

文章编号: 2095-4980(2021)05-0804-05

## 基于脊波导结构的太赫兹超宽带双工器设计

张沁旖<sup>a</sup>, 丁江乔<sup>\*b</sup>

(南京信息工程大学 a.长望学院; b.电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 在射电天文领域, 为了实现更宽频带内多谱线同时观测任务, 要求太赫兹超导相干接收机向更宽带方向发展。针对下一代太赫兹超宽带接收机的应用需求, 提出了一种频段覆盖 180~420 GHz(相对带宽达 87%)的超宽带脊波导双工器设计, 主要包括: 180~300 GHz 频段和 320~420 GHz 频段宽带脊波导滤波器设计与变换; 超宽带太赫兹多级耦合型脊波导双工器优化设计。仿真结果表明该结构能够在 180~300 GHz 和 320~420 GHz 频段双工工作, 回波损耗整体优于 15 dB, 通道间隔高度达 20 dB 以上。

**关键词:** 太赫兹; 脊波导; 滤波器; 双工器; 超宽带; 射电天文

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021245

## Design of a terahertz ultra-wideband duplexer based on the ridge waveguide structure

ZHANG Qinyi<sup>a</sup>, DING Jiangqiao<sup>\*b</sup>

(a.Changwang School of Honors; b. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** In radio astronomy field, the development of terahertz superconducting coherent receivers with ultra-wideband performance is required to achieve the simultaneous observation of multi-spectral lines in much wider frequency band. In response to the application requirements of the next-generation terahertz ultra-wideband receivers, an ultra-wideband ridge waveguide duplexer with a frequency band covering 180–420 GHz (the fractional bandwidth up to 87%) is developed. The main contents include the design and conversion of broadband ridge waveguide filters in 180–300 GHz and 320–420 GHz band, as well as the optimization of terahertz multi-stage coupled ridge waveguide duplexer. The simulation results show that this structure can be in duplex operation in the 180–300 GHz and 320–420 GHz bands with an overall return loss better than 15 dB and the isolation more than 20 dB.

**Keywords:** terahertz; ridge waveguide; filter; duplexer; ultra-wideband; radio astronomy

太赫兹(Terahertz, THz)频段拥有丰富且未被充分开发的频谱资源, 是射电天文研究前沿科学问题的重要窗口<sup>[1]</sup>, 并在高速通信<sup>[2]</sup>和雷达成像<sup>[3]</sup>等众多领域均展现出巨大的应用前景。为了进一步实现宽频带多谱线天文观测需求, 现阶段太赫兹探测器/接收机正向超宽带、多频段方向快速发展<sup>[4]</sup>。多工器<sup>[5]</sup>具有将不同频段信号分离或合并的特性, 其不仅能够实现几个分布在不同频谱位置上射频信号的分离, 而且能够实现多路本振信号的泵浦, 因此是下一代太赫兹超宽带相干探测系统中的关键器件之一, 近年来得到各大科研院所的广泛关注。近年来, 具有实时多频段覆盖观测的太赫兹多波段接收机得到重视, 太赫兹多工器的研制被提上日程。文献[6]介绍了一款通过数控机械(Computer Numerical Control, CNC)工艺实现的 W-波段多级耦合型三工器, 但实测与仿真结果相差较大, 且带内-3 dB 的损耗较大。文献[7]则利用微工艺 SU-8 技术研制了更高频段的耦合谐振式双工器, 能够工作于 220~325 GHz 频段, 但同样存在插损高、频带偏移严重等问题。瑞典皇家理工学院采用硅基深刻工艺研制了一款高性能 D-波段波导双工器<sup>[8]</sup>,  $Q$  值达 1 000 以上, 插损在-1 dB 附近, 性能优越。日本国立天文台基于高精度 CNC 工艺, 研制出 400 GHz 频段混合网络型波导多工器, 各频段带宽约为 6%, 实测与仿真结果高度吻

收稿日期: 2021-05-01; 修回日期: 2021-07-18

基金项目: 南京信息工程大学-大学生创新创业训练计划资助项目(XJDC202110300578)

