

doi:10.3788/gzxb20184709.0913002

透明衬底光致导电网栅的设计与制作

王君¹, 冷雁冰¹, 孙艳军¹, 纪雪松², 王丽¹, 王越¹

(1 长春理工大学 光电工程学院 光电工程国家级实验教学示范中心, 长春 130022)

(2 辽沈工业集团有限公司, 沈阳 110045)

摘 要:依据半导体光电导效应分析了光致导电复合网栅调控机理, 阐明了光致导电复合网栅的设计思路与结构特点. 结合透明衬底蓝宝石基片, 选取雷达波 2~18 GHz, 红外 3~12 μm 波段为研究对象对复合网栅结构参数进行优化和仿真, 当网栅参数周期由 5 mm 变为 2.5 mm、边长由 4.9 mm 变为 2.4 mm 时, 网栅的中心谐振频率从 13.2 GHz 变为 14 GHz. 采用衍射光栅同轴对准原理保证两次 lift-off 光刻工艺的对准精度, 制备的网栅周期误差小于 6 μm , 边长误差小于 5 μm , 满足实验要求. 复合网栅的光学和电学性能测试结果为: 加载复合网栅的蓝宝石衬底样件与未加载的相比, 红外透过率曲线整体走势未发生变化, 透过率整体下降了 7.8% 左右, 与单独金属网栅相比相差 3.4%, 符合红外透过损失规律. 该复合网栅在敏感波长为 600 nm 光照射下测得的中心谐振频率从 13.22 GHz 变为 14.03 GHz, 与仿真结果基本一致, 验证了光照对复合网栅电磁性能调控的可行性.

关键词:光学表面; 复合网栅; 光致导电; 光刻; 红外

中图分类号: TN713; O472+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0913002-7

Design and Fabrication of Photoconductive Mesh on Transparent Substrate

WANG Jun¹, LENG Yan-bing¹, SUN Yan-jun¹, JI Xue-song², WANG Li¹, WANG Yue¹

(1 National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China)

Abstract: Based on the semiconductor photoconductive effect, the mechanism of photo-induced conductive composite mesh was analyzed, and the design ideas and structural characteristics of the photo-induced conductive composite mesh were clarified. Combined with the transparent sapphire substrate, the radar wave 2~18 GHz and infrared 3~12 μm wavebands were selected as the research object to optimize and simulate the parameters of the composite mesh structure. When the period of mesh parameter cycle changes from 5 mm to 2.5 mm, and the side length changes from 4.9 mm to 2.4 mm, correspondingly, the central resonance frequency of the mesh changes from 13.2 GHz to 14 GHz. The principle of coaxial alignment of diffraction gratings was used to ensure the alignment accuracy of the two lift-off lithography processes. The mesh cycle error is less than 6 μm and the length error is less than 5 μm , which satisfies the experimental requirements. The optical and electrical properties of the composite mesh were tested, and the results are: compared the sample without sapphire substrate with the composite mesh, the overall trend of the infrared transmittance curve did not change, and the overall transmittance decreased by about 7.8%, which is a 3.4% difference from the single metal mesh. This is in line with the law of infrared transmission loss. The central resonant frequency of the composite mesh measured at a sensitive wavelength of 600 nm is changed from 13.22 GHz to 14.03 GHz, which is basically consistent with the

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11474037, 11474041)资助

第一作者:王君(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为先进光学系统设计与制造. Email:wjwjun@126.com

导师(通讯作者):孙艳军(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术. Email:custsun@126.com

收稿日期:2018-03-29; **录用日期:**2018-06-25

<http://www.photon.ac.cn>

simulation results. Thus, the feasibility of illumination to control the electromagnetic performance of the composite grid was verified.

