

3.5~4.0 μm 低温光谱带通滤光片的设计与研制

蔡 渊 刘定权 罗海瀚

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 新一代气象卫星对红外带通滤光片的光谱控制提出了很高的要求:滤光片在工作温度(92 K)下的光谱曲线被严格限定在一个由内、外框组成的区域之内。分别采用 Ge 和 SiO 作为高低折射率膜层材料,设计了含有 4 个谐振腔的带通膜系来提升通带边缘的陡度;对带通膜系中反射膜层的光学厚度进行了优化调整,压缩了通带内的波纹;根据膜层材料的折射率-温度变化特性,设计出了低温条件下符合光谱要求的带通滤光片。采用真空蒸发和光学极值监控的方法,研制出了 92 K 低温下符合内、外框限制要求的带通滤光片,其通带内的峰值透射率达到 93.2%,平均透射率达到 91%,波纹幅度控制在 5.2% 以内。

关键词 薄膜;光学薄膜;带通滤光片;低温光谱;中波红外

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0107001

Design and Fabrication of 3.5~4.0 μm Band-Pass Filter Working at Cryogenic Temperature

Cai Yuan Liu Dingquan Luo Haihan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract There is a very high requirement for the spectrum of the band-pass filter in the new generation meteorological satellite that at working temperature (92 K), the spectrum curve of the filter must be within an area restricted by an inner rim and an outer rim. Using germanium (Ge) and silicon oxide (SiO) as the higher and the lower refractive index materials respectively, a band-pass film system with 4 resonators is designed to obtain steep slopes at pass band boundaries. The ripple in the transmission region is flattened by means of optimizing the thickness of reflecting layers in the band-pass film system. The band-pass filter that satisfies the cryogenic spectrum requirements is designed, based on the refractive index versus temperature characteristic. Using vacuum evaporation technics and photometric extrema monitoring method, the band-pass filter has been developed and it meets the requirement of the inner-outer-rim specification at 92 K. In the transmission region, its maximum transmittance is 93.2%, the average transmittance is 91%, and the amplitude of the ripple is 5.2%.

Key words thin films; optical thin film; band-pass filter; cryogenic spectrum; middle infrared

OCIS codes 310.1860; 260.3060; 310.4165; 310.6850

1 引言

气象卫星的光学遥感仪器通常利用多个红外光谱通道进行探测,3.5~4.0 μm 是最为常用的光谱通道之一。为了提高仪器的光谱信噪比,提升对目标的探测与识别能力,滤光片的光谱控制水平是一个关键因素。为此,新一代气象卫星对滤光片的光谱控制提出了很高的要求。

2005 年,张子业等^[1]利用三半波(即 3 个谐振腔)的膜系结构研制了红外带通滤光片。2007 年,查家明等^[2]对中波红外滤光片的带宽和膜系结构进行了分析,但没有涉及到低温情况和光谱平滑。现在,要实现低温条件下的光谱控制要求,需要采用具有 4 个谐振腔的膜系结构,平滑中波红外通带区域明显的光谱波动,并且对光谱随温度的漂移进行预

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

作者简介: 蔡 渊(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事红外光学薄膜方面的研究。

E-mail: ssccyys@yahoo.com.cn

先设计。本文设计并研制了 92 K 低温下符合光谱要求的 3.5~4.0 μm 带通滤光片,其平均透射率达 91%,波纹幅度控制在 5.2%以内。

2 膜系设计

新一代气象卫星对滤光片的指标要求并非简单的数值指标,而是一个由内框和外框组成的框图。在 92 K 低温下,滤光片光谱曲线要严格限定在内、外框之间,并尽量贴近外框以获取最大的带内光谱能量,如图 1 所示。这对带通滤光片膜系的初始设计提出了更高的要求。

