

基于组合 Fabry-Perot 膜系的中波红外 双色滤光片设计

蔡 渊^{1,2} 周 晟¹ 刘定权^{1,3}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²中国科学院大学, 北京 100049

³上海科技大学物质学院, 上海 200031

摘要 双色滤光片的膜系设计方法有多种,如自动优化设计、缓冲层和组合膜系设计、加厚间隔层的 Fabry-Perot (F-P)膜系、双峰结构 F-P膜系的多次重复,以及具有分形结构的 F-P膜系设计等方法。但它们在特定通道带宽和通道间距要求的膜系设计中,或者在膜系的工艺可实施性方面存在一定的局限性。运用目标光谱拟合优化后的两个具有增透带的 F-P膜系相组合的设计方法,有效解决了较宽通道带宽和较大通道间距的双色滤光片的设计问题。采用 Ge 和 SiO 两种材料,利用有限的 38 层薄膜,在中波红外波段设计出了波形良好的双色滤光片,其两个通道的相对带宽均为 9%,两个通道中心波长位置比可以在 1.4~5.0 的范围内进行调整,通带边缘陡度不大于 2.0%。这种膜系结构的双色滤光片具有通带宽度和位置方便调控的特点,并具有较强的可实施性。

关键词 光学设计; 光学薄膜; 双色滤光片; 膜系设计; 法布里-珀罗滤光片; 红外滤光片

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0222004

Design of Dual-Band-Pass Optical Filter Based on Combination of Fabry-Perot Coatings in Mid-Infrared Band

Cai Yuan^{1,2} Zhou Sheng¹ Liu Dingquan^{1,3}

¹Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 200031, China

Abstract There are several methods to design dual-band-pass optical filters, such as automatic optimization, design using buffer and combinatorial layers, F-P filter with thick spacer layers; repeating blocks of F-P filter with double peaks and F-P filter with a fractal structure, etc. But they have certain limitations either in design that has specific requirements on band-width and distance between two channels, or in the technique implementation of the film stack. Using the method of combining two F-P filters with a transmission band, which is obtained from optimization of target fitting, the problem of designing a wide band-width and large channel span dual-band-pass filter is effectively solved. Using the materials of Germanium and Silicon monoxide, a good spectrum performance dual-band-pass optical filter is designed with a layer number of 38. The relative band-width of both path-bands are 9%, the ratio between two channels' wavelength position can be adjusted from 1.4 to 5.0, the steepness of all the band edges are no more than 2.0%. This kind of coatings structure has strong technological practicability as well as good adjustability of both pass-band-width and channel position.

Key words optical design; optical coatings; dual-band-pass filter; film design; Fabry-Perot filter; infrared filter

OCIS codes 220.4610; 260.3060; 310.1860; 310.4165; 310.6850

收稿日期: 2015-08-20; 收到修改稿日期: 2015-09-09

基金项目: 中科院上海技术物理研究所 2014 年度创新专项(CX-23)

作者简介: 蔡 渊(1982—),男,博士研究生,副研究员,主要从事红外光学薄膜方面的研究。E-mail: sscyyss@aliyun.com

导师简介: 刘定权(1964—),男,博士,研究员,教授,主要从事薄膜光学与技术方面的研究。

E-mail: dqliu@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

随着遥感探测技术的不断发展,双色探测技术在军事、工业、医疗、和空间技术等领域获得了广泛的应用^[1-2]。采用双色探测技术可以在提高目标识别能力的同时,简化光学系统的整体结构,提高光学元件的利用率,提升空间光学有效载荷的集成度和可靠性。实现双色探测的基础是双色探测器(阵列)^[3],它能够同时对两个光学波段产生光谱响应;为了进一步抑制背景噪声并隔离干扰信号,实现被探测目标的识别,需要利用双色滤光片对目标辐射光谱实现两个工作波段的限定,它是实现双色探测的关键光学元件。

这里,双色滤光片是指能在相同的通光路径(或通光面积)上同时通过两个设定的工作光谱波段,并有效拦截工作光谱以外辐射的滤光片。两个工作波段,因为光谱不同且独立,故称双色。不同于分区域实现光谱分离,双色滤光片的膜系结构比较复杂。

本文采用两个带有增透带的F-P膜系相组合的设计方法,利用较少的膜层数,实现了中波红外双色滤光片的膜系设计,其通带的波形较好,通带宽度和位置方便调控,且容易制备,有较强的实用性。