Key words: Optics at surface; Composite mesh; Photoconductive; Lithography; Infrared

OCIS Codes: 130.3060; 070.2615; 220.4000; 310.6860; 220.3740

0 引言

网栅是一种典型的带通型频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS),结构相对简单,制作工艺成熟,在电磁信号屏蔽和选频滤波方面有广泛的应用.网栅分无源网栅和有源网栅,无源网栅由于结构简单,制作难度小,被用于光学窗口及飞行器蒙皮表面^[1],文献[2]研究的无源单层复合结构 FSS,代表了无源 FSS 的前沿成果,但无法克服无源 FSS 的固有缺点,即一旦结构制作完成则电磁屏蔽和选频性能固定,无法根据使用环境的需要进行调控,因此应用受到一定的限制.有源网栅是根据无源网栅的缺点而提出的,可根据具体需要通过外部某种控制源调节 FSS 电磁性能.外部控制方法研究较多的是电控和磁控,其基本原理是在网栅的结构中加入电容性的二极管结构器件^[3]或磁性结构器件^[4],这些外部器件结构都比较复杂,在一定程度上可实现电磁性能的调控,却给整体结构带来很多问题.如二极管结构器件的引入,使得网栅线宽只能做得很宽、周期很大,电磁屏蔽效果差,而且这种复杂结构不能制作于光学材料表面,无法应用于光学窗口.而磁性结构器件的引入必然要采用磁源进行调控,这必然给主机系统带来信号干扰,得不偿失^[5-6].

本文提出一种利用金属膜网状结构与光致导电薄膜网状结构有效结合制成的由光照控制导电区域变化的网栅,即无特定光照时只有金属网栅具有电磁滤波特性,有特定光照时复合网栅同时导电,通过改变网栅周期或通光孔径的尺寸,从而改变其中心谐振频率,实现带通波段的可变性.在实际应用中可根据具体情况调控带通雷达频段,实现光学窗多模透过的可调控性,提高系统性能.

1 光致导电网栅原理与结构

1.1 光致导电薄膜原理

光致导电薄膜是依据半导体光电导效应原理制成的一种光电功能薄膜^[7].一些特殊的半导体材料,如 CdS、CdSe、PbS、InSb 等材料构成的薄膜在没有光照的条件下,处于一种低水平的热平衡状态,导电电荷数量极少,导电能力接近于绝缘体^[8].当半导体在特定波长的光照条件下,单位时间内产生的电子、空穴浓度为

$$N = \eta n_{\text{ph}} = \frac{\eta P_s}{h\nu LA} \quad (1)$$

式中, η 为量子效率, n_{ph} 为入射光子密度, P_s 为辐射功率, $h\nu$ 为光子能量, L 为光致导电薄膜长度, A 为薄膜截面积.光照不变的条件下,光生载流子不断产生,同时不断复合,载流子浓度随时间变化为

$$\frac{d\Delta n}{dt} = N - \frac{\Delta n}{\tau} \quad (2)$$

设初始条件为 $t=0, \Delta n(0)=0$, 得到

$$\Delta n(t) = N\tau(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

$t \rightarrow \infty, \Delta n = \Delta n_0 = N\tau$, 此时达到稳定值光生载流子浓度为

$$\Delta n_0 = \frac{\eta P_s}{h\nu LA} \tau \quad (4)$$

因此光电导率^[9-10]为

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) = q\mu_p(b\Delta n + \Delta p) \quad (5)$$

式中, q 表示电子电荷, Δn 表示光生电子, Δp 表示光生空穴, μ_n 表示电子迁移率, μ_p 表示空穴迁移率.光生载流子浓度决定光电导的大小,增加光生载流子浓度的途径主要靠提高入射光辐照能量和提高光生载流子寿命.

