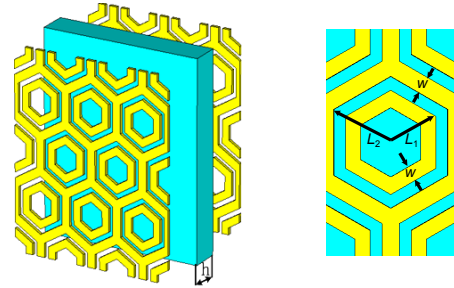




双阻带红外频率选择表面的设计与分析

陈晓莉, 田昌会*, 车志新

空军工程大学理学院, 西安 710051



摘要: 本文设计了工作在第二个大气窗口(3 μm ~5 μm)和第三个大气窗口(8 μm ~14 μm)的双频段 FSS。该 FSS 为双屏结构,由六边形金属网格和六边形谐振环阵列组合而成。仿真结果表明,该 FSS 在两个大气窗口的平均透过率低于 5%,且对不同角度入射的电磁波具有良好的角度稳定性。分析了结构主要尺寸参数对传输特性的影响,结果表明,调整六边形谐振环的单元尺寸能够有效调节 3 μm ~5 μm 波段范围内-10 dB 阻带的带宽,增大金属网格的单元尺寸会使得 8 μm ~14 μm 波段范围内的阻带向长波方向移动。

关键词: 大气窗口; 金属网格; 频率选择表面; 角度稳定性

中图分类号: TN21

文献标志码: A

Design and analysis of infrared frequency selective surface with dual-stopband

Xiaoli Chen, Changhui Tian* and Zhixin Che

Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract: A dual-band frequency selective surface (FSS) with double screen was designed to cover the mid-infrared atmospheric window (3 μm ~5 μm) and the far-infrared atmospheric window (8 μm ~14 μm). This structure is composed of hexagonal metallic mesh and hexagonal resonant ring array. Simulation results show that the average transmission of FSS in atmospheric window is lower than 5%, and this structure is insensitive to the incident angle. The effect of the parameters on transmission properties was analyzed. The results show that adjusting the size of hexagonal ring structure can effectively adjust the -10 dB stopband bandwidth in 3 μm ~5 μm , and increasing the size of metallic mesh can move the stopband in 8 μm ~14 μm to long wave direction.

Keywords: atmospheric window; metallic mesh; frequency selective surface; angle stability

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.003

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(8): 781-785

1 引言

频率选择表面^[1](Frequency selective surface, FSS)是由大量金属贴片单元或导体屏开孔单元周期性排列构成的二维阵列结构,可以有效调控电磁波的传播特

性^[2]。对入射电磁波而言,贴片型 FSS 呈现出带阻特性,孔径型 FSS 呈现出带通特性。FSS 在军事上具有较大的应用价值,在微波波段,可利用 FSS 制作雷达天线罩,在不影响自身雷达工作的前提下,将电磁波反射到非威胁方向,从而缩减天线系统的 RCS^[3]。在红外波段,可利用 FSS 抑制目标的红外辐射,从而降低被敌方红外探测系统侦查到的可能性,除此之外,还可以利用 FSS 设计吸波材料^[4]和 THz 滤波器^[5]。FSS

收稿日期: 2017-06-05; 收到修改稿日期: 2017-07-19

*E-mail: tchtyb001@163.com

在微波波段的研究和应用已比较成熟,而在红外领域的研究还相对较少。目前红外探测技术主要是对目标在第二个和第三个大气窗口内的红外辐射进行被动式探测,抑制目标在大气窗口的红外透过率能有效降低目标被探测到的可能性,基于此我们设计了具有双阻带特性的红外频率选择表面来实现大气窗口的低红外透过率。

相比于微波波段,红外波段 FSS 的设计针对的波段范围更宽。可见,红外波段 FSS 的设计问题是一个宽频带多频段的问题。在设计宽频带 FSS 时,首先要选择合适的单元类型,因为有的单元自身相对于其他单元就是宽带或窄带的。其次,可以通过减小单元间距或采用双屏^[6](多屏)的方式扩展带宽。多频段 FSS 的设计可利用分形结构的自相似特性^[7]、不同谐振单元之间的组合^[8,9]、多层级联结构之间的耦合^[10]来实现。针对红外波段 FSS 设计的特点,本文将六边形金属网

