

文章编号: 1005-5630(2020)05-0007-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.05.002

太赫兹可调谐滤波器设计

宋 健

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了实现太赫兹信号的可调谐滤波, 设计了一种基于柔性材料的太赫兹可调谐滤波器。通过扭曲特氟龙(Teflon)波导形成环型谐振器, 实现了160~200 GHz频段的带阻滤波功能。改变谐振腔长可实现自由频谱范围(FSR)和滤波频点的调谐, 实验测试了自由频谱范围在1.9 GHz和2.8 GHz间切换以及相应的滤波特性。研究表明, 谐振腔长一定时, 改变弯曲半径可实现滤波阻带抑制度的调节, 柔性材料太赫兹环型谐振器可用于可调谐滤波, 且具有较高的自由度。

关键词: 太赫兹波; 柔性材料; 谐振腔; 滤波器

中图分类号: TN 252 **文献标志码:** A

Terahertz tunable filter design

SONG Jian

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

Abstract: In order to realize terahertz tunable filtering wave, a terahertz tunable filter based on flexible materials was designed. By twisting the Teflon waveguide to form a ring resonator, the band-stop filter function in the 160 GHz to 200 GHz frequency band is realized. Changing the length of the resonant cavity can achieve the tuning of the free spectral range (FSR) and the filtering frequency. In the experiment, the switching of the free spectral range between 1.9 GHz and 2.8 GHz and the corresponding filtering characteristics are tested. Research results show that when the length of the resonant cavity is fixed, the stopband can be adjusted by changing the bending radius. The terahertz ring resonator using flexible materials can be used for tunable filtering and has a higher degree of freedom.

Keywords: terahertz wave; flexible materials; resonant cavity; filter

引 言

太赫兹波是一种介于红外和微波的电磁波,

通常其频率被定义为100 GHz~10 THz。太赫兹波因其穿透性强、安全性高、定向性好等特点已被广泛应用于通信、雷达和人体检测等领域^[1]。

收稿日期: 2020-04-28

作者简介: 宋 健(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹集成光子学器件。

E-mail: 511060350@qq.com

滤波器的发展开始于 20 世纪初, 伴随着滤波器理论的完善, 同轴谐振器、微带谐振器、波导谐振器和介电谐振器等器件被使用于微波射频领域的滤波中^[2-4]。

集成光学中的滤波通常使用微环谐振器来实现^[5]。在 1969 年 Marcatili 首次提出了环形谐振器结构, 并证实了该结构可支持行波谐振模式^[6]。在 1997 年 Rafizadeh 等利用 AlGaAs/GaAs 材料制备了微环直径只有 10 μm 的波导耦合微腔环形与圆盘谐振器^[7-9]。在 1998 年 Hagness 等通过有限时域差分(FDTD)法求解麦克斯韦方程组, 表征了波导色散以及弯曲和散射损耗对于微环谐振器耦合效率和谐振频率的影响, 为微环谐振器性能的研究提供了理论依据^[10-11]。随着制造工艺的突破, 微环谐振器飞速发展, 各种结构复杂的平面波导微环谐振器使器件集成度、精密度越来越高^[12-14]。

目前, 太赫兹波段的环形谐振器通常是采用高阻硅材料来实现滤波, 然而材料的高折射率导致集成器件精密且更易被损坏。通常谐振点的热调控利用了硅的折射率随温度改变的这一特性, 但这种调控方式很难对滤波频率进行大范围调节^[15-17]。因此, 本文采用了类似于微纳光纤的方法制作太赫兹可调谐滤波器。

1 可调谐滤波器物理模型

可调谐滤波器采用单微环谐振结构, 如图 1 所示。器件通常利用直波导(或弯曲矩形或脊形波导)输入光信号, 利用输入波导与圆环波导之间的耦合产生谐振来实现滤波功能。因其带阻滤波特性, 单微环谐振器也被称为全通型微环谐振器。该器件基本工作原理是光的干涉原理: 只有圆环周长是入射波长整数倍时谐振光波才能够产生干涉相消现象, 而光波是通过倏逝波形式耦合进入微环中^[18]。

谐振波长和圆环周长满足以下方程:

$$n_{\text{eff}}L = m\lambda_m \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为圆环波导有效折射率; L 为微环周长; λ_m 为谐振波长; m 为谐振级数(取正整数)。假设通过微环中心与耦合界面 S 两侧的输

