

双阻带红外频率选择表面的设计

王可欣, 王斌科, 田昌会, 屈绍波, 车志新

(空军工程大学 基础部, 陕西 西安 710051)

摘要: 为实现在中、远红外两个大气窗口的低透过率, 设计了一种基于六边形环状结构的双屏红外频率选择表面(FSS), 利用 CST 电磁软件进行仿真分析, 发现该 FSS 在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段内的平均透过率低于 2.5%, 实现了红外波段的双阻带; 采用表面电流模式分析法和有效介质理论分析了该 FSS 的滤波机理, 发现不同谐振点处由于屏间耦合或屏内单元间的耦合在谐振单元表面感应出对称分布的电流从而使散射总场增强, 形成增强型反射, 即比较理想的红外光阻带; 最后研究了电磁波的极化方式、入射角度、介质属性以及结构参数对 FSS 传输特性的影响。结果表明该 FSS 具有良好的偏振稳定性和角度稳定性, 介质属性和结构参数对其传输特性有较大影响。

关键词: 频率选择表面; 大气窗口; 表面电流; 传输特性

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0704003

Design of infrared frequency selective surface with dual stopband

Wang Kexin, Wang Binke, Tian Changhui, Qu Shaobo, Che Zhixin

(Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to get the low transmission rate in both mid and far infrared atmospheric windows, an infrared frequency selective surface (FSS) composed of two layers based on hexagonal ring structure was designed. Simulation analysis using CST electromagnetic software shows that the frequency selective surface has two stopbands in both 3–5 μm and 8–14 μm , of which the average transmission is lower than 2.5%. Therefore, this frequency selective surface realizes two stopbands in infrared wavelengths; the filtering mechanism of the frequency selective surface was analyzed based on the method of surface current model analysis and the effective medium theory. And it was found that the inducted current on the surface of units was symmetrical in different resonance points, which enhanced the total scattering-field and led to the enhanced reflection. That was the ideal infrared stopband. The inducted current was produced by the coupling between screen and the coupling between unit in a screen; In the end, the effect of electromagnetic wave polarization mode, incident angle, dielectric layer properties and structural parameters on the transmission properties of the frequency selective surface was researched. The results reveal that the transmission of FSS is insensitive to polarization mode and incident angle, while the dielectric layer properties and structural parameters are important factors to the transmission.

Key words: frequency selective surface; atmospheric window; surface current; transmission properties

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(61331005); 国家自然科学基金(11274389)

作者简介: 王可欣(1993-), 男, 硕士生, 主要从事红外低发射率材料及光电技术方面的研究。Email: 2430765550@qq.com

导师简介: 王斌科(1964-), 男, 教授, 硕士, 主要从事红外低发射率材料及光电技术方面的研究。Email: 18092571960@163.com

0 引言

随着红外探测和红外制导技术日新月异地飞速发展,飞行器在执行空中任务时被识别、追踪甚至击落的危险性大大提高^[1]。因此,红外隐身技术处于越来越重要的地位。红外隐身技术就是利用屏蔽、低发射率涂料、热抑制等措施降低目标的红外辐射,使红外探测设备难以探测到目标,从而实现隐身的目的。而作为隐身材料研究热点之一的频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种人工电磁材料,它是由大量的金属贴片单元或孔径单元组成的周期性阵列结构,对入射电磁波具有特定的频率选择作用,是一种对电磁波频率和极化方式均具有选择作用的空间滤波器^[2]。FSS能够较好地控制电磁波的传输和散射,能使入射电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射。在军事领域中FSS已经被广泛应用于微波、红外直至可见光波段。在微波波段,FSS可以有效地降低雷达天线罩、飞机座舱及进气道等散射源的雷达散射截面(RCS),提高飞行器的隐身性能^[3];在红外波段,FSS可用于设计红外吸波材料、红外窗口材料等新型隐身材料^[4]。