格和六边形谐振环阵列组合在一起,设计了一种在中、远红外大气窗口处平均透过率低于 5% 的双频带 FSS,并分析了主要结构参数对其传输特性的影响。

2 结构设计

金属网格可实现低频波段的电磁屏蔽^[11],利用这一特性抑制目标在第三个大气窗口的红外辐射,如图 1 所示。贴片型的 FSS 具有带阻特性,在不考虑介质因素的情况下,其谐振频率主要取决于贴片单元的尺寸。选择六边形环状结构作为结构单元,通过合理的设计单元尺寸,可实现在第二个大气窗口对目标红外辐射的抑制,如图 2 所示。

本文将六边形金属网格和六边形谐振环阵列进行组合,结构如图 3 所示。整体结构为三层,上下两层结构相同,中间为介质层。所用金属为金,厚度为 $0.15 \mu\text{m}$,其介电常数满足 Drude 模型,等离子频率

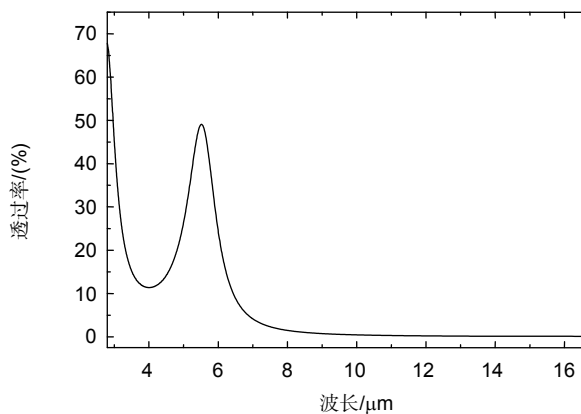


图 1 金属网格的透过率曲线。

Fig. 1 Transmission of metallic mesh.

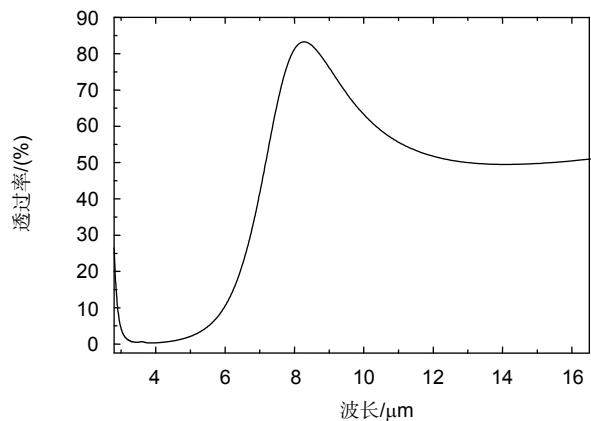


图 2 六边形环状贴片 FSS 的透过率曲线。

Fig. 2 Transmission of FSS with hexagonal loop structure.

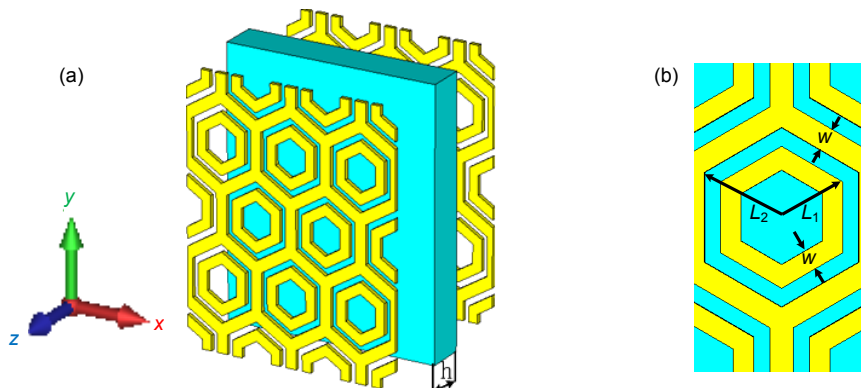


图 3 FSS 结构示意图。(a) FSS 结构。(b) 结构单元。

Fig. 3 Schematic diagram of FSS. (a) The structure of FSS. (b) Unit structure.

$\omega_p/2\pi = 2176$ THz, 碰撞频率 $\omega_c/2\pi = 6.5$ THz。介质层材料为 SiO_2 , 其介电常数 $\varepsilon_r=3.9$, 损耗角正切 $\tan\delta=0.025$ 。通过优化设计最终确定结构单元的尺寸为 $L_1=0.7 \mu\text{m}$, $L_2=0.85 \mu\text{m}$, $w=0.25 \mu\text{m}$, $h=0.9 \mu\text{m}$ 。

