分支数量，w_n 表示各分支线的宽度。该方程对任何耦合比和任何支路数($n\geqslant 3$)的波导耦合器均有效，解释了分支线总宽度与耦合度的关系。

另一方面，当温度急剧变化时，二氧化钒材料可实现金属态和绝缘态的可逆相变。当 VO_2 处于绝缘态时，可以等效为介电常数 $\varepsilon_r=9$ 的无损介质，对频率低于 6.7 THz 的电磁波高度透明。当 VO_2 处于金属态时，其对应的介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 可用 Drude 模型表示[12]，即：

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_\infty-\frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2+\mathrm{i}\gamma\omega} \tag{2}$$

式中，高频极限介电常数 $\varepsilon_\infty=12$，碰撞频率 $\gamma=5.75\times10^{13}$ rad/s，σ 为二氧化钒电导率，σ 处等离子体频率 $\omega_p^2(\sigma)=\frac{\sigma}{\sigma_0}\omega_p^2(\sigma_0)$，$\sigma_0=3\times10^5\ \Omega^{-1}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$，i 为虚数单位，$\omega$ 为入射电磁波的角频率。

二氧化钒的不同电导率可通过不同环境温度获得，频率依赖特性可忽略不计[13]。对 VO_2 进行加热，当温度达到 28 ℃时，其电导率为 10 S/m；当加热至 47 ℃时，电导率为 1 000 S/m；当温度从 57 ℃加热至 68 ℃时，电导率由 5×10^4 S/m 急剧增加至 2×10^5 S/m。

二氧化钒的相变具有可逆性，但相变过程存在热滞后现象[14]。当升温和降温时，VO_2 的相变温度不同，降温的相变温度比升温的相变温度低 8 ℃左右，即当降温时，VO_2 的相变温度降为 60 ℃。当温度从 68 ℃降至 60 ℃时，VO_2 的电导率仍为 2×10^5 S/m；随着温度继续降低，VO_2 从金属态转变为绝缘态，电导率急剧减小；当温度降低至 39 ℃时，VO_2 的电导率减小为 1×10^3 S/m；随着温度继续降低至 20 ℃时，VO_2 的电导率减小为 10 S/m，此时 VO_2 完全相变为绝缘态。除此之外，二氧化钒可经历反

复相变而不易受损，因此，基于二氧化钒的太赫兹器件具有较大的实际应用价值。

分支线耦合器的耦合度与工作分支总宽度正相关，通过控制工作分支的数量，进而控制进行耦合的分支线总宽度，实现耦合度的切换。在分支线表面覆盖一层二氧化钒薄膜，通过控制薄膜的相变状态来控制工作分支的数量。

2 耦合器的结构设计

首先设计耦合结构，然后设计耦合度切换结构。本文采用 CST2022 电磁仿真软件进行仿真，选用时域求解器，波导中的介质设置为真空，背景材料设置为理想导体，边界条件设置为电边界。

2.1 耦合结构的设计

所设计耦合器工作的中心频率为 220 GHz，对应波长 $\lambda=1.36$ mm。在此频率下的 10 dB 耦合结构分支线总宽度 $w_1+w_2+w_3+\cdots+w_n\approx0.35$ mm，3 dB 耦合结构分支线总宽度 $w_1+w_2+w_3+\cdots+w_n\approx0.90$ mm。耦合器的主副波导采用 WR-4 标准波导，波导横截面尺寸为 1.10 mm×0.55 mm，传输频率范围为 170～260 GHz，波导长度 $L=3.00$ mm。

根据分支线总宽度的计算结果可知：10 dB 耦合结构分支总宽度小于 3 dB 耦合结构分支总宽度。因此，先设计 10 dB 耦合结构，在其基础上增加分支线数量，实现 3 dB 耦合结构。仿真结果表明，要保持良好的性能，耦合器各分支线宽度的差距不能过大。结合两种耦合模式的分支线总宽度，决定使用 3 条分支线实现 10 dB 耦合结构，使用 7 条分支线实现 3 dB 耦合结构。

