

基于超表面的太赫兹滤波器研究

李亚尊 栗自强

华北水利水电大学 河南郑州 450045

摘要: 本文提出了一种基于双开口金属圆环结构的超表面太赫兹滤波器, 本结构在6.8THz频率时产生一个阻带, 形成带阻滤波器。文章使用有限元法对器件的传输特性进行了数值研究, 计算了不同超表面结构的传输特性, 开口金属环受到入射光的激励在金属表面发生电磁场的增强, 产生偶极子共振, 这种共振会导致在相对应的频率处与透射光相互增强, 在透射谱内呈现出带阻滤波器的特性。本文章所研究的结构为超表面太赫兹滤波器的设计提供了一种思路, 对滤波技术和电磁波控制方面做出了实验数据。

关键词: 超表面; FSS; 偶极子共振; 滤波器

引言

频率选择性表面(FSS)^{[1][2]}是一种特殊的超表面结构, 其通常由周期性排列的金属结构组成^[3]。FSS通过合理设计超表面中偶极子元件的几何形状、排列方式和材料特性来实现对偶极子振荡的调控^[4], 能够选择性地传输或反射特定频率范围内的电磁波。当金属或导体表面上存在特定频率的电磁波时, 会引起表面自由电子的共振, 从而产生强烈的局部电磁场效应, 使超表面在特定频率范围内呈现出表面等离子共振的特性^[5]。这种频率选择特性使得FSS在电磁波的调控中发挥了重要的作用, 尤其在微波波段和太赫兹波段中的器件设计中发挥着关键作用。已有研究表明, FSS对电磁波的传输特性和工作频率具有很好的调控效果, 并且由于其具有独特的空间滤波特性, 被应用于多个领域^[6]。目前, 有许多学者研究了FSS对微波波段和太赫兹波段电磁波的调控, 并且设计了各种FSS功能性器件^[7], 如空间滤波器^[8], 吸收器^[9]和调制器^[10]等。在滤波器的研究方面, 很多研究者通过使用不同的FSS结构设计了多频带、宽带、高通等具有不同功能的滤波器。在超表面和纳米光学研究中, 通过设计FSS结构以调控偶极子振荡可以精细地控制表面等离子共振的特性。利用FSS结构来实现特定的表面等离子共振效应, 是一种非常有前景的技术。这种控制能够实现对电磁波的准确调控, 例如改变传播方向、调

整波长、控制波的幅值和相位等。这些功能对于研究高性能的滤波器器件十分重要。这种综合利用偶极子振荡、FSS和表面等离子共振的方法不仅提供了在光学上控制传输特性的新途径, 也为超表面和纳米光学领域的研究开辟了新的可能性。

本文所提出的结构是一个金属片所构成的椭圆环, 下层有一个SiO₂的衬底, 当超表面受到入射光的激励时金属表面发生电磁场的增强, 从而产生偶极子共振, 达到抑制该频段内的信号, 形成一种带阻滤波器的效果。

基本结构及原理分析

图1给出超表面滤波器的结构示意图, 该结构有介质衬底与放置在衬底上的金属开口圆环构成, 衬底的厚度为1μm, 材料为二氧化硅, 折射率为1.46, 圆环的材料为金, 其相对介电常数使用Drude模型表征。滤波器的周期长宽为L1=L2=20μm, 金属圆环的形状为椭圆状, 内环的长半径A1=5μm, B1=7μm, 外环的长半径

