

用于车载激光雷达导电滤光膜的研究

付秀华^{1,2}, 陈星聿^{1*}, 檀承启¹, 朱忠尧³, 张静¹, 张功¹, 任仲举¹, 马国水⁴¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400;³北京空间机电研究所, 北京 100049;⁴光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444

摘要 为了使车载激光雷达视窗在大角度下具有高透过率并且具有除霜防雾的功能, 研制了近红外导电滤光膜。选择 SiH_x 与 SiO_2 作为高、低折射率材料, 调节氢气流量, 改变 SiH_x 的折射率及消光系数, 使得 SiH_x 可吸收可见光, 同时在红外波段的吸收率较低, 最终薄膜外观呈黑色。利用软件 Macleod 与 Optilayer 设计并优化膜系, 使薄膜在 $(905 \pm 30) \text{ nm}$ 波段增透, 同时减低了大角度入射时的光谱偏移量。在滤光膜最外层加镀了一层氧化钢锡 (ITO) 薄膜, 通过调整工艺参数, 在不影响光谱性能的前提下降低了方块电阻值。经测试, 所制备的导电滤光膜在入射角为 0° 时的平均透过率为 92.58%, 入射角为 30° 时的透过率为 91.9%, 方块电阻值达到 $24 \text{ } \Omega/\text{square}$, 适用于车载激光雷达视窗。

关键词 薄膜; 光学薄膜; 氧化钢锡; 方块电阻; 磁控溅射

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1703101

1 引言

随着无人驾驶、智能驾驶的高速发展, 汽车对周围环境感知的准确度要求日益提高, 这就需要视觉传感器、定位传感器、雷达传感器、听觉传感器、姿态传感器相互配合, 为驾驶行为决策提供依据。车载激光雷达作为汽车的眼睛, 对目标物发射无线电波, 将发送信号与目标反射信号进行对比, 实现探测目标物和测距功能^[1-3]。红外激光雷达视窗作为车载雷达的最外层, 参与光学成像, 所以它在可见光波段应不透光, 但在 $(905 \pm 30) \text{ nm}$ 波段的透过率较好。为了保证车体外观的一致性, 窗口一般吸收可见光, 呈黑色。在寒冷潮湿的天气中, 光学窗口容易结霜起雾, 影响透过率, 所以应具备加热导电的功能。

用于车载激光雷达的激光器以 905 nm 波长和 1550 nm 波长为主。目前 905 nm 硅基光电探测器比 1550 nm 砷化镓光电探测器更为成熟^[4-5]。近几年国内开始对 905 nm 激光雷达的视窗组件展开研究。汕头市东通光电材料有限公司制备的抗反射导电膜由二氧化硅、氟化镁及氧化钢锡 (ITO) 组成, 透光率达到 88%~95%, 表面电阻率为 $50 \sim 500 \text{ } \Omega/\text{square}$ ^[6]。福建富兰光学股份有限公司制备的复合视窗由光学玻璃

及塑胶夹加热件组成, 滤光膜在 $(905 \pm 30) \text{ nm}$ 处的单面反射率小于 0.5%, 方块电阻值为 $20 \sim 100 \text{ } \Omega/\text{square}$ ^[7]。宁波永新光学股份有限公司制备的视窗组件由蓝宝石基板和光学玻璃基板组成, 在 0° 入射下, $(905 \pm 30) \text{ nm}$ 处的透过率约为 93.6%^[8]。

由于激光雷达需要对周围环境全方位探测, 因此要求滤光膜在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 入射角度下 $(905 \pm 30) \text{ nm}$ 波段的平均透过率达到 91.5% 以上; 为了减少杂散光对系统信号接收的影响, 要求滤光膜在 $400 \sim 700 \text{ nm}$ 波段不透光, 平均反射率要低于 7%。本文以美国康宁公司生产的 2320 型钢化玻璃为基底, 设计并优化了膜系, 使用射频磁控溅射技术探究了镀膜工艺, 对材料性能进行了分析, 制备出适用于车载激光雷达窗口的近红外导电滤光膜。

2 膜系设计

目前制备可见及近红外波段滤光膜常用的高折射率材料^[9]为 Ta_2O_5 和 Ti_2O_3 , 低折射率材料为 SiO_2 。在设计膜系时, 当入射角从 0° 变为 30° 时, 透过率光谱曲线会向短波方向偏移 30 nm 左右, 这两种高折射率材料无法满足大角度的设计要求。经查阅资料, 发现 SiH_x 在可见光波段的吸收率较大, 在近红外波段的吸

收稿日期: 2021-12-08; **修回日期:** 2021-12-21; **录用日期:** 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11973040)、吉林省科技发展计划国际科技合作项目(20210402065GH)、中国科学院国际伙伴计划(181722KYSB20200001)

通信作者: *c44181418@163.com

收率较小^[10],可以有效减小大角度设计条件下滤光膜的光谱偏移量。所以本实验采用 SiH_x (*x* 为分子中 H 原子数量)作为高折射率材料, SiO₂ 作为低折射率材料,设计并制备滤光膜。