2.1.1 耦合器 10 dB 耦合结构设计

如图 2 所示为耦合器 10 dB 耦合结构示意图。各分支线宽度分别为：$w_1=0.11$ mm，$w_2=0.13$ mm，$w_3=0.11$ mm。分支线中心间距 $g=\lambda/4=0.34$ mm，分支线高度 h 与分支线中心间距保持一致，$h=0.34$ mm。

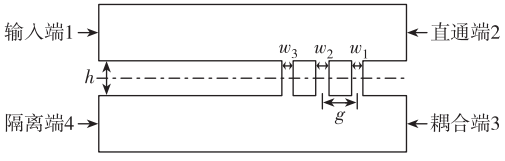


图 2 三分支 10 dB 耦合结构示意图

对图 2 所示的耦合结构进行仿真，其 S 参数仿真结果如图 3 所示，S_{11} 为反射参数，表征回波损耗；S_{21} 为直通参数；S_{31} 为耦合参数，表征耦合度；S_{41} 为隔离参数，表征隔离度。由图可知，在 180～250 GHz 的频率范围内，耦合度的幅度不平坦度小于 0.9 dB，回波损耗大于 20 dB，隔离度大于 15 dB。且在 190～250 GHz 范围内，回波损耗和隔离度均低于 20 GHz。

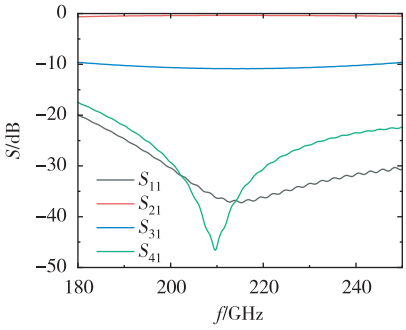


图 3 三分支 10 dB 耦合结构仿真结果

2.1.2 耦合器 3 dB 耦合结构设计

在 10 dB 耦合结构的基础上，增加四条分支线，使用七分支实现 3 dB 耦合结构。根据计算得出，所增加四条分支线的总宽度为 0.55 mm。最终确定四条分支线的长度分别为 $w_4=0.15$ mm，$w_5=0.15$ mm，$w_6=0.15$ mm，$w_7=0.10$ mm。10 dB 耦合结构的示意图如图 4 所示。

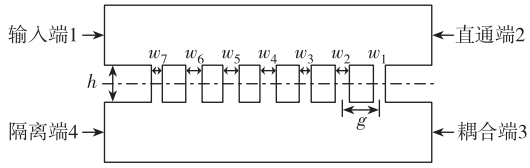


图 4 七分支 3 dB 耦合结构示意图

对图 4 所示的耦合结构进行仿真，其 S 参数仿真结果如图 5 所示。由图可以看出：在 180～250 GHz 的频率范围内，耦合器的幅度不平衡度小于 0.6 dB，回波损耗和隔离度均大于 15 dB。且在 190～250 GHz 范围内，回波损耗和隔离度均高于 20 dB。

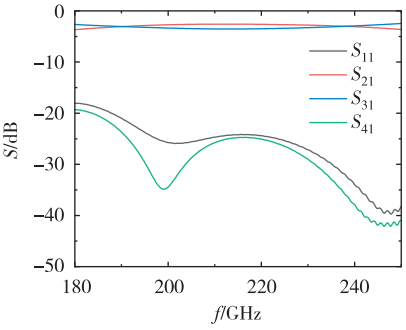
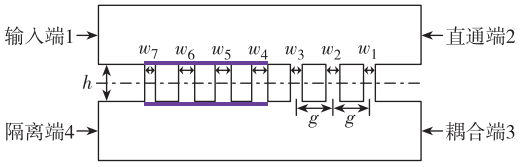


