

多金属层诱导透射紫外“日盲”探测成像滤光片设计与低温制备研究

尚 鹏^{1,2}, 熊津平³, 季一勤¹, 刘华松¹, 刘丹丹¹, 庄克文¹, 刘 旭², 沈伟东²

- (1. 天津市航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308;
2. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;
3. 成都七中高新校区, 四川 成都 610209)

摘要: 基于 $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 三层夹层结构, 结合使用多角度椭圆偏振谱和透射光谱精确反演获得了薄金属 Al 层光学常数, 并研究分析了 Al 光学常数随膜层厚度的变化; 在此基础上采用导纳匹配法, 理论优化获得了三腔金属诱导透射紫外滤光膜, 并系统分析了 Al 和 SiO_2 介质匹配层制备误差对紫外滤光膜光谱性能的影响; 进一步采用低温、高真空 Al、 SiO_2 薄膜生长工艺, 成功获得了峰值波长位于 218 nm 附近, 峰值透过率~23.1%, 带宽~32 nm, 在 280 nm、318 nm 波段的透过率分别约为 0.5% 和 0.04%, 400~700 nm、800~1100 nm 波段的截止度分别可达~5.0 OD、~4.5 OD 的高性能三腔诱导透射紫外滤光片样品。相关研究结果对于高性能多腔诱导透射“日盲”紫外滤光片的设计与制备具有很好的指导意义。

关键词: 光学薄膜; 电子束蒸发; 紫外诱导透射; Al/SiO_2

中图分类号: O484.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0920002

Design and the preparation of multi metal layer induced transmission UV "solar blind" filter at low temperature for detection imaging

Shang Peng^{1,2}, Xiong Jinping³, Ji Yiqin¹, Liu Huasong¹, Liu Dandan¹, Zhuang Kewen¹,
Liu Xu², Shen Weidong²

- (1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
2. State Key Labs of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Chengdu No.7 High School, Chengdu 610209, China)

Abstract: Based on the basic structural unit of $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$, the optical constants of thin Al films were obtained accurately by fitting the multi angle ellipse polarization spectrum and the transmittance spectrum. And the influences of the thickness of Al film on the optical constants was also studied and analyzed. Theoretically, the three cavity UV induced transmission filter was obtained by using the admittance matching method. And the influence of preparation error of Al and SiO_2 dielectric matching layer on the

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61405145, 61235011); 天津市自然科学基金(17JCQNJC1900)

作者简介: 尚鹏(1986-), 男, 主管设计师, 博士生, 主要从事光学薄膜方面的研究。Email: shangpeng163@163.com

导师简介: 季一勤(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学薄膜方面的研究。Email: jiyiqin@gmail.com

刘旭(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学与光电子薄膜、光学成像、光电显示等方面的研究。Email: liuxu@zju.edu.cn

spectral properties of UV filters was systematically analyzed. Based on the low temperature, the high vacuum growth process of Al and SiO₂ thin films, the high performance three cavity UV induced transmission filter were successfully prepared. The peak wavelength was located near 218 nm, and the peak transmittance was ~23.1%, and the bandwidth was ~32 nm. The transmittance in the 280 nm, 318 nm bands were about 0.5% and 0.04%, respectively. The cut-off rates of the samples were about 5.0 OD and 4.5 OD in the range of 400–700 nm and 800–1 100 nm, respectively. The results of this study have a good theoretical and practical significance for depositing the visible–near infrared band deep cut-off and UV induced transmission filters.

Key words: thin film; electron beam evaporation; UV induced filter; Al/SiO₂

0 引言

由于臭氧等气体成分的强吸收和散射作用,太阳光中 200~280 nm 紫外波段区间(也称“日盲”紫外波段)几乎无法到达地球表面,因此,相对与其他成像探测技术,紫外成像探测技术具有背景噪声小、虚警率低、隐蔽性强、结构简单和用途广泛等优点,其在导弹预警、制导、紫外通讯、生化分析、生物医药分析、公安侦察等诸多领域具有极大的商业和军事应用价值^[1-3]。为了有效屏蔽探测器对“日盲”紫外波段以外其他波段光的响应,紫外带通滤光片作为紫外探测与成像系统的核心元器件,直接影响到探测成像系统性能的优劣。

