

# 光学透明频率选择表面的衍射特性

于 淼<sup>1,2</sup> 高劲松<sup>1</sup> 徐念喜<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 基于金属网栅结构设计的光学透明频率选择表面(FSS)加载于复合制导头罩的光学窗口时,其对红外入射光的衍射作用会干扰系统的成像效果。为了能够在光学透明 FSS 的设计过程中减少衍射带来的干扰,基于夫琅禾费衍射理论,研究了光学透明 FSS 结构参数变化对其衍射特性的影响。研究发现:当金属网栅周期增大或线宽减小时,衍射光强增加但分布无变化,其中周期对于光强的影响较为显著;随着十字 FSS 单元缝宽和缝长的增大,衍射光强增加而分布保持不变;此外,当入射光波长增大时,光学透明 FSS 的总透射率增加,与实验测试结果相符。上述规律将在光学透明 FSS 的实际设计过程中起到十分重要的指导作用。

**关键词** 薄膜;频率选择表面;金属网栅;衍射特性;复合制导

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0831001

## Diffraction Characteristics of Optically Transparent Frequency Selective Surface

Yu Miao<sup>1,2</sup> Gao Jinsong<sup>1</sup> Xu Nianxi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Optically transparent frequency selective surface (FSS) is designed on metallic mesh. When it is loaded on the optical window of combined guidance radome, the diffractive effect to infrared will interfere with the quality of imaging system. For reducing the interference in the design procedure of optically transparent FSS, this paper specifically studies the influence of structural parameters of optically transparent FSS on the diffractive characteristics based on Fraunhofer diffractive theory. It is found that when the period of metallic mesh increases or the line width decreases, the intensity of diffractive light increases but distribution remains constant and the period has more notable influence on intensity. As the slit width and length of cross FSS unit increase separately, the diffractive light has rising intensity and unchanged distribution. Moreover, when the wavelength of incident light increases, the integral transmittance of optically transparent FSS increases. These show a good agreement with experimental results. The analysis mentioned above will have an important guiding significance in the process of designing optically transparent FSS.

**Key words** thin films; frequency selective surface; metallic mesh; diffractive characteristic; combined guidance

**OCIS codes** 310.7005; 070.2615; 050.1960; 240.0340

## 1 引言

频率选择表面(FSS)是由特定形状的谐振单元

沿一定方向排列形成的周期性阵列平面结构,是一个对电磁波的入射角、极化方式、频率均有选择作用

收稿日期: 2013-01-16; 收到修改稿日期: 2013-02-16

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期工程项目(093Y32J090)

作者简介: 于 淼(1987—),女,博士研究生,主要从事频率选择表面等方面的研究。E-mail: yumiao1129@126.com

导师简介: 高劲松(1968—),男,博士,研究员,主要从事光学薄膜及隐身材料等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: xnxlzhy999@126.com

的空间滤波器,它在电磁频谱的各个波段都有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。

光学透明 FSS 是在具有亚毫米尺度周期及微米量级线宽的金属网栅上打孔而成,它将金属网栅和 FSS 单元有机地结合为一个整体,从而保证了在不同波长电磁波的入射下表现出不同的电磁特性。在微波波段,它具有带通滤波特性,即在工作频点外的绝大部分电磁波被反射;在红外和可见光波段,电磁波的波长远小于金属网栅周期,此时光学透明 FSS 为宏观结构,前向衍射起主导作用,绝大部分电磁波透射而呈透光特性。这样一种具有微波/红外双带通特性的薄膜材料无论是在民用还是军用方面,均有着十分广泛的应用前景<sup>[3~5]</sup>。其中最为典型的是,当光学透明 FSS 加载于复合制导头罩上时,既能保证光学窗口(观测窗口)红外制导的成像效果,又能减少外部的微波电磁干扰和内部的电磁泄漏,实现探测和隐身的双重功能。因此,光学透明 FSS 凭借其独特的电磁特性已经引起了国内外的广泛关注。

