

大角度宽光谱红外成像系统灰度调节膜的研制

付秀华 熊仕富* 刘冬梅 张 静 张于帅

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 随着现代光学测试技术的不断发展,对图像处理技术的要求越来越高。灰度级层次蕴含了图像细节的重要信息,因此改变图像灰度级可以使图像的细节更清晰。通过滤光技术可以形成不同的灰度级。依据光学薄膜理论,并结合膜系设计软件,通过建立膜系优化评价函数,实现了 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 入射 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 滤光膜的设计,并采用真空沉积技术研制了灰度调节膜。通过在钼舟上方放置铜网,解决了由于 SiO 沉积速率不稳定产生的膜层表面缺陷的问题;采用逆向分析法对实验测试结果进行模拟,通过调整膜层监控方式,使膜系的敏感层厚度得以精准控制,降低了膜厚控制误差,从而平滑了光谱曲线。经过测试,制备的灰度调节膜满足红外成像系统灰度级调节的要求,并通过了相关环境测试。

关键词 薄膜; 红外成像; 灰度级; 调节膜; 逆向分析

中图分类号 O484 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0531001

Study and Fabrication of Wide Angle and Broad Spectrum Gray Adjustment Film in Infrared Imaging System

Fu Xiuhua Xiong Shifu Liu Dongmei Zhang Jing Zhang Yushuai

Department of Optics and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Jilin, Changchun 130022, China

Abstract With the continuous development of modern optical testing technology, the requirement of image process technology is increasing. As the gray-scale level contains important information of image, changing gray levels of the image can make the image detail more clear. Using filter technology can form different gray levels. Based on the optical thin film theory and combined with thin film design software, the design of a $3\sim 5\ \mu\text{m}$ thick filter film with incident angle of $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ is achieved by establishing film optimization evaluation function. And using vacuum deposition technology, the gray adjustment film is fabricated. Adding copper mesh over the molybdenum boat can solve the problem of surface defects caused by the unstable deposition rate of SiO . The experimental results are simulated using reverse analysis method. The sensitive layer thickness of film system can be controlled by adjusting the film monitoring method. The controlled deviation of film thickness is reduced. So that the spectral curve is smoothed. After tests, the prepared film meets the requirement of gray adjustment in the infrared image system, and passes the relevant environmental tests.

Key words thin films; infrared imaging; grays level; adjustment film; reverse analysis

OCIS codes 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310

1 引 言

近年来随着红外技术的飞速发展,红外技术的应用范围也越来越广泛^[1-3],如航天、航空、探测、遥感等领域。中波红外 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 是重要的大气窗口之一,此波段的光学系统成像也成为研究热点。随着技术发展,人们对像质要求不断增加,对元器件的技术要求也逐渐提高。灰度调节器作为红外成像系统中的关键部件,是影响系统成像质量的主要因素^[4-6]。根据该系统的技术要求,需要研制在 $0\sim 60^{\circ}$ 入射角时, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段

收稿日期: 2015-12-08; 收到修改稿日期: 2016-01-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203002GX)

作者简介: 付秀华(1963—),女,博士,教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: goptics@126.com

* 通信联系人。E-mail: xsf_optics@126.com

范围内透射与反射分光比(T/R)为 2/98、4/96、8/92、16/84、32/68、64/36 系列且容差小于 $\pm 1\%$ 调节膜。

根据所查资料,早在 1970 年 Costich^[7]用对称周期膜系的方法设计出了单波长全介质消偏振膜系;E A Nesmelov 等^[8]设计并制作了 $0.2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的金属宽带分束镜;E N Kotlikov 等^[9]设计了 KBr 基底 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 透射与反射比为 50/50 的宽带分束镜。在国内,2011 年中国科学院的罗海瀚等^[10]研究了锗(Ge)光学薄膜在不同沉积温度下的聚集密度;2011 年江南大学的阙立志^[11]在 ZnSe 基底上研制了 45° 入射角 $3\sim 13\ \mu\text{m}$ 平均透射率、反射率比约为 50/50 的平板分束镜;2013 年武汉东湖学院的高晓丹^[12]完成了变角度 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外消偏振增透膜的设计。但对于如此广角度($0^\circ\sim 60^\circ$)宽波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$)范围内的调节膜,国内外还未见相关报道。