2.1 SiH_x 光学常数的拟合计算

本文采用射频磁控溅射技术制备 SiH_x 薄膜,在溅射高纯度硅靶时,向电感耦合等离子体(ICP)内充入氢气,通过调节氢气流量,改变材料的折射率和消光系数。在靶材功率、靶材充气量、ICP 功率等工艺参数不变的条件下,向 ICP 内分别充入流量为 80, 100, 120, 140, 160 mL/min 的氢气,进行 5 组梯度测试,使用 Optilayer 软件对 5 组单层膜进行光学常数拟合,不同充氢流量条件下 SiH_x 的折射率如图 1 所示。

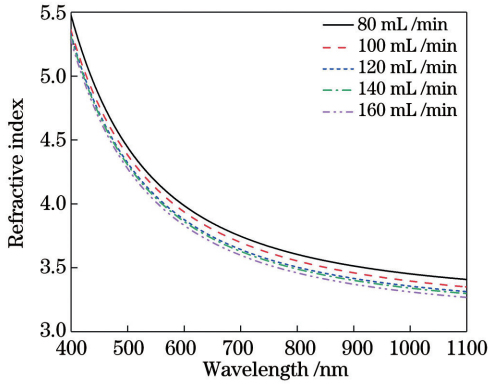


图 1 不同氢气流量下 SiH_x 的折射率

Fig. 1 Refractive indexes of SiH_x at different hydrogen flow rates

可以看出,随着氢气流量的增加, SiH_x 的折射率逐渐降低,当氢气流量为 80, 100, 120, 140, 160 mL/min 时,在 905 nm 处的折射率分别为 3.387、3.398、3.431、3.457、3.511。将 5 组实验拟合的消光系数进行对比,不同氢气流量下 SiH_x 的消光系数如图 2 所示。

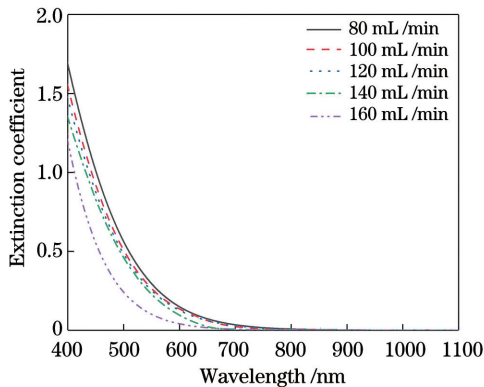


图 2 不同氢气流量下 SiH_x 的消光系数

Fig. 2 Extinction coefficients of SiH_x at different hydrogen flow rates

可以看出, SiH_x 在可见光波段的吸收率较大,在 905 nm 处的吸收率较小,并且消光系数随氢气流量的增加而降低。当氢气流量为 120 mL/min 时, SiH_x 消

光系数小且折射率高,在 905 nm 处的消光系数为 5.62×10^{-4} , 折射率为 3.431。在此工艺参数下 SiH_x 作为高折射率材料与低折射率材料 SiO₂ 相互匹配。

2.2 滤光膜膜系设计

由于滤光膜需要抑制短波但透射长波^[11],因此采用 Sub| (0.5H L 0.5H)^s | Air 作为基础膜系,其中 Sub 为基底, Air 为空气, H、L 分别为高、低折射率材料, *s* 为膜系的堆叠层数。多层膜 (0.5H L 0.5H)^s 的截止带半宽度用 Δg 表示,当光垂直入射时其计算公式为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_L - n_H}\right), \quad (1)$$

式中: n_H 为高折射率材料的折射率; n_L 为低折射率材料的折射率。

当光束斜入射(入射角为 θ)时,电矢量分成 S 偏振波和 P 偏振波,它们的有效折射率分别为 $\eta_S = n \cos \theta$ 和 $\eta_P = n / \cos \theta$ ^[12],其中 *n* 为材料折射率。此时膜系的中心波长将向短波方向偏移。S 偏振波的截止波长 g_S 和 P 偏振波的截止波长 g_P 之差 *g* 可以用来衡量偏振效应。令 $\rho = n_H / n_L$, 则 $g \approx \rho + 1/\rho$ 。S 偏振波的 ρ 值(ρ_S)和 P 偏振波的 ρ 值(ρ_P)的公式分别为

$$\rho_S = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)_S = \frac{n_H \cos \theta_H}{n_L \cos \theta_L}, \quad (2)$$

$$\rho_P = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)_P = \frac{n_H \cos \theta_L}{n_L \cos \theta_H}, \quad (3)$$

