

GREGOR 望远系统高透射深截止多腔负滤光片研制

常艳贺^{1*}, 付秀华^{1,2}, 张功¹, 张静¹, 李春³, Shigeng Song⁴¹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 528437;³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;⁴英国西苏格兰大学计算工程与物理学院薄膜、传感器与图像研究所, 佩斯利 PA1 2BE, 英国

摘要 为满足 GREGOR 望远系统末端的测试需求, 实现对某些荧光光谱干扰信号的有效过滤和屏蔽, 在可见光范围内设计并制备了一种高透射深截止多腔负滤光片。采用变迹函数不同级次的高阶迭代算法, 通过设计厚度调制层来有效抑制通带波纹; 在 B270 基底上采用离子束辅助反应磁控溅射的沉积方法进行制备, 使用光控法和时间控制法相结合的方案对非四分之一膜层厚度进行监控。实验结果表明, 实际制备结果与理论设计吻合较好, 制备工艺可行性较高。所设计的多腔负滤光片膜系结构总层数为 190 层, 总厚度约为 20 μm , 测得各通带透射率均大于 90%, 截止深度大于 0.1%, 反射带半峰全宽小于 24 nm, 最大位置偏差为 2 nm, 样品的均匀性良好, 测试结果完全满足实际应用需求。

关键词 薄膜; 多腔负滤光片; 反应磁控溅射; Nb_2O_5 ; SiO_2

中图分类号 O484 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221090

1 引言

在天文观测和遥感过程中, 太阳望远镜可以高精度测量太阳辐射、磁场分布、气体运动以及恒星光谱等。GREGOR 望远系统是一个主镜直径为 1.5 m 的太阳望远镜, 该望远镜可以观测太阳上分辨率为 70 km 的光球层和色球层的磁场、气体运动以及高分辨率的恒星光谱等。GREGOR 望远系统主要由成像系统、图像旋转系统、自适应光学系统、波前传感器(WFS)和红外光谱仪等部分构成^[1]。在系统末端, 测试设备(波前传感器和红外光谱仪)与分光系统联用。分光系统由两个光学元件胶合而成, 在不同的面上镀有相应的光学薄膜, 使其具有特定的光学性能。波前传感器工作波长为 490 nm, 最小光谱带宽为 10~15 nm。光线入射红外光谱仪之前, 为了实现某些干扰信号(荧光光谱)的深度截止及有效过滤和屏蔽并提高系统信噪比, 需要对 560 nm 和 645 nm 波段的荧光光谱进行去除, 最小光谱带宽为 20~24 nm, 且在反射带的两侧连接两个高透射带, 元件在指定波段附近具有较高透射率。满足这些要求的光学元件称为负滤光片(notch filter), 其功能与窄带滤光片刚好相反^[2-4], 有一个反射带的称为单腔负滤光片, 有两个或两个以上反射带的称为多腔负滤光片。随着系统复杂性的提高, 单腔负滤光片

的应用受限, 迫切需要设计和制备出多腔负滤光片以满足测试设备需求。

鉴于负滤光片的重要作用, 科研人员开展了有针对性的研究工作。2006 年, Leitel 等^[5]以 Nb_2O_5 和 SiO_2 为高、低折射率材料, 采用梯度折射率膜层和褶皱滤光片结构, 制备了单腔负滤光片, 透射电镜结果表明负滤光片膜层质量较好。2013 年, Zhang 等^[6]以 Ta_2O_5 和 SiO_2 为高、低折射率材料, 提出了一种约束优化方法, 设计了超陡单腔负滤光片, 在衬底附近增加了一些厚度约束的薄层以抑制通带的波纹, 通带波纹控制较好。随后 Zhang 等^[7]又提出一种退变层和匹配层方法, 再次有效抑制通带波纹, 使单腔负滤光片性能得到提升。2014 年, Lyngnes 等^[8]提出了另一种退变层设计方法, 主要是将离散层与带通波纹结合, 通过建立优化的评价函数, 对膜层结构进行了设计, 得到了满足光谱性能要求的单腔和多腔负滤光片。2020 年, Kumar 等^[9]以 Al_2O_3 和 SiO_2 为高、低折射率材料, 设计了一种 0° 入射和 45° 入射的 44 层负滤光片, 在反射带两侧采用阻尼最小二乘法优化透射带波纹, 取得了良好效果, 但是没有解决好膜层残余应力的问题, 膜层有皴裂现象。

根据太阳望远系统测试设备的使用需求, 本文从实际应用角度出发, 结合分析的光谱特性参数, 设计并制备了一个高透射深截止的多腔负滤光片。

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-08-12; 录用日期: 2022-08-26; 网络首发日期: 2022-09-05

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(111计划 D21009)

通信作者: *changyh@cust.edu.cn

2 材料选择与光学常数计算

在薄膜材料的选取中, SiO₂ 是一种常用的稳定性高的低折射率材料, 它在紫外、可见和近红外区都有较宽的透明区, 具有损伤阈值高、耐腐蚀、吸收小等特点, 折射率约为 1.46, 所以选择 SiO₂ 作为低折射率材料; Nb₂O₅ 作为高折射率材料, 光学性能稳定, 与 TiO₂ 和 Ta₂O₅ 等高折射率材料相比不容易吸收, 折射率约为 2.35, 薄膜表现为非晶态, 与 SiO₂ 作为高、低折射率的搭配, 容易制备出低损耗的光学薄膜, 因此选择 Nb₂O₅ 为高折射率材料。

