

文章编号: 0258-7025(2008)09-1375-05

角度调谐滤光片光斑整形设计与实验

俞侃^{1,2} 刘文^{1,3} 黄德修^{1,2} 常进³ 黄华茂^{1,2}

(¹ 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)
³ 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 在测试制备的 100 GHz 密集波分复用(DWDM)低偏振相关损耗的角度调谐滤光片时,其透射光谱的插入损耗和带宽的展宽现象会随着入射角度的加大而迅速增加,与理论设计不符。通过多光束干涉原理建立模型模拟,发现在倾斜入射时滤光片的透射光束的光斑会出现展宽和形变,使得位于接收端处的光准直器接收不到足够的透射光束,导致了光谱变形。根据分析结果设计了一种利用直角棱镜的光斑整形方案,能将展宽的椭圆光斑压缩回近似的圆形光斑。制备了一组直角棱镜整形装置,实验证明该设计能够在保持接收端光准直器位置固定的情况下有效地减小透射波形的损耗和半宽展宽现象,使角度调谐滤光片能达到理论设计中 20 nm 的可调谐范围。

关键词 薄膜;窄带滤光片;倾斜入射;光斑整形

中图分类号 O 484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083509.1375

Design and Research of Facular-Shaping on the Angle-Tuned Filter

Yu Kan^{1,2} Liu Wen^{1,3} Huang Dexiu^{1,2} Chang Jin³ Huang Huamao^{1,2}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China
²School of Optoelectronic Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
³Wuhan Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In testing the 100 GHz dense wavelength division multiplexer (DWDM) angle-tuned filter with low polarization dependent loss, the insertion loss and bandwidth broadening of the transmission optical spectrum will become more and more serious as the increase of incident angle. It is not coincide with the theoretical design. According to the theory of the multiple-beam interference, the theoretical analysis model is built up and simulated. The simulation results show that the transmission facular of the thin film filter will broaden obviously. It cause a serious spectrum distortion because the collimator at the incepting port cannot collect all the output beams. According to the analysis results, one kind of facular-shaping fitting used the upright angle prisms is designed and fabricated in the paper. It can empress the elliptical facular into a nearly circular shape in one dimension. The experimental results show that it can effectively reduce the insertion loss and the phenomenon of half bandwidth broadening. Using the spot-shaping fitting, the tunable range of the filter is about 20 nm which coincides with the theoretical design.

Key words thin film; narrowband filter; tilted incidence; facular-shaping

1 引言

在密集波分复用(DWDM)系统中,薄膜干涉滤光片具有通带窄、插入损耗低、温度稳定性好等诸多优异的特性^[1],应用十分广泛。在倾斜入射时,滤光片的透射通带和峰值会向短波方向移动。依此原理

设计的可调滤光片,由于结构简单、成本低,受到了人们的重视^[2~4]。本文根据前期工作中的设计^[5],制备了一种可应用于 100 GHz DWDM 系统的四腔窄带角度调谐滤光片,但在实验测试中发现可调滤光片随着调制角度的增大,透射光谱出现损耗迅速

收稿日期:2007-10-29;收到修改稿日期:2007-12-20

作者简介:俞侃(1978—),男,浙江人,博士研究生,主要从事光通信技术和器件的研究。E-mail:onlyfish@126.com

导师简介:黄德修(1937—),男,湖南人,博士生导师,主要从事光纤通信与传感方面的研究与教学工作。

E-mail:wnlo2@mail.hust.edu.cn

增大和波形带宽展宽的现象,这对实际应用极为不利。本文分析了出现这种现象的原因主要是由于在大角度倾斜入射时透射光的光斑会出现椭圆化的展宽和形变,通过计算模拟了该过程,并通过光路分析设计制备了一种利用直角棱镜组的光斑整形装置。测试证明该整形装置能有效地解决这种随着角度变化产生的光斑变形现象,在大角度入射时能将展宽的光斑压缩回光准直器的接受范围内,使滤光片在角度调谐时的透射特性非常稳定,达到其理论设计指标和要求。

2 实 验

实验所用的滤光片是深圳飞莱特公司根据文献[5]设计的膜系 $G/[(HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7 L(HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L(HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L(HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7]/A$ 在 Veeco 公司的镀膜设备上制备的。使用的高、低折射率膜料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 [6],其正入射时的中心波长为 1563 nm。其中,空气折射率 $n_0 = 1$,基板折射率 $n_G = 1.5$,高折射率材料的折射率 $n_H = 2.05$,低折射率材料的折射率为 $n_L = 1.46$ 。膜系结构中 H 和 L 分别表示高、低折射率层[7],其光学厚度为 $\lambda/4$,A 代表入射端的介质空气,G 代表玻璃基本,折射率为 1.52[8]。