目前,可使用的紫外滤光片有多种,其中以紫外干涉型和紫外吸收型两类最为常见^[8]。针对“日盲”紫外诱导透射滤光片的设计、制备与检测,国内外科研单位开展了广泛的研究。例如以色列 OFIL 公司生产的吸收型紫外滤光片目前处于全球领先水平,其在 260 nm 附件的峰值透过率>12%,带宽~15 nm, 290 nm、300~770 nm 波段截止度高达 12 OD(Optical Density)^[9]; R.G.Safom^[10]等设计并制备了通带 265~290 nm 波段透过率~20%,300~800 nm 波段截止深度 7 OD 的紫外滤光片;Webb K J 等^[11]利用铝和石英玻璃等材料获得了入射透射率对入射角度不敏感,同时能够有效截止近紫外和可见光的紫外滤光片;长春理工大学付秀华等^[12-13]通过电子束蒸发的方式,采用 HfO₂、MgF₂ 和 Al 金属薄层制备了单腔紫外滤光片,其紫外峰值波长在 265 nm 处透过率~22%,在 300~1 000 nm 波段的平均截止度<0.2%;同时还研究了 240~280 nm 紫外波段薄膜生长工艺因素的

影响;王正风等^[14]采用电子束蒸发和离子束辅助沉积方法,利用 HfO₂、MgF₂、UV-SiO₂ 薄膜材料设计制备了 25°以内 240~280 nm 波段透射、300~620 nm 波段抑制的紫外滤光片;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[15]通过离子束溅射方法,利用 ZrO₂、SiO₂ 和薄 Al 膜层材料设计制备了紫外单腔诱导滤光片,其峰值波长位于 264 nm,透过率大于 60.0%,带宽(FWHM)~13 nm,在 300~350 nm 波段的截止度达到了 2.6 OD。相比而言,国外在紫外诱导滤光片领域的研究较为深入,技术也相对较为成熟,国内在该领域总体起步较晚,虽然近年来相继有多家研究单位围绕紫外诱导透射滤光片开展了有意义的研究,但围绕多腔金属层诱导透射紫外滤光片的设计与生长制备研究报道内容还比较少。因此文中采用高真空、低温生长制备技术,针对薄金属 Al 层光学常数的精确拟合与演化,以及紫外滤光片的优化设计、误差分析、生长制备等内容,系统开展了相关理论和实验研究工作。

1 基本理论模型

目前,导纳匹配法是诱导透射滤光片的主要设计方法,通过设计相应匹配膜层的参数获得最大的膜层透过率;其对金属膜层的厚度选择也非常重要,金属膜层太厚,紫外考察波段的透过率会很低;而金属层太薄,可见-近红外波段的截止度则又很难满足系统要求。因此,在对光学薄膜系统中介质匹配层优化设计的同时,需要通过设定光谱截止度优化目标,以实现金属层的初步选定,再根据实验反馈结果作进一步的修正。诱导透射滤光片的基本理论结构模型如图 1 所示^[7]。

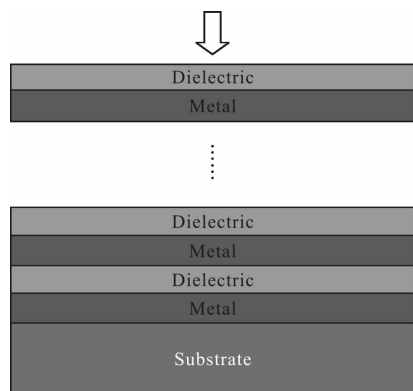


图 1 多腔金属诱导透射滤光片基本结构

Fig.1 Basic structure with multi-cavity metal of induced transmission filter

该滤光片由介质匹配层和金属层构成, 通过合理选择介质匹配层与金属层参数, 实现入射介质、膜堆系统、出射介质的导纳匹配设计, 从而获得在特定波段或波段区间很高的峰值透过率和宽的截止区。设定出射匹配导纳为 X_0+iZ_0 , 对于多层薄膜的特征矩阵如下所示:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left[\prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos\delta_i & \frac{i}{\eta_i} \sin\delta_i \\ i\eta_i \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{N+1} \end{bmatrix}$$

通过选择薄膜各层的结构参数, 使其有效导纳终止在出射匹配导纳, 即:

$$Y = \frac{B}{C} = X_0 + iZ_0$$

其中对于 p 偏振, $\eta_i = n_i / \cos\theta_i$; s 偏振, $\eta_i = n_i \cos\theta_i$; $\delta_i = 2\pi / \lambda n_i d_i \cos\theta_i$ 。