3 结果分析

3.1 透过率曲线

利用软件 CST Microwave Studio 进行仿真计算, x 和 y 方向上设置周期边界条件 unit cell, 当 TE 波和 TM 波分别沿 z 轴垂直入射时, 其透过率曲线如图 4 所示。从图中可以看出, $3 \mu\text{m}\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}\sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围内的平均透过率低于 5%, 具有良好的陡截止特性, 且 TE 和 TM 波分别入射时, 透过率曲线基本重合, 说明该结构具有良好的极化稳定性。对于贴片型 FSS 而言, 金属贴片会在入射电磁波的激励下产生感应电

流形成散射场, 散射场与透射场相互抵消从而降低电磁波的透过率, 此外结构对电磁波的吸收也会降低电磁波的透过率。图 5 给出了该结构的反射率、吸收率和透过率曲线, 从图中可以看出, 该结构在 $3 \mu\text{m}\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}\sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围内的反射率约为 90%, 吸收率约为 10%。因此, 该结构在这两个大气窗口内的带阻特性主要是感应电流产生的散射场所造成的。

3.2 角度稳定性

当电磁波的入射角度从 0° 增大到 60° 时, FSS 的透过率曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 入射角度的增加对 $3 \mu\text{m}\sim 5 \mu\text{m}$ 波段范围内透过率的影响较小。随着入射角度的增加, $8 \mu\text{m}\sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围内的透过率有所降低, 说明该结构在第二和第三个大气窗口内具有良好的角度稳定性。

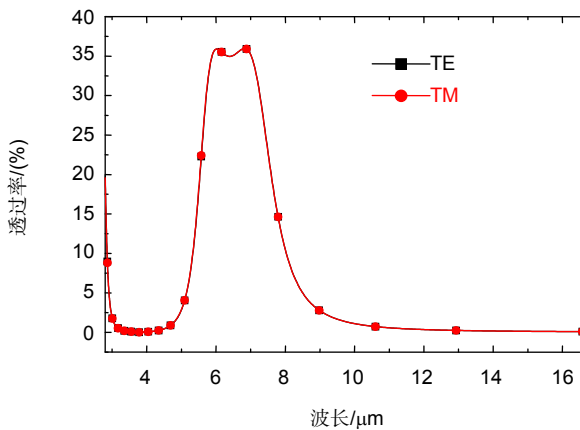


图 4 TE、TM 波入射时 FSS 的透过率曲线。
Fig. 4 The transmission of FSS at the incident of TE and TM wave.

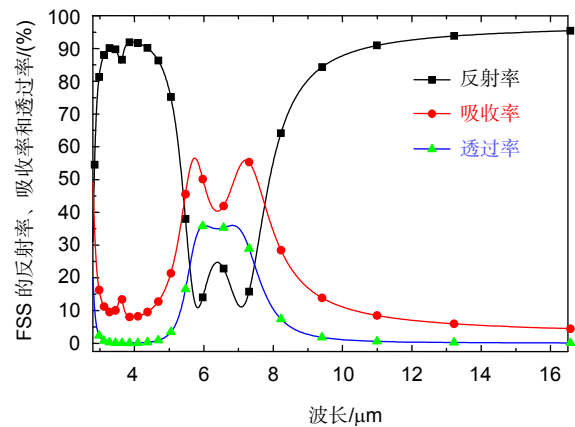


图 5 FSS 的反射率、吸收率和透过率曲线。
Fig. 5 The reflection, absorption and transmission of FSS.

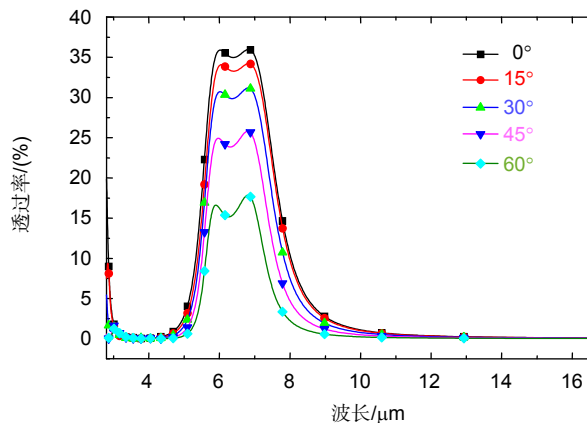


图 6 不同角度入射时 FSS 的透过率曲线。
Fig. 6 The transmission of FSS in different incident angles.

