

引用格式: WANG Jian, XU Jun-qi, SU Jun-hong, *et al.* Research on Infrared Anti-reflection Thin Film Devices with Compatibility of Electromagnetic Shielding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1031002

王建,徐均琪,苏俊宏,等.兼容电磁屏蔽红外增透薄膜器件的研究[J].光子学报,2020,49(10):1031002

兼容电磁屏蔽红外增透薄膜器件的研究

王建,徐均琪,苏俊宏,李阳,师云云

(西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,西安 710021)

摘 要:利用光刻掩模和热蒸发沉积技术制备兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件,实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段红外信号高效增透,且能屏蔽 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 频段的电磁波信号.通过光刻掩模和真空热蒸发沉积技术在双面抛光Si基底上制备满足要求的交叉对称金属网栅结构,通过离子束辅助电子束热蒸发沉积技术制备 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段高效增透的红外膜.为进一步改善金属网栅的透射率,在周期 g 为 $550\ \mu\text{m}$,不同线宽的金属网栅薄膜上沉积红外增透膜.结果表明:通过真空式傅里叶变换红外光谱仪测试得红外膜样品在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的峰值透射率为 99.8% ,平均透射率为 99.3% .矢量网络分析仪测试金属网栅 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 频段的电磁屏蔽效能,得到兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件在 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 频段内总体电磁屏蔽效能优于 $27\ \text{dB}$, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的峰值透射率为 86.3% ,平均透射率为 86.1% .金属网栅薄膜上镀制增透膜在保证电磁屏蔽效能不变($\geq 27\ \text{dB}$)的前提下,网栅光谱(透射率)提高了 37.6% (网栅周期 g 为 $550\ \mu\text{m}$,线宽 $2a$ 为 $30\ \mu\text{m}$).屏蔽效能的改善既可以通过调整网栅的周期和线宽,也可以选择电阻率较低的基底材料实现.

关键词:电磁屏蔽;红外;真空热蒸发;金属网栅;减反膜;透射率;屏蔽效能

中图分类号:O484

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204910.1031002

Research on Infrared Anti-reflection Thin Film Devices with Compatibility of Electromagnetic Shielding

WANG Jian, XU Jun-qi, SU Jun-hong, LI Yang, SHI Yun-yun

(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Photolithography mask and thermal evaporation deposition technology were used to fabricate a thin film devices compatible with electromagnetic shielding infrared window, which could realize the device to possess the efficient anti-reflection of infrared signals in the band of $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and shield electromagnetic signals in the frequency band of $12\sim 18\ \text{GHz}$. The cross-sectional symmetric metal grid microstructures which met requirements were prepared on the double-sided polished Si substrate by photolithography mask and vacuum thermal evaporation deposition technology, the highly efficient anti-reflection infrared in the $3\sim 5\ \mu\text{m}$ band was prepared by ion beam assisted electron beam thermal evaporation deposition technology. In order to improve the transmittance of the metal grid further, an infrared anti-reflection film was deposited on the metal grid coating with a cycle g of $550\ \mu\text{m}$ and different line widths. Results show that the peak transmittance of the infrared anti-reflection film at $3\sim 5\ \mu\text{m}$ is 99.8% and the average transmittance is 99.3% through the measurement of vacuum Fourier infrared spectrometer. The electromagnetic shielding

基金项目:陕西省国际科技合作与交流计划(Nos.2018KWZ-02,2016KW-036),陕西省自然科学基金研究计划(No.2016JZ025),西安市智能探视感知重点实验室项目(No.201805061ZD12CG45)

第一作者:王建(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为薄膜及激光损伤.Email:lannyla@163.com

导师(通讯作者):徐均琪(1973-),男,教授,博士,主要研究方向为薄膜技术.Email:jqux2210@163.com

收稿日期:2020-05-18;**录用日期:**2020-08-17

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

effectiveness in the 12~18 GHz frequency band of the metal grid was measured by vector network analyzer, and obtained the overall electromagnetic shielding efficiency of the compatible electromagnetic shielding infrared window thin film device in the 12~18 GHz band is better than 27 dB, the peak transmittance in the 3~5 μm infrared band is 86.3%, and the average transmittance is 86.1%. On the premise of ensuring the electromagnetic shielding efficiency is unchanged (≥ 27 dB), the transmittance of the metal grid films has increased by 37.6% (the grid cycle g is 550 μm , line width $2a$ is 30 μm). The improvement of shielding efficiency can be achieved either by adjusting the cycle and line width of the grid, or selecting a substrate material with lower resistivity.

