

# 光学透明频率选择表面的研究\*

李小秋<sup>1,2)</sup> 冯晓国<sup>1)</sup> 高劲松<sup>1)</sup>

1) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 10 月 13 日收到, 2007 年 11 月 14 日收到修改稿)

运用谱域 Galerkin 法对光学透明带通频率选择表面(FSS)进行了分析计算,研究了透明导电膜的电导率对光学透明带通 FSS 频率选择特性的影响. 计算及实验结果表明,在雷达波段,透明导电膜的电导率主要影响光学透明带通 FSS 在中心频率处的透过率,光学透明带通 FSS 在透可见反雷达波的同时,还具有选择性透过雷达波段的特性.

关键词: 频率选择表面, 透明导电膜, 电导率

PACC: 7300, 7360

## 1. 引言

频率选择表面(frequency selective surfaces, FSS)是由特定形状的单元图形构成的一种二维周期阵列结构<sup>[1-3]</sup>. FSS 能够较好地控制电磁波的传输和散射,使入射电磁波发生全反射或全透射<sup>[4,5]</sup>. 实际上, FSS 就相当于一个对入射角、极化方式、频率等均有作用的空间滤波器. 因此, FSS 已经在微波、红外直至可见光波段得到广泛应用及其深入研究<sup>[6-8]</sup>.

FSS 具有多种实现方式,最为典型的是由理想导体贴片单元二维周期性的排列构成带阻型 FSS 和在理想导体上二维周期性的开孔构成带通型 FSS. 自上世纪 70 年代以来,国内外学者已经从理论建模、数值计算、工艺实现及其工程应用对其进行了广泛而深入地研究. 为了得到光学透明 FSS,即具有在光学波段透明,在雷达波段具有选择性全透射或者选择性全反射的特性,国外已有文献对 ITO 透明导电膜 FSS 进行了简单的报道,国内还未曾见报道<sup>[9]</sup>. 透明导电 FSS 的这种特性无论在民用还是军用方面都具有广泛的应用前景. 在民用方面,可以利用其在可见区透明,在红外区高反,在无线电波段选择性透过的特点制作环保玻璃,应用在建筑材料和交通工具的挡风玻璃上<sup>[10]</sup>;在军用方面,则可以应用在采用光学和雷达复合制导的飞机和导弹等飞行兵器

的制导舱上,以缩减飞行兵器的雷达散射截面,实现飞行兵器的隐身. 因此,光学透明 FSS 已经引起了广大工程研究人员的关注.

本文以谱域 Galerkin 法为基本分析方法,利用电磁场中的二重性原理对含有一层介质衬底的光学透明带通 FSS 进行了分析计算<sup>[2,11]</sup>. 在其他参数不变的情况下,改变透明导电膜的电导率,对光学透明带通 FSS 的透射系数进行了计算,就不同电导率对光学透明带通 FSS 的频率选择特性的变化情况进行了有效分析.

## 2. 理论分析

对于图 1 所示的含有一层介质衬底的光学透明带通 FSS 的情况,我们首先假设 FSS 层无限薄,透明导电膜的导电率接近金属,  $J_m$  是孔径单元由入射场激励起的感应磁流,  $Z_{ms}$  为孔径单元的表面阻抗,则单个单元的散射场可以表示为

$$\begin{aligned} H^s(x, y) = & -j\omega\epsilon_0 F(x, y) \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot F(x, y)). \end{aligned} \quad (1)$$

在 FSS 孔径单元表面利用阻抗边界条件

$$H_t^s + H_t^{\text{inc}} = Z_{ms} J_m, \quad (2)$$

其中下标  $t$  表示切向磁场,由方程(1)和(2)可以得到

$$-H_t^{\text{inc}}(x, y) = -j\omega\epsilon_0 F(x, y)$$

\* 中国国防创新基金(批准号: CXJJ-149)资助的课题.

$$+ \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)) - Z_{ms} \mathbf{J}_m. \quad (3)$$

对于无穷薄平面只有  $F_x$  和  $F_y$  不为零. 方程(3)写成矩阵形式

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} H_x^{inc}(x, y) \\ H_y^{inc}(x, y) \end{bmatrix} \\ & = - \frac{j\omega\epsilon_0}{k_0^2} \begin{bmatrix} k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} - Z_{ms} \mathbf{J}_m. \end{aligned} \quad (4)$$

此时  $F_x = G * J_{mx}, F_y = G * J_{my}$ .