2 双色滤光片膜系设计方法概述

近年来,随着光学薄膜技术的进步,多层干涉膜的设计方法得到了很大的发展,其中很多方法在双色滤光片的设计中都有重要应用,下面对其中的一些能够得到双色滤光片的设计方法做简单介绍。

2.1 自动优化设计

目前,很多光学薄膜设计软件中包含有先进算法的自动设计和优化功能,能够帮助设计出一些特殊光谱性能要求的滤光片。例如采用Needle优化算法^[4],可以从某一简单的初始膜系出发^[5],自动添加必要的膜层,经过多次优化后,使膜系的光谱特性贴近设计目标,最终实现技术指标要求的光谱性能。

虽然自动优化设计的方法大大降低了膜系设计的专业化程度,但仅仅从简单膜系结构开始,完全依靠自动优化设计得到令人满意的双色滤光光谱,难度依然很大。在自动优化的非规整膜系中,往往存在着一些极薄层和极厚层,这些膜层的沉积对膜厚监控精度要求很高,最终要取得好的光谱效果,还需要精密的膜层沉积技术和监控策略相配合^[6]。采用大量非规整膜层有可能得到光谱效果令人满意的双色滤光片膜系,但是对软件功能及设计人员经验依赖较大,设计过程有很大的不确定性。合理的初始膜系结构设计是自动优化得到良好光谱的前提,也是保证膜系沉积工艺可实施的关键,当双色滤光片的两个通道离的较远时,很难找到良好的初始膜系结构。

2.2 缓冲层和组合膜系设计

王懿喆^[7]提出了用缓冲层和组合膜系进行双色滤光片的膜系设计,具体的步骤是:1)根据组合膜系的设计原理,确定所需子膜堆的类型和数量。如设计双色滤光片可选择负滤光片和带通滤光膜堆的组合膜系;2)根据基底情况,假定入射和出射媒质均与基底相同,在子膜堆之间预先放置于基底相同折射率的缓冲层;3)在基底和各个缓冲层之间,以及缓冲层与入射和出射媒质之间,根据多级匹配原理,构造合适的子膜堆,完成原型滤光片的设计;4)采用适当的等效方法,将原型中实际不存在的理想膜层等效为可镀制膜层,得到可镀制滤光片膜系;5)在上述可镀制滤光片膜系两侧添加必要的减反射层或长波通膜系,完成于入射和出射媒质的匹配,得到完整的滤光片膜系,作为初始膜系;6)根据初始膜系的实际情况,进行进一步的优化计算,得到最终的膜系设计。

采用这种方法进行双色滤光片设计时,往往需要进行负滤光片的设计^[8-9],其设计较为复杂,需要进行等效层的替换,并且不同膜系间需要加入缓冲层匹配^[10],入、出射介质也需要进行匹配,其膜层较多,膜层很厚。例如,按上述设计的一种红外色滤光片的总膜层数为210层,膜厚在57 μm 左右,对设备长时间稳定工作有较高要求,膜系中存在非规整的超薄,超厚膜层,监控难度较高,工艺实现难度较大,膜层的可靠性也很难得到保证。

2.3 F-P膜系为基础的设计

在进行带通滤光片的膜系设计时,经常会用到多个F-P谐振腔串置的膜系结构,其通带形状容易保证,用较少的膜层数即可得到较好的通带边缘陡度^[11]。在进行双色滤光片的膜系设计时,自然也会考虑到使用F-P谐振腔结构的带通膜系。能够实现双色滤光片设计的F-P膜系结构主要有下面几种。

2.3.1 双峰结构 F-P 膜系的多次重复

在进行 F-P 带通膜系的设计时,常采用增加谐振腔重复次数的方法来增加波形的矩形度。当某特定 F-P 膜系本身就有多个透射峰时,也可以通过多次重复耦合的方法,使这几个透射峰形成矩形度较好的通带。