式中: θ_L 为低折射率材料中光束的入射角; θ_H 为高折射率材料中光束的入射角。

根据 $nd \cos \theta = \frac{\lambda}{4}$ (*d* 为物理厚度, λ 为波长),得

出 $n_H \cos \theta_H = n_L \cos \theta_L$ 。代入式(2)、(3)可知,当 $n_H = n_L$ 时, g_S 和 g_P 的差值为 0,偏振效应不能完全被清除。因此调整 SiH_x 折射率或优化膜系设计,适当减少偏振,使光谱满足设计要求。使用 Essential Macleod 膜系设计软件辅助设计,设定目标 400~700 nm 波段的透过率为 0,反射率为 0, (905±30) nm 波段的透过率为 100%,对基础膜系 (0.5H L 0.5H)²⁰ 采用针插法进行优化,最终优化后的膜系结构为 Sub| 0.25L 0.08H 0.34L 0.18H 0.28L 0.37H 0.14L 0.43H 0.08L 2.58H 0.09L 1.54H 0.15L 0.83H 0.32L 0.97H 0.42L 0.86H 0.35L 0.89H 0.51L 0.98H 0.49L 0.87H 0.36L 0.95H 0.56L 0.93H 0.60L 1.02H 0.42L 0.87H 0.44L 1.03H 0.67L 0.92H 0.66L 1.05H 0.49L 0.92H 0.38L 1.08H 0.60L 0.88H 0.71L 1.06H 0.97L 0.86H 0.57L 1.16H 1.37L | Air, 共 51 层,薄膜总厚度为 2372 nm,入射角为 0°和 30°时的膜系光谱如图 3 所示。

可以看出,当入射角为 0°时,400~700 nm 波段的平均透过率为 0.09%,平均反射率为 5.97%, (905±30) nm 处的平均透过率为 93.56%;当入射角

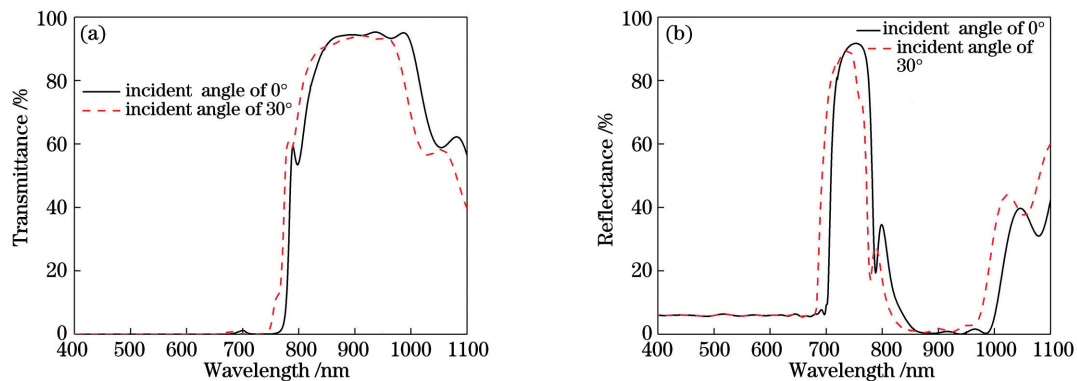


图 3 所设计膜系的光谱。(a)透过率光谱；(b)反射率光谱

Fig. 3 Spectra of designed films. (a) Transmittance spectra; (b) reflectance spectra

为 30°时,400~700 nm 波段的平均透过率为 0.09%,平均反射率为 6.65%,(905±30)nm 处的平均透过率为 93.41%。

在 Essential Macleod 中对所设计的膜系进行误

差分析,设置两种材料物理厚度的最大误差为 2%,进行 10 次误差模拟,所得结果如图 4 所示。误差分析后所得的膜系在(905±30)nm 波段的平均透过率最低为 93.37%,最高为 93.44%,符合设计需求。

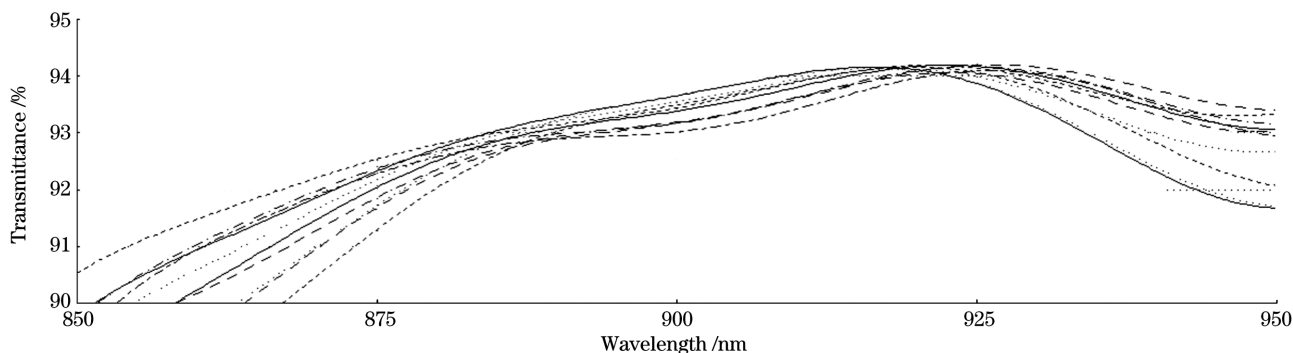


图 4 材料误差分析

Fig. 4 Material error analysis

3 实 验

3.1 滤光膜的制备

本实验使用光驰科技(上海)有限公司生产的 NSC-15 TLB 型磁控溅射机进行镀膜,该仪器配有一个制冷机(polycold)、两个等离子体源、两个机械罗茨泵、四个分子泵、一对高纯度绑定 ITO 靶(TG2)和两