该设计是一个具有四腔结构的膜系。通过对间隔层的调整消除了偏振光中心波长的分离现象,在角度调谐时能具有稳定的透射特性。在入射角度为 15° 时,滤光片的透射中心波长能从正入射时的 1563 nm 移至 1545 nm 左右。按照理论设计,滤光片在整个调制范围内的带宽等指标均满足 100 GHz DWDM 系统的要求并且具有很低的偏振相关损耗。使用一对固定放置在角度调谐滤光片两端的单芯光准直器,使用步进电机推动调制滤光片的入射角度,得到了如图 1 所示的不同角度下的透射光谱。

在正入射时其透射光谱形状良好、通带平坦,各项指标均和理论设计一致。但随着角度的增大,其透射波形变形严重,插入损耗随着入射角度的增加而迅速增大,通带不再平坦呈现高斯化,带宽展宽严重,这对角度调谐滤光片的实际应用极为不利。

3 理论分析

薄膜干涉滤光片是利用多光束干涉原理实现滤波的,多腔窄带滤光片的基本结构为高、低折射率膜

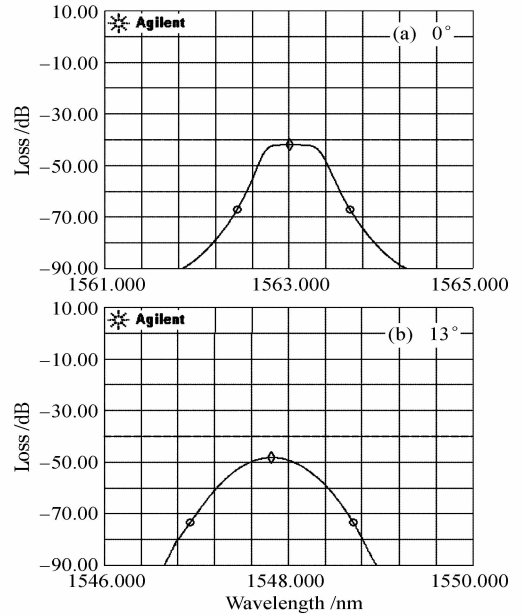


图 1 滤光片在 0° (a)和 13° (b)时的测量光谱

Fig. 1 Filter measured spectrum at the incident angle of 0° (a) and 13° (b)

层相间,每层膜的光学厚度为中心波长的四分之一整数倍。因为制备的四腔窄带角度调谐滤光片的膜层较多,所以整体的膜厚也较大。在大角度倾斜入射时,由于光线在各层薄膜间不断地反射和折射,透射光线会出现一定的位置偏移,随之光束的展宽也将产生模场和透射光斑的变化。由于光准直器输入到滤光片上的光信号为一个圆形光斑,正入射时透射光斑仍为一个圆形光斑[9]。但是在倾斜入射时随着角度的增大,透射光斑会产生位移并且形状发生改变。倾斜入射时,从空气进入的入射光经由多层规整薄膜的不断反射与折射后输出,会产生一定的位移偏移量。设整个多层膜系的膜层数目为 m ,其中根据膜系结构可知 $m = 136$ 。由 Snell 定律可知

$$n_0 \sin \theta_0 = n_H \sin \theta_1 = n_L \sin \theta_2 = \cdots = n_i \sin \theta_i = \cdots = n_H \sin \theta_m = n_G \sin \theta_{m+1}, \quad (1)$$

式中 θ_0 为入射角, θ_i 为第 i 层薄膜的折射角, n_i 为第 i 层薄膜的折射率(n_i 为 n_H 或 n_L)。每层薄膜引起的光路偏移量为 $s_i = d_i \tan \theta_i$,其中 d_i 为第 i 层薄膜的厚度。对于多层规整薄膜的厚度 d_i ,由于每层高低折射率材料的膜层的光学厚度都是四分之一中心波长,则有 $n_i d_i = \lambda/4$,可以推出

$$d_i = \lambda/4n_i, \quad (2)$$

由(1)式可知 $\sin \theta_i = n_0 \sin \theta_0 / n_i$ 成立,根据 $\tan \theta_i =$

$\sin \theta_i / \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}$ 可以得到光线经过整个多层膜系和基板后的位置偏移量为

$$S = \sum_{i=1}^{m+1} s_i = \sum_{i=1}^{m+1} d_i \tan \theta_i = \sum_{i=1}^{m+1} \frac{d_i \sin \theta_i}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}} \quad (3)$$

