

组合单元频率选择表面的设计研究

曲宝龙^{1,2} 李旭东¹ 张自斌¹ 朱鹏刚¹

¹ 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

² 长江大学化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023

摘要 利用谱域分析法研究了 Y 形与圆孔形组合单元频率选择表面(FSS)结构参数对频率响应特性的影响。该组合单元的频率响应特性同时兼有带通和带阻的双带特性。与其他结构参数相比, Y 形单元的臂长对 FSS 频率响应特性具有至关重要的影响, 臂长由 2.0 mm 增加至 3.5 mm, 带通谐振频率向低频漂移了 4.2 GHz, 带阻谐振频率向低频漂移了 7.0 GHz, 在 -5 dB 的通带传输带宽减少了 6.6 GHz, 阻带传输带宽增加了 4.4 GHz。

关键词 表面光学; 频率响应特性; 谱域法; 频率选择表面; 组合单元

中图分类号 TN713; TN957

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.101603

Design and Study of Combination Element Frequency Selective Surface

Qu Baolong^{1,2} Li Xudong¹ Zhang Zibin¹ Zhu Penggang¹

¹ State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

² College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

Abstract The effects of structure parameters of substrate on the frequency response characteristics of combination element frequency selective surface (FSS) which assembles Y element and circular aperture element are studied using the spectral domain method. Frequency response characteristics of the combination element FSS show double-band characteristic including band pass and band stop. Arm-length of Y element has a very important effect on FSS frequency response characteristic, compared with other parameters. When the arm-length is increased from 2.0 mm to 3.5 mm, the resonant frequency of band pass is drifted by 4.2 GHz and the resonant frequency of band stop is drifted by 7.0 GHz to low frequency, the transmission bandwidth of band pass is decreases by 6.6 GHz and the bandwidth of band stop increases by 4.4 GHz at -5 dB.

Key words optics at surfaces; frequency response characteristic; spectral domain method; frequency selective surface; combination element

OCIS codes 160.4670; 240.6700; 230.4000

1 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元或金属屏上周期性的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构,它通常借助印刷工艺或蚀刻技术制作在介质衬底的表面。FSS 可以用作空间滤波器,它与电磁波相互作用表现出明显的带通或带阻的滤波特性。FSS 具有特定的频率选择作用,被广泛地应用于微波、红外至可见光波段^[1~4]。在 FSS 国内外研究中采用过多种算法,如谱域法^[5]、传输线法^[6]、网络端口算法^[7]、遗传算法^[8]等。这些算法中, Taso 等^[9]在 1982 年提出的谱域分析法不仅数学模型简单,而且计算量较小、计算精度高。1984 年, Taso 等^[10,11]用谱域分析法计算了 3 种 FSS 结构的频率响应特性,为 FSS 的谱域分析法计算提供了很有价值的参考。近年来,大量的实验证明了谱域法在计算 FSS 频率响应特性中的精确性与可靠性^[12~15]。

收稿日期: 2011-04-13; **收到修改稿日期:** 2011-05-16; **网络出版日期:** 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(50271016, 50571042)和国家重大基础研究前期研究专项(2003CCA03800)资助课题。

作者简介: 曲宝龙(1978—),男,博士研究生,讲师,主要从事复合材料内电磁场效应数值计算方面的研究。

E-mail: quboaolong_78@163.com

导师简介: 李旭东(1959—),男,博士,教授,主要从事材料微结构计算学方面的研究。E-mail: li-xd@lut.cn

FSS 频率响应特性由单元尺寸、单元的周期、衬底电性能等诸多因素决定,在组合单元中,其影响因素还包括各个单元电磁效应的耦合。组合单元的频率响应特性一直是国内外研究的热点。本文采用 Galerkin 法求解谱域方程,设计了一种新型的 FSS 组合单元,即 Y 形与圆孔形组合单元结构,应用谱域分析法研究了 FSS 单元的单元尺寸、阵列周期等结构参数对 FSS 结构频率响应特性的影响规律。

2 谱域分析方法

谱域法即谱域中的模式分析方法,其简单过程如下:首先,对空域中按散射场表示式导出的电流积分方程做二维傅里叶变换,由于 FSS 结构表面导电薄片呈周期性阵列结构,其上的感应电流必然也呈相同的周期性分布,所以电流的谱函数为离散量,变化后的空域积分方程转化为谱域的代数方程。然后运用谱域 Galerkin 法或谱域迭代法求出电流谱函数的解,进而计算散射场,得出反射和透射系数。

