一种新型的低角度效应的滤波器*

·薛 晖^{1)*} 郑臻荣¹⁾ 顾培夫¹⁾ 张锦龙¹⁾ 沈伟东¹⁾ 陈海星²⁾

1) 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

2)(杭州科汀光学技术有限公司,杭州 311100)

(2008年6月23日收到 2008年9月3日收到修改稿)

低角度效应的滤波器由高折射率的介质膜和金属膜交替的奇数层膜组成.这种滤波器使用于斜入射光和大光 锥角照明时,不仅中心波长移动显著减少,而且特性仍能保持良好.理论和实验表明,这种新型滤波器能突破现用 滤波器对入射角和光锥角的限制.实现低角度效应的主要原理是高折射率材料的使用及其诱导透射的实现.

关键词:光学薄膜,新型滤波器,低角度效应 PACC:4280X,4280B,4225J

1.引 言

法布里-珀罗干涉滤波器(FPF)是最简单而又最 常用的干涉滤波器^[12].尽管今天已派生了许多薄膜 滤波器结构,但是所有这些结构,其基本原理都是基 于中心波长的光波在 FPF 间隔层中多次反射干涉 加强而使透射增强的同时,在其他波长区域干涉抵 消而使透射被抑制,从而达到滤波的目的.但是这种 基于 FPF 干涉原理的滤波器都有一个致命的弱点, 即它们在大入射角和大光锥角的照明光中使用时滤 波特性会明显恶化.但实际情况恰恰是滤波器有时 既要在非垂直入射光,又需要大光锥角下使用,如角 度调谐滤光片^[3-7]等,角度效应会使滤波器的效率 大大降低,甚至完全不能使用.

本文提出另外一种结构的滤波器来实现滤波的 目的,这种滤波器并不基于 FPF 的干涉原理,它没 有间隔层,是一种高折射率膜与金属膜的交替多层 膜,高折射率膜层的厚度可以小于滤波器中心波长 的四分之一,层数常为5层或7层.为了得到较好的 窄带滤波性能,层数多选7层,而且靠中央的两层高 折射率膜层的厚度选为高级次.使用这种结构,即使 滤波器使用于斜入射光和大光锥角时,不仅滤波器 中心波长移动少,而且仍能保持其良好的特性,从而 突破了现用滤波器不能用于较大入射角和较大光锥 角的限制.滤波器的这种特性主要是基于膜系中没 有使用低折射率材料,而全部采用高折射率材料和 金属膜.但由于金属膜吸收较大,会大大降低峰值透 射率,而高折射率薄膜恰能在中心波长上诱导金属 膜的透射而使吸收降低,从而使中心波长的透射增 强.

2. FPF 的角度效应

由于 FPF 的结构很多,这里仅以全介质单腔滤 波器为例,因为它是最基本、最简单的结构.这种 FPF 可表示为

G (HL) HH(LH) A ,

H-TiO₂ ,L-SiO₂ ,
$$\lambda_0 = 538$$
 nm

其中 ,G 为玻璃基底 ,A 为空气 ,H 为高折射率材料 , L 为低折射率材料 ,HH 称为间隔层 , λ_0 为中心波 长 .TiO₂ 和 SiO₂ 膜的折射率列于表 1.考虑到高折射 率材料作为间隔层的角度效应最小 ,故选高折射率 材料作为间隔层 .计算得到其 λ_0 = 538 nm、半宽度 $\Delta\lambda$ = 8 nm、峰值透射率 $T_{\rm M}$ = 95.5% .

图 1 给出了入射角和光锥角对上述 FPF 滤波器 特性的影响 (a)图表示入射角和光锥角均为零时的 特性 (b)和(c)图分别给出 30°入射角和 20°光锥角 时以及 45°入射角和 30°光锥角时的计算结果.可以 看出 随着入射角和光锥角的增大,滤波器中心波长

^{*}国家自然科学基金(批准号 160608014 60708013)资助的课题.