对于光束在多层薄膜中的传输,为简化计算只考虑输入光在薄膜内的四次反射后的透射光的干涉效应,高次反射忽略不计。经过测试光准直器的输入光斑直径为250 μm ,中心能量区域为80 μm 。通过输出光强叠加计算后模拟了滤光片在正入射和大角度(15°)倾斜入射时的模场能量近似分布情况和光斑尺寸,结果如图2所示。图中深浅色区域分别表示不同的能量分布区域。从图中可以看出,正入射时透射光斑的形状没有产生变化,但是随着入射角度的增大,透射光斑产生了形变,由圆形光斑逐渐椭圆化。在15°倾斜入射时光斑在图示水平方向展宽了约1.73倍。实验中采用微调架调整光纤准直器和芯片直接耦合对准^[10],导致了在调制过程中随着入射角度的增大,接收端光准直器的接收范围逐渐小于透射光斑的面积,接收不到足够的干涉光信号同时耦合度降低,产生了损耗增大和波形半宽展宽的现象。同时这一现象会随着入射角度的增加而越来越明显。

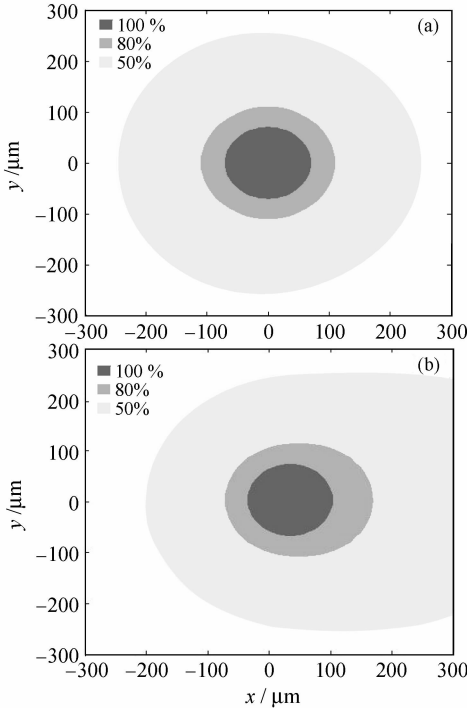


图2 入射角0°(a)和15°(b)时滤光片的透射模场仿真
Fig. 2 Simulation transmittance model field of the filter at the incident angle of 0° (a) and 15° (b)

通过模场模拟分析可以知道,随着角度的增大,滤光片的透射光斑变形是导致透射光谱形状恶化的主要原因。由于准直器的对准耦合过程要求十分精密,稍有变化就会导致其耦合度降低,所以要改善透射光谱特性就必须对透射光斑进行调整,使得在固定位置放置的光准直器能完全接收透射光信号。曾采用过使用补偿片的方式,就是利用一片和滤光片相同厚度的薄玻片,通过一对精密齿轮的带动使之和滤光片反相同角度旋转,利用光路的再次折射拉回光路位移,使得透射光束的中心能量部分回到准直器的接收范围内。如图3所示,实验结果表明该方案能够有效降低损耗,半宽展宽问题也能在一定程度上解决。但是由于光斑展宽明显,仍有相当的干涉光束在准直器的接受范围外,所以由于接收干涉光不足仍然导致透射光谱的带宽跟正入射相比展宽明显。所以要在根本上解决这一问题,就必须对展宽的透射光斑进行整形。

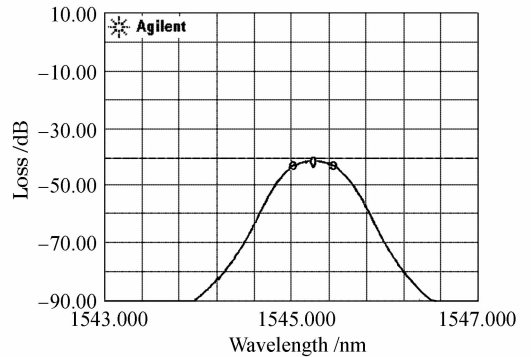


图3 加补偿片后的滤光片透射光谱
Fig. 3 Measured spectrum of the filter with the compensation fitting

