

文章编号: 0253-2239(2010)10-3064-05

# 探测用宽截止红外双通道带通滤光片的设计及误差分析

陈友华<sup>1,2</sup> 王志斌<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中北大学物理系, 山西 太原 030051; <sup>2</sup> 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要** 为满足探测 1,2 丙二醇二硝酸脂有毒气体浓度的红外探测元件抑制带截止深度深、通带内平均透射比高、波纹系数小等要求,采用等效折射率理论与局部优化相结合的设计方法,选用 PbTe/ZnSe 作为高低折射材料,采用长波通膜系、短波通膜系以及双半波膜系设计了截止深度深、双通道、通带宽度合适的红外滤光片,通带分别为 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  及 11.9~12.2  $\mu\text{m}$ ,通带内平均透射比分别在 90% 及 65% 以上;对所设计的膜系进行了薄膜物理厚度和膜层折射率的误差分析。分析表明,薄膜制备时沉积速率精度应控制在 3.5% 以内,材料折射率的变化应控制在 3% 以内,与膜层折射率相比,薄膜物理厚度对平均透射比的影响小,并且双半波膜系对厚度以及折射率变化更敏感。

**关键词** 薄膜光学;双通道带通滤光片;等效折射率;误差分析

**中图分类号** O484.4 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3064

## Design and Error Analysis of Infrared Dual-Channel Band Pass Filter with Wide Rejection Band for Detection Application

Chen Youhua<sup>1,2</sup> Wang Zhibing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Physics Department, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup> Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to meet the requirements of high transmittance in pass bands, high reflectance in rejection bands, small ripple coefficient for detecting 1, 2-propanediol dinitrate with infrared detector cell, an infrared dual-channel band pass filter with proper rejection band has been designed using the combined method of the Herpin refractive index principle and local optimization, as well as choosing PbTe/ZnSe as the material of high/low refractive index. A dual channel filter with pass bands of 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  and 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  and the average transmittance exceeds 90% and 65% respectively was designed. An error analysis of layer physical thickness and refractive index has been done for the design, which shows that the precision of deposition rate should be controlled within 3.5%, meanwhile, the refractive index accuracy should be lower than 3%, the refractive index has greater effect on the reflectance than the thickness, and the double half-wave film is more sensitive in the changes of refractive index and the thickness.

**Key words** thin film optics; dual-channel band pass filter; Herpin refractive index; error analysis

### 1 引 言

对 1,2 丙二醇二硝酸脂挥发浓度的探测除要求滤光片的抑制带截止深度深、通带内平均透射比高、

波纹系数小外,因其剧毒性<sup>[1]</sup>,对探测器的灵敏度也有很高要求。然而光电探测器的自身灵敏度是有限的,如果不改变器件结构和不增加探测窗口的同

收稿日期: 2010-01-04; 收到修改稿日期: 2010-03-26

作者简介: 陈友华(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学镀膜和光学设计等方面的研究。

E-mail: tiger1986ren@163.com

导师简介: 王志斌(1966—),男,教授,主要从事光学检测技术,激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: wangzhibing@nuc.edu.cn

时,使用双通道带通滤光片替换原先的单通道滤光片,增加探测窗口探测光的入射强度就可以大大提高探测器的灵敏度,同时也避免了使用传统微型滤光片阵列带来的光路复杂、成品率低等问题<sup>[2]</sup>。

宽通带的双通道滤光片目前一直没有非常简单的结构能够解决。本文通过在传统的由长波通和短波通截止膜系构成第一个通带的基础上,增加一个双半波膜系,产生第二个通带,并辅之以自动优化技术,适当调整膜系中个别膜层的厚度,设计实现了 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  及 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  的宽截止双通道带通滤光片。同时研究了制膜过程中膜厚和折射率的变化、每一层膜光学厚度的变化对薄膜光学性质的影响,并选择了适当的过渡层,进行了相应的膜系匹配设计。

## 2 长波红外双通道带通滤光片的设计

滤光片的设计主要有解析法和自动优化法。利用自动优化法设计出的滤光片具有优良的光谱性能,但由于得到的各膜层光学厚度不同,有时折射率也不同,给薄膜沉积带来了一定困难。解析法得到的是规整膜层,一般仅由两种材料组成,工艺上易实现,但光谱性能有时稍差。