本文所研究的调节膜,需在给定角度和波段范围内具有恒定的分光比,且分光容差小,这些都给膜系的设计和制备带来了很大的困难。该膜系采用一般的设计方法很难实现,并且对薄膜的制备工艺提出了更高的要求,特别是材料光学常数的确定和膜层厚度的精确控制。

2 材料选取

根据红外成像系统的技术要求,调节器件的光路示意图如图 1 所示,具体技术参数见表 1。

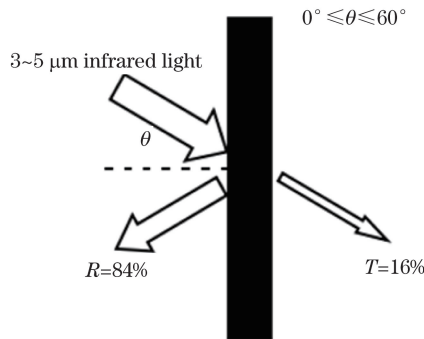


图 1 调节器件的光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of adjustment device

表 1 灰度调节膜设计参数

Table 1 Design parameters of grayscale adjustment film

Parameter	Specification
Substrate	Si
Spectrum range / μm	$3\sim 5$
Incident angle / $(^\circ)$	$0\sim 60$
T/R	16/84
Tolerance /%	± 1

依据参数要求,选取透明区在中红外波段的膜料,并考虑其折射率、膜层间的应力匹配、成膜后的机械性能及化学稳定性等因素^[13-14]。可选择的低折射率材料有以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO 为代表的氧化物和以 YbF_3 、 YF_3 为代表的氟化物。考虑到材料的折射率以及与单晶硅(Si)基底的应力匹配,选择 SiO 作为设计调节膜的低折射率材料。对于高折射率材料的选取, Si 、 ZnS 、 Ge 等都是中红外波段常用的材料。从理论设计的角度考虑,增加高、低折射率的比值有利于降低膜系的层数和总厚度,并综合考虑光谱稳定性、膜层的机械性能,最终选择 Ge 作为高折射率材料。

根据所查资料可知, Ge 膜的折射率会随着基片的温度升高而增大,而且薄膜的晶粒也会增大,导致表面粗糙度变差,从而增加表面散射,表现为薄膜的吸收增强。 SiO 材料的折射率随温度的升高略微有所下降,而消光系数随着基底温度的升高基本没有变化,总体而言, SiO 材料的光学常数对基底温度变化不敏感^[15]。根据实验室薄膜材料工艺数据库,最终选定实验基片温度参数为 $200\ ^\circ\text{C}$ 。图 2 和图 3 分别为实验所测得的高、低折射率材料的光学常数。

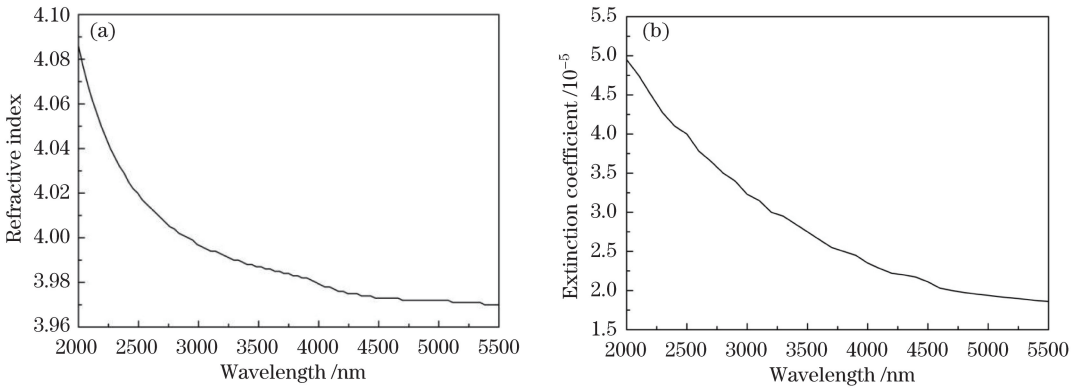


图 2 Ge 材料光学常数。(a) 折射率；(b) 消光系数

Fig. 2 Optical constant of Ge material. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

