

文章编号: 0253-2239(2003)03-0377-04

用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进*

顾培夫 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: 对倾斜入射时窄带薄膜滤光片的特性作了描述, 由于低折射率间隔层的滤光片, 倾斜入射时 p 偏振分量的通带比 s 分量更移向短波, 而高折射率间隔层的滤光片则反之, 因此可把间隔层同时设计成高、低折射率两种材料, 或选用适当的中间折射率材料, 使 p 分量和 s 分量两个通带的中心波长重合。设计了用于 20° 入射角的密集波分复用(DWDM)滤光片, 并给出了实验结果。

关键词: 光学元件; 倾斜入射; 窄带滤光片; 消偏振设计

中图分类号: TN202 文献标识码: A

1 引 言

窄带滤光片广泛应用于各种技术领域。在某些场合, 滤光片必须应用于倾斜入射的准直光束中。但是, 当入射角大于 15° 时, 滤光片的光学特性会产生两个显著的变化。首先, 其通带位置即峰值波长向短波移动; 其次, s 偏振光和 p 偏振光的特性产生分离。产生分离的原因是: 一方面由于 s 偏振光的反射率高于 p 偏振光, 因此 s 偏振光的通带宽度小于 p 偏振光; 另一方面由于高低折射率膜的有效折射率不同, 使两个偏振分量的峰值波长不再重合。这种现象随着滤光片带宽变窄而加剧, 因而在密集波分复用(DWDM)超窄带滤光片中成为一个非常突出的问题。

倾斜入射对窄带滤光片特性的影响, 已有一些文献作过报道^[1~3]。特别值得指出的是 Baumeister^[4]的工作, 他从微波滤光片的设计概念出发, 用驻波比技术来匹配反射带, 从而设计出夹在两个 45° 棱镜斜面上的 45° 使用的消偏振带通滤光片。然而, 为了对两个偏振分量的反射带宽实现匹配, 滤光片反射膜堆的材料多达 7 种, 给制备带来了困难, 且滤光片是胶合在棱镜中的, 使某些应用受到了限制。Cushing^[5]提出的方法是通过调节间隔层或者说在间隔层中插进另一种材料的半波层, 使 s 和 p 偏振光的通带分别在其短波侧或长波侧靠近, 然后将这两个滤光片串接, 以减少两个偏振分量特

性之间的分离, 这是一种既易于设计又易于制备的简单方法。

本文对倾斜入射使用的滤光片特性作了描述。在倾斜入射时, 以低折射率膜作为间隔层的滤光片, p 偏振光的通带要比 s 偏振光更移向短波, 而以高折射率膜作为间隔层的滤光片, 则恰好相反, 因此, 如果间隔层同时由高、低折射率两种材料组成, 或采用一适当中间折射率的膜层作为间隔层, 则可望使两个偏振分量的峰值波长重合。本文设计了用于 20° 入射角使用的密集波分复用滤光片, 并制备了这种滤光片, 实验结果与设计曲线基本相符。

2 倾斜入射对窄带滤光片特性的影响

当窄带滤光片在准直光中倾斜 20° 使用时, 其主要的影响是其峰值波长向短波移动, 并发生两个偏振分量特性的分离。这个影响可以把滤光片视为一个有效折射率为 N 的理想滤光片间隔层的变化引起的^[6], N 的数值介于滤光片膜料的高低折射率之间, 并有

对低折射率间隔层,

$$N_L = n_L \left[\frac{m - (m-1)(n_L/n_H)}{m - m(n_L/n_H) + (n_L/n_H)^2} \right]^{1/2},$$

对高折射率间隔层,

$$N_H = n_H \left[\frac{m - (m-1)(n_L/n_H)}{m - 1 - (m-1)(n_L/n_H) + (n_H/n_L)^2} \right]^{1/2},$$

式中, n_H 和 n_L 分别是高、低折射率膜的折射率, m 为干涉级次。于是, 只要反射膜堆的反射相位为 0 或 π , 滤光片峰值波长便出现在 $2\pi Nd \cos \theta / \lambda = m\pi$ 处, θ

