

基于二氧化钒的可调谐太赫兹宽带带通滤波器

王岩, 陈哲*, 崔琦

云南大学信息学院, 云南 昆明 650500

摘要 提出了一种基于二氧化钒超材料的可调谐宽带带通滤波器。仿真结果表明:该滤波器在中心频率 5.19 THz 处的 3 dB 带宽为 1.71 THz, 最高传输率能够达到 0.77, 并且在入射角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内具有稳定的宽带传输性能。运用谐振频率处的表面电流分布和等效电路法, 阐述了其实现宽带传输的物理机制。由于二氧化钒独特的相变特性, 通过改变二氧化钒的电导率, 滤波器的带宽可以从 1.71 THz 动态调谐至 2.31 THz。该滤波器具有结构简单、宽通带以及可调谐等特性, 有望在宽带太赫兹通信、传感以及其他新兴的太赫兹领域发挥重要的作用。

关键词 光学器件; 滤波器; 二氧化钒; 等效电路; 超材料

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2023002

Tunable Terahertz Broadband Bandpass Filter Based on Vanadium Dioxide

Wang Yan, Chen Zhe*, Cui Qi

School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract A tunable broadband bandpass filter is proposed, which is based on vanadium dioxide (VO_2) metamaterial. The simulation results show that the 3 dB bandwidth of this filter is 1.71 THz with the central frequency of 5.19 THz and the largest transmission rate of 0.77. Furthermore, this filter can maintain stable broadband transmission performances within the incidence angles of $0^\circ \sim 40^\circ$. The physical mechanism of this kind of filter performance is investigated based on the equivalent circuit of this filter and its surface current distributions at the resonance frequencies. Owing to the unique phase transition property of VO_2 , the bandwidth of the filter can accordingly change from 1.71 THz to 2.31 THz by tuning the conductivity of VO_2 . The proposed metamaterial filter possesses the advantages of structural simplicity, broadband performance, and tunable property, which makes it possible to find promising applications in THz communications, sensing and other emerging areas.

Key words optical devices; filter; vanadium dioxide; equivalent circuit; metamaterial

OCIS codes 230.4170; 160.3918; 300.6370

1 引言

太赫兹(terahertz, THz)波指介于微波与红外光之间的在 0.1~10 THz 频率范围内的电磁波。由于其独特的特性,其在无线通信、医学成像和安全检测等领域具有重要的应用^[1-3]。超材料(metamaterial)是一种人工介质材料^[4],具备天然

材料所不具有的电磁特性。最近,基于超材料的太赫兹器件,例如调制器^[5-6]、吸收器^[7-9]和滤波器^[10-12]等都得到了快速的发展。

在这些器件中,太赫兹带通滤波器在无线通信、传感等领域具有广阔的发展前景,已经成为最重要的太赫兹器件之一。2011年,文献[13]基于 4 倍旋转对称的金属-介质-金属(Metal-dielectric-metal,

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(62061051)、云南省基础研究计划(202001BB050056, 202101AT070187)、云南省光电信息技术重点实验室开放基金(YNOE-2018-02)、云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划(C176220200)

通信作者: *zhechen@ynu.edu.cn

MDM)三明治复合结构,提出了一种宽带太赫兹带通滤波器^[13],该滤波器的 3 dB 带宽为 0.5 THz,具有显著的宽带滤波特性。2012 年,文献[14]基于双层鳞斑状超材料设计了一种宽带带通滤波器^[14],3 dB 带宽为 1.13 THz,通带内的最高传输率为 0.6。2017 年,文献[15]基于上下不对称的 MDM 结构,提出了一种极化不敏感的多频段带通滤波器^[15],在中心频率 0.42, 1.27, 1.86 THz 处的 3 dB 带宽分别为 0.16, 0.11, 0.1 THz。2021 年,文献[16]基于双金属环提出了一种宽带带通滤波器^[16],在 0.54 THz 带宽的通带内,最高传输率能够达到 0.93。然而,基于超材料的太赫兹滤波器多由金属和介质材料构成,其传输特性在器件制备后无法调谐,这限制了滤波器在实际中的应用。最近,二氧化钒(VO₂)和石墨烯等可调谐材料的出现为设计可调谐的滤波器提供了一种新的思路。二氧化钒是一种相变材料,在电、热或光的激励下,二氧化钒可实现从绝缘态到金属态的可逆转变^[17-18]。2019 年,文献[19]基于二氧化钒设计了一种可调谐带通滤波器^[19],0.5 THz 处的最高传输率为 0.9,通过外加调谐,最高调制深度可达 96%。2019 年,文献[20]基于二氧化钒设计了一种双波段的可调谐带通滤波器^[20],在 0.59 THz 和 0.86 THz 处的传输率分别可以达到 0.84 和 0.8。

基于二氧化钒超材料的太赫兹滤波器设计灵活,可实现较大的动态调谐范围,关于其工作机制的解释更多采用基于三维电磁仿真(Electromagnetic simulation, EM simulation)的表面电流分布分析方法。而在相关分析方法中,等效电路法(Equivalent circuit, EC)^[21]可把较复杂的电磁问题

转变为较为直观的传输线问题,并能够在等效电路模型中求出各模型元件值,便于定量分析,具有直观及物理含义明确的特点。

本文提出了一种嵌入二氧化钒的可调谐超材料宽带带通滤波器,该滤波器在中心频率处的 3 dB 带宽为 1.71 THz,并且通带内最高传输率可以达到 0.77。采用模拟表面电流分布以及等效电路法,解释了发生宽带传输的物理机制。同时,通过改变器件温度来改变二氧化钒的电导率,该滤波器的带宽能够从 1.71 THz 增加至 2.31 THz。