1.2 光致导电网栅结构分析

如果单独由光致导电薄膜构成网栅,调节效果只是滤波功能的有和无,不符合网栅实用状态.因此设计成金属网与光致导电薄膜网构成的复合网栅,结构形式如图 1,图 1(a)为周期不变而通光孔径变化的复合网

栅,即在金属网栅孔径内复合一定宽度的光致导电薄膜;图 1(b)为周期和通光孔径同时变化,即在金属网栅内穿插光致导电薄膜线条.该结构的思路为:当没有特定光照时,光致导电薄膜部分不导电,电磁滤波依靠金属网栅,通光孔径边长为 A_1 ;当有特定波长光照时,光致导电薄膜部分导电,且与金属薄膜形成欧姆接触,通光孔径边长为 A_2 .

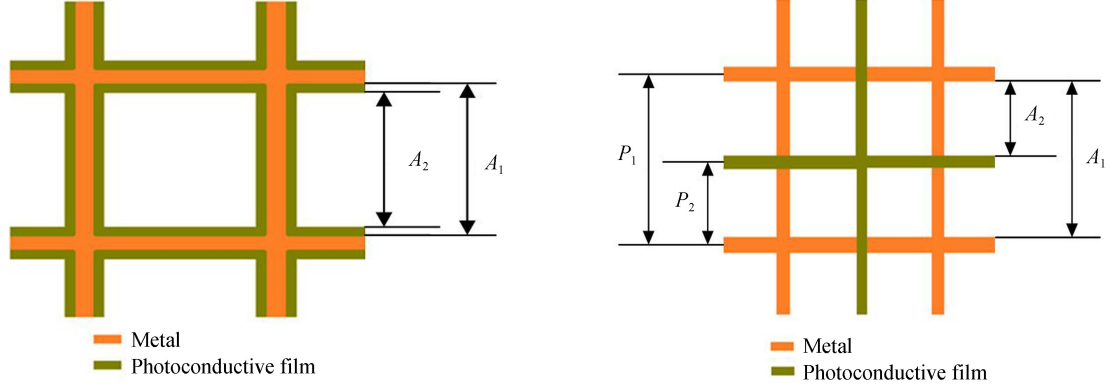


图 1 光致导电复合网栅结构
Fig.1 The structure of photoconductive composite mesh

网栅对电磁波的滤波作用决定于网栅参数孔径尺寸 A 、线宽 $2a$ 和栅线周期 P .起主要作用的为网栅孔径尺寸 A .从图 1 可以看出复合网栅在光照前后网栅的孔径尺寸都发生了变化,因此谐振频率发生变化.从结构上看图 1(b)较 1(a)通光孔径变化更大,电磁调制范围更宽.因此后续以 1(b)结构为例展开相关研究.

2 优化设计与仿真

2.1 优化设计

由电磁屏蔽理论可知,网栅对电磁波的反射率和透射率以及吸收率是网栅周期、线宽和电磁频率的函数^[11-12],因此,网栅周期、线宽的设计必须根据所要求屏蔽的电磁波频率和所要求的衰减指数来优选.当入射波长 λ 远远大于周期 P 时,电磁波的反射和透射特性服从微波传输线理论,根据微波传输线理论^[13],在 $2a/P$ 的值很小的前提下可推导出电磁波在网栅上的透过率 T 、反射率 R_{12} 和吸收率 J_{12} ,分别为

$$T = \frac{4n_1n_2 [(R_p/Z_0)^2 + (X_p/Z_0)^2]}{[1 + (n_1 + n_2)R_p/Z_0]^2 + (n_1 + n_2)^2 (X_p/Z_0)^2} \quad (6)$$

$$R_{12} = \frac{[1 + (n_2 - n_1)R_p/Z_0]^2 + (n_2 - n_1)^2 (X_p/Z_0)^2}{[1 + (n_2 + n_1)R_p/Z_0]^2 + (n_2 + n_1)^2 (X_p/Z_0)^2} \quad (7)$$

$$J_{12} = \frac{4n_1R_p/Z_0}{[1 + (n_2 + n_1)R_p/Z_0]^2 + (n_2 + n_1)^2 (X_p/Z_0)^2} \quad (8)$$