对高纯度喷涂硅靶(TG3/4),靶基距离约为 55 mm。

使用美国康宁公司生产的型号为 2030 的环保型铝硅钢化玻璃作为 905 nm 滤光膜基板,尺寸为 160 mm×68 mm。所选用的高折射率材料 SiH_x 和低折射率材料 SiO₂ 的工艺参数如表 1 所示,其中 ICP×2 表示此机器配有两个等离子体源,同时对薄膜进行辅助沉积。

表 1 滤光膜工艺参数

Table 1 Process parameters for filter coating

Material	TG2		TG3/4		ICP	ICP×2			Vacuum /Pa
	TG power /kW	Flow rate of Ar / (mL·min ⁻¹)	TG power /kW	Flow rate of Ar / (mL·min ⁻¹)		Flow rate of Ar / (mL·min ⁻¹)	Flow rate of O ₂ / (mL·min ⁻¹)	Flow rate of H ₂ / (mL·min ⁻¹)	
SiO ₂	-	100	10	100	3	100	80	-	3.53×10 ⁻¹
SiH _x	-	100	10	100	3	100	-	120	3.89×10 ⁻¹

将所制备的 SiO₂ 及 SiH_x 单层膜的光谱数据导入 Optilayer 软件中进行光学常数的拟合计算,得到 SiO₂ 与 SiH_x 在 905 nm 处的折射率分别为 1.466 和 3.431。

向程序中输入制备好的 905 nm 滤光膜数据,当

真空度达到 4.0×10⁻⁴ Pa 时,打开 ICP 活化与清洁基板,持续 1 min。清洗完成后自动打开靶材电源,开始成膜。成膜结束后取出基板,使用分光光度计对 0°、15°及 30°入射角下的光谱进行测量,结果如图 5 所示。

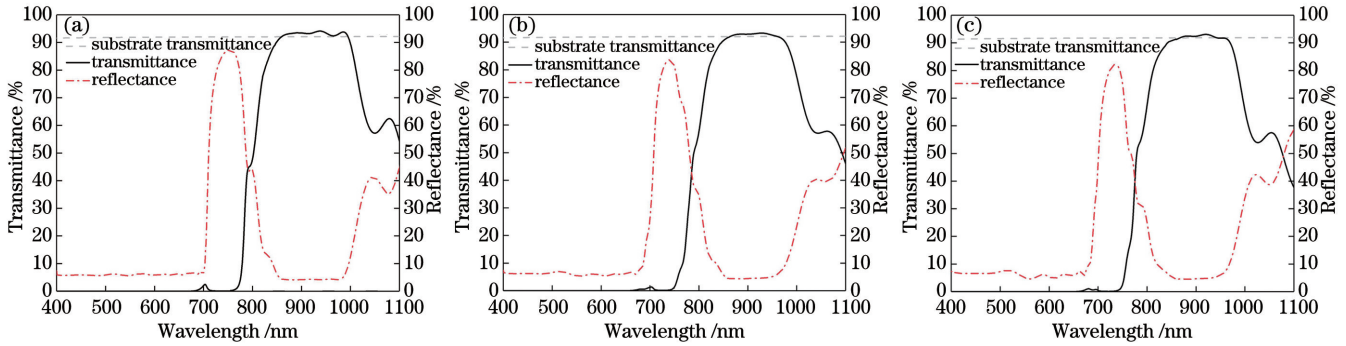


图 5 不同入射角下滤光膜的光谱。(a)0°; (b)15°; (c)30°

Fig. 5 Spectra of filter coating under different incident angles. (a) 0°; (b) 15°; (b) 30°

可以看出,当入射角为 0°时,400~700 nm 波段的平均透过率为 0.09%,平均反射率为 6.17%,(905±30)nm 处的平均透过率为 93.53%;当入射角为 15°时,400~700 nm 波段的平均透过率为 0.09%,平均反射率为 6.56%,(905±30)nm 处的平均透过率为 93.04%;当入射角为 30°时,400~700 nm 波段的平均透过率为 0.09%,平均反射率为 6.77%,(905±30)nm 处的平均透过率为 92.43%。

3.2 ITO 单层膜的制备

为了实现低温环境下除霜防雾的功能,选择在滤光膜上加镀一层 ITO 透明导电薄膜。向 In₂O₃ 掺入 Sn 后,在 ITO 的微观结构中,Sn 元素以 SnO₂ 的形式替换 In₂O₃ 晶格中的 In 元素,因为 In₂O₃ 中的 In 为三价,故 Sn 以 SnO₂ 的形式替换 In 时将贡献一个电子,同时在一定的缺氧状态下产生氧空穴。因此薄膜电导率为 10⁻⁴ Ω·cm 量级,ITO 薄膜具有导电性^[13]。对 ITO 薄膜通电即可使其加热,达到除霜防雾的效果。为了使导电效果良好,此 ITO 薄膜的方块电阻值应低于 25 Ω/square。ITO 薄膜的厚度对其方块电阻值有较大影响,厚度越厚,则方块电阻值越低,但是由于材料的吸收,增加厚度会使其透过率明显降低,影响光谱性能。