利用FSS获得红外波段双阻带,一般的设计思路是从谐振机制上入手,设计一种双屏结构,每层结构具有不同的尺寸,通过结构中较大的单元谐振产生低频阻带,较小单元产生高频阻带,上下两层结构间相互耦合,通过耦合机制形成双阻带。上述方法虽然基本实现了红外波段双阻带,但存在一定的缺陷,一是双阻带间隔比较小,不容易完全落在两个大气窗口之中^[5];二是阻带间的通带较窄。FSS结构的周期主要由低频阻带的工作波长决定,根据单元尺寸与工作波长间的关系可知,由低频阻带决定的单元周期较大,将会对高频阻带的传输特性产生影响,并且这种双屏结构单元间的谐振模式会产生相互影响,当入射角发生变化时,传输特性将会受到极大的影响^[6]。针对以上问题,设计了一种双屏FSS,实现了中、远红外大气窗口的双波段低透过率,即双阻带FSS。仿真结果表明透过率曲线在阻带内非常平滑稳定,在3~5 μm和8~14 μm两个大气窗口^[7]内的平均透过率低于2.5%,且透过率曲线具有边沿陡降截止的特征。

1 工作原理

FSS结构单元分为贴片型和孔径型,分别对电磁波产生带阻和带通的效果。电磁波由一种媒质进入另一种媒质时,会在媒质的分界面上形成反射和透射,用 R 表示反射系数, T 表示透射系数。

在完美传输情况下,透射系数与反射系数可以用等效媒质的本征阻抗来表示:

$$T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_0} \quad (1)$$

$$R = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2)$$

Z_0 为自由空间等效阻抗:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (3)$$

Z_1 为FSS的等效阻抗。设归一化阻抗为:

$$Z = \frac{Z_1}{Z_0} \quad (4)$$

则透射系数和反射系数可以表示为:

$$T = \frac{2Z}{Z+1} \quad (5)$$

$$R = \frac{Z-1}{Z+1} \quad (6)$$

根据公式(5)、(6)可以看出,当归一化阻抗 $Z=0$ 即阻抗失配时,透射系数 $T=0$,FSS具有阻带特性;当归一化阻抗 $Z=1$ 即阻抗匹配时,透射系数 $T=1$,FSS具有通带特性。

2 结构设计

文中采用六边形环状结构复合T形短臂结构的思路设计了一种双屏FSS,其结构如图1所示。它是由两层金属贴片和一层支撑基板构成,两层贴片部分为金,夹层介质为 Y_2O_3 ,其介电常数 $\epsilon_r=3.06$,损耗角正切值 $\tan\delta=0.001$ ^[8]。上下两层FSS结构一致,在每层面上平行密排,相邻三个单元的中心在正三角形的顶点上。依据多重构造理论和谐振理论,利用CST优化后的结构参数为: $L_1=5.25 \mu m$, $L_2=3.03 \mu m$, $L_3=1.65 \mu m$, $L_4=1 \mu m$, $L_5=0.5 \mu m$, $L_6=0.25 \mu m$, $T_1=0.15 \mu m$, $T_2=0.05 \mu m$, $H=0.6 \mu m$, $H_1=0.2 \mu m$ 。

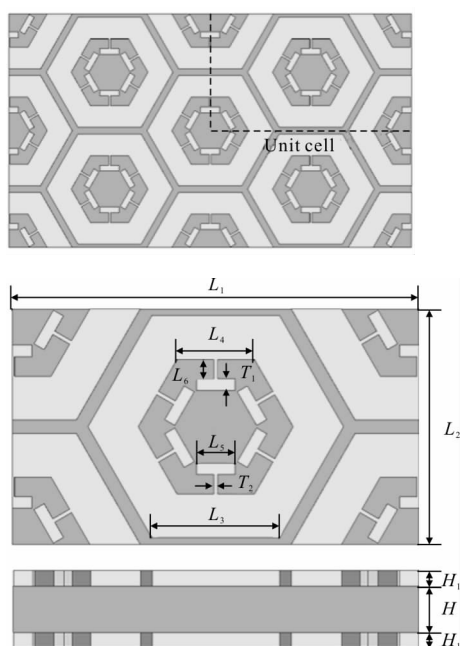


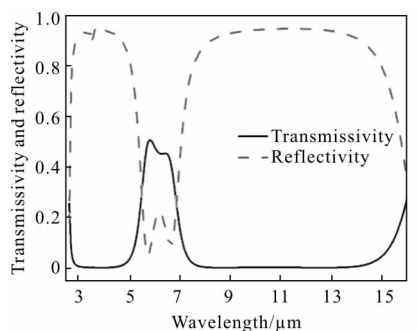
图 1 FSS 单元结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of FSS unit structure

