

基于介质谐振器的太赫兹超材料滤波器

张 娜^{1,2*}, 孟子凡^{2,3}

(1. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 特种显示技术国家工程实验室 现代显示技术省部共建国家重点实验室 光电技术研究院, 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 提出一种基于介质谐振器的太赫兹超材料滤波器, 其结构由高介电常数谐振器和聚二甲基硅氧烷(PDMS)基板组成, 并用有限元法对其进行仿真分析。研究表明, 该滤波器对极化不敏感。探究其滤波特性, 采用控制变量法来研究结构参数对传输系数的影响; 同时, 通过控制液晶介电常数的变化, 可以实现部分或全部频段的动态可调。此外, 为了深入了解滤波器的传输机理, 从有效介质理论和谐振器理论两个方面分析其谐振机理。

关键词: 全介质; 多频带; 滤波器; 动态可调; 太赫兹

中图分类号: TN823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)01-0041-06

Terahertz Metamaterial Filter Based on Dielectric Resonator

ZHANG Na^{1,2}, MENG Zifan^{2,3}

(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN; 2. National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN; 3. School of Instrumentation and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

Abstract: A terahertz metamaterial filter based on dielectric resonator was proposed. Its structure consisted of a high dielectric constant resonator and a polydimethylsiloxane (PDMS) substrate, and its simulation analysis was carried out by finite element method. The results showed that the filter was insensitive to polarization. The filtering characteristics were explored and the influence of structure parameters on transmission coefficient was studied by using the control variable method. At the same time, part or all of the frequency band could be dynamically adjustable by controlling the change of the dielectric constant of the liquid crystal. In addition, in order to understand the transmission mechanism of the filter, the resonant mechanism was analyzed from two aspects: the effective medium theory and the resonator theory.

Key words: all-dielectric; multi-band; filter; dynamic adjustability; Terahertz

收稿日期: 2021-08-22

作者简介: 张 娜(1995—), 女, 硕士研究生, 从事微波及太赫兹器件研究; (E-mail: 1262270734@qq.com)

孟子凡(1997—), 男, 硕士研究生, 从事微波及太赫兹器件研究。

* 通讯作者

引 言

近几十年来,太赫兹技术的蓬勃发展促进了太赫兹器件的发展,如太赫兹天线、太赫兹吸收器、太赫兹滤波器、太赫兹探测器等^[1-3]。在这些器件中,能够选择频率的太赫兹滤波器在太赫兹系统中具有重要意义,因此受到了广泛的关注和研究^[4]。随着太赫兹技术的发展,超材料结构被引入太赫兹频率,并提供了一系列潜在的应用,如成像系统、传感系统、光谱学和无损检测^[5-8]。例如,文献[9]中,Mehrab Ramzan 等人在 2017 年提出一种湿式微加工工艺在玻璃基板上的太赫兹带通滤波器,并详细描述了三种基于金属和玻璃基板的滤波器的带通特性。

然而,在太赫兹域,金属固有的欧姆损耗变得突出,其导致的热耗散影响到滤波器的效率^[10]。与传统超材料滤波器不同,介质谐振器因其体积小、成本低、易激发等特性在太赫兹系统中得到了广泛的应用。此外,当电磁波入射到介电材料表面时,会激发电谐振和磁谐振,使材料表现为电偶极子和磁偶极子。因此,电磁谐振具有环形位移电流,增强了表面电场和磁场。传统的金属滤波器是通过光与等离子体耦合来控制电磁波,并伴随着不可避免的能量耗散,而介质滤波器的本质是利用亚波长结构之间的近场耦合^[11]来从根本上解决这一问题。

文章提出了一种基于介质谐振器的太赫兹超材料滤波器,该滤波器具有尺寸小、对极化不敏感等优点,具有良好的多频段性能。同时,利用液晶介电常数的可调特性,可以实现频段动态可调。此外,研究了几何参数对传输特性的影响,并从有效介质理论和介质谐振器理论的角度深入探究其传输机理。所提出的滤波器适用于高温、高功率环境。