Kamikawa^[12]对这种特定的 F-P 膜系结构做了很好的总结,其基本结构可以用 (1) 式来表示^[12],

$$[M_0 C_1 M_1 \cdots C_i M_i L \text{ (or } H)]^k, \quad (1)$$

式中 M (膜系中大写字母均代表 1/4 波长光学厚度膜层) 表示镜面反射层,由相互间隔的 1/4 参考波长奇数倍的高低折射率膜层构成,C 是间隔层,光学厚度通常是 1/4 参考波长的偶数倍,最后的 L (or H) 是耦合层, i 和 k 都是不小于 2 的整数。多个通带之间的截止深度随着 k 的增加而变深,通过 k 次重复可以产生多带通的滤光片。多带通滤光片的通带数目可以通过设置间隔层的数目来调整,通带带宽可以通过调整反射层的层数来改变。通过设置不同的反射层和间隔层,可以设计出大量的包括双色滤光片在内的多带通滤光片膜系。

这种方法采用单面的膜系就能得到双色滤光片,但由于 F-P 膜系结构本身的限制,两个通道的间距不可能设计的很宽。

2.3.2 厚间隔层的 F-P 膜系

Fabry-Perot 谐振腔结构的带通膜系由间隔层和两边的反射层组成,其透射率可用下式表示:

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

式中

$$T_0 = \frac{(|t_1|^2 |t_2|^2)}{(1 - |r_1| |r_2|)}, F = \frac{4|r_1||r_2|}{(1 - |r_1||r_2|)}, \theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta),$$

其中 t_1, t_2 和 r_1, r_2 分别为反射层和间隔层界面处的透射系数和反射系数, φ_1, φ_2 为界面处的反射位相, δ 为间隔层的位相厚度。产生透射通带的条件是 (2) 式中透射率 T 出现极大值,此时 $\sin^2 \theta = 0$, 则:

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{4\pi nd}{\lambda} \right) = -k\pi (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

从中得到通带中心波长:

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi} = \frac{2nd}{m}, \quad (4)$$

式中 $m = k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi$ 为干涉级次,间隔层越厚,干涉级次越高,出现的低级次的透射带就越多。因此,适当增加间隔层的厚度就可以用 F-P 带通膜系产生双色滤光片。

这种方法的设计思路非常简单,但厚膜的镀制对膜层沉积监控精度要求很高,特别是在有多个厚间隔层的情况下,很难实现膜层的准确沉积。并且,它也不能设计出通道间隔很宽的双色滤光片膜系。

2.3.3 分形结构的 F-P 膜系

在 F-P 滤光片膜系中,高、低折射率材料需要按一定的周期规律间隔沉积,这种折射率周期变化的结构可以看作在一维空间上的光子晶体^[13]。通过在光子晶体中引入缺陷层,能够在禁带内形成通道,该通道对应频率的光波可以通过,在光子晶体的光谱特性曲线上就对应一个透射峰^[14]。

采用一种分形结构的方式,设置一维光子晶体中的周期结构和多个缺陷层,可以设计出通带位置进行独立调整的双色滤光片^[15]。分形结构的起点是一个单通带的 F-P 膜系: $(HL)^m \alpha H(LH)^m$ [或 $(LH)^m \alpha L(HL)^m$], 它具有相对中心缺陷膜层对称的特点,依据分形结构局部相对于整体自相似的特性,双色滤光片的膜系结构可以表达为: $(HL)^m \alpha H(LH)^m \beta L(HL)^m \alpha H(LH)^m$, 通过调整 α 和 β 值,就能调整两个通道的间距。

这种方法可以方便地调整两个通道的间距,但由于分布在间隔层两边的膜层较多,通道的带宽通常不能都设计的很宽。

3 红外双色滤光片的组合 Fabry-Perot 膜系设计

套用前述双色滤光片的设计方法,不一定能设计出光谱符合指标要求并具备工艺实施性的膜系。例

如,有这样一种中波红外双色滤光片,假设其长、短波通道的中心波长分别为 λ_1 、 λ_2 ,其对应的通带宽度分别为 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$,设计的指标要求为:1) $\lambda_1=1.6\lambda_2$ (长波通道中心波长是短波通道中心波长的1.6倍);2) 相对带宽 $\Delta\lambda_1/\lambda_1=\Delta\lambda_2/\lambda_2\approx 9\%$ (两个通道的带宽大约是它们通道中心波长的9%);3) 通道之间的光谱需完全截止(通道间截止区域的光谱透射率小于2‰);4) 若定义陡度 $g=(0.1T_p-0.8T_p)/\lambda_c$ (其中 T_p 为峰值透射率, λ_c 为通带中心波长),则要求通道边缘陡度 $g\leq 2\%$ 。