在过去几年间,对于 FSS 器件的研究重心更多地集中在微波波段,主要在于其本身的电磁滤波特性,即单波带或多波带的带通/带阻功能<sup>[6~11]</sup>。然而,对于光学透明 FSS,上述研究则不够全面,尤其是当将其加载于光学窗口时,光学透明 FSS 的引入会对红外波段的人射波产生衍射作用,进而对光学窗口的成像效果产生影响,如成像位置、透射率、光学调制传递函数等因素。因此,为了能够在光学透明 FSS 的实际设计过程中,定性定量地控制衍射作用给成像效果带来的干扰,本文基于夫琅禾费衍射理论,深入研究了光学透明 FSS 结构参数变化对其衍射特性的影响。基于这些影响,可以依据光学系统的约定指标指导光学透明 FSS 的设计,或是针对不同的光学系统提出设计指标。

## 2 单元模型及理论分析方法

### 2.1 光学透明 FSS 几何模型

图 1 所示的是工程中最为常用的一种光学透明 FSS 结构,它是在方格金属网栅上加载了十字型的 FSS 单元。其中,金属网栅的结构参数包括网栅周期  $g$  和线宽  $2a$ ,十字 FSS 单元的结构参数则分别为十字单元周期  $T_x$  和  $T_y$ 、十字缝宽  $w$  和缝长  $L$ 。在金属网栅与十字 FSS 单元的复合过程中两者需要相互匹配以免破坏单元图形形状,即上述参数需要满足如下的约束条件:

1) 十字缝宽必须是金属网栅周期的整数倍减

去金属网栅线宽,即  $w = k \times g - 2a$ ,其中  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;

2) 十字缝长与缝宽之差必须为金属网栅周期的偶数倍,即  $L - w = (m - k) \times g$ ,其中  $m - k = 2, 4, 6, \dots$ ;

3) 十字单元周期必须为金属网栅周期的整数倍,即  $T_x = T_y = n \times g$ ,其中  $n \geq 1$  且  $n$  为正整数。

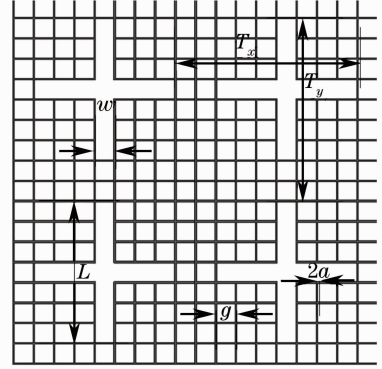


图 1 方格金属网栅与十字 FSS 单元复合得到的光学透明 FSS

Fig. 1 Optically transparent FSS with cross FSS units loaded on square metallic mesh

在实际工程制作及理论分析中发现,上述参数的变化均会对光学透明 FSS 的衍射特性产生不同程度的影响。因此,为了能够更加合理且清晰地阐述各个参数对光学透明 FSS 的作用效果,在后续的实验过程中,将对金属网栅和十字 FSS 单元两个部分分别加以研究和讨论。

### 2.2 衍射特性的理论分析

具有亚毫米周期的光学透明 FSS 在红外波段起着二维衍射光栅的作用,会产生多级次衍射。对于成像效果而言,只有零级次衍射能量用于成像,高级次衍射则会形成杂散光降低成像质量。此外,较高的零级衍射强度意味着光学透明 FSS 有着更高的光学透射率。在成像系统中,光学透明 FSS 所在的光学窗口相当于系统的“入瞳”,因此像面上的光强分布满足光学窗口孔径的夫琅禾费衍射条件,对于单位平面波垂直入射的情况,可以由孔径函数的傅里叶变换求得像面的复振幅分布,进而得到光强分布。

首先,对于独立的  $N \times N$  金属网栅,网栅周期为  $g$ ,线宽为  $2a$ ,其光学孔径函数可以表达为<sup>[12,13]</sup>

$$t_0(x_0, y_0) = \left[ \text{rect}\left(\frac{x_0}{g - 2a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_0}{g - 2a}\right) \right] \otimes \sum_m \delta(x_0 - mg) \otimes \sum_n \delta(y_0 - ng) \left[ \text{rect}\left(\frac{x_0}{Ng}, \frac{y_0}{Ng}\right) \right]. \quad (1)$$