3 仿真与分析

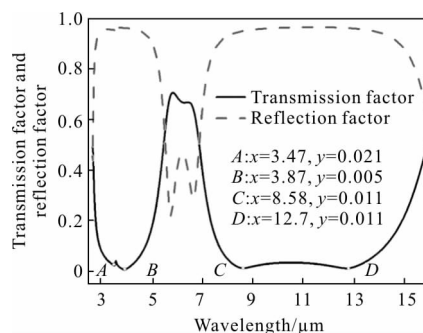
在 CST 电磁仿真软件中, 建立如图 1 所示模型, x 轴、 y 轴边界条件设为 unit cell, 电磁波沿 z 轴垂直入射, 采用频域求解器在 TE 波垂直入射下提取 S 参数, 对参数进行处理并绘制波长与透过率和反射率的关系曲线如图 2(a) 所示, 波长与透过系数和反射系数曲线如图 2(b) 所示。

由图 2(a) 可见, 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个红外大气窗口形成平均透过率低于 2.5% 的阻带。因此该 FSS 结构实现了双阻带的传输特性, 透过率曲线平滑并且具有陡降截止的特征。



(a) FSS 透过率与反射率曲线

(a) Transmissivity and reflectivity curves of FSS



(b) FSS 透过系数与反射系数曲线

(b) Transmission factor and reflection factor curves of FSS

图 2 仿真曲线图

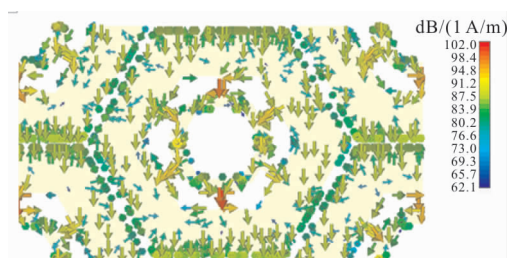
Fig.2 Simulation curves diagram

3.1 FSS 滤波机理分析

3.1.1 表面电流分析法

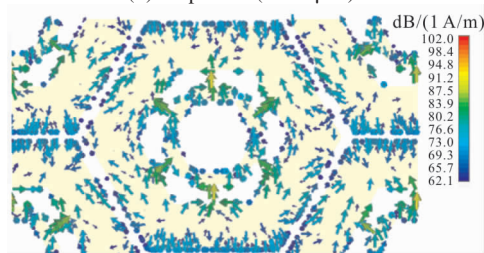
当电磁波入射到 FSS 时, 单元表面会激发出表面电流, 产生散射场, 而散射场的强弱会影响电磁波的透过率。下文通过谐振点处表面电流的分布情况来对 FSS 的滤波机理进行分析。

由图 2(b) 可知在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段具有两个谐振点 A、B。谐振点处单元的表面电流分布如图 3 所示。经分析得知两个谐振点的谐振机制基本相同。两个谐振点处表面电流主要集中于 T 形短臂上, 顶层表面电流强度大于底层, 并且上、下屏激发的电流方向相反, 这表明谐振是由每层结构内相邻单元间的耦合产生。从图 3(a)、3(c) 可以看出在 TE 波入射时, T



(a) 顶层单元 ($3.47\ \mu\text{m}$)

(a) Top unit ($3.47\ \mu\text{m}$)



(b) 底层单元 ($3.47\ \mu\text{m}$)

(b) Bottom unit ($3.47\ \mu\text{m}$)

