

二维光栅与周期性缝隙阵列组合薄膜结构的 杂散光抑制*

于森¹⁾²⁾ 高劲松¹⁾ 张建¹⁾²⁾ 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 100049)

(2013年6月20日收到; 2013年7月13日收到修改稿)

传统方格型二维光栅与周期性缝隙阵列的组合薄膜结构具有雷达和光学波段双带通的电磁特性. 但由于其杂散光能量集中分布而严重制约它在高精度探测以及成像领域中的应用. 本文提出了一种全新的组合薄膜结构, 即由满足一定约束条件的圆孔型二维光栅和十字缝隙阵列构成. 基于 Fraunhofer 衍射理论建立组合薄膜结构标量衍射模型, 通过对两种组合薄膜结构的衍射光分布, 理论分析与实验测试均表明: 圆孔型光栅与十字缝隙阵列组合薄膜结构不仅能够提高其光学透过率, 而且还使其杂散光分布均匀, 降低了其杂散光总比率, 从而有效抑制杂散光, 进一步增强了二维光栅与周期性缝隙阵列组合薄膜结构在实际光学系统中的可靠性.

关键词: 二维光栅, 组合薄膜结构, 衍射光强, 杂散光

PACS: 42.79.Dj, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.62.204208

1 引言

在电磁屏蔽技术领域, 透射式二维光栅通常是由金属屏上的开孔单元组成, 其周期远大于光学波长, 同时又远小于雷达波长, 可见这样的结构尺寸选择使其具有对高频光波透过和对低频微波截止的频率滤波功能, 可显著提高光学窗的抗辐射能力, 且在实现衰减电磁波功能的同时对光学窗的观通性影响较小, 在成像系统的光学窗上得到广泛应用^[1]. 十字缝隙阵列同样也是由金属屏上的开孔单元构成的二维周期结构, 它可以使电磁波在特定的频率上产生谐振, 起到一种空间滤波的作用^[2-4]. 当将这两种薄膜结构组合时, 不仅获得了一种光学透明窗口, 而且还实现了对不同频率的雷达波选择性透过, 能够同时满足雷达/光学波段透过的薄膜结构已经引起了广大工程研究人员的关注^[5,6].

目前, 国内外大多采用透明导电聚合物研究雷达/红外双波段带通的薄膜结构, 如用 ITO 透明导

电薄膜制作缝隙阵列, 但是 ITO 只适用于可见光波段, 且受到电导率的限制, 这种光学透明带通缝隙阵列的透射系数较低^[7]. 另外, 还有采用半导体薄膜制作缝隙阵列, 虽然它可以透红外波段, 但在微波波段有明显衰减, 且带宽较窄. 宗志园等^[8] 在缝隙阵列单元图形周围加金属薄片以提高微波波段的透过率, 但是要严格控制金属薄片所占面积小于总面积的 18%. 与上述方法相比, 利用二维光栅与周期性缝隙阵列组合薄膜结构则更具优势, 因为通过控制光栅的周期和线宽, 其透光波段能够覆盖可见光到红外光的宽波段. 传统组合薄膜结构的制作方法是在方格型二维光栅上设计缝隙阵列单元, 当红外光通过这种结构时, 高级次衍射能量主要分布在与光栅栅线平行的轴线上, 这种杂散光集中分布的现象严重制约了组合薄膜结构在高精度探测以及成像领域中的应用. 为了避免上述问题的发生, 减小高级次衍射总能量是一个有效方法, 可是这会造成雷达波段带外截止度以及带内透过率的降低.

