

文章编号: 2095-4980(2021)05-0808-06

太赫兹波导多通道滤波器的研究

马 静¹, 张 昆², 刘 欢¹, 苏 煜¹, 陶智勇¹, 樊亚仙^{*1}

(1. 桂林电子科技大学 无线宽带通信与信号处理广西重点实验室, 广西 桂林 541000;
2. 哈尔滨工程大学 光纤集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了一种基于多模共振的多通道太赫兹波导滤波器。在太赫兹周期结构波导中引入缺陷, 可以在禁带范围内形成通带, 从而实现窄带滤波。通过数值模拟对多通道滤波器的特性进行了研究。结果表明, 通过改变缺陷长度可以实现通道数可调的多通道滤波功能, 通道数可达 10~12 个, 透过率均在 98% 以上。此外, 改变波导结构的周期个数, 还可实现对通带带宽的调控, 最窄带宽可达 0.01 GHz。该波导滤波器性能优良, 具有结构紧凑、易于集成、透过率高、通道多、带宽窄等优点, 为太赫兹波段功能器件的研制提供重要的技术参考。

关键词: 太赫兹波导; 多通道滤波器; 布拉格共振; 非布拉格共振

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021244

Research on terahertz waveguide multichannel filter

MA Jing¹, ZHANG Kun², LIU Huan¹, SU Yu¹, TAO Zhiyong¹, FAN Yaxian^{*1}

(1. Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541000, China; 2. Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A multi-channel terahertz waveguide filter based on multimode resonance is studied. By introducing defects in terahertz periodic structure waveguide, the passband can be formed in the forbidden band range, so as to realize narrow-band filtering. The characteristics of multi-channel filter are studied by numerical simulation. The results show that the multi-channel filtering function with adjustable number of channels can be realized by changing the defect length. The number of channels can reach 10–12, and the transmittance is more than 98%. In addition, by changing the number of cycles of the waveguide structure, the passband bandwidth can be adjusted, and the narrowest bandwidth can reach 0.01 GHz. The waveguide filter has excellent performance and has the advantages of compact structure, easy integration, high transmittance, multi-channel and narrow bandwidth. It provides an important technical reference for the development of functional devices in terahertz band.

Keywords: terahertz waveguide; multichannel filter; Bragg resonance; non-Bragg resonance

随着太赫兹技术的不断发展, 其应用领域也越发广泛, 与之相关的太赫兹传输、调制及滤波等功能器件^[1-2]的研究就变得至关重要。近年来, 性能优良的太赫兹滤波器的研制成为广泛研究的热点问题。各种太赫兹滤波器, 如一维、二维光子晶体^[3-5], 等离子体滤波^[6], 带通到带阻和超材料^[7-13], 以及平板波导^[14-17]等结构的设计不断地涌现。2019 年, Meichen XU 等从理论上研究了基于磁化等离子体掺杂一维光子晶体多通道滤波器的太赫兹磁化场可调谐滤波特性, 该滤波器可以通过调节光子晶体中缺陷的层数, 从而控制太赫兹多通道滤波的通道数, 实现可调的滤波功能^[3]。2019 年, Yixin FAN 等研制了一种基于二氧化钒杂化超材料的多波段可调谐太赫兹带通滤波器, 该滤波器有 3 个通带, 可通过电调制的手段来实现带通滤波^[13]。2020 年, Kehui JIA 等设计了一种基于阻带调制平行板起伏波导的太赫兹窄带通滤波器, 提出了基于两个阻带连接的方法, 发现调整板距

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62001132; 12064005); 广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA159047; 2021GXNSFDA075006); 2020 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY05023)

*通信作者: 樊亚仙 email:yxfan@guet.edu.cn

和沟槽深度可以达到控制阻带间距的目的^[15]。2021 年, Kun ZHANG 等利用多缺陷的周期波导结构, 设计了一种宽带太赫兹滤波器, 通过改变缺陷的数量和尺寸, 可以调节其带宽及中心频率^[18]。现阶段实现的多通道滤波器, 主要是通过光子晶体中引入多个点缺陷来实现, 其结构复杂, 插入损耗较大, 无法满足高速的太赫兹通信的需求。超材料结构在介电材料上制作周期型金属图案仍然需要一个复杂的制备过程。因此低成本、宽频带、易制作, 具有良好频率选择性的太赫兹多通道滤波器亟待提出。