Key words: Electromagnetic shielding; Infrared; Vacuum thermal evaporation; Metal mesh; Anti-reflection film; Transmittance; Shielding effectiveness

OCIS Codes: 310.1210; 310.6188; 310.6870

0 引言

多年来,国内外学者对电磁屏蔽薄膜做了一定的研究,且取得了很大的研究进展.电磁屏蔽薄膜主要通过激光直写、真空镀膜技术^[1-3],光刻显影、真空镀膜技术^[4-6],掺杂磁性导电材料^[7]等途径制备.近些年来,学者开始通过掺杂法^[8-10]、纳米银线工艺^[11-13]等新技术制备薄膜研究其屏蔽特性.WU G和WANG Y Y等^[14-15]通过制备碳纳米管/聚合物复合膜,实现特定频段内的屏蔽效能分别高达30 dB和41.1 dB.LI T T等^[16]受珍珠层结构启发,制备具有防静电的高性能屏蔽复合纳米膜.电磁屏蔽薄膜可分为透明导电的ITO薄膜和二维阵列排布的金属网栅薄膜.但由于透红外屏蔽长波电磁干扰过程中,无法解决通阻带近、基底透射率差、连续薄膜材料少等问题,截至目前金属网栅仍是唯一的选择.在增透膜研究方面,膜料的合理组合可实现红外峰值透射率达98%,平均透射率为96%的高效增透效果^[17],也可通过膜系设计、制备工艺改善等途径提高薄膜的增透效果.MATSUOKA Y和YENISOY A等^[18-19]分别通过修改Lockhart和麦克劳德程序查找最佳厚度设计方法,制备了特定波段反射率小于1%的增透膜,且膜厚均小于2.5 μm .GE S B等^[20]使用单点金刚石车削和纳米压印光刻技术制造金字塔结构的宽带红外薄膜,利用离子刻蚀将铜模转移到氮化硅上,实现0.8~2.5 μm 红外波段的透射率在99%以上.

随着军事科技的快速发展,当今的红外精准制导武器不仅需要高效的红外透过率,同时也需具备较好的电磁屏蔽效能.兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜在特定红外波段具有良好的透过率,且能屏蔽一定频段内的电磁波信号.虽然国内外学者对此都做了一定的研究,但都只是研究薄膜的高效红外透过率,或者只研究薄膜的电磁屏蔽效能,对于既能实现红外高效透过又能实现电磁屏蔽的红外增透和金属网栅组合的兼容电磁屏蔽增透薄膜的报道则很少.因此如何实现兼容电磁屏蔽薄膜具有很重要的研究意义.本文通过在镀制的金属网栅薄膜表面继续镀制红外增透膜的新思路,实现了薄膜器件兼具良好的红外增透和强电磁屏蔽特性的研究目的.

1 实验

1.1 电磁屏蔽薄膜的理论分析

KOHIN M等^[21]研究表明,金属网栅在红外波段内表现为衍射光栅,会对入射的光产生衍射作用,网栅的透射率为所有衍射级透射率总和,可用占空比(透光面积所占的比例)表示为

$$T = \left(\frac{g - 2a}{g} \right)^2 = \left(1 - \frac{2a}{g} \right)^2 \quad (1)$$

式中, g 表示网栅的周期, $2a$ 表示网栅的线宽.从式(1)可以看出,网栅线宽与周期比值越小,会得到较高的红外透光率.所以在周期一定的情况下,网栅的线宽越小越好,但由于加工工艺、线宽过窄会引起断线(影响屏蔽效能)等因素限制,线宽不能过窄.

据URICH R等^[22]的等效电路原理可知,在网栅薄膜的厚度 $t \ll 2a$, $2a \ll g$ 的前提下,电磁波垂直入射时,金属网栅的电磁透射率为

$$y = f_0 \left(\ln \sin \frac{\pi a}{g} \right) \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, f_0 为归一化谐振频率, $f = g/\lambda$, λ 表示入射电磁波的波长, 则金属网栅电磁屏蔽效能表示为

$$S = -10\lg T \quad (3)$$

从式(2)和(3)分析可知, 当周期一定时, 随着线宽的增加, 金属网栅的屏蔽效能增加; 结合式(1)分析, 金属网栅的光学-电学特性是相互矛盾的.

1.2 金属网栅微结构的制备

选用光刻掩模将设计的网栅图案转移到双面抛光硅基底, 光刻胶选用 EPG533 光刻胶. 为了保证光刻胶旋涂的质量, 首先利用超声波对双面抛光硅基底进行清洗, 清洗溶液选择无水乙醇, 随后将残留乙醇用去离子水清洗, 用氮气吹干水渍. 采用 KW-4A 型台式匀胶机进行涂胶, 涂胶过程一般采用高、低转速, 低速确保光刻胶均匀附着于基底表面, 高速有效的控制光刻胶的厚度. 接着利用马弗炉选择合适的温度、时间烘烤涂胶基片, 增加光刻胶的黏附性的同时, 可有效减少胶层内部应力. 待基片冷却后, 选择合理的曝光时间对涂胶基片进行曝光, 曝光时间过短会导致光化学反应不彻底而出现光刻胶的残留; 曝光时间过长, 因衍射和散射使未曝光区域光刻胶发生光化学反应而去除. 最后将基片放入显影液进行显影, 显影时间长短也会影响光刻的质量. 表 1 为网栅的光刻工艺参数.