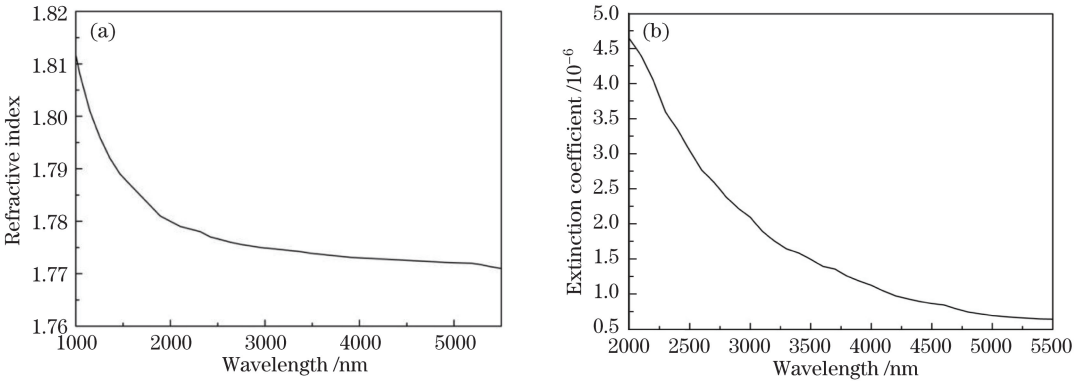


图 3 SiO 材料光学常数。(a) 折射率；(b) 消光系数

Fig. 3 Optical constant of SiO material. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

3 膜系理论设计

依据光学薄膜理论^[16], 对于多层膜, 当膜层数为 k ($k=1, 2, 3, \dots$) 时, 膜系与基底组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left(\prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & i \sin\delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, 第 j 层膜的位相厚度为

$$\sigma_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos\theta_j. \quad (2)$$

膜系与基底的组合导纳为

$$Y = \frac{C}{B}, \quad (3)$$

膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^*, \quad (4)$$

透射率为

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_s}{B^2 (\eta_0 + Y)(\eta_0 + Y)^*}. \quad (5)$$

依据上述理论可以计算分光膜的光谱透射率, 基于此原理, 并在其基础上演化, 可设计一定波段范围内的分光膜。

3.1 分光膜的设计

灰度调节膜采用 $\text{Sub} | (\text{HL})^s | \text{Air}$ 作为基础膜系, 其中 H 代表高折射率材料 Ge, L 代表低折射率材料 SiO, s 表示周期数, Sub 表示单晶硅 (Si) 基片, Air 表示空气。对于选定的两种材料, 其反射带宽为^[17]

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}, \quad (6)$$

式中 Δg , n_H 和 n_L 分别为相对波数和高、低折射率材料的折射率。当光线倾斜入射时, P 偏振光和 S 偏振光的有效光学导纳分别为

$$\eta = \begin{cases} n \cdot \cos\theta & (\text{S-polarization}) \\ n/\cos\theta & (\text{P-polarization}) \end{cases} \quad (7)$$

对于大角度宽波段分光膜而言, 采用常规的评价函数很难设计出容差小于 $\pm 1\%$ 的分光膜, 因而考虑引入新的评价函数。即在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、角度 $\theta_1 \sim \theta_2$ 范围内, j 层膜的能量透射率 $T_j(\lambda, \theta)$ 与给定理想能量透射率 $T_0(\lambda, \theta)$ 的差值为最小时, 每层膜的光学厚度为理想厚度, 将评价函数定义为

$$f = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_j(\lambda, \theta) |T_j(\lambda, \theta) - T_0(\lambda, \theta)| d\lambda d\theta, \quad (8)$$

式中 $\omega_j(\lambda, \theta)$ 为权重因子, 取决于光源能量分布及受光器分光灵敏度等, $T_j(\lambda, \theta)$ 为 j 层膜振幅透射率, $T_0(\lambda, \theta)$ 为目标振幅透射率函数。例如: 在无吸收多层介质膜的情况下, 当 $T_0(\lambda, \theta) = 0.5$ 时, 即在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、角度 $\theta_1 \sim \theta_2$ 范围内寻求一个中性分光膜。在波长 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、角度 $0 \sim 60^\circ$ 范围内 $T_0(\lambda, \theta) = 0.16$, 且有 $\omega_j(\lambda, \theta) \equiv C$ (常数)。