文献[3,4]基于传统的法布里-珀罗标准具的分形结构并引入光子晶体中的缺陷层概念<sup>[5]</sup>,设计出了位置相对可调的双通道带通滤光片,结构非常简洁,但依然存在截止带过窄,通带带宽过小的问题。Aguilera 等<sup>[4]</sup>采用 Needle 法<sup>[6,7]</sup>,从简单膜系出发设计出了在中远红外区的双通道带通滤光片,得到理想的带通透射特性。但这种方法得出的膜层厚度相当复杂,甚至包含了很多难以镀制的膜层。因此,采用在解析法的基础上通过局部优化的方法实现长波红外双通道带通滤光片的设计。

在设计中,主要是考虑膜系的截止深度及带宽是否符合要求,膜系的等效折射率与 Ge 基底以及空气入射介质的匹配问题。

对于 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  的通带,采用传统的截止波长为 5.9  $\mu\text{m}$  的长波通膜系和截止波长为 6.2  $\mu\text{m}$  的短波通截止膜系构成。对于基本膜系为(pqp)结构的对称周期性膜系:

$$\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^s \text{ 或 } \left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^s, \quad (1)$$

其等效折射率  $E$  为<sup>[8]</sup>

$$E = n_p \sqrt{\frac{\cos \delta_{H/L} (n_p + n_q)^2 - (n_p^2 - n_q^2)}{\cos \delta_{H/L} (n_p + n_q)^2 + (n_p^2 - n_q^2)}}, \quad (2)$$

式中  $H$  和  $L$  分别表示  $\lambda_0/4$  光学厚度的高、低折射率膜层, $n_H$  和  $n_L$  分别是  $H$  和  $L$  膜料的折射率, $\delta_{H/L}$  表示  $H$  或  $L$  的相位厚度, $s$  为对称膜系的周期数。截止带宽度为

$$\frac{\lambda_{c0}}{\lambda_c} = 1 \pm \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right), \quad (3)$$

式中  $\lambda_c$  和  $\lambda_{c0}$  分别为截止波长和截止带中心波长。

因此,为了实现宽截止带,应尽可能选择折射率差异较大的高、低折射率材料。红外波段滤光片的镀膜材料相当有限,且多数比较软,耐久性差。目前常用的主要有 ZnS,ZnSe,PbTe,Ge 等<sup>[9]</sup>,它们在 4~16  $\mu\text{m}$  的范围内的吸收系数小,易沉积。本文设计基于双通道等综合因素的考虑,选用 PbTe/ZnSe 组合膜层,基底选择较薄的 Ge 片。

对于 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  的通带,通过在上述方式实现的膜堆中增加一个中心波长为 12.05  $\mu\text{m}$  的双半波膜系实现。

最终膜系设计如下:

$$\text{Air}|2.512L0.368(0.5HL0.5H)^80.673L(0.5LH0.5L)^2(HLH)(HLHLHLHLH)(HLHLL)|\text{Ge}|0.7L0.673H(0.5LH0.5L)^8$$

入射角  $\theta=0$ ,中心设计波长 12.05  $\mu\text{m}$ 。兼顾到膜系整体的透射比以及通带两侧的陡峭程度,选定周期数为 8。膜系中,(0.5LH0.5L)<sup>8</sup> 为短波通主膜系,L(0.5LH0.5L)<sup>2</sup> 为匹配膜系,(0.5HL0.5H)<sup>8</sup> 为长波通膜系,(HLH)(HLHLHLHLH)(HLHLL)为双半波膜系,其中,(HLHLHLHLH)为主膜系,(HLH)和(HLHLL)为匹配层。

## 3 计算结果

由长波通膜系和短波通膜系组成的膜堆可实现 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  的通带,但在该位置的通带内会存在一个很尖锐的凹谷,由图 1 的短波通膜系的透射图像可知,该凹谷主要是短波通膜系的波纹引起的。另外,在长波区域存在着次峰,一般在设计单通道滤光片时,往往采用在短波通和基底之间增加一级消次峰膜系的方法加以消除<sup>[7]</sup>,并可以使截止深度增加。

设计中,因需要在实现了 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  通带的基础上,在 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  处再生成一个通带,因此,不能采用传统的(0.5LH0.5L)<sup>s</sup> 结构的消次峰膜系,而是选用(HLH)(HLHLHLHLH)(HLHLL)|Ge 结构的双半波膜系,其中,(HLHLL)和(HLH)为匹配层,使主膜系能与基底以及其他膜系较好的匹配,

(HLHLHLHLH)为主膜系,可在  $12.05 \mu\text{m}$  处产生一个通带,并将截止带延伸至  $17 \mu\text{m}$  附近,同时,该膜系的截止范围下限大于  $9 \mu\text{m}$ ,因此对第一个通带不产生影响。