对不同厚度的 ITO 单层膜进行方块电阻值测试,结果如图 6 所示,其方块电阻值随厚度的增加而

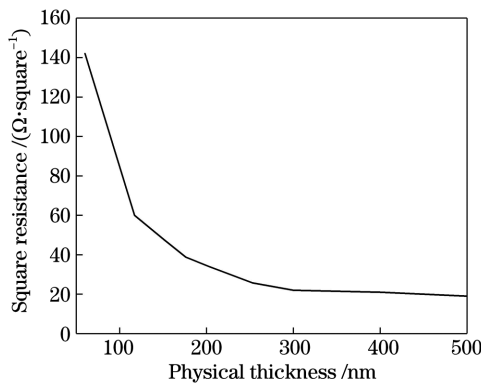


图 6 不同厚度 ITO 薄膜的方块电阻值

Fig. 6 Square resistances of ITO films with different thicknesses

降低,当厚度达到 250 nm 左右时,方块电阻值接近 25 Ω/square,当厚度大于 250 nm 时,方块电阻值的降低不明显,同时由于材料吸收,透过率显著降低,因此厚度为 250 nm 为宜。

选定 ITO 薄膜厚度为 250 nm,对 ITO 薄膜的制备工艺进行研究。在其余工艺参数不变的前提下,在 K9 玻璃基板上分别以 10,20,30,40 mL/min 的流量向 ICP 中充入氧气以制备单层 ITO,使用低阻抗分析仪,以四探针法对其方块电阻值进行测量,所得的方块电阻值随氧气流量的变化如表 2 所示。

表 2 不同氧气流量下 ITO 薄膜的方块电阻值
Table 2 Square resistances of ITO films at different oxygen flow rates

Flow rate of O ₂ / (mL · min ⁻¹)	Square resistance / (Ω · square ⁻¹)
10	19.7
20	21.5
30	24.2
40	34.8

研究发现,充入适量氧气可以抑制 ITO 材料在镀制过程中的分解。当氧气流量小于 20 mL/min 时,由于氧气过少,ITO 材料生成深色的低价氧化物,吸收率增大,透过率降低;当氧气流量大于 40 mL/min 时,材料中的金属被氧化,方块电阻值显著升高。氧气流量为 30 mL/min 时方块电阻值与透过率均满足要求。

在 ICP 中氧气流量为 30 mL/min 的前提下,通过改变靶材充入气体的流量,对溅射 ITO 的方块电阻值进行研究。向靶材中充入流量为 50,80,120,150 mL/min 的氩气,并对所制备的 ITO 单层薄膜进行方块电阻值的测量,结果如表 3 所示。

可以看出,ITO 薄膜的方块电阻值随着充入靶材的气体流量的增加先降低后升高,当充入靶材的气体流量为 120 mL/min 时,所制备的 ITO 的方块电阻值最小,故应选择此充气流量作为最优工艺参数。同时,过高的温度会使 ITO 分解并使钢氧化,从而使方块电

阻值降低,故成膜时应尽量减小 ICP 功率。最终确定的工艺参数如表 4 所示。

表 3 向靶材中充入不同流量的氩气时 ITO 的方块电阻值

Table 3 Square resistances of ITOs when argon gases with different flow rates are filled into target

Flow rate of Ar / (mL · min ⁻¹)	Square resistance / (Ω · square ⁻¹)
50	32.6
80	27.0
120	24.5
150	28.0

表 4 ITO 制备工艺参数

Table 4 ITO preparation process parameters

Material	TG2		TG3/4		ICP	ICP×2			Vacuum /Pa
	TG power /kW	Flow rate of Ar / (mL · min ⁻¹)	TG power /kW	Flow rate of Ar / (mL · min ⁻¹)		Flow rate of Ar / (mL · min ⁻¹)	Flow rate of O ₂ / (mL · min ⁻¹)	Flow rate of H ₂ / (mL · min ⁻¹)	
ITO	10	120	-	120	2	300	30	-	6.37×10 ⁻¹