式中, n_1 代表空气折射率, n_2 代表基片介质折射率, Z_0 是电磁波在自由空间里的阻抗, R_p 表示网栅中串联等效电阻, X_p 表示网栅的等效阻抗.设 ϵ_0 为自由空间介电常数, λ 为涉及的波长, σ 为网栅介质的电导率, η 为网格因子, $\eta = P/2a$, 则可得到

$$X/Z_0 = \left(-\omega' \operatorname{Incsc} \frac{\pi a}{p} \right) \left(\frac{\omega}{\omega'} - \frac{\omega'}{\omega} \right)^{-1} \quad (9)$$

式中, ω' 为网格在电介质界面的共振频率, 它可表示为 $\omega' = 1 - 0.27(a/P)$, ω 为标准频率, 它是周期与波长的函数.

优化设计时, 可根据所要求的电磁波的衰减值, 预先给定 P 和 $2a$ 的范围, 经计算机计算相应的 T 、 R_{12} 和 J_{12} 的值, 反复优选求出最佳效果时的 P 和 $2a$.

2.2 仿真

选择光学窗常用材料蓝宝石作为衬底材料, 对光照前后不同周期和通光孔径条件下网栅谐振频率的变化进行仿真.如图1(b), 当没有照射时, 光致导电薄膜对电磁信号无作用, 网栅的周期为 P_1 , 孔径边长为 A_1 ; 有光照时, 光致导电薄膜与金属膜之间形成欧姆接触, 构成复合网栅, 此时网栅周期为 P_2 , 孔径边长为

A_2 .选取雷达波段2~18 GHz,红外波段3~5 μm 和8~14 μm 为研究对象,以达到带通某雷达频段又不影响红外透过的目的.设置衬底厚度 $h=8\text{ mm}$,采用电磁仿真软件(Computer Simulation Technology-microwave studio, CST-microwave studio)分别仿真优化得到的周期 $P_1=5\text{ mm}$ 、边长 $A_1=4.9\text{ mm}$ 和周期 $P_2=2.5\text{ mm}$ 、边长 $A_2=2.4\text{ mm}$ 时的网栅谐振曲线,线宽 $2a=7\text{ }\mu\text{m}$,优化仿真结果如图2,网栅的中心谐振频率随单元结构尺寸从13.2 GHz变为14 GHz.

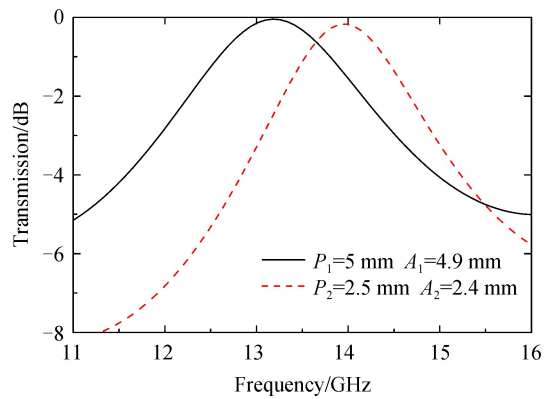


图2 单元尺寸变化前后的谐振曲线

Fig.2 Different transmission curves in different structure sizes

3 实验

3.1 制作工艺

参照仿真结果选用蓝宝石作为衬底材料,制作工艺设计为两次 lift-off 工艺, lift-off 工艺为半导体光刻中常用技术^[14],流程如图3.采用图3(a)工艺制作出金属膜网栅,因后续工艺光致导电半导体薄膜的制作涉及高温过程,为防止金属氧化,因此选择导电良好和性能稳定的“金”作为金属网栅材料.采用图3(b)工艺完成光致导电网栅制作,使其与金属网栅共同构成复合网栅.关键技术是两次光刻制作中的对准和光致导电薄膜的制备.