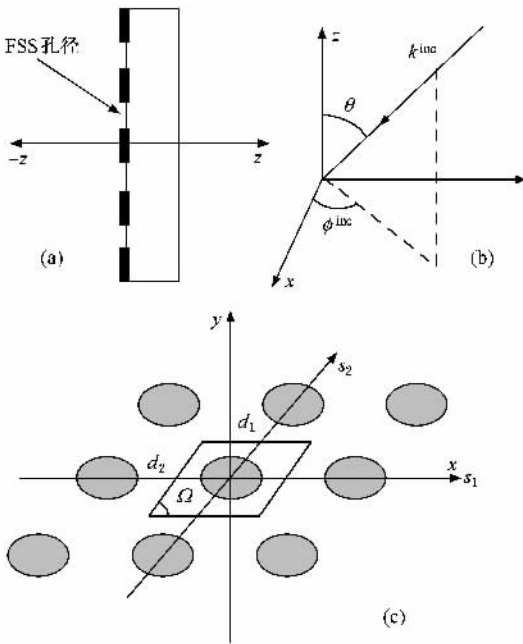


图 1 光学透明带通 FSS 结构示意图 (a)侧视图;(b)入射角;(c)顶视图

由于 FSS 是二维周期结构, 利用 Floquet 定理可得

$$\mathbf{J}_m(x) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{mp} e^{j(2p\pi/d_1 + k_x^{inc})x}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_m(y) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{mq} e^{j(2q\pi/d_2 + k_y^{inc})y}, \quad (7)$$

式(6)中,  $k_x^{inc}$  表示在  $x$  方向的入射波数,  $d_1$  表示在  $x$  方向的周期. (7)式中,  $k_y^{inc}$  表示在  $y$  方向的入射波数,  $d_2$  表示在  $y$  方向的周期.

将(6)(7)式代入(5)式, 有

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} H_x^{inc}(x, y) \\ H_y^{inc}(x, y) \end{bmatrix} \\ & = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 d_1 d_2} \\ & \times \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{pq}^2 & -\alpha_{pq}\beta_{pq} \\ -\alpha_{pq}\beta_{pq} & k_0^2 - \beta_{pq}^2 \end{bmatrix} \\ & \cdot \tilde{G}(\alpha_{pq}, \beta_{pq}) \begin{bmatrix} \tilde{J}_{mx}(\alpha_{pq}, \beta_{pq}) \\ \tilde{J}_{my}(\alpha_{pq}, \beta_{pq}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{pq}x} e^{j\beta_{pq}y} \\ & - Z_{ms} \mathbf{J}_m. \end{aligned} \quad (8)$$

(6)式中,

$$\alpha_{pq} = \frac{2p\pi}{d_1} + k_x^{inc}, \quad (9)$$

$$\beta_{pq} = \frac{2q\pi}{d_2 \sin\Omega} - \frac{2p\pi}{d_1} \cot\Omega + k_y^{inc}, \quad (10)$$

$\Omega$  是 FSS 两个周期方向的夹角.

表面阻抗

$$Z_{ms} = (\tilde{\epsilon}_m / \mu)^{-1/2}, \quad (11)$$

其中  $\tilde{\epsilon}_m$  为透明导电膜的复介电常数, 通常表示为

$$\tilde{\epsilon}_m = \epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon''}. \quad (12)$$

方程(8)(11)(12)清楚地表明透明导电膜的电导率将影响光学透明带通 FSS 的频率选择特性. 将方程(8)中的感应磁流  $\mathbf{J}_m$  以基函数展开后即可进行有效求解, 具体方法见文献[2, 11, 13], 进而可以求得透射系数和反射系数. 通过对在不同频率的入射波激励下, 对光学透明带通 FSS 透射系数进行计算后, 即可完成对光学透明带通 FSS 的频率选择特性的分析.