将(7)式导入 Matlab 软件的遗传算法工具箱中, 将膜系的膜层数 9 设置为变量的个数, 每层的几何厚度均限定在 $30 \sim 1000 \text{ nm}$, 使程序根据目标值自动优化。对膜系进行计算后, 得到评价函数极小值为 0.2351, 优化后的膜系为: Sub|0.1882L 0.7428H 0.5830L 0.4678H 1.1179L 0.9355H 1.1957L 1.2409H 0.6943L|Air, 其理论设计光谱曲线如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 0° 入射时, 平均透射率 $\bar{T} = 15.96\%$; 30° 入射时, 平均透射率 $\bar{T} = 15.94\%$; 45° 入射时, 平均透射率 $\bar{T} = 16.15\%$; 60° 入射时, 平均透射率 $\bar{T} = 16.08\%$ 。从图 5 的三维图中可直观看到, 在新评价函数得到的膜系在大角度宽波段范围内均满足设计要求, 容差小于 $\pm 1\%$, 且光谱曲线的平滑度良好。

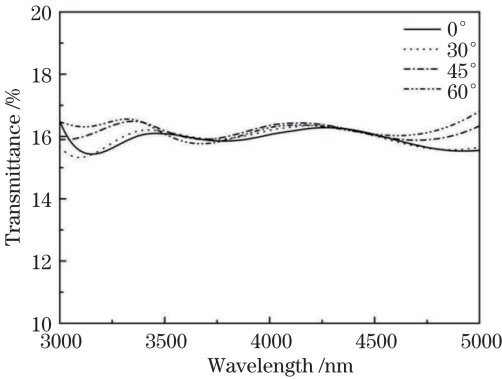


图 4 分光膜理论设计曲线

Fig. 4 Theoretical design curves of beam splitter

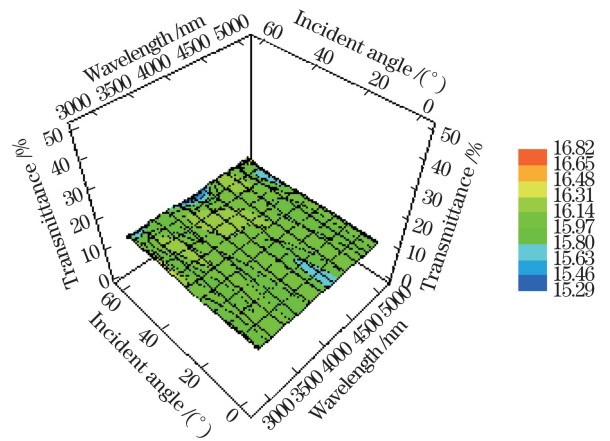


图 5 分光膜理论设计曲线(三维图)

Fig. 5 Theoretical design curves of beam splitter (3D graph)

3.2 减反膜的设计

为了消除背面高级次干涉光对系统成像的影响, 需要在背面镀制相应波段的减反膜。应用双有效界面法并结合 Macloed 膜系设计软件, 优化得到减反膜系 Sub|1.6263L 2.1536H 8.1946L|Air, 其理论设计曲线如图 6 所示, 0° 入射时, 平均透射率为 $\bar{T} = 98.4\%$, 60° 入射时, 平均透射率 $\bar{T} = 91.9\%$ 。