2 结构设计

图 1 为本文所设计的超材料滤波器的单元结构以及具体的几何参数。如图 1(a)所示,电磁波沿着垂直于器件表面的方向入射。它包含三层结构:顶层由嵌入一字形二氧化钒的方环槽金属板构成,这里金属材料选择铝,其电导率设为 $\sigma_{\text{aluminum}} = 3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[19],厚度设为 t_2 ;中介质层选择无耗材料聚乙烯环烯烃共聚物(Polyethylene cyclic olefin copolymer, ToPaS),其相对介电常数设为 $\epsilon_r = 2.35$ ^[22],厚度设为 t_s ;底层是与顶层相同的金属谐振结构,厚度设为 t_1 。与传统的基于金属和介质的太赫兹滤波器不同,该滤波器结构嵌入了相变材料二氧化钒,当改变温度使二氧化钒发生相变时,可以实现滤波器的传输带宽可调谐。单元结构具体的几何参数设置如下:单元周期 $P = 15 \mu\text{m}$,方环槽的外边长 $l_1 = 13 \mu\text{m}$,其宽度 $W_1 = 1 \mu\text{m}$,二氧化钒的长度 $l_2 = 8 \mu\text{m}$,其宽度 $W_2 = 2 \mu\text{m}$, $t_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $t_s = 9 \mu\text{m}$, $t_2 = 0.2 \mu\text{m}$ 。

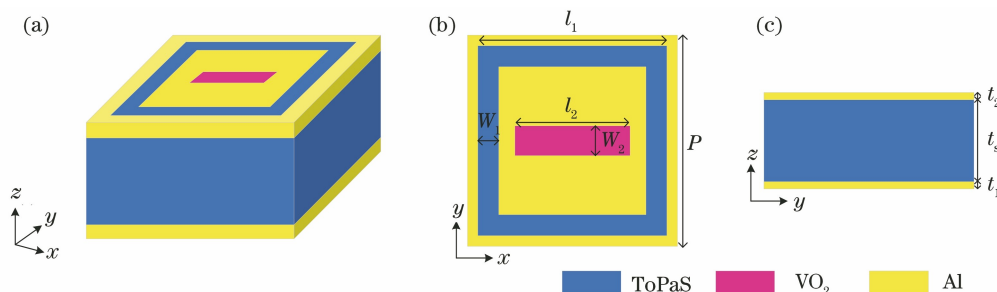


图 1 超材料滤波器单元的结构示意图和几何参数。(a)三维示意图;(b)俯视图;(c)侧视图

Fig. 1 Structural diagrams and geometric parameters of metamaterial filter unit. (a) Three-dimensional diagram; (b) top view; (c) side view

在太赫兹频段内,二氧化钒的相对介电常数可以使用 Drude 模型导出^[19],即 $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\omega\gamma}$,其中碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$,在无限频率下的相

对介电常数 $\epsilon_\infty = 12$,等离子体频率 ω_p 可近似定义为 $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\delta_0} \omega_p^2(\sigma_0)$,其中 $\sigma_0 = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$,并且 $\omega_p^2(\sigma)$ 和二氧化钒的电导率 σ

与自由载流子密度成正比, ω 为入射波的角频率。在室温环境下, 二氧化钒处于绝缘态, 此时二氧化钒的电导率设为 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 。当器件温度增加至 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 二氧化钒将经历相变, 并且伴随电导率的增加。当二氧化钒转变为完全的金属态时, 二氧化钒的电导率设为 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ ^[9]。此外, 本文使用商用软件 CST Microwave Studio 来仿真该滤波器的传输特性。在本文的设置中, 在 x 和 y 方向上设置为周期性边界条件(unit cell), 在 z 方向上设置为开放性边界条件(open add space), 并且横电(Transverse electric, TE)波是沿 x 方向极化的。另外, 滤波器的传输率可由 $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 导出, 其中 S_{21} 表示滤波器的传输系数, 可由仿真结果直接得到。

3 结果与讨论

图 2 所示为当二氧化钒电导率 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 时, 所提超材料滤波器的传输率和传输系数幅度的仿真曲线。为了研究该滤波器的特性, 本文主要考虑滤波器的传输系数 S_{21} , 然后通过 $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 得到滤波器的传输率仿真曲线。从图 2 中可以看出, 当电磁波垂直入射到该结构表面时, 出现一个宽的通

带(如图 2 中黑实线所示), 在谐振频率 $f_1 = 4.74 \text{ THz}$ 和 $f_2 = 5.64 \text{ THz}$ 处分别出现一个传输峰。通带内滤波器的最高传输率可以达到 0.77, 并且在中心频率 $f_0 = 5.19 \text{ THz}$ 处的 3 dB 带宽为 1.71 THz 。通过观察, 可以看出, 该滤波器在所研究的频率范围内具有较好的带外抑制, 可以实现较为理想的滤波效果。

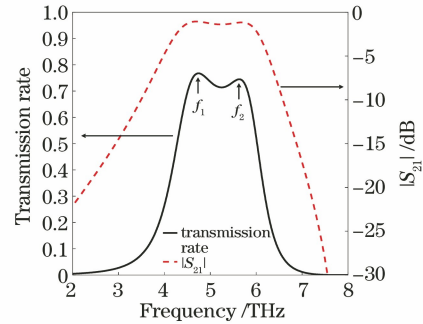


图 2 超材料滤波器的传输率和传输系数幅度曲线
Fig. 2 Transmission rate and transmission coefficient magnitude curves of metamaterial filter