1 结构模型优化与仿真

接下来计算基板的高度值及谐振器的半径和高度。文章的目标是实现多频带太赫兹超材料带阻滤波器,因此使用多个谐振器来实现多频带响应。对于在最深谐振处相对介电常数较高的材料,波导波长 λ_g 计算如下^[12]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

其中, λ_0 为自由空间波长, c 为光速, f_0 是谐振频率, ϵ_r 表示谐振器的介电常数。

所需波导的最小高度 h 可以近似为:

$$h = \frac{\lambda_g}{2} \quad (2)$$

谐振器半径的计算公式为:

$$k_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (3)$$

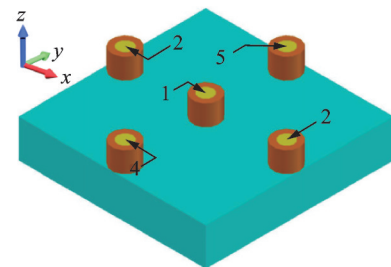
$$k_r = k_g \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_r}} \quad (4)$$

$$r = \frac{3.83}{k_r} \quad (5)$$

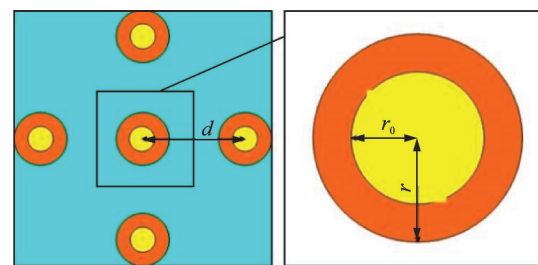
这里, k_g 表示波导波矢量,而 k_r 表示径向波矢量。

由式(1)~(5)可以计算出基板高度 h 必须大于 $12.75 \mu\text{m}$,圆柱谐振器高度 h_0 大于 $7 \mu\text{m}$,半径 r 小于 $8.6 \mu\text{m}$ 。

文中设计的多频带太赫兹超材料滤波器的结构是将钛酸钙(CaTiO_3)空心圆柱谐振器放置在柔性 PDMS 基板上,空心圆柱中填充初始介电常数均为 3.1 的向列相液晶,如图 1 所示。 CaTiO_3 谐振器在室温下的介电常数为 122。一般来说,材料的介电常数越高,越适合制造小尺寸的器件。而介电常数为 2.35 的 PDMS 由于其良好的柔韧性被用作基板,这使得太赫兹超材料滤波器易于集成到系统中。此

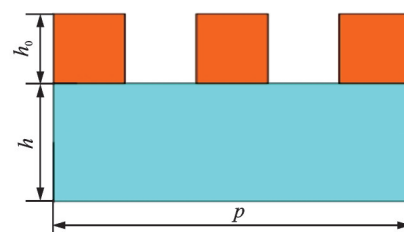


(a) 三维结构图



(b) 顶视图

(c) 顶视细节



(d) 侧视图

图 1 多频带太赫兹滤波器结构图

Fig.1 Multi-band Terahertz filter structure

外,文中将谐振器排列成十字形的原因主要有两个:一是多个谐振器的使用便于实现多频滤波特性;二是结构对称性使太赫兹超材料滤波器对极化不敏感。采用控制变量法得到的最优结构参数如下:周期 $p=100\ \mu\text{m}$ 、基板高度 $h=20\ \mu\text{m}$ 、谐振器厚度 $h_0=11\ \mu\text{m}$ 、谐振器外半径 $r=7\ \mu\text{m}$ 、谐振器内半径 $r_0=4\ \mu\text{m}$ 、相邻谐振器之间的间距 $d=43\ \mu\text{m}$ 。利用CST微波仿真软件对文中所提出的多频带太赫兹超材料滤波器进行了数值模拟仿真,以表征其单元特性,在 x 和 y 方向设置单元边界条件,在 z 方向设置开放边界条件。

2 仿真结果分析与讨论

超材料滤波器的亚波长结构、几何参数对滤波性能都有或大或小的影响,为了理解滤波器的传输性能,下面研究该滤波器的极化不敏感性,同时用控制变量法分别研究了基板厚度 h 、谐振器高度 h_0 、谐振器之间的间距 d 等几何参数对传输系数的影响。