* 高等学校重点实验室访问学者基金资助课题。

E-mail: gupeifu@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-04-01; 收到修改稿日期: 2002-04-28

为光在有效折射率 N 材料中的折射角, d 为膜层几何厚度。由正弦定律 $n_0 \sin \theta_0 = N \sin \theta$, 设 $n_0 = 1$, 得

$$\cos \theta \approx 1 - 0.5(\theta_0/N)^2,$$

即 $\lambda \approx \lambda_0 [1 - 0.5(\theta_0/N)^2]$,

式中, λ_0 为垂直入射时的中心波长, θ_0 为入射角。在 θ_0 下波长移动为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda \approx (\lambda_0/2)(\theta_0/N)^2.$$

显然, 当入射角不是太大时, 峰值波长的移动正比于入射角的平方而反比于滤光片有效折射率 N 的平方。

表 1 列出了两个三腔滤光片在空气中以 20° 入射时的中心波长和半峰全宽, 滤光片的设计分别为

$$G/[(HL)^8 H 10L H(LH)^8 L]^3/A, \quad (1)$$

$$G/[(HL)^8 10H (LH)^8 L]^3/A, \quad (2)$$

其中, 基板折射率为: $n_G = 1.5, n_H = 2.05, n_L = 1.458, \lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 。它们的理论计算曲线示于图 1。

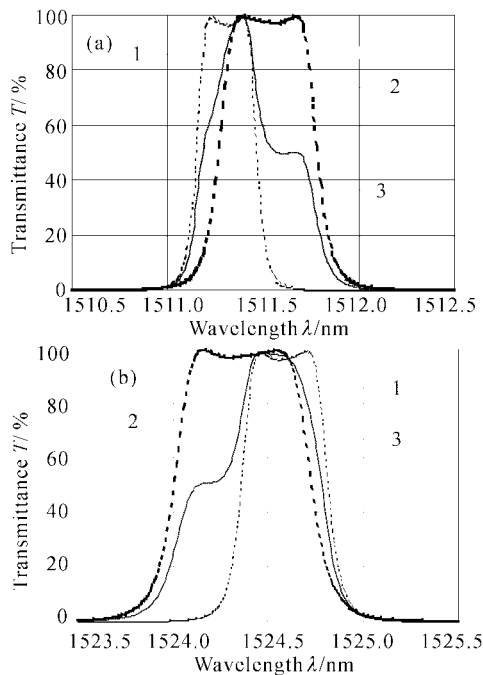


Fig. 1 The calculated transmittance curves of design 1 (a) and design 2 (b) at incident angle 20° .

1: p-polarization; 2: s-polarization; 3: average

由表 1 和图 1 可以看出, 首先, 对密集波分复用超窄带滤光片, 即使以小角度倾斜使用时, 滤光片中心波长已产生很大的短移, 其中高折射率间隔层的滤光片短移要比低折射率间隔层的小得多, 这是因为高折射率间隔层的滤光片具有较高的有效折射率。其次, 由于 p 分量和 s 分量的有效折射率不同,

滤光片 p 分量和 s 分量的中心波长产生明显分离, 对低折射率间隔层的滤光片, p 分量的中心波长 λ_p 大于 s 分量的中心波长 λ_s ; 反之, 对高折射率间隔层的滤光片, $\lambda_p < \lambda_s$ 。最后, 因高低折射率膜的有效折射率之比 p 分量小于 s 分量, 滤光片 p 分量的半峰全宽总是大于 s 分量的半峰全宽。

Table 1. Central wavelength and bandwidth of two typical filters at incident angle of 20°

	Design 1	Design 2
N_H, N_L	1.533	1.881
Central wavelength λ_p/nm	1511.523	1524.367
λ_s/nm	1511.303	1524.587
Bandwidth (FWHM) $(\Delta\lambda_{0.5})_p/\text{nm}$	0.516	0.722
$(\Delta\lambda_{0.5})_s/\text{nm}$	0.317	0.456

