

光学透明频率选择表面的设计研究*

张建¹⁾²⁾ 高劲松¹⁾ 徐念喜^{1)†}

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 北京 100039)

(2012年12月26日收到; 2013年3月28日收到修改稿)

以氟化镁为基底材料, 采用基底、金属网栅与频率选择表面一体化设计方法设计了一种雷达波与光学波段双带通的结构. 利用模式匹配法对设计结构的传输特性进行了仿真研究, 并将设计结果与制备样件的测试结果进行了对比分析. 结果发现: 采用一体化设计的方法设计光学透明频率选择表面, 不仅能够快速得到电场基函数而且还能够准确预估其谐振尺寸, 从而在提高计算效率的同时避免了模式互作用零点的出现. 采用一体化设计方法获得了具有稳定滤波特性的光学透明频率选择表面, 为雷达/红外双模制导头罩的电磁屏蔽技术和隐身技术提供了一种有效技术方案.

关键词: 复合制导, 频率选择表面, 金属网栅, 一体化设计

PACS: 73.20.-r, 73.61.-r

DOI: 10.7498/aps.62.147304

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是由周期性排布的金属贴片单元或金属屏上周期性排列的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构, 它能使电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射^[1-3]. 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深入研究及广泛应用^[4].

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特性的频率选择表面. 光学透明 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^[4]; 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器的制导舱上, 以缩减飞行器的雷达

散射截面, 实现飞行器的隐身. 因此, 光学透明 FSS 已经引起了广大工程研究人员的关注.

国内外已有文献对氧化铟锡 (ITO) 透明导电膜 FSS 进行了报道, 但是 ITO 只适合透可见光, 且其电导率有限, 光学透明带通 FSS 的透射系数较低^[4]. 金属网栅的透光波段能覆盖可见光到红外光的宽波段, 因此, 在金属网栅上制备光学透明 FSS 成为首选. 本文以矢量模式匹配法为基本分析方法, 分析了网栅 FSS 的电场基函数和谐振模式, 计算了光学透明带通 FSS 的透射系数, 通过采用基底、金属网栅与频率选择表面一体化设计的方法优化设计了光学透明带通 FSS. 结合镀膜与光刻技术制备了实验样件, 并搭建了自由空间法测试系统, 测试光学透明 FSS 的毫米波段的频率响应特性, 从而验证了光学透明 FSS 一体化设计方法的优化效果.

2 物理模型的建立

光学透明 FSS 的一般设计步骤分为两步: 首先, 根据指标要求在光学透明基底上设计金属网栅, 然后根据谐振尺寸预估 FSS 几何单元参数. 根据光

* 长春光机所创新三期工程项目 (批准号: 093Y32J090) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xnxlzh999@126.com

学透明 FSS 设计步骤, 我们得到图 1 所示的周期单元模型. 按照图 1 所示的光学透明 FSS 周期单元模型, 运用矢量模式匹配法对其传输特性进行数值计算时, 由于周期单元图形被破坏而发生畸变, 光学透明 FSS 优化设计将存在以下问题:

1) 金属网栅上的十字缝隙单元的一阶偶次谐振模式将会发生畸变, 它不仅影响我们对 FSS 谐振频点的预估 (一阶偶次谐振模式对应的频点为工作频点), 而且还增加了基函数的复杂程度, 从而降低了光学透明 FSS 优化设计的效率;

2) 光学透明 FSS 容易产生模式相互作用零点, 十字缝隙单元上不仅包含一阶偶次谐振模式如图 2(a), 还存在着弯曲模式如图 2(b) 所示, 弯曲模式与一阶偶次谐振模式的谐振波长基本一致, 这意味着电偶极子连接型单元极易出现模式相互作用零点,

如图 2(c) 所示. 因此, 我们应当避免它对光学透明 FSS 传输特性的影响.