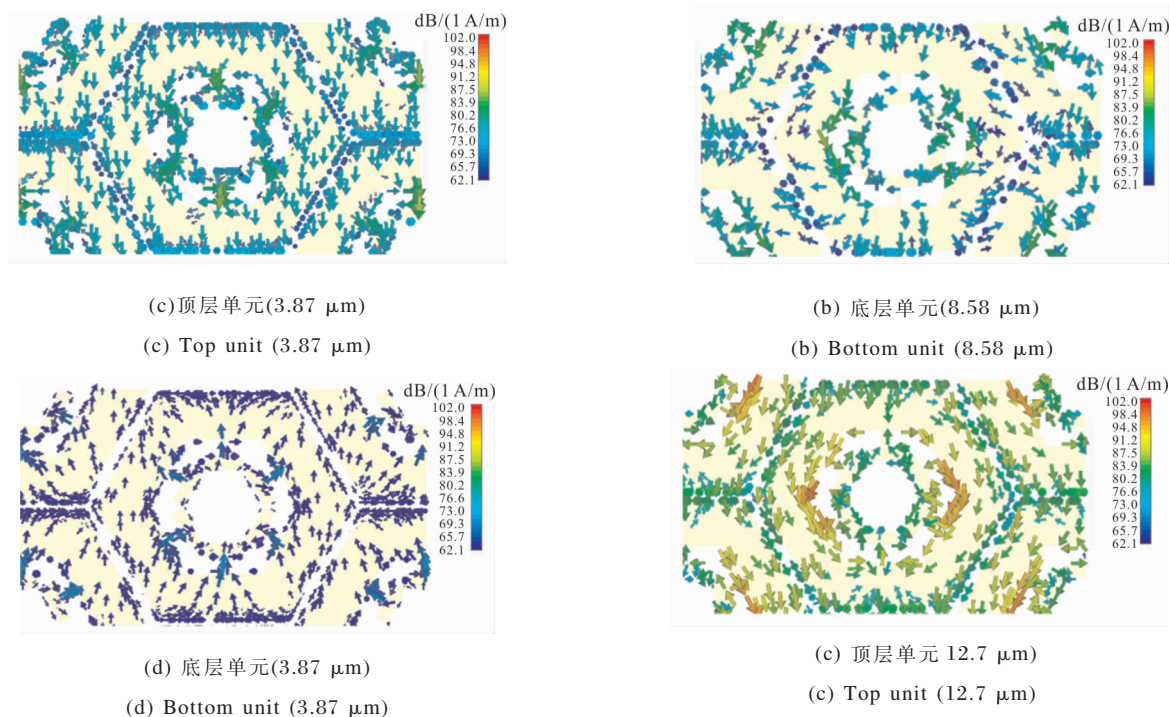


图 3 第二个大气窗口处表面电流分布

Fig.3 Surface current at the second atmospheric window

形短臂产生同向对称分布的电流，形成对称电流模式，使散射总场增强从而使透过率降低，形成阻带。

由图 2(b)可知在 8~14 μm 波段内也具有两个谐振点 C、D。在谐振点 C 处表面电流分布如图 4(a)、(b)所示。在 TE 波入射时，谐振点处表面电流主要集中在六边形环内侧，并且上、下屏电流方向相同，在竖直方向形成对称分布电流，这种屏间耦合形成增强型反射，阻止电磁波通过 FSS。

谐振点 D 处表面电流分布如图 4(c)、(d)所示，由图可知上、下屏上的电流方向相反，所以谐振不是由屏间耦合激发。顶层表面电流强度高于底层，并且顶层六边形环两侧产生同向分布的电流，形成对称电流模式，使单元的散射总场增强从而使透过率降低，形成阻带。