表 1 网栅的光刻工艺参数
Table 1 Photolithography process parameters of the grid

Craftsmanship	Time/s	Temperature / $^{\circ}\text{C}$
Ultrasonic cleaning	600(10 min)	60
Spin-on photoresist	12(low speed 800 r/min)	25
	20(high speed 2 000 r/min)	25
Bake	90	90
Exposure	15	25
Development	15	25

利用表 1 工艺参数进行网栅图案制备. 图 1 为光学显微镜下网栅的微观图案, 使用的光学显微镜的目镜

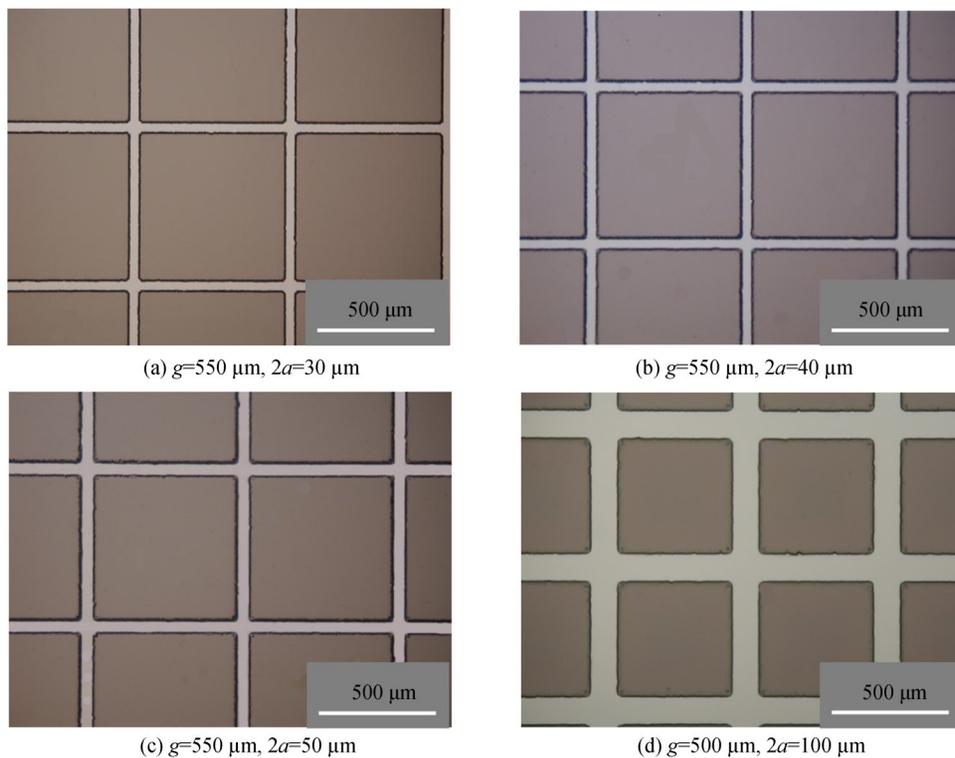


图 1 100 \times 光学显微镜下网栅微观结构

Fig.1 Microstructure of grid under 100 \times optical microscopy

放大倍率为 $10\times$,物镜的放大倍率选择 $10\times$.图1(a)~(d)分别是周期为 $550\mu\text{m}$,线宽为 $30\mu\text{m}$;周期为 $550\mu\text{m}$,线宽为 $40\mu\text{m}$;周期为 $550\mu\text{m}$,线宽为 $50\mu\text{m}$;周期为 $550\mu\text{m}$,线宽为 $100\mu\text{m}$ 的网栅结构在 $100\times$ 光学显微镜下的微观结构.可以看出在该工艺下制作的网栅结构轮廓分明,光刻结果较为理想,满足后期金属网栅的制作.

使用ZZS500-2/G真空箱式镀膜机完成金属薄膜的制备,采用电子束热蒸发技术沉积Cu膜.将光刻有网栅的硅基底清洗后装夹到制备薄膜的工件夹上,金属薄膜沉积温度设置为 120°C ,调节工件反馈电流保证工件以一定的转速进行旋转保证受热均匀和得到膜层均匀的薄膜,采用机械泵将箱体內的真空度抽至低真空,然后转化到机械泵和扩散泵将箱体內抽成高真空,待箱体的真空度为 $3.0\times 10^{-3}\text{Pa}$ 镀制薄膜,最后冷却取件.取出制备好的金属薄膜冷却一段时间(室温).在制备金属铜薄膜时,由于铜薄膜在Si基底的附着性不好,为此在硅基片上预先镀一层很薄(约 50nm)的铬(Cr)膜层作为过渡层,金属薄膜制备工艺见表2.