为了设计和制备满足要求的多腔负滤光片, 必

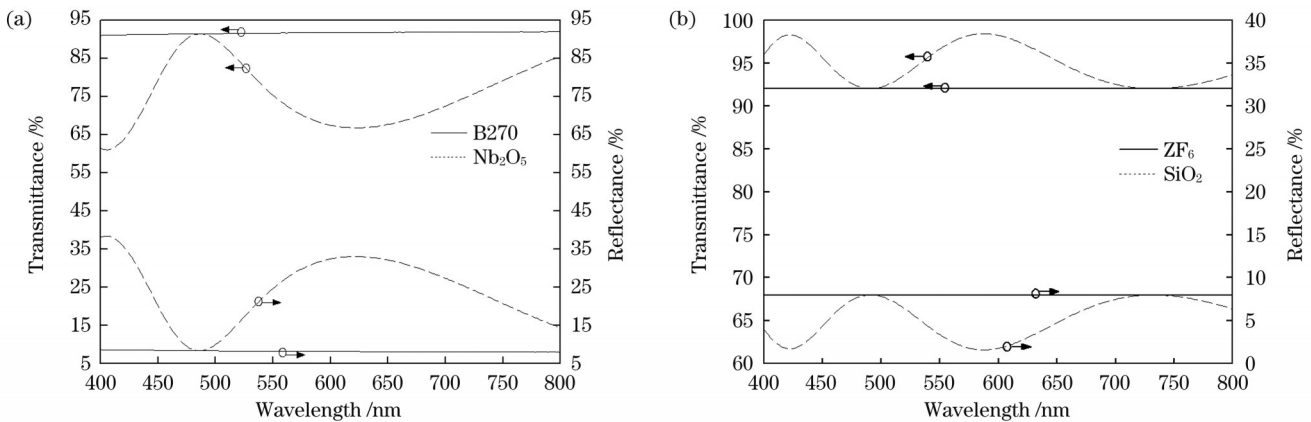


图 1 薄膜在不同基底上的测量光谱曲线。(a) Nb₂O₅ 薄膜; (b) SiO₂ 薄膜

Fig. 1 Measured spectral curves of thin films coated on different substrates. (a) Nb₂O₅ thin film; (b) SiO₂ thin films

可以看出, 两种薄膜材料的光学损耗很小, 该波长处衬底的光谱曲线峰值与薄膜透射光谱的峰值相等, 说明通过优化溅射速率和气体流量等工艺参数, 离子

须准确获取所用薄膜材料在相应波段范围内的光学常数(折射率 n 和消光系数 k)。材料的光学常数在薄膜状态下和块状状态下的差别很大, 并强烈依赖于所采用的沉积方法和工艺参数, 因此需要在具体的实验条件下, 制备单层薄膜进行光学常数的精确求解。薄膜的光学常数利用光度法解析^[10], 在成都光明玻璃有限责任公司生产的厚度为 1.5 mm、直径为 25.4 mm 的双面抛光 B270 和 ZF₆ 基底上, 采用离子束辅助反应磁控溅射方法分别沉积了 200 nm 厚的 Nb₂O₅ 和 500 nm 厚的 SiO₂ 单层薄膜, 利用分光光度计测量了单层薄膜样品的透射率和反射率光谱, 如图 1 所示。

束辅助反应磁控溅射方法沉积的单层膜质量较好, 获得了良好的光谱特性, 优化的工艺参数范围如表 1 所示。

表 1 优化的工艺参数

Table 1 Optimal processing parameters

Parameter	Evaporator source 1	Evaporator source 2
Material	Nb	Si
Argon flow	30.0 cm ³ /min	30.0 cm ³ /min
Oxygen flow	35.0–50.0 cm ³ /min	10.0–15.0 cm ³ /min
Ion source power	4500 W	4500 W

根据测试得到的单层膜在基底上的光谱曲线, 给出一组初始值, 代入合适的色散关系模型, 计算各个波长处的透射率和反射率, 同时逐点拟合反射光谱和透射光谱, 使其快速收敛至设定的评价函数, 反演计算使光谱曲线的理论值与测量值之差最小, 得到薄膜在 400~800 nm 范围内折射率 n 和消光系数 k 的色散曲线, 如图 2 所示。

3 多腔负滤光片膜系设计

膜系设计不但与薄膜材料和膜系结构有关, 其难

易程度还与给定的技术指标密切相关。GREGOR 望远系统的光学结构示意图如图 3 所示, 需要在 B 面镀制光谱特性参数如表 2 所示的多腔负滤光片。

多腔负滤光片的结构不是单腔负滤光片的简单叠加, 但设计过程中初始膜系的正确选择可以为整体设计带来极大便利。单腔负滤光片的基本结构为 Sub/[$aH(2-a)L$] ^{$\frac{N-1}{2}$} aH/Air, 其中, Sub 表示基底, Air 表示空气, H 和 L 分别表示膜层厚度为 1/4 中心波长的高、低折射率材料, a 表示膜层厚度为 1/4 中心波长的高折射率材料的系数, N 表示膜层总数。