* 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

因此,如何解决缝隙阵列的带外截止度以及带内透过率与透光能力之间的固有矛盾,并克服其高级次衍射能量集中分布的缺点,已成为实现高性能雷达/红外双带通组合薄膜结构的关键技术问题。

针对这一关键问题,本文提出了一种全新的组合薄膜结构,它是在满足一定约束条件下由圆孔型二维光栅和十字缝隙阵列组合而成。基于 Fraunhofer 衍射理论建立其对应标量衍射模型,对比分析了两种组合薄膜结构的衍射特性,理论模拟与实验结果均表明:相比于传统的方格型组合薄膜结构,圆孔型组合薄膜结构可以从降低杂散光总比率、均匀化杂散光分布两方面有效抑制杂散光。

2 模型建立

传统的方格型组合薄膜结构模型如图 1 所示,它将二维光栅与十字形的缝隙阵列单元有机结合。其光电特性设计步骤:首先,要根据其光学特性要求确定二维光栅的参数,包括线宽 $2a$,周期 g ;然后,根据其电磁特性要求预估缝隙阵列单元的尺寸,包括十字缝隙阵列的单元间隔 D_x, D_y ,十字缝隙单元腿宽 w 和腿长 L 。

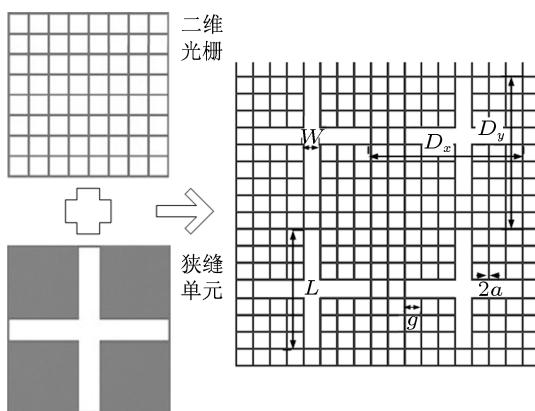


图 1 方格型组合薄膜结构模型

在成像系统中,组合薄膜结构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 Fraunhofer 衍射条件,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^[5]。

图 2 给出了不同角度照射下,方格型组合薄膜结构衍射光强分布规律。从图中可以清晰地看出,高级次衍射光主要集中分布在与光栅栅线平行的两轴上,而其他区域衍射强度则很小。在无外加干

扰的情况下,组合薄膜结构的高级次衍射是其所在光学系统中产生杂散光的主要来源,高级次衍射能量的集中分布就等同于杂散光的集中分布,这一问题对光学成像系统影响较大,尤其是在对多点目标成像时,杂散光的集中分布极易产生虚假探测信号,从而掩盖真实的探测目标。为此,在组合薄膜结构的设计过程中,必须对杂散光进行抑制,以减少其对成像系统的影响。由光的衍射特性可知,如果构成一种新型的孔径单元形状,改变其高级次衍射的分布规律,使高级次衍射能量平均分布到各个衍射级次上,那么就可以有效抑制杂散光的集中分布。基于这一思想,我们提出一种新型的组合薄膜结构,它是在圆孔型的二维光栅上设计十字缝隙阵列单元,其结构特征如图 3 所示。