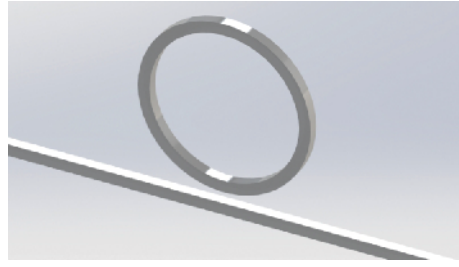


图 1 可调谐滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of tunable filter

入和输出光场振幅分别为 E_{i1} 、 E_{i2} 和 E_{t1} 、 E_{t2} , 直波导和微环如图 2 所示。

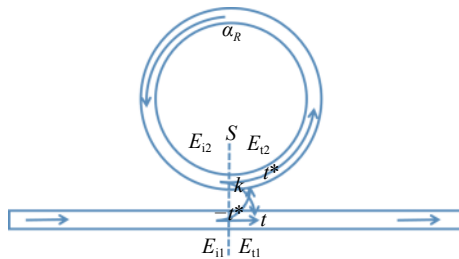


图 2 可调谐滤波器电场传输示意图

Fig. 2 Schematic of electric field transmission of tunable filter

直波导与单环振幅满足

$$\begin{bmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: t 为直波导和微环波导之间的光场振幅透过率; k 为直波导和微环波导之间的光场振幅耦合比率; $*$ 为共轭复数。在无损耦合状态下, t 、 k 关系满足 $t^2 + k^2 = 1$ 。

微环中的光场振幅变化表示为

$$E_{i2} = E_{t2}\alpha \cdot e^{j(\theta + \Delta\psi)} \quad (3)$$

式中: α 为传输因子, 由损耗系数 τ 和微环周长 L 决定; θ 为光在微环中传播一圈的相位; $\Delta\psi$ 为外在调制导致微环附加的相移。当 $\Delta\psi = 0$ 时,

$$\alpha = e^{-\tau \cdot L} \quad (4)$$

$$\theta = \beta L = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L \quad (5)$$

式中 β 为传播常数。联立式(2)、式(3)和式(4), 得到振幅传递函数如下:

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{t - \alpha e^{j(\theta + \Delta\psi)}}{1 - \alpha t e^{j(\theta + \Delta\psi)}} \quad (6)$$

根据光强和电场强度之间的关系, 由式(6)推导出输出端光强透射率, 即

$$T = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{\alpha^2 + t^2 - 2\alpha t \cos(\theta + \Delta\psi)}{1 + \alpha^2 t^2 - 2\alpha t \cos(\theta + \Delta\psi)} \quad (7)$$

将产生谐振的条件 $\theta + \Delta\psi = 2m\pi$ 代入式(7), 可得

$$T = \frac{(\alpha - t)^2}{(1 - \alpha t)^2} \quad (8)$$

当 $\alpha = t$ 时, $T = 0$, 此时在输出端谐振波长处对应的光强等于零, 即光波在微环里传输一周的损耗等于通过耦合进入微环的能量, 这种光场能量都集中在微环上的情况称为临界耦合。当 $\alpha < t$ 时, 此时微环谐振器处于欠耦合状态。当 $\alpha > t$ 时, 此时微环谐振器处于过耦合状态。

2 实验系统和结果分析

2.1 实验系统

实验中, 我们采用矢量网络分析仪测试样品的频谱, 所测试的特氟龙(介电常数约 2.0, 正切损耗角约 0.0002)加工成直径为 1 mm、长度为 30 cm 的细线状。样品两端通过与拓展模块波导口直接耦合来实现能量传输, 实验系统如图 3 所示^[9]。