2 实验制备

在 200~400 nm 紫外波段, 可使用的低折射率介质材料主要有 MgF_2 和 SiO_2 , 其中 SiO_2 由于具有较好的环境稳定性、成熟的生长工艺是低折射率介质膜材料的首选。此外, 金属 Al 工艺是紫外金属诱导滤光片制备成功的关键工艺技术, 很多文献指出, 高真空、Al 膜料高纯度、镀膜过程低温 (<100 °C)、高蒸发速率都有利于高质量紫外金属 Al 膜的生长。文中实验基于德国莱宝真空镀膜机平台, 采用传统的电子束蒸发和电阻蒸发方式生长沉积 SiO_2 介质薄膜和金属 Al 薄膜, 镀膜基底采用熔融紫外石英。镀膜前对石英基片进行金刚石粉抛光、乙醇乙醚混合液清洗, 以降低基底表面的加工缺陷及污染。Al 膜的

制备采用电阻蒸发 Al 丝(纯度 99.99%)工艺, 镀膜前所用 Al 丝进行超声清洗, 同时辅助酒精反复擦拭, 以尽可能地去除表面杂质污染、氧化层的影响。 SiO_2 、Al 薄膜的生长制备工艺参数如表 1 和表 2 所示。另外, 利用 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda 900 光谱仪测试实验样品的透射光谱, 其测量误差小于 0.3%; 采用美国 J.A.Woollam 公司生产的变角度光谱性椭偏仪 VB-400(Variable Spectroscopic Ellipsometry, VASE) 测量获得薄膜的椭偏参数, 薄膜光学参数的拟合分析采用专业 WVASE32 软件, 该软件基于 Marquardt-Levenberg 算法进行反演拟合。

表 1 SiO_2 薄膜制备工艺参数

Tab.1 Deposition parameters of SiO_2 thin film

Item	Content
Thin film	SiO_2
Material	$SiO_2(99.99\%)$
Deposited rate/nm · s ⁻¹	0.35
O ₂ /sccm	20
Deposited method	Electron beam evaporation
Current/mA	50
Base pressure/Pa	~6×10 ⁻⁵
Growth temperature/°C	<50
Deposited pressure/Pa	~3×10 ⁻³

表 2 Al 薄膜制备工艺参数

Tab.2 Deposition parameters of Al thin film

Item	Content
Thin film	Al
Material	Al(99.99%)
Deposited rate/nm · s ⁻¹	1.5
Deposited method	Thermal evaporation
Current/A	3.8
Base pressure/mbar	~6×10 ⁻⁷
Growth temperature/°C	<50
Deposited pressure/Pa	~8×10 ⁻⁴

3 结果与分析

3.1 薄膜光学常数精确反演

由于存在空气氧化、吸潮、污染等因素影响, 通过纯 Al 膜进行光学常数的反演计算将存在很大的误差, 因此, 为了获得精确的 Al 膜光学常数, 采用低

温、高真空生长沉积 SiO₂/Al/SiO₂/air 结构单元方法, 结合使用透射光谱与多角度入射椭圆偏振光谱, 精确反演获得了高真空环境下低温 Al、SiO₂ 薄膜光学常数。所使用的反演结构单元模型如图 2 所示, 通过传统椭圆偏振仪测量方法测试获得的 SiO₂ 薄膜在 200~1200 nm 波段区间的色散曲线如图 3 所示。

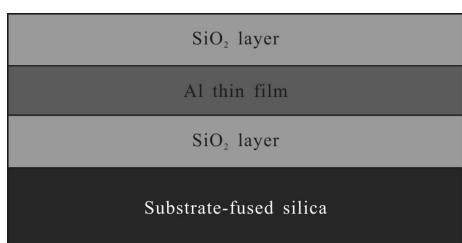


图 2 JGS1/SiO₂/Al/SiO₂/air(SAS)反演结构单元模型

Fig.2 Inversion structure element model of

JGS1/SiO₂/Al/SiO₂/air (SAS)