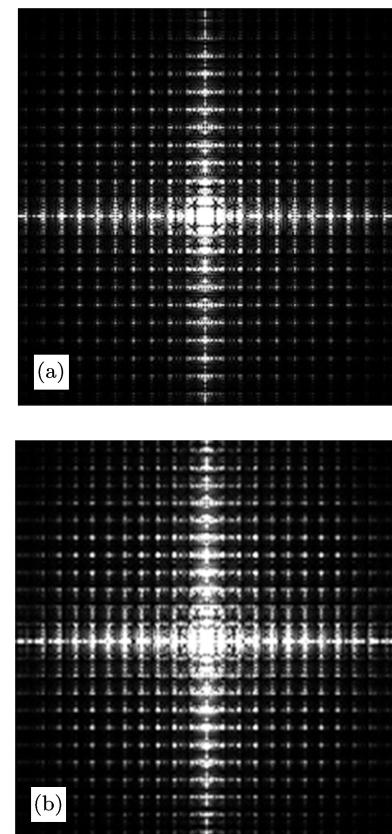


图 2 不同入射角度下方格型组合薄膜结构衍射光强分布 (a) 0° 照射; (b) 30° 照射

值得注意的是,在设计上述的圆孔型组合薄膜结构时需要严格遵守二维光栅与十字缝隙阵列单元的约束条件:1) 缝隙阵列的十字单元周期必须是二维光栅周期的整数倍;2) 十字图形的腿长和腿宽所包含的二维光栅周期个数是整数;3) 十字长所占二维光栅个数 m 与其宽所占个数 n 的差值需是偶数。只有满足上述条件时,才能够有效避免十字缝

隙阵列单元的一阶偶次谐振模式的畸变, 以及模式的互作用零点^[9].

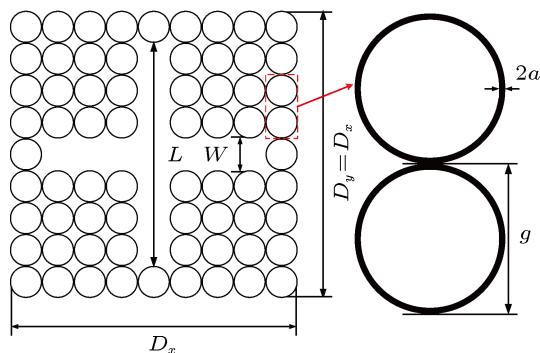


图 3 圆孔型组合薄膜结构模型

3 理论分析与计算

3.1 光学透过率计算

在获知圆孔型二维光栅与缝隙阵列组合的结构后, 这里将对其光学透过率进行计算, 并与方格型组合薄膜结构进行对比. 研究表明^[10-12], 二维光栅的总透过率等于二维光栅的占空比, 即孔的总面积/二维光栅总面积. 同样的, 在考虑组合薄膜结构时, 也可以采用此方法对其光学透过率进行计算. 根据图 1 和图 3 所示的结构特征, 方格型组合薄膜结构和圆孔型组合薄膜结构的总透过率分别为

$$T_G = \left(1 - \frac{2a}{g}\right)^2 \left(1 - \frac{2km - k^2}{n^2}\right) + \frac{2km - k^2}{n^2} + \frac{4a^2 - 4amg}{n^2 g^2}, \quad (1)$$

$$T_A = \left(1 - \frac{2\pi ag - 4a^2\pi}{g^2}\right)^2 \left(1 - \frac{2km - k^2}{n^2}\right) + \frac{2km - k^2}{n^2}. \quad (2)$$

众所周知, 二维光栅的周期 g 与线宽 $2a$ 是一对影响二维光栅透过率与屏蔽效率的矛盾参量, 在组合薄膜结构的设计过程中亦是如此, 所以往往要考虑 $2a$ 和 g 的比值, 即 $2a/g$. 根据 (1) 和 (2) 式, 图 4 给出了在不同 $2a/g$ 的取值下, 方格型组合薄膜结构与圆孔型组合薄膜结构的总透过率情况.

由图 4 可知, 当金属栅格周期 g 一定时, 对于具有相同栅格线宽 $2a$ 的两种组合薄膜结构, 圆孔型结构的总透过率总是优于方格型结构, 且两者的差距会随着 $2a/g$ 的增大而逐渐增大. 值得注意的是, 若要满足高透过率的要求, 圆孔型组合薄膜的

$2a/g$ 的取值应小于 0.2, 相比于方格型的 $2a/g$ 应小于 0.13, 放宽了设计尺寸的要求, 更易于制作. 根据 Kohin 等^[12] 的研究结论, 将 (1) 和 (2) 式平方后即可得到零级光的透过率. 由图 4 不难发现, 圆孔型组合薄膜结构的零级光透过率也总是高于方格型组合薄膜结构. 这一结果说明, 当红外光分别通过这两种组合薄膜结构后, 圆孔型结构的零级衍射光强度更高. 对于实际成像系统而言, 这就意味着有效信息量更大, 相应地, 对于成像产生干扰的杂散光总量也就更小. 为了从理论上验证这一想法, 下面将对两种结构的杂散光进行分析.