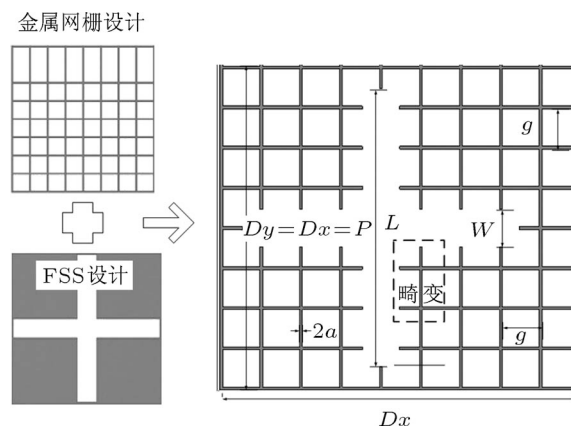


图 1 光学透明 FSS 设计的一般步骤

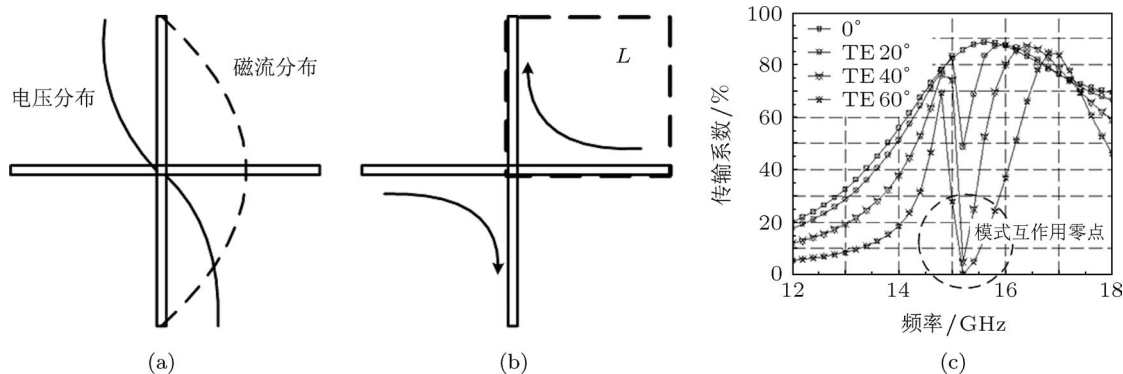


图 2 十字缝隙单元上一阶偶次谐振模式和弯曲模式 (a) 十字缝隙单元一阶偶次谐振模式; (b) 十字缝隙单元弯曲谐振模式; (c) 一阶偶次谐振模式与弯曲模式相互作用产生的模式相互作用零点

鉴于光学透明 FSS 优化设计中存在的问题, 本文提出一种光学透明 FSS 一体化设计的方法. 首先, 根据一阶偶次谐振模式能量透过率尽可能的高、红外基底材料易于加工、最佳入射角度等要求, 利用 (1) 式确定基底电厚度

$$d = \frac{n\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_0}}, \quad (1)$$

其中, λ_0 为设计波长, θ_0 为最佳入射角度, ϵ_r 为介质基底介电常数, $n = 1, 2, 3, \dots$, 然后, 将金属网栅的尺寸与 FSS 的尺寸相匹配, 将众多的设计参数约束为几个参数控制, 光学透明 FSS 一体化设计需要满足的参数约束条件为:

1) FSS 臂宽必须是网栅周期的整数倍减去网栅线宽, $W = k \times g - 2a (k = 1, 2, 3, \dots)$;

2) FSS 臂长与臂宽之差必须为网栅周期的偶

数倍, $L - W = m \times g (m = 2, 4, 6, \dots)$;

3) FSS 周期必须为网栅周期的整数倍, $P = n \times g (n \geq m + k + 1, \text{且 } n \text{ 为整数})$.