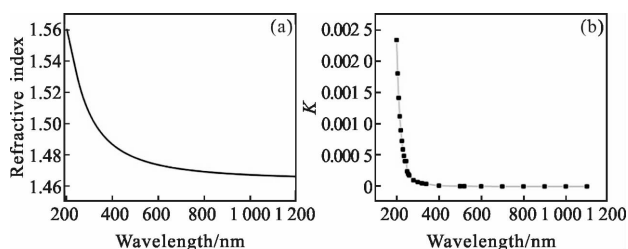


图 3 SiO₂ 薄膜光学常数

Fig.3 Measured optical constants of SiO₂ thin films

由图 3 可知, 电子束蒸发获得 SiO₂ 薄膜折射率在 1.46~1.56 之间, 接近体材料折射率, 表明低温高真空环境下, 沉积粒子间的相互碰撞程度较弱, 能量损失较低, 所制备的 SiO₂ 薄膜内部结构相对较为致密; 同时可以看到, SiO₂ 薄膜消光系数在 300~1200 nm 波段区间基本可以视为 0; 随着波长的变短, 薄膜的消光系数逐渐开始变大, 在 220 nm 波长附近接近 0.0009, 但此时的吸收仍处于较小的水平。在精确获得 SiO₂ 薄膜光学常数基础上, SiO₂/Al/SiO₂ 单元样品在不同入射角度(55°、65°、75°)下的椭圆偏振参数和透射光谱曲线如图 4 和图 5 所示。实验结合使用获得的多角度椭圆偏振数据和光谱数据, 通过 WVASE32 软件内置的 Marquardt-Levenberg 算法反演拟合获得 Al 薄膜在不同波长处的光学常数 n, k 。由图 4 和图 5 可知, 55°、65°、75° 椭圆偏振谱和透射光谱的理论拟合数据与实验测试数据均具有较好的一致性。拟合获得的 25~44 nm Al 薄膜光学常

数的分布如图 6 所示。由图 6 可知, 随着 Al 膜厚度的增加, 在 200~650 nm 波段范围内金属膜层材料的光学常数略有差异, 但整体变化不大, 说明实验获得的 Al 膜在厚度 25 nm 附件已经基本处于成膜状态, 随着金属膜层厚度的增加膜层材料的光学常数趋于稳定。

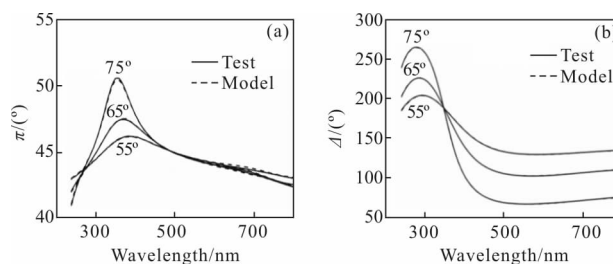


图 4 ZS1//SiO₂/44.18 nm Al/SiO₂ 椭圆偏振光谱测试结果及模型计算结果

Fig.4 Ellipse polarization spectrum measurement result and model

calculation result of ZS1//SiO₂/44.18 nm Al/SiO₂ model

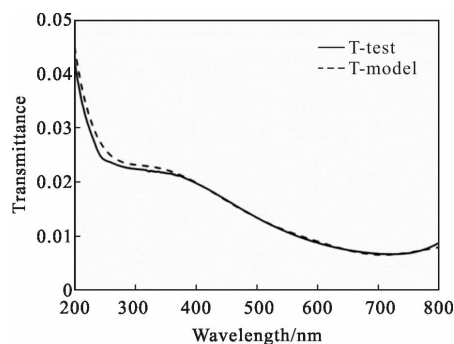


图 5 SiO₂/44.18 nm Al/SiO₂ 结构透射光谱测量曲线与拟合曲线

Fig.5 Measured and fitter curves of transmittance spectrum transmittance of SiO₂/44.18 nm Al/SiO₂ structure

