

本文献由福州通产公司吴陈仁收集整理。



福州通产光电技术有限公司 (TCT) 系一家专业从事光学晶体和传统光学元件加工及光学镀膜业务的高科技光电子企业，现有厂房面积 2800 多平方米。TCT 公司在管理经营上与国际接轨，建立了完善的质量管理体系组织结构，通过了 ISO9001: 2000 质量管理体系认证。

TCT 公司汇聚了一批高级专业人才并聘请福州大学、长春光学精密机械研究所、华中科技大学教授和专家为顾问，由此构成了公司发展的原动力，组成了强大的研发、生产及加工队伍，以及完善的管理、销售及服务体系。

TCT 公司拥有高性能的光学冷加工设备和性能一流的真空镀膜机以及用于特性检验和质量检测的高精度检测仪器。公司能够承接 YVO_4 、 $LiNO_3$ 、 $PbMoO_4$ 等光学晶体以及透镜、棱镜和平镜等传统光学元件的加工和镀膜业务，可以满足客户的需求，生产各种规格的产品。

目前，TCT 公司的产品有：[点击下载通产公司产品目录（英文，PDF 格式）](#)

1. **光无源器件的配件**： YVO_4 波片、 $PbMoO_4$ 波片、石英波片、双折射楔角片和分束片等。
2. **激光晶体**： $Nd: YVO_4$ 、 $Nd: GdVO_4$ 等。
3. **各种薄膜产品**：各种波长的高效减反射膜、各种波长的高反射膜、各种波长的偏振膜、各种特征波长的抗激光膜、可见光谱区的半透半反膜等。
4. **传统光学产品**：滤光片、反射镜及各种棱镜、透镜及平镜等。

业务联系电话：0591-3709622、3709621 传真：0591-3709620

公司地址：福州市洪山科技园 12 号楼福州 203 信箱（350002）

联系人：吴陈仁 电子邮件：sales2@fztct.com

主 页：<http://www.fztct.com>

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0794-04

密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计*

顾培夫 白胜元 李海峰 章岳光 刘旭 唐晋发

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 介绍了波分复用系统对薄膜干涉滤光片的基本要求, 为了满足这些要求, 一方面需要精心选择基板和薄膜材料, 另一方面要寻找性能优良、制造容易的膜系。文中提出了二种适宜于设计这种滤光片的方法。

关键词: 密集型波分复用; 薄膜干涉滤光片; 膜系设计

中图分类号: TN202 文献标识码: A

1 引言

随着密集型波分复用(DWDM)技术的发展, 对密集型波分复用系统的薄膜干涉滤光片提出了越来越高的要求。这种滤光片不仅要求通带窄、矩形度高、通带波纹小、损耗低, 而且要求温度稳定性极好, 甚至对群延迟的平坦性也提出了要求。

在波分复用技术中, 用超窄带的薄膜干涉滤光片来实现分波和合波^[1], 这些称之为密集型波分复用的干涉滤光片, 无论在设计、制备还是测试等方面都具有极高的难度。

目前, 这种密集型波分复用滤光片的设计还是基于传统的法布里-珀罗型干涉滤光片^[2], 所不同的只是要求其通带窄、矩形度高^[3]、通带波纹小、损耗低、特性稳定^[4]。此外, 随着传输速率的提高, 对群速度延迟的波纹也提出了要求^[5]。对于传输速率为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的滤光片, 群速度延迟应分别

小于 10 ps 和 2.5 ps。为了达到这些要求, 膜系常采用多腔干涉滤光片, 其层数多达 150 层左右, 甚至接近 200 层。这就要求膜层损耗低、应力小、稳定性高, 并对折射率温度系数和热膨胀系数等方面的性能提出了要求, 为此, 对薄膜和基板材料增加了非常苛刻的限制。