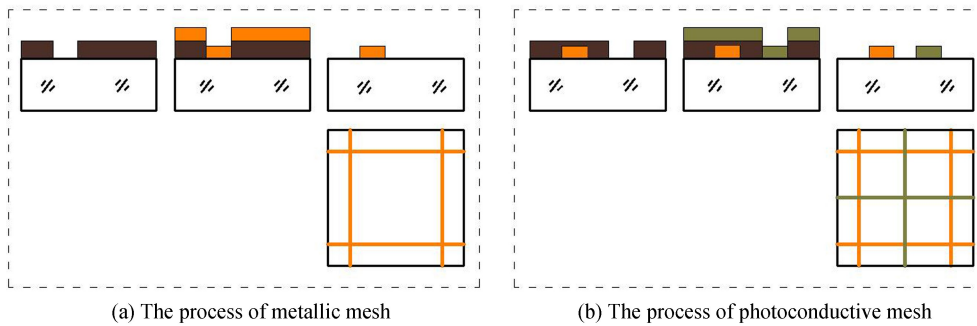


图3 复合网栅制作工艺原理
Fig.3 The process principle of composite mesh production

3.2 对准技术

在两次光刻中采用衍射光栅同轴对准技术以保证复合网栅周期的准确性.图4(a)、(b)为掩膜版和蓝宝石衬底上的光栅型对准标记,分四个区域,一侧周期16 μm ,线宽8 μm ;另一侧周期17.6 μm ,线宽8.8 μm .采用5倍缩小物镜,使无论在X或Y方向,工件台每扫描88 μm 对准标记会出现共同过零点,测量行程88 μm .

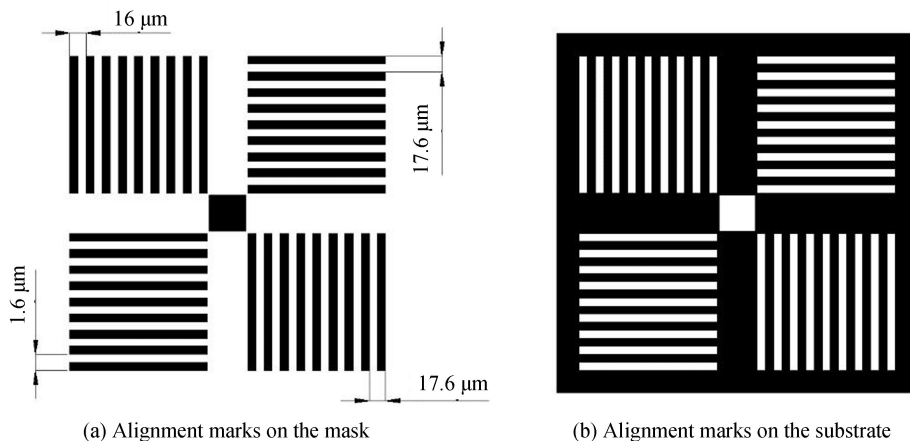


图4 对准标记
Fig.4 Alignment mark

在掩模版和蓝宝石基片中心的“■”和“□”是用于粗略对准的标记。

衍射光栅同轴对准原理如图 5.SAVART 板的作用是把±1 衍射光分成偏振方向相互垂直的 o 光和 e 光,调制器组件对入射的线偏振光进行调制,以 50 kHz 的固定高频使出射的 o 光和 e 光的偏振方向发生 90° 角的反转,检偏器只通过一个方向的偏振分量,探测器接收到的光信号为交替通过的 o 光和 e 光,经过光学调制器组件处理,由干涉仪读取基片位置,确定对准点,对准精度小于 1 μm.