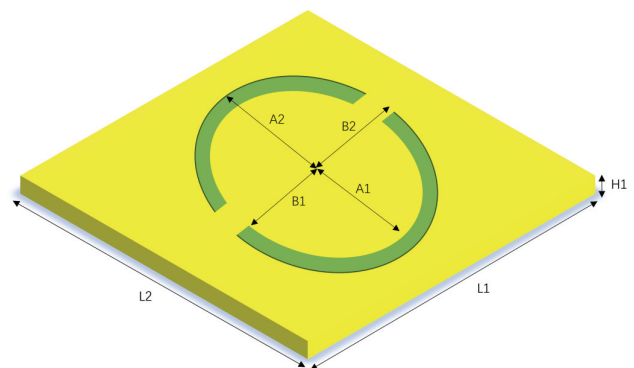


图1 开口椭圆环超表面滤波器结构图

作者简介: 李亚尊(1998-), 男, 汉族, 河南新乡人, 研究生, 单位: 华北水利水电大学, 研究方向: 基于超表面的太赫兹滤波器。

$A_2=8\mu\text{m}$, $B_2=6\mu\text{m}$ 。采用有限元法进行模拟,沿 x 和 y 方向设置了周期性边界条件,沿 z 轴方向设置了完美匹配层,入射电磁波垂直作用到滤波器上。

图2展示了所研究滤波器在入射光响应下的透射谱,开口椭圆环受到入射光的激励产生偶极子振荡,在金属表面产生电磁场的增强,发生了表面等离子共振。因此在入射光频率为 6.82THz 时,传输特性曲线上会形成透射谷。

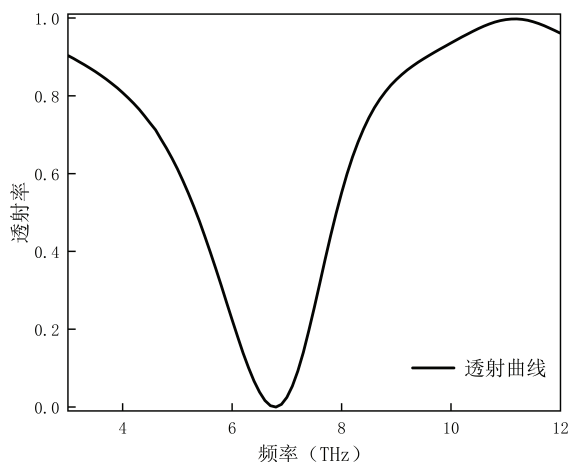


图2 开口椭圆环在入射光激励下的透射谱

接下来分析其电场,入图3所示。从图中可以看出,金属条受到入射光的激励产生偶极子振荡。 6.82THz 时,在金属表面产生电磁场的增强,发生了表面等离子共振。此时电场能量主要集中在圆环开口附近,并在金属上也有电场分布,形成了很强的表面电流。因此在入射光频率为 6.82THz 时,传输特性曲线上会形成透射谷。

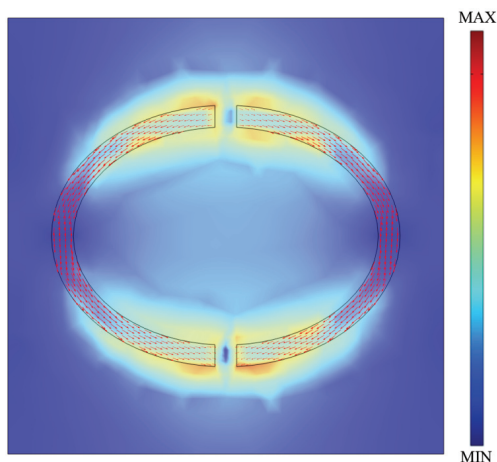


图3 开口椭圆环在 6.82THz 下的表面电流图
性能分析

文章接下来对所研究的滤波器进行性能分析,通过修改入射角的变化观察入射角度对滤波器性能的影响。研究了入射角从 0° 到 60° 的变化规律,如图4所示,设

置了 0° 到 60° 的入射角变化范围,每 10° 为一个步长。从图中可以看出,随着入射角的增加,阻带的中心频率出现轻微红移,而阻带的性能未发生改变,带阻滤波器的性能保持完好。可见此滤波器对入射角的变化具有很强的适用性。