图 3(a)、(c)分别模拟了在低谐振频率 f_1 处顶层和底层的表面电流分布, 图 3(b)、(d)分别模拟了在高谐振频率 f_2 处顶层和底层的表面电流分布。从图 3(a)、(c)可以看出, 在低谐振频率处, 表面电

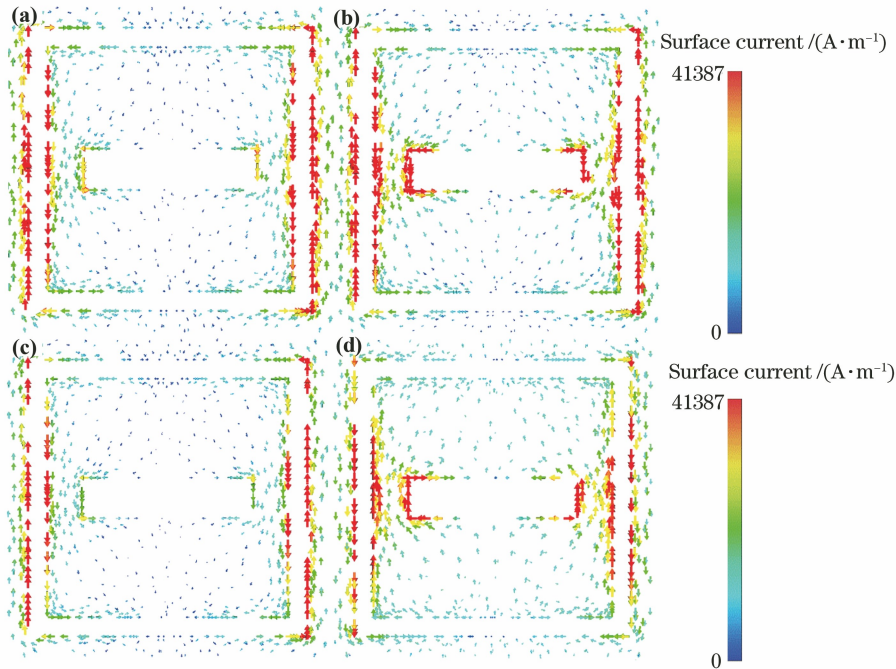


图 3 超材料滤波器在谐振频率处的表面电流分布。在(a) $f_1 = 4.74 \text{ THz}$ 和(b) $f_2 = 5.64 \text{ THz}$ 处的顶层表面电流分布; 在(c) $f_1 = 4.74 \text{ THz}$ 和(d) $f_2 = 5.64 \text{ THz}$ 处的底层表面电流分布

Fig. 3 Surface current distributions of metamaterial filter at resonance frequencies. Surface current distributions of top layer at (a) $f_1 = 4.74 \text{ THz}$ and (b) $f_2 = 5.64 \text{ THz}$; surface current distributions of bottom layer at (c) $f_1 = 4.74 \text{ THz}$ and (d) $f_2 = 5.64 \text{ THz}$

流主要分布在金属板方环槽的左右两边,并且顶层和底层的表面电流振荡方向相同,这将产生电谐振。当入射电磁波的频率与该谐振频率相同时,将在该频率处发生太赫兹波传输增强的现象,产生第一个通带。而在高谐振频率处,从图 3(b)、(d)可以看出,表面电流主要分布在金属板方环槽的左右两边以及一字形二氧化钒的左右两端,并且顶层和底层的表面电流振荡方向相反,这将产生磁谐振^[23]。与低谐振频率处的情况相似,当入射电磁波的频率与该谐振频率相同时,将产生第二个通带。最后,这两个通带相互结合,在所研究的太赫兹频率范围内形成一个宽通带。

为了定量地理解实现宽带传输的物理机制,本文研究了该滤波器的等效电路模型。当二氧化钒电导率 $\sigma=10\text{ S/m}$ 时,二氧化钒处于绝缘态,此时一字形的二氧化钒可以等效为顶层内侧金属贴片之间的一段“空隙”。如图 4(a)所示,外侧金属环 A 和 B 点两边的金属部分等效为电感 L'_1 和 L'_2 并联,外侧金属环与内侧金属贴片之间的空隙等效为上下左右四个电容 C'_1 、 C'_2 、 C'_3 和 C'_4 ,金属贴片 C 和 D 点两侧

的金属部分等效为电感 L'_3 和 L'_4 并联,金属贴片之间的“空隙”等效为 C 和 D 点之间的电容 C'_5 。为了方便电路仿真和计算,首先将顶层的等效电路进行简化,结果如图 4(b)所示。其中 $L_1=L'_1L'_2/(L'_1+L'_2)$ 为电感 L'_1 和 L'_2 的并联, $C_1=(C'_1+C'_3)(C'_2+C'_4)/(C'_1+C'_2+C'_3+C'_4)$ 等效为并联电容 $C'_1//C'_3$ 和 $C'_2//C'_4$ 的串联, $L_3=L'_3L'_4/(L'_3+L'_4)$ 为电感 L'_3 和 L'_4 的并联, $C_3=C'_5$ 。由于底层和顶层是完全相同的金属谐振结构,因此等效电路也完全一致。