本文提出了一种基于多模共振的多通道太赫兹波导滤波器。太赫兹波在圆柱状周期性起伏波导结构中传输时, 由于多模共振效应会形成频域禁带, 即布拉格禁带和非布拉格禁带, 在该周期波导结构中引入了缺陷, 因此在禁带范围内形成了通带, 通过调节波导结构、缺陷长度等几何参数可实现通道数、通带宽度可调的多通道滤波。

1 变截面周期结构波导中多模共振理论

在周期结构波导中, 由于模式共振的影响, 太赫兹波在变截面波导中传播时会形成特殊的谱带结构。有些频率的太赫兹波可以透过, 形成通带; 而有些频率的太赫兹波则大幅度衰减, 形成禁带。当具有周期变截面结构波导的周期长度与其平均半径尺寸相近时, 将会激发布拉格共振和非布拉格共振, 导致谱带分裂。其中, 相同横向模式耦合引发的布拉格共振产生布拉格禁带, 而不同横向模式的耦合导致非布拉格共振及相应禁带。当在两段周期波导中间加入一段直波导后, 其谱带结构会发生明显变化。引入的直波导会打破结构的周期性, 进而在原来布拉格和非布拉格禁带范围内会激发缺陷态, 导致太赫兹波能量的局域化, 产生较强的透射峰, 实现滤波功能, 这种缺陷态在光波导^[19]和声波导^[20]结构中已经被实验观测到。因此, 基于该共振原理, 设计了具有缺陷结构的太赫兹周期波导, 当缺陷足够长时, 在原来的禁带中会形成多个窄带透射峰。

图 1 为太赫兹圆柱形波导多通道滤波器的结构示意图。太赫兹波沿波导腔内轴线方向入射, R_1 为波导的长半径, R_2 为短半径, A 为波导的周期长度, d 为占空比, 即一个周期内长半径的宽度 dA 与波导周期长度 A 的比值, ε 为管壁内径起伏参数, 这里长半径与短半径的平均值为 R , 命名为平均半径。虚线框内为引入的一段长度为 x 的直波导。

具有周期结构波导的色散特性可以表示为:

$$f^{(p)} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{k_r^{(p)}}{R}\right)^2 + (\beta + nk)^2} \quad (1)$$

式中: c 为光速; 截止频率 $f_c = \frac{k_r^{(p)}}{R}$, 这里 $k_r^{(p)}$ 为零阶贝塞尔函数的零点, 代表不同的径向模式。

$\beta(-k/2 \leq \beta \leq k/2)$ 为传播常数, $k=2\pi/A$ 为管壁起伏的波数。且有:

$$k_{r,n} = \sqrt{k_{r,n'}^2 + 2(n'-n)k\beta - (n^2 - n'^2)k^2} \quad (2)$$

由式(2)可知, 对于确定的入射波频率 f , 第 n 阶空间谐波的第 p 个径向模式与第 n' 阶空间谐波的第 q 个径向模式之间的共振发生在 β_{pq} 处, β_{pq} 表达式如下:

$$\beta_{pq} = -\frac{(n+n')k}{2} \left[1 + \frac{(k_r^{(q)})^2 - (k_r^{(p)})^2}{(n^2 - n'^2)k^2} \right] \quad (3)$$

当 $p=q$ 时, 发生布拉格共振, 即相同的径向模式之间发生相干相消, 对应频率的电磁波不能传播, 产生布拉格禁带; 当 $p \neq q$ 时, 发生非布拉格共振, 即不同径向模式之间的相互作用, 产生非布拉格禁带。

$$l(p,n) = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{k_r^{(p)}}{R}\right)^2 + \left(\beta + \frac{2\pi n}{A}\right)^2} \quad (4)$$

式(4)给出了周期结构波导的色散曲线表达式 $l(p,n)$ 。式中 $l(p,n)$ 代表第 n 阶空间谐波的第 p 个径向模式。

由于波导管壁上存在周期性结构, 径向模式的色散曲线都折叠到第一布里渊区进行分析。图 2 分别为布拉格共振和非布拉格共振波导的色散曲线及相应的透射谱。设计第一种波导的结构尺寸为平均半径 $R_B=191$ m, 周期 $A_B=182$ m, 占空比 d 为 0.5, 起伏参数 $\varepsilon_B=0.1R_B$, 如图 2(a)所示。在 $\beta=\pm k/2$ 处, 相同径向模式间发生相互作用, 产生一阶布拉格共振, 使得频谱分裂。由对应的图 2(b)可以看出, 在 1 THz 附近产生布拉格禁带, 称之为

