

日盲系统紫外诱导滤光片的研制

付秀华 寇 洋 刘冬梅 唐赫岳 王 帅

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 紫外波段薄膜的研究在军事和民用领域都具有重要意义。国内外对该波段薄膜的研制多采用高、低折射率材料交替镀制的介质膜层结构,其缺点为对可见光截止度不好,易产生背景噪声。针对此问题从膜系设计理论出发,在对紫外薄膜材料特性、膜系优化设计技术、沉积技术、测试技术等方面进行研究的基础上采用紫外诱导透射滤光片的结构,并通过反复的理论计算与模拟实验,优化了材料的工艺参数,最终制备出在 265 nm 处透过、300~1000 nm 波段截止的紫外滤光片。

关键词 薄膜;紫外诱导滤光片;紫外日盲

中图分类号 O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0507002

Research of Ultraviolet Induced Transmission Filter for the Solar Blind System

Fu Xiuhua Kou Yang Liu Dongmei Tang Heyue Wang Shuai

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Researches of ultraviolet band optical thin films are significant important in both military and civilian fields. Domestic and international researches about ultraviolet film often use high and low refractive index materials to alternately plat dielectric layer structures. The disadvantage is that the cutoff level in visible band is not good, so there will be large amount of background noise. Aim at this problem, this paper uses the coating design theory and adopts an induced transmission filter structure based on the thin film of ultraviolet material properties, coating optimization design technology, deposition and testing technology. Through repeated theoretical calculation and simulation experiments, process parameters of different materials are optimized. We deposit the ultraviolet induced filter which transmits at 265 nm and cutoffs at 300~1000 nm.

Key words thin films; ultraviolet induced filter; ultraviolet solar blind

OCIS codes 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310

1 引 言

近年来紫外(UV)光学发展迅速,随着高灵敏度紫外探测器件研制取得突破,对紫外波段的研究日益广泛,紫外探测技术已朝着多波段、全方位的方向发展,可应用于军事、医疗、环境监测、空间天文和工业生产等众多领域^[1]。

紫外线是波长位于紫光和 X 射线之间的电磁辐射,不能引起视觉响应,可见光能透过的物质对于紫外线的某些波段却会引起强烈的吸收。太阳光透

过大气层后,由于大气中的臭氧层对 250 nm 波长附近紫外线有强烈的吸收作用,所以在近地大气太阳背景中的短波紫外线(UVC)辐射极其微弱,故该波段常被称为“日盲区”。如果能在该区域内能产生大量的紫外辐射,就能够在其微弱的背景下探测出紫外辐射源进而实现相关探测。

同其他探测方式相比,紫外波段的应用具有灵敏度高、虚警率低、隐蔽性强、结构简单和用途广泛等特点。鉴于 UVC 波段信号在传输过程中几乎不

收稿日期: 2012-12-12; 收到修改稿日期: 2013-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)和预研项目紫外技术(51317020103)资助课题。

作者简介: 寇 洋(1988—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜技术方面的研究。E-mail: kyoptical@yahoo.com.cn

导师简介: 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

存在大气背景噪声干扰,故此波段的研究对军事、通讯和空间天文等领域具有特别重要的意义。

从 20 世纪 60 年代开始,国外就已经开始了紫外波段探测洲际导弹发射的研究工作,并对紫外辐射理论进行了大量的研究,日本、荷兰、德国和前苏联等国家也发表了日盲区微弱紫外光探测方面的文献。而国内在紫外波段的应用总体起步较晚,虽偶有文献报道但却以基础理论研究居多,所以对紫外诱导透射光片的研制工作显得尤为重要。

2 膜系设计

2.1 材料的选择

2.1.1 基底材料的选择

目前在近紫外波段使用的光学材料十分有限,这也是国内外专家研究的热点之一。紫外波段可用的基底材料有紫外熔融石英(JGS₁)、氟化镁单晶(MgF₂)、氟化锂单晶(LiF)和氟化钙单晶(CaF₂)。熔融石英是合成石英玻璃的一种,由于紫外波段透射率较高、物理化学性能稳定且热膨胀系数低,已成为紫外常用的光学材料^[2]。

2.1.2 薄膜材料的选择

大多数的薄膜材料在该波段都会存在一定的吸收,所以可用的介质与金属材料就十分有限。而相对透射率较高、吸收较少的薄膜材料只有 Al₂O₃、HfO₂、MgF₂、LaF₃、UV-SiO₂^[3],金属材料有 Al、Ag、Au。高折射率介质材料的选择主要考虑是否具有较高的折射率和较低的消光系数^[4]。综合考虑,选择 HfO₂ 为高折射率材料。MgF₂ 具有折射率低,成膜牢固等特点^[5],所以选其作为低折射率材料。