4 校正光斑

质量较好的光束其光斑应当是圆形的,因为圆形光斑的面积比椭圆形光斑的面积更小,能有效提高照射目标单位面积的功率。光准直器有效发射和接收的光斑面积是一定的,透射光斑面积的扩大,就会使接收端光准直器的耦合难度增大,有一部分光超出范围不能被接收。要解决这一问题就必须对透射光斑进行校正和整形,压缩其光斑至准直器的接收范围。由于棱镜具有使光线向厚部偏折的特性,所以采用直角棱镜压缩光斑进行整形。由于光斑直径最大扩展了约1.73倍,则若要在最大角度入射时能将其整形回输入光斑大小就要至少压缩约0.57倍。

设棱镜的顶角为 α ,入射光束是经过滤光片后

透射并扩束的平行准直光。入射光束的直径为 d_1 ，经过直角棱镜后透射光束的直径为 d_2 ，入射角为 θ_1 ，透射角为 θ_2 ，入射光束在进入棱镜后的折射角为 β_1 ，达到斜面的入射角为 β_2 ，空气的折射率为 n_1 ，棱镜的折射率为 n_2 。直角棱镜的作用是使透射光束的直径减小，即 $d_1 > d_2$ 。如图 4 所示，根据几何光学可以得到

$$\theta_1 + \beta = \alpha, d_1 = a \cos \theta_1, d_2 = b \cos \theta_2, \quad (4)$$

设光斑的压缩比为 T ，若要达到压缩光斑直径的目的，则

$$T = \frac{d_2}{d_1} < 1, \quad (5)$$

又因为光束在经过棱镜的传输中满足 Snell 定律，则

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \beta_1, n_2 \sin \beta_2 = n_1 \sin \theta_2, \quad (6)$$

当光束以某角度入射棱镜并满足(4)~(6)式时可以实现光斑压缩。

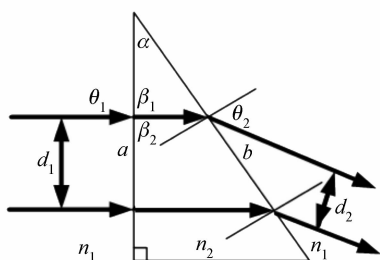


图 4 直角棱镜压缩光斑直径原理

Fig. 4 Principle of the spot compress using the upright angle prism

光束垂直入射直角棱镜， $n_1 = 1, n_2 = 1.5$ ，直角棱镜的顶角 $\alpha = 30^\circ$ 。则由几何关系可知： $d_1 = a, \theta_1 = 0, \beta_1 = 0, b = a / \cos \alpha, \beta_2 = \alpha$ ；则由(6)式计算可得 $\theta_2 = 48.59^\circ$ ，代入(4)和(5)式可得 $T = 0.76$ 。显然实现了光斑压缩。考虑到系统所需的压缩比，使用了双棱镜对滤光片的透射光斑进行压缩。两个棱镜都是顶角为 α 的直角棱镜，入射的直角面镀增透膜。经过一对直角棱镜后，其压缩比为 $T = 0.76 \times 0.76 \approx 0.57$ ，能够满足设计要求。这样通过该棱镜组的整形压缩，可以在光斑展宽最大情况下将其压缩回光准直器接受范围内的近似圆形光斑。在其他角度入射时，光斑虽然变小但是仍可以保证全部在光准直器的接收范围内，不会出现接收不到足够的干涉光束和影响耦合。

5 实验结果

加工了带整形棱镜组的实验器件后，重新对制

备的角度调谐滤光片的透射光谱进行测试。实验中使用的光源是 Agilent 83438A ASE 宽带可调谐激光测试系统，所用的单芯光准直器是武汉光迅科技股份有限公司生产的，损耗小于 0.2 dB，将其调光对准后固定放置于滤光片和整形棱镜组的两端，通过控制步进电机的推拉步数来实现对滤光片的角度调谐。由于该滤光片理论设计的最大调制角度为 15° ，所以分别测试了滤光片在正入射和 15° 倾斜入射时在光谱仪上的测量曲线，结果如图 5 所示。