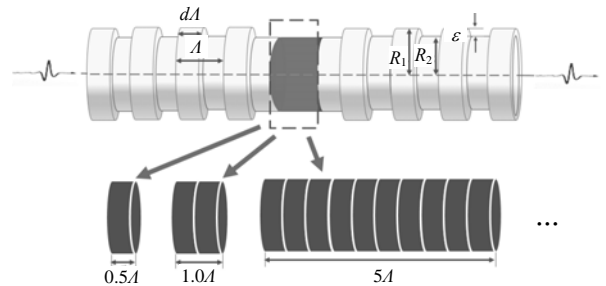


Fig.1 Structure diagram of terahertz multichannel filter based on cylindrical waveguide

图 1 太赫兹圆柱形波导多通道滤波器的结构示意图

布拉格波导；第二种波导结构的平均半径 $R_{NB}=264$ m，周期 $\Lambda_{NB}=248$ m，占空比 d 为 0.5，起伏参数 $\epsilon_{NB}=0.1R_{NB}$ ，如图 2(c)所示。在 $\beta=\pm k/3$ 处，不同径向模式间发生相互作用，产生非布拉格共振，也使得频谱分裂。由对应的图 2(d)可以看出，在 1 THz 附近具有非布拉格禁带，称之为非布拉格波导。本文中所提出的太赫兹波导多通道滤波器，是将上述两种不同参数的周期结构波导与直波导连接到一起来构成的。

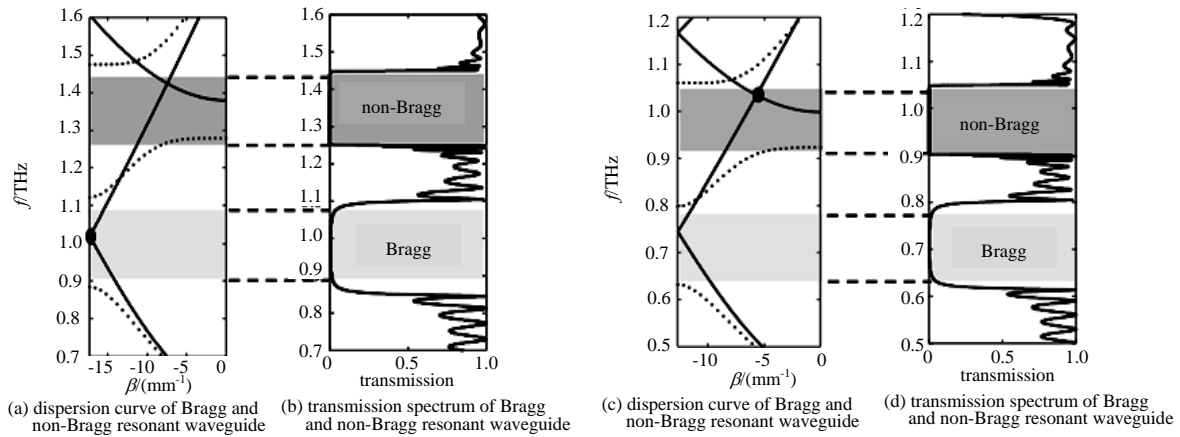


Fig.2 Dispersion curve and transmission spectrum of periodic waveguide with variable cross section
图 2 变截面周期性结构波导的色散曲线及对应的透射谱

2 可调谐多通道滤波器的特性研究

为了表征太赫兹波在这种带有缺陷的周期结构波导中的传输特性，本文采用了基于有限元方法的 COMSOL Multiphysics 软件，有限元法是一种应用较为广泛的数值计算方法，非常适用于研究电磁波在波导中的传播特性。定义沿着波导轴线方向为轴向，垂直于轴线方向为径向，太赫兹波沿轴线方向从波导左侧入射，在管壁起伏的中空波导中，传输介质为空气，设置变截面管壁为完美电导体边界。数值模拟过程中计算的频率范围 0.80~1.15 THz，同时为了保证模拟结果的精确度和准确性，采用了极细化网格，频率步长设置为 0.001 GHz。利用上述数值模拟的方法，对该波导多通道滤波器进行了三方面的特性研究，包括缺陷长度对通道数的影响、波导的周期个数对带宽的影响以及不同共振特性的布拉格和非布拉格波导对滤波性能的影响。

