



低光学衍射随机六元环金属网络导电膜

李子杨 杨霄 刘华松 姜玉刚 白金林 李士达 杨仕琪 苏建忠

Low optical diffraction random hexagonal structure metallic network conductive films

Li Zi-Yang Yang Xiao Liu Hua-Song Jiang Yu-Gang Bai Jin-Lin Li Shi-Da Yang Shi-Qi Su Jian-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 134202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212010

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212010>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平面波照射下无限大导体板上周期孔阵屏蔽效能的解析研究

Analytical theory on electromagnetic shielding effectiveness of infinite conductor plate with periodic aperture array under plane wave illumination

物理学报. 2019, 68(10): 104101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182070>

基于深度残差网络的高精度自然转捩模拟方法

High-order natural transition simulation method based on deep residual network

物理学报. 2020, 69(20): 204701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200563>

基于Zernike模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正

Aberration correction for ellipsoidal window optical system based on Zernike mode coefficient optimization

物理学报. 2020, 69(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200933>

金属基底上光学偶极纳米天线的自发辐射宽带增强: 表面等离激元直观模型

Broadband enhancement of spontaneous emission by optical dipole nanoantenna on metallic substrate: An intuitive model of surface plasmon polariton

物理学报. 2022, 71(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212290>

基于神经网络在线学习方法优化磁屏蔽特性参数

Online learning method based on artificial neural network to optimize magnetic shielding characteristic parameters

物理学报. 2019, 68(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190234>

低光学衍射随机六元环金属网络导电膜*

李子杨 杨霄 刘华松[†] 姜玉刚 白金林
李士达 杨仕琪 苏建忠[‡]

(天津航技术物理研究所, 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308)

(2021年10月28日收到; 2022年3月6日收到修改稿)

传统金属网栅多为二维方格结构, 光学透射率损耗较大, 高级次衍射杂散光严重干扰探测系统成像质量. 本文设计了一种具有随机六元环表面结构的金属网络导电薄膜, 该结构相较于传统二维方格结构金属网栅具有更高的光学透射率; 由于在结构中引入了随机变量, 也可以实现高级次衍射杂散光的抑制. 随后在 ZnS 光学窗口上完成了线宽为 4 μm 、周期为 100 μm 的随机六元环结构金属网络导电膜的制备. 测试结果表明, 样品表面图案完整、金属线清晰可见、线宽均匀、无断线情况发生. ZnS 光学窗口在长波红外波段透射率损失 10.5%, 在可见光波段透射率仅损失 6.8%, 同时可以显著均化高级次衍射杂散光分布. 电磁屏蔽数值仿真结果显示, 该网络导电膜在 0.2—20 GHz 电磁波段内平均电磁屏蔽效能为 37.9 dB, 最低屏蔽效能 29.6 dB, 比传统方格结构网栅高 3.2 dB. 本文设计并制备的随机六元环结构金属网络导电膜具有优异的光学性能与电磁屏蔽效能, 对于提升图形化光学窗口的综合性能具有重大意义.

关键词: 光学窗口, 金属网络导电膜, 电磁屏蔽, 高级次衍射**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Fx, 73.61.-r, 78.20.-e**DOI:** 10.7498/aps.71.20212010

1 引言

随着电子技术的迅速发展, 空间电磁环境日益复杂, 对于光电器件的电磁干扰愈发严重^[1-4]. 特别是对于光学窗口等透明光学器件, 空间电磁干扰将严重影响光电系统的探测与成像性能. 光学窗口需要在保持高透光率的同时, 对电磁干扰进行有效屏蔽^[5-8]. 在光学窗口表面制备图形化金属网络导电薄膜可以实现光学波段与电磁波谱段的频率分离, 是目前光学窗口实现高效透光与电磁屏蔽的主流方案和关键技术^[9-14].