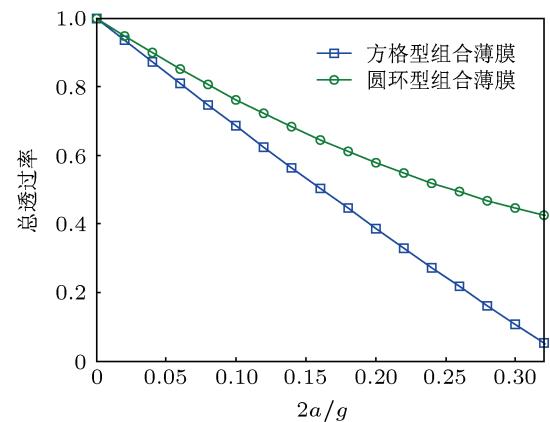


图 4 两种组合薄膜结构总透过率对比

3.2 杂散光分析

杂散光透过率是指总透过率减去零级光透过率, 而杂散光的总比率则为杂散光透过率与总透过率的比值. 对于两种不同结构的组合薄膜结构, 它们杂散光的总比率分别为

$$S_G = (T_G - T_{G0})/T_G, \quad (3)$$

$$S_A = (T_A - T_{A0})/T_A, \quad (4)$$

其中 T_{G0} 和 T_{A0} 为两种结构的零级光透过率. 根据 (3) 和 (4) 式, 方格型组合薄膜结构与圆孔型组合薄膜结构的杂散光总比率如图 5 所示.

从图 5 中不难发现, 在 $2a/g$ 的取值逐渐增大的过程中, 圆孔型组合薄膜结构的杂散光总比率始终小于方格型组合薄膜结构. 由此可见, 圆孔型组合薄膜结构对杂散光的抑制作用要明显优于方格型组合薄膜结构, 它能通过降低杂散光在透过光中的比率来有效抑制杂散光对于成像系统的影响. 进一步地, 我们将从衍射光强分布的角度来深入探讨圆孔型组合薄膜结构是否有能力使杂散光分布更

加均匀.

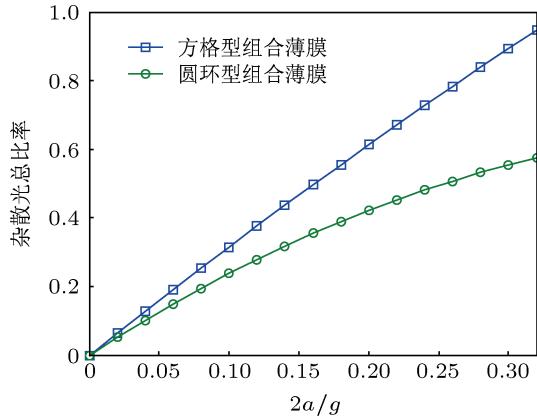


图 5 两种组合薄膜结构杂散光总比率对比

3.3 衍射光强分布计算

在分析圆孔型组合薄膜结构的衍射特性之前, 需要对其光瞳函数进行准确描述. 首先, 描述 $N \times N$ 个圆孔型二维光栅单元的光学孔径函数, 它可以表达为

$$t_0(x_0, y_0) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{x_0}{g}\right) \text{rect}\left(\frac{y_0}{g}\right) - \text{circ}\left(\frac{f_0}{g}\right) \right. \right. \\ \left. \left. + \text{circ}\left(\frac{f_0}{g-2a}\right) \right] \otimes \otimes \sum_m \delta(x_0 - mg) \right.$$