2.1 极化不敏感性研究

固定结构参数,讨论TE极化和TM极化下滤波器的滤波性能,图2和图3展示了该滤波器由于结构的对称性而产生的极化不敏感性。根据图2可知,该滤波器对于入射波的极化模式不敏感;而图3可以看出在TE和TM两种模式下,随着极化角度的改变,该滤波器的滤波性能能够保持稳定,说明其在两种模式下都对极化角度没有依赖性。由于所提出的滤波器对极化不敏感,因此以下只针对TE模式下的仿真结果进行分析。

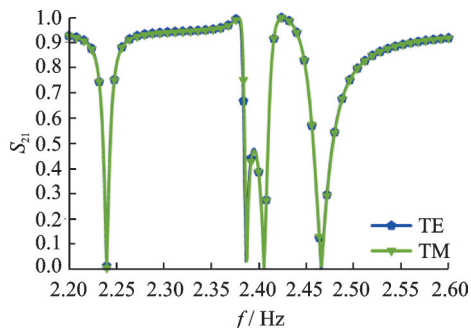


图2 TE和TM模式下滤波器的传输系数

Fig.2 Transmittance of filter at TE and TM modes

2.2 基板厚度对滤波器传输性能的影响

固定其他结构参数,仅改变基板厚度 h 的大小,如图4所示,随着基板厚度从 $20\ \mu\text{m}$ 逐渐增加到

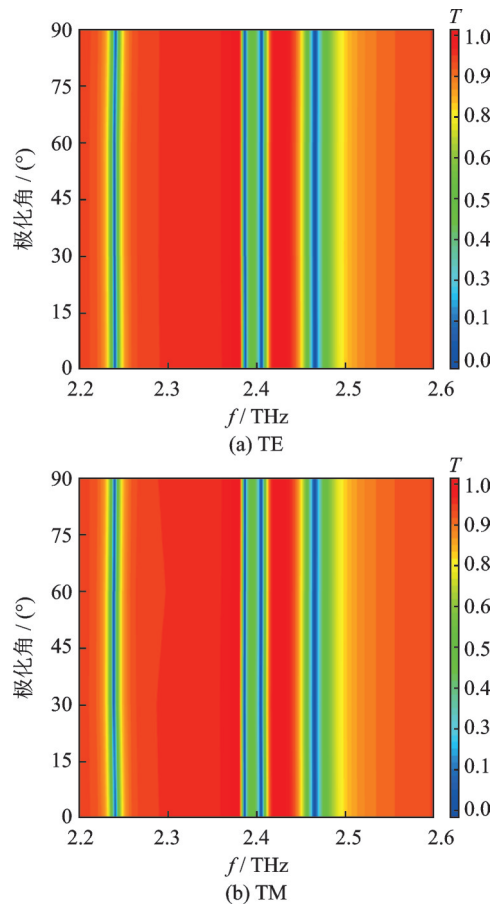


图3 极化角依赖性研究

Fig.3 Study on dependence of polarization angle

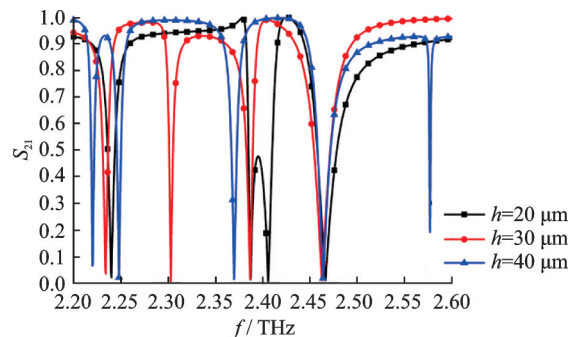


图4 不同基板厚度下的滤波器透射系数

Fig.4 Transmission coefficient of filter for different substrate thicknesses

$30\ \mu\text{m}$,谐振深度基本不变,第二波段的两个谐振逐渐分离,三频带变为四频带,继续增大基板厚度 h 到 $40\ \mu\text{m}$,出现五个频带。