[†] E-mail:xuehui1223@126.com

表 1 TiO₂ SiO₂ 和 Ag 膜在可见区的折射率

波长/nm	400	450	500	550	600	650	700
TiO ₂	4.521	2.469	2.422	2.385	2.351	2.337	2.326
SiO_2	1.464	1.460	1.457	1.454	1.451	1.448	1.446
Ag	0.075—i1.93		0.050—i2.87		0.060—i3.75		0.075—i4.62

图 1 入射角和光锥角对 FPF 特性的影响 (a)入射角和光锥 角均为零 (b)30°入射角和 20°光锥角 (c)45°入射角和 30°光 锥角

向短波显著移动,而且峰值透射率下降,半宽度迅速 增大.在30°入射角和20°光锥角时,滤波器的滤波效 率已大为降低;在45°入射角和30°光锥角时,滤波 器特性己完全恶化,特别是截止度的破坏导致滤波 器已失去实用价值.

3. 新型滤波器的角度效应

一种低角度效应的新型滤波器由高折射率的介

质膜和低吸收的金属膜交替组成.最典型的设计为 7 层.即

$G \mid HMHMHMH \mid A$,

其中高折射率材料 H 可从 TiO₂,Ta₂O₅ Nb₂O₅ 和 ZnS 四种材料中任意选取其中之一,每层膜的厚度根据 滤波器的中心波长、半宽度和所选高折射率材料的 不同而有所不同,特别是当半宽度要求较小时,靠中 心的二层高折射率膜需选用高级次膜;金属膜 M 常 选 Ag,其光学常数也被列于表 1.银膜的厚度由滤波 器的中心波长和半宽度决定,一般为 30—60 nm.

作为例子,7 层滤波器结构的各层膜厚列于表 2.计算得到其 $\lambda_0 = 536.5 \text{ nm}$ 、半宽度 $\Delta \lambda = 9 \text{ nm}$ 、峰 值透射率 $T_M = 77\%$.

表 2 7 层 TiO_2 和 Ag 交替的低角度效应的滤波器

玻璃基底	TiO ₂	Ag	TiO ₂	Ag	TiO ₂	Ag	TiO ₂ 空气
膜厚 d/nm	42.4	32.0	516.6	56.0	516.6	38.0	42.4

这种新型的滤波器使用于斜入射光和大光锥角 时,不仅滤波器中心波长向短波移动小,而且滤波器 特性变化也相应减小.图2给出了入射角和光锥角 对这种新型滤波器特性的影响,以便与图1的FPF 比较.

新设计的滤波器相比于常用的 FPF,虽然膜层 数目减少了近一半,但是中心波长两侧的截止度仍 很高;当然,由于使用了金属 Ag 膜,使垂直入射时 中心波长的峰值透射率有所降低.在角度效应方面, 虽然 FPF 已选用了角度效应最小的膜系结构,但新 设计的滤波器随着入射角和光锥角增大仍具有:中 心波长向短波的移动量小;透射率下降和半宽度增 大相对较少 s和 p 偏振光分离明显减小;截止深度 具有明显的优势.新滤波器即使在 45°入射角和 30° 光锥角下使用仍具有较好的滤波性能,不像 FPF 完 全失去了滤波器特性而无法使用.

4. 实 验

实验在国产南光机器上进行的.基板温度为室 温.高低折射率材料 TiO₂ 用电子束蒸发,其淀积速 率约为0.25 nm/s; Ag 用电阻加热蒸发,淀积速率约

100



图 2 入射角和光锥角对新型滤波器特性的影响 (a)入射角和 光锥角均为零 (b)30°入射角和 20°光锥角 (c)45°入射角和 30° 光锥角

为 5 nm/s.蒸发 TiO₂ 膜时真空氧压约为0.015 Pa.膜 层厚度用石英晶振法监控.图 3 是垂直入射、30°和 45°入射角的光度测试结果.由于分光光度计测试光 束的光锥角约为 5°,所以测试得到的角度效应引起 的特性变化主要是由入射角引起的.