2.1 通道数可调的太赫兹窄带滤波特性

选用两段布拉格波导中间加入直波导缺陷的复合变截面周期结构。左右两端波导周期个数均为 4 个，逐渐增加直波导缺陷的长度，依次为 0, 0.5A, 1A, 5A, 10A, 20A，研究直波导即缺陷长度变化对布拉格禁带中产生的通带个数的影响。从图 3 可以看出，当所添加的直波导缺陷长度 $x=0$ 时，由结构图可知两端的布拉格波导的短半径部分相接，此时并非完美周期结构，而是存在一个宽度为 $\Lambda/2$ 的短半径直波导缺陷，此时禁带当中会激发一个透射峰^[21]。随着缺陷长度的增加，布拉格禁带中透射峰的个数逐渐增加，且带宽随着缺陷长度的增加逐渐变窄，而在此过程中透射峰的峰值却并未减小。对应图中蓝色曲线可以看出，当缺陷长度达到 20A 时，通带个数可达到 10~12 个，透射峰的峰值均可达到 98% 以上，且透射峰的平均半高全宽为 1.11 GHz，实现了高透过率的多通道窄带太赫兹滤波功能。该模拟结果表明，通过调节波导的缺陷长度，可以实现高透过率窄带宽通道数可调的太赫兹滤波。

2.2 带宽可调的太赫兹窄带滤波特性

在这种复合变截面周期性波导两端依然采用布拉格波导，缺陷长度设置为 20A，逐渐增加左右两端波导的周期个数，依次为 2, 3, 4, 5, 6, 7 时，研究不同周期个数对布拉格禁带中透射峰带宽的影响。由图 4(a)可以看出，随着两端波导的周期个数逐渐增加，通带所

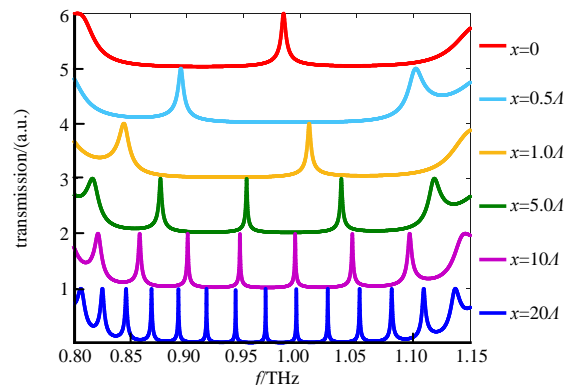


Fig.3 Terahertz transmission spectrum under different defect lengths
图 3 不同缺陷长度下太赫兹波的透射率

对应的频率位置和滤波通道的个数以及透射峰的透过率几乎没有发生变化。为了能够更加清晰地观察到带宽随周期个数的变化情况,图 4(b)中给出了 1 THz 附近透射峰带宽的变化曲线,并计算了相应的品质因子。结果表明随着周期个数的增加,带宽在急剧减小,相应的品质因子提高了近 4 个数量级,当两端变截面波导周期个数为 7 个时,带宽最窄可达 0.01 GHz。由此,通过改变两端变截面波导的周期个数,可以实现太赫兹多通道滤波器带宽的调控。