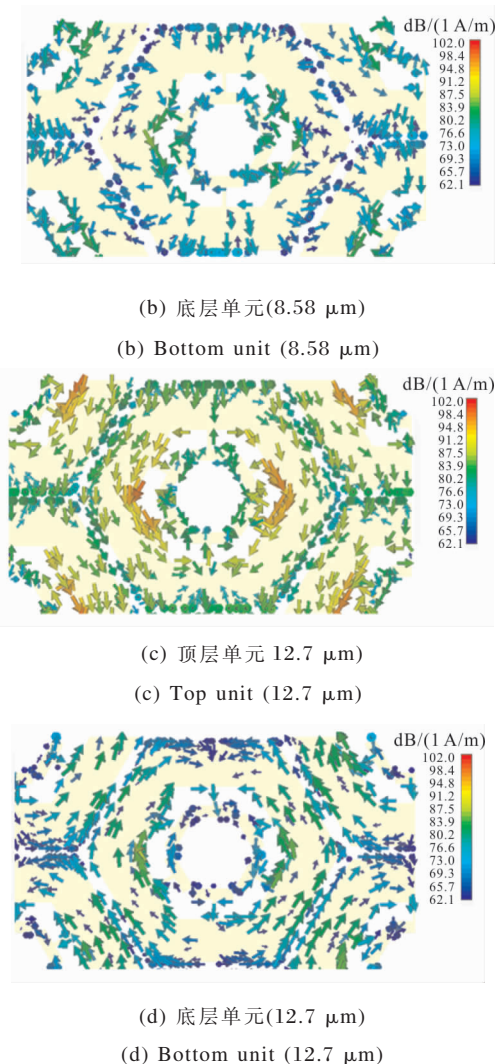
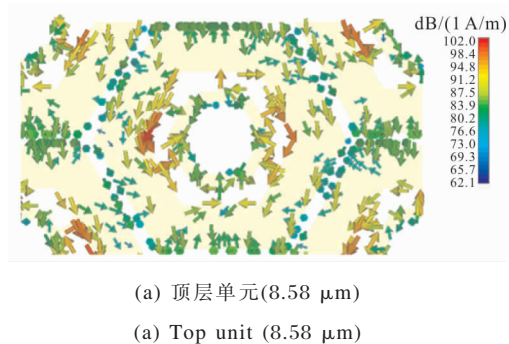


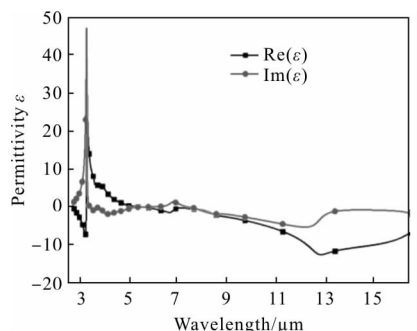
图 4 第三个大气窗口处表面电流分布

Fig.4 Surface current at the third atmospheric window

3.1.2 有效介质理论分析法

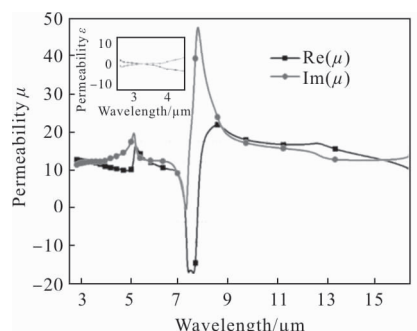
下面通过有效介质理论对 FSS 的传输特性进行深入分析。利用 S 参数绘制等效电磁参数曲线如图 5 所示。图 5(a)、(b)分别为该 FSS 的等效介电常数和磁导率曲线，在 3~3.25 μm 波段，等效介电常数曲线下降到最小值，产生强烈的电谐振，而等效磁导率曲线为正，因此没有磁谐振与之耦合，故形成阻带；在 3.25~5 μm 波段，等效介电常数曲线为正，无电谐振，等效磁导率曲线下降到最小值，产生强烈的磁谐振，所以产生阻带；在 8~14 μm 波段，等效介电常数曲线为负，产生电谐振，但等效磁导率曲线为正，无磁谐振，故形成阻带。图 5(c)为等效表面阻抗曲线，在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内 FSS 的等效阻抗接近于 0，导致阻抗失配，透射系数接

近于 0,形成双阻带。综上所述,利用等效介质理论对 FSS 的滤波机理进行分析与利用表面电流法得到的结论一致。



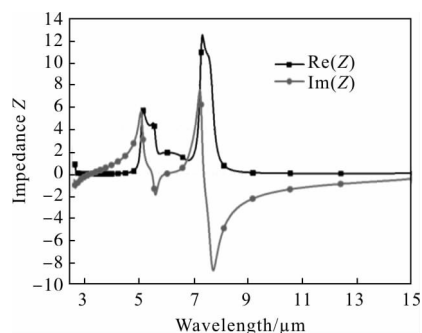
(a) 等效介电常数

(a) Effective permittivity



(b) 等效磁导率

(b) Effective permeability



(c) 等效表面阻抗

(c) Effective surface impedance

图 5 等效电磁参数曲线

Fig.5 Curves of effective electromagnetic parameters

3.2 电磁波极化方式对 FSS 传输特性的影响

在不同偏振波入射情况下对该 FSS 进行仿真计算,绘制透过率曲线如图 6 所示。由图可见,当 TE 波和 TM 波分别入射到该结构时,透过率曲线基本相同,表明该结构对电磁波的极化方式不敏感。