\*通信作者: 丁江乔 email:jqding@nuist.edu.cn

合,性能突出<sup>[9]</sup>;并在此基础上,结合高低通滤波器,拓展至 275~500 GHz 高频段,实现总宽带达 60%的高性能响应<sup>[5]</sup>。虽然多款波导多工器结构被报道,包括带宽达 60%的结构,但因标准矩形波导 TE<sub>10</sub>-模基模带宽及其耦合结构的限制,传统波导结构往往难以实现更宽带的响应,限制了超宽带系统的发展与应用。而脊波导传输线<sup>[10]</sup>因具有截止频率低、单模工作频带宽等优点,为太赫兹频段超宽带滤波器、双工器的实现提供可能。本文在脊波导超宽带滤波器<sup>[11]</sup>工作的基础上,首先提出 320~420 GHz 频段宽带脊波导滤波器的变换设计;并结合 H-面 T 型脊波导接头,进一步提出具有超宽带性能的太赫兹频段多级耦合型宽带双波段信号合成(双工器)设计。

## 1 低频段宽带脊波导滤波器

宽带滤波器是实现超宽带双工器的基础单元,常规矩形波导滤波器的通带带宽往往难以达到 10%以上<sup>[12]</sup>。将脊波导结构拓展到太赫兹频段对于扩展滤波器带宽具有重要意义。在前期的工作中<sup>[11]</sup>,已经分析了消逝模脊波导谐振腔的结构及其频率特性,见图 1<sup>[11]</sup>(a);采用经典的低通原型综合法,结合三维电磁仿真软件 HFSS(High Frequency Structure Simulator),给出了通带为 180~300 GHz(相对带宽达 50%)脊波导滤波器的详细设计方法<sup>[11]</sup>,模型结构见图 1(b);利用高精度微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)工艺制备出该器件,经两步刻蚀工艺后的照片见图 1(c)。此外,还匹配设计了宽带脊波导喇叭结构,搭建了基于高灵敏度超导混频器的测试装置,对 200~400 GHz 频段内的相对传输特性进行了验证,获得的相对传输特性仿真及实测结果见图 2。比较发现,200~400 GHz 频段内测量结果与仿真数据基本吻合。该工作首次在太赫兹频段提出、设计并验证了脊波导的宽带特性,为后续将脊波导结构应用到太赫兹宽带器件的研制提供重要的基础。

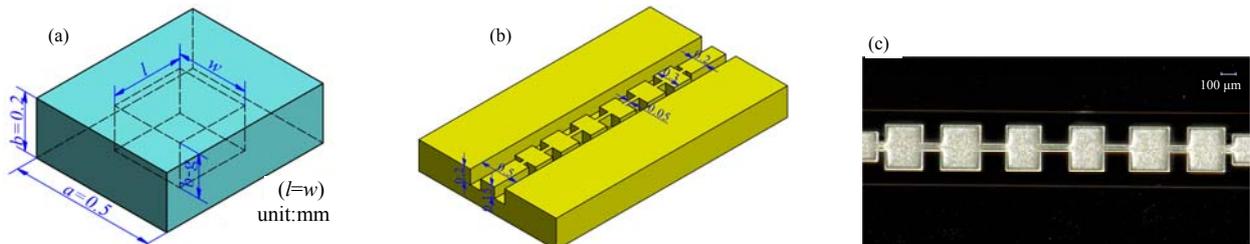


Fig.1 (a) geometric construction of the ridged resonator; (b) configuration of the proposed 180~300 GHz wideband ridged waveguide filter; (c) top view photomicrograph of the etched ridged waveguide filter structure

图 1 (a) 脊波导谐振腔几何结构; (b) 180~300 GHz 脊波导滤波器结构图; (c) 滤波器刻蚀工艺完成后结构顶视图

## 2 高频段脊波导滤波器变换设计

基于上述方法,对另一个关键频段 320~420 GHz 滤波器进行变换设计,为后续双工器的研制提供另一个通道的频率响应特性。考虑到 MEMS 中刻蚀工艺的特点及端口互联特性等,该频段滤波器在脊波导结构高度上保持与前面 180~300 GHz 脊波导滤波器一致。因此,首先分析了脊波导宽度( $a$ )的维度变化对谐振腔频率特性的影响,见图 3。从图中明显看出,当脊波导的宽度  $a$  增大时,该结构谐振腔的频率将降低,该尺寸相关的频率变换原理将为不同频段脊波导滤波器设计提供基础。根据双工器工作性能,另一个通道响应为 320~420 GHz,为此本设计拟采用  $a=0.3$  mm 作为该脊波导滤波器结构中的端口宽度,以获得期望的频率选择响应。