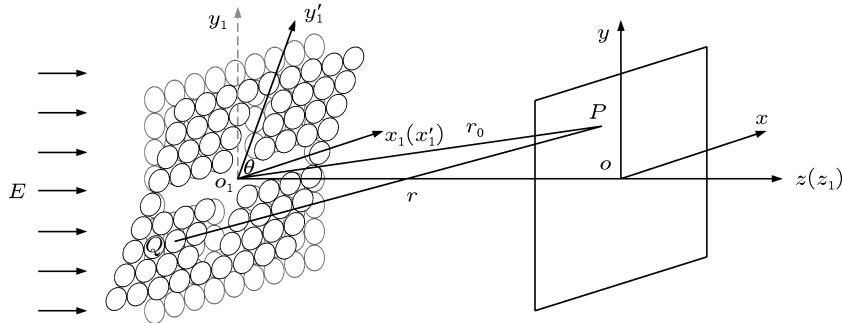


图 6 倾斜照射下圆孔型组合薄膜结构的标量衍射模型

为了便于计算, 我们将倾斜入射的平面波转化为组合薄膜结构的倾斜放置, 其倾角为 θ , $x_1'o_1'y_1'$ 是 $x_1o_1y_1$ 平面绕 x_1 轴倾斜 θ 后的新平面. 由原坐标系 $x_1o_1y_1$ 变为 $x_1'o_1'y_1'$, 坐标变换可表示为

$$x' = x; \quad y' = y / \cos \theta; \quad z' = y \tan \theta. \quad (7)$$

$x_1'o_1'y_1'$ 面上任意一点 Q 到 xoy 像面上任意一点 P 的距离为 r , 其中, $oo_1 = z_0$, 则距离 r 的表达式为

$$r = \sqrt{(x - x_1')^2 + (y - y_1')^2 + (z_0 - z_1)^2}.$$

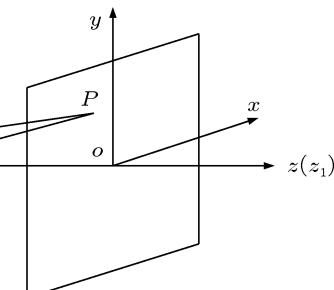
$$\left. \times \sum_n \delta(y_0 - ng) \right\} \times \text{rect}\left(\frac{x_0}{Ng}, \frac{y_0}{Ng}\right), \quad (5)$$

其中, $f_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$. 在加入如图 3 所示的十字孔隙单元后, $M \times M$ 个单元的组合薄膜结构的孔径函数可以表示为

$$t_1(x_1, y_1) = \left[t_0(x_1, y_1) \times \left[1 - \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L}\right) \right. \right. \\ \left. \left. - \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \right. \right. \\ \left. \times \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) \right] + \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L}\right) \\ + \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) - \text{rect}\left(\frac{x_1}{w}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right) \right] \otimes \sum_t \delta(x_1 - tT_x) \\ \otimes \sum_s \delta(y_1 - sT_y) \times \text{rect}\left(\frac{x_1}{MT_x}, \frac{y_1}{MT_y}\right). \quad (6)$$

根据 Fraunhofer 衍射理论, 对 (6) 式进行傅里叶变换就可以得到圆孔型组合薄膜结构在系统像面上衍射光强的振幅, 其模值的平方就是我们需要讨论的衍射光强的分布情况.

然后, 建立组合薄膜结构的标量衍射模型. 根据图 3 所示的结构特征, 建立最为普遍的倾斜照射下的标量衍射模型, 如图 6 所示.