3.3 双面设计

根据以上的设计, 将前、后表面膜系导入 Macloed 中, 该灰度调节膜的理论透射光谱如图 7 和图 8 所示。

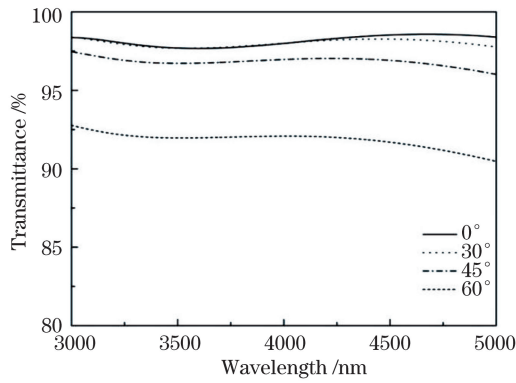


图 6 减反膜理论设计曲线

Fig. 6 Theoretical curves of anti-reflection film

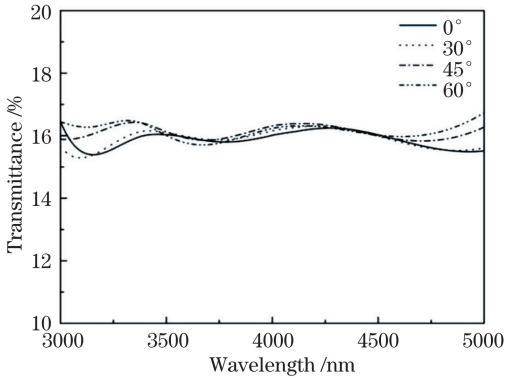


图 7 调节膜理论透射光谱曲线

Fig. 7 Theoretical transmittance curves of adjustment film

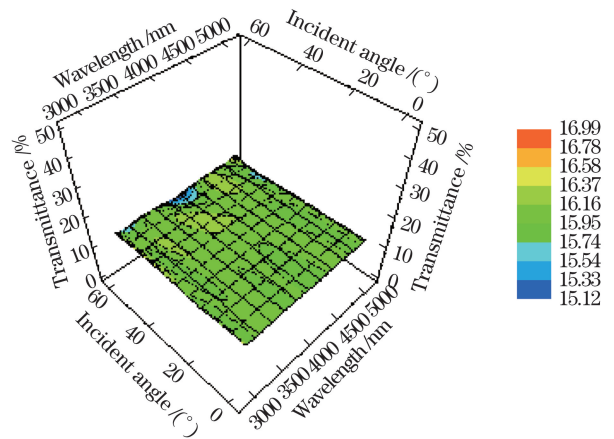


图 8 调节膜理论透射光谱曲线(三维图)

Fig. 8 Theoretical transmittance curves of adjustment film (3D graph)

4 薄膜制备

该实验是在 TXX700-II 型真空箱式镀膜机上完成的,该设备配有两个“e 型”电子枪、阻蒸、考夫曼离子源、双晶控探头以及 IC/5 膜厚控制仪。实际镀制工艺参数如表 2 所示。

表 2 工艺参数表

Table 2 Technological parameters

Material	Deposition rate / (nm/s)	Substrate temperature / °C	Size of tooling / %
Ge	0.25	200	92.5
SiO	0.5		83.6

在镀制前,需清洁真空室,更换晶控片,添加相应膜料。基片用无水乙醇和无水乙醚按 3:1 体积比混合的溶液清洗后,放在工件架上以适当的转速开始抽真空。当真空度达到 2.5×10^{-3} Pa 时打开考夫曼离子源轰击基片 20 min,离子源参数如表 3 所示,表中 sccm 为标况下毫升每分钟。镀制完成后,在真空室进行真空退火,由 200 °C 降温至 80 °C。

5 测试结果及分析

5.1 显微检测

在扫描电子显微镜(SEM)下观察制备的样品,如图 9 所示,薄膜表面有很多凹凸缺陷。

表 3 考夫曼离子源的参数

Table 3 Parameters of Kaufmann ion source

Parameter	Value
Argon flow /sccm	12
Plate voltage /V	415
Acceleration /V	275
Anode voltage /V	50
Neutralizing current /A	13.5
Cathodic current /A	14
Ion beam current /mA	50

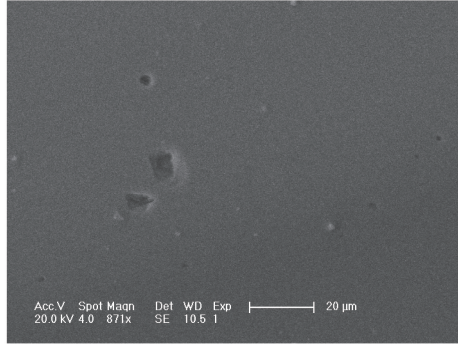


图 9 实验样品 SEM 照片

Fig. 9 SEM photograph of experimental sample

通过对膜层微观结构的分析,导致膜层的这种缺陷的原因主要有:1)在使用电阻蒸发 SiO 材料时,膜料受热不均发生喷溅导致膜层表面有凹凸缺陷;2)膜料受热不均导致蒸发速率不稳,在沉积过程中膜层表面也会形成凹凸缺陷。为了解决该问题,在钼舟的上方放一个间隔为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的铜网,该铜网能够有效阻隔发生喷溅的膜料,减少膜料沉积过程中形成的膜层缺陷。再次实验,用 SEM 观察实验样片,如图 10 所示。薄膜表面的缺陷明显减少,表面质量得到很大程度的改善。