然而, 周期性图形化窗口具有极强的衍射特性, 将在平行于栅线的轴向上形成十分明显的衍射

杂散光, 从而降低光学窗口的成像质量, 甚至造成虚假目标掩盖真实目标等严重影响, 对光学系统危害极大. 为了解决上述问题, Halman 等^[15]设计并制备了轮-辐结构、六边形结构和重叠圆环结构的金属网络导电膜, 证实了随机量的引入可以平滑高级次衍射杂散光的强度分布. 清华大学提出了一种具有花瓣形图案的新型金属网络导电膜, 它可以有效地实现高级次衍射杂散光的抑制, 同时保证高电磁屏蔽效能^[16]. 韩余等^[17]采用分散系薄膜干燥开裂法制备出高度随机结构的金属网络导电膜, 可以有效地抑制高级次衍射杂散光, 然而, 使用这种制造方法得到的网格图案过于随机, 无法对光学性能和电磁屏蔽效能进行较为准确的工艺设计.

针对当前图形化窗口在实际应用中遇到的问题

* 国家自然科学基金(批准号: 61975150, 61775167, 61705165)、天津市自然科学基金(批准号: 19JCZDJC38400, 18JCZDJC37900)、国家拔尖青年人才支持计划、天津市人才发展专项支持计划高层次创新团队、天津市创新人才推进计划重点领域创新团队.

[†] 通信作者. E-mail: liuhuasong@hotmail.com

[‡] 通信作者. E-mail: sujianzhong@sina.com

题, 本文对比分析了不同网络图案下的光学透射率, 选取透光率最高的六边形作为初始结构. 随后在规则六边形的基础之上, 提出了一种随机六元环结构的图形化表面. 该结构可以有效地实现高电磁屏蔽效能, 同时保持较为平滑的高级次衍射杂散光分布和较低的光学透射率损耗. 随后开展了随机六元环结构金属网络导电膜的制备及光学透射率测试. 本文研究成果对提升飞行器光学窗口的综合性能具有重要意义.

2 理论分析及结构参数设计

2.1 不同网络图案下光学透射率对比分析

金属网栅图形化表面在光学波段下总体透过率数值上等于网络图案的孔隙比, 用 T_{total} 表示, 数值上等于在一个基本结构单元内无金属线覆盖的面积与整个图案单元面积的比值. 用 $2a$ 表示网栅

的线宽, g 表示网栅的周期. 金属网络导电膜的总光学透射率可以通过 (1) 式计算.

$$T_{\text{total}} = [(g - 2a)/g]^2. \quad (1)$$

网络的基本结构阵列可以有多种形式, 如传统二维方格结构^[18,19]、圆环结构^[9]、六边形结构^[12,20]等, 如图 1 所示. 常规金属网络导电膜的表面图案通常为二维方格结构, 然而, 从光学透射率最大化的角度出发, 二维方格结构并非表面网络图案的最佳选择. 衡量网络结构特性的最主要参数为周期和线宽, 通常情况下, 周期是指相邻图案单元中心之间的距离. 在认为光学探测器的信号接收光瞳为圆形的前提下, 对于相同线宽与周期结构的图案, 其光学透射率存在一定差异. 因此, 令不同基本图案阵列的周期相同, 选取任一单位结构的中心作为圆心, 以共有周期为半径. 上述图案的总体光学透射率 T_{total} 分别为:

$$\begin{cases} T_a = \frac{\pi g^2 - 8\sqrt{3}ag + 16a^2}{\pi g^2}, & T_b = \frac{\pi g^2 - 2a \cdot \left(\pi g + 4g \cdot \arccos 0.25 + 4g \cdot \arcsin \frac{\sqrt{14}}{8} \right) + 16a^2}{\pi g^2}, \\ T_c = \frac{\pi g^2 - 2a \cdot (4g + 2\sqrt{3}g) + 24a^2}{\pi g^2}, & T_d = \frac{\pi g^2 - 4\sqrt{3}ag - 6ag + 16a^2}{\pi g^2}, \\ T_e = \frac{\pi g^2 - 6\pi ag + 24a^2}{\pi g^2}, & T_f = \frac{\pi g^2 - 6ag + 24a^2}{\pi g^2}. \end{cases} \quad (2)$$

比较 (2) 式中各透射率计算结果的大小可知, 在图 1 所示基本图案组成的阵列中, 图 1 (f) 对应的正六边形结构具有最大的透光率. 六边形作为一种可以无缝隙平铺整个平面的结构单元, 具有空间利用率高的特点. 根据上述分析, 本文在六边形结

构的基础上开展设计.