在 Fraunhofer 近似下, 整理后的 r 可简化为

$$r = r_0 - \frac{xx_1 + yy_1 / \sin \theta + y_1 z_0 \tan \theta}{r_0},$$

其中, $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}$. 当单位平面波垂直入射时有 $e(x, y) = 1$, 此时, 衍射像面振幅为

$$U_2(u, v) = \frac{C}{\cos \theta} \iint_{s_2} t_1\left(x, \frac{y}{\cos \theta}\right)$$

$$\times \exp \left[\frac{-ik(xx_1 + \tau y_1)}{r_0} \right] dx dy, \quad (8)$$

这里, 定义 $\tau = y/\cos\theta + \tan\theta\sqrt{r_0^2 - x^2 - y^2}$ 为拉伸因子. 与垂直照射相比较, 倾斜后的组合薄膜结构在 y 方向的衍射图形拉伸, 是垂直情况下的 τ 倍而 x 方向衍射图形不变.

最后, 根据 (8) 式分别模拟了不同倾角下衍射光强的分布情况, 计算结果如图 7 所示.

从图 7 中不难发现, 随着倾斜角度的增大, 衍射光强的分布轮廓大体上并没有出现明显的变化, 而只是在 y 轴方向上存在一定的拉伸, 且倾斜角度越大, 拉伸程度越明显. 进一步地, 对比图 2 和图 7

中两种不同结构的衍射光强分布情况. 对于方格型组合薄膜结构, 具有较大强度的高级次衍射光主要集中分布在两个轴向方向. 而对于圆孔型组合薄膜结构, 其高级次衍射光则主要集中在零级光附近, 并且呈中心对称分布. 这一实验结果说明, 圆孔型组合薄膜结构的高级次衍射光分布更加均匀, 也就意味着当红外光通过圆孔型组合薄膜结构时, 由高级次衍射所形成的杂散光分布更加均匀. 这一点在实际工程应用中尤为重要, 更加均匀的杂散光分布能够减小光学系统在成像过程中生成虚假信号的概率, 提高目标探测的精度, 并有利于图像获取后的后期处理工作.

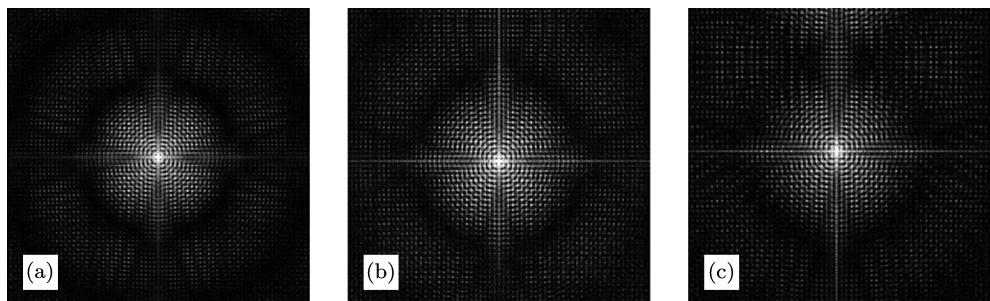


图 7 不同倾角下圆孔型组合薄膜结构衍射光强分布 (a) 0° 照射; (b) 15° 照射; (c) 30° 照射

4 实验测试

4.1 组合薄膜的制备

制备实验样件时主要采用复制光刻与镀膜技术相结合的手段, 采用铬板作为掩膜板来制备两种不同结构的组合薄膜结构样件, 加工精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$, 以此来确保实验样件的金属栅格精度, 其加工过程已详细描述过^[5], 这里不再赘述. 加工后的两种组合薄膜结构具有相同的结构参数: 二维光栅的

$g = 300 \mu\text{m}$, 线宽 $2a = 21.4 \mu\text{m}$, 十字孔单元间隔 $D_x = D_y = 2.7 \text{ mm}$, 十字缝隙单元的腿长 L 和腿宽 w 分别占 7 个和 1 个栅格. 图 8 所示为光学显微镜下观察到的实验样件.

在加工过程中需要注意的是, 由于组合薄膜结构需要镀一定厚度的金属 (约为 $0.8 \mu\text{m}$), 这一厚度容易在镀膜沉积过程中将曝光台阶堵密, 一旦被堵死, 金属膜就很难剥离. 另外, 厚胶涂覆过程中, 对显影时间的控制要求极为苛刻, 显影后极易引起曝光处的图形扩大.