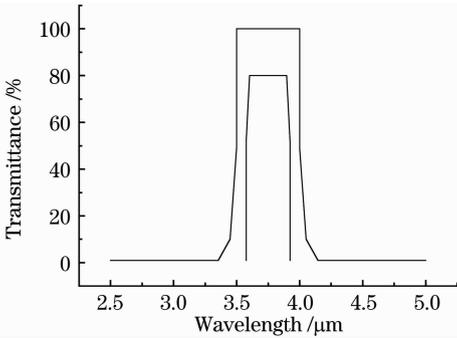


图 1 光谱限定框图

Fig. 1 Diagram of spectrum specification

构成带通滤光片通常有两种方法:第一种是基片两面分别镀制长波通和短波通截止膜系;第二种是基片两面分别镀制含多个谐振腔的带通膜系和截止膜系^[3]。应用第一种方法,可以满足较宽的通带宽度和截止宽度要求,但在制作时,长波通和短波通截止膜系的截止波长都要求有准确的定位,而且为了平抑通带波纹而加入的非规整膜层给监控带来较大难度;第二种方法则只需要准确定位带通膜系的位置,而截止膜系的光谱定位要求就不那么严格了,这样就可以充分利用截止膜系透射带内透射率较高且光谱曲线较平坦的部分,其缺点是通带宽度有限。第二种方法的好处是通带形状容易保证,而且用较少的膜层数即可得到较好的通带边缘陡度^[2]。当两种设计方法都能达到设计目标时,第二种方法是较优的选择。

2.1 通带的设计

首先,选择比较常用的在该波段光学透明的高、低折射率膜层材料。高折射率材料选用晶体锗(Ge),其折射率约 4.0;低折射率材料选用一氧化硅(SiO),其折射率约 1.79。然后,依据下式确定中心波长 λ₀:

$$\lambda_0 = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2) \approx 3.73 \mu\text{m}. \quad (1)$$

根据指标要求,带通滤光片的半功率带宽(2Δλ)约为 0.5 μm。以上数据即为初步的设计目标。

含谐振腔的基本带通膜系的结构为:反射膜|间隔层|反射膜。在间隔层两边对称分布的反射膜有两种主要形式 HLH…H|LL|H…HLH 或 HLH…HL|HH|LH…HLH,其中 H、L 分别代表一层高、低折射率的规整膜层,其光学厚度为设计波长的 1/4。通带的带宽可由以下公式估算^[4,5]:

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x} n_g}{m\pi n_H^{2x+1}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m}$$

high refractive index spacer layer, (2)

或

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x-1} n_g}{m\pi n_H^{2x}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m}$$

low refractive index spacer layer, (3)

式中 n_L, n_H 分别为高、低折射率材料的折射率; n_g 为基片折射率,此处基片为 Ge; x 为反射膜内高折射率膜层数; m 为谐振腔干涉级次,它与间隔层厚度的关系为 m = 2nd/λ₀。对于半波间隔层, m = 1。

从带宽估算公式中可以看出,干涉级次 m 越低,反射膜层数越少,带宽越宽。此处的滤光片带宽要求(2Δλ/λ₀ ≈ 0.13)在含谐振腔的带通膜系中属于较宽的情形^[2],因此从较小的 m 和 x 起始值来估算带宽。

令 m = 1, x = 1, 代入(2)式,得到高折射率间隔层情况下 2Δλ ≈ 0.53, 同样,得到低折射率间隔层情况下 2Δλ ≈ 0.24。当 m = 1, x = 1 时,在低折射率间隔层情况下的带宽与设计目标不符,而在高折射率间隔层情况下的带宽已经和设计目标很接近了。于是以 m = 1, x = 1, 高折射率材料作为间隔层的膜系作为初始设计。膜系基本结构为 LHL|HH|LHL。

将两个或多个基本结构串置起来,可以提高光谱曲线的矩形度。含 3 个谐振腔的带通膜系结构为 Ge|L|HH|LHL|HH|LHL|HH|LHL。

保留外层的 LHL 是为了确保最外层为一氧化硅,其表面反射损失小,也能对膜层起到一定的保护作用。其光谱曲线(设计曲线均未考虑背面反射,材料吸收可以忽略)如图 2 中 a 曲线所示。从光谱曲线看,含 3 个谐振腔的膜系已经基本能够满足内外框指标要求,但大约在透射率为 0.1~0.01 倍峰值处,仍有一些露出限制框外,需再做进一步完善,于是采用含 4 个谐振腔的带通膜系 Ge|L|HH|LHL|HH|LHL|HH|LHL|HH|LHL,其光谱曲线如