2.3 谐振器厚度对滤波器传输性能的影响

如图5所示,改变谐振器厚度 h_0 从 $8\ \mu\text{m}$ 到 $11\ \mu\text{m}$,谐振深度变化不大,但滤波器逐渐从单频带增加到三频带。当谐振器厚度 $h_0=8\ \mu\text{m}$ 时,滤波器表现为单频带带阻滤波特性;缓慢增加谐振器厚度

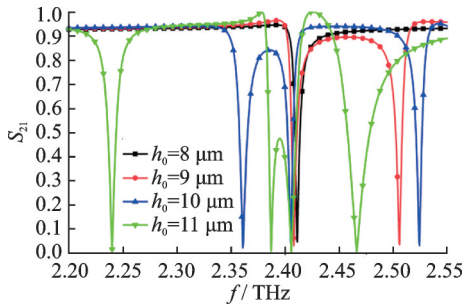


图 5 滤波器在不同谐振器厚度时的透射系数

Fig.5 Transmission coefficient of filter for different resonator thicknesses

到 9 μm 时,滤波器表现为双频带带阻滤波性能;继续增加谐振器厚度到 10 μm,滤波器表现为三频带带阻性能;若再增加谐振器厚度,三频带带阻性质不变,但谐振点出现四个,并发生红移。

2.4 相邻谐振器之间的间隙对滤波器传输性能的影响

如图 6 所示,相邻谐振器之间的间距 d 为 19 μm 时,滤波器表现出四频带带阻滤波特性;当相邻谐振器之间的间距 d 增大到 31 μm,相比较 $d=19$ μm 时的传输性能,谐振深度基本不变,第一频带和第二频带蓝移,第三频带和第四频带红移;而相邻谐振器之间的间距 d 达到 43 μm 的时候,谐振深度没有变化,第一频带和第四频带红移,而第二频带和第三频带逐渐靠近合并成一个更宽的频带。因此,在制备该滤波器时,可以利用这个特性来实现不同频带数的滤波器,以适应不同的需求。

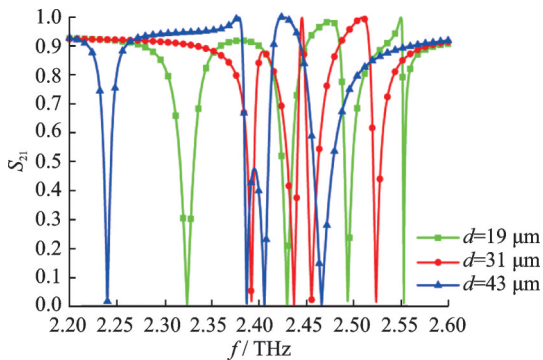
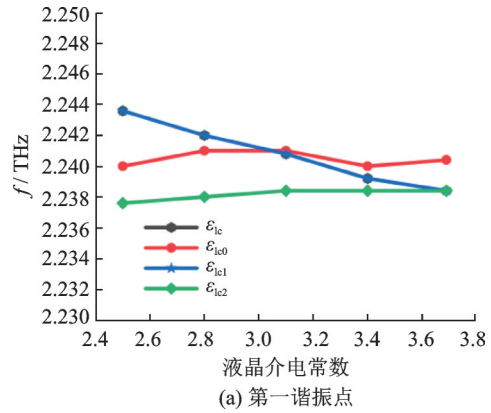


图 6 间隙不同时的滤波器透射系数

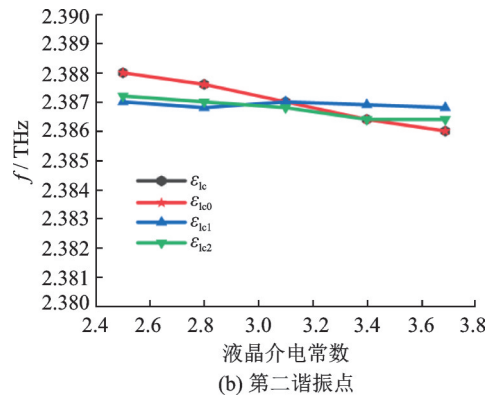
Fig.6 Transmission coefficients of filter with different gaps