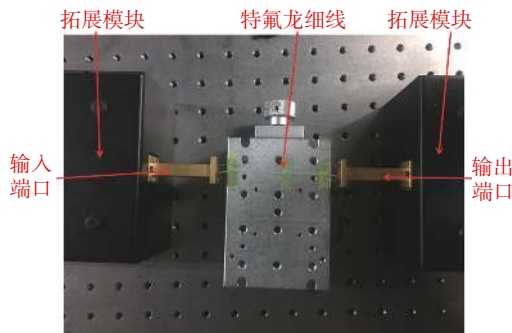


图 3 实验系统图

Fig. 3 Experimental setup

2.2 结果分析

首先将特氟龙细线置于位移平台上, 通过图 3 实验系统测试特氟龙细线在太赫兹频段的传输性能, 测试结果如图 4 所示。本实验主要

测试了特氟龙材料在 140~220 GHz 频段的透射谱。

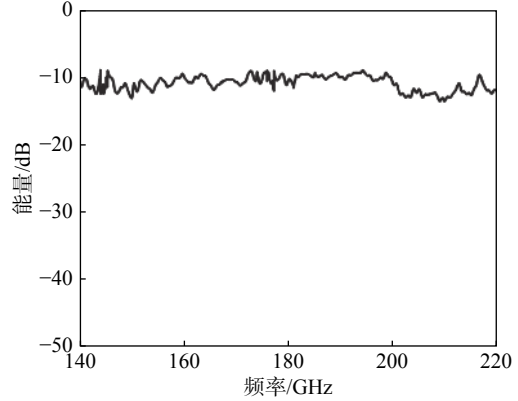


图 4 器件透射谱

Fig. 4 Device transmission spectrum

根据图 4 可以得出, 直径 1 mm 的特氟龙细线在 140~220 GHz 频段传输效率较高, 其中在 140~200 GHz 频段, 样品的传输损耗大约为 -10 dB, 而在 200~220 GHz 频段时, 传输性能低于 140~200 GHz (200~220 GHz 传输损耗约为 -13 dB)。由于特氟龙材料在太赫兹频段几乎无损耗, 因此实验中传输曲线显示的损耗主要来源于拓展模块波导口和样品圆波导直接耦合, 即插入损耗约为 -10 dB。

根据式(1)微环谐振器满足的谐振式, 可以得出, 随着谐振长度的增长, 相邻的谐振点波长间隔也随之增加。为了验证谐振环的长度对谐振的影响, 通过改变特氟龙扭曲的谐振长度来测试器件的透射谱, 由实验得到的谐振长度与透射关系曲线如图 5 所示。

当扭曲的谐振长度为 21.33 cm 和 14.22 cm 时, 测试得到的透射谱呈现周期不同的谐振峰: 谐振长度为 21.33 cm 时, 器件的自由频谱范围约为 1.9 GHz; 而谐振长度为 14.22 cm 时, 器件的自由频谱范围约为 2.8 GHz。由此我们可以得出, 谐振长度越长, 相邻谐振点的频率间隔越短。同时可以知道, 随着谐振长度的变化, 其整体的传输效率也发生了改变, 这是由于不同谐振长度所形成的圆环弯曲半径不同而产生。谐振长度较短时, 形成的圆环弯曲半径较小, 当光信号在环形腔中传播时, 由于波导的束缚性不够, 导致了大量的能量散射, 因此降低了器件整体的传输效率。

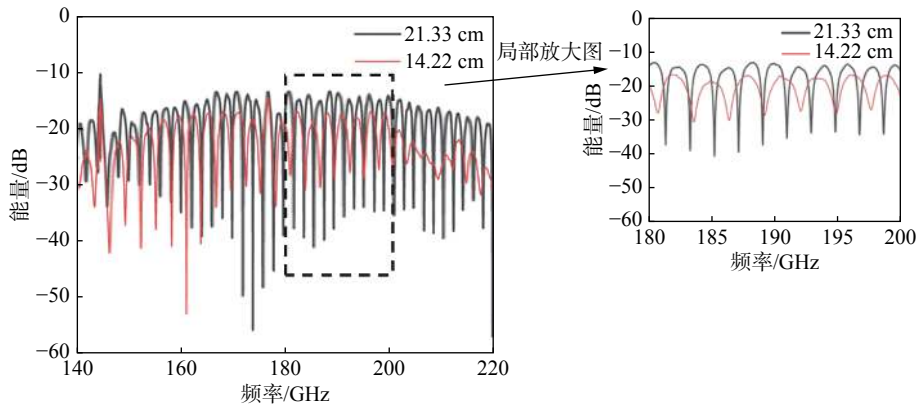


图 5 不同谐振长度透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of different resonance lengths