### 3. 理论计算结果

Y 环单元形状简单, 工艺精度也很容易达到, 对任意极化的情况都能够应用, 带宽比较窄, 中心频率对入射角的变化也比较稳定<sup>[1]</sup>. 因此, 本文以 Y 环

在谱域中, 我们可以用  $G * \mathbf{J} \leftrightarrow \tilde{G} \tilde{\mathbf{J}}, \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} \leftrightarrow j\alpha \mathbf{F}$ ,

$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} \leftrightarrow j\beta \mathbf{F}$  来代替(4)式出现的卷积以及部分导数得到

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} H_x^{inc}(x, y) \\ H_y^{inc}(x, y) \end{bmatrix} \\ & = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega\mu_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \\ & \times \tilde{G} \begin{bmatrix} \tilde{J}_{mx} \\ \tilde{J}_{my} \end{bmatrix} e^{j\alpha x} e^{j\beta y} d\alpha d\beta - Z_{ms} \mathbf{J}_m, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\tilde{G}$  为含有一层介质衬底的谱域并矢格林函数,

单元为例,对光学透明带通 FSS 的频率选择特性进行分析计算. 图 2 是 Y 环单元的尺寸示意图,取  $L = 4.3 \text{ mm}$ ,  $W = 2 \text{ mm}$ ,  $w' = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0.5 \text{ mm}$ ,  $D_x = 10 \text{ mm}$ ,  $D_y = 10 \times \sin 60^\circ \text{ mm}$ , 正三角形排列,介电衬底为石英玻璃板,介电常数为  $\epsilon_r = 3.8$  ( $\text{tg} \delta < 0.1$ ),厚度  $d = 8.7 \text{ mm}$ . 则在电导率分别为  $\sigma = 1.0 \times 10^6 \text{ S/cm}$ ,  $\sigma = 1.0 \times 10^5 \text{ S/cm}$ ,  $\sigma = 1.0 \times 10^4 \text{ S/cm}$ ,  $\sigma = 1.0 \times 10^3 \text{ S/cm}$  时,入射平面波在  $\phi^{\text{inc}} = 0^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$  时计算结果如图 3 所示.

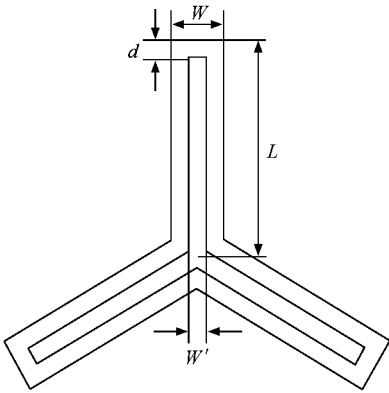


图 2 Y 环单元尺寸示意图

均透过率可以达到 90% 以上. 图 5 给出了光学透明带通 FSS 雷达波段透过率测试曲线,显然在中心频率 9.5 GHz 处的雷达透过率大于 86% .