经过初步分析发现:若采用F-P膜系中多个波峰的多次耦合或者厚间隔层的F-P膜系的设计,长、短波通道中心波长位置比难以达到1.6倍的要求;若采用分形结构的F-P膜系设计,则无法达到9%相对带宽的要求;由于两个通道中心波长位置比要求为1.6,通道相距较远,很难得到良好的初始膜系来进行完全自动优化的设计;若采用缓冲层和组合膜系设计,虽然有可能设计出符合指标的膜系,但膜系的膜层数会异常庞大,其工艺的可实施性很差。

3.1 设计过程

对于该实例,需考虑其他设计方案。采用两个带有增透带的单带通F-P滤光片的组合膜系的设计方案:在基片的两侧分别设计一个带有增透带的F-P膜系,基片一侧F-P膜系的增透带正好覆盖另一侧F-P膜系的通带,确保双色滤光片的两个通道有高的透射率;同时,两个F-P膜系截止区域的叠加,正好使两个通道之间的光谱以及两个通道两侧必要宽度的光谱完全截止。设计方案示意图如图1所示。

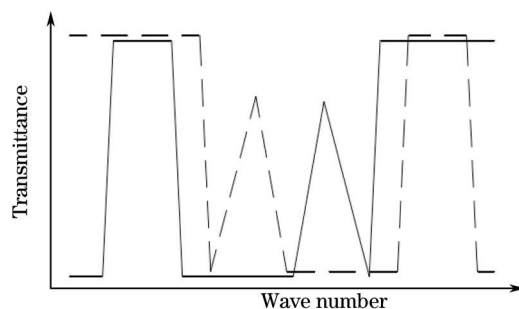


图1 两个带有增透带的单带通F-P膜系的组合设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of combining two F-P filters with a transmission band

根据设计要求,双色滤光片工作中波红外波段,可选取宝石(Al_2O_3)作为基底,选取常用的中波红外光学薄膜材料,锗(Ge)作为高折射率材料,一氧化硅(SiO)作为低折射率材料,其折射率分别为1.76、4.25与1.8(不考虑材料吸收,材料折射率因供应商及薄膜沉积工艺不同而不同,此处为设定值)。下面是膜系设计的具体步骤。

以常规的F-P膜系为基础,设计基片两侧的带有增透带的单带通F-P膜系。首先选取合适的反射层和间隔层结构,当双带通滤光片的两个通带宽度都是通带所处中心波长的9%,通道边缘的陡度不大于2%时,基片两侧可采用4半波的F-P膜系:LHL 2H LHL 4H LHL 4H LHL 2H LHL,并且基片一侧膜系的中心波长是另一侧的1.6倍。

基片两侧的初始膜系已经分别具备了双色滤光片对应的一个带通,还需对其进行优化设计,使它们同时都具备一个能够完全覆盖基片另一侧通带的增透带。设定合理的优化目标是优化过程的关键。通带中心波长较短侧的优化目标如图2(a)中的4条粗线所示,通带中心波长较长侧的优化目标如图2(b)中的4条粗线所示。图2(a)中的优化目标(4)应该正好覆盖图2(b)中的优化目标(3);图2(b)中的优化目标(1)应该正好覆盖图2(a)中的优化目标(2),并且图2(a)中的优化目标(3)和图2(b)中的优化目标(2)的叠加应该保证两个通带之间的光谱被完全截止。

设定好优化目标后,对基底侧和表面侧的4层膜以及所有的反射层进行优化,即对除膜系结构中两个光学厚度为4H的间隔层外的所有膜层进行优化,优化算法会不断调整待优化膜层的厚度,即时得出设计光谱,使之会不断向优化目标贴近,最终得到了总膜层数为38层的膜系:

中心波长较短处膜系:0.56L 0.49H 0.53L 2.66H 0.48L 0.85H 1.06L 4H 1.23L 0.54H 1.39L 4H 0.73L 1.43H 0.38L 2.62H 0.47L 0.34H 0.66L

中心波长较长处膜系:0.69L 0.32H 1.41L 2H 0.83L 1.17H 0.97L 4H 0.92L 1.1H 1.17L 4H 0.81L 0.93H