然后,对(1)式进行傅里叶变换,便可以得到衍射光的归一化光强分布:

$$I = \left(\frac{g-2a}{g}\right)^4 \sum_m \sum_n \left[ \text{sinc}\left(n\frac{g-2a}{g}\right) \text{sinc}\left(m\frac{g-2a}{g}\right) \right]^2 \left\{ \text{sinc}\left[Ng\left(u-\frac{n}{g}\right)\right] \text{sinc}\left[Ng\left(v-\frac{m}{g}\right)\right] \right\}^2, \quad (2)$$

式中  $u = \frac{x_0}{\lambda r}$ ,  $v = \frac{y_0}{\lambda r}$ ,  $\lambda$  为入射波长,  $r$  为入瞳到像面的距离。

同理,在研究光学透明 FSS 衍射特性的过程中,首先需要确定如何表征孔径函数。为此,基于图 1 所示的光学透明 FSS 结构,建立如图 2 所示的衍射特性计算模型。

如图 2 所示,  $M \times M$  个单元的光学透明 FSS 的孔径函数可以表示为

$$t_1(x_1, y_1) = \left\{ t_0(x_1, y_1) \times \left[ 1 - \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L}\right) - \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) \right] + \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) - \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) \right\} \otimes \sum_t \delta(x_1 - tT_x) \otimes \sum_s \delta(y_1 - sT_y) \text{rect}\left(\frac{x_1}{MT_x}, \frac{y_1}{MT_y}\right). \quad (3)$$

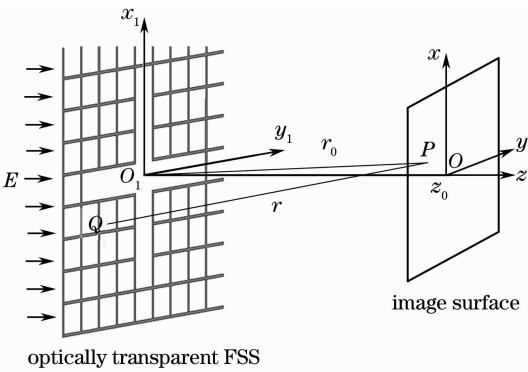


图 2 光学透明 FSS 衍射特性计算模型

Fig. 2 Calculation model of the diffractive characteristics of optically transparent FSS

在得知光学透明 FSS 的孔径函数后,就可以仿照(1)式到(2)式的计算过程,利用傅里叶变换得到像面上的光强分布。此外,从(3)式中不难发现,相比于独立的金属网栅,光学透明 FSS 的孔径函数由于十字 FSS 单元的引入更加复杂,参数也更多,金属网栅和十字 FSS 单元两种结构共同影响着光学

透明 FSS 的衍射特性。更为重要的是,仅考虑单位平面波垂直入射的情况时,根据夫琅禾费衍射理论,在像面上的光强分布是以原点  $O$  为中心的中心对称分布。所以为了能够更加直观简洁,在下一节的分析中,将以  $x-z$  平面为例具体研究光学透明 FSS 参数对衍射特性的影响。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 金属网栅结构参数变化对衍射特性的影响

依照工程常用数据标准,假设以波长为  $3 \mu\text{m}$  的红外光垂直照射到如图 2 所示的光学透明 FSS 上,十字 FSS 单元参数固定,十字单元周期  $T_x = T_y = 3.15 \text{ mm}$ 、十字缝宽  $w = 0.335 \text{ mm}$ 、十字缝长  $L = 2.435 \text{ mm}$ 。首先,保持金属网栅线宽  $2a$  为  $15 \mu\text{m}$ ,分别改变网栅周期  $g$  为  $250$ 、 $350$ 、 $450 \mu\text{m}$ ,并将各参数代入(3)式中,而后利用傅里叶变换得到衍射光的光强分布,模拟结果如图 3(a)所示。然后,令周期  $g$  为  $350 \mu\text{m}$  保持不变,当线宽  $2a$  分别