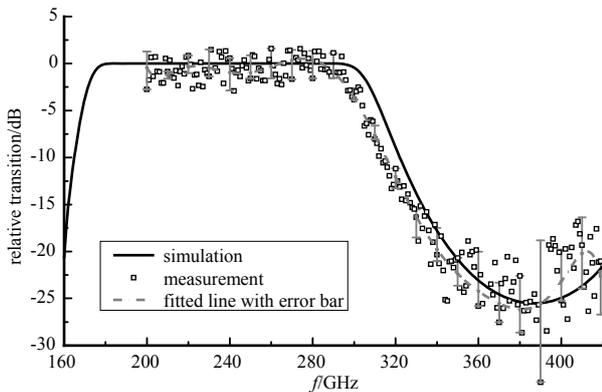


Fig.2 Simulated and measured relative transmission response for 180~300 GHz wideband ridged waveguide filter

图 2 180~300 GHz 宽带脊波导滤波器的仿真与测试结果

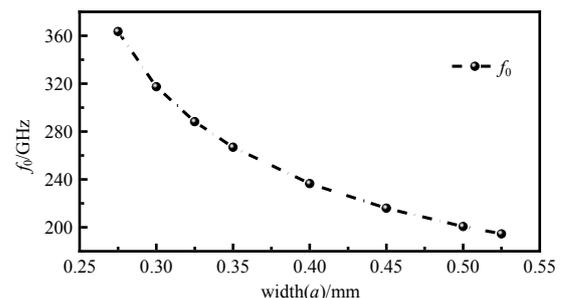


Fig.3 Resonance frequency of the ridged resonator versus  $a$

图 3 谐振频率随脊波导谐振腔宽度  $a$  的变化特性

其次,采用文献[11]中讨论的  $K$ -变换和谐振等效电路及低通原型综合方法,设计出图 4(a)中的 Filter-1(原始),其频率响应见图 4(b),在 320~420 GHz 范围内,通带响应性能良好,回波损耗在-15 dB 以下,能够满足后续超宽带脊波导双工器通道性能要求。此外 180~300 GHz 脊波导滤波器端口为  $a=0.5$  mm,而该 320~420 GHz 脊波导滤波器的端口  $a=0.3$  mm,为了实现端口尺寸的统一,为进一步实现双工器研制准备前期基础,该高频段滤波器加载一段  $\lambda/4$  阻抗匹配电路,在结构形式上为台阶过渡结构( $a=0.35$  mm),见图 4(a)中 Filter-2(加载匹配电路后的结构)。同时该加载匹配电路后 Filter-2 响应见图 4(b),在 320~420 GHz 范围内,通带响应特性基本保持不变。

### 3 超宽带脊波导双工器设计方法

经典多工器的实现方法主要有<sup>[13]</sup>: a) 混合网络耦合型多工器; b) 环形耦合型多工器; c) 定向滤波多工器; d) 多级耦合型多工器。本文将采用多级耦合型结构,相较于其他类型结构,其结构简单、紧凑,损耗小,易于高频段应用与工艺实现。基于前文的滤波器设计与讨论,太赫兹超宽带双工器主要指标如下,通带 1: 通带频段 180~300 GHz,带内回波损耗优于-15 dB; 通带 2: 通带频段 320~420 GHz,回波损耗优于-15 dB; 2 个通道之间的抑制优于-20 dB。

本文多级耦合型双工器的实现采用“先独立设计 2 个通道滤波器,再与 T 型接头相连并电路综合”的设计方法。显然,双工器的设计难于 2 个独立 2 端口滤波器的设计,在双工器结构中,当其中一个通道滤波器与 T 型接头匹配后,会产生复数阻抗,从而导致另一频段滤波器的失配,恶化滤波器原有的通带特性。因此,本设计提出图 5 的综合电路结构实现方法,将其中一个通道滤波器与 T 型接头的公共端口优先匹配,则从与另一个滤波器相连的端口看进去,会得到一个复数阻抗,此时通过一段宽度/长度可优化的传输线结构来实现滤波器与 T 接头的阻抗匹配。综上,多级耦合型双工器采用 2 个滤波器与 T 型接头彼此相连的结构,存在三者间的特性互扰问题,将整体电路综合问题转化为复数阻抗与二端口滤波器的匹配电路与结构实现,将大幅度降低双工器的优化设计难度。