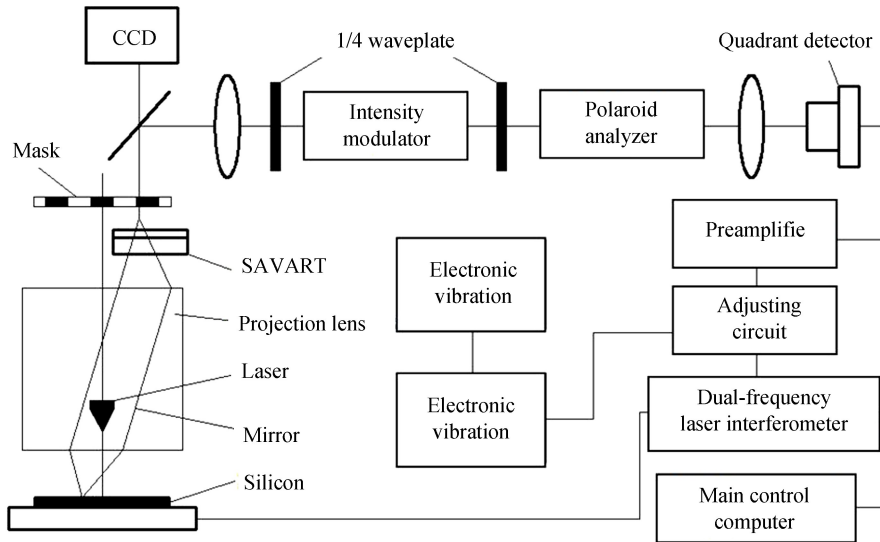


图 5 衍射光栅同轴对准原理
Fig.5 The coaxial alignment principle of diffraction grating

3.3 光致导电薄膜制备

光致导电薄膜的光电性能与构成薄膜的材料及掺杂元素直接相关,薄膜材料的选择需考虑禁带宽度、掺杂难度、敏感光谱和成膜难度几个因素;掺杂元素用以实现光照响应速度快、亮暗电阻差距大的目标,经对大量材料的性能分析和实验确定薄膜主体材料和掺杂成分如表 1.CdSe 和 CdS 作为光致导电薄膜主体材料,调节其比例用以调控薄膜的敏感波长.

表 1 薄膜材料与掺杂元素
Table 1 Materials of thin film and doping elements

Material	Band gap/eV	Sensitive wavelength/μm	Doping elements	Ionization energy/eV	Effect
CdS	2.42	0.5	Cl ⁻	0.25	Photosensitizing
CdSe	1.76	0.7	Cu ²⁺	0.03	Increase difference between bright and dark resistances
-	-	-	In ³⁺	0.14	Reduce the light resistance

薄膜制备工艺为真空镀膜辅以离子浸润工艺,在蓝宝石基底上制备光致导电薄膜,薄膜材料配比为 CdS : CdSe(1 : 1~5 : 1), CdCl₂ : InCl₃ : CuCl₂ (3.6 : 2.6 : 1.3)^[15].设备采用 Angstrom 公司的 EvoVac 型镀膜机镀制光致导电膜, lift-off 工艺后制成光致电网栅,其与金属网栅共同构成复合网栅.为实现光致导电薄膜与金属膜之间良好的欧姆接触,采用 JQF1100 型高温实验电炉在 400℃ 进行退火处理.样件在显微镜下观察效果如图 6.



图 6 复合网栅显微图
Fig.6 The micrograph of composite mesh

采用 ZTM-700 型测量显微镜测试网栅参数,结果如表 2,误差在允许范围之内.

表 2 样件设计及测试结果

Table 2 Design and measurement results of sample

The sample of infrared window	Design/mm	Measurement/mm
Period P_1	5	5.006
Period P_2	2.5	2.504
Length A_1	4.9	4.897
Length A_2	2.4	2.395
Line width $2a$	0.007	0.007

4 性能测试

4.1 透红外性能测试

采用 Varian600-IR 傅里叶红外光谱仪对样件红外透过率进行测试,得到加载光致导电复合网栅前后的红外透过率曲线如图 7.曲线 a 表示蓝宝石衬底的红外透过率,曲线 b 表示在蓝宝石衬底制备光致导电复合网栅后的红外透过率,曲线 c 表示在微波暗室中在波长 600 nm、功率 200 mW/cm²光照下的透过率曲线.光照条件下,加载光致导电复合网栅与加载前相比,红外透过曲线趋势不变,透过率整体下降了 7.8% 左右,与单独金属网栅相比相差 3.4%,符合网栅光波段透过率与网栅表面占有率之间的关系,满足实用需求.