表2 金属薄膜的制备工艺
Table 2 Shows the metal film preparation process

Film material	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Evaporation method	Beams/mA	Vacuum degree of work/ $(\times 10^{-2}\text{Pa})$	Deposition rate/ $(\text{nm}\cdot\text{s}^{-1})$
Cu	120	Electron beam evaporation heat	100	1.0	0.53
Cr			30		0.34

将得到的金属薄膜进行最后的去胶处理,用蘸取丙酮溶液的棉签轻轻的擦拭金属薄膜表面,在光刻胶上镀制的金属薄膜随着光刻胶的脱落,被溶解到丙酮溶液中,其余区域的金属膜被保留,这样就得到了金属网栅薄膜.在光学显微镜下观察到的金属网栅微观结构,如图2所示.

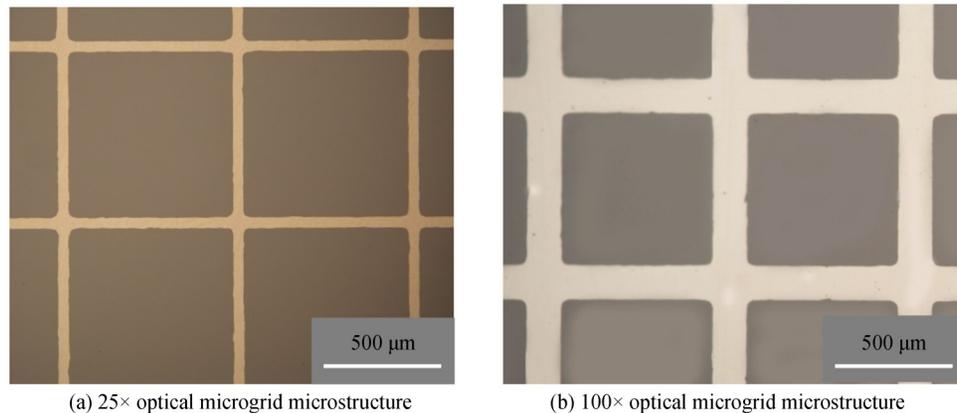


图2 金属网栅薄膜的微观结构

Fig.2 Microstructure of metal grid film

1.3 红外增透膜设计与制备

针对金属网栅薄膜的透射率不高的问题,需要设计和制备红外增透膜.根据单层增透膜原理,推出三层的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_3 \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 是膜系和基底参数决定的二阶矩阵, M_1 、 M_2 、 M_3 分别为第1、2、3层膜的特征矩阵, η_g 为基底折射率.图3为求解多层膜矩阵法的示意图.

当用导纳递推时有

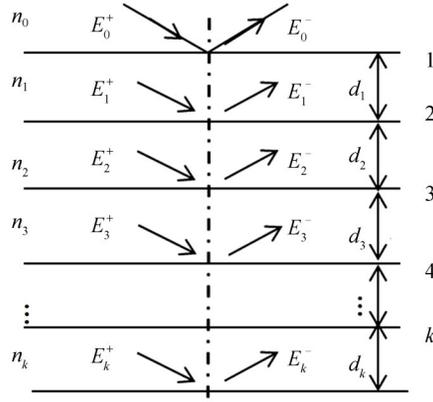


图3 求解多层膜的矩阵法

Fig.3 Matrix method for solving multilayer films

$$Y_k = \frac{\eta_{k+1} \cos \delta_k + i \eta_k \sin \delta_k}{\cos \delta_k + i \frac{\eta_{k+1}}{\eta_k} \sin \delta_k} \quad (5)$$

因此递推公式为

$$Y_1 = \frac{Y_2 \cos \delta_1 + i \eta_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + i \frac{Y_2}{\eta_1} \sin \delta_1} \quad (6)$$

$$R = \left[\frac{\eta_0 - Y_1}{\eta_0 + Y_1} \right] \left[\frac{\eta_0 - Y_1}{\eta_0 + Y_1} \right]^* \quad (7)$$

得到

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

该 k 层膜的光谱特性为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (9)$$

$$T = \frac{4 \eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (10)$$

结合薄膜材料选择依据:1)薄膜材料在使用波段内透明,材料消光系数尽量小;2)薄膜材料折射率选择合适前提下,高、低折射率材料的折射率差值大;3)材料物理化学性质稳定,薄膜应力匹配,在基片附着力良好;4)薄膜材料易制备且成本较低.经过综合对比及单层膜光学常数研究,ZnSe薄膜材料透光区为 $0.5 \sim 15 \mu\text{m}$,折射率为 2.67,消光系数为 1.4×10^{-4} ($\lambda = 1064 \text{ nm}$);BaF₂薄膜材料透光区为 $0.13 \sim 15 \mu\text{m}$,折射率为 1.40,消光系数为 5.0×10^{-6} ,选择 ZnSe 和 BaF₂ 为制备增透膜的高低折射率材料.