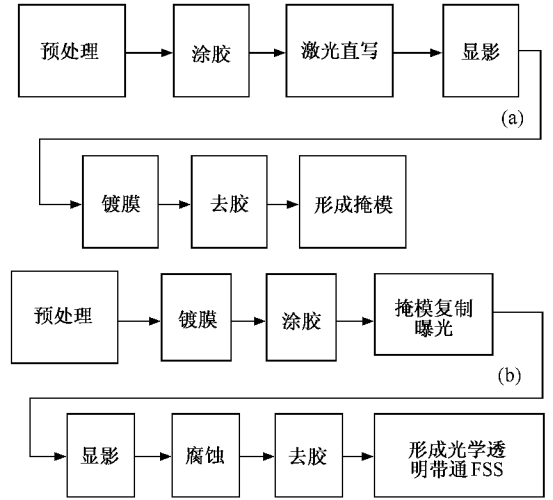


图 4 光学透明带通 FSS 制作工艺流程图 (a)掩膜制作工艺流程图;(b)FSS 单元刻蚀工艺流程

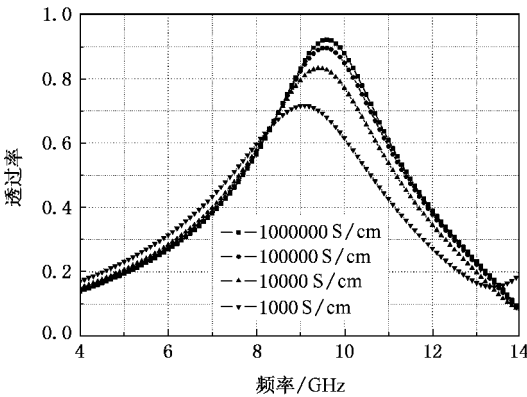


图 3 电导率对光学透明带通 FSS 雷达波段透过率的影响

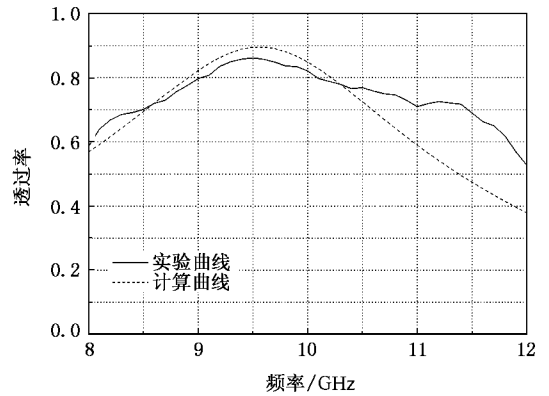


图 5 光学透明带通 FSS 的雷达波段透过率测试曲线

### 4. 实 验

根据上述光学透明带通 FSS 的分析,我们在介电常数为  $\epsilon_r = 3.8$  ( $\text{tg} \delta < 0.1$ ),厚度  $h = 8.7 \text{ mm}$  的石英玻璃板上制备出电导率为  $\sigma = 1.0 \times 10^5 \text{ S/cm}$  的 ITO 透明导电膜<sup>[14-16]</sup>. 采用掩膜复制的方法在制备好的 ITO 膜上刻蚀出 Y 环单元 FSS<sup>[17,18]</sup>,工艺流程如 4 所示. 在可见光波段,光学透明带通 FSS 的平

由于影响因素(理论误差、工艺误差、测试误差等)较多,在求解方程(8)时,感应磁流基函数的展开模式,基函数的选取及个数,Floquet 模的数目均会产生理论误差,具体参考文献[2,11,12]. ITO 膜的厚度是光学波长量级,远远小于雷达波长量级,所以 ITO 膜的厚度不会产生误差. ITO 膜各个位置上的电导率与均值(理论值)有差异,而电导率对光学透明 FSS 传输特性的影响较大,这就产生了工艺误差. 本文的实验曲线比计算曲线选频特性差的主要原因就是 ITO 膜有的位置电导率较低. 在测试中,实验件为有限大平面,其边缘会产生边缘效应;发射天线的波束也只能是一个近似平面波,这就产生了

测试误差. 综上所述, 实验值与理论值有一定误差(理论上中心频率在 9.7 GHz, 中心频率处透过率在 89%), 但也比较接近.

## 5. 结 论

本文提出了采用透明导电薄膜材料来制作光学透明频率选择表面的思想. 并运用谱域 Galerkin 法, 在透明导电膜表面利用阻抗边界条件, 推导出利用该类材料制作的光学透明频率选择表面的电磁场谱域积分方程.

与传统的理想导电材料(如铜)相比, 透明导电膜兼顾了光学透明度高和电导率高的优点. 本文针

对透明导电膜电导率变化的情况, 对各种光学透明 FSS 的传输系数进行了有效计算. 计算结果表明: 在雷达波段, 透明导电膜的电导率主要影响光学透明带通 FSS 在中心频率处的透过率, 电导率越大, 中心频率处的透过率越高.

通过一个具体的工艺实验, 验证了上述主要观点. 测试结果表明: 光学透明带通 FSS 在可见光波段的平均透过率能达到 85% 以上, 在雷达波段中心频率处的透过率达到了 86%. 论文讨论了理论设计与实测结果之间的误差. 误差主要是由于制作的 ITO 膜有的位置电导率较低产生的.

显然, 光学透明频率选择表面在飞行兵器复合制导窗口上有广泛应用前景.