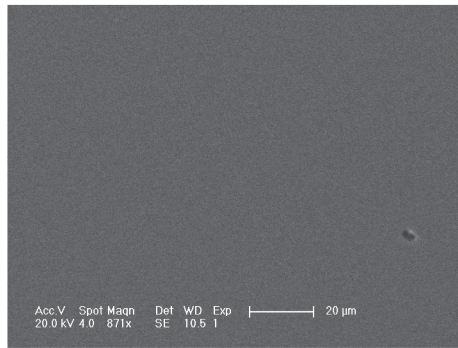


图 10 加铜丝网后实验样品 SEM 照片

Fig. 10 SEM photograph of experimental sample after adding copper mesh

5.2 光谱测试

采用 Varian660-IR 傅里叶红外光谱仪对实验样品进行测试,结果如图 11 和图 12 所示。由图 11 可以看到, 0° 入射时,单面减反膜的平均透射率为 $\bar{T} = 69.3\%$,与理论设计相符,满足要求。

对分光膜进行测试,曲线如图 12 所示。分光膜测试曲线与理论设计存在较大的差异,经分析,光谱曲线的变化主要是由膜厚监控误差造成的。采用 TFCalc 软件对测试曲线进行逆向反演,并对各层膜的敏感度进行分析,如图 13 所示。

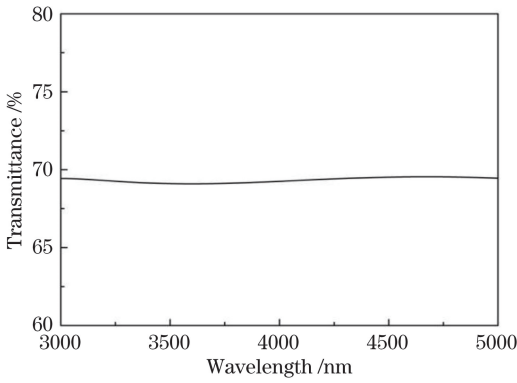


图 11 减反膜光谱测试曲线图

Fig. 11 Test spectra graph of anti-reflection film

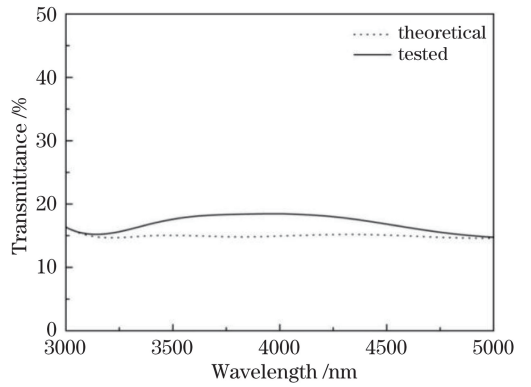


图 12 分光膜光谱测试曲线图

Fig. 12 Test spectra graph of beam splitter

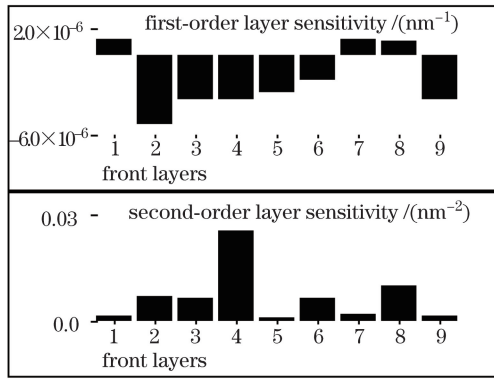


图 13 分光膜的膜层敏感度

Fig. 13 Layer sensitivity of beam splitter

从膜层敏感度分布图可以看出,第 4 层和第 8 层的敏感度较高,对膜系的影响较大。通过逆向反演发现光谱曲线的变化主要是由第 4 层和第 8 层厚度监控误差大导致的。整个实验过程中采用石英晶体监控,该监控方式是通过监测 AT 切割的石英晶体的振动频率的变化量来测量膜层厚度的^[18],其工作原理为

$$\Delta f = -\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N} \Delta d_M, \quad (9)$$