2.2 随机六元环结构表面生成理论

在实际应用中, 并非所有的透射光都可以被探测系统利用, 有相当一部分的透射光会受到网络的衍射作用, 产生高级次衍射杂散光, 只有中央零级衍射光可以被光学系统探测并接收, 这使实际透射率小于孔隙遮挡作用提供的透射率. 中心零级次衍射中包含的能量为^[11]

$$T_{\text{total}}(0,0) = [(g - 2a)/g]^4. \quad (3)$$

方格型结构金属网络导电膜除了透射率受制约之外, 同时具有极强的衍射特性, 会在平行于网栅栅线的两个轴向上形成十分明显的衍射杂散光, 将显著降低方格网栅的光学传递函数, 当应用在探测成像系统上时, 会造成虚假目标掩盖真实目标等严重影响, 对系统危害极大. 为了解决上述问题,

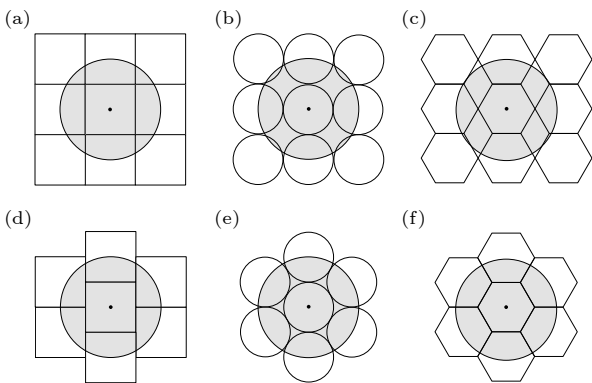


图 1 常见金属图形化表面结构阵列

Fig. 1. Common metallic graphical surface structure arrays.

在初始结构上引入一定的随机度. 首先按照规律生成并记录相邻六边形连接点的坐标; 随后在每个连接点的 x 与 y 方向上添加随机偏移量 Δx 与 Δy , 使每个连接点平移到一个新的位置; 最后将新的坐标点连接, 获得随机六元环结构. 随机偏移量在 $0-g/3$ 范围内选取. 随机结构生成原理及二者构效关系如图 2 所示.

2.3 衍射特性分析

对于周期型图形化表面, 可以通过对光瞳函数进行二维傅里叶变换, 对结果取模平方给出^[21]. 而对于随机六元环结构, 其光瞳函数无法用解析式直接表达出, 因此无法直接求解. 本文采取构造离散化矩阵的方法模拟光瞳函数. 首先将衍射器件在几何上用离散化矩阵表示, 矩阵中每一个元素均代表实际空间中衍射光屏 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 的微面元. 若该微面元处有金属线, 则将矩阵该位置的元素赋值为 0; 反之, 若该微面元处为镂空部位, 则将矩阵该位置的元素赋值为 1. 对矩阵作离散傅里叶变换处理, 对结果取模平方, 可以得到随机结构网栅的衍

射能量分布.

使用上述算法分别计算传统二维方格结构、规则六边形结构与随机六元环结构的归一化衍射杂散光强度分布, 结果如图 3 所示. 对于传统二维方格结构网栅, 可以明显观察到分布于 x 与 y 两条轴线上的衍射图案; 对于规则六边形图案, 衍射杂散光相比于方格结构得到一定程度的均化, 但仍然可以观察到分布于三条边的方向上的衍射图案; 将随机六元环结构表面与六元环结构表面相对比. 二者透光率相同, 但随机六元环结构表面的高级次衍射能量获得了明显均化. 为了定量评估衍射分布的均匀性, 可以计算网格的归一化衍射能量. 随机六元环结构网栅旁瓣的最大归一化衍射能量为 0.025%, 远小于规则六边形网栅的 0.14% 与方形网格的 0.23%. 因此可以得出结论, 随机六元环结构可以有效克服传统方格型网栅衍射能量分布不均的弱点.