利用电磁场二重性原理,假设 M 是 FSS 结构上由入射电磁场激励起的感应磁流,则单个单元的散射场可表示为

$$H^s(x, y) = -j\omega \epsilon_0 F(x, y) + \frac{1}{j\omega\mu_0} \Delta[\Delta \cdot F(x, y)], \quad (1)$$

式中

$$F(r) = \int G(r, r') M(r') dr', \quad (2)$$

式中 $G(r, r')$ 为自由空间格林函数,可表达为

$$G(r, r') = \frac{\exp(-jk_0 |r - r'|)}{4\pi |r - r'|}, \quad (3)$$

式中 $|r - r'|$ 为观察点 r 到源点 r' 的距离, k_0 为自由空间波数。

假设 FSS 单元为理想导体(PEC),则在 FSS 单元表面有 $H_t = H_t^s + H_t^{\text{inc}} = 0$ (下标表示切向磁场),应用傅里叶变换,即可得到谱域表达式

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\omega} \iint \frac{1}{j\omega\mu_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \times \tilde{G} \begin{bmatrix} \tilde{M}_x \\ \tilde{M}_y \end{bmatrix} \exp(j\alpha x) \exp(j\beta y) d\alpha d\beta, \quad (4)$$

式中 \tilde{G} 为谱域并矢格林函数,与介质衬底的电参数有关。由于 FSS 阵列是二维周期结构,应用 Floquet 定理可得

$$M(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_m \times \exp\left[j\left(\frac{2m\pi}{D_x} + k_x\right)x\right], \quad (5)$$

$$M(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_n \times \exp\left[j\left(\frac{2n\pi}{D_y} + k_y\right)y\right], \quad (6)$$

式中 D_x 和 D_y 分别表示沿 x 轴和 y 轴方向的周期长度, \tilde{M}_m 和 \tilde{M}_n 是傅里叶级数的系数, k_x 和 k_y 为扫描角决定的 Floquet 传播常数,可表示为

$$k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi, \quad (7)$$

$$k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi. \quad (8)$$

将(5)和(6)式代入(4)式,有

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 D_x D_y} \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \times \tilde{G}(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} \exp(j\alpha_{nm} x) \exp(j\beta_{nm} y). \quad (9)$$

式中 $\tilde{G}(\alpha_{nm}, \beta_{nm})$ 是谱域并矢格林函数,选用屋顶(Rooftop)函数为子域基函数,用矩量法求解(9)式,就可以求出等效磁流分布,进而可以求出反射场和透射场。

由于 FSS 阵列是二维周期结构,由傅里叶变换的性质可知, α 和 β 不再是连续的值,变为 α_{nm} 和 β_{nm} , 对应

相应的 Floquet 谐波表达式为

$$\alpha_{nm} = \frac{2m\pi}{D_x} + k_x, \quad (10)$$

$$\beta_{nm} = \frac{2n\pi}{D_y \sin \Omega} - \frac{2m\pi}{D_x} \cot \Omega + k_y, \quad (11)$$

式中 Ω 是 FSS 两个周期方向的夹角。

3 频率响应特性

3.1 组合单元的频率响应

图 1 为组合单元 FSS 结构示意图。具体参数为圆孔半径 $R=4$ mm, Y 形单元臂长 $L=3$ mm, Y 形单元宽度 $W=1$ mm, 周期 $P=10$ mm, 正方形排列; 衬底厚度 $H=1.5$ mm, 相对介电常数 $\epsilon=2.2$, 相对磁导率 $\mu=1$ 。

应用谱域法对 Y 形单元 FSS、圆孔形单元 FSS 以及组合单元 FSS 结构进行对比研究, 频率响应特性曲线如图 2 所示。显然, 圆孔形单元 FSS 的频率响应特性表现为带通特性, 谐振频率为 21.5 GHz, -5 dB 的传输带宽为 13.8 GHz; Y 形单元 FSS 则表现为典型的带阻特性, 谐振频率为 17.5 GHz, -5 dB 的传输带宽约为 2 GHz。组合型单元 FSS 频率响应曲线则显示出了双带特性, 带通区谐振频率 13 GHz, -5 dB 带宽为 5.8 GHz; 带阻区谐振频率 20 GHz, -5 dB 带宽为 7.8 GHz。对比三者的频率响应可以看出, 组合型单元 FSS 的频率响应特性综合了 Y 形单元和圆孔形单元的频率响应特性, 兼有带通特性和带阻特性。从曲线上来看, 组合型单元 FSS 具有更低的带通谐振频率和更高的带阻谐振频率, 并且降低了通带传输带宽, 增加了阻带传输带宽。