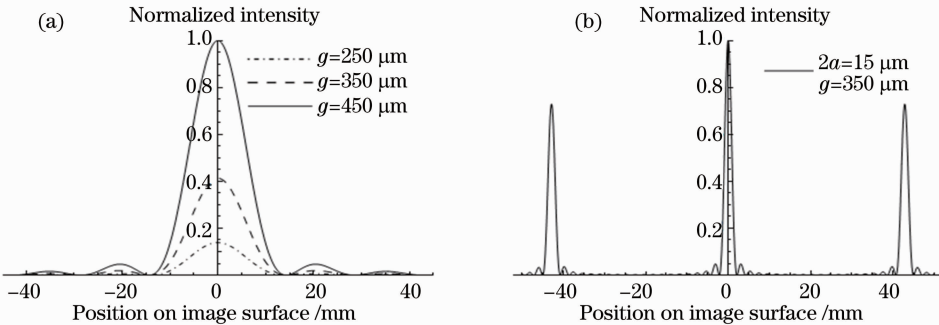


图 3 (a)网栅周期对光学透明 FSS 衍射特性的影响;(b)独立金属网栅的衍射特性

Fig. 3 (a) Influence of period of mesh on the diffractive characteristics of optically transparent FSS; (b) diffractive characteristics of single metallic mesh

为 15、30、45  $\mu\text{m}$  时,获得的衍射特性如图 4 所示。

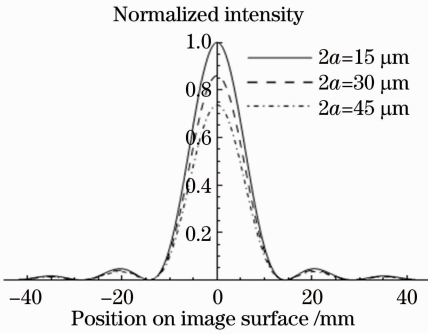


图 4 网栅线宽对光学透明 FSS 衍射特性的影响

Fig. 4 Influence of line width of mesh on the diffractive characteristics of optically transparent FSS

此外,为了更好地突出光学透明 FSS 具有较好的成像能力,在图 3(b)中模拟了独立金属网栅的衍射特性。从图 3(a)和(b)的对比中可以看出,在加入十字 FSS 单元之前,独立的金属网栅结构会对入射光产生多级次衍射并且高级次的衍射光强度很大,一级衍射光强能达到零级光强的 75%,这使得光学系统的局部噪声很高。与之形成鲜明对比的是,光学透明 FSS 的高级次衍射光强很弱,一级衍射光强仅为零级光强的 4%,有效降低了光学系统的噪声,提高了成像质量。因此,从衍射光学角度再

一次证明,光学透明 FSS 作为一种新兴的薄膜材料,相比于传统的独立金属网栅结构,是应用于微波/红外复合制导头罩光学窗口的最佳选择。

另外,结合图 3(a)和图 4 可以看出,金属网栅结构中周期和线宽的变化并不会影响到光学透明 FSS 衍射光强的分布形式,而光强的大小则会随着周期的增大、线宽的减小而增大。其中值得注意的是,由周期所引起的光强变动较线宽因素而言更为显著。这一结论表明在光学透明 FSS 的实际设计过程中,在需要大幅度增加透射率时,增加金属网栅周期是首选方案。

### 3.2 十字 FSS 单元结构参数变化对衍射特性的影响

如 3.1 节中所讨论的,十字 FSS 单元的引入对光学透明 FSS 成像效果的提升有着十分显著的作用,不仅如此,十字 FSS 单元的参数变化也同样会引起光学透明 FSS 衍射特性的改变。为了便于研究,这里首先固定金属网栅的结构参数:金属网栅周期  $g=350 \mu\text{m}$ ,线宽  $2a=15 \mu\text{m}$ 。然后,以波长为  $3 \mu\text{m}$  的红外光垂直照射到具有不同十字缝长  $L$  和缝宽值  $w$  的光学透明 FSS 上,其中十字单元周期  $T_x=T_y=3.15 \text{ mm}$ 。最后,利用傅里叶变换得到如图 5 所示的衍射特性图。