金属材料选择方面,由于金属膜具有很宽的截止区,尤其是对长波具有很好的抑制作用,所以要与所选介质材料进行匹配,选择 Al 作为紫外诱导透射光片的金属材料。

2.2 膜系设计方案

针对紫外光学仪器对滤光片的要求,利用膜系设计软件模拟计算光学常数、设计膜系和评估误差。诱导透射滤光片的基本结构如图 1 所示。

诱导透射滤光片的优点是具有相对较高的透射率和宽的截止带,尤其是对长波具有很好的抑制作用^[6]。选用 Al 作为诱导透射滤光片的金属膜,是由于其与介质材料的黏附性较好,同时不容易受空气中的杂质影响。

在设计方面,金属膜的吸收不仅取决于金属膜本身的光学常数(折射率 n , 消光系数 k)和厚度,而

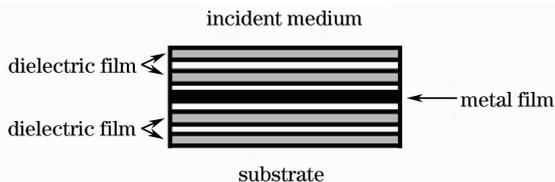


图 1 诱导透射率光片的膜层结构

且与相邻的介质导纳密切相关。只要选择正确的匹配导纳,就能使整个膜系的透射峰达到最高值。通常诱导透射滤光片的设计方法主要是导纳匹配法,根据金属膜的光学常数和选定厚度计算出最大透射率、出射匹配层和入射匹配层所需的导纳值,据此确定匹配膜层的相应参数。

为了得到最大的诱导透射率,在基片上设计一匹配膜堆,选定出射匹配导纳为 $X_0 + iZ_0$,相对简单的方法就是若干 1/4 波长膜堆叠加,最后一层蒸镀非 1/4 波长层,使导纳终止到 $X_0 + iZ_0$ 。假设基片上叠加了 1/4 波长的多层膜后,导纳值由 n_g 变为 μ ,并且最后一层非 1/4 波长膜层的折射率为 n_f ,相位厚度为 δ_f ,则有

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_f & \frac{1}{n_f} \sin \delta_f \\ in_f \sin \delta_f & \cos \delta_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\mu \end{bmatrix}. \quad (1)$$

使导纳终止在 $X_0 + iZ_0$,那么

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{\mu \cos \delta_f + in_f \sin \delta_f}{\cos \delta_f + i \frac{\mu}{n_f} \sin \delta_f} = X_0 + iZ_0, \quad (2)$$

其中相位厚度 δ_f 为

$$\delta_f = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2Z_0 n_f}{(n_f^2 - X_0^2 - Z_0^2)} \right]. \quad (3)$$

这里 \tan 可取第一象限与第二象限的解,所以 n_f 可以为高折射率,也可为低折射率,但 μ 必须小于基片的折射率,所以金属两边的匹配层必须为低折射率材料。同理可求出 1/4 波长的多层膜匹配层参数^[7]。

在实际诱导透射滤光片的设计中,金属膜层过厚会导致峰值透射率急剧下降,而金属膜层太薄则会产生其他波段的干扰峰,影响滤光片的截止度。为了获得任意厚度的金属膜与介质膜的最佳导纳匹配,只能采用计算机优化设计,得到介质膜的匹配厚度。

根据上述膜系设计理论,利用 TFC 软件进行膜系设计,初始膜系按带通滤光片的常规膜系设为 $G | (HL)^s M (LH)^s | A$,其中 G 表示基底, A 表示入射介质(空气), H 表示 HfO₂, L 表示 MgF₂, M 表示金

属 Al, S 表示膜层周期。根据设计要求给出最佳的金属膜层厚度, 经过反复计算与优化设计, 当金属膜厚度为 40~60 nm 时截止度较理想, 为得到最高的透射率, 经过优化后的膜系为 G|HLHL'/ML'/HLH|A, 膜系中 L' 为计算后的低折射率材料厚度, 其设计曲线如图 2 所示。

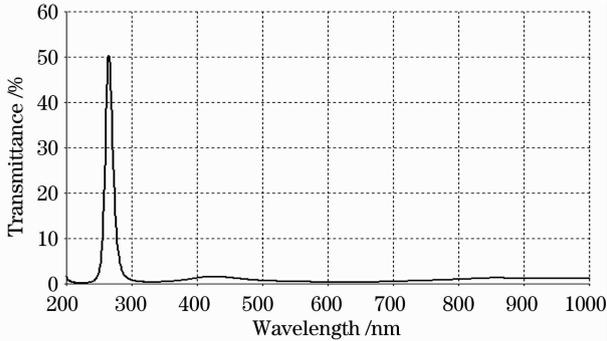


图 2 诱导滤光片设计曲线

Fig. 2 Design curve of the induced transmission filter

由设计曲线可以看出, 在 420 nm 附近有一明显次峰, 经过多次设计与计算发现, 该次峰不能被彻底消除。为避免次峰产生的背景噪声影响, 须对滤光片的背面诱导膜系进行重新设计与优化, 将次峰移出该波段内, 修改后的膜系为 G|HLHL''ML''HLH|A, 其设计曲线如图 3 所示。