1.12L 2H0.84L 1.34H 0.95L

通带中心波长较短处和较长处优化后膜系的光谱曲线如图 2(a)、(b)所示,优化后膜系的参考波长可以作进一步的调整,使通带中心的位置更加准确。将中心波长较短处和较长处膜系分别置于基片的两侧,最终得到的组合膜系的光谱曲线如图 2(c)所示。从图中可以看出,两个通带之间的光谱已经被完全截止,两个通带的 4 个边缘的陡度分别为 1.5%、2.0%、1.3%、1.5%,均不大于 2.0%,满足设计指标,并且,组合膜系的总膜层数为 38 层,可分两次进行膜层沉积,每次只需沉积 19 层,膜系的工艺可实施性很强,最终,设计出了较为理想的双色滤光片膜系。

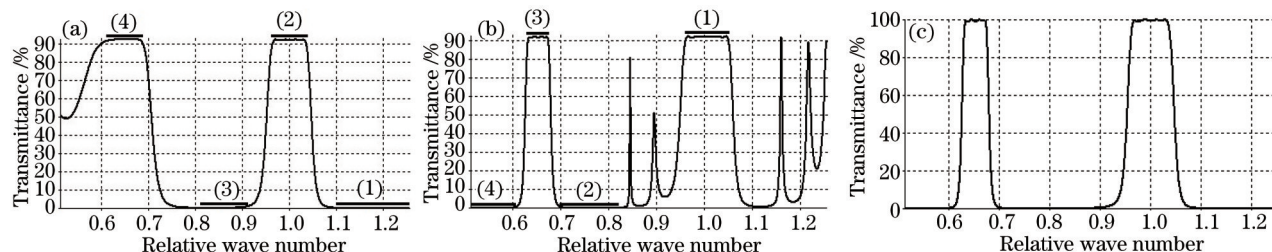


图 2 相对带宽均为 9% 的两个通道的光谱优化及最终的双色滤光片光谱。(a) 带有长波增透带的短波通道; (b) 带有短波增透带的长波通道; (c) 最终的双色滤光片光谱

Fig.2 Spectrum optimization of both path-bands with 9% relative band-width and the combination of their spectra.

(a) Shorter wavelength (SW) pass-band with a longer wavelength (LW) transmission band;

(b) LW pass-band with a SW transmission band; (c) final spectrum of the dual-band-pass filter

3.2 通道带宽的调整

采用上述组合 F-P 膜系设计时,两个通道是单独设计的,因此各通道带宽的调整与单通道 F-P 滤光片相类似^[1],这样就可以设计出各种通道带宽组合的双色滤光片。F-P 膜系的基本结构如下所示:

$$[H_1L_1H_2\cdots H_n | (LL)^k | H_1L_1H_2\cdots H_n]^m \text{ or } [L_1H_1L_2\cdots L_m | (HH)^k | L_1H_1L_2\cdots L_m]^m$$

通过对间隔层厚度进行整数倍的调整(调整 k 值)以及调整反射层的膜层数目(调整 n 值),可以有效地调节通道的带宽。

假设基底和膜层材料都不变,将长波侧 F-P 膜系的间隔层厚度均设置为 $2H$,并将谐振腔的数目增加到 5 个,以有效地增加通带边缘的陡度,此时的基础膜系设置为:LHL 2H LHL 2H LHL 2H LHL 2H LHL 2H LHL,其对应的相对带宽约为 11.5%;将短波侧 F-P 膜系的间隔层厚度也设置为 $2H$,部分反射层层数增加到 5 层,此时的基础膜系设置为:LHL 2H LHLHL 2H LHLHL 2H LHLHL 2H LHL,其对应的相对带宽约为 6.5%。假设中心波长位置比仍然是 1.6 倍,按此比值确定两个 F-P 膜系的增透带的位置,并设置相应的通带、增透带和截止带的优化目标,进行优化。为了达到良好的优化效果,可以用包括 Needle 优化算法在内的多种优化方法。基础膜系的光谱离优化目标差距越大,膜系结构的变动就越大,膜层数也会不断增加。最终膜系的优化结果如下所示。

短波侧 F-P 膜系:0.72H 0.35L 2H 0.28L 0.49H 0.5L 0.95H 0.99L 0.89H 0.62L 2.39H 0.62L 0.94H 1.07L 1.08H 0.47L 2.43H 0.68L 0.81H 1.02L 1.1H 0.18L 2.64H 1.7L。光谱如图 3 (a) 所示。