我们只需要确定几个参数就可以将整个网栅 FSS 的模型确定下来, 既提高了设计效率, 也保证了 FSS 的谐振尺寸. 网栅 FSS 一体化的设计思想如图 3 所示.

由以上约束条件就可将所有参量用网栅线宽 $2a$ 和网栅周期 g 来表示, 即确定了网栅参量, 也就能确定适应此网栅的 FSS 的参量. m, n, k 的值确定 FSS 相对与网栅的大小和位置, 确定了 m, n, k 的值就确定了 FSS 的嵌入方式, 然后通过调整 $2a$ 和 g 两个参数, 可以对一体化设计的整体电磁特性进行微调.

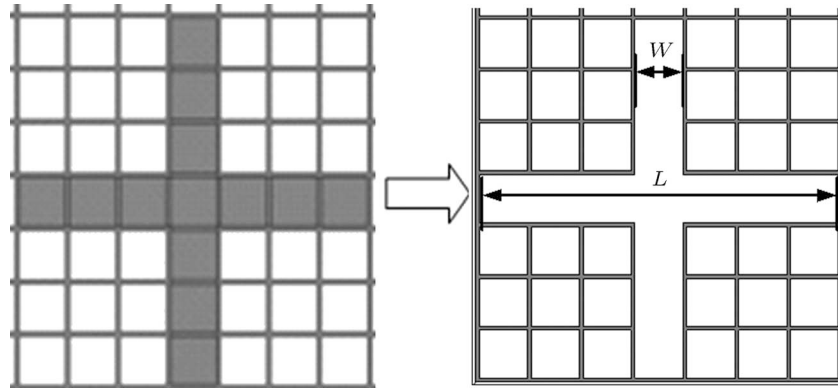


图3 光学透明 FSS 一体化设计

3 数值分析与计算

在应用矢量模式匹配法分析之前, 首先做如下假设: 金属网栅制作在无限大无限薄的理想导体上; 平面波前照射. 矢量模式匹配法是目前 FSS 分析中一种常用而且重要的方法^[5]. 首先, 将平面周期阵列以外的自由空间场或介质区域场以 Floquet 空间谐波的形式展开, 满足 Floquet 条件的标量波动方程的解为

$$S_{pq} = \exp \left[-j \left(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{x} + \frac{2\pi p}{dx} \right) x \right] \times \exp \left[-j \left(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{y} + \frac{2\pi q}{e \cdot \sin \alpha} - \frac{2\pi p}{dx \cdot \tan \alpha} \right) y \right] \times \exp[\pm j \gamma_{pq} z], \quad (2)$$

其中 $\mathbf{k}_0$ 表示平面波的矢量传播常数, $p, q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$. 则第 (p, q) 个矢量 Floquet 模式便可表示为

$$\Psi_{pq}^r = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{d_x d_y}} \cdot \frac{V_{pq} \hat{x} - U_{pq} \hat{y}}{T_{pq}} \Psi_{pq} & \text{TE}(r=1) \\ \frac{1}{\sqrt{d_x d_y}} \cdot \frac{U_{pq} \hat{x} + V_{pq} \hat{y}}{T_{pq}} \Psi_{pq} & \text{TM}(r=0) \end{cases}, \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} U_{pq} &= k \sin \theta \cos \phi + \frac{2\pi p}{d_x}, \\ V_{pq} &= k \sin \theta \sin \phi + \frac{2\pi q}{d_y} - \frac{2\pi p}{d_x \tan \alpha}, \\ p, q &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \\ \gamma_{pq} &= \sqrt{k^2 - t_{pq}^2} \quad k^2 > t_{pq}^2, \end{aligned}$$

$$\gamma_{pq} = -j \sqrt{k^2 - t_{pq}^2} \quad k^2 < t_{pq}^2,$$

$$t_{pq} = \sqrt{U_{pq}^2 + V_{pq}^2}.$$

然后, 将周期表面上的电场按某种正交完备的模式展开, 并在周期表面上相匹配, 从而得到周期表面上的模匹配积分方程^[6,7]:

$$2 \sum_r y_{00r} A_{00r} \phi_{00r} = \sum_p \sum_q \sum_r (Y_{pqr} + y_{pqr}) \phi_{pqr} \iint_{\text{孔径}} \mathbf{E}_t \phi_{pqr}^* ds, \quad (4)$$