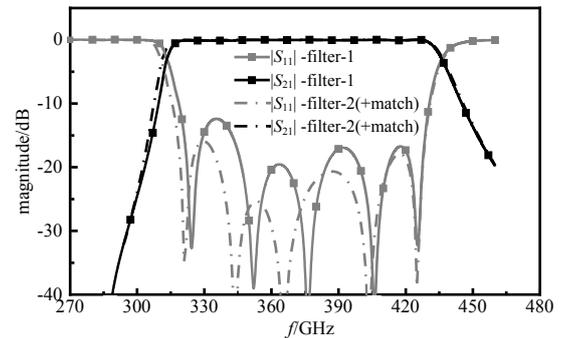
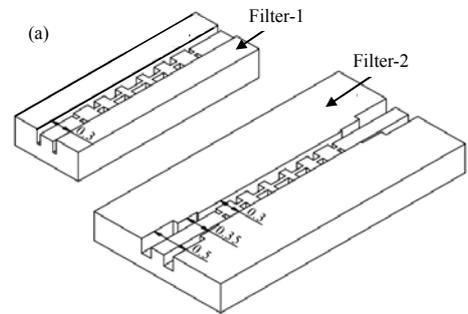


Fig.4 (a) 320~420 GHz ridged waveguide filter structures; (b) responses including Filter-1 and Filter-2

图 4 (a) 320~420 GHz 脊波导滤波器结构; (b) Filter-1 和 Filter-2 的响应

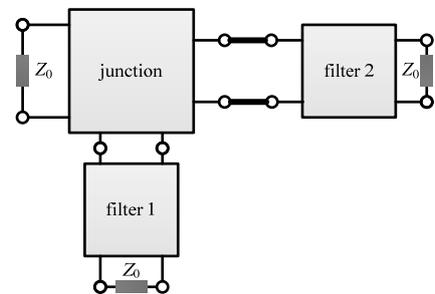


Fig.5 Equivalent circuit diagram of this duplexer  
图 5 双工器等效电路结构框图

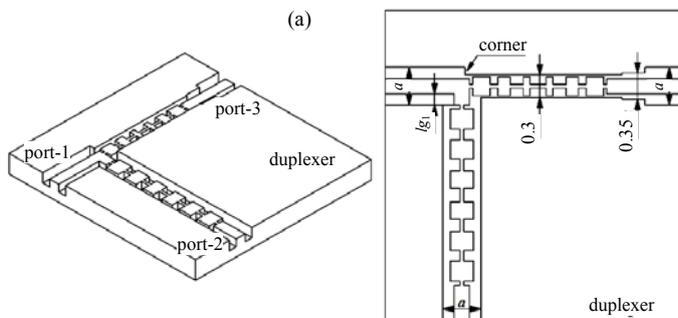
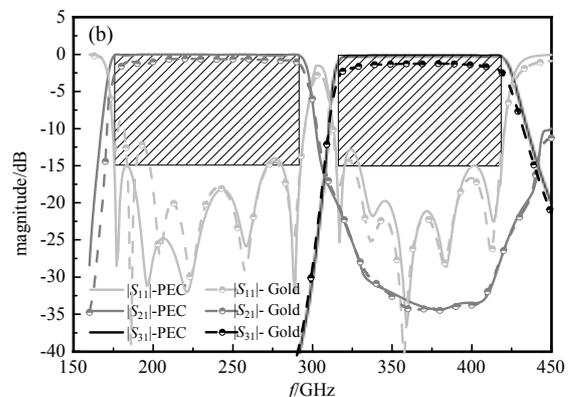


Fig.6 (a) Structure diagram of terahertz ridge waveguide duplexer; (b) Full wave simulation response of ridged waveguide duplexer  
图 6 (a) 太赫兹脊波导双工器结构图; (b) 脊波导双工器散射参数全波仿真响应

基于上述方法,将前文独立设计完成的高、低频段滤波器与  $H$ -面 T 型脊波导接头连接,构建模型见图 6(a),



Port 1 为公共端, Port 2 为低频段信号输入端/输出端, Port 3 为高频段信号输入端/输出端, 整体结构与图 5 的原理框图一致。 $H$ -面 T 型接头的采用, 使得整个双工器结构在同一平面上, 且具有统一高度, 方便刻蚀等工艺的实现。图 6(a)中低频段滤波器通过加载一段传输线(长度为  $l_{g1}$ )及  $90^\circ$ 弯头耦合至 T 型结公共端口, 高频段滤波器通过加载一段传输线(长度为  $l_{g2}$ )直接与 T 型接头连接。值得注意的是, 高频段滤波器与 T 型结的连接处, 因过渡结构的存在而形成一个角(Corner), 见图 6(a)。该 Corner 结构的等效电路见图 7, 该不连续结构等效成一个 T 型 LC 电路, 能够用于为复数阻抗与二端口滤波器的阻抗匹配增加自由度。针对性地对  $l_{g1}$  和  $l_{g2}$  的值进行优化设计, 获得  $l_{g1}=0.15$  mm,  $l_{g2}=0$  mm, 整体三维结构见图 6(a)。