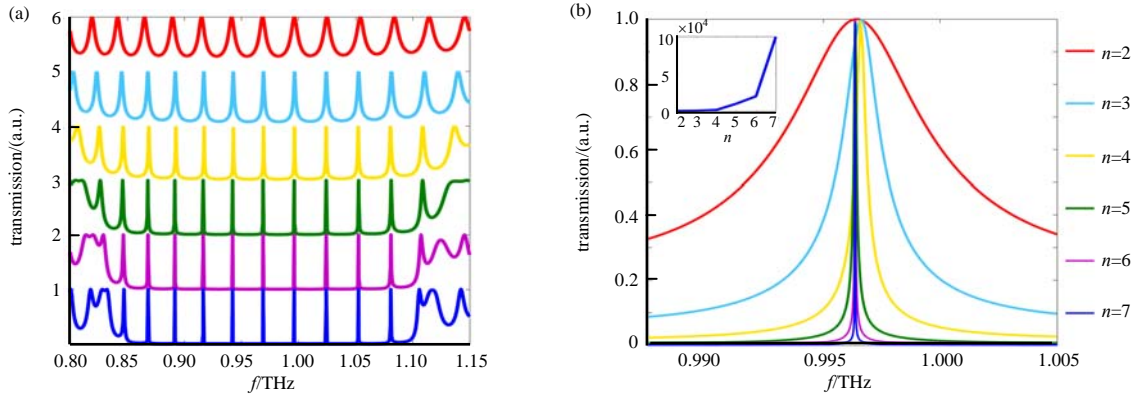


Fig.4 Influence of the periods number of waveguide on the terahertz transmission spectrum

图 4 波导的周期个数对太赫兹透射谱的影响

2.3 波导共振特性对滤波特性的影响

前面研究了两端均为布拉格波导的滤波特性,发现通过增加直波导缺陷的长度和周期个数,可以调谐通道数和透射峰的带宽,同时保持透射率不变,成功实现了通道数和带宽可调的太赫兹多通道滤波器。为了研究不同共振参数波导对滤波特性的影响,模拟了两端为非布拉格波导且波导的周期个数为 4 个时的透射光谱,结果如图 5 所示,逐渐增加直波导缺陷的长度,研究对禁带中透射峰的影响。由图 5 可以看出,非布拉格波导随着缺陷长度的增加,透射峰的个数同样会相应增加,且透射峰的峰值依然很高,对应图中蓝色曲线可以看出,当缺陷长度达到 $20A$ 时,与两端为布拉格波导的复合变截面周期结构相比,禁带中通带个数明显减少。

为了证明这里所设计的太赫兹波导滤波器优越的滤波性能,下面给出此滤波器与目前已报道的滤波器的性能对比,如表 1 所示。发现目前大部分类型的太赫兹滤波器,如平板波导、光子晶体以及超表面结构等,其 Q 因子普遍较低,然而本文所提出的基于多模共振的多通道太赫兹波导滤波器的 Q 因子远远高于上述滤波器件,提高了约两个数量级。

表 1 本文提出的太赫兹滤波器与目前已报道的滤波器的性能对比

Table1 Performance comparison between the proposed THz filter and other reported filters

terahertz filter type	proposed filter	plate waveguides ^[15]	photonic crystals ^[22]	metasurface ^[23]
Q-factor	100 000	220	943	104

本文所设计的太赫兹波导多通道滤波器可以做成实物并进行测试。在器件的实际生产中,采用传统的微纳加工技术和高精确度的 3D 金属打印技术,可以方便地加工出多缺陷周期波导结构。在这里,讨论了两种用于器件制造的微纳处理方法。第一种方法的主要过程是通过聚焦离子束和溅射涂层直接写入来制造半圆柱形空心金属结构,然后将其拼接成一个完整的周期波导。第二种方法的主要过程是:与空心变截面周期结构相比,制备实心变截面周期结构非常容易,以固体变截面周期结构为模板,采用溅射镀膜法制备外变截面周期结构,通过溶解固体结构模板制备完整的空心周期波导;然后,可以利用太赫兹时域光谱系统对波导的多通道

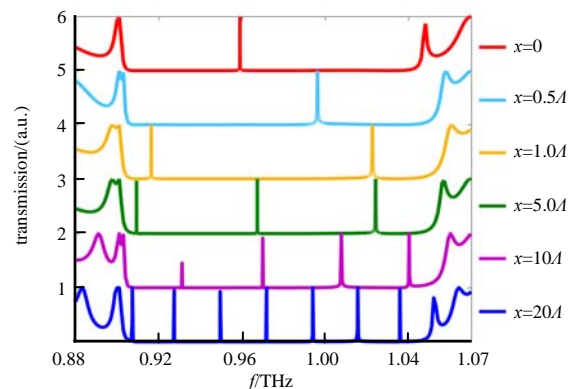


Fig.5 Terahertz transmission spectrum of different defect lengths when the two ends are non-Bragg waveguide