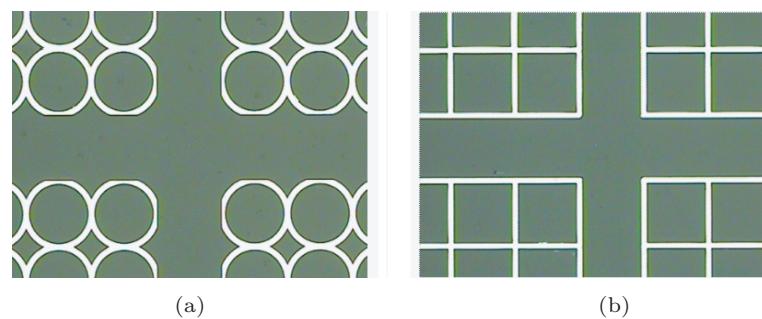


图 8 300 \times 下的组合薄膜结构样件 (a) 圆孔型; (b) 方格型

4.2 光学透过率和衍射光强分布测试

在光学透过率的测试中, 利用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Spectrum GX 傅里叶变换红外光谱仪, 分别测试方格型和圆孔型组合薄膜结构在 3—5 μm 范围内红外光谱的透过率, 测试结果如图 9 所示。

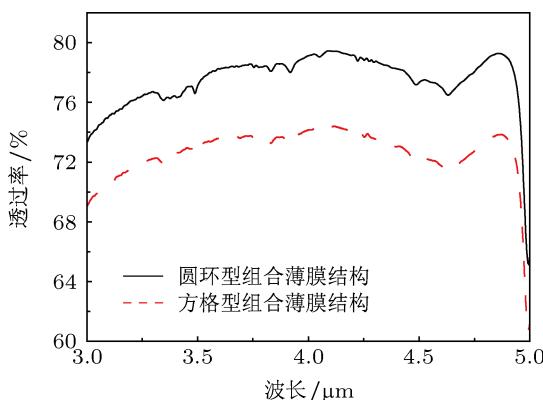


图 9 组合薄膜结构的透过率

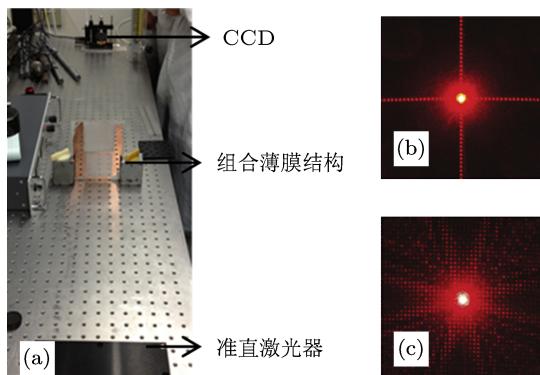


图 10 衍射光强分布的测试系统与结果 (a) 测试系统; (b) 方格型组合薄膜结构衍射光强分布; (c) 圆孔型组合薄膜结构衍射光强分布

由图 9 可知, 在 3—5 μm 的波段内, 圆孔型组合薄膜结构和方格型组合薄膜结构的平均透过率则分别为 76% 和 70%。对比来看, 圆孔型结构具有更高的光学透过率, 这一实验结果与 3.1 节中理论

模拟结论相符。

为了分析组合薄膜结构的衍射光强分布情况, 我们搭建了如图 10(a) 所示的测试系统, 以准直半导体激光器 ($\lambda = 880 \text{ nm}$) 作光源, 在激光垂直穿过组合薄膜结构样件后, 采用 Spiricon 公司的 SP620 CCD 相机对衍射图样进行采集, 相机像素为 1600×1200 , 分辨率为 $4.4 \mu\text{m}$ 。方格型组合薄膜结构及圆孔型组合薄膜结构的衍射的测试结果如图 10(b) 和 (c) 所示。