新的频率响应特性不仅仅是两种结构特性的简单叠加。入射电磁波使得 FSS 的金属表面产生感应电流, 作为组合单元的 Y 形单元和圆孔单元的感应电场会发生耦合作用。在耦合作用的影响下, Y 形单元决定的带阻谐振频率向高频漂移, 由原来的 17.5 GHz 变化为 20 GHz; 同时圆孔形单元决定的带通特性向相反的低频方向漂移, 带通谐振频率由原来的 21.5 GHz 向低频漂移到 13 GHz。对于整个 FSS 结构, 低频点的传输特性主要取决于圆孔单元, 带阻谐振频率主要受到 Y 形单元的影响。

FSS 频率响应特性是 FSS 结构参数的函数, 下面将从 Y 形单元尺寸、圆孔单元尺寸等几个方面分析组合型 FSS 的频率响应特性。

3.2 Y 形单元臂长的影响

圆孔半径 4 mm, Y 形单元宽度 1 mm, 周期 10 mm, 改变 Y 形单元的臂长, 研究其对 FSS 频率响应特性的影响。Y 形单元臂长分别为 3.5, 3.0, 2.5 和 2.0 mm。

研究结果如图 3 所示, 所有结果曲线均显示了双带特性。随 Y 形单元臂长增大, 曲线向低频漂移。臂长由 2.0 mm 增加至 3.5 mm, 带通谐振频率向低频漂移了 4.2 GHz, 带阻谐振频率向低频漂移了 7 GHz。在 -5 dB 的通带传输带宽减少了 6.6 GHz, 阻带传输带宽增加了 4.4 GHz。从图 3 还可看出, Y 形单元臂长的变化对栅瓣的出现位置基本没有影响。

显然, 从这组数据来看, 较长的臂长有利于获得更窄的通带带宽和更宽的阻带带宽, 但与较短臂长 FSS 结构相比具有更陡峭的阻带边缘特性, 具体应用要平衡二者之间的关系。

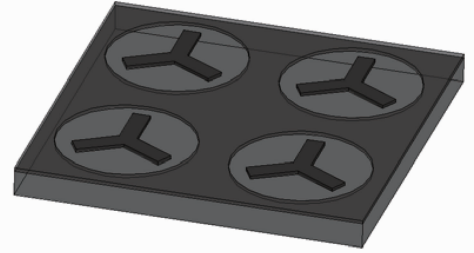


图 1 组合单元 FSS 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combination element FSS structure

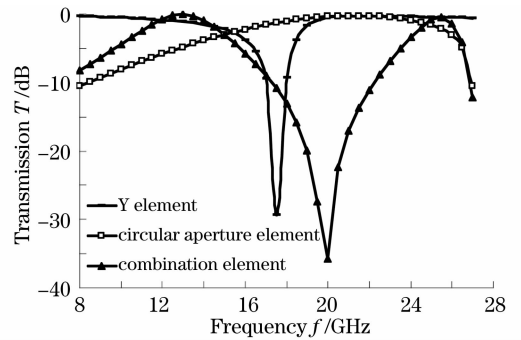


图 2 FSS 频率响应特性曲线

Fig. 2 Curves of frequency response characteristics of FSS

3.3 Y形单元宽度的影响

圆孔半径 4 mm, Y形单元臂长 3.5 mm, 周期 10 mm, 改变 Y形单元宽度, 研究其对 FSS 频率响应特性的影响。Y形单元宽度分别为 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 mm。

计算结果如图 4 所示, FSS 结构依然呈双带特性。Y形单元宽度由 0.5 mm 增加至 2.0 mm, 带通谐振频率向低频漂移了 1.5 GHz, 而带阻谐振频率则向高频漂移了 1.5 GHz。在 -5 dB 处查看传输带宽, 通带带宽基本不变, 而阻带带宽增加了 2 GHz。与 3.1 节分析结果类似, Y形单元宽度的变化对栅瓣的出现位置也没有影响。同时, 从曲线形状可以看出, 这些 FSS 结构的阻带边缘均具有陡峭的特性, 对 FSS 的应用有利。