2.5 液晶介电常数对滤波器传输性能的影响

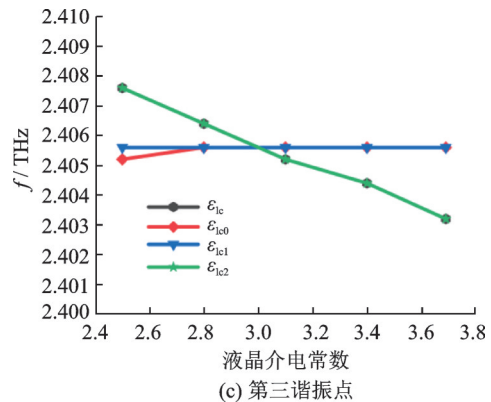
利用谐振器内液晶的介电常数随外部电压的变化可调节的特性,实现多频带带阻滤波器的动态可调。图 7 为滤波器的四个谐振点在液晶介电常数



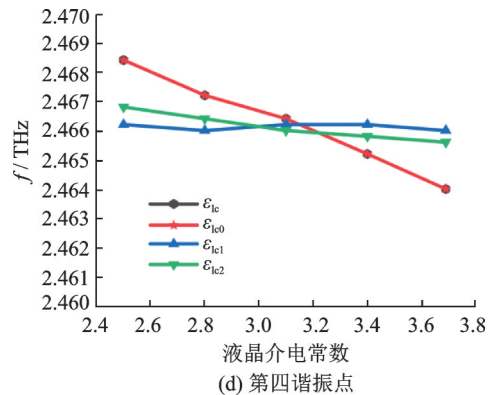
(a) 第一谐振点



(b) 第二谐振点



(c) 第三谐振点



(d) 第四谐振点

图 7 滤波器的四个谐振点在液晶介电常数不同时的偏移
Fig.7 Offset of the four resonant points of filter at different dielectric constants of liquid crystal

不同时的偏移情况。其中 ϵ_{ic0} 为中空圆柱1中液晶的介电常数, ϵ_{ic1} 表示中空圆柱2、中空圆柱3中液晶的介电常数, ϵ_{ic2} 表示中空圆柱4、中空圆柱5中液晶的介电常数。从图7(a)可以看出,当整体改变液晶介电常数 ϵ_{ic} 或者单独改变中空圆柱2和3中液晶的介电常数 ϵ_{ic1} 时,第一谐振点频率发生红移;由图7(b)可知,无论是整体改变液晶介电常数还是局部改变任一谐振器的介电常数,第二谐振点相对稳定;图7(c)可以轻易得出,当整体改变液晶介电常数 ϵ_{ic} 或者单独改变中空圆柱4和5中液晶的介电常数 ϵ_{ic2} 时,第三谐振点红移;同理,如图7(d)所示,当整体改变液晶介电常数 ϵ_{ic} 或者单独改变中空圆柱1中液晶的介电常数 ϵ_{ic0} 时,第四谐振点红移。换言之,可以通过整体或局部改变液晶的介电常数来动态调整若干频段或某一频段的频率发生偏移。

3 滤波机理分析与讨论

为了更深入地理解文中提出的多频带带阻滤波器的滤波机理,从有效介质理论^[13-14]和谐振器理论^[15-16]两个角度来分析讨论其传输特性。

3.1 有效介质理论分析

由于结构的对称性,可以将文中提出的多频带带阻滤波器看作是一个双端口对称网络^[17],因此多频带带阻滤波器的归一化阻抗可以通过双端口网络的S参数来计算,公式如下:

$$Z_n = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (6)$$

其中, Z_n 为归一化阻抗,根据有效介电常数和有效磁导率的定义,其关系式如下:

$$Z_n = \frac{Z}{Z_0} \quad (7)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, Z 表示多频带带阻滤波器的有效阻抗, Z_0 表示真空特性阻抗,近似为 377Ω 。 ϵ_r 和 μ_r 分别为多频带带阻滤波器的有效介电常数和磁导率。滤波器的通带传输窗口对应阻抗匹配,完全传输,没有反射和吸收,要求有效阻抗等于空气的特性阻抗,即式(6)中的 Z_n 等于1。换句话说,对于滤波器而言,通带对应阻抗匹配,阻带对应阻抗失配。通过调节有效介电常数和磁导率可以调节阻抗匹配或阻抗失配。