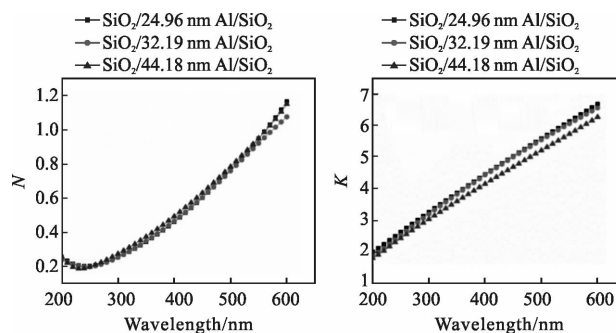


图 6 不同厚度的 Al 薄膜光学常数

Fig.6 Measured optical constants of different thickness of Al films

3.2 三腔诱导透射滤光设计与研制

三腔诱导透射紫外滤光膜理论结构模型如图 7

所示,固定金属 Al 层厚度为 20、30、20 nm (由外而内),通过着重优化考察金属夹层之间 SiO₂ 介质膜层的物理厚度,以获得在紫外 220 nm 波长处具有最大势透过率的薄膜结构形式。由于实验电子束蒸发获得的 SiO₂ 材料与基底熔融石英材料光学性质接近,因此紧靠基底的 SiO₂ 层主要起到改善基底表面质量、降低基底表面对 Al 膜附着性的作用。由图 7 可知,优化后的 SiO₂ 介质匹配层厚度分别为 93.17、42.39、41.54 nm(见图 7(a)),此时三腔诱导透射滤光膜在紫外 220 nm 波段处的峰值透过率~24%,紫外透射谱半宽度(FWHM)~26 nm,其在 280 nm、400 nm 波段处的透过率大小分别为~0.05%、~0.001%,400 nm 以上波段区间截止度可达~5.0 OD。

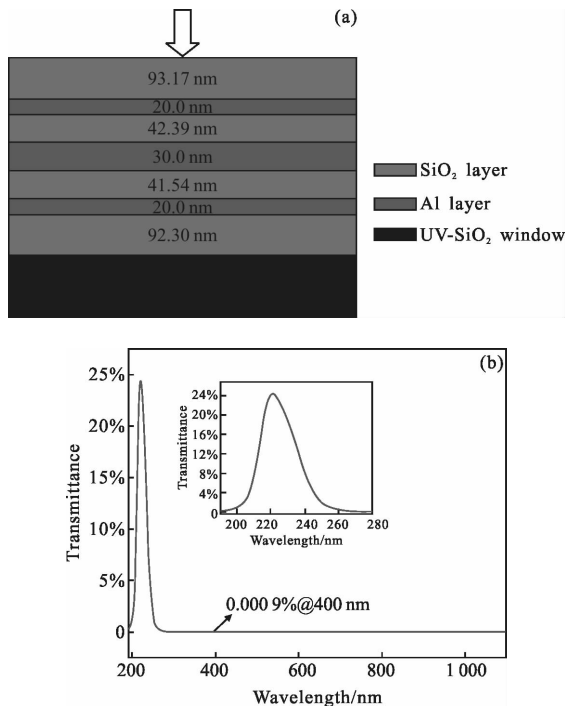


图 7 三腔诱导透射滤光片模型及其透射光谱曲线

Fig.7 Three cavity induced transmission filter model and the transmission spectrum curve

为了进一步获得金属层和介质层对膜层系统紫外光学特性的影响,以优化后的基底膜层厚度为基础,分别以一定的比例改变金属层和介质层的厚度,膜层紫外波段光谱性能变化如图 8 所示。由图 8(a)可知,三层金属层厚度分别以 20、30、20 nm 为基准,若进一步在 0.7~1.7 倍厚度范围变化,诱导透射滤光膜的中心波长将逐渐向长波转移;紫外光谱带宽由~45 nm 降低为~14 nm,峰值透过率出现了较大幅

度的降低,但在 255~300 nm 波段区间的截止深度得到了提升;随着介质层 SiO₂ 物理厚度从 0.9 倍增加到 1.15 倍,诱导透射滤光膜的中心波长亦逐渐向长波转移,但整体光谱带宽基本保持不变。由此可知,对于该三腔金属诱导透射滤光片,金属层的整体变化对膜层的截止深度、峰值透过率和光谱带宽影响较大,而五层介质层的整体偏移主要影响的是紫外诱导透射光谱的中心波长位置。

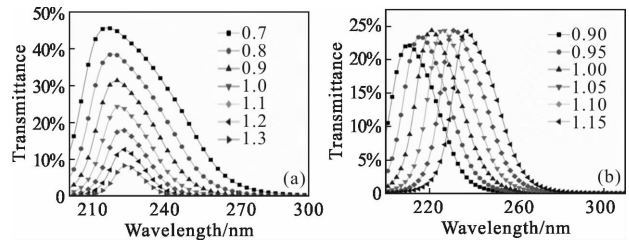


图 8 金属层和介质层厚度变化对薄膜系统光学性能的影响

Fig.8 Influence of thickness of metal layer and dielectric layer on optical performance of thin film system