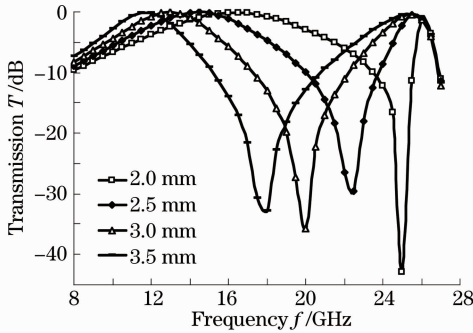


图 3 不同臂长 FSS 频率响应

Fig. 3 Frequency responses of FSSs with various arm-lengths

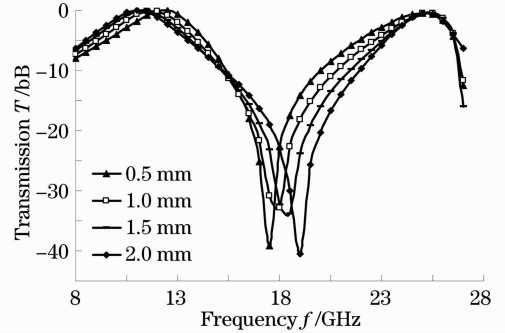


图 4 不同臂宽 FSS 频率响应

Fig. 4 Frequency responses of FSSs with various arm-widths

3.4 圆孔半径尺寸的影响

Y形单元臂长 2.0 mm, 周期 10 mm, Y形单元宽度 1.0 mm, 改变圆孔半径, 研究其大小对 FSS 频率响应特性的影响。圆孔半径尺寸分别为 4.5, 4.0 和 3.5 mm。

计算结果如图 5 所示, FSS 结构仍然表现出双带特性。圆孔半径由 4.5 mm 减小至 3.5 mm, 带通谐振频率基本没有变化, 而阻带谐振频率向高频漂移了 2 GHz。在 -5 dB 处查看传输带宽, 通带传输带宽减小了 5.6 GHz, 阻带谐振带宽则增加了 2.7 GHz。随着圆孔半径减小, 阻带边缘陡峭性逐渐消失, 栅瓣的出现也将延迟。事实上, 当圆孔半径减小至 3.0 mm 时, 在 30 GHz 之前, 将看不到栅瓣的出现。

由这组 FSS 结构的基本参数结合及其频率响应特性曲线可以看出, 当组合式 FSS 单元的间隙较大时, FSS 结构具有较大的通带带宽和较小的阻带带宽。显然这样的结构有利于利用其通带特性, 而不利于应用其阻带特性。

3.5 周期的影响

Y形单元臂长 2.5 mm, Y形单元宽度 1.0 mm, 圆孔半径 3.0 mm, 改变 FSS 阵列周期, 研究周期大小对 FSS 频率响应特性的影响。阵列周期尺寸分别为 10, 9, 8 和 7 mm。

不同周期大小的 FSS 结构频率响应特性曲线如图 6 所示, 双带特性依然很明显。阵列周期由 10 mm 减小至 7 mm, 带通谐振频率基本不漂移, 而带阻谐振频率由 23.5 GHz 漂移至 24.5 GHz, 仅仅漂移了 1 GHz。随着阵列周期减小, 通带带宽增加, 阻带带宽减小。