本文讨论对称周期设计和主体参数寻优两种方法, 这两种方法对于密集型波分复用滤光片的设计是比较行之有效的。

2 密集型波分复用干涉滤光片的设计要求

表 1 给出了 400 GHz、200 GHz、100 GHz 和 50 GHz 四种最重要的滤光片的特性要求。这些要求已能满足解复用合波器的使用要求。

Table 1. The performance of DWDM interference filters

channel spacing	400 GHz	200 GHz	100 GHz	50 GHz
center wavelength λ_0	see ITU list	see ITU list	see ITU list	see ITU list
passband bandwidth $W_{0.5 \text{ dB}}/\text{nm}$	>1.6	>0.8	>0.4	>0.2
stopband bandwidth $W_{25 \text{ dB}}/\text{nm}$	<4.8	<2.4	<1.2	<0.6
$\eta = W_{25 \text{ dB}}/W_{0.5 \text{ dB}}$	<3	<3	<3	<3
passband loss L/dB	<0.6	<0.5	<0.5	<0.5
passband ripple r/dB	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
thermal wavelength drift $(\text{nm}/^\circ\text{C})$	<0.002	<0.002	<0.001	<0.0005

在设计时, 主要考虑以下因素:

- 1) 设计中心波长时要考虑滤光片的使用角度。
- 2) 矩形度 η 的设计比较复杂, 实际制备的结果

与理论设计结果相比较, 通常 $W_{0.5 \text{ dB}}$ 会减小, $W_{25 \text{ dB}}$ 会增加, 所以矩形度的实际结果总是大于设计结果, 具体数值视膜厚控制水平和其他工艺水平而定, 况且有些应用场合的通带宽度是定义在 0.3 dB 取值的。

3) 通带波纹和损耗应该考虑到滤光片是胶合的还是以空气为入射媒质。

* 高等学校重点实验室访问学者基金资助课题。

E-mail: gupeifu@hotmail.com

收稿日期: 2001-08-03; 收到修改稿日期: 2001-10-04

4) 温度稳定性必须根据滤光片带宽来决定基板和薄膜材料,以减小它们的应力形变所引起的波长漂移。

总之,设计必须考虑到使用要求,并在设计时留有充分余地,以确保制备得到的滤光片能满足表 1 所列的各项技术指标。

3 基板和薄膜材料

在通常情况下,滤光片中心波长的漂移主要是由薄膜的聚集密度决定的,而且吸附水气的折射率温度系数对波长热漂移也起着重要的作用^[6]。如果薄膜的聚集密度达到 1,则潮气吸附引起的波长漂移可忽略不计,而温度引起的薄膜材料的线膨胀和

折射率温度变化所致的波长漂移便占据主导地位。据此,Takahashi^[4]建立了一个温度诱导滤光片中心波长漂移的数学物理模型。他指出,滤光片膜系一旦确定,滤光片中心波长的热漂移可以通过选择适当的基板来加以调节。因为对一个薄膜-基板系统,当存在温度引起的形变时,膜层几何厚度和折射率都产生了变化,因此通过调节基板的线膨胀系数,有可能使膜层的光学厚度在温度变化时保持不变,或者小于 $1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。作者认为,因为可供选择的基板非常有限,所以更好的办法是先选定基板,然后根据基板的热膨胀系数来设计膜系,因为不同的膜系结构要求的基板线膨胀系数有所不同。表 2 列出了几种基板材料的参数。

Table 2. The properties of common substrate

glass	coefficient of linear expansion $(10^{-7}^\circ\text{C}^{-1})$	refractive index at 1550 nm	dn/dT at 1550 nm	Poisson ratio
S700X (Schott)	93	1.55		0.247
F7 (Schott)	98	1.60		
S700G (Schott)	101	1.557		0.254
WMS-0X (Ohara)	101	1.658	$-0.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	
WMS-1X (Ohara)	110	1.519	$-0.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	
FPL51 (Ohara)	127	1.497		