其中, (4) 式中的未知量为十字孔径上的电场 $\mathbf{E}_t$. 利用金属网栅上孔径区的边界条件还可以得到 FSS 的透射系数 B_{pqr} 与反射系数 R_{pqr} :

$$\begin{aligned} A_{00r} + R_{00r} &= B_{00r}, \\ r &= 1 \text{ 或 } r = 2, \quad p = q = 0, \\ R_{pqr} &= B_{pqr} = \iint_{\text{十字孔}} \mathbf{E}_t \phi_{pqr}^* ds \\ p, q &\text{ 不同为零}. \end{aligned} \quad (5)$$

运用模匹配技术求解 (4) 式和 (5) 式可以归结为寻求单元栅格上有效的电场展开基函数 (贴片类 FSS 则对应单元栅格上的电流基函数). 基函数的选取原则是其必须满足给定单元的物理电场 (或电流) 边界条件. 则“十”字形单元上的电场基函数 ψ_{mnl} 表示为^[8,9]

$$\psi_{mnl} = \begin{cases} g \left[\frac{n\pi}{d} e_{mnx} x - \frac{m\pi}{L} e_{mny} y \right] & l = 1 (\text{TE}) \\ g \left[\frac{m\pi}{L} e_{mnx} x + \frac{n\pi}{d} e_{mny} y \right] & l = 2 (\text{TE}) \end{cases}, \quad (6)$$

其中,

$$g = \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_n}{dL} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2},$$

$$e_{mnx} = \cos \left(\frac{m\pi}{L} x - \frac{m\pi}{2} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{d} y - \frac{n\pi}{2} \right),$$

$$e_{mny} = \sin \left(\frac{m\pi}{L} x - \frac{m\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{n\pi}{d} y - \frac{n\pi}{2} \right),$$

$$\varepsilon_m, \varepsilon_n = \begin{cases} 1, m, n = 0 \\ 2, m, n \geq 1 \end{cases}.$$