文中提出的多频带带阻滤波器的有效介电常数和有效磁导率是复数,因此归一化阻抗也是复数。当归一化阻抗的实部和虚部分别近似等于1和0时,阻抗匹配;而当实部和虚部分别远离1和0时,阻抗匹配变差,出现阻抗失配,产生阻带。从图8(a)可以看出,在2.234~2.248 THz、2.383~2.412 THz和2.452~2.491 THz阻抗失配,分别对应三个阻带;而归一化阻抗失配是由有效电容率和磁导率的突变引起的。从图8(b)中介电常数的变化曲线可以看出,随着频率增加到2.046 THz,有效介电常数先增大到最大值,再减小到最小值,这是电谐振的典型特征;然而在2.24 THz、2.387 THz和2.466 THz时,其他三个谐振频率的介电常数变化很小。同理,磁谐振的一个典型特征是磁导率先增大到最大值,再减小到最小值。图8(c)在2.24 THz、2.387 THz和2.466 THz处均可明显观察到磁谐振现象,而在2.406 THz处磁谐振现象较弱。因此,强磁谐

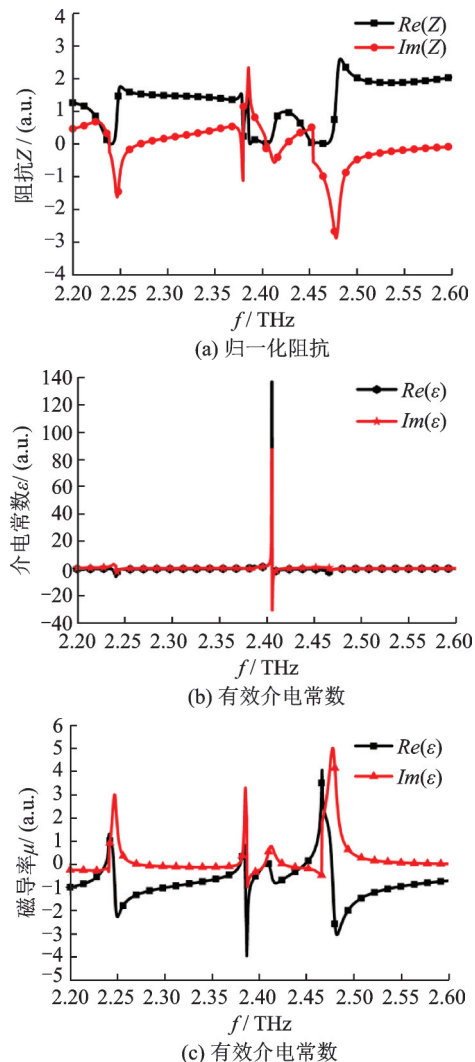


图8 归一化参数的实部和虚部

Fig.8 Normalized parameters with real and imaginary parts

振出现在 2.24、2.387 和 2.466 THz 处,而强电谐振发生在 2.406 THz 处。

3.2 谐振器理论分析

为了验证上述有效介质理论分析的准确性,从谐振器理论的角度对多频带带阻滤波器的特性进行了再次分析。当电磁波穿透介质谐振器,电谐振和磁谐振在谐振器内激发,在 2.24 THz、2.387 THz、2.406 THz 和 2.466 THz 处的电磁场分布和电磁场能量密度分布如图 9 所示。从图 9(a)和(b)所示的电磁场能量密度分布很容易看出,在频率为 2.24 THz 处的电磁能量主要集中在谐振器 2 和 3 上,即在 2.24 THz 处的谐振主要由谐振器 2 和 3 产生。同理,在频率为 2.387 THz、2.406 THz 和 2.466 THz 处的电磁能量主要集中在谐振器 1、谐振器 4 和谐振器 5 上,即在 2.387 THz、2.406 THz 和 2.466 THz 处