就薄膜材料而言,目前主要采用 TiO_2 - SiO_2 和 Ta_2O_5 - SiO_2 薄膜。这两种材料组合在离子束辅助沉积 (IAD) 下都可生成无定形薄膜, TiO_2 、 Ta_2O_5 、 SiO_2 薄膜的折射率分别为 2.200、2.050 和 $1.467^{7,8,1}$ 。由于 TiO_2 膜折射率高,与 Ta_2O_5 相比,可用较少的层数获得特定的带宽,但从吸收来说, TiO_2 会比 Ta_2O_5 薄膜稍高些。虽然 TiO_2 膜的归一化折射率温度系数 $(dn/dT)_n$ 稍高,但实际上三种材料均为 $1 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ 左右。它们的应力虽然取决于制备工艺,但一般情况下都呈现压应力,显然,积累应力对滤光片是一个很大的问题,其中 TiO_2 、 Ta_2O_5 单层膜的应力值约为 10^7 N/m^2 ,而单层 SiO_2 膜的应力比高折射率材料约高一个数量级,所以 SiO_2 膜是密集型波分复用滤光片应力的主要来源。在设计中必须考虑这些因素,采取适当措施,以降低不利因素的影响,如间隔层选用高折射率材料等。

4 设计方法

单腔和双腔薄膜干涉滤光片是不可能满足表 1 的技术指标的。为了改善矩形度,腔的数目通常要求 3 以上,但是随着腔的数目增加,通带内的插入损耗和波纹也随之增大,这是一对矛盾。解决这个矛盾的方法很多,而下面介绍的两种方法我们认为是

比较有效的。

为了便于分析,先写出滤光片的典型设计:

$$G[(HL)^p(2H)^q(LH)^rL]^m|A \quad \text{或} \\ G(HL)^p_0(2H)^q_1(LH)^r_1L(2H)^p_2(LH)^q_2L\dots|A, \quad (1)$$

$$G[(HL)^pH(2L)^qH(LH)^rL]^m|A \quad \text{或} \\ G(HL)^p_0H(2L)^q_1H(LH)^r_1H(2L)^p_2H(LH)^q_2L\dots|A, \quad (2)$$

然后来讨论对称周期膜设计方法和滤光片主体参数寻优方法。

1) 对称周期膜法

若把 (1) 式和 (2) 式最靠近空气入射媒质 A 的低折射率膜 L 去掉,上述膜系便成为对称周期结构,因此可以方便地算出不同 p 、 q 和 m 下的等效折射率 E 。作为例子,设 (1) 式和 (2) 式中的 $m=3$, $n_H=2.050$, $n_L=1.467$, $\lambda_0=1550 \text{ nm}$,则计算得到中心波长上两种设计的 E 值列于表 3。

Table 3. Equivalent index of symmetrical periods

$q_1-q_2-q_3$	E	$q_1-q_2-q_3$	E	$q_1-q_2-q_3$	E
6-8-6	1.90	4-8-4	1.72	2-8-2	1.52
6-6-6	2.07	4-6-4	1.87	2-6-2	1.65
6-4-6	2.28	4-4-4	2.07	2-4-2	1.82
6-2-6	2.56	4-2-4	2.34	2-2-2	2.07

由表 3 可见:

(i) 当三个腔的间隔层处于同一级次时 , E 值均为 2.07 ; 而且 在相同的 q 下 , E 值 (λ_0) 与反射镜的周期数 p 无关 , 即 p 值增加 , 不影响极值 , 但使中心波长两侧 E 曲线变陡。

(ii) 当第二个腔 q 具有较高的级次时 , E 值相对较低 , 它与基板比较匹配 , 但在空气入射侧需要一个匹配膜。于是 , 可以根据基板的折射率方便地选取膜系。

例如 , 当基板为 WMS-02 时 , 取表 3 中 $E = 1.90, 1.72, 1.87, 1.65, 1.82$ 等对应的膜系 , 均可在基板侧得到良好的匹配 , 而在空气侧需要增加适当的匹配膜 , 由于 L 层的折射率 1.467 太高 , 故常用双层增透膜。