根据上述分析,在正入射情况下,所提超材料滤波器的等效电路模型如图 5 所示。其中,滤波器的入射端和出射端分别等效为端口 1 和 2, $Z_0=377\ \Omega$ 为自由空间波阻抗。顶层和底层的等效电路如图 4(b)所示。介质层可以看作一段短的传输线,其长度 h 等于介质的厚度,传输线的特性阻抗 $Z_T=Z_0/\sqrt{\epsilon_r}$ ^[24]。因而可以构建出完整的电路。最后,利用电路仿真软件 Advanced Design System(ADS)对等效电路模型的频率响应进行仿真。

图 5 中等效电路元件的初值可以通过以下步骤计算获得。

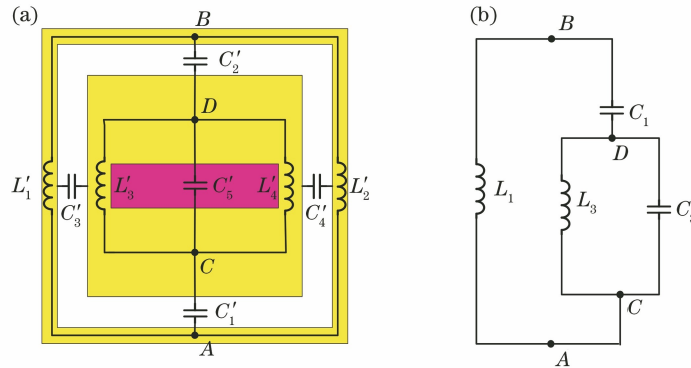


图 4 超材料滤波器顶层结构的等效模型。(a)等效电路;(b)简化电路

Fig. 4 Equivalent models of top layer of metamaterial filter. (a) Equivalent circuit; (b) simplified circuit

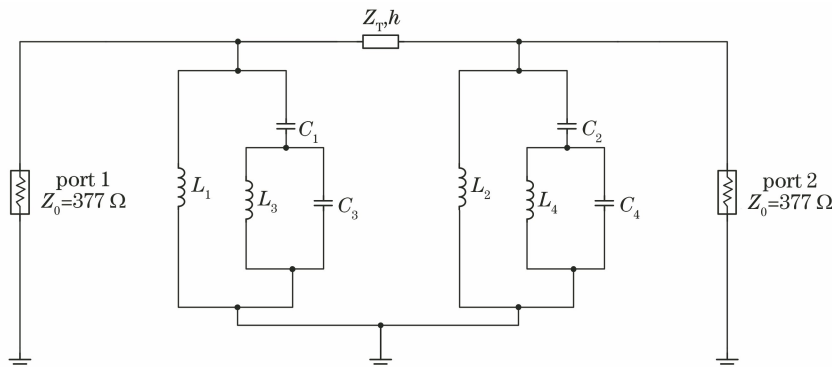


图 5 超材料滤波器的等效电路模型

Fig. 5 Equivalent circuit model of metamaterial filter

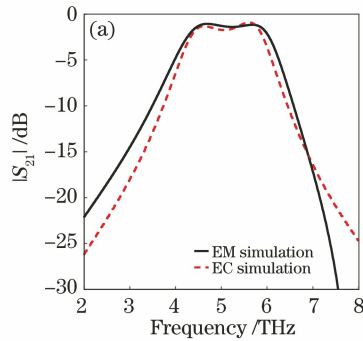
$C_i (i=1,2,3,4)$ 的值^[21]为

$$C_i = \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \frac{2P}{\pi} \ln \left[\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi W}{2P}\right)} \right], \quad (1)$$

式中： ϵ_0 为自由空间的介电常数； ϵ_{eff} 为介质的有效介电常数且 $\epsilon_{\text{eff}} \approx (1 + \epsilon_r)/2$ ^[24]； P 为结构的周期长度； W 为金属之间的空隙宽度。

$L_i (i=1,2,3,4)$ 的值为

$$L_i = \mu_0 \frac{P}{2\pi} \ln \left[\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi D}{2P}\right)} \right], \quad (2)$$



式中： μ_0 为自由空间的磁导率； D 为金属结构的宽度。

在等效电路模型中设定模型的初值，并与三维电磁模型仿真结果进行对比，进行数值拟合，得到等效电路中元件的值分别为： $Z_T = 246 \Omega$, $C_1 = C_2 = 0.35 \text{ fF}$, $C_3 = C_4 = 0.15 \text{ fF}$, $L_1 = L_2 = 2.75 \text{ pH}$, $L_3 = L_4 = 0.32 \text{ pH}$ 。通过 ADS 软件的等效电路(EC)仿真和 CST 软件的三维电磁(EM)仿真，从图 6(a)、(b)中可以观察到，滤波器传输系数 S_{21} 的幅度以及相位都实现了较为准确的拟合，因而通过等效电路模型可以很好地模拟滤波器的频率响应。

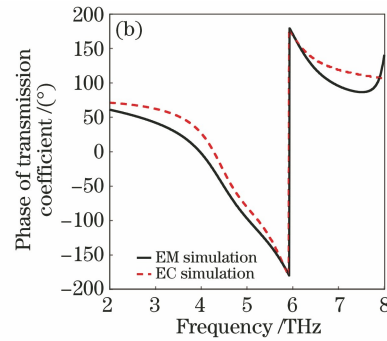


图 6 传输系数的幅度和相位对比。(a)幅度；(b)相位

Fig. 6 Magnitude and phase comparison of transmission coefficients. (a) Magnitude; (b) phase