图 2 中 b 曲线所示,光谱曲线全部进入外框之内,但有较深的通带波纹,波纹振幅为 17%,需要进一步压缩。至于将长波通和短波通截止膜系结合组成带通滤光片的设计方案^[6],在此不再叙述。

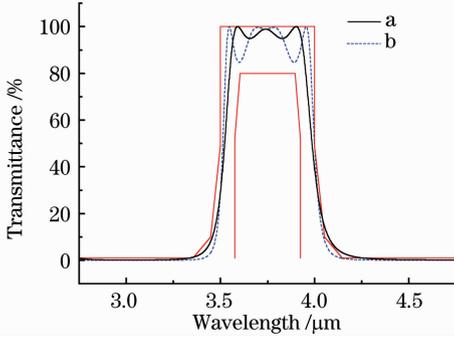


图 2 滤光片理论光谱曲线。(a)三半波和(b)四半波
Fig. 2 Theoretical spectra of the filters, (a) 3 half-waves and (b) 4 half-waves

2.2 波纹的压缩

规整的带通膜系的光谱曲线在通带的上升沿和下降沿附近都有很深的波纹,而且随着谐振腔数目的增加,波纹会变得更加密集(如图 2 所示)。通带波纹的压缩是带通膜系设计过程中最困难的部分。

上述四半波膜系对于中心波长的等效界面导纳 $Y = n_i^2/n_g$,最外层对 Y 影响较大,选择合适的最外层材料可以减小波纹。例如,将最外层改为 ZnS(折射率约 2.3),得到如图 3 所示的光谱曲线。

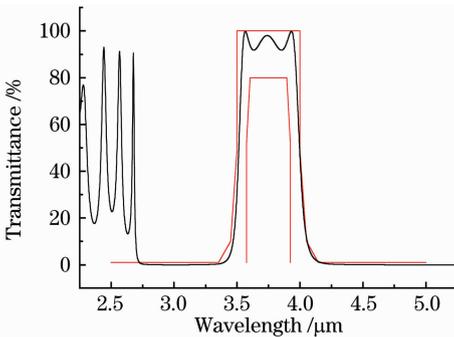


图 3 最外层为 ZnS 的四半波膜理论光谱曲线
Fig. 3 Theoretical spectrum of 4-half-wave filter whose outermost layer is ZnS

通带的光谱曲线平滑了很多。但这种方法在实际镀膜过程会遇到一些问题:在镀膜前需要考虑 3 种材料在工件架特定区域的膜厚沉积比例。如果只要考虑 2 种材料的膜厚沉积比例,那么问题就简单很多,于是尝试只用 2 种材料的膜层设计。

通常压缩通带波纹的方法是在膜系的基片侧和空气侧增加匹配层^[7],但由于所选的基片材料是折射率较高的 Ge,与空气的折射率相差很大,需要至

少增加 2 种材料才能实现良好的光学匹配,但在可靠性方面仍会存在问题。转而考虑调整各谐振腔内膜层的厚度,经过尝试后发现,如果改变谐振腔中反射层内膜层厚度会明显影响通带波纹,而整个通带的波形仍能保持良好。于是借助膜系设计软件的相关优化算法^[8,9],对反射层内的膜层厚度进行优化,得到的优化效果如图 4 所示。