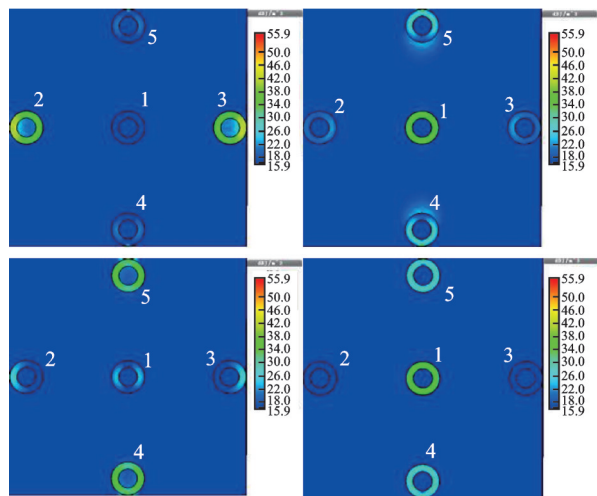
的谐振分别是由谐振器 1、谐振器 4 和谐振器 5 引起的。综上所述,在谐振器内产生强电磁谐振,与上述有效介质理论分析一致。

4 结束语

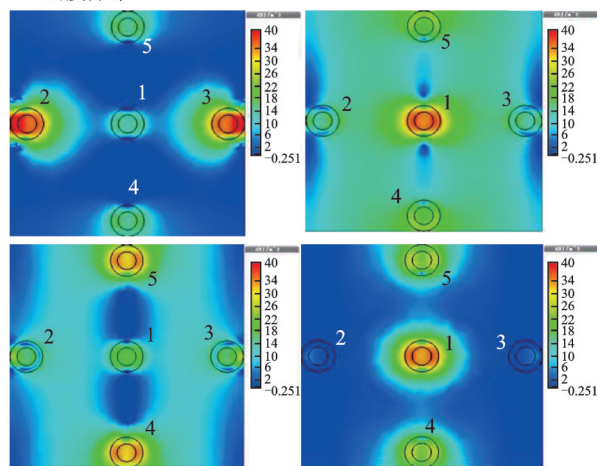
文章给出了多频带带阻滤波器在太赫兹域的透射率。通过分析几何参数对多频带带阻滤波器结构的影响,可以有效地控制多频带带阻滤波器的频带数和传输特性;还可以通过有效介质理论和谐振器理论更好地理解多频带带阻滤波器的工作原理。此外,为了实现多频带带阻滤波器的动态可调,通过局部或整体改变液晶的介电常数,多频带带阻滤波器的部分或全部频段都可以调节。该多频带带阻滤波器采用高介电常数介质材料,实现了尺寸小、多频带、阻带性能好、极化不敏感的滤波特性。多频带带阻滤波结构为更好地操纵和控制太赫兹波提供了新方案,在通信、传感、医疗、光谱学等诸多领域具有潜在应用。

参 考 文 献

- [1] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8):495-497.
- [2] Sabah C, Uckun S. Multilayer system of Lorentz/Drude type metamaterials with dielectric slabs and its application to electromagnetic filters[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, 91: 349-364.
- [3] Williams P. Filling the THz gap—High power sources and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 69(2): 301.
- [4] Peng X, Ooik J A, Tan D T H. Ultra-broadband and compact graphene-on-silicon integrated waveguide mode filters[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-9.
- [5] Shen Z, Ito N, Sakata E, et al. Frequency selective surface notch filter for use in a millimeter wave imaging system[C]. 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, Albuquerque, NM, USA, 2006: 4191-4194.
- [6] Ma Y, Khalid A, Drysdale T D, et al. Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1555-1557.
- [7] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 2944-2956.
- [8] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1514-1527.



(a) 2.24 THz、2.387 THz、2.406 THz、2.466 THz 处的电场能量密度分布



(b) 2.24 THz、2.387 THz、2.406 THz、2.466 THz 处的磁场能量密度分布

图 9 电磁场能量密度分布

Fig.9 Energy density distribution of electromagnetic field