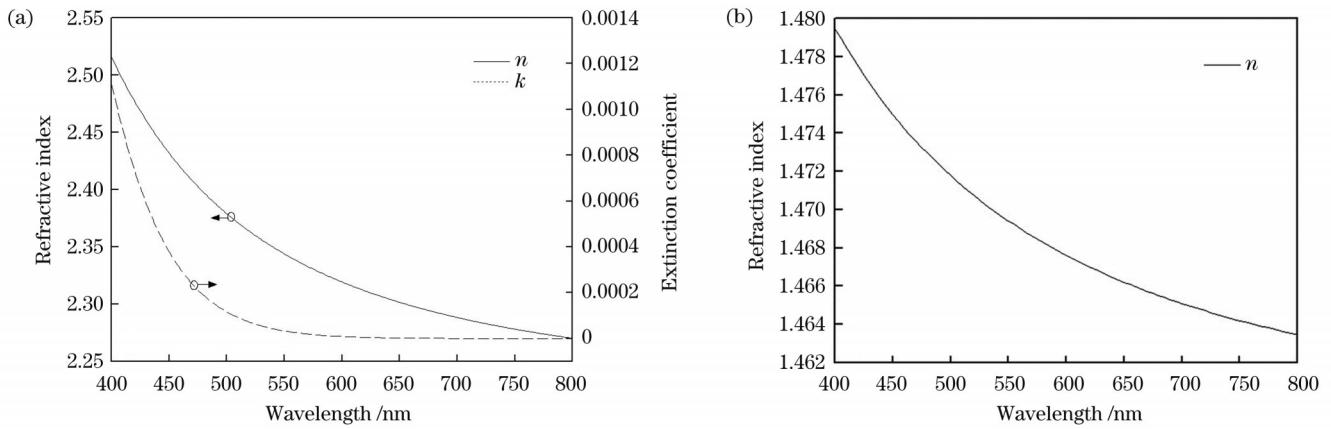


图 2 色散曲线。(a)Nb₂O₅; (b)SiO₂ 薄膜
Fig. 2 Dispersion curves. (a) Nb₂O₅ thin film; (b) SiO₂ thin film

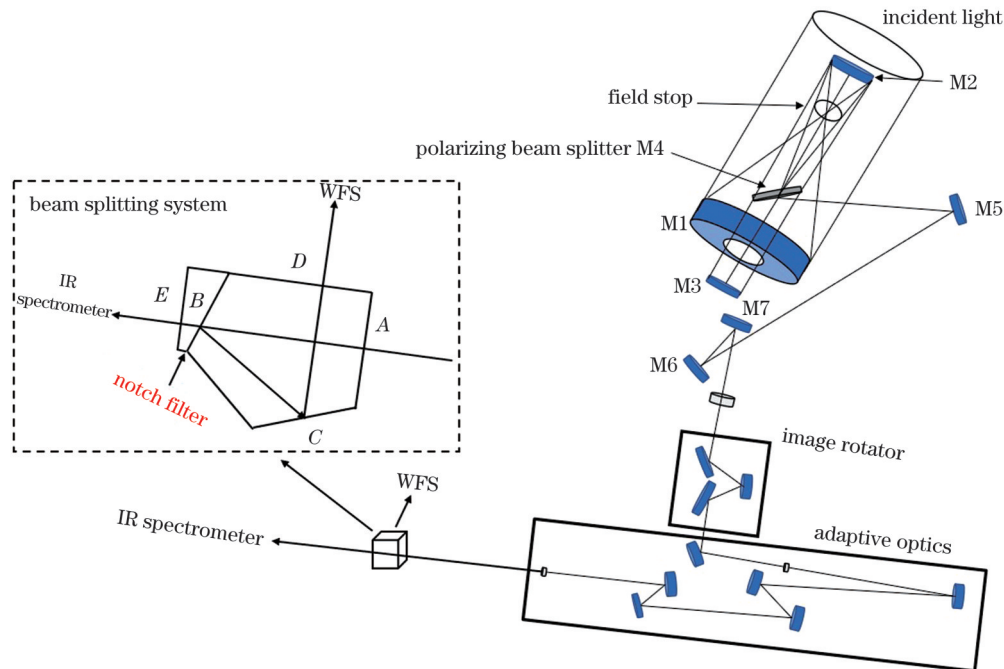


图 3 GREGOR 望远系统光学结构示意图
Fig. 3 Schematic of optical structure of GREGOR telescopic system

表 2 光谱特性参数
Table 2 Spectral characteristic parameters

Parameter	Value
Permissible error	± 2 nm
Angle of incidence	15°
Transmittance	≥ 90%
Cut-off depth	≥ 0.1%
Half band width	≤ 24 nm
Central wavelength 1	490 nm
Central wavelength 2	560 nm
Central wavelength 3	645 nm