多层减反射薄膜可以由膜系 Sub/(HL)^S/Air 来实现,使用 TFC 膜系软件设计在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 高效增透的红外膜,经过优化后得到膜系结构为 Sub/3.5H3.5L/Air, H: ZnSe, L: BaF₂, Air: 空气,设计中心波长 λ 为 1064 nm.设计曲线如图 4 所示.在双面镀制相同的膜系结构后,理论上 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外波段的峰值透射率 99.9%,平均透射率为 99.5%.

使用 ZZS500-2/G 真空箱式镀膜机完成红外增透膜的制备,制备过程中采用光电极值法进行膜厚监控,并利用过正控制、短波控制长波的镀制技巧完成红外膜的制备.监控波长为设计波长的一半,即镀制膜系结构为 Sub/7H7L/Air.微调监控波长以获得良好透射率,制备过程中镀制 ZnSe 薄膜采用 λ 为 540 nm 进行监控,镀制 BaF₂ 薄膜采用 λ 为 535 nm 监控.具体的工艺参数如表 3.

在得到满足要求的金属网栅和红外增透膜后,在金属网栅薄膜上镀制红外增透膜,完成兼容电磁屏蔽

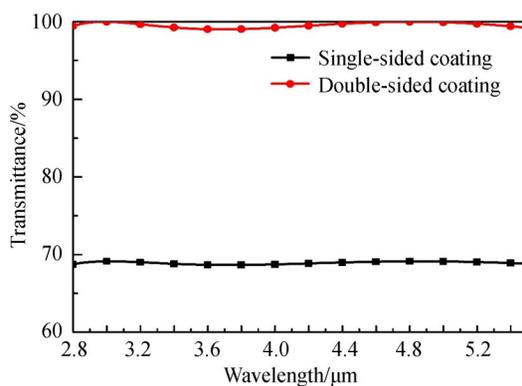


图4 红外增透膜在3~5 μm 波段膜系仿真曲线
Fig.4 Simulation curve of infrared antireflection coating in 3~5 μm band

表3 薄膜制备工艺参数
Table 3 Thin film preparation process parameters

Film material	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Evaporation method	Beams/mA	Vacuum degree of work/ $(\times 10^{-2}\text{Pa})$	Deposition rate/ $(\text{nm}\cdot\text{s}^{-1})$
ZnSe	170	Electron beam evaporation heat	30	1.0	0.23
BaF ₂					0.97

红外增透膜的制备.

2 结果与分析

2.1 金属网栅的光谱及屏蔽效能

由于线宽为 $100\ \mu\text{m}$ 的网栅结构,虽然电磁屏蔽效能较高,但由于透射率过低,后期无法满足使用要求.图5(a)对同周期、不同线宽的金属网栅的透射率进行测试,线宽 $2a$ 分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$.从图5(a)中发现,在双面抛光硅基底上没有镀制金属网栅时,硅基底在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的透射率为 55.3% 左右.镀制周期 g 为 $550\ \mu\text{m}$,线宽分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 的金属网栅薄膜后,网栅的红外透射率为 50.3% 、 48.5% 、 46.1% 和 45.0% .镀制金属网栅薄膜后透射率最大下降 10.3% ,这与金属网栅薄膜需要良好的透光性能是相违背的.图5(b)对同周期、不同线宽的金属网栅的屏蔽效能进行测试.选择两种不同电阻率的硅基底制备金属网栅,其中高电阻率为 $45\sim 60\ \Omega\cdot\text{cm}$,低电阻率为 $0.1\sim 1\ \Omega\cdot\text{cm}$.其中 M 表示高电阻率, S 表示低电阻率.

从图5(b)发现,同周期线宽不同时,随着线宽的增加,网栅的电磁屏蔽效能不断增加.结合图5(a),网栅

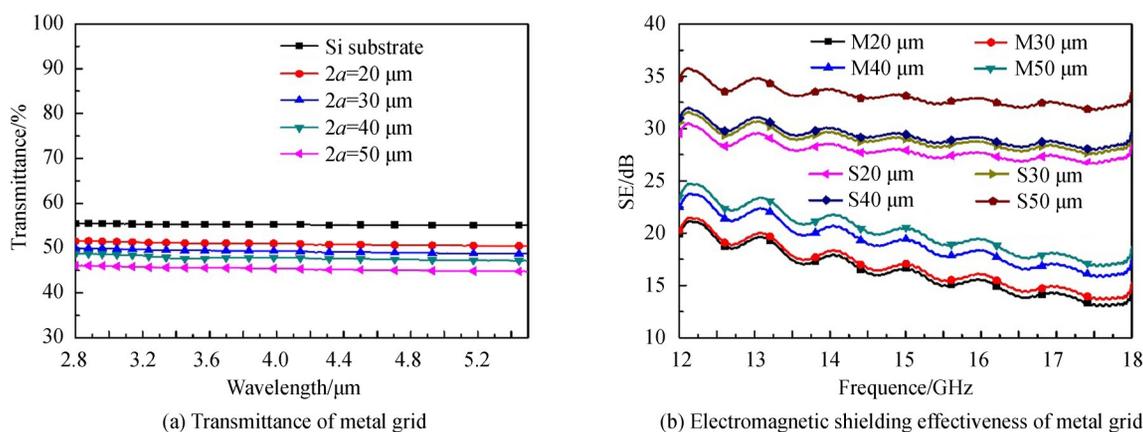


图5 金属网栅的光谱-屏蔽效能测试曲线
Fig.5 Transmittance-shielding efficiency test curve of metal grid