图 5 两端为非布拉格波导结构时,不同缺陷长度下的太赫兹透射谱

窄带滤波特性进行精确表征。在加工制备过程中,圆柱型波导内壁的平整度较难控制,是误差的主要来源,会对透射率、滤波带宽以及禁带位置产生较大影响,因此在实际生产中,应调试优化设备的加工参数,使得通过微纳处理方法制造的圆柱形空心金属结构内壁尽量光滑,进而实现更好的滤波性能。

3 结论

本文基于多模共振理论,研究了一种多通道太赫兹波导滤波器。在两段太赫兹变截面周期结构波导中引入直波导缺陷,在原有的禁带范围内形成了多通道窄带通道。通过数值模拟的方法对多通道滤波器的特性进行了研究,结果表明通过调节直波导缺陷长度可实现通道数从 1 到 12 的可调窄带滤波。此外通过调节变截面波导的周期个数,可达到调节通带带宽的目的,当两端波导的周期个数为 7 个时,通带带宽最窄,可达 0.01 GHz。最后将布拉格波导与非布拉格波导分类组合,研究不同组合方式对滤波特性的影响,结果表明两端为布拉格波导结构的滤波通带个数最多,带宽最窄最均匀,且透过率最高,均高于 98%。该滤波器具有结构紧凑、易于集成、透过率高、带宽和通道数可调的优点,为窄带、多通道、可集成的太赫兹波的实际应用需求提供重要的技术储备,同时也为未来的 6G 通信技术提供至关重要的技术参考。

参考文献:

- [1] 沈仕远,王元圣,池瑶佳,等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(1): 1-6. (SHEN Shiyuan,WANG Yuansheng,CHI Yaojia,et al. Phase transition material based coding metasurface for two-way terahertz beam steering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(1):1-6.)
- [2] 张旻南,李虹,马立鹏,等. 基于太赫兹人工超材料的带阻滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):185-188. (ZHANG Minnan,LI Hong,MA Lipeng,et al. A terahertz metamaterial for band-stop filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):185-188.)
- [3] XU M C,LIU S,ZHONG S Y. The properties of a tunable terahertz multi-channel filter from one-dimensional photonic crystal doped by magnetized plasma defect[J]. Optical and Quantum Electronics, 2019,51(115):1-11.
- [4] MATLOUB S,HOSSEINZADEH M,ROSTAMI A. The narrow band THz filter in metallic photonic crystal slab framework: design and investigation[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014,125(21):6545-6549.
- [5] KARAKLİN Z N,TEZ S,KAYA M. Photonic crystal bandpass filter exploiting the degenerate modes tunable with MEMS actuator for terahertz application[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021,63(7):1813-1819.
- [6] ZHUANG H,LIU C,LI F,et al. Tunable plasmonic filter based on parallel bulk Dirac semimetals at terahertz frequencies[J]. Applied Optics, 2021,60(13):3634-3640.
- [7] JIANG M,HU F,QIAN Y,et al. Tunable terahertz bandpass filter based on MEMS reconfigurable metamaterials[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2020,53(6):065107.
- [8] LUO J,SHI X,LUO X,et al. Broadband switchable terahertz half-/quarter-wave plate based on metal-VO₂ metamaterials[J]. Optics Express, 2020,28(21):30861-30870.
- [9] KINDNESS S J,ALMOND N W,MICHAÏLOW W,et al. A terahertz chiral metamaterial modulator[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(21):2000581.
- [10] LEE S,BAEK S,KIM T,et al. Metamaterials for enhanced optical responses and their application to active control of terahertz waves[J]. Advanced Materials, 2020,32(35):2000250.
- [11] HE X,LIU F,LIN F,et al. Investigation of terahertz all-dielectric metamaterials[J]. Optics Express, 2019,27(10):13831.
- [12] WANG Q,GAO B,RAGLIONE M,et al. Terahertz optoelectronics:design,fabrication,and modulation of THz bandpass metamaterials[J]. Laser & Photonics Review, 2019,13(11):1-22.
- [13] FAN Y X,QIAN Y X. Multi-band tunable terahertz bandpass filter based on vanadium dioxide hybrid metamaterial[J]. Materials Research Express, 2019,6(055809):1-8.
- [14] PARKER-JERVIS R S,PARK S J. Tunable terahertz band-stop filter using strongly coupled split ring resonators integrated with on-chip waveguide[J]. Journal of Applied Physics, 2021,129(5):053101.
- [15] JIA K H,FAN L N,CAO Z L. THz narrow bandpass filter based on stopband modulation in corrugated parallel plate waveguides[J]. Optics Communications, 2020,456(125604):1-5.
- [16] LEE E S,SO J K,PARK G S,et al. Terahertz band gaps induced by metal grooves inside parallel-plate waveguides[J]. Optics Express, 2012,20(6):6116-6123.