4.2 电磁性能测试

在微波暗室中,采用毫米波测试仪、VectorStar 矢量网络分析仪、喇叭天线和光源等构成的综合测试装置进行测试,测试分为光照和暗室两种状态,光照波长分别为 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm,测试频段为 2~18 GHz.暗室条件下测得曲线如图 8 曲线 a ;光照条件下测得曲线如图 8 曲线 $b \sim f$ (b -400 nm, c -500 nm, d -600 nm, e -700 nm, f -800 nm),可以看出: 1) 由于实验变量为光照波长,对于同一样件,结构尺寸不变,各波长光照射下的中心谐振频率也不变; 2) 600 nm 的光照射时带通曲线较窄,屏蔽效果最好,说明该光致导电薄膜的最佳可见光敏感波长为 600 nm; 3) 最佳敏感波长 600 nm 照射下中心谐振频率从 13.22 GHz 变为 14.03 GHz,与仿真结果基本一致.

5 结论

本文提出了一种光照主动控制的复合网栅,通过理论分析、仿真和相关实验验证了光照对网栅电磁性能进行调控的可行性.该技术与目前研究较多的电控或磁控网栅相比不但结构简单,并且制备工艺较为成熟,可实现小周期、细线宽的网栅制作,易于应用于光学材料表面.从主动控制角度分析,采用特定波长的光源照射即可,对主机系统无电磁干扰,因此优势较为明显.研究的不足之处在于光致导电薄膜的电导率问题,光致导电薄膜采用掺杂半导体材料制成,因此整体导电性能弱于金属薄膜,而网栅电磁调制能力与网栅电导率又直接相关,因此光致导电复合网栅电磁屏蔽效能略低于相同结构参数的金属网栅,针对这一问题,后续研究可通过对掺杂元素的优化设计与实验验证,进一步提高光致导电薄膜的导电性能.