各介质层物理厚度变化对于薄膜紫外光谱性能的影响如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知,处于三层金属层之间的 SiO₂ 介质匹配层相对较为敏感,即第三层和第五层膜层物理厚度的变化对紫外诱导透射滤光膜的整体光谱特性具有显著影响。具体而言,如图 10 所示,随着第三层和第五层薄膜物理厚度的增加,紫外透射峰值波长逐步向长波偏移;若保持第三层(第五层)SiO₂ 介质匹配层物理厚度,增加或降低第五层(第三层)SiO₂ 介质匹配层物理厚度,紫外峰值透过率大小迅速下降,透射光谱带宽呈增大趋势,且在紫外波段出现了较为明显的“劈峰”现象;以上规律对于定性反演多腔金属诱导透射滤光膜系具有较好的指导意义。因此,根据系统指标要求,精确生长制备 SiO₂ 介质匹配层,对于获得紫外波段高透过、可见-近红外波段深截止的高性能滤光膜至关重要。

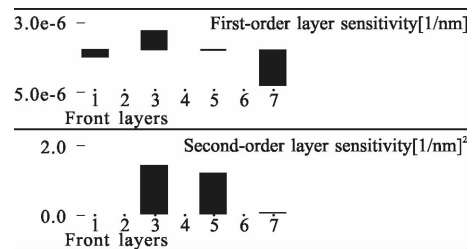


图 9 三腔诱导透射滤光片各膜层敏感度示意图

Fig.9 Schematic of layer sensitivity of three cavity induced transmission filter

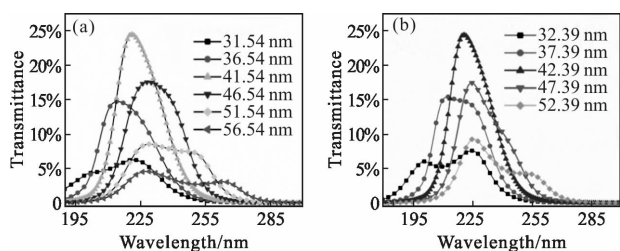


图 10 第三层(a)和第五层(b)薄膜物理厚度变化对紫外波段透射光谱性能的影响

Fig.10 Influence of third layer (a) and fifth layer (b) film thickness on transmission spectrum of ultraviolet band

基于以上设计与分析,通过物理蒸发方法,生长沉积了三腔诱导透射紫外滤光片样品,其理论设计与实际测试曲线如图 11 所示,由图可知,低温、高真空生长制备的紫外诱导透射滤光片峰值波长位于 218 nm 附近,峰值透过率~23.1%,带宽约为 32 nm,在 280、318、400 nm 波段处的透过率分别约为 0.5%、0.04%、0.0054%,400~700 nm、800~1 100 nm 波段的截止度分别可达~5.0 OD、~4.5 OD。理论设计曲线与实际样品的光谱测试曲线具有较为一致的整体变化趋势。另外,比较紫外诱导滤光片的理论设计与实际制备透射率曲线发现,峰值波长位置、实际透过率大小及透射带宽略有差异,该现象的产生与实际 SiO₂ 介质膜层和金属 Al 层的匹配性以及实际金属薄膜厚度偏差等薄膜生长工艺因素密切相关。

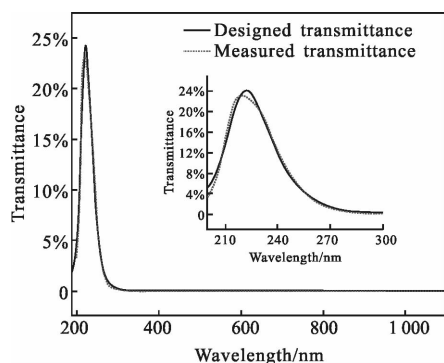


图 11 紫外三腔诱导透射滤光片理论设计与实际制备透射光谱曲线

Fig.11 Theoretical and measured transmission curve of the UV three cavity induced transmission filter