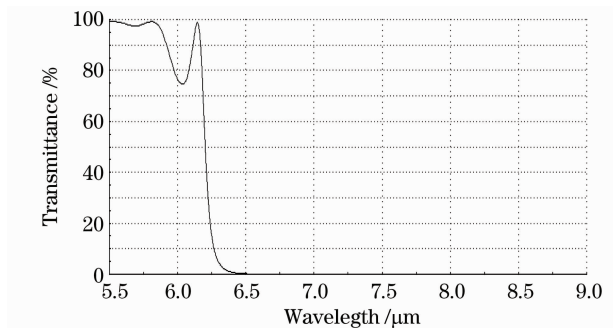


图 1 短波通膜系的计算透射比

Fig. 1 Calculated transmittance spectrum of short wave passed film

#### 4 通带内波纹的压缩

短波通膜系在中心波长处的等效折射率约为 1.3。与入射介质空气的折射率能够很好地匹配,但是由于锗的折射率是 4.0,相差过大,经计算与调整,在锗与短波通膜系之间增加了一层  $\lambda_0/4$  光学厚度的 ZnSe 膜层,0.7 为修正系数,以达到膜层基本匹配。由图 2 可知,短波通膜系在  $12.05 \mu\text{m}$  及  $6 \mu\text{m}$  附近的透射曲线并不理想,对两个通位置的光谱性能均会产生影响,必须加以消除,经分析,这两处的波纹幅度变化较大主要原因是组成滤光片的各膜系的等效折射率不匹配所致。因此,利用设计软件适当修正其中几层薄膜的光学厚度即可<sup>[10,11]</sup>。修正后的膜系光谱透射比曲线如图 3 所示。

考虑到双半波膜系的匹配问题。利用等效折射率理论<sup>[12,13]</sup>,决定将其置于基底和长波通膜系之间,经过计算,发现双半波膜系的匹配层(HLHLL)

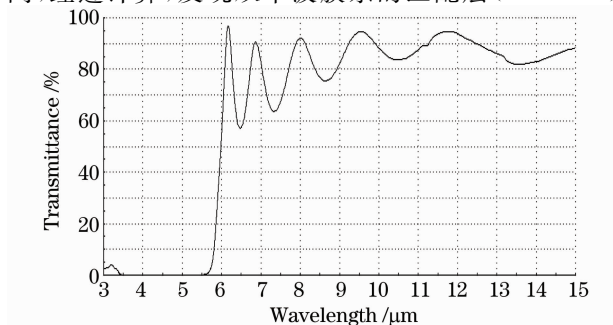


图 2 长波通膜系的计算透射比

Fig. 2 Calculated transmittance spectrum of long wave passed film

和主膜系组合后的等效折射率约为 5.5。与基底 Ge 基本匹配,因此无需增加额外的匹配层。而(LHL)不能很好的与长波通膜系匹配,需要增加一折射率为  $3.67$ [即  $(2.4 \times 5.3)^{1/2}$ ]的匹配层  $L(0.5 LH0.5L)^2$ ,使得双半波膜系能与长波通膜系匹配。最终合成后的膜堆光谱透射比曲线如图 4 所示。

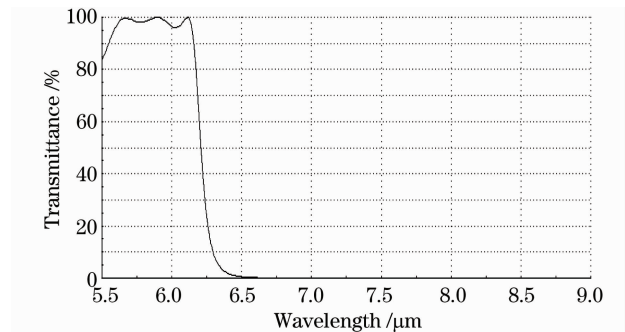


图 3 修正后短波通膜系的理论计算透射光谱

Fig. 3 Calculated transmittance spectrum of adjusted short wave passed film

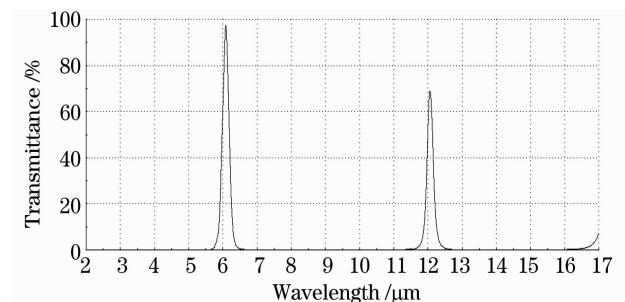


图 4 高截止双通道带通滤光片理论计算透射光谱

Fig. 4 Calculated transmittance spectrum of infrared dual-channel band pass filter with wide rejection band