太赫兹超宽带脊波导双工器的全波仿真响应见图 6(b), 在理想导体(Perfect Electric Conductor, PEC)边界条件下, 180~300 GHz 和 320~420 GHz 通带范围内, 回波损耗均优于-15 dB, 通带间隔度优于-20 dB, 满足设计指标要求。同时利用材料特性对该双工器进行了插入损耗分析, 在材料为金(Gold), 厚度为  $2\ \mu\text{m}$ , 表面粗糙度为  $0.1\ \mu\text{m}$  边界条件下, 2 个通带内均出现了明显的损耗, 其中低频段通道内损耗为-1 dB, 而高频段通带损耗约为-2 dB。该设计能够采用文献[11]中介绍的 MEMS 工艺实现。但是基于实验室现有测试条件, 仅能搭建如文献[11]中介绍的测试装置, 只能测试二端口器件的相对传输特性, 难以实现当前太赫兹频段双工器三端口的匹配与性能表征。测量装置的进一步研究同时也是课题组下一步研究方向之一。

将本文所设计的太赫兹脊波导双工器与已经报道过的其他波导多工器进行性能对比, 见表 1。可以明显发现, 大多数波导多工器通道的相对带宽在 10%以下, 而本设计脊波导双工器具有明显的宽频带特性, 通道内带宽达 50%, 宽带优越性突出。

表 1 太赫兹频段波导多工器的性能对比

Table 1 Performance comparison of different terahertz waveguide multiplexers

Ref.	$f_0/\text{GHz}$	FBW/(%)	IL/dB	RL/dB	technology	comments
[5]	320/439	30.6/26.2	2/1.5	15/15	CNC	—
[6]	94.4/95/95.5	0.5/0.4/0.5	1.5/1.5/1.5	15/15/15	CNC	Triplexer
[7]	265/300	7.5/6.7	7.6/8	10/13.4	SU-8	—
[8]	132/145	3/5.1	1.2/0.8	20/18	DRIE	—
[9]	417.3/442.3/467.3	5/5.6/5.3	1.7/2.3/2.6	15/15/15	CNC	Multiplexer
this work	240/370	51/27.2	1/2	15/15	—	simulated performance

$f_0$ : center frequency of each passband; FBW: relative bandwidth of each passband; IL: insertion loss of each passband; RL: return loss of each passband

## 4 结论

本文基于脊波导单模工作频带宽的特点, 提出了太赫兹频段超宽带脊波导双工器的设计方法, 实现了宽频带 180~300 GHz 和 320~420 GHz 的双工工作性能, 单通道相对带宽达 50%, 整体相对带宽达 87%, 且通道间隔度在-20 dB 以上。脊波导结构在太赫兹超宽带器件上的应用, 为下一代射电天文太赫兹接收机宽带特性的发展及其应用提供了重要的借鉴价值。

## 参考文献:

- [1] SHI Shengcai, PAINE S, YAO Qijun, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at Dome A in antarctica[J]. Nature Astronomy, 2016. doi:10.1038/s41550-016-0001.
- [2] 赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Research status and application prospect of terahertz communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6):931-937.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.
- [3] 国爱燕, 高文军, 徐明明, 等. 星载太赫兹雷达碎片预警技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2):172-177. (GUO Aiyun, GAO Wenjun, XU Mingming, et al. Debris warning technology of space borne terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(2):172-177.) doi:10.11805/TKYDA201702.0172.
- [4] KOJIMA T, KROUG M, GONZALEZ A, et al. 275-500 GHz wideband waveguide SIS mixer[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2018, 6(8):638-646.
- [5] GONZALEZ A, KOJIMA T, KANEKO K, et al. 275-500 GHz waveguide diplexer to combine local oscillators for different frequency bands[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2017, 6(7):669-676. (下转第 813 页)

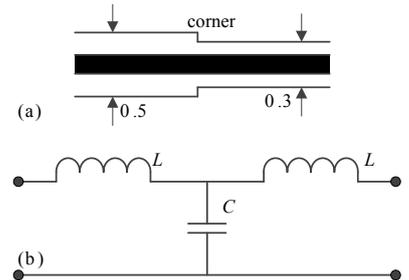


Fig.7 Equivalent circuit of ridged waveguide discontinuous structure

图 7 脊波导不连续结构等效电路