负滤光片的三个关键参数分别为反射带的截止深度、半峰全宽和透射带的透射特性。当制备的薄膜材

料确定后,负滤光片的反射带的截止深度可用光密度 (OD) 表示,即反射带透射率的负对数,例如 OD3 表示截止带透过率为 0.001,即 0.1%。反射带反射率与滤光片的周期数有关,周期数越大,反射带反射率越高。但如果周期数太大,薄膜层数就较多,这不仅增加了制备的难度,还对透射区的透射特性有一定影响,而且由于膜层中吸收和散射等损耗的增加,反射率下降。因此诸多因素共同作用限制了薄膜的最大层数^[11]。

为了改变反射带的半峰全宽,一是可以通过选择不同高、低折射率材料进行设计,反射带的半峰全宽与高、低折射率材料匹配有关,两种材料的折射率差值越大,反射带越宽。如果选择半峰全宽较小的薄膜组合作为设计的初始结构,它们的高、低折射率差值较小,需要增加层数来提高反射带的反射率,这会影

越高,反射带越窄。本文选择第二种方法,利用变迹函数 b 的不同级次对膜层厚度进行调制^[8],当选定两种高、低折射率材料时,利用 $\text{Sub}/[bL(8-b)H0.75bL(9-0.75b)H]^i/\text{Air}(i$ 表示周期重复次数)的结构设计级次和控制波长,从而确定多腔负滤光片的反射带半峰全宽。

$$\begin{cases} b = a \cdot \exp\left[-(n - N/2)^2 / (2C^2)\right] \\ C = \frac{\omega}{2^{3/2} \sqrt{\ln 2}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: n 表示第 n 层; C 表示与反射带半峰全宽有关的系数; ω 表示负滤光片的半峰全宽。

多腔负滤光片的设计难点在于要同时消除多个截止带两侧透射通带的波纹。随着薄膜层数的增加,波纹变得较为密集,这是因为在截止区附近,薄膜与基底或入射介质的等效折射率匹配性变差,需要对等效结构进行减反处理^[12]。但是这样必然要在膜系中引入第三种薄膜材料以构造匹配层,使透射带起到减反效果。可以通过等效折射率方法获得特定匹配层膜层的折射率和相位厚度,但能够完全符合匹配层要求的薄膜材料较少,这给薄膜设计和制备都带来了困难。

本文选择厚度调制层设计方法,通过插入一个厚度调制层,使用高阶变迹函数迭代算法,对多腔负滤光

片的通带波纹进行抑制。该算法的优势在于可以同时优化膜系层数和膜层厚度,在膜系中不断插入新的调制层,不断减小评价函数 $F(M)$ 值,形成一个全局连续寻优过程。

$$T_H = \begin{cases} a \left[10(1-x)^3 - 15(1-x)^4 + 6(1-x)^5 \right], n \leq \frac{N}{2} \\ \left[10(1+x)^3 - 15(1+x)^4 + 6(1+x)^5 \right], n > \frac{N}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

$$x = C \cdot (1 - 2n/N), \quad (3)$$

$$T_L = 2 - T_H, \quad (4)$$

$$F(M) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{R(M, \lambda_j) - \tilde{R}(\lambda_j)}{\Delta R_j} \right], \quad (5)$$

式中: T_H 、 T_L 表示第 n 层高、低折射率材料的光学厚度; M 表示设计参数; λ_j 表示波长的步长; j 表示膜层编号; $R(M, \lambda_j)$ 表示实际的反射率; ΔR_j 表示设计容差; $\tilde{R}(\lambda_j)$ 表示目标反射率。该算法与等效层法相比,不用增加第三种薄膜材料,仅用高低折射率两种材料,通过插入调制层来进行膜层厚度和层数的匹配,计算得到不同评价函数的透射光谱理论设计组合,如图 4 所示,并从中选择出最符合实际制备要求的膜系设计。

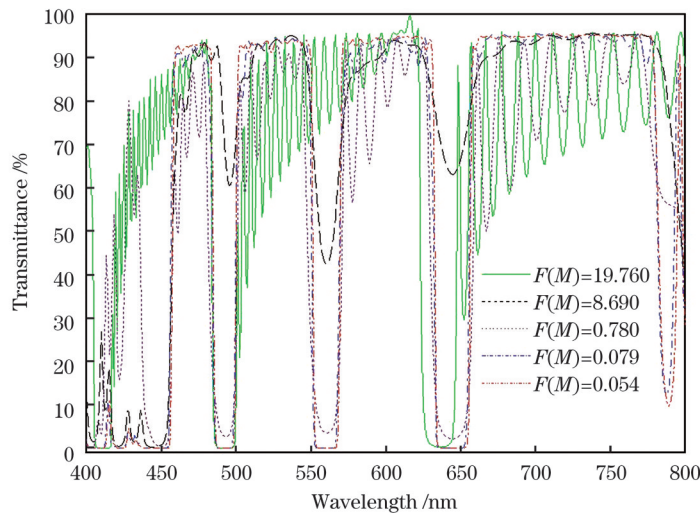


图 4 不同评价函数的理论设计

Fig. 4 Theoretical designs under different merit functions

基于上述厚度调制方法,根据系统给定的光谱特性参数,继续增加层数和迭代次数,优化通带波纹,成功设计了截止带两侧透射带波纹消除较好的多腔负滤光片,在 15° 入射条件下,设计的膜层总层数为 190 层,膜层总厚度约为 $20 \mu\text{m}$,控制波长为 490 nm 。膜系部分结构为: Sub/16.488H 33.945L 147.194H 29.235L 40.036H 27.15L 163.043H 8.31L 193.837H 4.16L 156.702H 8.725L 169.296H 6.65L 175.274H 4.845L 190.484H 10.25L 144.294H 10.25L 363.497H 6.65L 169.837H 9.555L 132.604H 9.98L 242.122H 12.47L