对于

$$G|(HL)^2H(LH)^6L2H(LH)^6L2H(LH)^8|A$$

膜系 , 可以分为三组对称膜系 , 即

$$G|(HL)^8H[(HL)^7]^2|(HLH)^8|A,$$

膜系 $[(HL)^7]^2$ 的等效折射率随波长的变化曲线示于图 1 , 而膜系 $(HL)^8H$ 的等效折射率随波长的变化曲线示于图 2。

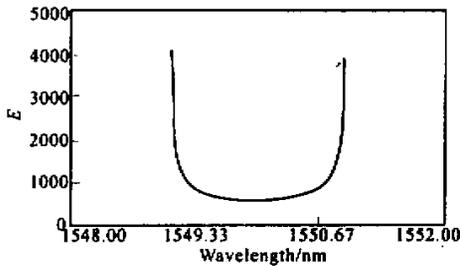


Fig. 1 Equivalent index of symmetrical period $[(HL)^7]^2$

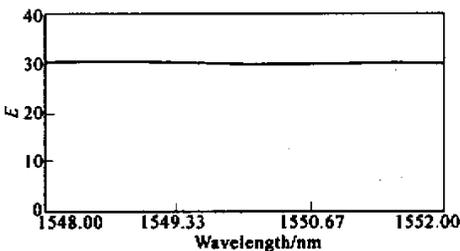


Fig. 2 Equivalent index of symmetrical period $(HL)^8H$

从这两个图中可以看出它们的等效折射率随波长的变化相差很大 , 这就是通带内产生波纹的原因。这种失配的现象随着腔的数目增大急剧增加 , 但是 , 从上面的讨论可知道 , 在三腔的情况下 , 当中间的腔级次高于边缘两个腔时 , 滤光片具有较好的匹配。因此 , 若用图 3 所示的 E 随波长变化比较接近的对称周期来构成多腔滤光片 , 可望通带内损耗和波纹

都比较小。例如 :

$$G| \underbrace{(HL)^8H}_{\text{匹配膜}} \underbrace{(HLH)^7}_{\text{低级次膜}} \underbrace{[5H(LH)^7 4H]^2}_{\text{高级次膜}} \underbrace{(HLH)^7}_{\text{低级次膜}} \underbrace{(HLH)^8}_{\text{匹配膜}} | A, \quad (3)$$

此膜系由于空气侧匹配不够好 , 所以还需一个双层增透膜。设计结果示于图 4。

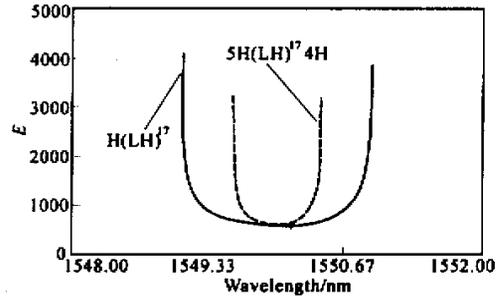


Fig. 3 Comparison between two symmetrical periods

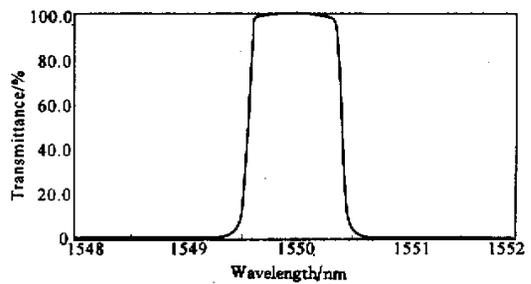


Fig. 4 The calculated transmittance curve of design (3)