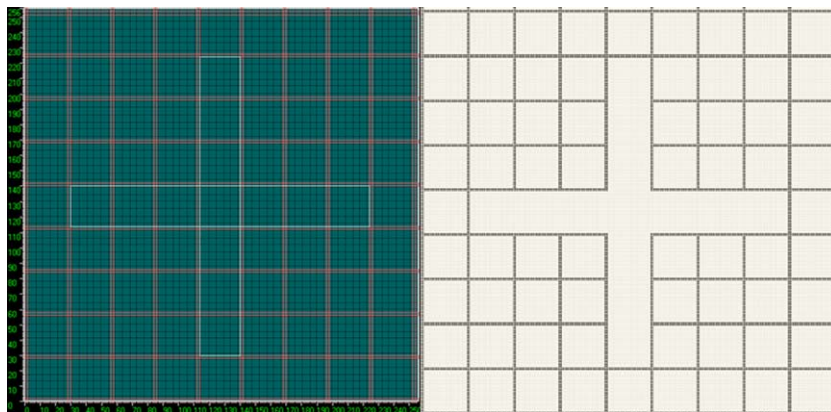


图4 光学透明 FSS 数值计算模型和离散剖分模型

4 数值计算结果分析

在雷达/红外复合制导中, 雷达制导采用毫米波且最佳入射角度为 40° , 红外基底材料为 MgF_2 (相对介电常数为 $\varepsilon_r = 4.8$, 插入损耗 $\tan \delta = 0.005$), 根据 (1) 式得到 $d = 3.82 \text{ mm}$. 根据雷达工作波长, 预估 FSS 的谐振周长也应当在毫米量级, 按照图 3 所示的一体化设计思想, 我们确定了光学透明 FSS 的模型, 阵列为正交栅格排布, 金属网栅与 FSS 的几何结构尺寸为: $m = 6, n = 9, k = 1, 2a = 21 \mu\text{m}, g = 300 \mu\text{m}, L = 2.079 \text{ mm}, W = 279 \mu\text{m}$, FSS 周期 $P = 2.7 \text{ mm}$. 利用矢量模式匹配法, 采用相同的结构尺寸, 建立了三种计算模型: GridFSS 表示未采用一体化设计思想设计的光学透明 FSS, Optimized-GridFSS 表示采用一体化设计思想设计的光学透明 FSS, PEC-FSS 表示在理想导体金属层上的 FSS. 图 5 给出了上述三种模型的数值计算结果对比.

由图 5 可知, 采用一体化设计的光学透明 FSS 谐振尺寸与理想金属导电层设计的 FSS 谐振尺寸基本一致, 而且未采用一体化设计的光学透明 FSS, 谐振尺寸不仅与理想金属导电层设计的 FSS 谐振

最后, 利用矩量法求解 $\mathbf{E}_t = \sum_m \sum_n \sum_{l=1}^2 F_{mnl} \psi_{mnl}$, 式中, $l = 1, 2$ 分别表示 TE, TM 模式, F_{mnl} 为基函数展开系数. 矢量模式积分方程中的未知量便确定, 进而由 (5) 式确定 FSS 的透射系数与反射系数.

图 4 给出了以矢量模式匹配法为原理的 FSS 透射、反射系数计算界面、离散剖分模型. 矢量模式匹配法的求解精度取决于 (4) 式中的 Floquet 模式项个数和 (6) 式中的基函数选取个数.

尺寸相差甚远, 而且滤波曲线中出现模式相互作用零点. 另外, 采用一体化设计的光学透明 FSS 还显著提高了带外截止度.

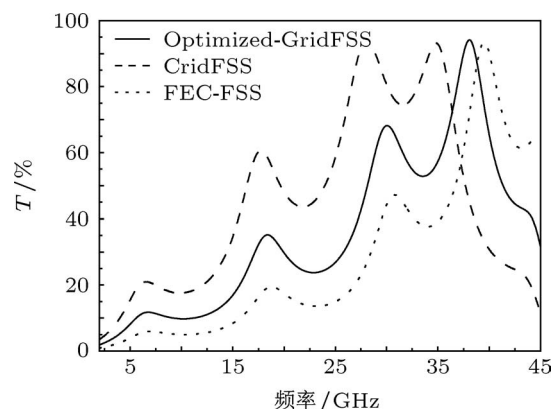


图5 垂直入射时不同模型 FSS 传输特性计算结果对比

为了进一步分析一体化设计的光学透明 FSS 频率响应特性, 我们采用矢量模式匹配法分别计算了光学透明 FSS 的角度稳定特性和基底厚度变化对其传输特性的影响.

图 6 给出了一体化设计的 FSS 在 TE 电磁波 0° — 40° 扫描时的频率响应特性, 由图 6 可知, 采用

一体化设计的光学透明 FSS 具有较好的角度稳定性, 而且扫描角度对其频响特性的影响规律与理想金属层设计的 FSS 基本一致.