滤光片中心波长 p 分量和 s 分量的分离与滤光片的结构有一定的关系。就其间隔层而言, 低折射率膜的间隔层要比高折射率膜的间隔层分离大, 而且, 无论是高折射率膜的间隔层还是低折射率膜的间隔层, 偏振分离均随着干涉级次增加而增大。此外, 随着反射膜周期的增加或半峰全宽的变窄, 偏振分离也变得更严重, 这就是密集波分复用滤光片倾斜使用时必须考虑偏振分离的原因。

3 改进设计

据上分析, 为了减少滤光片的偏振分离, 可以将间隔层同时包含高折射率材料和低折射率材料, 使 p 分量和 s 分量的中心波长基本重合, 从而使滤光片在倾斜入射时仍能有效地工作。

作为设计例子, 图 2 是在 2L 间隔层两侧加上 2H 层后的计算曲线。膜系为

$$G/[(HL)^8 H 2H2L2H H(LH)^8 L]^3/A. \quad (3)$$

膜层折射率与式(1)和(2)相同, $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, 在空气中的入射角为 20° 。类似地, 也可在 2H 间隔层滤光片的 2H 两侧加上 2L 层, 但由于膜系(3)的间隔层高折射率膜更厚, 所以对应的波长短移也更小。膜系(3)也可写成

$$G/[(HL)^8 3H2L3H (LH)^8 L]^3/A,$$

进而, 还可在 3H2L3H 两侧插入 2L, 即

$$G/[(HL)^8 2L3H2L3H2L(LH)^8 L]^3/A,$$

膜系中心波长仍保持一致。值得指出的是, 一旦膜系设计已实现 p 分量和 s 分量的中心波长一致, 反射膜周期或半峰全宽对偏振分离的影响便可忽略, 因而可以方便地调节通带宽度。

采用高干涉级次的滤光片设计:

$$G/[(HL)^7 7H2L8H2L7H(LH)^7 L]^3/A$$

同样可达到目的。这说明有多种设计可使滤光片 p 分量的中心波长与 s 分量保持重合。设计方法可简单地描述为：若 $\lambda_p > \lambda_s$ ，则间隔层需增加高折射率膜层，反之，则需增加低折射率膜层。通过适当调节高低折射率膜的厚度比，最终使两者的中心波长重合。

还有一种方法是选择第三种材料作为间隔层，例如，

$$G/[(HL)^8 H10MH(LH)^8 L]^3/A,$$

其中，中间折射率 $n_M = 1.64$ 。用这种方法具有同样的效果，只是增加了一种中间折射率的薄膜材料。

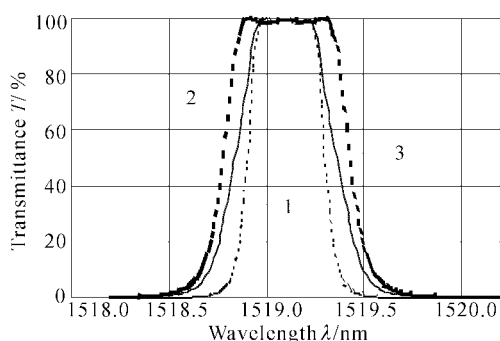


Fig. 2 The calculated transmittance curves of improved design 3 at incident angle 20° . 1: p-polarization; 2: s-polarization; 3: average

应该指出的是，改进后的上述膜系由于没有完全消偏振，p 分量和 s 分量的半峰全宽分离依然存在。而且，滤光片倾斜使用时的波长短移也是不可避免的，只是由于间隔层同时包含高折射率材料和低折射率材料，或采用中间折射率材料，故中心波长的短移量介于膜系(1)和(2)之间。

4 实验结果

实验是在 Veeco 公司的设备上进行的。采用膜系(3)进行实验，膜层材料为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ，其实验的折射率分别为 2.05 和 1.458^[7]。控制波长为 1550 nm。为了增加通带的透射率和减小波纹，膜系最外二层设计成减反射膜，其厚度分别为 1.382H 和 1.176L。测量是在 Agilent 8164A 1550 nm 可调谐激光测试系统上完成的。