图 5 七分支 3 dB 耦合结构仿真结果

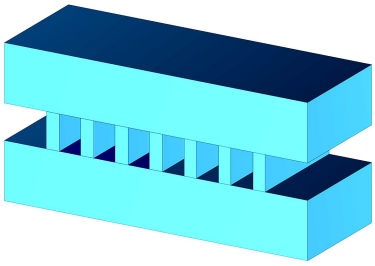
2.2　切换结构的设计

2.2.1　耦合度与二氧化钒厚度的关系

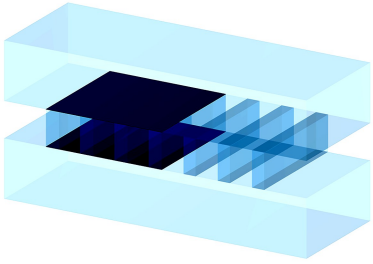
基于二氧化钒薄膜的相变特性，通过改变温度控制二氧化钒薄膜的电导率，实现耦合器耦合度的切换。耦合器的所有分支共同工作实现 3 dB 耦合，仅后三条分支 w_1～w_3 工作实现 10 dB 耦合，在前四条分支上使用二氧化钒贴片，通过控制二氧化钒的相变状态，调整工作分支的数量，实现耦合度的切换。图 6 为耦合器的具体结构设计。



(a) 结构示图



(b) 三维视图

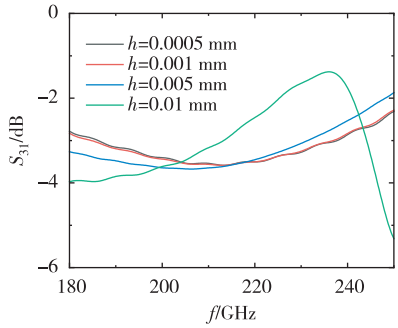


(c) 贴片视图

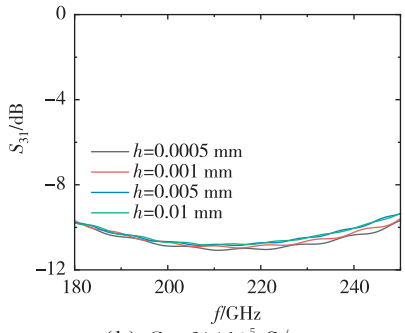
图 6　耦合器结构示意图

在理想状态下，当耦合器进行 3 dB 耦合时，太赫兹波无损地通过前四条分支 w_4～w_7 表面的绝缘态二氧化钒薄膜，七条分支均处于工作状态。当耦合器进行 10 dB 耦合时，太赫兹波无法穿透前四条分支表面的金属态二氧化钒薄膜，只有后三条分支工作。

为了研究二氧化钒薄膜的厚度对耦合度的影响，当对耦合器进行仿真时，将不同相变状态下的二氧化钒薄膜设置为不同的厚度，仿真结果如图 7 所示。当二氧化钒薄膜电导率为 10 S/m 时，由图 7(a)可知，若其厚度为 0.01 mm，耦合器的耦合曲线不平坦，耦合效果差；若其厚度小于等于 0.001 mm，耦合曲线平坦，耦合效果好。当二氧化钒薄膜电导率为 2×10^5 S/m 时，由图 7(b)可知，四种厚度下耦合曲线均平坦，耦合效果良好。