此工艺参数下制备的 ITO 薄膜的光学常数如图 7 所示。

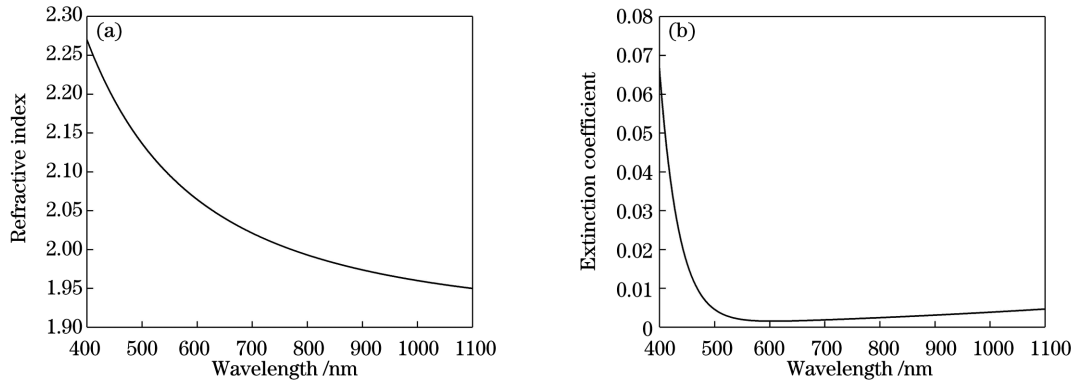


图 7 ITO 的光学常数。(a)折射率; (b)消光系数

Fig. 7 Optical constants of ITO. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

4 测试与分析

依上述工艺在滤光膜的最外层加上一层 ITO,并在制备后测得其光谱,如图 8 所示。

可以看出,在(905±30)nm 处,当入射角为 0°时平均透过率为 92.58%,当入射角为 15°时平均透过率

为 92.32%,当入射角为 30°时平均透过率为 91.9%;在可见光波段,0°、15°、30°入射角下的平均透过率均为 0.1%,满足设计要求。目标波段 ITO 的吸收率较小,最外层加镀 ITO 并未影响光谱性能。但是,测量方块电阻值后发现,薄膜的方块电阻值升高到了 29 Ω/square。这是由于制备滤光膜时 ICP 功率较高,

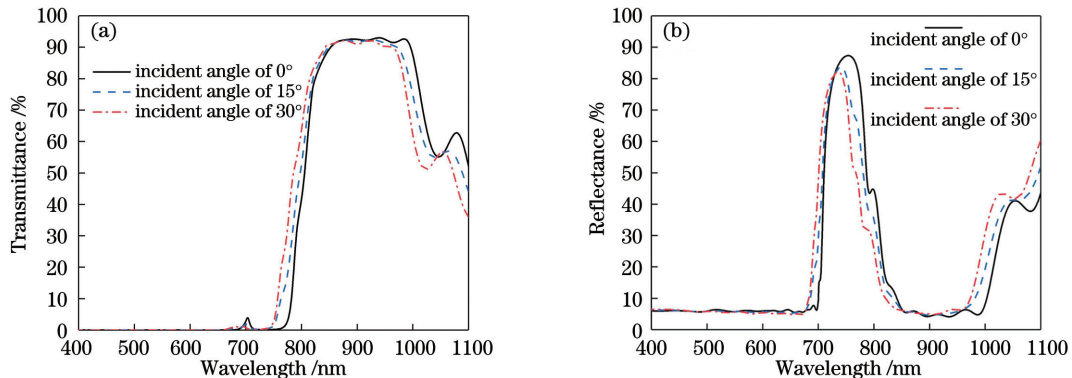


图 8 加镀 ITO 后滤光膜的光谱。(a)透过率光谱; (b)反射率光谱

Fig. 8 Spectra of filter coating after plating ITO. (a) Transmittance spectra; (b) reflectance spectra

成膜时间较长,成膜后机器内温度达到 170 °C,高温会使 ITO 分解,降低其金属性,此时继续制备 ITO 会使其方块电阻值显著升高。

为了避免高温对薄膜方块电阻值的影响,应改良薄膜制备流程。在成膜工艺参数不变的前提下,镀制滤光膜后先将基板取出,待机器冷却至 65 °C 以下后再将基板重新搬送至真空室,然后在滤光膜的最外层 SiO₂ 上加镀一层 ITO。依此流程制备的近红外导电滤光膜的最终方块电阻值为 24 Ω/square。

为了验证所制备的近红外滤光片的实用性,在 38 V 直流电压下加热薄膜 10 min 后,测量其光谱曲线,并与未充电情况下的光谱进行对比,以检测温度变化引起的光谱漂移量。结果如图 9 所示,通电加热后光谱向长波方向漂移 1 nm 左右,对实际使用无影响,滤光片具有实用性。

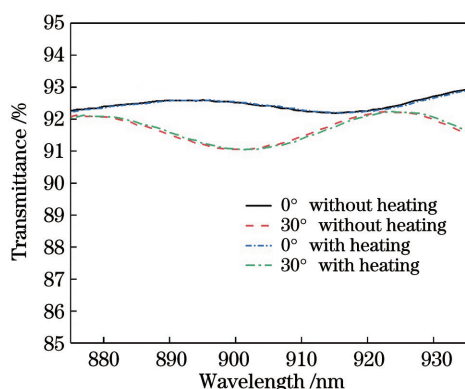


图 9 光谱漂移量测试结果

Fig. 9 Measurement results of spectral drifts

对制备好的滤光膜进行牢固度测试,将 3M 胶带粘在薄膜表面,用指肚用力压平并挤出气泡,提起胶带使其与膜面成 45°,用力快速向垂直膜面的方向拉起胶带,反复拉膜 5 次,未出现脱膜现象。将薄膜放入恒温箱中,设置温度参数为 27 ~ 71 °C,每 2 h 进行高低温循环实验,持续 24 h 后取出观察,未出现膜裂、脱膜等现象。说明该薄膜具有高牢固度、耐摩擦、耐温度冲击的特点,可应用的环境较广泛。使用百格刀与百格尺在薄膜上划出百格,并在显微镜下进行观察,结果如图 10 所示,未出现膜裂、脱膜等现象。