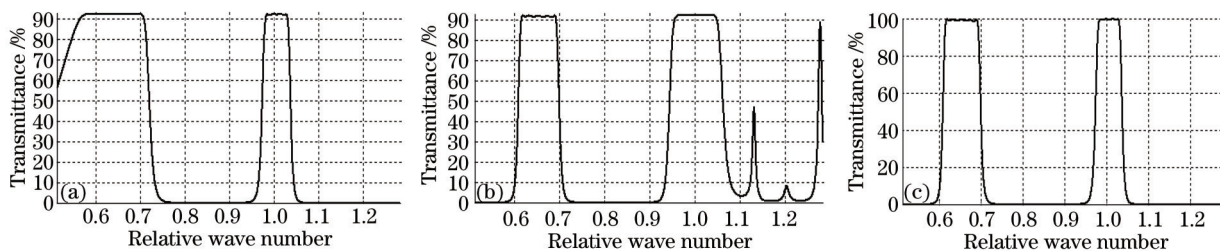


图 3 相对带宽分别为 6.5% 和 11.5% 的两个通道的光谱优化及其相应的组合光谱。(a) 带有长波增透带的短波通道; (b) 带有短波增透带的长波通道; (c) 最终的双色滤光片光谱

Fig.3 Spectra optimization of 6.5% and 11.5% relative band-width path-bands and the combination of their spectra. (a) SW pass-band

with a LW transmission band; (b) LW pass-band with a SW transmission band; (c) final spectrum of the dual-band-pass filter

长波侧 F-P 膜系 : 1.48L 0.162H 1.46L 2.23H 0.41L 1.28H 0.78L 2.18H 0.72L 1.13H 0.79L 2.11H 1.03L 0.6H 1.22L 2H 0.78L 1.54H 0.2L 2H 1.76L 0.19H 0.99L。光谱如图 3 (b) 所示。最终的双色滤光片光谱如图 3 (c) 所示。

3.3 通道间距的调整

下面对组合 F-P 膜系法设计的双色滤光片的两个通道的最大及最小间距做进一步的讨论。当两个通道之间的距离很近,此时若要保证单通道 F-P 膜系波形的同时,保证其增透带有最高的透射率,就会导致两个通道间的截止深度不够,不能起到光谱抑制作用,如图 3(a)所示。带有长波增透带的短波带通膜系和带有短波增透带的长波带通膜系一样,都会在两个通道距离过近时,产生截止深度不够的问题,如图 3(b)所示,于是用这种方法设计的双色滤光片的两个通道就存在一个最近距离。两个通道之间的最近距离和通道带宽有关,带宽越宽,通道之间所要求的最近距离就越大;反之,两个通道就可以离的较近。如图 3(c)所示,当相对带宽为 5.4%,两个通带的中心位置比减小到 1.2 倍时,出现过高的截止区透射率;如图 3(d)所示,当相对带宽为 17.3% 时,1.53 倍的通带中心位置比,就使截止区透射率明显不能满足截止深度要求。