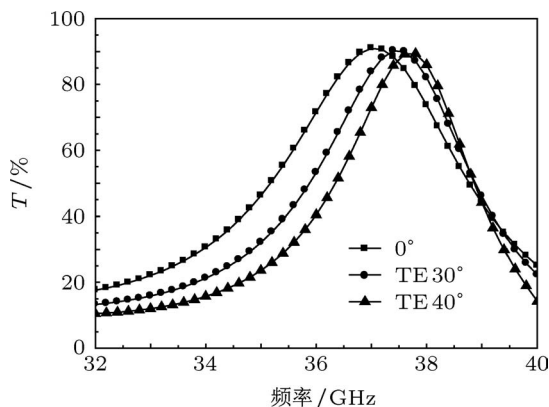


图 6 不同角度入射时光学透明 FSS 数值计算结果对比

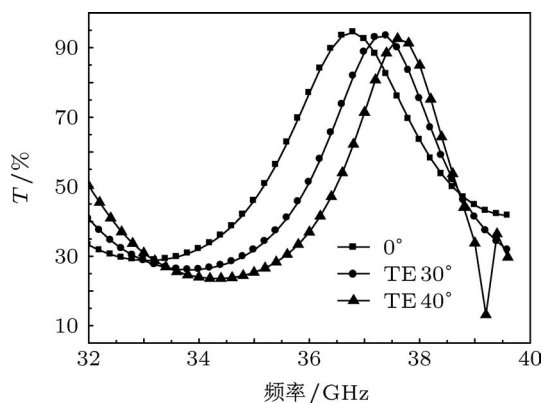


图 7 改变介质基底厚度时光学透明 FSS 数值计算结果

图 7 给出了光学透明 FSS 的 MgF_2 厚度变为 7.64 mm 时, TE 电磁波 0° — 40° 扫描时的频率响应特性. 由图 7 可知, 基底厚度增加一倍时, 光学透明 FSS 毫米波的频响特性基本没有变化. 但是, 基底厚度变大, 会导致入射角度变大时杂散射的提前出现, 不利于获得稳定的滤波特性.

5 实验件的制备与测试

采用图 8 所示的工艺制备流程^[10,11], 制备光学透明 FSS 实验样件. 掩膜板为铬板样件, 加工精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$. 根据红外透过率指标要求 ($\geq 75\%$) 以及掩膜板加工难易程度, 我们确定金属网栅的几何结构参数为: 金属网栅周期 0.3002 mm, 金属网栅线宽 0.0214 mm. 根据图 3 所示的光学透明 FSS 一体化设计思想, 光学透明 FSS 几何结构参数如图 9(a) 所

示. 光学透明 FSS 样件大小为 $76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$, 包含的 FSS 单元数目为 112×112 个, 基底厚度为 3.82 mm 的 MgF_2 .

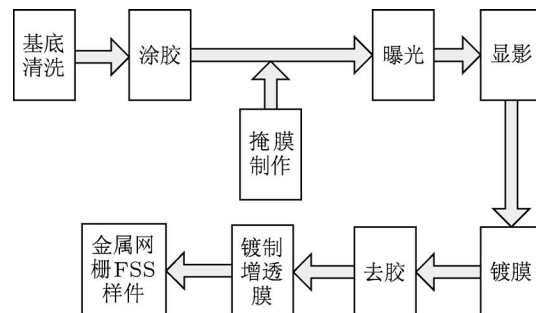


图 8 光学透明 FSS 工艺制备流程

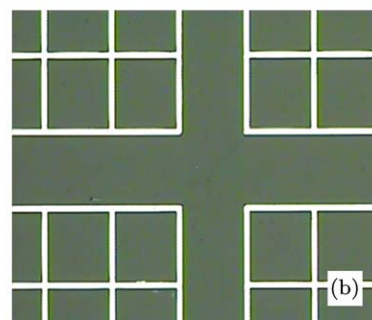
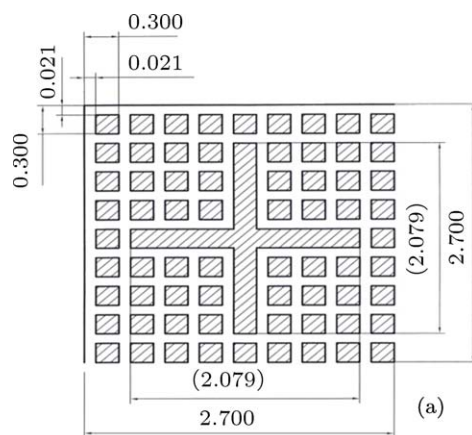