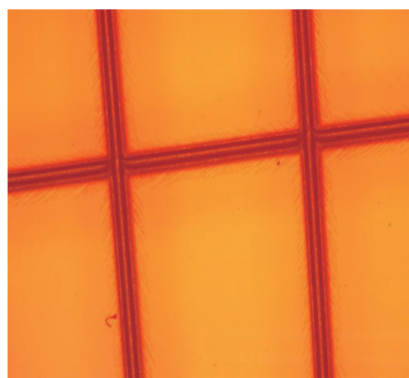


图 10 显微镜下百格结果

Fig. 10 Hundred-grid result under microscope

5 结 论

选择 SiH_x 与 SiO₂ 作为高、折射率材料,研制了一种应用于车载测距激光雷达的大角度近红外滤光膜,并在薄膜最外层加镀了一层低方块电阻值的 ITO 薄膜,以便于屏蔽电磁波干扰且在通电加热后具有除霜防雾的功能。该薄膜在 (905 ± 30) nm 波段的增透效果十分优异。使用软件 Macleod 与 Optilayer 进行设计与计算,降低了薄膜的反射率;利用 SiH_x 作为高折射率材料对可见光波段进行吸收,达到黑膜的效果。研制出的 (905 ± 30) nm 导电滤光膜在 0° 入射角下的平均透过率为 92.58%, 30° 入射角下的透过率为 91.9%, 薄膜方块电阻值达到 24 Ω/square, 适用于车载雷达的视窗,同时对增强现实/虚拟现实 (AR/VR)、人脸识别等应用场景下的黑膜制备具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 冉述. 基于计算机视觉的智能车载感知系统设计实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Ran S. Design and implementation of intelligent vehicle sensing system based on computer vision [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [2] 许永鑫. 车载单线激光雷达与通信一体化技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
Xu Y X. Research on integrated technology of vehicle single-line lidar and communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [3] 张大印. 自动驾驶车载激光雷达关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
Zhang D Y. Research on key technologies of autopilot vehicle lidar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [4] 赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.
- [5] 吴仲, 孙飞阳, 袁丰, 等. 近红外单光子激光雷达人眼安全分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 20-25.
Wu Z, Sun F Y, Yuan F, et al. Human eye safety analysis of near-infrared single photon laser radar [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 20-25.
- [6] 李伟明. 一种抗反射导电膜: CN209216605U [P]. 2019-08-06.
Li W M. Anti-reflection conductive film: CN209216605U [P]. 2019-08-06.
- [7] 潘敏忠, 陈宇光, 魏孝典, 等. 一种激光雷达复合视窗及其制备工艺: CN113281828A [P]. 2021-08-20.
Pan M Z, Chen Y G, Wei X D, et al. A composite lidar window and its preparation process: CN113281828A [P]. 2021-08-20.
- [8] 张克奇, 邱慧, 毛磊, 等. 一种安装在车载激光雷达上的视窗组件: CN113253242B [P]. 2021-10-22.
Zhang K Q, Qiu H, Mao L, et al. A window assembly installed on the vehicle lidar: CN113253242B [P]. 2021-10-22.
- [9] 刘冬梅, 岳鹏飞, 付秀华, 等. 低角度效应虹膜识别滤光片的研制[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1131002.
Liu D M, Yue P F, Fu X H, et al. Development of iris recognition filter with low-angle effect [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1131002.
- [10] 郭立强, 丁建宁, 杨继昌, 等. 氢化硅薄膜光吸收近似特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(11): 8184-8190.

- Guo L Q, Ding J N, Yang J C, et al. Photo-absorption coefficient approximation of hydrogenated silicon films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 8184-8190.
- [11] 李候俊, 徐均琪, 王建, 等. 近红外激光薄膜滤光片的研制[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0931001.
- Li H J, Xu J Q, Wang J, et al. Fabrication of near-infrared laser film filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0931001.
- [12] 李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 9 版. 新北市: 艺轩图书出版社, 2019: 443-444.
- Li Z Z. *Thin film optics and coating technology* [M]. 9th ed. New Taipei City: Yi Hsien Publishing Co., Ltd., 2019: 443-444.
- [13] 何志远, 张治国. ITO 薄膜电导率与温度关系的测量[C]//福建省第五届实验物理教学研讨会论文集. 福州: 福建省科学技术协会, 2005: 21-26.
- He Z Y, Zhang Z G. Measuring of the relationship between conductivity and temperature of ITO membrane[C]// *Proceedings of the Fifth Experimental Physics Teaching Conference in Fujian Province*. Fuzhou: Fujian Association for Science and Technology, 2005: 21-26.