2.4 电磁屏蔽效能分析

电磁屏蔽效能是图形化光学窗口的重要特性. 实际上, 金属网络导电膜电磁屏蔽的机制可以用波

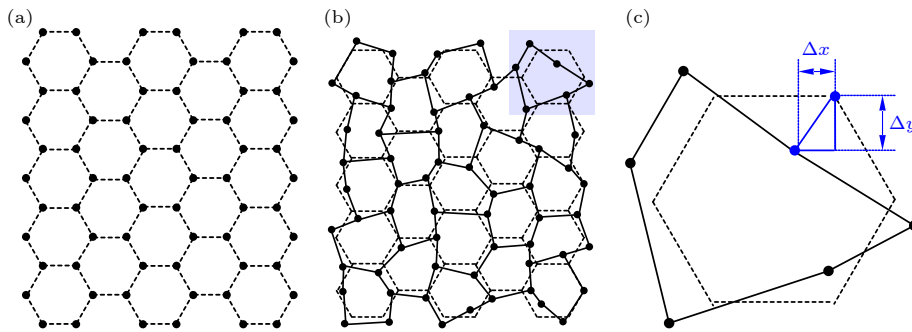


图 2 规则六边形结构与随机六元环结构构效关系 (a) 规则六边形结构; (b) 随机六元环结构; (c) 随机结构生成原理
Fig. 2. Conformational relationship: (a) Regular hexagonal structure; (b) random hexagonal structure; (c) random structure generation principle.

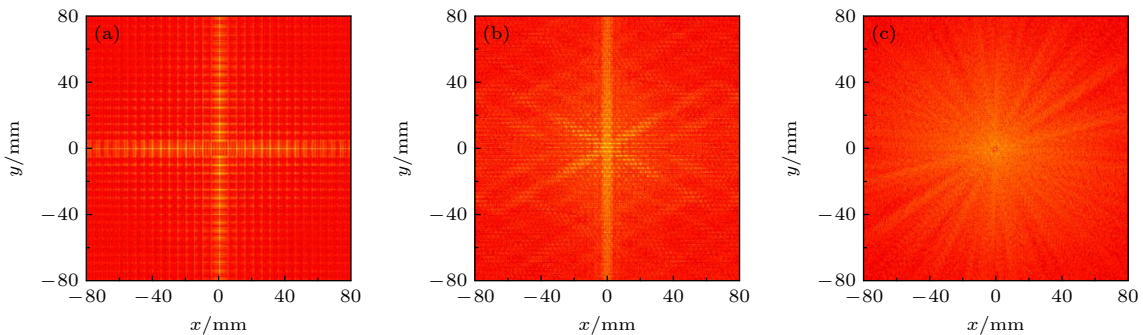


图 3 金属网栅的不同表面结构所对应的衍射能量分布 (a) 二维方格结构; (b) 规则六边形结构; (c) 随机六元环结构
Fig. 3. Distribution of diffracted intensity under different surface structures: (a) Two dimensional (2D) square structure; (b) regular hexagonal structure; (c) random hexagonal structure.

导理论来解释^[22]. 每个结构单元都可以看作是一个波导, 截止频率取决于波导横截面的大小. 波导的孔径越小, 它可以达到的截止频率越高, 电磁波的屏蔽效能也就越高. 而波导的孔径正取决于周期 g 和线宽 $2a$, 因此它们二者是影响电磁屏蔽效能的最关键因素^[18]. 令网栅线宽为 $4\ \mu\text{m}$, 周期为 $100\ \mu\text{m}$, 使用 CST Microwave Studio 软件仿真 $0.2\text{--}20\ \text{GHz}$ 频段内二维方格结构、规则六边形结构与随机六元环结构的电磁屏蔽效能, 结果如图 4 所示.

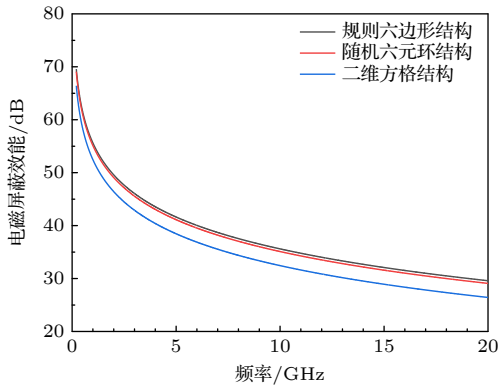


图 4 二维方格结构、规则六边形结构与随机六元环结构三者电磁屏蔽效能对比

Fig. 4. Comparison of electromagnetic interference shielding effectiveness among 2D square structure, regular hexagonal structure and random hexagonal structure.