接下来，本文研究了该超材料滤波器的带宽可调谐特性。当器件温度从室温增加至 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，二氧化钒能够实现从绝缘态到金属态的可逆转变。不同器件温度下滤波器的传输光谱如图 7(a) 所示。可以发现：当温度从室温增加至 $47 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，滤波器的传输光谱几乎不变；当温度继续增加至 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，滤波器的 3 dB 带宽逐渐增加。因此，当温度从室温增加至相变温度 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，可以实现滤波器的带宽可调谐。由于二氧化钒的尺寸相对较小，并且在室温时二氧化钒的热膨胀系数仅为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ^[25]，因此可以忽略温度引起的二氧化钒的热膨胀对仿真结

果的影响。

在室温 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，二氧化钒的载流子浓度非常低，此时二氧化钒的电导率 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ ，二氧化钒处于绝缘态；随着温度增加至 $47 \text{ }^\circ\text{C}$ ，二氧化钒的电导率相应地增加至 $\sigma = 1000 \text{ S/m}$ ；当温度从 $57 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加至 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，二氧化钒的电导率从 $\sigma = 50000 \text{ S/m}$ 急剧增加至 $\sigma = 200000 \text{ S/m}$ ^[26-27]，二氧化钒转变为金属态。当电磁波垂直入射时，滤波器在不同二氧化钒电导率下的传输光谱如图 7(b) 所示。可以看出，当电导率从 $\sigma = 10 \text{ S/m}$ 逐渐增加到 $\sigma = 200000 \text{ S/m}$ 时，低谐振频率几乎保持不变，高谐振频率出现明显的蓝移，滤波器

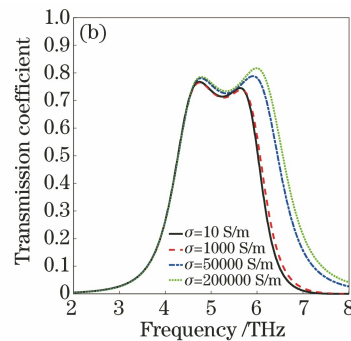
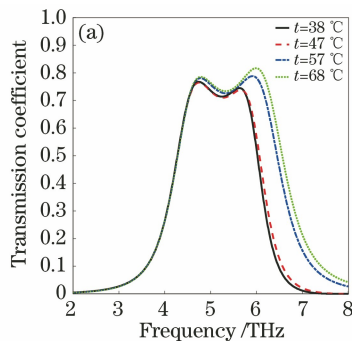


图 7 不同条件下超材料滤波器的模拟传输光谱。(a)不同温度；(b)不同二氧化钒电导率

Fig. 7 Simulated transmission spectra of metamaterial filter under different conditions. (a) Different temperatures; (b) different conductivities of vanadium dioxide

相应的 3 dB 带宽从 1.71 THz 增加到 2.31 THz。

由于二氧化钒的相变具有可逆性,因此在降低温度的情况下也可以实现滤波器的带宽可调谐。但是二氧化钒的相变过程存在热滞后现象^[28]:在升温 and 降温时,二氧化钒的相变温度不同,降温时的相变温度比升温时的相变温度低 8 °C 左右,即在降温时,二氧化钒的相变温度降为 60 °C。当温度从 68 °C 降至 60 °C 时,二氧化钒的电导率仍为 $\sigma = 200000$ S/m,并且滤波器的 3 dB 带宽保持不变;随着温度继续降低,二氧化钒从金属态转变为绝缘态,二氧化钒的电导率急剧减小,滤波器的 3 dB 带宽从 2.31 THz 开始逐渐减小;当温度降低至 39 °C 时,二氧化钒的电导率减小为 $\sigma = 1000$ S/m,滤波器的 3 dB 带宽减小至 1.71 THz 左右;随着温度继续降低至 20 °C 时,二氧化钒的电导率减小为 $\sigma = 10$ S/m,此时二氧化钒处于完全绝缘态,并且滤波器的 3 dB 带宽几乎保持不变。除此之外,由于二氧化钒可以经受反复的相变而不受损坏,因此基于二氧化钒的可调谐带通滤波器具有较大的实际应用价值。并且二氧化钒的相变过程能够在极短的时间^[29-31]内完成,因而可以忽略相变所需时间对滤波器带通频率范围调谐的影响。

为了充分了解基于二氧化钒材料的滤波器实现传输带宽可调谐的物理机制,本文研究了二氧化钒电导率分别为 $\sigma = 10$ S/m 和 $\sigma = 200000$ S/m 时在相应高谐振频率处的模拟磁场分布。当二氧化钒电导率为 $\sigma = 10$ S/m 时,该滤波器单元的顶层结构可以等效为图 8(b)所示的结构,为嵌入与原结构相同尺寸的方环槽以及一字形槽的金属结构。在该高谐振频率 $f_2 = 5.64$ THz 处,从图 8(c)中可以看出,此时磁场主要分布在方环槽的左右两边以及一字形槽的左右两端,因此该谐振主要是电磁波与金属方环槽的左右两边以及一字形槽的左右两端发生耦合引起的。而当二氧化钒电导率增加至 $\sigma = 200000$ S/m 时,二氧化钒由绝缘态转变为完全金属态,此时二氧化钒和金属都能够阻挡电磁波的传输,因此该滤波器单元的顶层结构可以等效为图 8(d)所示的结构,为嵌入与原结构相同尺寸的方环槽的金属结构。同样地,在该高谐振频率 $f_2 = 6.02$ THz 处,从图 8(e)中可以看出,此时磁场主要分布在金属方环槽的左右两边,而与一字形结构无关,因此该谐振主要是电磁波与金属方环槽的左右两边发生耦合引起的。由于耦合的改变,谐振频率发生偏移,因此实现了所提超材料滤波器的带宽可调谐。