250.99H 6.93L 165.393H 15.655L 254.618H 13.02L 95.655H 10.53L 141.757H 11.36L 165.845H 8.04L 234.236H 5.685L 132.063H 29.37L 332.969H 39.205L 26.448H 46.549L 145.375H 17.73L 211.593H 27.989L...140.577H 45.584L 167.389H 22.585L 329.98H 31.59L 138.041H 29.929L 190.573H 25.49L 166.661H 19.67L 143.202H 25.22L 340.392H 49.464L 138.404H 228.182L 12.142H 247.717L 40.213H 18.84L 159.966H 31.869L 300.809H 47.659L 21.286H 62.899L 138.857H

36.02L 146.191H 16.35L 178.076H 31.725L 150.547H
26.735L 149.731H 48.904L 35.503H 28.82L
275.452H 25.49L 159.779H 11.64L 169.837H 13.85L
169.926H 14.13L 159.415H 21.61L 168.205H 12.19L
160.507H 20.23L 138.68H 181.633L 108.968H
84.654L/Air。其中 Sub 表示基底 B270, 设计的透射光谱曲线如图 5 所示。

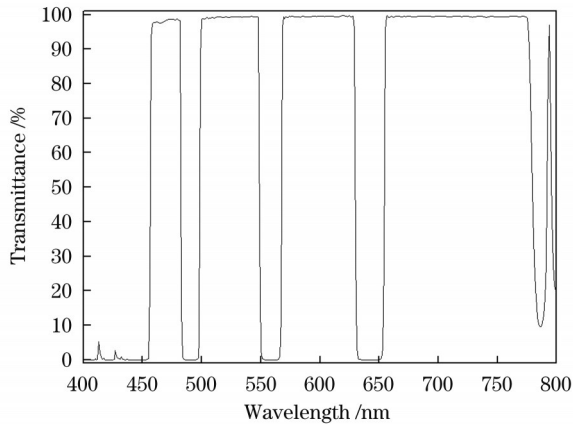


图 5 多腔负滤光片的设计光谱曲线

Fig. 5 Designed spectral curve of multi-notch filter

4 多腔负滤光片制备

理论设计的多腔负滤光片光谱特性可达到比较理想的效果,但薄膜的实际制备过程会受到诸多因素的影响,最终导致理论设计曲线和制备曲线有所偏差。其中,薄膜厚度和均匀性的优化控制是多腔负滤光片成功制备的关键因素^[13]。

实验的本底真空度优于 2×10^{-4} Pa, 真空室未加热,在厚度为 1.5 mm、直径为 50.8 mm 的双面抛光 B270 基底上,采用反应磁控溅射方法制备多腔负滤光片。沉积过程中,为了避免出现 Nb_2O_5 化学剂量比失配现象,适当控制充氧量为 35~50 mL/min,同时采用低能等离子体辅助蒸发,使膜层更加致密和牢固,有效地防止负滤光片在使用过程中的波长飘移。膜层厚度控制采用德国莱宝公司生产的 OMS 系列光控,厚度监控过程中使用光控法和时间控制法相结合的控制方案。对于非规整膜系,只要该膜层的厚度大于四分之一波长极值点(turning point)所对应的厚度,光控可以计算出膜层厚度的停止点(trigger point),光控模拟趋势示意图如图 6 所示。光控控制方法制备滤光片的巨大优势在于可以自动补偿层与层之间的误差。如果膜层的厚度小于一个四分之一波长,就采用基于溅射平均速率的时间控制方法进行控制^[14]。

随着膜层厚度的增加,光控的控制片的反射率增大,透射信号减弱,选择合适的控制片更换位置和个数显得尤为重要^[15],根据膜系的敏感层和失败光谱反演分析结果,分别在第 33 层、65 层、95 层、129 层和 162 层更换 5 次控制片,最后成功制备出了光谱性能比较理