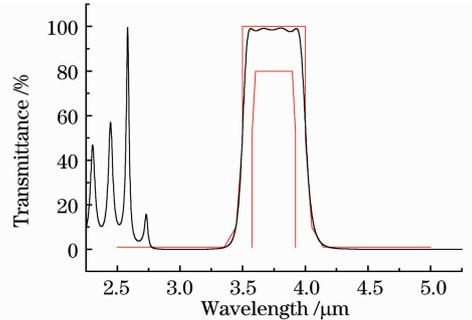


图 4 优化后的四半波膜光谱曲线

Fig. 4 Optimized spectrum of 4-half-wave filter

优化的结果中出现了较多的非规整膜层,要得到图 4 那样理想的光谱曲线需要精确控制膜层厚度,这对于使用光电极值法监控膜厚而言有很高的难度。于是将膜系进一步修改成形式 $\text{Ge}|\text{L}|\text{HH}|k_1(\text{L H}/2\text{L})|\text{HH}|\text{LHL}|\text{HH}|k_2(\text{L H}/2\text{L})|\text{HH}|k_3(\text{L H}/2\text{L})$ 。

通过优化系数 k_1, k_2, k_3 来得到较为理想的设计效果,这样,在使用光电极值法监控膜厚时,监控光波长就不必频繁改变,以便得到较为稳定的镀膜结果。最后设计出的膜系为 $\text{Ge}|\text{L}|\text{HH}|1.18(\text{L H}/2\text{L})|\text{HH}|\text{LHL}|\text{HH}|1.18(\text{L H}/2\text{L})|\text{HH}|1.13(\text{L H}/2\text{L})$,其光谱曲线如图 5 所示,通带内的波纹振幅为 5.6%。

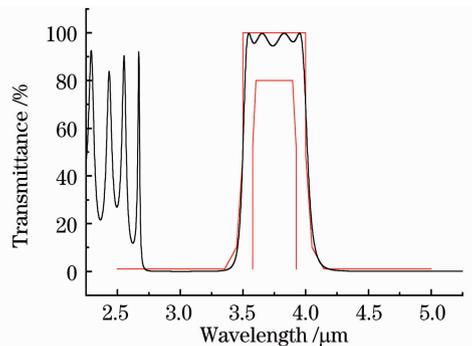


图 5 便于监控的四半波膜系理论光谱曲线
Fig. 5 Theoretical spectrum of 4-half-wave filter which is more convenient to monitor

2.3 低温光谱的控制

背景的热辐射对红外成像系统有不可忽视的影

响。为了消除背景热辐射的影响,需要让该波段(3.5~4.0 μm)的滤光片与探测器一起工作在 92 K 的低温条件下,因此,滤光片的光谱曲线也应该是在 92 K 低温下测量得出的结果。

受膜层材料的折射率温度特性的影响,滤光片低温条件下的光谱曲线相对于室温会发生移动。由于膜层所选用的材料和膜系设计是固定的,因温度变化产生的光谱偏移量也是固定的。经过多次低温光谱测试,以 Ge 为基片,Ge 和 SiO 分别作为高低折射率膜层材料,采用上节所述的最终设计膜系,并且完成背面的前截止膜系后,滤光片在 92 K 低温下的光谱曲线较室温要向短波方向偏移(45±3)nm,如图 6 所示。掌握了滤光片光谱曲线随温度的变化规律后,可以通过室温下测量的光谱曲线,外推得到 92 K 低温下的光谱。

利用外推得到的低温光谱曲线,利用光谱内外框的要求进行初步筛选,可以大大减轻低温光谱测量的工作量。通过初步筛选的滤光片,再进行低温光谱测量,测量时保持了测量样品室的良好真空度,避免了光路中的气氛干扰;利用温度控制避免了窗口表面因低温可能产生的凝结,保证了测量的准确性。

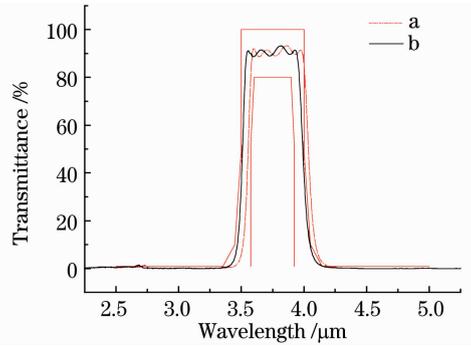


图 6 实测光谱曲线。(a)室温;(b) 92 K
Fig. 6 Measured spectrum of the filter. (a) Room temperature; (b) 92 K