的透射率却不断下降.这说明网栅的良好透射率和强电磁屏蔽效能相互制约,无法同时实现.在保持较强电磁屏蔽效能的前提下,可以通过镀制增透膜以提高网栅的透射率.在同周期、同线宽的情况下,相比高电阻率硅基底上金属网栅,低电阻率硅基底上镀制金属网栅的总体电磁屏蔽效能较高.线宽为 $30\ \mu\text{m}$ 的金属网栅薄膜样片在 $15\ \text{GHz}$ 处的电磁屏蔽效能为 $28.6\ \text{dB}$.

2.2 红外增透膜的光谱特性

利用真空式傅里叶变换红外光谱仪对制备 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段增透的红外膜进行光谱测试,该设备可实现 $1.3\sim 27\ \mu\text{m}$ 红外波段的光谱测试,小于 $0.2\ \text{mbar}$ 的真空测试环境能有效地避免水蒸气、二氧化碳等气体引起的微弱光谱.测试的校准夹具的透光区直径为 $1\ \text{cm}$ (即测试的光斑直径为 $1\ \text{cm}$),入射光角度为 0° ,测试样片的基底均为厚度为 $1\ \text{mm}$ 的双面抛光硅片.测试结果如图 6 所示.在硅基底单面镀制增透膜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的透射率基本上维持在 69.5% ,无法满足使用要求.双面镀制增透膜后的峰值透射率为 99.8% ,平均透射率为 99.3% ,在 $5\ \mu\text{m}$ 处的透射率为 96.5% .

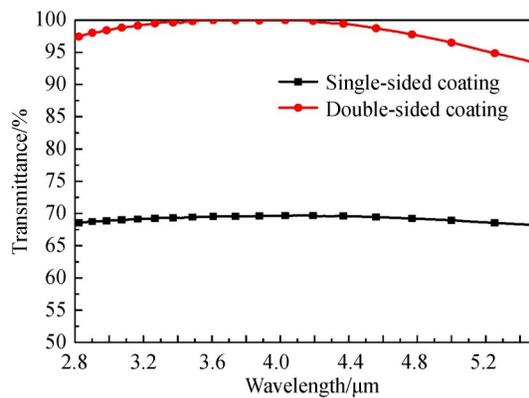


图 6 红外增透膜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段实测曲线

Fig.6 The measured curve of infrared antireflection coating in the $3\sim 5\ \mu\text{m}$ band

2.3 兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件的特性

兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件兼具有良好的光谱和强电磁屏蔽效能.前期分析以及实验结果显示,金属网栅薄膜的光谱-电磁屏蔽特性是相互矛盾的,无法在得到高效透光的前提下,具有良好的电磁屏蔽效能.鉴于此,通过采用在制备的金属网栅上镀制红外增透薄膜的新思路,既能实现红外波段内具有良好的光学透射率,又能对一定频段内的电磁波有良好的屏蔽效果.图 7 为兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件的膜层结构.

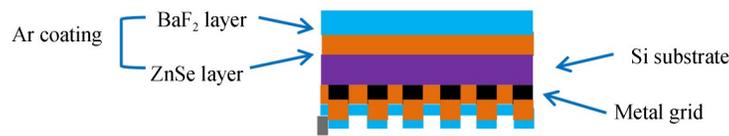


图 7 兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件的结构示意图

Fig.7 Structure diagram of thin film device compatible with electromagnetic shielding infrared window

对制备的兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件进行光谱和电磁屏蔽效能测试,测试结果如图 8(a)和图 8(b)所示.其中 R 表示金属网栅上镀制红外增透膜,周期 g 为 $550\ \mu\text{m}$,线宽分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$.从图 8(a)所示,镀制增透膜后,金属网栅的红外透射率得到很大的提升.以线宽 $2a$ 等于 $30\ \mu\text{m}$ 为例,在没有镀制增透膜时, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内的红外透射率平均在 48% ,金属网栅的基础上镀制红外增透膜后的透射率平均为 86.1% ,透射率增加了 38% .金属网栅的线宽为 $20\ \mu\text{m}$ 增加到 $50\ \mu\text{m}$ 时,器件的透射率在 $80.6\%\sim 91.8\%$ 之间.结合图 5(b)对比图 8(b)发现,镀制红外增透膜对兼容电磁屏蔽红外窗口器件的电磁屏蔽效能几乎无影响,即测试低电阻率基底薄膜器件在 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 的总体均在 $27\ \text{dB}$ 以上.金属网栅薄膜镀制红外增透膜前后透射率对比见表 4,两种不同电阻率硅基底同周期兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件的电磁屏蔽效能如表 5

所示.