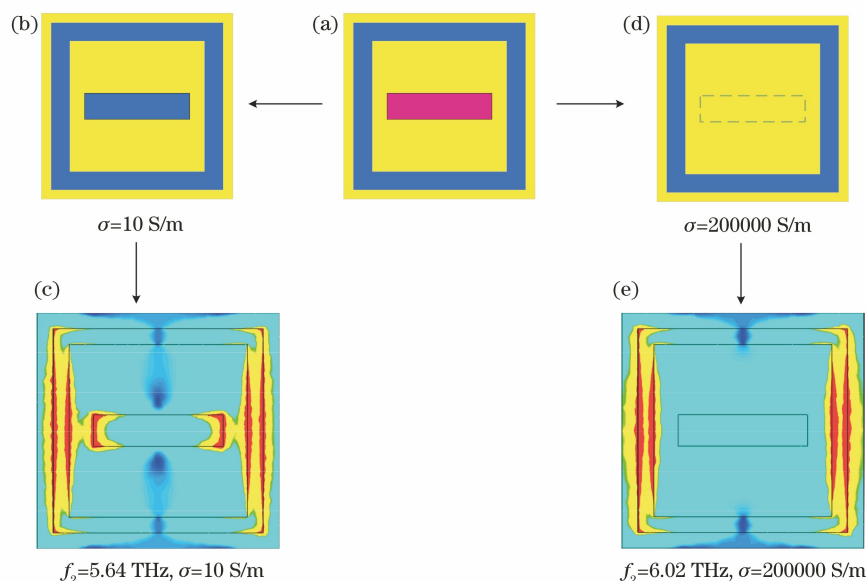


图 8 当二氧化钒发生相变时超材料滤波器的模拟磁场分布。(a)超材料滤波器的顶层结构;当二氧化钒电导率为 $\sigma = 10$ S/m 时,(b)等效的滤波器顶层结构和(c)在高谐振频率处的磁场分布;当二氧化钒电导率为 $\sigma = 200000$ S/m 时,(d)等效的滤波器顶层结构和(e)在高谐振频率处的磁场分布

Fig. 8 Simulated magnetic field distributions of metamaterial filter when vanadium dioxide undergoes phase transition. (a) Top layer structure of metamaterial filter; (b) equivalent top layer structure and (c) magnetic field distribution at high resonance frequency when conductivity of vanadium dioxide is $\sigma = 10$ S/m; (d) equivalent top layer structure and (e) magnetic field distribution at high resonance frequency when conductivity of vanadium dioxide is $\sigma = 200000$ S/m

进一步地,本文基于所提等效电路模型研究了二氧化钒电导率改变过程中滤波器性能影响的机制。基于图 5 的等效电路模型,并结合二氧化钒不同电导率下的 EM 仿真结果进行数值拟合,导出二氧化钒电导率分别为 $\sigma=10$ S/m、 $\sigma=1000$ S/m 和 $\sigma=50000$ S/m 时等效电路的具体值,如表 1 所示。从表 1 中可以发现,电容 C_1 、 C_2 与电感 L_1 、 L_2 的值几乎保持不变,而电容 C_3 、 C_4 与电感 L_3 、 L_4 的

值变化明显,其中 C_3 、 C_4 的值逐渐增大, L_3 、 L_4 的值逐渐减小。并且当二氧化钒电导率增加至 $\sigma=200000$ S/m 时,电容 C_3 和 C_4 的值趋近于无穷大,电感 L_3 和 L_4 的值趋近于 0。不同 σ 下 EC 仿真以及 EM 仿真的 S_{21} 如图 9~11 所示,可以看出,当二氧化钒发生相变时,通过等效电路模型依然可以很好地模拟滤波器发生带宽调谐时的频域特性。

表 1 不同二氧化钒电导率下超材料滤波器等效电路模型的电路参数值

Table 1 Circuit parameter values of equivalent circuit model of metamaterial filter under different conductivities of vanadium dioxide

$\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	Z_T / Ω	$C_1(C_2) / \text{fF}$	$C_3(C_4) / \text{fF}$	$L_1(L_2) / \text{pH}$	$L_3(L_4) / \text{pH}$
10	246	0.35	0.15	2.75	0.32
1000	246	0.35	0.60	3.08	0.18
50000	246	0.34	50.3	2.95	0.05

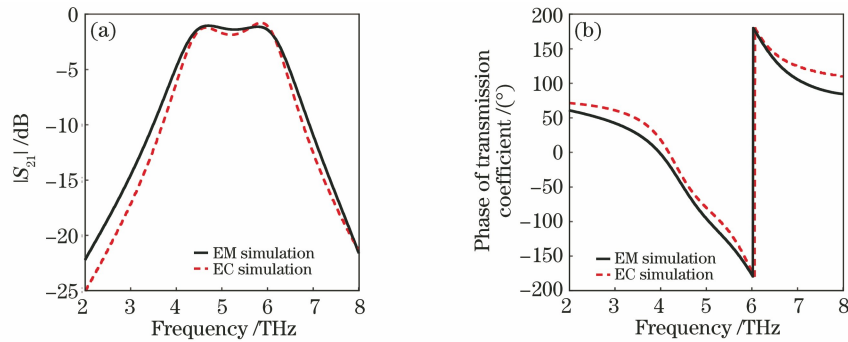


图 9 当 $\sigma=1000$ S/m 时,EC 与 EM 仿真的传输系数 S_{21} 。(a)幅度;(b)相位

Fig. 9 Simulated transmission coefficient S_{21} by EC and EM when $\sigma=1000$ S/m. (a) Magnitude; (b) phase