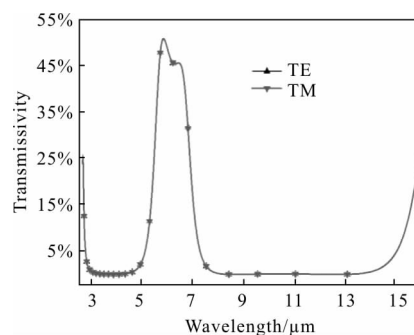


图 6 不同偏振模式对应的透过率曲线

Fig.6 Transmissivity for different polarization mode

3.3 入射角对 FSS 传输特性的影响

在实际情况中,很多时候电磁波并不是垂直入射,而是具有一定的角度。图 7 为 TE 波沿 z 轴以不同的角度入射时的透过率曲线。从图中可以看出,当入射角度从 0°增加到 75°时,FSS 的谐振点保持稳定,通带的透过率下降,并且带宽减小。3~5 μm 波段的曲线产生细微波动并且向长波方向漂移,8~14 μm 波段的透过率曲线向短波方向漂移,在角度为 75°时发生转变,曲线向长波方向漂移。综合来看在笔者等重点关注的两个红外大气窗口该结构具有良好的角度稳定性。

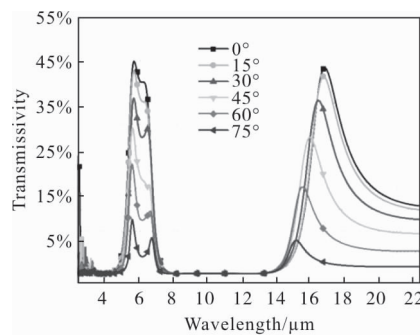


图 7 不同入射角的透过率曲线

Fig.7 Transmissivity for different incident angle

3.4 介质属性对 FSS 传输特性的影响

3.4.1 介质厚度的影响

为探究介质厚度对 FSS 传输特性的影响,以 0.1 μm 为步长改变介质层的厚度 H 得到透过率曲线如图 8 所示。由图可见,随着 H 的增加,曲线整体向短波方向漂移。谐振频率保持不变,原因是单元的结构参数没有发生改变,这是谐振点的决定性因素。

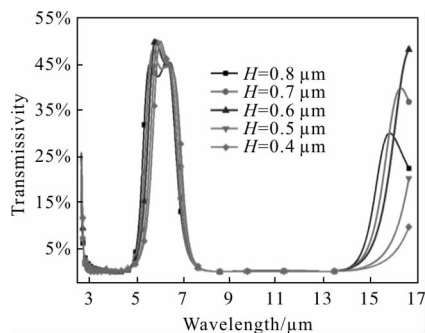


图 8 不同厚度介质的透过率曲线

Fig.8 Transmissivity for dielectric of different thickness

3.4.2 介电常数的影响

选取不同介质材料进行仿真,绘制透过率曲线如图 9 所示。由图可见,随着介电常数的增加,曲线整体向长波方向漂移,并且通带的透过率降低,3~5 μm 波段透过率出现明显波动,这表明介电常数是影响 FSS 传输特性的重要参数,特别是在红外波段。