图 3 垂直入射、30°和 45°入射角的光谱测试曲线

5. 讨论

为了比较上述 FPF 和新设计的滤波器在倾斜 入射和锥光束照明时的特性 表 3 列出了它们在 30° 入射角和 20°光锥角时的峰值平均透射率 T_{M} 、半宽 度 $\Delta\lambda$ 、在波长 580 nm 处的截止度 T_{min} 、中心波长向 短波移动量 $\Delta\lambda_0$ 、两偏振分量的透射率之差 $T_p - T_s$ 、两偏振分量在半宽处短波边缘的分离 $\lambda_s - \lambda_p$ 等 设计特性参数.可以看出 新设计的角度效应显著降 低,偏振分离减小,因而滤波器在倾斜入射和锥光束 照明时的性能退化要比 FPF 轻微得多.

表 3	两种滤波器在	30°∧	、射角和	20°光锥角	时的特性比较

滤波器	$T_{\rm M}$ / %	$\Delta\lambda/\mathrm{nm}$	$T_{ m min}$ / %	$\Delta \lambda_0 / \text{nm}$	$(T_{\rm p}-T_{\rm s})\%$	$(\lambda_{s}-\lambda_{p})/nm$
FPF	43.8	19	1.51	19	16.8	5.1
新设计	62.9	12	0.05	8.5	4.7	2.4

产生上述效果的原理可归结为二点:第一,膜系 中采用了具有低角度效应的高折射率薄膜材料.计 算表明,高折射率的 TiO₂ 薄膜由垂直入射变为 30° 和 45°入射时,中心波长短移分别为 8 和 16 nm,而对 低折射率的 SiO₂ 薄膜,其对应的中心波长短移分别 为 32 和 63 nm,可见在同样的入射角下,低折射率薄 膜的角度效应足比高折射率薄膜大 4 倍.通常总以 高、低折射率薄膜来构筑反射镜,其对应的中心波长 移动应介于上述高、低折射率薄膜之间.第二,为了 避免使用低折射率膜,采用银膜作为反射镜,而银膜 的吸收损失较大,因而采用诱导透射原理.所谓诱导 透射原理就是在银膜两侧设计适当的减反射膜而使 银膜的最大可能的透射 T_M诱导出来,即

$$T_{\rm M} = (1 - R)\psi,$$

式中, $\psi = \frac{T}{1-R} = 1 - \frac{A}{1-R} = \frac{T}{T+A}$ 称为势透射率,

其中 *T* ,*R* ,*A* 分别表示诱导透射系统的透射率、反 射率和吸收.显然 ,只有当 *A* = 0 时 ,势透射率才等 于 1 ,若同时使 *R* = 0 ,则系统的 *T*_M = 1.TiO₂ 薄膜作 为银膜的减反射膜虽不能达到 *R* = 0 ,但足以使银膜 的反射显著降低 ,进而使 *A* 下降 ,使透射率增加.由 于 TiO₂ 薄膜并非最佳匹配 ,故中心波长的最大峰值 透射率 *T*_M = 77%.

新设计的基本结构是高折射率膜和金属膜交替 的奇数层结构,其层数主要取决于半宽度和截止度, 图4是5层和7层两种结构的滤波特性,其对应的 结构列于表4.显然,层数增加有利于压缩半宽度, 更有助于改善截止度.



图 4 5 层和 7 层两种结构的光谱特性

表 4 5 层和 7 层两种基本结构的物理厚度(单位 inm)

玻璃基底	TiO ₂	Ag	TiO ₂	Ag	TiO ₂	Ag	TiO ₂	空气
5 层结构	35.9	40.0	71.7	45.0	35.9			
7 层结构	38.1	34.0	73.5	60.0	73.5	40.0	38.1	

靠中央的高折射率膜采用高级次厚度,对压缩 半宽度有很大贡献,但是由于高级次膜的使用,长波 和短波出现相应的次透射带,因而需要辅助膜系或 吸收玻璃来消除这些次峰.图 5 是 7 层膜结构采用 不同级次后的滤波特性变化,图中 1,2,3 分别表示 中央两层高折射率膜的物理厚度为 73.5,299.2 和 516.6 nm.显然,随着级次的提高,半宽度明显缩小.