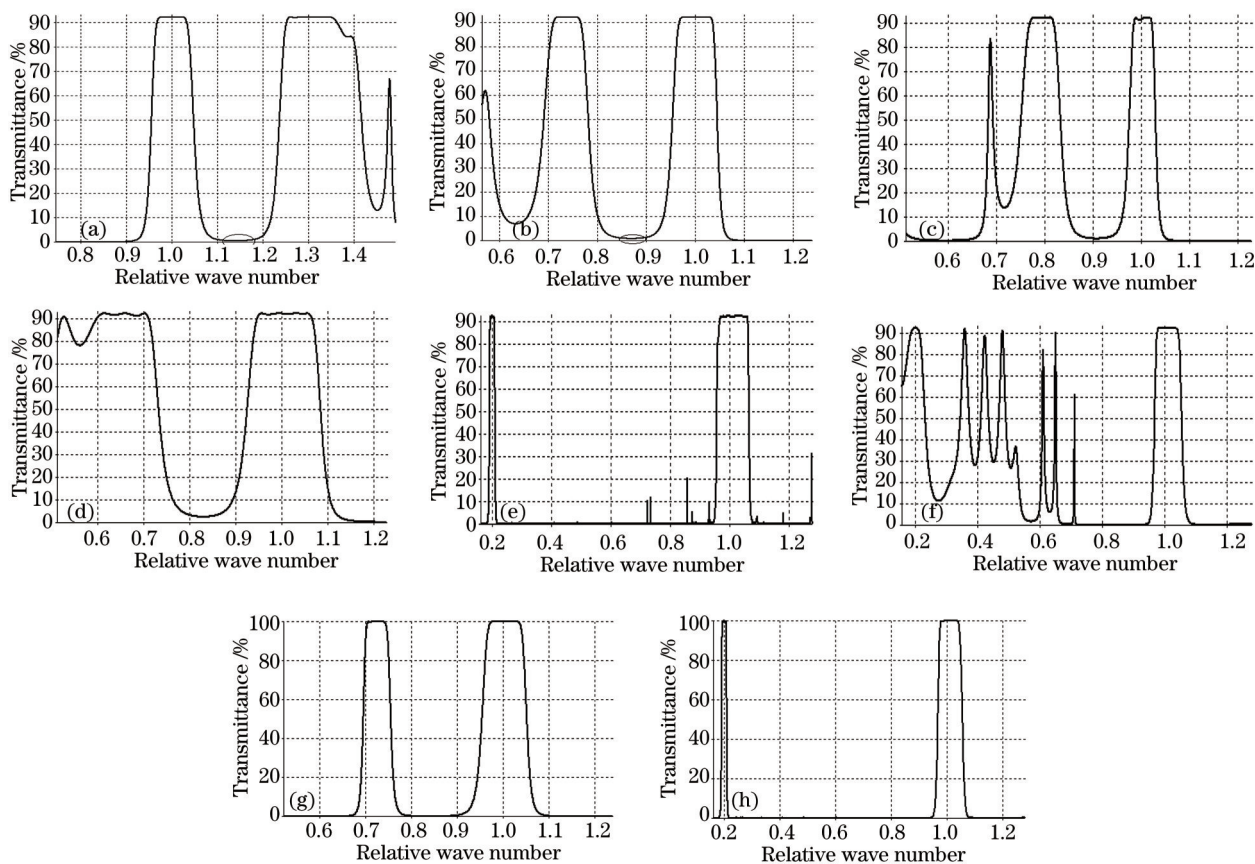


图 4 最大和最小通道间距双色滤光片的设计光谱。(a)、(b)、(c)、(d) 小于最小通道间距时截止深度不够的情况;

(g) 最小通道间距双色滤光片的设计光谱;(e)、(f)、(h) 在材料透射区边缘的最大通道间距设计;

(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h) 9% 相对带宽,(c) 5.4% 相对带宽,(d) 17.3% 相对带宽

Fig.4 Designed spectra of dual-band-pass filters with biggest and smallest channel distance. (a), (b), (c), (d) Situation of insufficient cut-off depth when the channel distance is less than the smallest one; (g) the designed spectra of dual-band-pass filters with smallest channel distance; (e), (f), (h) the design of biggest channel distance on the edge of materials' common transmission area;

(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) 9% relative band-width, (c) 5.4% relative band-width, (d) 17.3% relative band-width

因此,在选用材料不变的前提下,能够设计出的最小通道间距与通道间截止深度的要求有关。为了有效抑制通带间光谱信号,截止深度要求通常为透射率小于 2%,以 Ge 和 SiO 为高、低折射率膜层材料,相对带宽为 9% 的双色滤光片的两个通道的最小通带中心位置比约为 1.4 倍,如图 4 (g) 所示。

当两个通道间的距离变大时,通道间的截止区会产生更多的次峰,只要组合膜系能将这些次峰有效压制,就可以得到更大通道间距的双色滤光片。理论上,通过不断增加非规整膜层并进行大量的优化,长波通道F-P膜系可以无限的向短波方向延长截止区域,如图4(e)所示,因此,在不考虑材料因素的前提下,双色滤光片的两个通道的最远距离也是没有限制的。而在实际的膜系设计过程中,需要考虑高、低折射率薄膜材料的透明波段范围。例如Ge用于膜层沉积的透明区域是1.8~23 μm ,SiO的透明区是1~9 μm ,它们的公共透明区是1.8~9 μm ,用这两种材料研制的双色滤光片的两个通带的最大通带中心波长比为5,以此中心波长位置比设计的相对带宽均为9%的两个通道的光谱如图4(e)、4(f)所示,它们组成的双色滤光片的光谱如图4(h)所示。