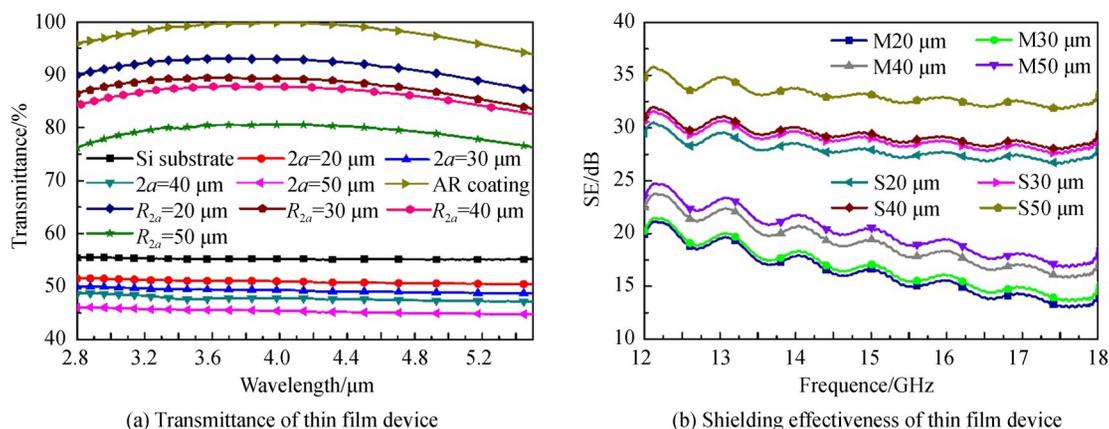


图8 薄膜器件的光谱-电磁屏蔽效能

Fig.8 Transmittance-electromagnetic shielding effectiveness of thin film device

表4 金属网栅镀制红外增透膜前后透射率对比

Table 4 Comparison of transmittance before and after the infrared antireflective coating on the metal grid

Line width $2a/\mu\text{m}$	20	30	40	50
Average transmittance before antireflection coating/%	50.3	48.5	46.1	45.0
Average transmittance after antireflection coating/%	91.8	86.1	84.3	80.6
Increment $\Delta/\%$	40.5	37.6	38.2	35.6

表5 同周期兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件的电磁屏蔽效能

Table 5 Electromagnetic shielding effectiveness of electromagnetic shielding infrared window film devices

$2a/\mu\text{m}$	M20	M30	M40	M50	S20	S30	S40	S50
SE/dB								
Si substrate	4.2	4.2	4.2	4.2	23.0	23.0	23.0	23.0
Film	16.6	17.0	19.4	20.5	27.9	29.0	29.8	33.1
Metal mesh	12.4	12.8	15.2	16.3	4.9	6.0	6.8	10.1

如表4所示,相比较镀膜前,镀制红外增透膜使得金属网栅薄膜在3~5 μm 波段内透射率最大增加了40%,周期为550 μm ,线宽为30 μm 时,平均透射率为86.1%,相比较未镀制红外增透膜而言,镀制红外增透膜的透射率增加37%.

如表5所示,就基底而言,低电阻率硅基底的电磁屏蔽效能比高电阻率硅基底电磁屏蔽效能大.低电阻率金属网栅样片的屏蔽效能比高电阻率金属网栅样片的屏蔽效能高,在周期为550 μm 、线宽为30 μm 的金属网栅薄膜样片,在15 GHz处的屏蔽效能为29.0 dB.

2.4 其它性能

根据GJB 2485-95对光学薄膜附着力的测试标准,对制备的兼容电磁屏蔽红外窗口薄膜器件使用宽度为2.5 cm的3M剥离胶带紧贴薄膜样片表面,然后沿着与膜面垂直的方向迅速提起,薄膜表面未出现损伤和脱落.

3 结论

1)采用光刻掩模技术和电子束热蒸发沉积技术制备了同周期不同线宽的金属网栅薄膜,测试金属网栅的光谱透射率和电磁屏蔽效能发现,网栅的透射率和电磁屏蔽效能是相互制约的,无法实现既能高效透射,且具有较强的电磁屏蔽效能.

2)使用TFC膜系设计软件设计满足要求的红外增透膜,通过过正控制、短波控制长波和微调监控波长得到在3~5 μm 波段高效增透的红外膜,峰值透射率为99.8%,平均透射率为99.3%.

3)通过金属网栅薄膜上增镀红外增透膜的新思路,实现在保证网栅较强电磁屏蔽效能的前提下,使得网栅的红外透射率得到较大的提高,在线宽为 30 μm 时,红外透射率从最初的 48.5% 提升到 86.1%,提高了 37.6%,且电磁屏蔽效能在特定频段优于 27 dB.

4)金属网栅电磁屏蔽效能的改善,不仅可以通过网栅线宽和周期的调整实现,也可以通过选择电阻率较低的基底材料来提高薄膜器件的屏蔽效能.