2) 主体参数寻优法

上面方法对减小损耗和波纹是有效的 , 但它不能对带宽提供约束 , 因而需要依赖经验。而主体参数寻优法可对各种设计参数进行自动调节。

如果我们把 (1) 式或 (2) 式中反射镜 $(HL)^0$ 或 $(HL)^0H$ 表示成 R_0 , 间隔层 $(2H)^1$ 或 $(2L)^1$ 表示成 S_1 , 依次类推 , 则 (1) 式、(2) 式可表示成 :

$$G|R_0S_1R_1S_2R_2|A \quad (\text{双腔})$$

$$G|R_0S_1R_1S_2R_2S_3R_3|A \quad (\text{三腔})$$

$$G|R_0S_1R_1S_2R_2S_3R_3S_4R_4|A \quad (\text{四腔})$$

通过不断增加 S_iR_i 单元 , 即不断增加腔的数目 , 则可自动优化获得最佳评价函数的多腔结构。步骤简述如下 (i) 根据带宽要求给定初始结构 R_0 ; (ii) 增加 S_1R_1 优化 p_0, p_1 和 q_1 , 优化减反射膜 ; (iii) 若不满足设计指标 , 继续增加 S_2R_2 , 优化 p_0, p_1, p_2, q_1, q_2 , 及减反射膜 (iv) 直至全部设计指标满足为止。

滤光片的设计目标为 $W_{0.5 \text{ dB}} > \alpha, W_{25 \text{ dB}} < \beta, \alpha,$

β 为表 1 所列数据 根据带宽要求确定 矩形度 $\eta < 3$ 波纹系数 r 定义为通带内最大分贝与最小分贝之差 其值尽可能小。用此方法同样可设计得到性能优良的滤光片。

结论 要设计一个性能优良的密集型波分复用薄膜滤光片并非易事 特别是考虑到制备工艺和成品率等因素时难度就更大。

滤光片的带宽取决于 n_H/n_L 、间隔层的级次 q 、反射镜的反射率(高低折射率之比和周期数 p)以及反射镜的相位色散。

滤光片的矩形度 η 取决于腔的数目 m , 或者说正比于腔的数目, 而与薄膜材料的高低折射率之比无多大关系。腔的数目增加, 滤光片的半宽度(即 -3 dB 处的带宽)是不变的, 但 -0.5 dB 处的带宽会增加, 而 -25 dB 处的带宽会明显缩小。一般说来, 带宽越窄的滤光片, 其矩形度会越好。

插入损耗和波纹主要取决于滤光片和周围媒质的匹配, 用对称周期膜方法可较好地获得匹配膜系。

设计滤光片的目的, 就是要寻找满足滤光片带宽、矩形度、损耗和波纹等要求的解, 通常这种解是非常多的, 这就为我们选择热稳定性好、角度效应小、又易于制备的解提供了便利。

参 考 文 献

- [1] Yanagimachi Y, Oguri H, Nayyer J *et al.*. High-performance and highly stable 0.3 nm full-width at half maximum interference optical filters. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(16): 3513~3517
- [2] Scobey M A, Lekki W J, Geyer T W. Filters create thermally stable, passive multiplexers. *Laser Focus World*, 1997, **33**(3): 111~116
- [3] Minowa J, Fujii Y. High performance bandpass filter for WDM transmission. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(2): 193~194
- [4] Takashashi H. Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 667~675
- [5] Zhang K, Wang J, Schwondeman E *et al.*. Group delay and chromatic dispersion of narrow bandpass filters used in DWDM systems. *Optical Interference Coatings, Technical Digest*, 2001, July, WD6: 1~3. Benf, Canada
- [6] Bai Shengyuan, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Optical stability of thin film filters. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(5): 576~580 (in Chinese)
- [7] Zoller A, Gotzelmann R, Matl K *et al.*. Temperature-stable bandpass filters deposited with plasma ion-assisted deposition. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5609~5612
- [8] Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Refractive indexes of oxidized thin films deposited by ion beam sputtering. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3): 290~293 (in Chinese)

Design of DWDM Thin-Film Interference Filters

Gu Peifu Bai Shengyuan Li Haifeng Zhang Yueguang Liu Xu Tang Jinfa

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 3 August 2001; revised 4 October 2001)

Abstract: The basic performance of thin-film interference filters used in Mux/Demux systems is presented. In response to the requirement it is important that coating materials and filter substrates must be selected carefully, and the filter designs must have excellent performance and preparation tolerance. Two design methods suitable for DWDM filters are discussed.

Key words: dense wavelength division multiplex; thin-film interference filter; coating design