Research on Conductive Filter Film for Vehicle-Mounted Lidar

Fu Xiuhua^{1,2}, Chen Xingyu^{1*}, Tan Chengqi¹, Zhu Zhongyao³, Zhang Jing¹, Zhang Gong¹,
Ren Zhongju¹, Ma Guoshui⁴

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

² Zhongshan Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China;

³ Beijing Institute of Space Mechatronics, Beijing 100049, China;

⁴ Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China

Abstract

Objective The vehicle-mounted laser radar acts as the car's eyes, transmitting radio waves to the target object, and comparing the transmitted signal to the target reflection signal to achieve the detection and ranging function of the target object. The infrared Lidar window, as the vehicle-mounted radar's outermost layer, also participates in optical imaging. People are increasingly demanding that filters filter light at a wide-angle. And because the optical window is prone to frost and fog in cold and humid weather, which affects the transmittance, the filter must also have heating and conducting functions. According to information, domestic research on Lidar window components has begun in recent years. However, current research typically cannot simultaneously increase the transmittance, increase the working angle, and reduce the square resistance of the film. Therefore, the primary research focus of the near-infrared conductive filter is the improvement of multiple indicators. In this paper, SiH_x and SiO_2 are selected as high and low refractive index materials. Adjusting the amount of hydrogen changes the optical constants of SiH_x . A 905 nm filter is designed and prepared, and the outermost layer is plated with a single layer of indium tin oxide (ITO). The square resistance of the film is reduced under the premise of spectral performance.

Methods According to the index requirements, the filter cannot produce a large shift in the spectrum at a large angle of incidence. SiH_x , which has a large absorptivity in the visible wavelength band and a small absorptivity in the near-infrared band, is selected as the high-refraction filter material and the low-refraction material SiO_2 is superimposed on each other to prepare a filter. The filter is made using radio frequency magnetron sputtering technology. First, the optical constant of SiH_x is investigated, and the gradient test on the inductively coupled plasma (ICP) hydrogen charge is performed to validate the theoretical experimental calculation results (Figs. 1 and 2). Then, using the material's optical constants, a filter that meets the requirements is designed (Fig. 3), and the error analysis of the designed film is performed (Fig. 4). Select the best sputtering process to match the refractive index of SiH_x with that of SiO_2 (Table 1), and test the spectral curve with spectrophotometers (Fig. 5). A layer of ITO transparent conductive film is plated on the filter to achieve the function of defrosting and anti-fogging in a low-temperature environment. First, perform square resistance tests on ITO single-layer films with different thicknesses (Fig. 6), and then use ITO with a thickness of 250 nm to perform gradient tests on the oxygen charge of the plasma source and the argon charge of the target material (Tables 2 and 3). Determine the best process for ITO (Table 4). First, prepare the filter as described above, then add a layer of ITO to the outermost layer after the standby device has been cooled, measure the spectrum (Fig. 8), and use a low impedance analyzer to measure the square resistance.

Results and Discussions After testing, when the incident angle of the filter is 0° , the average transmittance in the 400–700 nm band is 0.09%, the average reflectance is 6.17%, and the average transmittance at $(905 \pm 30)\text{nm}$ is 93.53%. When the incident angle is 30° , the average transmittance in the 400–700 nm band is 0.09%, the average reflectance is 6.77%, and the average transmittance at $(905 \pm 30)\text{nm}$ is 92.43%. After adding 250 nm thick ITO to the

outermost layer, the average transmittance under the incident angle of 0° at (905 ± 30) nm is 92.58%, and the average transmittance at the incident angle of 30° is 91.9%; the average transmittances at the incident angles of 0° and 30° in the visible light band are both 0.1%, which meets the design requirements, and the final square resistance of the prepared near-infrared conductive filter is $24 \Omega/\text{square}$. While the ITO film has no effect on the filter's transmittance, the square resistance of the film is significantly reduced by adjusting the process. The film is subjected to high and low-temperature cycle tests, stretched films tests, and hundred-grid tests, and there is no film peeling, cracking, etc.

Conclusions Using SiH_x and SiO_2 as the high and low refractive index materials, a large-angle near-infrared filter for automotive ranging lidar is developed, and a low square resistance ITO film is coated on the outermost layer of the film to facilitate shield electromagnetic interference and energize heating to achieve the function of defrosting and anti-fogging. The film has a very good anti-reflection effect in the (905 ± 30) nm band. To reduce the reflectivity of the film, the Macleod and Optilayer softwares are used for design and calculation. SiH_x is used as the high refractive index material to absorb the visible light wave to achieve the effect of black film. The developed (905 ± 30) nm conductive filter has an average transmittance of 92.58% at the incident angles of 0° , 91.9% at the incident angles of 30° , and a square resistance of $24 \Omega/\text{square}$. It is suitable as the window of vehicle radar and has important reference significance for the black film required by augmented reality/virtual reality, face recognition, etc.

Key words thin films; optical film ; indium tin oxide; square resistance; magnetron sputtering