根据仿真结果可知, 在相同周期和线宽之下, 规则六边形与随机六元环网络导电膜电磁屏蔽效能几乎相同, 最大相差仅 $0.5\ \text{dB}$. 二者在 $0.2\text{--}20\ \text{GHz}$ 电磁波谱段内平均电磁屏蔽效能为 $37.9\ \text{dB}$, 最低屏蔽效能为 $29.6\ \text{dB}$. 而传统二维方格在 $0.2\text{--}20\ \text{GHz}$ 内平均电磁屏蔽效能为 $34.7\ \text{dB}$, 最低屏蔽效能为 $26.4\ \text{dB}$, 比前两者低 $3.2\ \text{dB}$, 因此适当地引入图案随机度并不会显著影响电磁屏蔽效能; 同时六元环基本结构与传统二维方格结构相比, 在实现高电磁屏蔽效能方面更具优势.

2.5 结构参数设计

根据前文的分析, 网络导电膜的周期必须远小于入射微波波长, 且周期越小, 线宽越大, 其电磁屏蔽效能越高. 然而较小的周期和较大的线宽会提高网格的遮蔽率, 进而降低其光学透射率. 对光学系统而言, 图形化表面设计的重点应在于在满足整体电磁屏蔽技术需求的基础上尽可能地提升整体

红外透射率. 对于具有相同孔隙比的网络, 具有窄线宽、小周期的结构具有更加优秀的电磁屏蔽效能. 然而考虑制备条件, 线宽并不能无限减小; 另外, 当线宽过窄时, 极易出现线宽不均匀、金属膜附着牢固性差、网络断线率上升等问题, 不仅会导致设计结果与实际结果不符, 而且会导致网络导电膜的电磁屏蔽性能下降. 基于上述考虑, 也考虑到制造的可行性, 选择网格的周期和线宽分别为 100 和 $4\ \mu\text{m}$. 根据 (3) 式可以计算得到网栅中心零级次衍射光透射率为 85% . 根据 2.4 节仿真结果可知, 网络导电膜在 $0.2\text{--}20\ \text{GHz}$ 内平均电磁屏蔽效能为 $37.9\ \text{dB}$, 最低电磁屏蔽效能为 $29.6\ \text{dB}$. 为了使样品能够同时工作在可见光波段与长波红外波段, 窗口材料选取为 ZnS , 窗口面积为 $100\ \text{mm} \times 125\ \text{mm}$. 为了保证网络导电膜具有较长的使用寿命, 金属材料选取为金. 随着金属膜层厚度的增加, 窗口的电磁屏蔽效能将逐渐上升, 然而金属膜层不能无限增厚. 首先, 金属膜层沉积过厚会导致膜层与基底的结合性变差, 可能因为沉积缺陷等造成网络断线的现象; 同时, 通过计算可知, 厚度增加引起的电磁屏蔽效能提升作用很小, $100\ \text{nm}$ 厚的金属膜层与 $250\ \text{nm}$ 厚的金属膜层电磁屏蔽效能最大差异也仅有 $0.2\ \text{dB}$. 在综合考虑结合强度与电磁屏蔽效能的情况下, 金属膜层的沉积厚度为 $150\ \text{nm}$.

3 实验及测试

3.1 分析图形化表面的制备

金属网络导电膜的制备工艺流程以紫外光刻为核心, 前后包括基片清洗、旋涂光刻胶、金属膜沉积、去胶清洗等工序. 具体制备工艺如下: 首先对 ZnS 基片进行清洗; 在此之后旋涂 JZ-504 正性光刻胶, 先令旋胶台在 $1000\ \text{r/min}$ 的转速下甩胶 $5\ \text{s}$, 再切换至 $2000\ \text{r/min}$ 的高转速下甩胶 $60\ \text{s}$; 随后使用加热板烘烤装置, 在 $90\ ^\circ\text{C}$ 的温度下烘烤 $1000\ \text{s}$; 待涂胶基片冷却后, 将基片转移至光刻机中, 在 $365\ \text{nm}$ 紫外光照下曝光 $5\ \text{s}$. 使用光刻胶配套显影液在室温下冲洗基片 $15\ \text{s}$; 采用离子束辅助电阻加热蒸发方式, 在 ZnS 基片上沉积 $150\ \text{nm}$ 厚的金膜, 镀膜温度设置为 $200\ ^\circ\text{C}$; 考虑到金膜与 ZnS 的结合性并不好, 为了防止金膜发生脱落, 在 ZnS 窗口与金膜之间增镀一层很薄的 Cr 作为过渡层;