#### 5 误差分析

就真空镀膜而言,若想制备出与计算值完全相同的薄膜是不大可能的。薄膜的光学厚度偏差是影响其剩余反射率的重要因素,如果膜厚与计算值有偏差,那么光谱曲线中的两个中心波长将产生位移;膜层折射率的变化同样也会引起整个光谱曲线的变形<sup>[14]</sup>。为了确定薄膜的制备精度,需要分析在制备时的膜厚误差控制、膜料折射率误差控制和敏感层的控制。

##### 5.1 膜厚误差对透射比及中心波长的影响

对每一种误差情况分别进行了 4 次模拟计算,并与未变化的透射比曲线(虚线部分)进行比较。

图 5(a)~(c)为薄膜物理厚度发生均匀变化时透射比及中心波长的变化情况。从图中可以看出,当膜厚以均匀分布变化  $3.5\%$  时,两个通带的峰值

透射比大小并未发生太大变化,但 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  处的通带位置发生约 50 nm 的偏移,进而造成整体的平均透射比的下降。根据探测器对薄膜整体透射比的要求,实际制备时应当把膜厚精度控制在 3.5%

以内。同理,当薄膜物理厚度发生正态变化时的透射比及中心波长的变化情况如图 5(d)~(f)所示。实际制备时应当把膜厚精度控制在 2.5%以内。

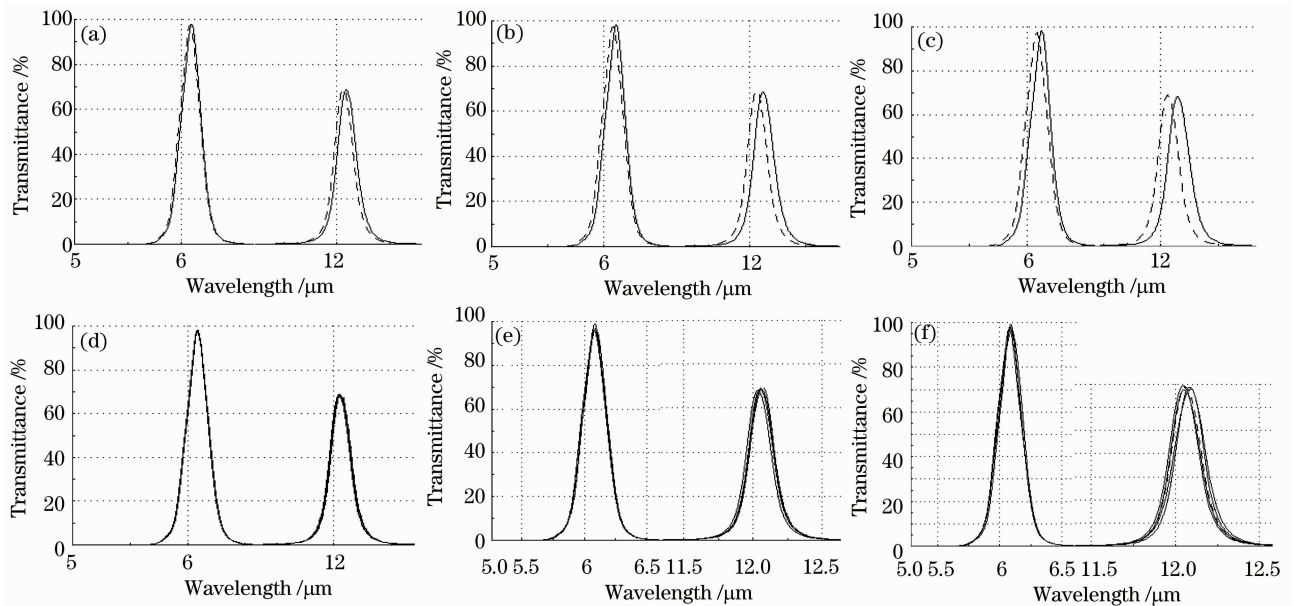


图 5 物理厚度以均匀分布变化(a)2%,(b)2.5%,(c)3.5%,及物理厚度以正态分布变化(d)1%,(e)2%,(f)2.5%的透射比  
Fig. 5 Transmittance when layer physical thickness varies (a) 2%, (b) 2.5%, (c) 3.5% in a uniform distribution, Transmittance when layer physical thickness varies (d) 1%, (e) 2%, (f) 2.5% in a normal distribution