参考文献

- [1] FENG Xiao-guo, ZHANG Ge, 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.
- [2] LIU Xiao-han, ZHAO Jing-li, FENG Xiao-guo, *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.
- [3] LIU Xiao-han, FENG Xiao-guo, ZHAO Jing-li, *et al.* Electroless nickel plating of thin copper mesh on K9 substrate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2185-2191.
刘小涵,冯晓国,赵晶丽,等.K9基底细薄铜网上的化学镀镍[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10):2185-2191.
- [4] LU Zhen-gang, TAN Jiu-bin, JIN Peng, *et al.* Equivalent refractive index model on shielding effectiveness analysis of high transparency metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006(6): 949-954.
陆振刚,谭久彬,金鹏,等.高通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(6):949-954.
- [5] ZHANG Jian, GAO Jin-song, XU Nian-xi. Design and study of optically transparent band-pass frequency selective surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(14): 416-422.
张建,高劲松,徐念喜.光学透明频率选择表面的设计研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(14):416-422.
- [6] CHEN Yun, LI Yan-ru, ZHANG Hong-sheng. Improvement on fabrication technology of metallic mesh based on ZnS[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(1): 131-136.
陈贇,李艳茹,张红胜.基于ZnS金属网栅制作工艺的改进[J]. *中国光学*, 2014, **7**(1):131-136.
- [7] CHEN Yu. Study on electromagnetic shielding of infrared /visible optical window[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(7): 393-397.
陈宇.透红外/可见光学窗的电磁波屏蔽技术[J]. *红外技术*, 2012, **34**(7):393-397.
- [8] MOHAN R R, VARMA S J, SANKARAN J. Impressive electromagnetic shielding effects exhibited by highly ordered, micrometer thick polyaniline films[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(15): 154101.
- [9] BORA P J, VINOY K J, RAMAMURTHY P C, *et al.* Nickel coated flyash (Ni-FAC) cenosphere doped polyaniline composite film for electromagnetic shielding[J]. *Materials Research Express*, 2015, **2**(3): 036403.
- [10] BORA P J, MALLIK N, RAMAMURTHY P C, *et al.* Poly(vinyl butyral)-polyaniline-magnetically functionalized fly ash cenosphere composite film for electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, (106): 224-233.
- [11] JUNG J, LEE H, HA I, *et al.* Highly stretchable and transparent electromagnetic interference shielding film based on silver nanowire percolation network for wearable electronics applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, **9**(51): 44609-44616.
- [12] KIM D H, KIM Y, KIM J W. Transparent and flexible film for shielding electromagnetic interference[J]. *Materials & Design*, 2016, **89**: 703-707.
- [13] KIM D G, CHOI J H, CHOI D K, *et al.* Highly bendable and durable transparent electromagnetic interference shielding film prepared by wet sintering of silver nanowires[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(35): 29730-29740.
- [14] WU G, CHEN Y, ZHAN H, *et al.* Ultrathin and flexible carbon nanotube/polymer composite films with excellent mechanical strength and electromagnetic interference shielding[J]. *Carbon*, 2020, **3**(158): 472-480.
- [15] WANG Y Y, ZHOU Z H, ZHOU C G, *et al.* Lightweight and robust Carbon nanotube/Polyimide foam for efficient and heat-resistant electromagnetic interference shielding and microwave absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **2**(23): 8704-8712.
- [16] LI T T, WANG Y, PENG H K, *et al.* Lightweight, flexible and superhydrophobic composite nanofiber films inspired by nacre for highly electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, **1**(128): 30434-30438.
- [17] SU Xian-jun, HE Jia-yuan. Fabrication of antireflectin coating on ZnS substrate[J]. *Optical Instruments*, 2001(Z1): 68-70.
苏现军,何家元.硫化锌基底上减反膜的镀制[J]. *光学仪器*, 2001(Z1):68-70.
- [18] MATSUOKA Y, MATHONNEIRE S, PETERS S, *et al.* Broadband multilayer anti-reflection coating for mid-infrared range from 7 μm to 12 μm [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(7): 1645.

- [19] YENISOY A, YESILYAPRAK C, TUZEMEN S. High efficient ultra-broadband anti-reflection coating on silicon for infrared applications[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **100**: 82-86.
- [20] GE S B, LIU W G, ZHOU S, *et al.* Design and preparation of a micro-pyramid structured thin film for broadband infrared antireflection[J]. *Coatings*, 2018, **8**(5): 192.
- [21] KOHIN M, WEIN S J, TRAYLOR J D, *et al.* Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(5): 911-925.
- [22] URICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(1): 37-57.

Foundation item: International Science and Technology Cooperation and Exchange Program of Shaanxi Province (Nos. 2018KWZ-02, 2016KW-036), Basic Research Program of Natural Science of Shaanxi Province (No.2016JZ025), Xian Key Laboratory of Intelligent Visiting Perception (No.201805061ZD12CG45)