式中 Δf 为晶体振动频率变化量, ρ_M 为膜层密度, ρ_Q 为石英密度, f 为石英晶体基频, N 为取决于石英晶体的几何尺寸和切割类型的频率常数, Δd_M 为膜层厚度改变量。在材料给定的情况下, ρ_M 是已知的, $-\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N}$ 一般为常数,其中“ $-$ ”号表示频率随着厚度的增加而减少。从(9)式可知,由于膜层厚度的增加,石英晶体的振动频率不断下降,其探测灵敏度就相应降低,产生细微误差,该误差对于不敏感膜层的影响并不明显,但对于敏感度较高的膜层,微小的厚度误差也会影响光谱特性。通过多次理论分析与实验验证,发现准确控制第 4 层和第 8 层可以明显改善平滑分光曲线。因而对沉积工艺进行改进,将第 4 层和第 8 层用 2[#] 晶控探头单独监控,其晶控 tooling 值为 92.7%,制备的调节膜测试光谱曲线如图 14 所示,0°时 3~5 μm 的平均透射率为 15.92%,平均反射率为 84.06%,60°时平均透射率为 16.09%,平均反射率为 83.89%,与理论设计结果相吻合,满足设计要求。

其他 T/R 比值的灰度级调节膜的膜系按照上述工艺进行制备,可获得与理论设计吻合较好的光谱曲线。

其他 T/R 比值的灰度级调节膜的膜系按照上述工艺进行制备,可获得与理论设计吻合较好的光谱曲线。

5.3 环境测试

为保证调节膜性能的可靠性,对样片进行环境测试,结果如下:

1) 机械牢固度测试:将黏性强度大于 3 N/cm 的 3 M 胶带粘在膜层表面,确保胶带平整无气泡,沿薄膜

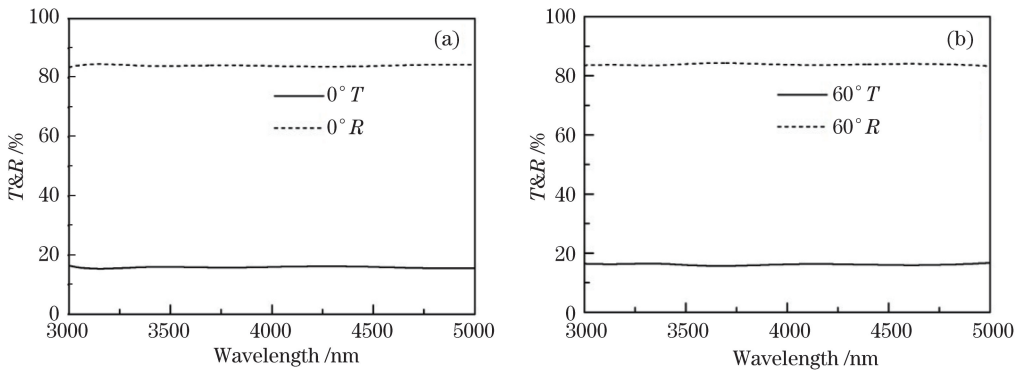


图 14 调节膜测试曲线

Fig. 14 Test curves of adjustment film

表面垂直方向迅速拉起,重复操作 20 次,薄膜表面未产生脱膜现象。

2) 耐摩擦性实验:用施加 10 N 力的钢丝绒在薄膜表面来回摩擦 20 次,擦净后观察,薄膜表面没有明显的擦痕。

3) 湿热测试:样片在 60 °C,相对湿度 95%的湿热箱中存放 24 h,膜层无明显变化。

经环境测试后,样品透射光谱曲线没有明显的漂移和升降,说明制备的调节膜具有良好的环境稳定性,满足使用要求。

6 结 论

依据光学薄膜设计理论和技术参数要求,建立了膜系优化设计评价函数,并结合膜系设计及 Matlab 软件,实现了该灰度调节膜的设计。通过附加铜网解决了 SiO 材料蒸发速率不稳定导致膜层表面缺陷多的问题。根据测试的光谱透射率曲线和膜层厚度敏感度分布情况进行逆向反演模拟,得到误差产生的原因,进而调整制备参数,精确控制灵敏度较高的膜层,最终研制出满足红外成像系统中的广角度宽波段的一系列调节膜,经过光谱和环境测试,调节膜性能稳定,可靠性好。随着现代光学测试技术的快速发展,对图像信息的灰度级要求会越来越高,如何进一步展宽分光波段,获得更精确的分光效率,将是今后研究努力的方向。