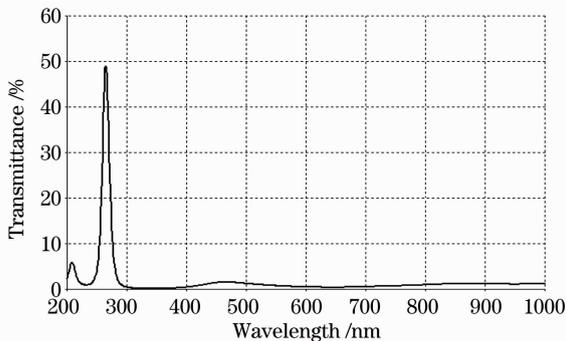


图 3 设计优化后诱导滤光片理论设计曲线

Fig. 3 Theoretical design curve of the induced transmission filter with the optimized layers

3 薄膜的制备

该滤光片的制备是在 TXX-700 真空镀膜机上完成的, 该设备配有双电子枪和考夫曼离子源, 双探头以及 IC/5 膜厚监控仪。

3.1 材料特性研究

在镀制介质膜时, 发现 HfO_2 很容易在镀膜过程中失氧, 造成薄膜中存在化学失配现象, 使其对紫外波段的吸收很大。所以在蒸镀 HfO_2 过程中必须充氧, 但是充氧过多又会导致 HfO_2 折射率偏低, 因

此需要反复优化工艺参数(例如: 温度和充氧量等), 最终找到稳定的充氧量、蒸发温度、真空度和相应的离子源参数来减少对紫外的吸收以提高紫外光波段的透射率^[8]。

3.2 实验温度的确定

在镀膜材料中, 氟化镁是低折射率材料里较为稳定的材料, 但前提是基板温度达到 200 °C 以上, 其优质的材料特性才能得到体现, 一旦温度降低, 其各项性质都会受到相应的影响, 从而影响整个诱导滤光片的性能。而金属铝则需要快速地蒸镀到低温的基板上, 基板温度一般小于 100 °C, 否则会严重影响薄膜的光学以及物理性能。因此, 通过反复对比实验, 才能找到合适的蒸发温度, 保证滤光片的各项性能。

给出三组温度测试实验, 其他参数保持不变。温度曲线如图 4 所示, 其相对应的实验测试曲线如图 5 所示。从实验中可以看出当金属蒸发温度过高

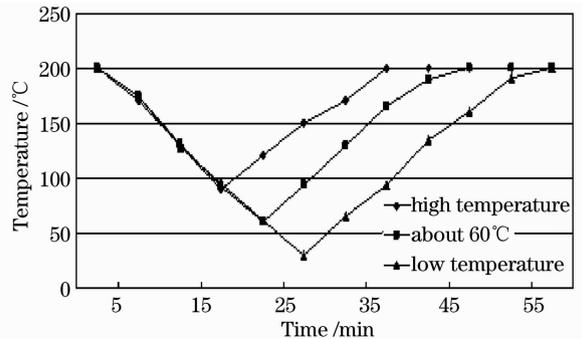


图 4 实验温度坐标曲线

Fig. 4 Coordinate curves of experimental temperature

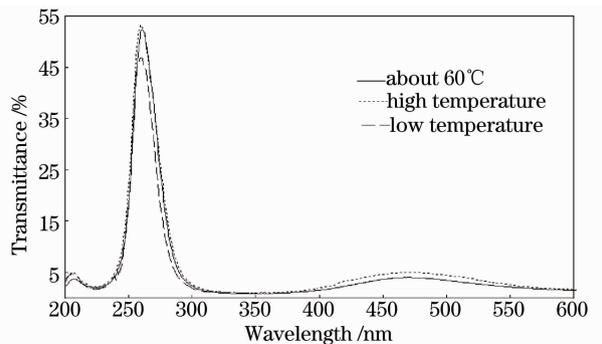


图 5 不同温度下实际光谱测试曲线

Fig. 5 Test curves of actual spectrum at different temperatures

时, 在可见波段存在明显次峰。当温度过低时, 紫外波段透射率降低, 经分析发现这是由于金属膜的化学活性非常强, 即便在只有微量的 O_2 时, 也很容易发生表面氧化。综合考虑, 当温度为 60 °C 左右时, 薄膜性能较稳定。