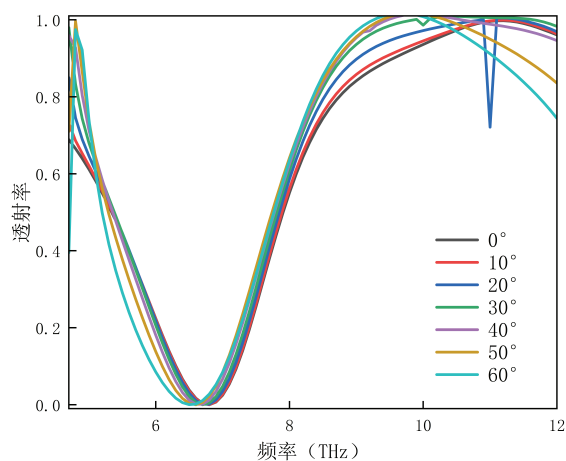


图4 入射角变化时带阻滤波器的透射谱

最后,本文通过控制开口椭圆环直接的开口大小,观察其性能变化,透射曲线如图5所示,将开口大小从 $1\mu\text{m}$ 到 $4\mu\text{m}$ 进行参数化扫描,步长为 $1\mu\text{m}$ 。从透射谱中可以看出,随着椭圆环开口的增大,阻带的中心频率变化。带阻滤波性能保持不变。

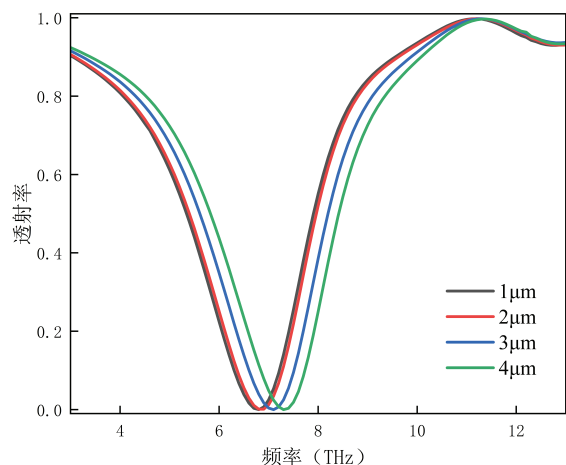


图5 开口椭圆环不同开口大小时带阻滤波器的透射谱

总结

本文研究了一种基于金属开口椭圆环结构的太赫兹带阻滤波器,带阻滤波器受到入射光的激励在一定频率下(6.82THz)发生共振,产生金属表面的电场增强,为研究电磁波等离子共振提供了数据。使用有限元法对器件的传输特性进行了数值研究,数值计算表明,该带阻

滤波器的阻带特性良好。另外，对带阻滤波器进行了性能分析，该滤波器在一定变化范围内（入射角，椭圆环开口）滤波性能保持良好。本论文为太赫兹超表面滤波器的研究提供了数据。

参考文献

[1] Yan M, Wang J, Pang Y, et al. An FSS-backed dual-band reflective polarization conversion metasurface[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 104435–104442.

[2] Kumar A, Kongari S, Chandrapure Y, et al. Multi-functional metasurface as a transmissive/reflective FSS and an on-air frequency mixer[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 13874.

[3] Baghel A K, Kulkarni S S, Nayak S K. Linear-to-cross-polarization transmission converter using ultrathin and smaller periodicity metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1433–1437.

[4] Cui C, Yuan S, Qiu X, et al. Light emission driven by magnetic and electric toroidal dipole resonances in a silicon

metasurface[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(30): 14446–14454.

[5] Anushkannan N K, Wekalao J, Patel S K, et al. Design of encoded and tunable graphene-gold metasurface-based surface plasmon resonance sensors for glucose detection in the terahertz regime[J]. *Plasmonics*, 2024: 1–20.

[6] Li A, Singh S, Sievenpiper D. Metasurfaces and their applications[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 989–1011.

[7] Singh A, Kumar A, Kanaujia B K. High gain and enhanced isolation MIMO antenna with FSS and metasurface[J]. *Optik*, 2023, 286: 170982.

[8] Kim D, Nguyen M A, Byun G, et al. Metasurface spatial filters for multiple harmonic signals[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2397–2403.

[9] Guo W, Liu Y, Han T. Ultra-broadband infrared metasurface absorber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20586–20592.

[10] Damgaard-Carstensen C, Thomaschewski M, Bozhevolnyi S I. Electro-optic metasurface-based free-space modulators[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(31): 11407–11414.