3 制备与光谱测量

滤光片的光学膜层在真空室中以蒸发沉积的方式完成,设备是成都南光公司生产的 ZZS-700/G 型光学镀膜机。高折射率材料 Ge 采用电子束蒸发沉积,低折射率材料 SiO 采用热电阻蒸发沉积。在膜层生长过程中,真空度好于 1×10^{-3} Pa,沉积温度保持在 220 °C~250 °C 范围,样品保持公转,采用光学极值法监控膜层的光学厚度,如图 7 所示。

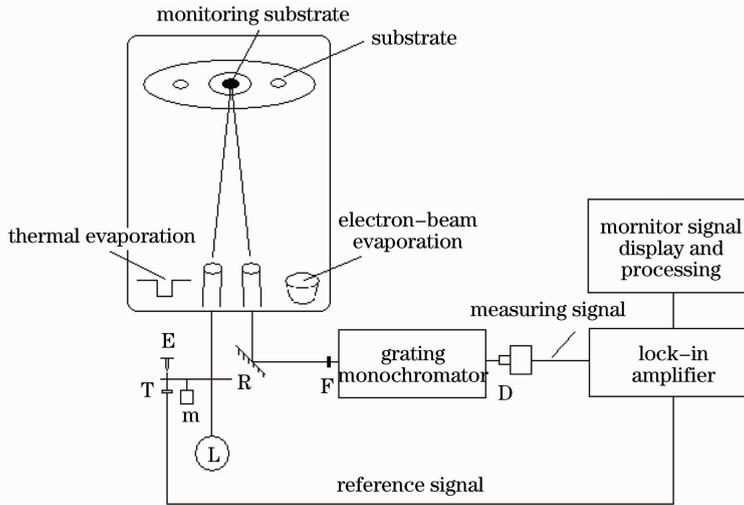


图 7 薄膜制备与膜厚监控示意图

Fig. 7 Schematic representation of film fabrication and thickness monitoring system

红外二极管 E 发出的光经过调制盘 m 调制后被红外探测器 T 接收,生成参考信号,进入锁相放大器;光源 L 发出的光束经过 m 的调制,再经比较片(监控片)及 R 的反射后,通过光栅单色仪,形成某一特定波长的光信号,被光电探测器 D 接收后,生成测量电信号,进入锁相放大器。在未镀膜时,参考信号与测量信号经过调零达到平衡,在蒸镀过程

中参考信号是相对不变的,经过锁相放大器的处理,最后得到的仅仅是随膜层厚度变化而变化的那部分信号,即用于监控膜层厚度的监控信号。从示意图中可以看出,整套装置监控的是比较片上的膜厚,要确定基片上的膜厚,还需乘上一个比例系数,此系数在各种镀膜工艺条件不变的情况下是相对固定的,可通过多次实验得到。

滤光片室温及低温下的光谱曲线的测量都使用了美国珀金埃尔默(PerkinElmer)公司的 FT-IR Spectrum GX 型傅里叶变换红外光谱仪。在对滤光片进行低温测量时,需先将其放入一个带红外透光窗口的真空测量样品室,此样品室与一个温控装置相连,在加入液氮制冷液的情况下,可以进行从 80 K 到室温的不同温度条件下的光谱测量,温控精度为 0.1 K。

实际测得滤光片的低温(92 K)和常温光谱曲线在图 6 中给出,通带的峰值透射率达到 93.2%,顶部平均透射率达到 91%,波纹振幅约 5.2%。

4 分析与讨论

在设计带通滤光片时,为了压缩通带波纹,对基本周期结构进行了适当调整。在本文的设计过程中就是通过调整反射膜层厚度达到压缩通带波纹的目的。也可以看作单个谐振腔两侧分别加镀有相似色散的对称膜系作为匹配层,而匹配层不仅增加了带通膜系的矩形度,而且压缩了通带波纹。