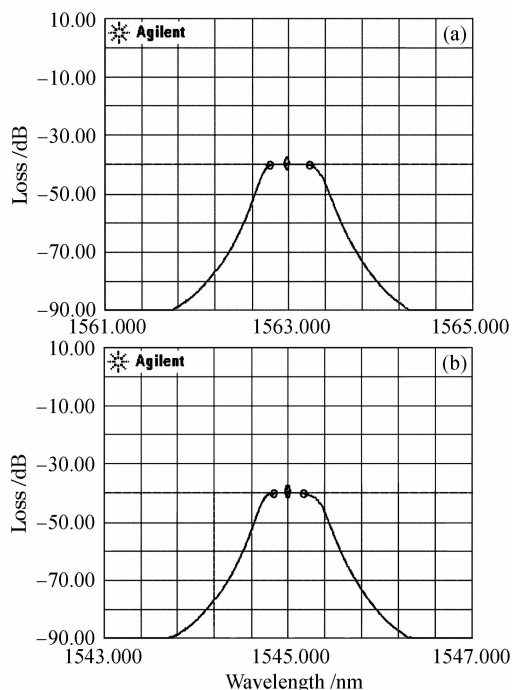


图 5 入射角 0° (a) 和 15° (b) 时带整形装置的滤光片测量光谱

Fig. 5 Measured spectrum of the filter with the shaping fitting at the incident angle of 0° (a) and 15° (b)

从图 5 可以看出，当滤光片的角度调谐到 15° 时，峰顶平坦，带宽稳定，没有产生较大的损耗和带宽展宽现象，各项指标完全满足 100 GHz DWDM 系统的要求，偏振相关损耗小于 0.2 dB。从光谱的谱形看，形状明显好于图 1 所示倾斜入射时的状况，较之图 3 所示的带补偿片的装置看也成功地实现了带宽的压缩，同正入射时光谱相比形状基本一致，说明在调制范围内具有稳定可靠的透射特性。 15° 倾斜入射时其中心波长由 1563 nm 移至 1545.2 nm，实验结果和该滤光片的理论设计值吻合。若保持滤光片截至带指标 1.2 nm 不变而将通带指标从 0.4 nm 降至 0.35 nm，则可调范围还可以扩大至 1535 nm 处，能进一步增加可调谐范围。说明在加了整形装置后，该角度调谐滤光片能实现较大的调谐量，满足了

设计要求的指标,同时降低了调制难度。

6 结 论

在利用调制角度实现滤光片的可调谐滤波时,由于滤光片本身的厚度和多层薄膜等效折射率的变化,会造成透射模场的变化从而导致透射光斑变形和展宽。这对使用光准直器进行接收耦合极为不利,透射光谱特性会随着角度的增大而变差,不能满足设计指标。通过增加棱镜组整形的方式对光斑进行压缩整形后可以有效地解决该问题。理论分析和实验证明该方法简单可行,对角度调谐滤光片的设计和使用有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):794~797
顾培夫,白胜元,李海峰等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(7):794~797
- 2 Yoshihiko Suemura, Ahio Tajima, Naoya Henmi *et al.*. An adaptive wavelength tunable optical filter employing an angle-tuned interference filter and an intelligent digital controller [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1048~1055
- 3 Anatoly Frenkel, Chinlon. Angle-tuned etalon filters for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **4**(7):615~624
- 4 Lawrence Domash, Ming Wu, Nikolay Nemchuk *et al.*. Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1):126~135
- 5 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Optimal design and arithmetic on the stack of the angle-tuned filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1287~1291
俞侃,刘文,黄德修等. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1287~1291
- 6 Wang Shaowei, Wang Li, Wu Yonggang *et al.*. Arrays of narrow bandpass filter fabricated by combinatorial etching technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):746~751
王小伟,王利,吴永刚等. 组合刻蚀法制备窄带滤光片阵列[J]. 光学学报, 2006, **26**(5):746~751
- 7 Cao Changsheng, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. A linear tuning filter based on thin-film interference filters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1055~1058
曹昌盛,罗斌,潘炜等. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(8):1055~1058
- 8 Chen Haixing, Gu Peifu, Lü Weige *et al.*. Superprism effect in thin film Fabry-Perot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):157~160
陈海星,顾培夫,吕维阁等. 薄膜法布里-珀罗滤光片中的超棱镜效应[J]. 光学学报, 2006, **26**(1):157~160
- 9 Liu Xu, Chen Lin, Cai Chun *et al.*. Investigation on focusing performance of tapered and lensed fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1182~1186
刘旭,陈麟,蔡纯等. 锥形透镜光纤聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(8):1182~1186
- 10 Long Caihua, Chen Baoxue, Sha Huijun *et al.*. Study on fiber-waveguide automatic alignment system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):442~447
龙彩华,陈抱雪,沙慧军等. 光波导-光纤自动调芯系统研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(4):442~447