4 膜层性能测试和光学谱线分析

4.1 膜层性能测试

为了保证紫外滤光片的可靠性,需要对滤光片进行膜层质量测试。

1) 机械牢固度测试:利用黏性强度大于 3 N/cm 的胶带对膜层表面进行牢固度测试,保证胶带平整无气泡,然后沿薄膜表面垂直迅速拉起,反复几次,薄膜表面未产生脱膜现象。

2) 高温测试:将诱导滤光片放置 200 ℃ 的高温箱内 2 h 后,进行阶梯退火,观察到膜层表面未出现明显的皱褶现象,表明膜层内部应力匹配。

3) 湿热测试:在湿度为 95%,温度为 50 ℃ 条件下,放置 12 h,膜层未有明显变化。

4) 水泡测试:在室温条件下,将滤光片放置于去离子水中浸泡约 48 h,再进行加热,至沸腾 2 h 后,膜层无脱落现象。

4.2 光学透射谱分析

采用 UV3150 型分光光度计测量诱导滤光片的透射率光谱。检测滤光片 5 个位置以上,确保样品的稳定性、一致性和重复性,测量结果如图 6 所示。

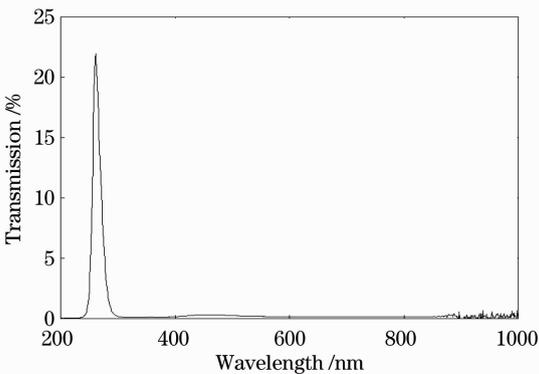


图 6 诱导滤光片实际光谱测试曲线

Fig. 6 Test curve of actual spectrum of the induced transmission filter

从光谱曲线看出,利用金属诱导和颜色片相结合的方法制备的滤光片在紫外波段的透射率达到 22%,对可见光的抑制平均小于 0.2%。

5 结 论

采用电子束真空镀膜与离子辅助蒸发相结合的方法制备薄膜,通过理论推算优化膜系,改进监控方法,调整工艺参数,研制了紫外透射滤光片。其在紫

外波段峰值波长为 265 nm,透射率为 22%,在 300~1000 nm 波段的截止度平均小于 0.2%。从测试曲线中可以看出,在 400~500 nm 波段的截止度还不够理想,分析后确认影响诱导滤光片的透射峰与截止度的主要因素是 Al 膜的成膜质量和两侧介质膜堆匹配度,这两个因素制约着紫外诱导滤光片的光谱性能,但通过对 Al 膜蒸镀工艺的进一步优化,同时改进匹配膜层参数,可有效地提升膜层的光学质量,这将是下一步研究工作的重点。

参 考 文 献

- Zhang Hailiang, Jia Honghui, Zhang Xueao *et al.*. Research of the ultraviolet radiation transfer in the atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 108~111
张海良,贾红辉,张学骛等. 紫外光大气辐射传输特性研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(s2): 108~111
- Xue Chunrong, Yi Kui, Wei Chaoyang *et al.*. Optical properties of vacuum ultraviolet and deep ultraviolet region substrate materials[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 287~290
薛春荣,易葵,魏朝阳等. 真空紫外到深紫外波段基底材料的光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(2): 287~290
- Xue Chunrong, Yi Kui, Qi Hongji *et al.*. Optical constants of film materials for deep ultraviolet/ultraviolet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2135~2139
薛春荣,易葵,齐红基等. 深紫外/紫外薄膜材料的光学常数研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2135~2139
- Wang Ying, Zhao Yuanan, He Hongbo *et al.*. Photoluminescence and photoluminescence excitation of hafnium dioxide (HfO₂) thin films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1104~1107
王莹,赵元安,贺洪波等. HfO₂ 薄膜的光致发光谱与激发谱[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1104~1107
- Zhong Disheng. Vacuum Coatin —— Selection and Application of Optical Material [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. 186~188,280
钟迪生. 真空镀膜—光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 186~188, 280
- Zhang Jiarong. The development of induced transmission filter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1991, **18**(2): 58~62
张家戎. 诱导透射滤光片的研制[J]. 光电工程, 1991, **18**(2): 58~62
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006. 118~123
唐晋发,顾培夫,刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006. 118~123
- Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing *et al.*. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1207002
王正风,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

栏目编辑: 韩峰