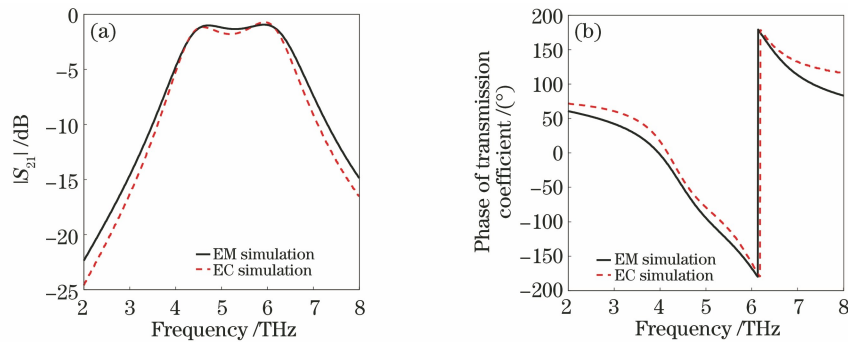


图 10 当 $\sigma=50000$ S/m 时,EC 与 EM 仿真的传输系数 S_{21} 。(a)幅度;(b)相位

Fig. 10 Simulated transmission coefficient S_{21} by EC and EM when $\sigma=50000$ S/m. (a) Magnitude; (b) phase

最后,考虑到实际中的应用,超材料滤波器需要具备广角稳定特性。在横电和横磁(TM)极化模式下,所提超材料滤波器在不同入射角下的传输光谱如图 12(a)、(b)所示。当入射角从 0° 增加至 85° 时,对于 TE 和 TM 极化,传输带宽均从 40° 附近开始减小,并最终接近消失。并且在 TM 极化模式下,即使入射角增加至 60° ,该滤波器仍然具有一定的传输带宽。总之,在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的宽入射角范围内,所提

超材料滤波器能够保持相对稳定的传输性能。

4 结 论

提出并理论证明了一种基于二氧化钒的可调谐太赫兹宽带通滤波器。该滤波器由三层结构组成,其中顶层和底层的结构完全相同,为嵌入一字形二氧化钒的方环槽金属铝,中间为无耗的 ToPaS 介质层。数值仿真结果表明,当二氧化钒处于绝缘态

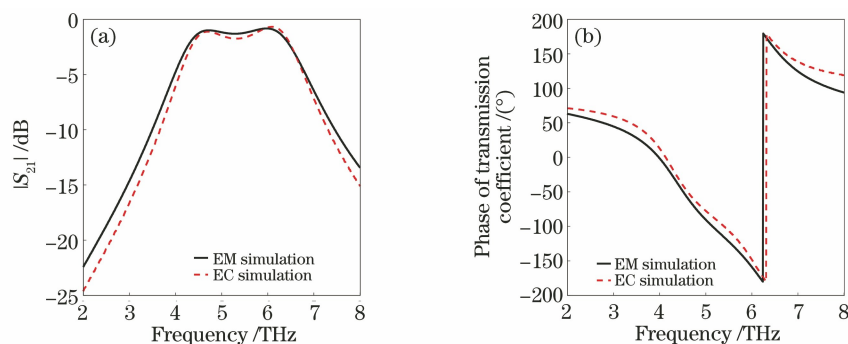


图 11 当 $\sigma=200000$ S/m 时, EC 与 EM 仿真的传输系数 S_{21} 。(a) 幅度; (b) 相位

Fig. 11 Simulated transmission coefficient S_{21} by EC and EM when $\sigma=200000$ S/m. (a) Magnitude; (b) phase

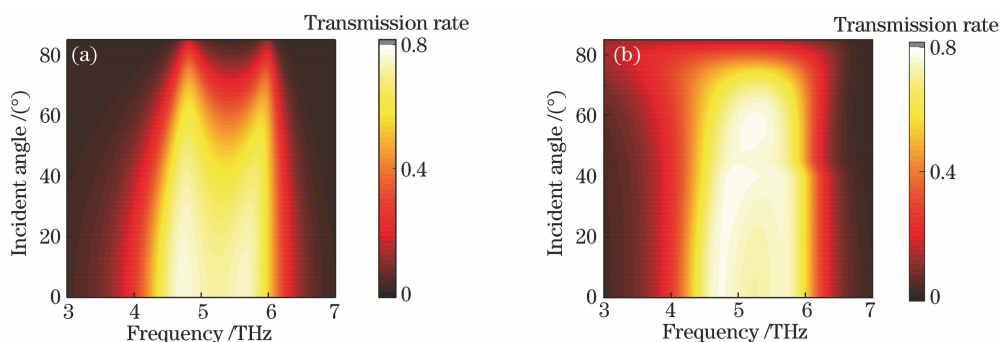


图 12 不同极化模式下超材料滤波器随入射角变化的传输光谱。(a) TE; (b) TM

Fig. 12 Transmission spectra of metamaterial filter versus incident angle for different polarization modes. (a) TE; (b) TM