最后, 使用棉签蘸取丙酮溶液, 擦拭已经完成金属薄膜沉积的 ZnS 窗口. 使用金相显微镜测试金属网络导电膜表面微结构, 如图 5 所示. 制备得到的金属网络导电膜图案完整、金属线清晰可见、线宽均匀、无断线情况发生.

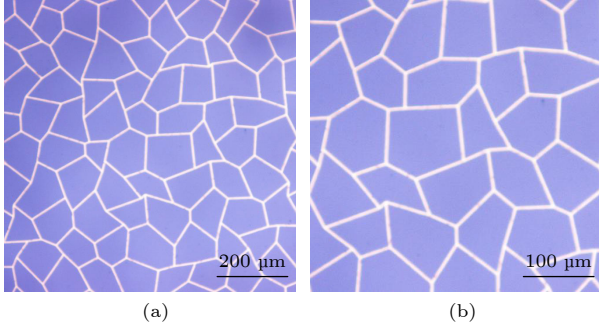


图 5 金属网络导电膜微观结构 (a) 100 X 金相显微探测结果; (b) 200 X 金相显微探测结果
Fig. 5. Random hexagonal surface microstructure: (a) 100 X metallographic probing result; (b) 200 X metallographic probing results.

3.2 光学透射率测试

使用 PerkinElmer 公司的 LAMBDA900 型分光光度计测量窗口样品的可见光波段的透射曲线; 使用 Bruker 公司的 VERTEX 70 型傅里叶光谱仪测量样品长波红外波段的透射曲线. 测试 ZnS 光学窗口在可见光与长波红外波段的透射率情况, 结果如图 6 所示. ZnS 光学窗口在 400—800 nm 可见光波段平均透射率为 70.4%. 经表面图形化制备后, 平均透射率变为 63.6%, 能量损失 6.8%; 在 8—12 μm 长波红外波段, 窗口平均透射率为 73.3%, 表面图形化制备后平均透射率变为 62.5%, 能量损失 10.5%; 对于长波红外波段, 可以计算得出网络自身的透射率为 85.2%, 与理论设计结果 85% 十分符合. 而对于可见光波段, 计算得出网络自身的透射率为 90.3%, 大于设计结果, 这是因为可见光的波长较短, 高级次衍射能量分布更集中, 实际测试结果不仅包括中心零级次衍射光, 也包含了部分高级次衍射杂散光, 所以实际测试的结果相较于理论值更高.

3.3 衍射杂散光分布测试

采用 632.8 nm 激光器作为光源, 垂直照射于完成镀制金属网络导电膜的红外窗口上, 测试衍射杂散光的空间分布特性, 结果如图 7 所示. 实际衍

射杂散光分布图样与前文计算分析结果总体一致. 本文设计的随机六元环结构金属网络导电膜与传统二维结构相比, 能够大幅度降低和均化高级次衍射杂散光, 对提升电磁屏蔽窗口成像质量具有重要意义.