- [17] LEE E S, JEON T I. Tunable THz notch filter with a single groove inside parallel-plate waveguides[J]. *Optics Express*, 2012,20(28):29605–29612.
- [18] ZHANG K, FAN Y X, XU L L, et al. Terahertz flat-top broadband defect modes generated in periodically undulated waveguides[J]. *Physica Scripta*, 2021,96(6):065503.
- [19] FERRERA J, THOEN E R, STEINMEYER G, et al. Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides[J]. *Nature*, 1997,390(6656):143–145.
- [20] MUNDAY J N, BRADBENNETT C, ROBERTSON W M. Band gaps and defect modes in periodically structured waveguides[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002,112(4):1353–1358.
- [21] ZHANG L, FAN Y X, LIU H, et al. A magnetically tunable non-Bragg defect mode in a corrugated waveguide filled with liquid crystals[J]. *Physics Letters A*, 2018,382(14):1000–1005.
- [22] BELHADJ W, AL-AHMADI A N. Tunable narrowband terahertz multichannel filter based on one-dimensional graphene-dielectric photonic crystal[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021,53(1):1–17.
- [23] YAN F, LI Q, WANG Z W, et al. Extremely high Q-factor terahertz metasurface using reconstructive coherent mode resonance[J]. *Optics Express*, 2021,29(5):7015–7023.

作者简介：

马 静(1991–)，女，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹技术及功能器件研究.email:jingma900526@163.com.

刘 欢(1989–)，男，黑龙江省哈尔滨市人，讲师，硕士生导师，主要研究方向为太赫兹技术及功能器件研究.

张 昆(1992–)，男，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹技术及功能器件研究.

陶智勇(1976–)，男，黑龙江省大庆市人，博士，教授，主要研究方向为太赫兹波导理论与技术、线性与非线性声学.

樊亚仙(1975–)，女，内蒙古自治区通辽市人，博士，教授，主要研究方向为太赫兹波导理论与技术、线性与非线性声学.

(上接第 807 页)

- [6] MORINI A, VENANZONI G, FARINA M, et al. Practical design of a high-power tuning-less W-band triplexer for ground radar surveillance systems[J]. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 2007,1(4):822–826.
- [7] SKAIK T, LANCASTER M, KE M, et al. A micromachined WR-3 band waveguide diplexer based on coupled resonator structures[C]// 2011 41st European Microwave Conference. Manchester, UK: IEEE. doi:10.23919/EuMC.2011.6101851.
- [8] ZHAO Xinghai, GLUBOKOV O, CAMPION J, et al. Silicon micromachined D-band diplexer using releasable filling structure technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020,68(8):3448–3460.
- [9] KOJIMA T, GONZALEZ A, ASAYAMA S, et al. Design and development of a hybrid-coupled waveguide multiplexer for a multiband receiver[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017,1(7):10–19.
- [10] HOOFFER S. The design of ridged waveguide[J]. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1955(5):20–29.
- [11] DING Jiangqiao, HU Jie, LIU Dong, et al. A 240 GHz wideband ridged waveguide filter based on MEMS process[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017,38(3):283–291.
- [12] 许广阳, 赵芸, 陈垚, 等. W 波段单 E 面耦合宽带波导滤波器[J]. *微波学报*, 2021,37(3):60–64. (XU Guangyang, ZHAO Yun, CHEN Yao, et al. W-band broadband waveguide filter with single E-plane coupling[J]. *Acta Microwave*, 2021,37(3): 60–64.)
- [13] CAMERON R J, YU M. Design of manifold-coupled multiplexers[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2007,8(5):46–59.

作者简介：

张沁旖(2000–)，女，江苏省苏州市人，本科，研究方向为电磁场与微波技术.

丁江乔(1987–)，男，南京市人，博士，讲师，研究方向为太赫兹器件.email:jqding@nuist.edu.cn.