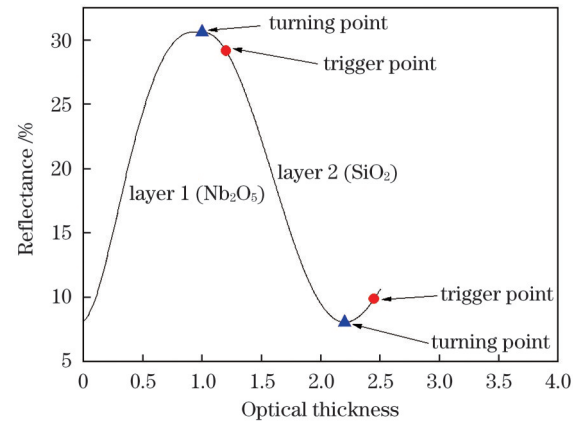


图 6 光控模拟趋势示意图

Fig. 6 Schematic of optical monitoring simulation trend

想的多腔负滤光片。测试结果表明,多腔负滤光片的各通带透射率均大于 90%,截止深度大于 OD3,反射带的半峰全宽小于 24 nm,测试的光谱和光密度曲线如图 7 所示。可以看出,多腔负滤光片的理论设计值与实际测量值吻合较好,表明薄膜制备工艺的可行性较高。其中,透射带高低之差是由样品背面未镀减反射薄膜引起的。滤光片的基底为 B270,单面反射率约为 4.2%,镀制减反射薄膜后,单面透过率可以提升 4.1% 左右。多腔负滤光片的透射带理论透过率为 99%,没有镀制减反射薄膜的样品实际平均透过率为 94%;如果样品背面镀制减反射薄膜,透过率可以提升至 98% 左右,与理论设计值比较接近,在制备和测量误差允许范围内。

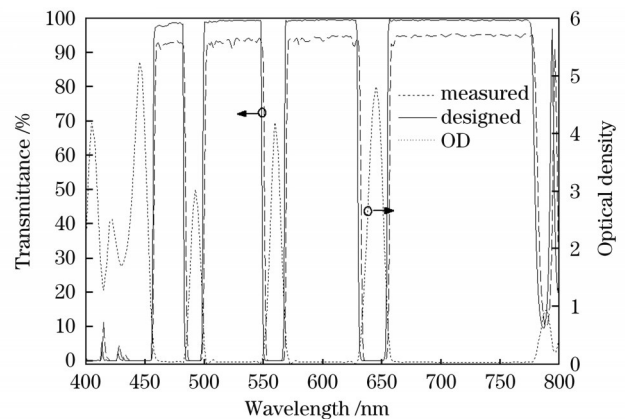


图 7 多腔负滤光片的设计与测试曲线对比

Fig. 7 Comparison of designed and measured curves multi-notch filter

薄膜在沉积过程中会产生残余应力,过量的残余应力极大地影响多层膜的性能和可靠性。残余应力过大,薄膜容易剥落、开裂或起皱,因此多层膜沉积之后,进行应力释放是一个比较重要的环节。研究表明,利用溅射方法制备的 Nb_2O_5 和 SiO_2 单层薄膜都表现为压应力,但与单层膜相比,多层膜的压应力更小了,其不仅包含单层膜应力,还包含膜层界面应力和热应力^[16]。考虑到本文制备的多腔负滤光片层数较多,为了使薄

膜内部应力得到释放,对制备的多腔负滤光片进行优化的梯度温度退火后处理,退火温度从室温开始升温,间隔 50 °C 恒温 20 min,升温到 200 °C 恒温 20 min,然后退火降温,再间隔 50 °C 恒温 20 min 降到室温。应力测试采用激光干涉仪分别测量镀膜前、后基底的曲率半径,计算出曲率半径的变化量,并用 Stoney 公式计算出薄膜的应力值。应力值为正时表示为张应力,为负时表示为压应力,实验结果中讨论的应力大小均指其绝对值。退火前,计算得出多腔负滤光片的应力值为 -233 MPa,200 °C 退火后,计算得出样品的应力值为 -89 MPa,样品的应力值均为负值,均呈现为压应力。在薄膜溅射制备过程中,样品未加温,使用离子束

辅助轰击薄膜表面,离子将能量传递给下面的原子,使薄膜产生较强的聚集效应,从而产生压应力。当样品进行退火后处理时,随着温度的改变,处于亚稳态的原子具有较大的迁移率,原子排列更加紧凑,聚集密度改善,从而薄膜内部应力得到释放^[17]。

多腔负滤光片的均匀性测试曲线如图 8 所示,在直径为 50.8 mm 的薄膜样品上,选取 4 个测试点(P1、P2、P3 和 P4)进行小光斑透射光谱测试,测得 P1、P2、P3 和 P4 位置的谷值中心波长分别为 789、788、788、787 nm,4 个点中任意两两之间的最大位置偏差为 2 nm。在薄膜制备过程中,由于样品高速旋转以及修正挡板的反复优化,样品的均匀性表现良好,满足技术指标要求。