图 9 采用铬板掩膜板制备的光学透明 FSS 实验样件 (a) 光学透明 FSS 掩膜板加工参数 (斜线为非金属区域); (b) 利用 MF-A1010B 型光学显微镜, 在 $300\times$ 下的光学透明 FSS 样品照片 (灰色为非金属区域)

当采用自由空间法测试图 9(b) 所示的测试样件时, 鉴于测试样件尺寸小、测试频率高的特点, 我们搭建了图 10 所示的测试系统. 测试过程主要包括: 校准, 即根据吸波窗口的大小调整矢量网络分析仪的时域门大小; 归零, 即验证电磁波透过吸波窗口后的背景电平; 对齐, 即将喇叭天线的端口面与吸波窗口平行; 测试, 即将测试件垂直放入吸

波窗口内进行测试. 图 10 所示的测试系统能够快速准确地得到试件的频率响应特性, 但由于测试样件尺寸有限, 图 10 所示的测试系统只有在垂直扫描的状态下具有较高的精度 [12,13].

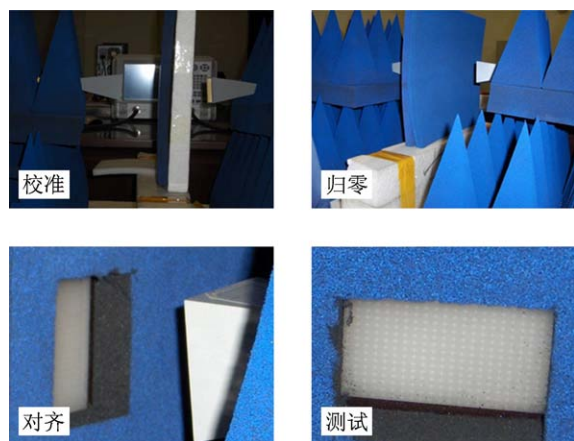


图 10 自由空间法测试光学透明 FSS 毫米波频率响应特性系统图

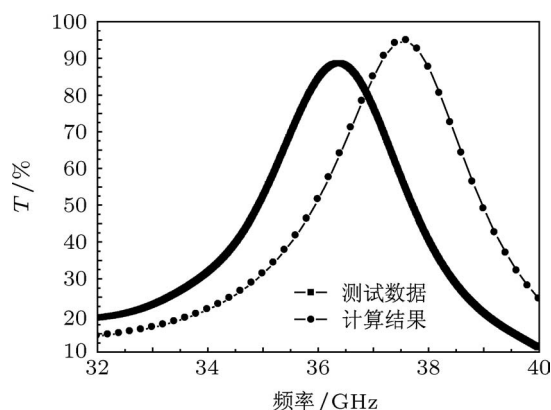


图 11 光学透明 FSS 测试结果与计算结果对比

图 11 给出了光学透明 FSS 测试结果与计算数据的对比. 由图 11 可知, 光学透明 FSS 谐振频点有 1 GHz 的频率漂移, 峰值透过率降低 5% 左右. 造

成测试和仿真出现误差的原因主要有三个: 一是 MgF_2 晶体的介电常数介于 4.7 到 5.4 之间, 计算中使用的介电常数为 4.8, 这是仿真计算和实验测试固有的误差, 导致了频率的较大漂移; 二是在毫米波波段, 相对于厘米波而言, 样件的加工精度要求更高, 微小的误差所造成的频率漂移更加显著; 三是受金属网栅线宽及厚度的影响, 网栅的导电性能有很大程度的下降, 导致了透过率的降低. 考虑上述原因, 光学透明 FSS 测试结果基本验证了计算结果的可行性和准确性, 通过调整 FSS 的单元尺寸和间隔, 使光学透明 FSS 的中心频点分别工作在雷达/红外制导波段, 从而满足工程应用需求.