时,该结构在中心频率 $f_0=5.19$ THz 处的 3 dB 带宽为 1.71 THz,并且最高传输率为 0.77。利用在谐振频率处的表面电流分布和等效电路法,对该滤波器产生宽带传输的物理机制进行了分析。改变器件温度,使二氧化钒由绝缘态转变为金属态,该滤波器的 3 dB 带宽从 1.71 THz 增加到 2.31 THz,从而能够实现滤波器的带宽可调谐。最后,证明了该滤波器在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 的入射角范围内均能够实现稳定的宽带传输,证明了其在实际中的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [3] Chen Z, Zhang B, Zhang Y, et al. 220 GHz outdoor wireless communication system based on a Schottky-diode transceiver [J]. IEICE Electronics Express, 2016, 13(9): 20160282.
- [4] Cummer S A, Popa B I. Wave fields measured inside a negative refractive index metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4564-4566.
- [5] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 148-151.
- [6] Zhang Y X, Zhao Y C, Liang S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface [J]. Nanophotonics, 2018, 8(1): 153-170.
- [7] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0816001.
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0816001.
- [8] Cai Y J, Xu K D, Feng N X, et al. Anisotropic infrared plasmonic broadband absorber based on graphene-black phosphorus multilayers [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3101-3112.
- [9] Zhang M, Song Z Y. Terahertz bifunctional absorber based on a graphene-spacer-vanadium dioxide-spacer-metal configuration [J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11780-11788.
- [10] Liu Y, Zhong R B, Lian Z, et al. Dynamically tunable band stop filter enabled by the metal-graphene metamaterials [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2828.
- [11] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, et al. Flexible dual-

- stopband terahertz metamaterial filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1016001.
- 王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1016001.
- [12] Zhu D W, Zeng R M, Tang Z T, et al. Design of multiband filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 172401.
- 朱登玮, 曾瑞敏, 唐泽恬, 等. 基于人工表面等离子体激元的多频带滤波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 172401.
- [13] Chiang Y J, Yang C S, Yang Y H, et al. An ultrabroad terahertz bandpass filter based on multiple-resonance excitation of a composite metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(19): 191909.
- [14] Zhang X Q, Gu J Q, Cao W, et al. Bilayer-fish-scale ultrabroad terahertz bandpass filter [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 906-908.
- [15] Li H P, Fu W Y, Shen X P, et al. Design and theoretical study of a polarization-insensitive multiband terahertz metamaterial bandpass filter[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(12): 127801.
- [16] Gao W, Wang J Y, Wu Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0516001.
- 高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器的设计与研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0516001.
- [17] Zhang C H, Zhou G C, Wu J B, et al. Active control of terahertz waves using vanadium-dioxide-embedded metamaterials[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(5): 054016.
- [18] Casu E A, Müller A A, Fernández-Bolaños M, et al. Vanadium oxide bandstop tunable filter for Ka frequency bands based on a novel reconfigurable spiral shape defected ground plane CPW[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12206-12212.
- [19] Hu F R, Wang H, Zhang X W, et al. Electrically triggered tunable terahertz band-pass filter based on VO₂ hybrid metamaterial [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 1-7.
- [20] Zhao S, Hu F R, Xu X L, et al. Electrically triggered dual-band tunable terahertz metamaterial band-pass filter based on Si₃N₄-VO₂-Si₃N₄ sandwich [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(5): 054203.
- [21] Zhang X Q, Li Q, Cao W, et al. Equivalent circuit analysis of terahertz metamaterial filters[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(11): 110012-110016.
- [22] Han J Z, Chen R S. Tunable broadband terahertz absorber based on a single-layer graphene metasurface [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30289-30298.
- [23] Wang J L, Wang X, Han D. Terahertz wide stop-band metamaterials filter based on metal-dielectric-metal structure[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(6): 722-727.
- 王俊林, 王鑫, 韩丁. 基于金属-介质-金属结构的太赫兹超材料宽阻带滤波器[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(6): 722-727.
- [24] Wang D S, Che W Q, Chang Y M, et al. A low-profile frequency selective surface with controllable triband characteristics [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 468-471.
- [25] Sakai J, Zaghrioui M, Matsushima M, et al. Impact of thermal expansion of substrates on phase transition temperature of VO₂ films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(12): 123510.
- [26] Sun D D, Chen Z, Wen Q Y, et al. Low temperature growth of VO₂ film and giant modulation to terahertz transmission[C]//*Laser and Tera-Hertz Science and Technology 2012*, November 1-2, 2012, Wuhan, China. Washington, D.C.: OSA, 2012: STh6B.4.
- [27] Liu H W, Lu J P, Wang X R. Metamaterials based on the phase transition of VO₂ [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(2): 024002.
- [28] Driscoll T, Kim H T, Chae B G, et al. Memory metamaterials[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1518-1521.
- [29] Leroy J, Crunteanu A, Bessaudou A, et al. High-speed metal-insulator transition in vanadium dioxide films induced by an electrical pulsed voltage over nano-gap electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(21): 213507.
- [30] Stefanovich G, Pergament A, Stefanovich D. Electrical switching and Mott transition in VO₂ [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, 12(41): 8837-8845.
- [31] Cavalleri A, Tóth C, Siders C W, et al. Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(23): 237401.