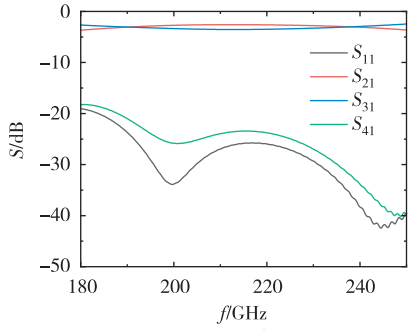
(a) $G=10$ S/m



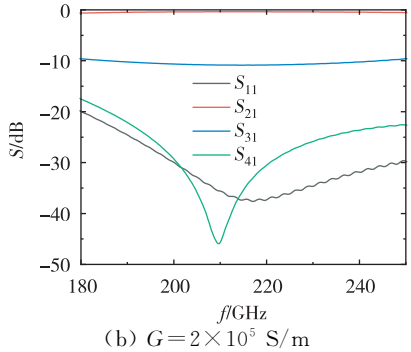
(b) $G=2\times10^5$ S/m

图 7　二氧化钒的厚度 h 对耦合度的影响

最终确定二氧化钒薄膜的厚度为 0.2 μm，两种耦合状态下的仿真结果如图8所示，当二氧化钒电



(a) $G=10$ S/m



(b) $G=2\times10^5$ S/m

图 8　当二氧化钒厚度 $h=0.2$ μm 时的 S 参数变化情况

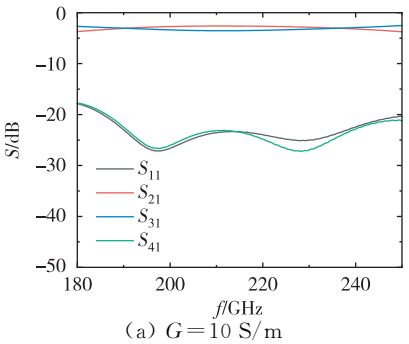
导率为 10 S/m 时，在 180～250 GHz 的频率范围内，耦合度幅度不平衡度小于 0.6 dB，隔离度与回波损耗大于 15 dB，且在 190～250 GHz 的频率范围内，隔离度与回波损耗大于 20 dB；当电导率为 2×10^5 S/m 时，在 180～250 GHz 的频率范围内，回波损耗小于 20 dB，隔离度小于 15 dB，但耦合曲线下移，耦合器进行 11 dB 耦合。

2.2.2 耦合度优化

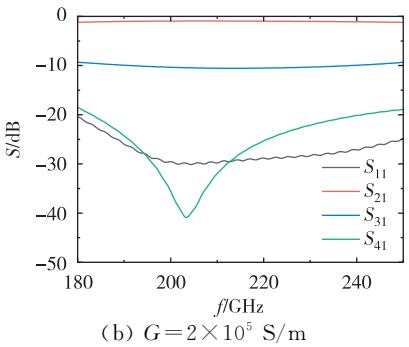
使用二氧化钒薄膜作为耦合度切换结构后，耦合器在 10 dB 耦合状态下的耦合曲线下移，未能达到设计指标，需要对原设计进行优化。

已知分支线耦合器的耦合度与进行耦合的分支线总宽度成正比，且原设计的 3 dB 耦合性能符合要求，10 dB 耦合性能因为使用二氧化钒薄膜有所下降。那么保持耦合器分支线总宽度不变，对各分支的宽度进行调整，适当增大进行 10 dB 耦合的后三条分支的总宽度，经过仿真，发现后三条分支总宽度增大 0.2 mm 便可实现 10 dB 耦合。最终确定耦合器各分支宽度 $w_1=w_2=w_3=w_4=w_5=w_7=0.13$ mm，$w_6=0.12$ mm。

对优化后的耦合器进行仿真，仿真结果如图 9 所示，当二氧化钒电导率为 10 S/m 时，在 180～250 GHz 的频率范围内，耦合度幅度不平衡度小于 0.6 dB，隔离度与回波损耗大于 17 dB，且在 190～250 GHz的频率范围内，隔离度与回波损耗大于 20 dB；当电导率为 2×10^5 S/m 时，在 180～250 GHz 频率范围内，耦合度幅度不平衡度小于 0.7 dB，回波损耗小于 20 dB，隔离度小于 18 dB。耦合器在两种工作状态下，均表现出良好的性能，符合设计指标。



(a) $G=10$ S/m



(b) $G=2\times10^5$ S/m

图 9 优化后的耦合器 S 参数曲线

2.2.3 耦合度与二氧化钒电导率的关系

为了研究耦合度与二氧化钒电导率的关系，当对耦合器进行仿真时，将二氧化钒的电导率设置为不同的值，仿真结果如图 10 所示。当二氧化钒薄膜的电导率为 10 S/m 时，太赫兹波以较低的损耗穿透薄膜进入前四分支，此时，七条分支均处于工作状态，耦合器进行 3 dB 耦合。在二氧化钒薄膜的电导率从 10 S/m 提升到 5×10^4 S/m 的相变过程中，二氧化钒电导率增加，太赫兹波穿透二氧化钒的难度变大，耦合器的耦合性能逐渐减弱，耦合曲线下移，耦合器的耦合度逐渐从 10 dB 变为 3 dB。当二氧化钒的电导率增加到 1×10^5 S/m 以上时，耦合器的耦合度不再变化。原因是当二氧化钒电导率大于 1×10^5 S/m 时，相变为完全的金属状态，相当于金属反射板，太赫兹波无法穿透二氧化钒薄膜进入前四分支，此时只有后三分支进行耦合，耦合器处于 10 dB 耦合状态。