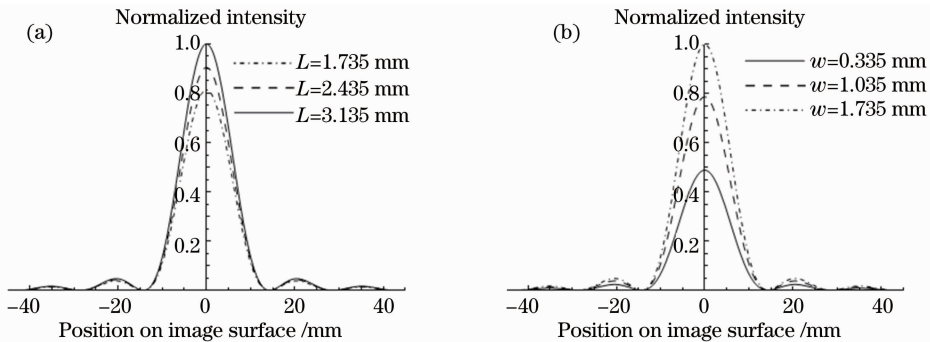


图 5 十字 FSS 单元结构参数对光学透明 FSS 特性的影响。(a)缝长;(b)缝宽

Fig. 5 Influence of structural parameters of cross FSS unit on the diffractive characteristics of optically transparent FSS. (a) Slit length; (b) slit width

在图 5(a)中,十字 FSS 单元的缝宽  $w=0.335 \text{ mm}$ ,当十字缝长  $L$  分别为 1.735、2.435、3.135 mm 时,光学透明 FSS 的衍射光强度呈现上升趋势,而强度分布保持不变。同样地,在图 5(b)中,十字缝长  $L=2.435 \text{ mm}$ ,当十字缝宽由 0.335 mm 增加到 1.735 mm 时,光学透明 FSS 的衍射光强逐步增大,而强度分布无变化。由此可以看出,十字 FSS 单元的参数变化只会影响到衍射光强度的变化,对强度分布无影响。所以,在光学透明 FSS 单元图形

的选择和设计方面又有了新的理论依据:形象来讲,“胖”形的十字 FSS 单元比“瘦”形单元的 optical 透射率更有优势。

### 3.3 入射波长变化对衍射特性的影响

在实验过程中发现,影响光学透明 FSS 衍射特性的因素不仅仅局限于金属网栅和十字 FSS 单元的结构参数,同时还包括入射光的波长因素。因此,这里同样具体研究了入射光波长变化对于光学透明 FSS 衍射特性的影响。



为了与第 4 节的实验相对比,这里选取金属网栅的线宽  $2a=15\ \mu\text{m}$ 、周期  $g=350\ \mu\text{m}$ , 十字 FSS 单元的缝宽  $w=0.335\ \text{mm}$ 、缝长  $L=2.435\ \text{mm}$ 、十字单元周期  $T_x=T_y=3.15\ \text{mm}$ , 然后分别模拟了不同波长入射下光学透明 FSS 的衍射特性, 具体结果如图 6 所示。

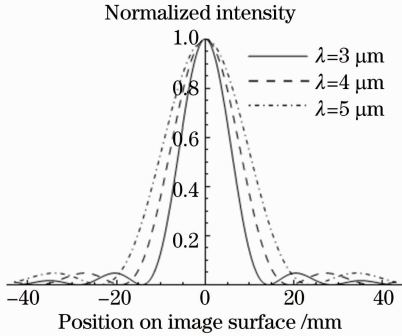


图 6 入射波长对光学透明 FSS 衍射特性的影响  
Fig. 6 Influence of wavelength on the diffractive characteristics of optically transparent FSS

从图 6 中可以看出, 当入射光波长由  $3\ \mu\text{m}$  以  $1\ \mu\text{m}$  的步长增加至  $5\ \mu\text{m}$  时, 三种情况下产生的各级次衍射光强度相同, 唯一的差异在于随着入射波长的增大, 零级衍射光的宽度逐步增加, 这也就意味着光学透明 FSS 对于入射光的总透射率增加。上述结果表明: 在光学透明 FSS 的设计过程中, 当考虑其对于成像系统的影响时, 需要同时兼顾结构参