5.2 折射率误差对透射比及中心波长的影响

图 6(a)~(c)为膜层折射率发生均匀变化时透射比及中心波长的变化情况。从图中可以看出,当折射率以均匀分布变化 3%时,两个通带的峰值透

射比未发生太大变化,但 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  处的通带中心位置发生约 50 nm 的偏移,进而造成相应的平均透射比的下降。根据探测器对薄膜的要求,实际制备时应当把膜厚精度控制在 3%以内。当膜厚以

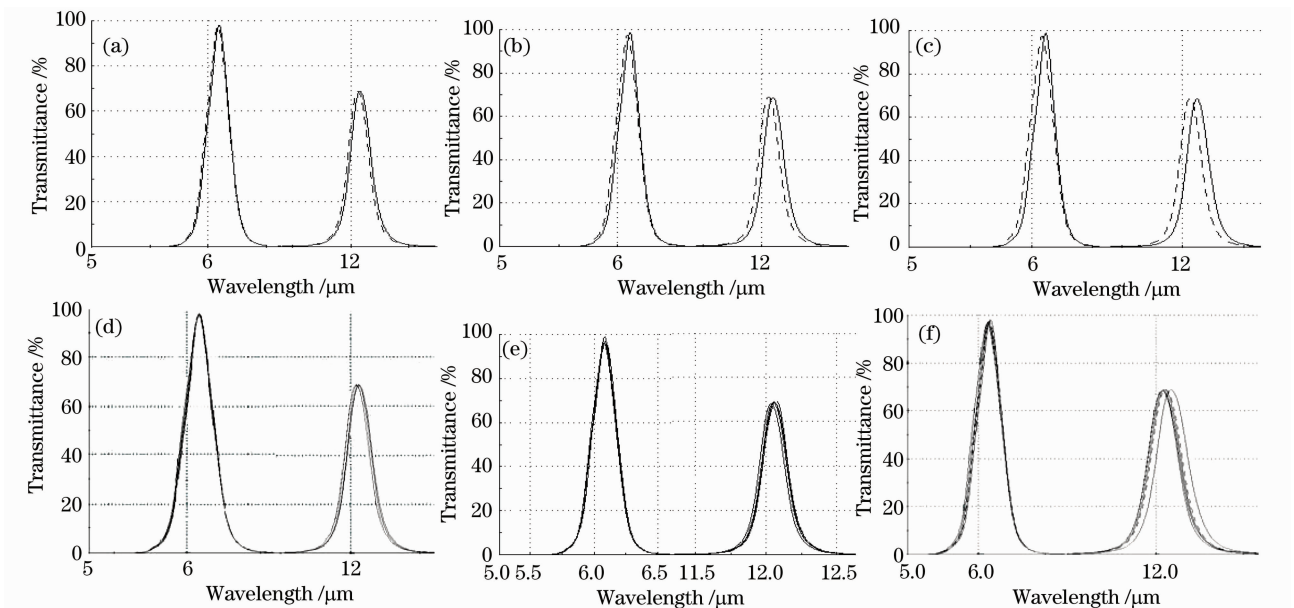


图 6 折射率以均匀分布变化(a)1%,(b)2%,(c)3%,及折射率以正态分布变化(d)1%,(e)1.5%,(f)1.7%的透射比  
Fig. 6 Transmittance when refractive index varies (a) 1%, (b) 2%, (c) 3% in a uniform distribution, Transmittance when refractive index varies from (c) 1%, (d) 1.5%, (f) 1.7% in a normal distribution

正态分布变化 1.7% 时, 两处峰位的移动幅度变化开始明显, 最大发生了约为 50 nm 的移动, 对整体性能影响较大。因此实际制备时应当把折射率精度控制在 1.7% 内。

通过薄膜物理厚度和膜层折射率的误差分析表明, 后者对剩余反射率的影响大于前者。同时发现无论是薄膜物理厚度还是膜层折射率, 正态分布变化带来的误差对剩余反射率的影响比均匀分布变化大。厚度及折射率误差对第一个通带的影响要远小于由双半波膜系构成的第二个通带的影响要小, 即双半波膜系对厚度以及折射率变化更敏感, 这一结论与文献中的结论相吻合<sup>[15,16]</sup>。