6 结 论

在金属网栅基底上加载频率选择表面可以制备出光学透明 FSS, 运用矢量模式匹配法对其电磁特性进行了分析计算. 采用基底、金属网栅与频率选择表面一体化设计的方法优化设计了其频响特性. 通过与未优化的光学透明 FSS 对比计算, 得到了明显的优化效果: 不仅能够快速得到电场基函数而且还能够准确预估其谐振尺寸, 从而在提高计算效率的同时避免了模式相互作用零点的出现. 采用自由空间法测试 $76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$ 的光学透明 FSS 样件, 计算与测试结果虽然出现了 1 GHz 频漂, 但可以通过改变 FSS 单元尺寸的方法进行调整, 使中心频点落在设计的带宽内. 验证了光学透明 FSS 设计方法的准确性与可靠性, 为雷达/红外双模制导头罩的电磁屏蔽技术和隐身技术提供了一种有效技术方案.

- [1] Xu N X, Feng X G, Wang Y S, Chen X, Gao J S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114102 (in Chinese) [徐念喜, 冯晓国, 王岩松, 陈新, 高劲松 2011 物理学报 **60** 114102]
- [2] Wang S S, Gao J S, Liang F C, Wang Y S, Chen X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050703 (in Chinese) [王珊珊, 高劲松, 梁凤超, 王岩松, 陈新 2011 物理学报 **60** 050703]
- [3] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易, 张树仁, 卢俊, 王剑波, 孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [4] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋, 高劲松, 赵晶丽, 孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]

- [5] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [6] Chen C C 1973 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **21** 1
- [7] Mittra R, Chan C H, Cwik T 1988 *Proceedings of the IEEE* **76** 1593
- [8] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [9] Pelton E L, Munk B A 1974 *IEEE Trans. On Antennas Propagat.* **32** 799
- [10] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2010 *Acta Phys. Sin.* **57** 3193 (in Chinese) [李小秋, 冯晓国, 高劲松 2010 物理学报 **57** 3193]

- [11] Zhu H X, Feng X G, Zhao J L, Liang F C, Wang Y S, Chen X, Gao J S 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 2766 (in Chinese) [朱华新, 冯晓国, 赵晶丽, 梁凤超, 王岩松, 陈新, 高劲松 2010 光学学报 **30** 2766]
[12] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (1st

- Ed.) (New York: Wiley)
[13] Meng Z J, Lü M Y, Wu Z, Huang J 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 1123 (in Chinese) [蒙志君, 吕明云, 武哲, 黄俊 2008 电波科学学报 **23** 1123]

Design and study of optically transparent band-pass frequency selective surface*

Zhang Jian^{1)2)†} Gao Jin-Song¹⁾ Xu Nian-Xi¹⁾

1) (Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 26 December 2012; revised manuscript received 28 March 2013)

Abstract

Radar and optical dual band-pass film material can be fabricated by the method of loading frequency selective surface into metallic mesh substrate. In this paper its electromagnetic characteristics are analyzed and calculated by the vector mode matching method. Using substrate, metallic mesh and frequency selective surface integration design method, its electromagnetic characteristics are optimized. The calculated and measured results show that optically transparent frequency selective surface which is designed by the integration design method can not only quickly obtain the electric field basis functions but also accurately predict the resonant size, therefore, the computational efficiency is improved and the occurrence of the modal interaction null is avoided. With integration design method, optically transparent band-pass frequency selective surface having a stable filter characteristic is obtained in this paper.

Keywords: combined guidance, frequency selective surface, metallic mesh, integration design

PACS: 73.20.-r, 73.61.-r

DOI: 10.7498/aps.62.147304

* Project supported by the Third Innovation of Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 093Y32J090).

† Corresponding author. E-mail: xnxlzh999@126.com