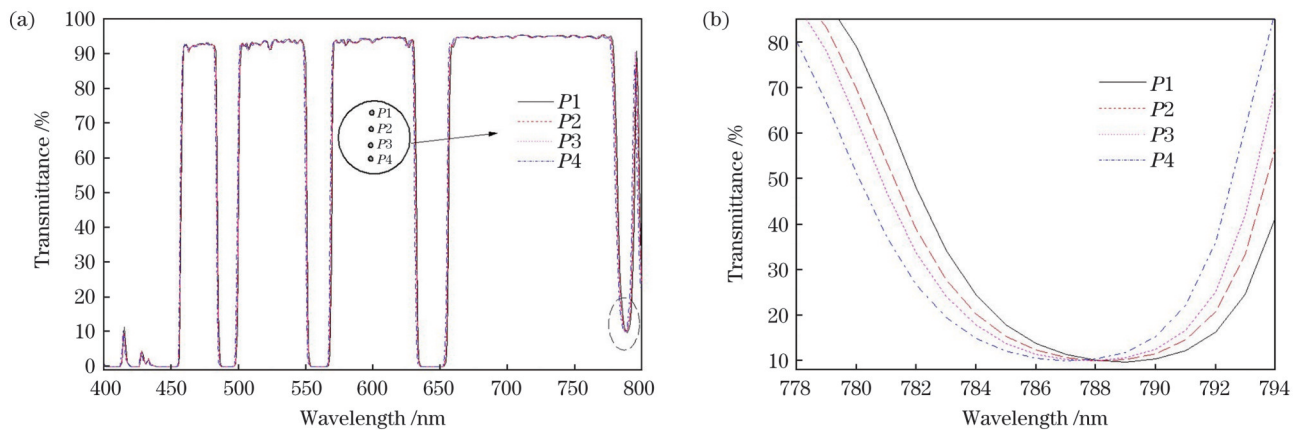


图 8 多腔负滤光片均匀性测试曲线对比。(a)测试曲线;(b)图 8(a)的局部放大

Fig. 8 Comparison of uniformity measurement curves of multi-notch filter. (a) Measurement curves; (b) partial magnification of Fig. 8(a)

5 结 论

针对 GREGOR 望远系统测试设备使用需求,设计了一种高透射深截止多腔负滤光片,采用厚度调制层设计方法,利用变迹函数不同级次的高阶迭代算法,解决了通带波纹抑制问题,设计出总层数为 190 层、总厚度约为 20 μm 的多腔负滤光片。采用离子束辅助反应磁控溅射的沉积方法进行制备,通过光控法和时间控制法相结合的方案监控膜层厚度,成功制备了光谱性能良好的多腔负滤光片,测得各通带透射率均大于 90%,反射带截止深度大于 OD3,反射带半峰全宽小于 24 nm,最大位置偏差为 2 nm,样品的均匀性表现良好,负滤光片的各项指标均满足实际应用需求。

参 考 文 献

- [1] Schallenberg U, Ploss B, Lappschies M, et al. Design and manufacturing of high-performance notch filters[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 77391X.
- [2] 魏博洋, 刘冬梅, 付秀华, 等. 基于结构光 3D 成像技术的 945 nm 窄带滤光片研制[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1431001.
Wei B Y, Liu D M, Fu X H, et al. Development of a 945-nm narrowband filter based on a structured light 3D imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1431001.
- [3] 王凯旋, 陈刚, 刘定权, 等. 0.2 nm 带宽滤光片的制备以及退火温度对其形貌和性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2031001.
Wang K X, Chen G, Liu D Q, et al. Fabrication of 0.2 nm bandwidth filter and effects of annealing temperature on its morphology and characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2031001.
- [4] 于志强, 费书国, 赵帅锋, 等. 面向多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片设计[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2331001.
Yu Z Q, Fei S G, Zhao S F, et al. Design of optical thin-film filters for multispectral palmprint image acquisition systems[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2331001.
- [5] Leitel R, Stenzel O, Wilbrandt S, et al. Optical and non-optical characterization of Nb₂O₅-SiO₂ compositional graded-index layers and rugate structures[J]. Thin Solid Films, 2006, 497(1/2): 135-141.
- [6] Zhang J L, Tikhonravov A V, Trubetskov M K, et al. Design and fabrication of ultra-steep Notch filters[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21523-21529.
- [7] Zhang J L, Xie Y J, Cheng X B, et al. Thin-film thickness-modulated designs for optical minus filter[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5788-5793.
- [8] Lyngnes O, Kraus J. Design of optical Notch filters using apodized thickness modulation[J]. Applied Optics, 2014, 53(4): A21-A26.
- [9] Kumar V S P, Kumar M, Kumari N, et al. Design and development of an optical reflective Notch filter using the ion assisted deposition technique with stepwise modulated thickness for avionics applications[J]. Applied Optics, 2020, 59(2): 564-571.
- [10] 常艳贺, 金春水, 李春, 等. 热蒸发紫外 LaF₃ 薄膜光学常数的表征[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0807002.
Chang Y H, Jin C S, Li C, et al. Characterization of optical constants of ultraviolet LaF₃ films by thermal evaporation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0807002.
- [11] 常艳贺, 金春水, 李春, 等. 深紫外氧化物薄膜的光学特性[J]. 中