4 结 论

基于 SiO₂/Al/SiO₂ 夹层基本结构单元,结合结构

单元透射谱和椭圆偏振谱精确拟合分析了薄金属 Al 膜的光学常数,结果表明:Al 膜厚度在 25 nm 附件已经基本处于成膜状态,随着金属膜层厚度的增加,膜层材料的光学常数趋于稳定;对于优化后的三腔金属诱导透射滤光片,金属层的整体变化对膜层的截止深度、峰值透过率和光谱带宽影响较大,而介质层的整体偏移影响的主要是紫外诱导透射光谱的中心波长位置,处于三层金属层之间的 SiO₂ 介质匹配层相对较为敏感,是成功制备高性能诱导透射紫外滤光片的关键;采用优化后的低温、高真空金属 Al 和介质 SiO₂ 薄膜生长工艺,成功获得了紫外滤光片峰值波长位于 218 nm 附近,峰值透过率~23.1%,带宽~32 nm,在 280 nm、318 nm 波段的透过率分别约为 0.5%和 0.04%,400~700 nm、800~1 100 nm 波段的截止度分别可达~5.0 OD、~4.5 OD 的高性能三腔诱导透射紫外滤光片。相关研究成果对于高性能多腔诱导透射“日盲”紫外滤光片的设计与制备具有很好的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] Li Xiang, Wang Hengmao, Cao Xun, et al. Application of solar blind UV detection technology in space warning [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(4): 1-8. (in Chinese)
李想,王恒茂,曹汛,等.日盲紫外探测技术在空间预警中的应用[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(4): 1-8.
- [2] Wang Tianjiao, Xu Weizong, Lu Hai, et al. Solar-blind ultraviolet band-pass filter based on metal-dielectric multilayer structures [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23 (7): 074201.
- [3] Zhao Jianchuan, Chen Zhaobing, Guo Jing, et al. Model of UV and IR compounded alarm system based on signal-noise ratio [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 195-199. (in Chinese)
赵建川,陈兆兵,郭劲,等.基于信噪比的紫外红外复合告警系统模型[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(3): 195-199.
- [4] Zhang Mingchao, Zhou Yue, Yan Feng, et al. Automatic gain control of SBUV-ICCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 496-502. (in Chinese)
章明朝,周跃,闫丰,等.“日盲”紫外增强型 CCD 的自动增益控制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 496-502.
- [5] Mu J, Lin P T, Zhang L, et al. Design and fabrication of a

- high transmissivity metal-dielectric ultraviolet band-pass filter[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(21): 213105.
- [6] Wu Ligang, He Wenrong, Hu Jinsun, et al. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1529–1535. (in Chinese)
吴礼刚, 何文荣, 胡晋荪, 等. 日盲紫外-可见光双光谱照相相机系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1529–1535.
- [7] Tang Jinfu, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
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.
- [8] Lu Zhaoshun, Wu Hanping, Li Junyu, et al. Research on "solar blind" filter for near ground UV communication [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(8): 952–958. (in Chinese)
吕照顺, 吴晗平, 李军雨, 等. 近地层紫外光通信“日盲”滤光片技术研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(8): 952–958.
- [9] Xu Suzhi, Chang Shengli, Jia Honghui, et al. Research of UV filter technology in NLOS ultraviolet communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, 31(8): 58–60. (in Chinese)
徐素芝, 常胜利, 贾红辉, 等. 大气光散射通信紫外滤光片技术研究[J]. *光通信技术*, 2007, 31(8): 58–60.
- [10] Safin R G, Gaĭnutdinov I S, Sabirov R S, et al. Solar-blind filter for the ultraviolet region [J]. *Journal of Optical Technology*, 2007, 74(3): 208–210.
- [11] Webb K J, Kim S, Man M, et al. Multilayer metal-dielectric stack ultraviolet filter[C]//Frontiers in Optics. Optical Society of America, 2013: JW3A. 30.
- [12] Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, et al. Research of ultraviolet induced transmission filter for the solar blind system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (5): 0507002. (in Chinese)
付秀华, 寇洋, 刘冬梅, 等. 日盲系统紫外诱导滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0507002.
- [13] Yan Hao. Design and fabrication of day type blind ultraviolet detection system filter[D]. Changchun: University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
闫昊. 日盲型紫外探测系统滤光膜的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [14] Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing, et al. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (12): 1207002. (in Chinese)
王正凤, 付秀华, 张静, 等. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1207002.
- [15] Deng Wenyuan, Jin Chunshui. Fabrication of solar-blind induced transmission filters by ion-beam sputtering methods [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2884–2890. (in Chinese)
邓文渊, 金春水. 离子束溅射制备“日盲”紫外诱导透射滤光片[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2884–2890.