## 6 结 论

采用 PbTe 和 ZnSe 材料, 按照等效折射率理论设计实现了 5.9~6.2  $\mu\text{m}$  及 11.9~12.2  $\mu\text{m}$  的双通道带通滤光片。并对所设计的膜系进行了薄膜物理厚度和膜层折射率的误差分析, 分析表明, 与膜层折射率相比, 薄膜物理厚度对平均透射比的影响小, 同时, 双半波膜系对厚度以及折射率变化更敏感。另外, 两个通带位置分别是由不同的膜系决定, 因此互相之间独立, 可以根据不同需求独立地调节各自的带通位置, 只需改变相应膜系的中心波长并注意产生各膜系在需要产生通带位置处的透射情况即可, 但使用双半波膜系产生的第二个通带处的平均透射比有些偏低, 这主要是因为双半波膜系在远红外波段匹配层与基底没能做到很好的匹配造成的, 有待进一步的改进和完善。

## 参 考 文 献

- Mikio Hoshino, Takayuki Ogata *et al.*. Gas phase reaction of  $\text{N}_2\text{O}_5$  with propylene [J]. *Chem. Lett.*, 1978, **7** (12): 1367~1370
- Wang Yihu, Zhang Fengshan. A novel optical thin film element-multi-passed filter[J]. *Infrared*, 2003, (1): 15~20  
王懿祜, 张凤山. 一种新的光学薄膜元件——多通道带通滤光片[J]. *红外*, 2003, (1): 15~20
- Wang Shaowei, Chen Xiaoshuang, Lu Wei *et al.*. Fractal independently tunable multi-channel filters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(21): 211113
- Aguilera, Jr., John A *et al.*. Multi-spectral filter [P]. US, 5164858 1992-11-17
- Yablonoivitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20): 2059~2061
- Gu P. F. Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990  
顾培夫. 薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990
- Chen Naibo, Wu Yonggang, Lin 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
- Zhang Baisen, Ma Mianjun, Xiong Yuqin. Design and preparation of infrared pass-band filters with wide rejection band for space use[J]. *Infrared*, 2009, **30**(2): 15~19  
张佰森, 马勉军, 熊玉卿. 空间用宽截止长波红外带通滤光片的设计与镀膜[J]. *红外*, 2009, **30**(2): 15~19
- Yang Peizhi, Liu Liming *et al.*. Research progress of long-wavelength infrared optical materials[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, **23**(4): 641~646  
杨培志, 刘黎明 等. 长波红外光学材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2008, **23**(4): 641~646
- Li Shaomei, Luo Chongtai *et al.*. Design of 10.4  $\mu\text{m}$ ~12.5  $\mu\text{m}$  pass-band optical filter[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 1999, **5**(3): 171~174  
李少梅, 罗崇泰 等. 10.4  $\mu\text{m}$ ~12.5  $\mu\text{m}$  带通滤光片的设计[J]. *真空与低温*, 1999, **5**(3): 171~174
- Wang Wenliang, Xiong Shengming. Multiobjective optimization approach of optical thin film design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2026~2030  
王文梁, 熊胜明. 光学薄膜自动设计的多目标优化方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2026~2030
- J. Kar, H. Sladek. Thin solid film[J]. *Engng. Chem. Prod. Res. Develop.*, 1972, (11): 92
- Shi Yaocheng, Dai Daoxin, He Sailing. An effective index method for an optical waveguide with an arbitrary refractive index distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 51~54  
时尧成, 戴道锌, 何赛灵. 一种适用于任意折射率分布的等效折射率方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 51~54
- Tan Tianya, Huang Jianbing *et al.*. Design and error analysis of 1064 nm, 532 nm frequency-doubled antireflection coating for LBO[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 242~247  
谭天亚, 黄建兵 等. LBO 晶体上 1064 nm, 532 nm 二倍频增透膜的设计及误差分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 242~247
- H. A. Maeleod. Thin Film Optical Filters, (2<sup>nd</sup> ed) [M]. New York: Macmillan, 1956
- Cai Xiao, Zuo Yuhua, Mao Rongwei *et al.*. Effect of random growth error on double half-wave Fabry-Pérot filter with flat-top response[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 625~629  
蔡晓, 左玉华, 毛容伟 等. 随机生长误差对双腔型平顶法布里-珀罗滤波器的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 625~629