- 国激光, 2011, 38(12): 1207004.
- Chang Y H, Jin C S, Li C, et al. Optical properties of oxide thin films for deep ultraviolet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1207004.
- [12] 刘凤玉, 吴晓鸣, 张元生, 等. 窄带负滤光片膜层的制备[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S2): 188-190.
- Liu F Y, Wu X M, Zhang Y S, et al. Film coating for narrow-band negative filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S2): 188-190.
- [13] Scherer M, Schallenberg U, Hagedorn H, et al. High performance Notch filter coatings produced with PIAD and magnetron sputtering [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7101: 71010I.
- [14] Zöllner A, Boos M, Hagedorn H, et al. Computer simulation of coating processes with monochromatic monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7101: 71010G.
- [15] Zoeller A, Hagedorn H, Weinrich W, et al. Testglass changer for direct optical monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8168: 81681J.
- [16] Chuen L T, Lin H Y, Cheng K S, et al. Design and fabrication of a cost-effective optical Notch filter for improving visual quality[J]. Coatings, 2021, 12(1): 19.
- [17] 袁文佳, 沈伟东, 郑晓雯, 等. 离子束溅射制备 Nb₂O₅、Ta₂O₅ 和 SiO₂ 薄膜的光学、力学特性和微结构[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1231001.
- Yuan W J, Shen W D, Zheng X W, et al. Optical and mechanical properties and microstructures of Nb₂O₅, Ta₂O₅ and SiO₂ thin films prepared by ion beam sputtering[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1231001.

Design and Fabrication of Multi-Notch Filter with High Transmittance and Optical Density for GREGOR Telescope System

Chang Yanhe^{1*}, Fu Xiuhua^{1,2}, Zhang Gong¹, Zhang Jing¹, Li Chun³, Shigeng Song⁴

¹*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

²*Zhongshan Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, Guangdong, China;*

³*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

⁴*Institute of Thin Films, Sensors and Imaging, School of Engineering and Computing, University of the West of Scotland, Paisley PA1 2BE, UK*

Abstract

Objective GREGOR is an assembled solar telescope with 1.5 m diameter that is designed for high-precision measurements of the magnetic field and gas motion in the solar photosphere and chromosphere with a resolution of 70 km on the sun and high-resolution stellar spectroscopy. To meet the specific requirements of measurement using the GREGOR telescope system, the surfaces of the lenses need to be modified using interference coatings. These coatings form the optical filters required to achieve the rejection bands at the specific wavelength ranges originating from fluorescence. Therefore, a multi-notch filter covering visible light with high transmittance for passbands and high optical density for rejection bands is designed and fabricated to improve the signal-to-noise ratio, where the noise signals are rejected.

Methods In this design, two materials with high and low refractive indices are employed and the ripples in the passband regions are suppressed by modulating the layer thicknesses of the layer stacks with high order apodization functions. As the full width at half maximum (FWHM) and central wavelength of the multi-rejection bands are also specified, high-order iteration algorithms are used to insert and adjust modulating layers to achieve the desired merit functions. This realizes the global search for a multi-band notch filter with effective ripple suppression. The designed multi-notch filters are then fabricated on B270 substrates using ion-beam-assisted reactive magnetron sputtering deposition. Optical monitoring and time control methods are used to control the thickness of the non-quarter wavelength optical thickness (QWOT) layers. The trigger point of the deposition of each layer can be determined using the turning points of the QWOT if the thicknesses are larger than the QWOT, whereas the trigger point of the deposition of each layer is determined by time using the average deposition rate for thicknesses less than the QWOT. The errors in the layer thickness can be automatically compensated by the optical monitoring method. By changing the number and position of the test glass, multi-rejection notch filters with improved spectral performance are fabricated.

Results and Discussions The measurement results of the fabricated multi-band notch filter demonstrate good agreement with the designed spectra, thus proving the feasibility of the fabrication process (Fig. 5). Considering the high number of layers in the stack for the filter, gradient temperature annealing is performed at 200 °C. This reduces the stress from -233 MPa to -89 MPa, indicating that relaxation of the internal stress can be achieved by the annealing method. The filter deposition method where the substrates rotate at high speeds and the masks are optimized after multi-iterations enables improvements in the fabrication of filters and results in a higher thickness uniformity (Fig. 6). From the above results, we demonstrate a design for a multi-notch filter with a narrow high-rejection band, where the sidelobes can be strongly suppressed by apodization. Fabricating a multi-notch filter is always a challenge, with difficulties in the accurate control of the index of refraction and thickness of each layer during deposition. The accuracy in the layers affects the steepness at the reflecting band edges and the high transmittance in the passband, resulting in high requirements in the accuracy of the index and thickness control. The advantage of this design approach is that the layer thicknesses are all close to the half wave length at the central rejection wavelength and therefore are very suitable for accurate monitoring during deposition. These

coatings are produced by ion-beam-assisted reactive magnetron sputtering deposition technology with a high deposition rate and low stress.

Conclusions The apodization thickness modulated design method presented in this work generates notch filter designs with strongly suppressed ripples in the transmission regions and high optical density for the rejection bands. The total layer number of the multi-notch filter is 190 and the total filter thickness is approximately 20 μm . The good performance multi-notch filter is deposited successfully. The multi-notch filter is prepared by ion-beam-assisted reactive magnetron sputtering on B270. Optical monitoring and time control methods are utilized to monitor the non-quarter thickness. The average transmittance in the passbands of the fabricated multi-notch filter is higher than 90%, the cut-off depth for the rejection bands is better than 0.1%, the full width at half maximum of the rejection bands is less than 24 nm, and the maximum deviation of the band position is 2 nm. This indicates the fabricated multi-notch filter with excellent performance and high production yield meets the specified requirements for the GREGOR telescope application.

Key words thin films; multi-notch filter; reactive magnetron sputtering; Nb_2O_5 ; SiO_2