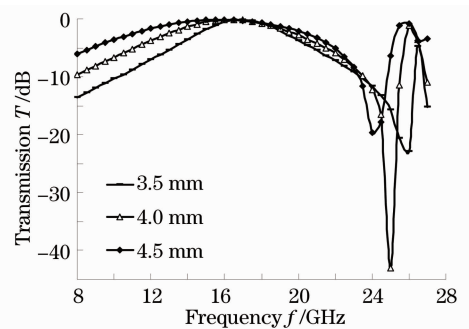


图 5 不同圆孔半径 FSS 频率响应

Fig. 5 Frequency responses of FSSs with various radii of circular aperture

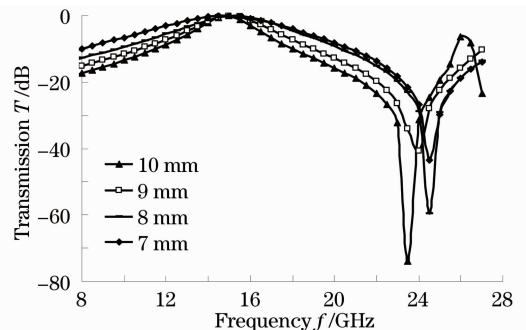


图 6 不同阵列周期 FSS 频率响应

Fig. 6 Frequency responses of FSSs with various periods

4 结 论

本文利用谱域分析方法,研究了组合单元 FSS 结构参数及衬底材料属性对其频率响应特性的影响,经过对频率响应特性曲线的研究,得出以下主要结论。

Y 形与圆孔形组合 FSS 单元的频率响应表现为双带特性,这种特性是二者在电磁场激励下耦合作用的表现。低频区的带通特性主要由圆孔形结构决定,而高频区的带阻特性与 Y 形结构关系较大。在 FSS 结构参数中,Y 形结构的臂长对 FSS 频率响应特性影响最大,臂长越大,则通带带宽越小,阻带带宽越大,谐振频率向低频漂移。

在实际工程中可根据应用环境和应用要求设计 FSS 单元,通过对结构参数的调整可以使这种组合单元应用于不同场合。本研究为组合单元的使用及设计提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Lu Jun, Sun Guancheng, Cai Hongxing. Transmission characteristic of far-infrared frequency selective surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(6): 41~44
卢俊,孙贯成,蔡红星. 远红外频率选择表面的传输特性分析[J]. 光电工程, 2006, **33**(6): 41~44
- 2 Li Xiaoqiu, Gao Jinsong. Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 1071~1076
李小秋,高劲松. Y 环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(6): 1071~1076
- 3 Lin Baoqin, Xu Lijun, Yuan Naichang. Uniplanar compact photonic band-gap on uniaxial anisotropic substrate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3711~3715
林宝勤,徐利军,袁乃昌. 以各向异性介质为衬底的共面紧凑型光子带隙结构[J]. 物理学报, 2005, **54**(8): 3711~3715
- 4 Huaxin Zhu, Jinsong Gao, Jingli Zhao *et al.*. Effective medium theory applied to frequency selective surfaces on periodic substrates [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(12): 1175~1177
- 5 P. S. Antonio Luiz, Assuncao Adaildo Gomes. A sensitivity analysis of frequency selective surfaces at millimeter wave band [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(1): 15~27
- 6 P. S. Antonio Luiz. Analysis of FSS with dielectric losses at millimeter wave band using the transverse transmission line method [J]. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2007, **28**(2): 139~147
- 7 Fang Weihai, Xu Shanxia. Scattering characteristics of dielectric periodic structure composed of left-handed materials with arbitrary oblique incidence [J]. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008, **29**(11): 1060~1069
- 8 Shim Hyungwon, Lee Jihong, Lee Fill-Youb *et al.*. Optimal design of frequency selective surface by genetic algorithm [J]. *International J. Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, **10**(5): 725~732
- 9 C. H. Taso, R. Mittra. A spectral-iteration approach for analyzing scattering from frequency selective surfaces [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1982, **30**(2): 303~308
- 10 C. H. Taso, R. Mittra. Spectral-domain analysis of frequency selective surfaces comprised of periodic arrays of cross dipoles and Jerusalem crosses [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1984, **32**(5): 478~486
- 11 R. Mittra, R. C. Hall, C. H. Tsao. Spectral-domain analysis of circular patch frequency selective surfaces [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1984, **32**(5): 533~536
- 12 Su Xuejun, Gao Jinsong, Zhu Huaxin *et al.*. Frequency selective surface with narrow passband and high transmittance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(3): 561~567
苏学军,高劲松,朱华新等. 窄通带高透过频率选择表面[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(3): 561~567
- 13 Zhu Huaxin, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo *et al.*. A new method of improving frequency selective surface passband transmittance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0223002
朱华新,高劲松,冯晓国等. 一种提高频率选择表面通带透射比的新方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0223002
- 14 Zhu Huaxin, Feng Xiaoguo, Zhao Jingli *et al.*. Design of antireflection and band-pass frequency selective surface combining coatings for ZnS optical window [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2766~2770
朱华新,冯晓国,赵晶丽等. ZnS 光窗上增透与带通频率选择表面组合膜设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2766~2770
- 15 Wang Shanshan, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo *et al.*. Design methods of fractal frequency selective surface based on quasi-optical waveband [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0416001
王珊珊,高劲松,冯晓国等. 基于矩量法分析准光学波段的分形频率选择表面[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0416001