参 考 文 献

- Chen Chaoping, Shi Jiantao, Guo Rui, *et al.*. Design and preparation of mid-infrared bandpass filter [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 595-598.
陈朝平, 师建涛, 郭 芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备 [J]. 应用光学, 2012, 33(3): 595-598.
- Zhang Baisen, Chen Tao, Xiong Yuqing, *et al.*. Design and preparation of medium-wave infrared short-wavelength pass filter [J]. Vacuum & Cryogenics, 2010, 16(3): 148-152.
张佰森, 陈 焘, 熊玉卿, 等. 中波红外短波通滤光片的设计与镀膜技术研究 [J]. 真空与低温, 2010, 16(3): 148-152.
- Zhang Long, Chen Lei, Fan Youyu, *et al.*. Development of mid-infrared transmitting glasses window and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900134.
张 龙, 陈 雷, 范有余, 等. 中红外玻璃材料发展及前沿应用 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900134.
- Wang Bo, Wu Xinjian. Infrared image gray level transformation system based on Nios II [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(2): 45-47.
王 波, 吴新建. 基于 Nios II 的红外图像灰度变换系统设计 [J]. 光学与光电技术, 2007, 5(2): 45-47.
- Liu Xiufeng, Wang Xingdong, Pei Yun, *et al.*. Lighting system based on image gray value adaptive control [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 38(2): 269-273.
刘秀峰, 王兴东, 裴 云, 等. 基于图像灰度自适应控制的光源系统 [J]. 电子器件, 2015, 38(2): 269-273.
- Li Na. Digital image enhancement by gray-scale transformation method [J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 2009, 3(18): 36-39.
李 娜. 利用灰度变换法增强数字图像 [J]. 北京工业职业技术学院学报, 2009, 3(18): 36-39.
- Costich V R. Reduction of polarization effects in interference coating [J]. Appl Opt, 1970, 9(4): 866-870.

- 8 I S Gainutdinov, E A Nesselov, R D Aliakberov. Quality criterion for determining the optimum parameters of broadband spectral splitters[J]. Journal of Optical Technology, 2003, 70(5): 373-376.
- 9 E N Kotlikov, V N Prokashchev, E V Khonineva, *et al.*. Synthesizing beamsplitter coatings[J]. Journal of Optical Technology, 2001, 68(8): 580-583.
- 10 Luo Haihan, Liu Dingquan, Yin Xin, *et al.*. Packing density of germanium thin films at different deposited temperature[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(12): 90-93.
罗海瀚, 刘定权, 尹欣, 等. 锗(Ge)光学薄膜在不同沉积温度下的聚集密度研究[J]. 光电工程, 2011, 38(12): 90-93.
- 11 Que Lizhi. Study of a 3 μm to 13 μm wideband infrared beamsplitter[J]. Infrared Technology, 2011, 33(12): 695-698.
阙立志. 3~13 μm 宽带红外分束镜研究[J]. 红外技术, 2011, 33(12): 695-698.
- 12 Gao Xiaodan. Design of infrared non-polarizing anti-reflective film of 3~5 μm at variable incidence angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 033101.
高晓丹. 变角度 3~5 μm 红外消偏振增透膜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 033101.
- 13 Fu Xiuhua, Xiong Shifu, Liu Dongmei, *et al.*. Study and fabricate of TV goniometry optics composite film[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1131003.
付秀华, 熊仕富, 刘冬梅, 等. 电视测角仪光学系统复合薄膜的研制[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1131003.
- 14 Liu Huasong, Ji Yiqin, Zhang Feng, *et al.*. Dispersive properties of optical constants of some metallic oxide thin films in the mid-infrared regions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831003.
刘华松, 季一勤, 张锋, 等. 金属氧化物薄膜在中波红外光谱区内光学常数色散特性[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831003.
- 15 Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan, *et al.*. Study on optical properties of two thin film materials in medium-wave infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 177-180.
段微波, 刘定权, 张凤山, 等. 两种中波红外薄膜材料的光学特性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(s1): 177-180.
- 16 Fu Xiuhua, Zhang Yushuai, Kou Yang, *et al.*. Study and fabrication of multi-channel filter film in free-space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0407001.
付秀华, 张于帅, 寇洋, 等. 自由空间激光通信系统中多通道滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0407001.
- 17 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 118-123.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 118-123.
- 18 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.*. Research of ultraviolet filter film in solar blind communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0731001.
付秀华, 寇洋, 刘冬梅, 等. 紫外日盲通信系统中滤光膜的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0731001.