4 结 论

介绍了常规的几种双色滤光片的设计方法,以及基于组合Fabry-Perot膜系的双色滤光片设计方法。这种方法能对双色滤光片中每一个通道进行独立设计,使之分别满足指标要求,然后再将它们组合到一起,形成最终的膜系。以此方法设计出的双色滤光片的两个通道存在一个最近距离,该最近距离的大小主要受通道带宽的影响,通道带宽越宽,通道之间所要求的最近距离就越大;反之,两个通道就可以离的较近。在膜层材料允许的条件下,经过足够多的膜层优化,可以无限地拉长两个通道的距离。

以通道中心波长位置比为1.6倍、通道带宽均为9%通道中心波长的中波红外双色滤光片的设计为例,设计出总膜层数为38层,通带边缘陡度不大于2.0%的双色滤光片膜系。经过进一步的膜层优化,该双色滤光片的最小通道中心波长位置比为1.4倍;当采用Ge和SiO作为膜层材料时,可以在两种材料的公共透明区边缘,设计出最大通道中心波长位置比为5倍的双色滤光片。

参 考 文 献

- 1 Su Peichao, Zhang Xingcan. Dual spectral IR detector[J]. *Infrared Technology*, 1989, 11(4): 29-34.
苏培超,张星灿. 双色红外探测器[J]. *红外技术*, 1989, 11(4): 29-34.
- 2 Du Shaojun, Lu Qisheng. Study on IR dual-spectral detection[J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(2): 36-38.
杜少军,陆启生. 红外双色探测研究[J]. *红外技术*, 2000, 22(2): 36-38.
- 3 Ding Ruijun, Ye Zhenhua, Zhou Wenhong, *et al.*. Review of two-color infrared focal plane arrays[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 14-17.
丁瑞军,叶振华,周文洪,等. 双色红外焦平面研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 14-17.
- 4 Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Debell G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(28): 5493-5508.
- 5 Lin Yongchang, Gu Yonglin, Zhang Cheng, *et al.*. Needle method and initial coating design[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(10): 1433-1436.
林永昌,顾永林,张 诚,等. 针法与初始膜系设计[J]. *光学学报*, 1999, 19(10): 1433-1436.
- 6 Sullivan B T, Clarke G A, Akiyama T, *et al.*. High-rate automated deposition system for the manufacture of complex multilayer coatings [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(1): 157-167.
- 7 Wang Yizhe. Research on Design Principle and Preparation Technology of Dual-Color Infrared Optical Thin Film Components[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2005: 51-94.
王懿喆. 红外双色光学薄膜器件设计原理及制备技术研究[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2005: 51-94.
- 8 Thomas O. Infrared minus-filter coatings: Design and production[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(31): 4565-4573.
- 9 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.
- 10 Lemarquis F, Pelletier E. Buffer layers for the design of broadband optical filters[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(25): 5665-5672.
- 11 Cai Yuan, Liu Dingquan, Luo Haihan. Design and fabrication of 3.5~4.0 μm band-pass filter working at cryogenic temperature[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0107001.
蔡 渊,刘定权,罗海瀚. 3.5~4.0 μm 带通滤光片的低温光谱设计与研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0107001
- 12 Kamikawa S. How to design an easily deposited multi-band-pass filter[C]. *Asia Pacific Optical Communications, International Society*

- for Optics and Photonics, 2008: 713432.
- 13 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao, *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 728-734.
顾国昌, 李宏强, 陈洪涛, 等. 一维光子晶体中的光学传输特性[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 728-734.
- 14 Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan, *et al.*. Design and modification of double channel of one dimensional photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5): 661-664.
田国勋, 吴永刚, 王占山, 等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整[J]. 光学学报, 2005, 25(5): 661-664.
- 15 Wang Shaowei, Lu wei, Li Zhifeng, *et al.*. Independently Tunable Multichannel Filters on Fractal Structure: China, 200610024250.4[P]. 2006-03-01.
王少伟, 陆 卫, 李志锋, 等. 基于分形结构的多通道位置独立可调滤光片: 中国, 200610024250.4[P]. 2006-03-01.

栏目编辑: 张浩佳