3.3 带阻特性分析

贴片型 FSS 具有带阻特性,为分析 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围内产生传输阻带的原因,分别提取了阻带内 $4\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 处的表面电流,如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出, $4\ \mu\text{m}$ 处环状贴片的表面电流的强度大于金属网格表面电流的强度,因此该点的带阻特性主要是环状结构表面电流产生的散射场所引起的。从图 7(b)中可以看出, $10\ \mu\text{m}$ 处金属网格表面电流的强度大于环状结构表面电流的强度,因此该点的带阻特性主要是由金属网格表面电流产生的散射场所引起的,这也印证了前期的设计思路。

4 尺寸参数对传输特性的影响

4.1 线宽的影响

保持其他参数不变,逐渐减小线宽 w , 透过率曲

线如图 8 所示。从图中可以看出,随着线宽的逐渐减小,透过率曲线向长波方向移动, $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内透过率为 $-10\ \text{dB}$ 的阻带带宽由 $2.47\ \mu\text{m}$ 增加到 $3.08\ \mu\text{m}$,这是由于 w 减小使得六边形环状贴片之间的距离减小,单元之间的耦合作用增强,扩展了带宽。

4.2 六边形环状结构单元尺寸 L_1 的影响

保持其他参数不变改变六边形环状结构的单元尺寸 L_1 , FSS 的透过率曲线如图 9 所示。从图中可以看出,改变 L_1 对 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围透过率的影响较小,对 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内的影响较大。 L_1 从 $0.75\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.60\ \mu\text{m}$ 时, $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内透过率为 $-10\ \text{dB}$ 的阻带带宽由 $2.92\ \mu\text{m}$ 减小到了 $1.65\ \mu\text{m}$,且出现了栅瓣,这是由于 L_1 减小使得六边形环状单元の間隔增大,栅瓣出现的频率降低,单元之间的耦合作用减弱,带宽减小。

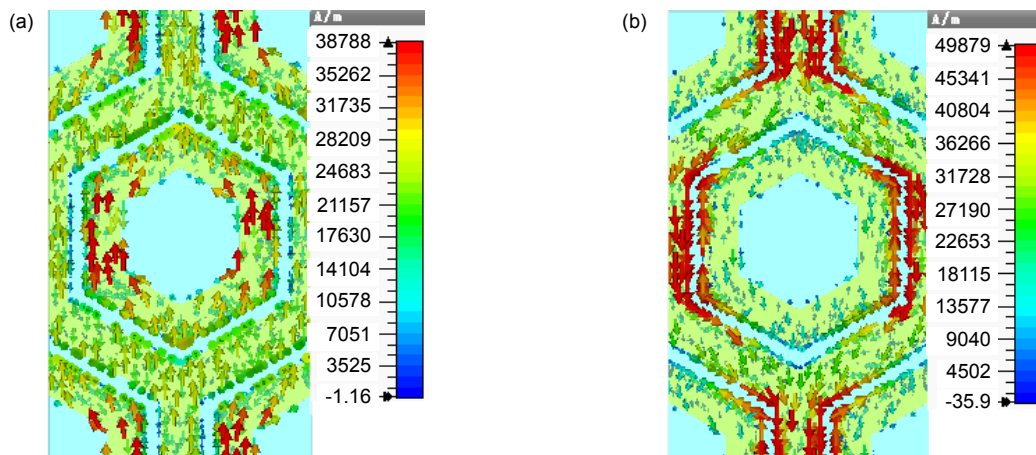


图 7 表面电流. (a) $4\ \mu\text{m}$ 处表面电流. (b) $10\ \mu\text{m}$ 处表面电流.

Fig. 7 Surface current. (a) Surface current at $4\ \mu\text{m}$. (b) Surface current at $10\ \mu\text{m}$.

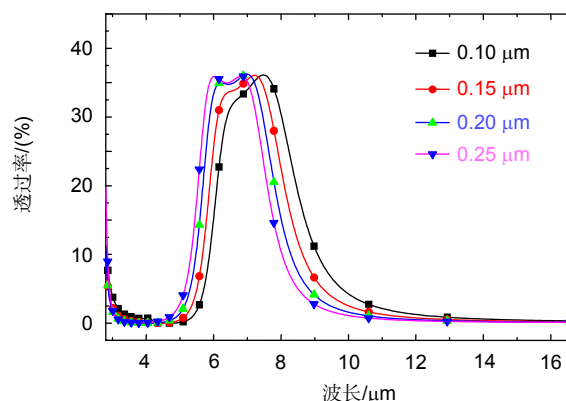


图 8 改变线宽时 FSS 的透过率曲线.

Fig. 8 The transmission of FSS in different line widths.