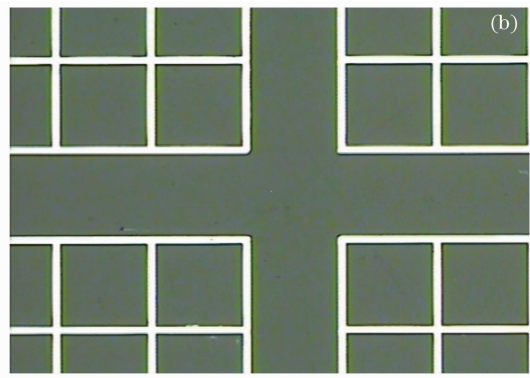


图 8 制备光学透明 FSS 用的 (a) 铬板和 (b) 样品照片

Fig. 8 (a) Chromium board and (b) micrograph of optically transparent FSS for fabrication

得到面积为  $70\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$  的光学透明 FSS 样品后, 利用 Spectrum GX 傅里叶变换光谱仪在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的光波段下对样品的透射率进行测试, 测试结果如图 9(a) 所示。

从图 9(a) 中可以看出, 在  $3\sim 4.9\ \mu\text{m}$  波段内, 光学透明 FSS 具有很高的光学透射率并且平均透射率能够达到  $92.15\%$ , 此外, 图中的曲线走势表

数和入射波长两个方面, 要针对不同的入射条件合理地调节光学透明 FSS 的结构参数。

#### 4 光学透明 FSS 制备与测试

采用图 7 所示的工艺制备流程, 在  $3.82\ \text{mm}$  厚的  $\text{MgF}_2$  基底上制备光学透明 FSS 实验样品。掩模板采用铬板, 考虑工程需求和实验成本, 确定加工精度为  $\pm 1\ \mu\text{m}$ , 光学透明 FSS 铬板如图 8(a) 所示。在  $300\times$  的 MF-A1010B 光学显微镜下获得的光学透明 FSS 实验样品照片如图 8(b) 所示 (灰色为非金属区域)。其中光学透明 FSS 的几何结构尺寸为金属网栅周期  $350\ \mu\text{m}$ 、线宽  $15\ \mu\text{m}$ , 十字 FSS 单元缝长  $2.435\ \text{mm}$ 、缝宽  $0.335\ \text{mm}$ 、十字单元周期  $3.15\ \text{mm}$ 。

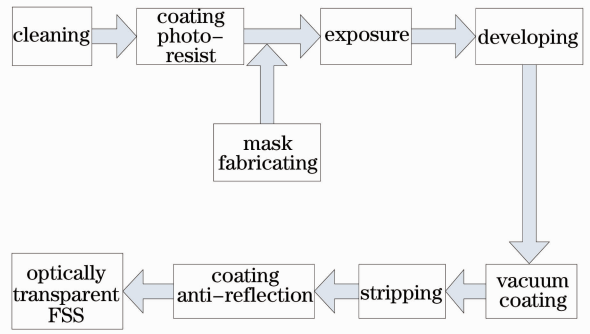


图 7 光学透明 FSS 工艺制备流程

Fig. 7 Fabrication crafts of optically transparent FSS for fabrication

明, 光学透明 FSS 的透射率随波长的增大而逐渐增大, 这一实验结果与 3.3 节中的理论分析完全相符。值得注意的是, 在  $4.9\sim 5.0\ \mu\text{m}$  的范围内, 光学透明 FSS 的透射率发生大幅度下降, 这一现象产生的主要原因是由于实验所采用的  $\text{MgF}_2$  基板在该波段内的透射率过低。为了验证这一观点, 又测量了单独的  $\text{MgF}_2$  基板在该波段内的透射率, 结果如

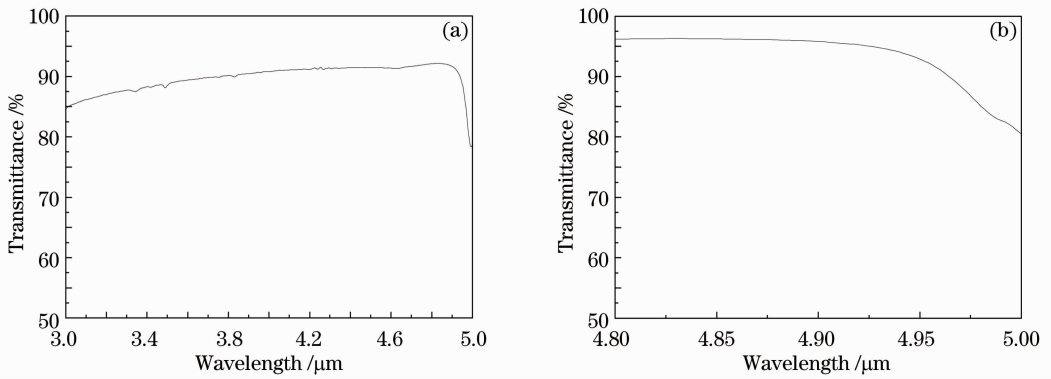


图 9 (a)光学透明 FSS 在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的透射率; (b)单独  $\text{MgF}_2$  基板在 4.8~5  $\mu\text{m}$  波段的透射率