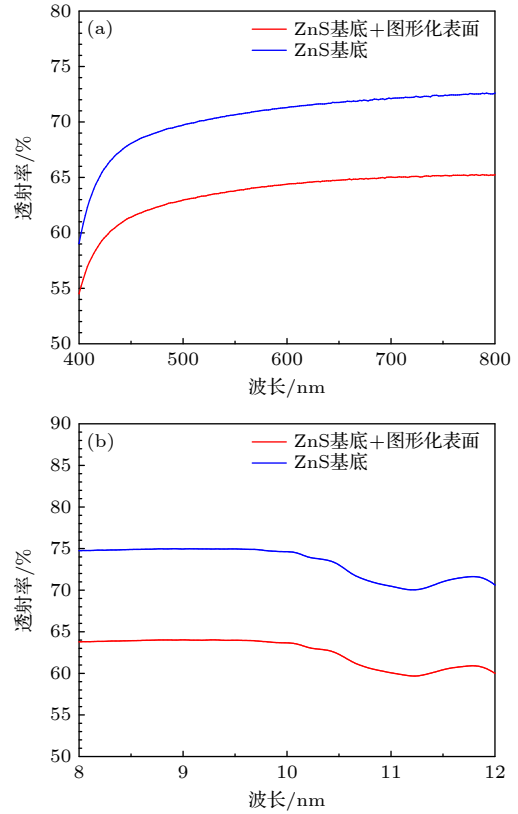


图 6 透射率测试结果 (a) 400—800 nm 可见光波段透射率; (b) 8—12 μm 长波红外波段透射率
Fig. 6. Transmittance test results: (a) Transmittance in the 400—800 nm visible band; (b) transmittance in the 8—12 μm long-wave infrared band.

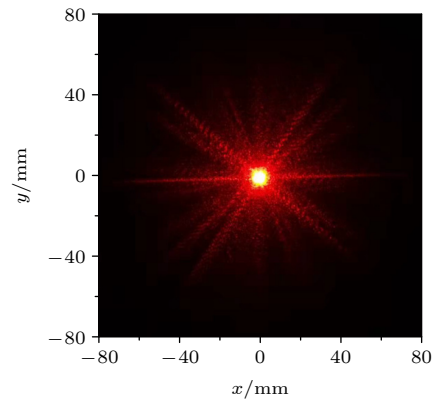


图 7 随机六元环结构金属网络导电膜衍射光强分布测试结果
Fig. 7. Regular hexagonal structure diffraction intensity distribution test results.

4 结 论

本文对比分析了不同网络图案下的光学透射率,其中正六边形结构具有最高的光学透射率.与此同时,六边形作为一种可以无缝隙平铺整个平面的结构单元,具有空间利用率高、结构稳定的特点.本文在规则六边形结构的基础上开展了随机六元环结构表面的设计.经过衍射特性分析,可知随机六元环结构可以有效克服传统方格型网栅高级次衍射能量分布不均的弱点.根据电磁屏蔽效能仿真结果可知,规则六边形结构与随机六元环结构在相同周期和线宽下的电磁屏蔽效能几乎相同,在0.2—20 GHz 电磁波谱段内平均电磁屏蔽效能为37.9 dB,最低屏蔽效能为29.6 dB,均高于传统二维方格结构.

随后在 ZnS 光学窗口上完成了线宽为 4 μm 、周期为 100 μm 的随机六元环结构金属网络导电膜的制备,样品表面图案完整、金属线清晰可见、线宽均匀、无断线情况发生.光学透射率测试结果显示,ZnS 光学窗口在可见光波段的透射率由 70.4% 变为 63.6%,在长波红外波段的透射率由 73.3% 变为 62.5%,能量损失较低.衍射杂散光分布测试结果显示,与传统二维方格结构相比,随机六元环结构金属网络导电膜能够大幅度降低和均化高级次衍射杂散光.综上所述,本文设计并制备的随机六元环结构金属网络导电膜具有优异的光学性能与电磁屏蔽效能,对于提升图形化光学窗口的综合能力具有重大意义.