- [ 1 ] Li X Q, Gao J S 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 1070 (in Chinese) [ 李小秋、高劲松 2006 光学精密工程 **14** 1070 ]
- [ 2 ] Munk B A 2000 *Frequency selective surface : theory and design* ( New York : Wiley )
- [ 3 ] Wu T K 1995 *Frequency selective surface and grid array* ( New York : Wiley )
- [ 4 ] Lu J, Sun G C, Cai H X 2006 *Opto-Electronic Engineering* **33** 41 (in Chinese) [ 卢 俊、孙贯成、蔡红星 2006 光电工程 **33** 41 ]
- [ 5 ] Lu J, Zhang J, Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 219 ( in Chinese ) [ 卢 俊、张 颢、孙连春 2005 光学精密工程 **13** 219 ]
- [ 6 ] He B, Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 599
- [ 7 ] He B, Cong Y L 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 704 ( in Chinese ) [ 何 斌、丛玉良 2006 光学精密工程 **14** 704 ]
- [ 8 ] Jia H Y, Feng X G, Gao J S 2007 *Optics and Precision Engineering* **15** 978 ( in Chinese ) [ 贾宏燕、冯晓国、高劲松 2007 光学精密工程 **15** 978 ]
- [ 9 ] Tsakonas C, Liew S C, Koutsogeorgis D C, Ranson R M, Cranton W M, Dudhia M 2001 *Electronics Letters* **37** 1464
- [ 10 ] Mats G, Anders K, Antonio P P R, Bjorn W 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag* **54** 1897
- [ 11 ] Mittra R, Chan C C, Cwik T 1988 *Proceedings of the IEEE* **76** 1593
- [ 12 ] Zhang W J, Wang T M, Cui M, Rong A L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1295 ( in Chinese ) [ 张维佳、王天民、崔 敏、戎霏伦 2006 物理学报 **55** 1295 ]
- [ 13 ] Glisson A W, Wilton D R 1980 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **28** 593
- [ 14 ] Gao J S, Xu Y, Wang X Y, Wang T T 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 397
- [ 15 ] Hao X T, Ma J, Xu X G, Yang Y G, Zhang D H, Yang T L, Ma H L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 351 ( in Chinese ) [ 郝晓涛、马 瑾、徐现刚、杨莺歌、张德恒、杨田林、马洪磊 2002 物理学报 **21** 351 ]
- [ 16 ] Yang Z W, Han S H, Yang T L, Zhao J Q, Ma J, Ma H L, Cheng C F 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1196 ( in Chinese ) [ 杨志伟、韩圣浩、杨田林、赵俊卿、马 瑾、马洪磊、程传福 2000 物理学报 **49** 1196 ]
- [ 17 ] Feng X G, Fang L, Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 59 ( in Chinese ) [ 冯晓国、方 梁、孙连春 2005 光学精密工程 **13** 59 ]
- [ 18 ] Zhang L G, Chen D 2002 *Optics and Precision Engineering* **10** 266 ( in Chinese ) [ 张立国、陈 迪 2002 光学精密工程 **10** 266 ]

# Optically transparent band-pass frequency selective surface<sup>\*</sup>

Li Xiao-Qiu<sup>1 2)</sup> Feng Xiao-Guo<sup>1)</sup> Gao Jin-Song<sup>1)</sup>

1) *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*

2) *Graduate School of Chinese University of Sciences, Beijing 100049, China*

( Received 13 October 2007 ; revised manuscript received 14 November 2007 )

## Abstract

Effects of the conductivity of transparent conductive film on the optically transparent band-pass frequency selective surface ( FSS ) are investigated by using Galerkin 's method in the spectral domain. According to the results of the calculation and measurement , it is found that the conductivity of transparent conductive film mainly affects the transmission coefficient at the resonance frequency in radar wave band. The optically transparent band-pass frequency selective surface can transmit optical band and reflect radar wave band , however , it can also selectively transmit the radar wave.

**Keywords** : frequency selective surface , transparent conductive film , conductivity

**PACC** : 7300 , 7360

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Defense Innovation Foundation of CAS ( Grant No. CXJJ-149 ).