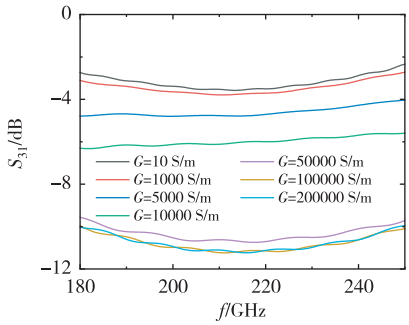


图 10 电导率对耦合器耦合度的影响

3 结论

本文提出了一种耦合度可切换的太赫兹分支波导定向耦合器。通过控制耦合器中二氧化钒薄膜的温度，改变其相变状态，从而实现耦合器耦合度的切换。在 180～250 GHz 的频率范围内，当二氧化钒处于绝缘态时，耦合器进行 3 dB 耦合，耦合度幅度不平衡度小于 0.6 dB，隔离度与回波损耗大于 17 dB。当二氧化钒处于金属态时，耦合器进行 10 dB 耦合，耦合度幅度不平衡度小于 0.7 dB，隔离度大于 18 dB，回波损耗大于 20 dB。该耦合器在两种耦合状态下均表现出良好的工作性能。相比于传统的耦合器，

该耦合器具有耦合度可切换的特点，其使用更加灵活，因而在太赫兹功能器件等领域具有潜在的应用价值。

参考文献：

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

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

[3] Liu S, Hu J, Zhang Y, et al. Sub-millimeter-wave 10 dB directional coupler based on micromachining technique[J]. Int. J. Antennas Propagation, 2015: 1-8.

[4] 王　颖，张斌珍，段俊萍，等. 一种双田字型太赫兹波导定向耦合器的设计方法[J]. 电子技术应用，2018，44(1)：88-90，95.
Wang Ying, Zhang Binzhen, Duan Junping, et al. A design of terahertz waveguide directional coupler with double "tian-shape"[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(1): 88-90, 95.

[5] 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.

[6] Jepsen P U, Fischer B M, Thoman A, et al. Metal-insulator phase transition in a VO_2 thin film observed with terahertz spectroscopy[J]. Phys. Rev. B, 2006, 74(20): 205103.

[7] Song Z, Zhang J. Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies[J]. Opt. Express, 2020, 28(8): 12487-12497.

[8] Zhu H, Zhang Y, Ye L, et al. Switchable and tunable terahertz metamaterial absorber with broadband and multi-band absorption[J]. Opt. Express, 2020, 28(26): 38626-38637.

[9] 朱华利，张　勇，叶龙芳，等. 基于石墨烯-二氧化钒的太赫兹双控可调宽带吸收器[J]. 光学学报，2022，42(14)：1423002.
Zhu Huali, Zhang Yong, Ye Longfang, et al. Dual-control and tunable broadband terahertz absorber based on graphene-vanadium dioxide[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1423002.

[10] Reed J. The multiple branch waveguide coupler[J]. IRE Trans. Microwave Theory Tech., 1958, 6(4): 398-403.

[11] Niu Z, Zhang B, Yang K, et al. Mode analyzing method for fast design of branch waveguide coupler[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2019, 67(12): 4733-4740.

[12] Li J, Zhang Y, Li J, et al. Frequency-switchable VO_2-based coding metasurfaces at the terahertz band [J]. Opt. Commun., 2020, 458: 124744.

[13] 王　岩，陈　哲，崔　琦. 基于二氧化钒的可调谐太赫兹宽带带通滤波器[J]. 光学学报，2021，41(20)：2023002.
Wang Yan, Chen Zhe, Cui Qi. Tunable terahertz broadband bandpass filter based on vanadium dioxide[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2023002.

[14] Atkin J M, Berweger S, Chavez E K, et al. Strain and temperature dependence of the insulating phases of VO_2 near the metal-insulator transition[J]. Phys. Rev. B, 2012, 85(2): 020101.

作者简介：

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

秋　森(1999—)，男，陕西省咸阳市人，硕士研究生，研究方向为光电集成系统；

张　振(1987—)，男，河南省信阳市人，讲师，主要从事太赫兹波产生、传输和探测研究。