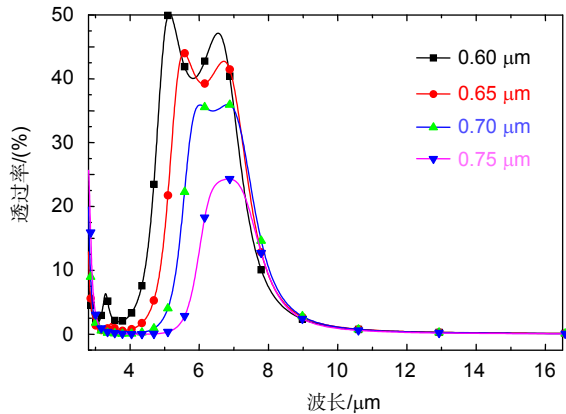


图9 改变六边形环状结构单元尺寸 L_1 时 FSS 的透过率曲线。

Fig. 9 The transmission of FSS with different size L_1 of hexagonal ring structure.

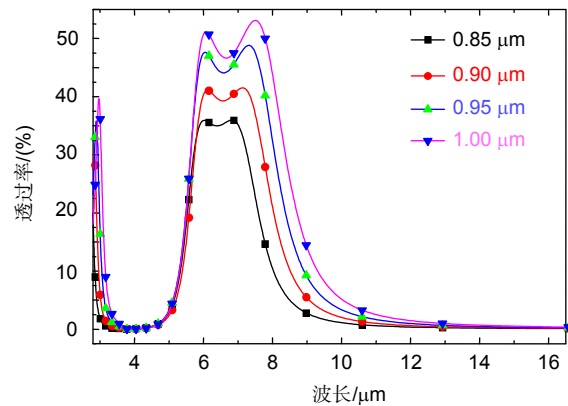


图10 改变金属网格单元尺寸 L_2 时 FSS 的透过率曲线。

Fig. 10 The transmission of FSS with different size L_2 of metallic mesh.

4.3 金属网格单元尺寸 L_2 的影响

保持其他参数不变改变 L_2 , FSS 的透过率曲线如图 10 所示。从图中可以看出, 改变金属网格的单元尺寸 L_2 对 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围透过率的影响较小, 对 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围内的影响较大。 L_2 从 $0.85\ \mu\text{m}$ 变化到 $1\ \mu\text{m}$ 时, 阻带逐渐向长波方向移动, 这是因为该波段范围内阻带的形成主要是利用了金属网格低频波段的电磁屏蔽特性, 增加金属网格的单元尺寸, 使得阻带向长波方向移动。

5 结论

本文利用六边形金属网格和六边形环状结构贴片的组合设计了一种双阻带红外频率选择表面, 仿真结果表明, 该结构在第二个大气窗口 ($3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$) 和第三个大气窗口 ($8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$) 的平均透过率低于 5%, 具有良好的陡截止特性和角度稳定性。调整六边形环状结构的单元尺寸能够有效调节 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内 -10 dB 阻带的带宽, 增大金属网格的单元尺寸会使得 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围内的阻带向长波方向移动。

参考文献

- Munk B A. Frequency selective surface: theory and design[M]. New York: Wiley, 2000.
- Pu Mingbo, Wang Changtao, Wang Yanqin, et al. Subwavelength electromagnetics below the diffraction limit[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(14): 144101.

蒲明博, 王长涛, 王彦钦, 等. 衍射极限尺度下的亚波长电磁学[J]. *物理学报*, 2017, **66**(14): 144101.

- Guo Yinghui, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Advances of dispersion-engineered metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 3-22.
- 郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 等. 电磁超构材料色散调控研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 3-22.
- Liu Haitao, Cheng Haifeng, Chu Zengyong, et al. Absorbing properties of frequency selective surface absorbers with cross-shaped resistive patches[J]. *Materials & Design*, 2007, **28**(7): 2166-2171.
- Lin X Q, Cui T J, Fan Y, et al. Frequency selective surface designed using electric resonant structures in terahertz frequency bands[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, **23**(1): 21-29.
- Mitra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, **76**(12): 1593-1615.
- Romeu J, Rahmat-Samii Y. Fractal FSS: a novel dual-band frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, **48**(7): 1097-1105.
- Gianvittorio J P, Rahmat-Samii Y, Romeu J. Fractal FSS: various self-similar geometries used for dual-band and dual-polarized FSS[C]// *Proceedings of 2001 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2001, **3**: 640-643.
- Gianvittorio J P, Romeu J, Blanch S, et al. Self-similar prefractal frequency selective surfaces for multiband and dual-polarized applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(11): 3088-3096.
- Ranga Y, Matekovits L, Weily A R, et al. A low-profile dual-layer ultra-wideband frequency selective surface reflector[J]. *Micro-wave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(6): 1223-1227.
- Ulrich R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(1): 37-55.