Fig. 9 (a) Transmittance of optically transparent FSS in 3~5  $\mu\text{m}$  waveband; (b) transmittance of single  $\text{MgF}_2$  substrate in 4.8~5  $\mu\text{m}$  waveband

图 9(b)所示。从图中不难看出,单独的  $\text{MgF}_2$  基板在 4.9~5.0  $\mu\text{m}$  的范围内,其透射率发生了明显的下降,并最终影响到了光学透明 FSS 透射率的测量,上述问题可以通过采用变换基板材料等手段加以克服。

## 5 结 论

基于夫琅禾费衍射理论,具体研究了光学透明 FSS 结构参数变化对其衍射特性的影响。通过研究发现:当金属网栅周期增大或线宽减小时,衍射光强度增大但分布保持不变,其中周期对于衍射光强度的影响更为显著;随着十字 FSS 单元缝宽和缝长的增加,衍射光强的分布保持不变,但“胖”形单元比“瘦”形单元的透射率更有优势。此外,还研究了入射波长对衍射特性的影响,从理论分析和实验测试两个方面证实,光学透明 FSS 的总透射率会随着入射波长的增大而增加。上述规律将会在光学透明 FSS 的实际设计过程中起到十分重要的指导作用,为光学透明 FSS 的实用化奠定理论和实验基础。

## 参 考 文 献

- 1 B A Munk. Frequency Selective Surface; Theory and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- 2 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.
- 3 T K Wu. Frequency Selective Surface and Grid Array [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- 4 Jia Hongyan, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo, *et al.*. Novel composite element frequency selective surface [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1596-1600.  
贾宏燕,高劲松,冯晓国,等.一种新型组合单元频率选择表面[J].光学学报,2008,28(8):1596-1600.

- 5 Zhang Long, Chen Lei, Fan Youyu, *et al.*. Development of mid-infrared transmitting glass window and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900134.  
张龙,陈雷,范有余等.中红外玻璃材料发展及前沿应用[J].光学学报,2011,31(9):0900134.
- 6 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.
- 7 Lu Zhengang. Electromagnetic Shielding Methods for Optical Windows Based on Ring and Double-Layer Metallic Meshes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 41~58.  
陆振刚.基于圆环和双层金属网栅结构的光学窗电磁屏蔽方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.41-58.
- 8 Liu Xiaohan, Zhao Jingli, Feng Xiaoguo, *et al.*. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 80~87.  
刘小涵,赵晶丽,冯晓国,等.高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽[J].光学精密工程,2012,20(1):80-87.
- 9 Lu Zhengang, Tan Jiubin, Jin Peng, *et al.*. Equivalent refractive index model on shielding effectiveness analysis of high transparency metallic mesh [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 949-954.  
陆振刚,谭久彬,金鹏,等.高透光率金属网栅屏蔽效率分析的等效折射率模型[J].光学精密工程,2006,14(6):949-954.
- 10 Shen Zhenfeng, Feng Xiaoguo, Gao Jinsong, *et al.*. The inducting mesh coating used for electromagnetic shielding of the infrared windows [J]. Infrared Technology, 2008, 30(8): 468-471.  
申振峰,冯晓国,高劲松,等.用于红外窗电磁屏蔽的电感性网栅薄膜[J].红外技术,2008,30(8):468-471.
- 11 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.
- 12 M Kohin, S J Wein, J D Traylor, *et al.*. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters [J]. Opt. Eng., 1993, 32(5): 911-925.
- 13 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 65-102.  
吕乃光.傅里叶光学[M].北京:机械工业出版社,2006.65~102.

栏目编辑:韩峰