制备时关键工艺是膜厚监控和银膜的蒸发速率.膜厚监控可以采用石英晶振法,也可以用任意膜厚监控法.由于晶振法比较直接,故本实验采用晶振法.银膜蒸发速率要适当快一些,以减小吸收,但太



图 5 7 层膜结构采用不同级次膜厚引起滤波特性的变化

快又会导致膜厚监控困难,故本实验控制在 5 nm/s 左右.实验测试结果表明,新型滤波器从垂直入射时 的中心波长 542.5 nm 短移到 45°时的 524.5 nm,波 长短移量为 18.0 nm,与理论计算值 18.6 nm 很接 近.在忽略光锥角的同样条件下,上述 FPF 的短移 量为 35.5 nm,可见新型滤波器的短移量减小了约 一半.

从计算和实验还可以看出,波长短移和偏振分 离主要是由入射角引起的,光锥角的影响基本上可 以忽略 相反,对滤波器峰值透射率和半宽度的影响 主要是光锥角而不是入射角.

6.结 论

新设计的滤波器结构简单 相比于常规的 FPF, 角度效应对滤波器特性的影响大大降低.在 30°入射 角和 20°光锥角下,新设计的滤波器因角度效应引起 的中心波长短移减小了 55%,s和p偏振分量的透 射率之差及半宽处短波边缘的分离分别降低了 72%和 53%,因而滤波器的峰值平均透射率、半宽 度和截止度都没有像 FPF 那样受到严重退化.

研究结果还表明,波长短移和偏振分离主要是 由入射角引起的,新型滤波器的短移量仅为 FPF 的 一半,而峰值透射率和半宽度退化主要是由光锥角 引起的,光锥角对新型滤波器的特性影响显著降低. 这对设计和使用滤波器时选择入射角和光锥角是很 重要的.

- [1] Unlu M S , Strite S 1995 J. Appl. Phys. 78 607
- [2] Hunt N E J, Schubert E F, Zydzik G J 1993 Appl. Phys. Lett. 63 391
- [3] Lee H Y , Yao T 2003 J. Appl. Phys. 93 819
- [4] Song Q H , Lin L Y , Ling T , Xu L , Wang W C 2003 Appl . Phys. Lett. 82 2923
- [5] Hu Z F 2004 Chin. Opt. Lett. 2 15
- [6] He Y J, Su H M, Tang F Q, Dong P, Wang H Z 2001 Acta Phys. Sin. 50 892(in Chinese)[何拥军、苏惠敏、唐芳琼、董 鹏、 汪河洲 2001 物理学报 50 892]
- [7] Liu NH, Fu JW 2003 Acta Phys. Sin. 52 1418 (in Chinese) [刘 念华、傅继武 2003 物理学报 52 1418]

A novel filter with low angle effect *

Xue Hui¹)[†] Zheng Zheng-Rong¹) Gu Pei-Fu¹) Zhang Jin-Long¹) Shen Wei-Dong¹) Chen Hai-Xing²)

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

2 X Keting Optical Technology Inc., Hangzhou 311100, China)

(Received 23 June 2008; revised manuscript received 3 September 2008)

Abstract

The filters with low angle effect are composed of high index dielectric layers and metallic layers laid alternately. When used in the case of oblique incidence or large cone angle incidence, this filter reduces shift of central wavelength significantly while still maintaining its filter characteristics. Theoretical and experimental studies show that such a novel filter can be used in the situation of both large incident angle and cone angle. This effect is due to the usage of high index material and its induced transmittance.

Keywords : optical thin film , novel filter , low angle effect PACC : 4280X , 4280B , 4225J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60608014 ,60708013).

[†] E-mail :xuehui1223@126.com