从测量结果中可以发现, 实验结果与图 2 和图 7 中的理论模拟结论基本一致。对于方格型组合薄膜结构, 其衍射光强主要分布在轴线上, 而圆孔型组合薄膜结构的衍射光强分布则更为均匀。所以, 可以从实验的角度再次证实了圆孔型组合薄膜结构能够有效地使杂散光(即高级次衍射光)的分布更为均匀, 更有利于组合薄膜结构在实际光学成像系统中应用。

5 结 论

为了解决传统方格型组合薄膜结构高级次衍射光集中分布的现象, 攻克杂散光集中分布制约其在光学成像系统中的应用, 本文提出了一种新型的组合薄膜结构, 它是在满足一定约束条件下, 由圆孔型二维光栅和十字缝隙阵列组合而成。通过建立理论模型和采用傅里叶变换等计算方法, 从理论上得出, 相比于传统的方格型组合薄膜结构, 圆孔型结构具有更高的光学透过率、更低的杂散光总比率, 并且杂散光的分布也更加均匀。而后, 通过制备两种不同结构的组合薄膜结构并对其衍射特性进行测量, 获得了与理论符合较好的实验结果。至此, 从理论和实验两个角度共同证明了圆孔型组合薄膜结构能够更好地对杂散光进行抑制, 进而提升组合薄膜结构在工程应用中的可靠性, 拓宽了其应用领域。

- [1] Lu Z G 2007 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [陆振刚 2007 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [2] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167307 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 167307]
- [3] Jiao J, Xu N X, Feng X G, Liang F C, Zhao J L, Gao J S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167306 (in Chinese) [焦健, 徐念喜, 冯晓国, 梁凤超, 赵晶丽, 高劲松 2013 物理学报 **62** 167306]
- [4] Zhou H, Qu S B, Peng W D 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054101
- [5] Yu M, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0831001 (in Chinese) [于淼, 高劲松, 徐念喜 2013 光学学报 **33** 0831001]
- [6] Zhang J, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 147304 (in Chinese) [张建, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 147304]
- [7] Zhang Z L, Zheng G, Qu F Y, Wu X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098104
- [8] Zong Z Y, Wu W, Shi L F, Fang D G 2010 *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility* April 12–16, 2010 p162

- [9] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (1st Ed.) (New York: Wiley)
[10] Tan J B, Lu Z G, Liu J, Jin P, Wang Y C 2007 *Measur. Sci. Technol.* **18** 1703
[11] Tan J B, Lu Z G 2007 *Opt. Express* **15** 790
[12] Kohin M, Wein S J, Traylor J D, Chapman J 1993 *Opt. Engin.* **32** 911

Suppression of the stray light of 2-dimensional gratings combined with an array of periodic slit*

Yu Miao¹⁾²⁾ Gao Jin-Song¹⁾ Zhang Jian¹⁾²⁾ Xu Nian-Xi^{1)†}

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 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 20 June 2013; revised manuscript received 13 July 2013)

Abstract

An array of periodic slits, combined with classic grid two-dimensional gratings, can acquire a dual band-pass characteristic in radar and optical wave band. The concentrated distribution of stray light energy will severely restrict the applications of classic composite film structure in high precision detection and imaging. To solve this problem, a novel composite film structure is developed in this paper, which is composed of slit elements and annular gratings. A scalar diffractive model is built based on Fraunhofer diffractive theory through contrasting the diffractive properties of two kinds of composite film structures. The theoretical simulations and experimental results both prove that the annular composite film structure can suppress the stray light effectively, for its higher transmittance, lower ratio and more uniform distribution of stray light, and enhance the reliability of composite film structure in the practical optical applications.

Keywords: 2-dimensional grating, composite film structure, intensity of diffractive light, stray light

PACS: 42.79.Dj, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.62.204208

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

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