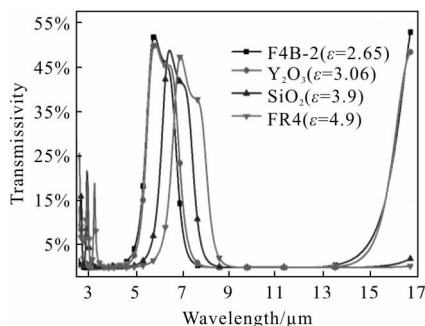


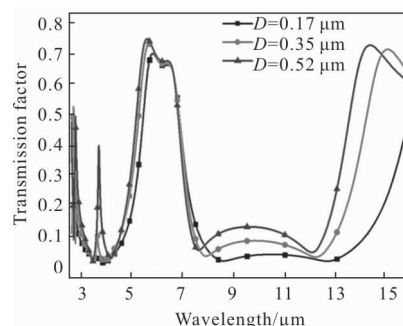
图 9 不同介电常数的透过率曲线

Fig.9 Transmissivity for different dielectric constant

3.5 结构参数对 FSS 传输特性的影响

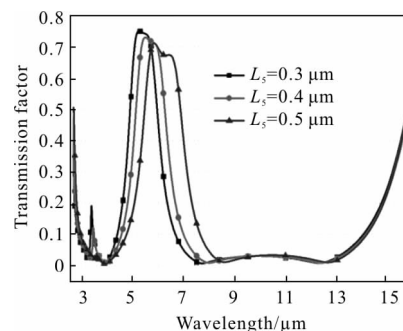
根据多重构造理论和谐振理论,FSS 的结构参数将会对其传输特性产生影响,尤其是谐振点的位置。前面给出了参数优化后的结果,下面通过主要结构参数单元间距 D 、T 形短臂横臂宽 L_5 的变化研究结构参数对谐振点位置的影响规律,结果如图 10 所示。由图 10(a)可见,随着单元间距 D 由 0.17 μm 增大到 0.52 μm,3~5 μm 波段的谐振点向长波方向移动;8~14 μm 波段的谐振点向短波方向移动,阻带带宽减小。由图 10(b)可见,随着参数 L_5 由 0.3 μm 增大到 0.5 μm,3~5 μm 波段的谐振点向长波方向移动;8~14 μm 波段的谐振点也向长波方向移动,阻带带宽减小。同理,六边形环的宽度、T

形短臂的竖臂长等参数也会对谐振点的位置产生影响。



(a) 单元间距 D

(a) Unit cell spacing D



(b) T 形短臂参数 L_5

(b) Parameter L_5 for T-type short arm

图 10 不同结构参数的透过系数曲线

Fig.10 Transmission factor for different structural parameters

4 结论

文中采用六边形环状结构和 T 形短臂结构复合的方式,设计了一种在两个红外大气窗口均具有带阻特性的双屏频率选择表面,并使用 CST 电磁仿真软件对其性质进行了仿真计算。计算结果表明,该 FSS 结构在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段之间的平均透过率低于 2.5%,在中红外和远红外大气窗口波段内对红外辐射传输具有良好的抑制效果。并且由于结构的高度对称性使得该结构具有良好的偏振稳定性和角度稳定性。对红外光而言,介质层厚度、介质材料的选择即介电常数的大小对 FSS 传输特性影响明显。FSS 的结构参数如单元间距、六边形环宽、T 形短臂横臂宽和竖臂长均会对谐振点的位置产生影响。总之,采用 FSS 是同时获得中、远红外大气窗口双阻带的有效途径,有结合实验进一步深入研究的必要。

参考文献:

- [1] Huang Wei, Ji Honghu. Effect of reflected background radiation by skin on infrared characteristics of subsonic aircraft (II): application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2039–2043. (in Chinese)
- [2] Wang Shanshan, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo, et al. Design methods of Y aperture fractal FSS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 959–966. (in Chinese)
- [3] Chen Xin, Gao Jinsong, Wang Yansong, et al. Design of overlapping Y loop element FSS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2043–2049. (in Chinese)
- [4] Yang Bai, Li Zhao, Ju Dongquan, et al. Wide-angle, polarization-independent and dual-band infrared perfect absorber based on L-shaped metamaterial [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8670–8680.
- [5] Mu Xin, Wang Binke, Tian Changhui, et al. Suppression analysis of periodic structure on radiation characteristics in far infrared [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1091–1095. (in Chinese)
- [6] Zheng Lin. The frequency selective surface design of the antenna cover wall structure [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [7] Li Wensheng, Zhang Qin, Fu Yanhua, et al. Design of infrared stealth coating of military vehicle based on photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3299–3303. (in Chinese)
- [8] Zhang Nan, Zhou Peiheng, Wang Shuya, et al. Broadband absorption in mid-infrared metamaterial absorbers with multiple dielectric layers [J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 388–392.