制作出的滤光片的带宽较设计结果略窄。从(2)式可以看出,在干涉级次确定的情况下,谐振腔滤光片的带宽和低、高折射率材料的比值 n_L/n_H 有关。带宽变窄主要是因为 n_L/n_H 比值小于理论设计时采用的折射率比值。之所以产生这种变化,可能是由于部分 SiO 在镀制过程中产生了组分不同的膜层,部分膜层折射率低于理论值;而同时 Ge 膜的折射率基本保持理论值,造成 n_L/n_H 值变小,带宽偏窄。

测试得到的 92 K 的光谱曲线相对室温要向短波方向移动约 45 nm,而通带宽度和波形没有明显变化。光谱曲线发生偏移的因素包括膜层的折射率温度系数、基板和膜层材料的线性热膨胀系数、材料的泊松比、膜层的聚集密度等^[10]。其中,两种膜层的折射率随温度降低均表现出一定程度的减小,这是主要的影响因素。图 6 中,低温下通带宽度较常温没有明显变化,所以温度变化对 n_L/n_H 值影响较小。在低温条件下,热膨胀系数的影响也会造成膜层的光学厚度减小,光谱曲线整体向短波方向移动,但这一因素的影响很小,可以忽略不计。

5 结 论

采用 Ge, SiO 作为高低折射率膜层材料,设计

了含 4 个谐振腔的带通膜系和前截止膜系相结合的 3.5~4.0 μm 带通滤光片。采用对谐振腔中反射层内膜层厚度进行调整的方法,实现了通带波纹的压缩。由于滤光片需要在低温条件下工作,膜层材料的折射率温度特性和受冷收缩的特性不可避免,低温条件下光谱曲线向短波方向有一定的漂移,漂移量固定。滤光片在 92 K 低温下实际测量的光谱曲线符合内外框的限定要求,同时完成了波长小于 6 μm 的带外背景光谱抑制。

参 考 文 献

- Zhang Ziyue, Zhou Dongping, Zhang Fengshan. Three half-wave filter and analysis of layer thickness[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 710~712
张子业, 周东平, 张凤山. 三半波带通滤光片的制作与膜厚分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 710~712
- Zha Jiaming, Li Sicheng, Tang Qianlong. Structure, bandwidth estimation and adjustment of medium bandpass infrared filter[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(2): 151~155
查家明, 李斯成, 唐乾隆. 红外中带滤光片的结构, 带宽估算及调整[J]. *应用光学*, 2007, **28**(2): 151~155
- I. S. Gainutdinov, A. S. Nikitin, V. A. Ivanov *et al.*. Cutoff and band-pass interference filters for the UV region[J]. *J. Opt. Technol.*, 2002, **69**(12): 907~909
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 140~160
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. 140~160
- H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters[M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001. 260~280
- Huang Xingeng. Development of wide-passband infrared filter with high rejection rate for infrared earth sensor[J]. *Optical Instruments*, 2001, **23**(5): 169~173
黄心耕. 红外地球敏感器用高截止度宽带红外滤光片研制[J]. *光学仪器*, 2001, **23**(5): 169~173
- Chen Youhua, Wang Zhibin. Design and error analysis of infrared dual-channel band pass filter with wide rejection band for detection application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3064~3068
陈友华, 王志斌. 探测用宽截止红外双通道带通滤光片的设计及误差分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3064~3068
- Zhang Xiaojuan, Qiao Guanjun, Liu Hanchen. Simulated annealing algorithm for multi-layer optical thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3660~3664
张晓娟, 乔冠军, 刘汉臣. 多层光学薄膜模拟退火算法的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3660~3664
- Chen Naibo, Wu Yonggang, Ling Leijie *et al.*. Thin-film polarizers designed by the needle method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 590~596
陈乃波, 吴永刚, 凌磊婕等. 基于针法的平板偏振膜设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 590~596
- Bai Shengyuan, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Optical stability of thin film filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 576~580
白胜元, 顾培夫, 刘旭等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5): 576~580