保持谐振长度不变，通过改变圆环的弯曲形状来对比透射谱中谐振峰的深度，实验结果如图 6 所示。

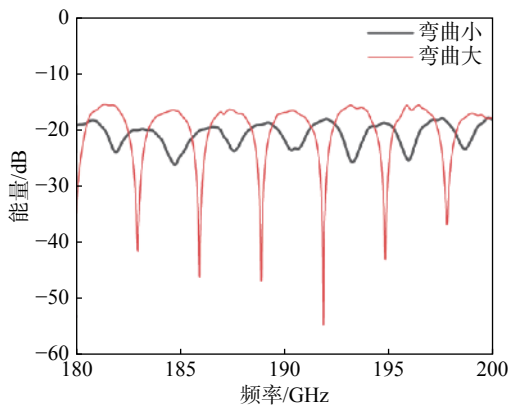


图 6 不同弯曲半径透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of different bending radius

由图 6 可以得出，频率在 180~200 GHz 时，特氟龙扭曲的圆环弯曲半径不同造成了透射谱的谐振深度也不同。改变弯曲半径实质上是改变了环形结构的传输因子 α ，当传输因子 α 和直波导、环形波导之间的振幅透射率 t 越相近，器件的谐振效果越佳。通过扭曲形成的环形谐振器可以改变环内弯曲半径，从而改变谐振腔与直波导间的耦合状态。

3 结 论

本文通过建立物理模型研究了影响微环谐振器谐振峰位置和耦合状态的因素，并设计了太赫

兹可调谐滤波器。在太赫兹波段利用矢量网络分析仪验证了扭曲柔性特氟龙材料形成的环形谐振腔可实现滤波的功能，同时证实了特氟龙在太赫兹波段的高传输效率。本文通过扭曲特氟龙来调谐谐振环长度和圆环弯曲半径，并研究了这两个参数对器件透射谱的影响。以柔性材料制备的可调谐环形谐振腔不仅有效降低了加工成本，而且解决了器件易损坏的问题。

参考文献：

[1] FATTINGER C, GRISCHKOWSKY D. Point source terahertz optics[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 53(16): 1480 – 1482.

[2] 李奇. 无线通信中微带滤波器的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

[3] 赖鑫. 微带多通带和宽带滤波器研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

[4] 王玺. 带传输零点的紧凑型滤波器 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[5] LITTLE B E, CHU S T. Toward very large-scale integrated photonics[J]. *Optics and Photonics News*, 2000, 11(11): 24.

[6] MARCATILI E A J. Bends in optical dielectric guides[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7): 2103 – 2132.

[7] RAFIZADEH D. Experimental realization of nanofabricated semiconductor waveguide-coupled microcavity ring and disk optical resonators[D]. Xi'an: Northwestern University, 1997.

[8] RAFIZADEH D, ZHANG P J, HAGNESS C S, et al.

- Temperature tuning of microcavity ring and disk resonators at 1.5- μm [C]//Conference proceedings. LEOS '97. 10th annual meeting IEEE lasers and electro-optics society 1997 annual meeting. San Francisco: IEEE, 1997: 162-163.
- [9] RAFIZADEH D, ZHANG J P, HAGNESS S C, et al. Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6-nm free spectral range[J]. *Optics Letters*, 1997(22): 1244 – 1246.
- [10] HAGNESS S C. FDTD computational electromagnetics modeling of microcavity lasers and resonant optical structures[D]. Xi'an: Northwestern University, 1998.
- [11] HAGNESS S C, RAFIZADEH D, HO S T, et al. FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(11): 2154 – 2165.
- [12] LI C, MA N, POON A W. Waveguide-coupled octagonal microdisk channel add-drop filters[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 471 – 473.
- [13] MA N, LI C, POON A W. Laterally coupled hexagonal micropillar resonator add-drop filters in silicon nitride[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2487 – 2489.
- [14] LI C, ZHOU L J, ZHENG S M, et al. Silicon polygonal microdisk resonators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1438 – 1449.
- [15] 刘德兵, 刘祖其. 硅基太赫兹微环谐振器的设计与分析 [J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(5): 84 – 87.
- [16] 潘武, 周亚婷, 邓珊, 等. 太赫兹硅基微环谐振器的设计与分析 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(5): 571 – 575.
- [17] KATTI R, PRINCE S. Microring resonator-based photonic system for terahertz signal generation[J]. *Photonic Network Communications*, 2019, 38(1): 75 – 88.
- [18] 陈朋鑫. 硅基微环谐振器特性研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [19] 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.

(编辑: 刘铁英)