参考文献

[1] Han J C, Wang X N, Qiu Y F, Zhu J Q, Hu P A 2015

Carbon **87** 206

- [2] Xu H, Anlage S M, Hu L B, Gruner G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 183119
- [3] Mesfin H M, Baudouin A C, Hermans S, Delcorte A, Huynen I, Bailly C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 103105
- [4] Polley D, Barman A, Mitra R K 2014 *Opt. Lett.* **39** 1541
- [5] Hu M J, Gao J F, Dong Y C, Li K, Shan G C, Yang S L, Li R K 2012 *Langmuir* **28** 7101
- [6] Huang J L, Yau B S, Chen C Y, Lo W T, Lii D F 2001 *Ceram. Int.* **27** 363
- [7] Kim C H, Lee Y 2011 *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **12** 161
- [8] Han Y, Liu Y X, Han L, Lin J, Jin P 2017 *Carbon* **115** 34
- [9] Tan J B, Lu Z G 2007 *Opt. Express* **15** 790
- [10] Lu Z G, Liu Y S, Wang H Y, Tan J B 2016 *Appl. Opt.* **55** 5372
- [11] Kohin M, Wein S J, Traylor J D, Chase R C, Chapman J E 1993 *Opt. Eng.* **32** 911
- [12] Jiang Z Y, Huang W B, Chen L S, Liu Y H 2019 *Opt. Express* **27** 24194
- [13] Zhong H, Han Y, Lin J, Jin P 2020 *Opt. Express* **28** 7008
- [14] Liang Y L, Huang X J, Yao L X, Cheng K, Liu P G 2021 *Safety & EMC* **2** 61 (in Chinese) [梁圆龙, 黄贤俊, 姚理想, 程开, 刘培国 2021 安全与电磁兼容 **2** 61]
- [15] Halman J I, Ramsey K A, Thomas M, Griffin A 2009 *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* Orlando, USA, April 15-16, 2009 p73020 Y
- [16] Wang W Q, Bai B F, Zhou Q, Ni K, Lin H 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 3485
- [17] Han Y, Lin J, Liu Y X, Fu H, Ma Y, Jin P, Tan J B 2016 *Sci. Rep.* **6** 25601
- [18] Ulrich R 1967 *Infrared Phys.* **7** 37
- [19] Feng X G, Zhang G, Tang Y 2015 *Opt. Precis. Eng.* **23** 686 (in Chinese) [冯晓国, 张舸, 汤洋 2015 光学精密工程 **23** 686]
- [20] Jiang Z Y, Zhao S Q, Chen L S, Liu Y H 2021 *Opt. Express* **29** 18760
- [21] Zhuang S L, Qian Z B 1981 *Optical Transfer Function* (Beijing: China Machine Press) p264 (in Chinese) [庄松林, 钱振邦 1981 光学传递函数(北京: 机械工业出版社) 第264页]
- [22] 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)]

Low optical diffraction random hexagonal structure metallic network conductive films^{*}

Li Zi-Yang Yang Xiao Liu Hua-Song[†] Jiang Yu-Gang Bai Jin-Lin
Li Shi-Da Yang Shi-Qi Su Jian-Zhong[‡]

(*Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Technical Physics Institute, Tianjin 300308, China*)

(Received 28 October 2021; revised manuscript received 6 March 2022)

Abstract

Traditional metallic meshes are a two-dimensional square structure with high optical transmittance loss, and the diffraction of light seriously interferes with the imaging quality of the detection system. In this work a metallic network conductive film with a random hexagonal surface structure is designed. This structure has a higher optical transmittance than conventional square metallic meshes. As a result of the random variables in the structure, it can also suppress the stray light of high-order diffraction. Then we prepare a metallic network conductive film on a ZnS optical window with a line width of 4 μm and a period of 100 μm . The metal lines of the sample are clear, the line width is uniform, and there is no dotted line. The transmission loss of the ZnS optical window is 10.5% in the long-wave infrared band (LWIR) band but only 6.8% in the visible band, which has low energy loss. At the same time, it can achieve uniform optical diffraction, thus reducing the imaging interference to the photoelectric detection system. The numerical simulation results show that the average EMI shielding efficiency is 37.9db, which is in an electromagnetic spectrum range from 0.2 GHz to 20 GHz, and its minimum shielding efficiency is 29.6 dB, which is 3.2 dB higher than the traditional square mesh's. The random hexagonal structure metallic network conductive films designed and prepared in this paper have excellent optical properties and EMI shielding efficiencies, which is of great significance in improving the comprehensive performance of the graphical optical window.

Keywords: optical window, metallic network conductive film, electromagnetic interference shielding, high-order diffraction

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Fx, 73.61.-r, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.71.20212010

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975150, 61775167, 61705165), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant Nos.19JCZDJC38400, 18JCZDJC37900), the National Plans for the Top of the Notch Youth Talents, the High-Level Innovation Team of Tianjin Talent Development Special Plans, and the Key Area Innovation Team of Tianjin Innovation Talent Promotion Plans.

[†] Corresponding author. E-mail: liuhuasong@hotmail.com

[‡] Corresponding author. E-mail: sujianzhong@sina.com