图 3 是垂直入射和入射角大约为 20° 时的损耗测量曲线。由于 20° 测量时没有对应的偏振片，故没有分别对 p 分量和 s 分量进行测量。由图 3 可见，改进的滤光片即使在 20° 的入射角下，自然光的分光透射曲线与垂直入射时的形状基本一致，但其

波纹、截止度和陡度稍有变差。此外，滤光片的中心波长从 1550 nm 移到了 1519.1 nm。以上测试结果与理论计算结果相符。

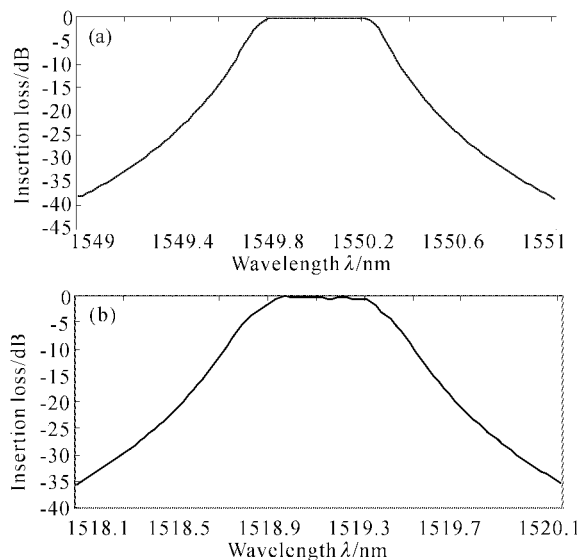


Fig. 3 Measured insertion losses of design (3) at normal incidence (a) and incident angle 20° (b)

结论 超窄带干涉滤光片在倾斜入射时不可避免地会遭到特性恶化，通过调节滤光片间隔层高、低折射率的厚度比，或通过选用一适当的中间折射率材料，可使滤光片在倾斜入射时 p 分量和 s 分量的峰值波长保持一致，从而使滤光片仍保持优良的特性。理论设计和实验结果说明这种方法是简单可行的。

参 考 文 献

- 1 Macleod H A. *Tilted films. Optical Coatings*. Beijing: Thin Film Optics Committee, Optical Society of Beijing, 1983. 9~19
- 2 Yanagimachi T. High-performance and highly stable 0.3 nm-full-width-at-half-maximum interference optical filters. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(16):3513~3517
- 3 Lee C C. *Thin-Film Optics and Coating Technology* (薄膜光学与镀膜技术). 2nd ed. Beijing: Yi Hsien Publishing Company, 2001. Ch. 8 (in Chinese)
- 4 Baummeister P. Bandpass design-application to non-normal incidence. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(4):504~512
- 5 Cushing D. Bandpass filter for 45 angle with low polarization properties. *OSA Technical Digest*, series Vol. 19, Optical Interference Coatings, Tucson, 1998, 226~228
- 6 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters*. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1986, 260~265
- 7 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)

Characteristics and Improvement of Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Thin Film Filters Used in Tilted Incidence

Gu Peifu Li Haifeng Zhang Yueguang Liu Xu Tang Jinfu

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

(Received 1 April 2002; revised 28 April 2002)

Abstract: The characteristic of thin film narrowband filters used in tilted incidence is described. The wavelength shift to shorter wavelength in a low index spacer filter for p-polarization component is larger than that for s-polarization component when filter is tilted. On the contrary, the shift in a high index spacer filter for p-component is less than that for s-component. Therefore the passbands of a tilted filter can be centered at the same wavelength for two polarization modes by means of using high and low index materials for a spacer, or selecting a moderate index material instead of a spacer. Designs of DWDM filters used for incident angle of 20° are presented, and the experimental results are discussed.

Key words: optical component; tilted incidence; narrow band-pass filter; non-polarization design