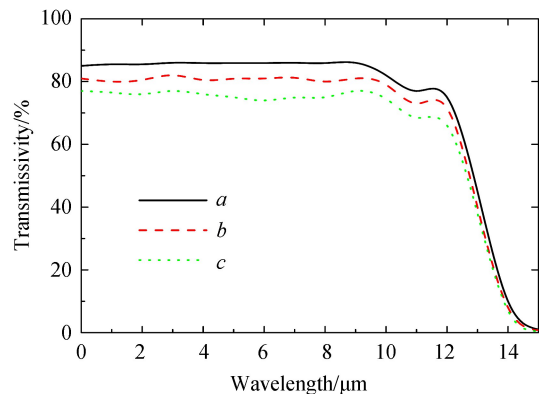


图 7 红外透过率测试曲线

Fig.7 The curves of infrared transmission

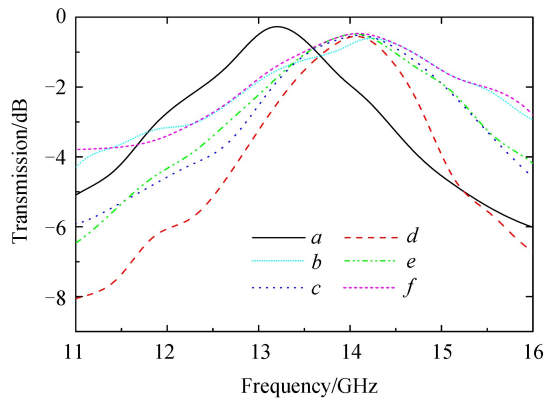


图 8 电磁性能测试曲线

Fig.8 Test curve for electromagnetic performance

参考文献

- [1] HUANG Min-jie, MENG Zhi-jun. Transmission upper limit of band-pass double-layer FSS and method of transmission performance improvement[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, **26**(2): 224-231.
- [2] ZHANG Jian, GAO Jin-song, XU Nian-xi, *et al.* Design and study of frequency selective surface based on hybrid period metallic mesh[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(6): 067302.
张建, 高劲松, 徐念喜, 等. 基于混合周期栅网结构的频率选择表面设计研究[J]. 物理学报, 2015, **64**(6): 067302.
- [3] ZHU Xiao-ming, YANG Xiao-dong, SONG Qi-chao, *et al.* Compact UWB-MIMO antenna with metamaterial FSS decoupling structure[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, **115**: 1-6
- [4] HAN Peng, WANG Jun, WANG Fu-jia, *et al.* Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(19): 256-265.
韩鹏, 王军, 王甲富, 等. 基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择表面设计研究[J]. 物理学报, 2016, **65**(19): 256-265.
- [5] BAI Zheng-yuan, JIANG Xiong-wei, ZHANG Wei. Ultra-thin metamaterial absorber for electromagnetic window shielding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 251-259.
白正元, 姜雄伟, 张龙. 超薄电磁屏蔽光窗超材料吸波器[J]. 光学学报, 2017, **37**(8): 251-259.
- [6] SHEN Zhen-feng, FENG Xiao-guo, GAO Jin-song, *et al.* The inducing 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.
- [7] WANG Jun, SUN Yan-jun, JI Xue-song, *et al.* Photoelectric controllable frequency selective surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0324002.
王君, 孙艳军, 纪雪松, 等. 光电可调控频率选择表面[J]. 光子学报, 2018, **47**(3): 0324002.
- [8] WANG He-yan, LU Zhen-gang, LIU Ye-shu, *et al.* Double-layer interlaced nested multi-ring array metallic mesh for high-performance transparent electromagnetic interference shielding[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(8): 1620-1623.
- [9] URICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(1): 37-55.
- [10] KOHIN-NITSCHHELM M. Conductor and inductive grid transmission[D], Boston: Tufts University, May 1989.
- [11] FENG Xiao-guo, ZHANG Ke, TANG Yang. Electromagnetic shielding properties of metallic mesh coatings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 686-691.
冯晓国, 张舸, 汤洋. 薄膜型金属网栅的电磁屏蔽特性[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(3): 686-691.
- [12] KOHIN M, WEIN S J, TRAYLOR J D. Analysis and design of transparent conductive coating and filters[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(5): 911-925.
- [13] QIU Sheng-de, HU Cheng-zheng, WANG Ai-jun, *et al.* Optical conductivity of decagonal quasicrystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(2): 743-747.
邱圣德, 胡承正, 王爱军, 等. 十次对称准晶的光电导率[J]. 物理学报, 2006, **55**(2): 743-747.
- [14] LI Lei, LIU Xian-yun, QIAN Zhong-jian, *et al.* Fabrication and thermoelectric performance of CoSb₃ nanoparticle films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0216001.
李磊, 刘宪云, 钱忠建, 等. CoSb₃ 纳米薄膜的制备与热电性能[J]. 光子学报, 2016, **45**(2): 0216001.
- [15] WANG Jun, SUN Yan-jun, JI Xue-song, *et al.* Fabrication and photoelectric properties of optically controlled active frequency selective surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(5): 0524002.
王君, 冷雁冰, 孙艳军, 等. 光控主动频率选择表面制作及光电性能研究[J]. 光学学报, 2018, **38**(5): 0524002.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos.11474037, 11474041)

引用格式: WANG Jun, LENG Yan-bing, SUN Yan-jun, *et al.* Design and Fabrication of Photoconductive Mesh on Transparent Substrate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0913002

王君, 冷雁冰, 孙艳军, 等. 透明衬底光致导电网栅的设计与制作[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0913002