

角度调谐滤光片准直系统发散角抑制技术研究

俞 侃¹ 包佳祺¹ 黄德修^{1,2} 尹娟娟¹ 常 进³

¹ 华中科技大学文华学院, 湖北 武汉 430074
² 武汉光电国家实验室, 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 入射光束的发散角会影响角度调谐窄带滤光片的透射特性, 出现透射通带变小及发散损耗增大的情况, 且该现象随着入射角度的增大而更加明显。分析了出现这些现象的原因, 并根据拉赫不变量定理设计了扩束棱镜组来压缩入射光束的发散角。并利用二次滤波技术进一步提高了透射光谱的矩形度和稳定性。根据该方法设计了针对 100 GHz 密集波分复用系统角度调谐窄带滤光片的光学整形系统, 实验结果表明, 该方法能有效地改善入射光束发散角对器件滤波特性的影响。

关键词 光学器件; 窄带滤光片; 角度调谐; 发散角; 准直器

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0213001

Research on Divergence-Angle Suppression Techniques in the Collimator System of Angle-Tuned Filter

Yu Kan¹ Bao Jiaqi¹ Huang Dexiu^{1,2} Yin Juanjuan¹ Chang Jin³

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

Abstract The divergence angle of an incident beam will change the characteristics of a narrow-band angle-tuned thin-film filter whose passband will decrease and divergence loss will increase. This phenomena will be more and more obvious while the incident angle is increasing. Here its reason is analyzed. According to the Lagrange-Helmholtz principle, a beam expander is designed to compress the divergence angle of the incident beam. The double filtering technology is used to enhance the passband stability and the rectangle factor of the angle-tuned filter. One kind of shaping optic system is fabricated to the 100 GHz DWDM narrow-band angle-tuned filter. Experimental results show that the shaping system could effectively eliminate the influence of the divergence angle to the filter.

Key words optical devices; narrow-band filter; angle-tuned; divergence angle; collimator

OCIS codes 130.7408; 310.6188; 140.3300

1 引 言

光学滤波器是光通信系统中的重要元器件^[1]。随着消偏振技术的发展, 已涌现出越来越多的利用调制角度改变透射波长的可调谐滤光片^[2,3], 这些结构各异的薄膜滤光片作为新兴的可调滤波器以其低插损、高矩形度和温度不敏感在密集波分复用

(DWDM)系统中有着极大的应用价值。这类器件都是利用光纤准直器进行空间光路耦合的, 但是经由光纤准直器输出的仅仅是近似准直的光束, 仍然存在一定的发散角度^[4]。而这个发散角对角度调谐滤波器斜入射透射特性的影响很大, 将导致透射通带带宽的降低和损耗的增加, 尤其在较大角度斜入

收稿日期: 2010-05-14; 收到修改稿日期: 2010-07-15

基金项目: 校创新基金(J02005301)资助课题。

作者简介: 俞侃(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光通信技术和器件等方面的研究。E-mail: onlyfish@126.com

射时非常明显。本文分析了光纤准直器发散角对 100 GHz 信道间隔的角度调谐滤光片斜入射透射特性的影响,其带宽设计指标为通带带宽大于 0.35 nm,截止带带宽小于 1.2 nm,设计了一种扩束棱镜组以压缩发散角的角度,并设计光学结构实现了扩束光束的还原。计算模拟和实验结果证明了这一设计能有效地压缩滤光片入射光束的发散角,进一步提高透射光谱的矩形度。

$$G \left/ \left[\frac{(\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7 \text{L}(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^8 \text{L}}{(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^8 \text{L}(\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7} \right] \right/ A, \quad (1)$$

式中 H 和 L 分别表示高/低折射率膜层 ($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$)^[7]。G 为玻璃基底, A 为入射介质(空气)。

该滤光片理论设计在入射角度从 0 调至 20°时,中心透射波长能从 1563 nm 移至约 1528 nm,且在整个调谐范围内的带宽指标都能满足 100 GHz DWDM 系统的要求。在滤光片的角度调谐中使用一对光纤准直器对空间光路进行耦合。光纤准直器是一种广泛应用于光纤通信系统的无源器件,它可将从光纤端面出射的发散光束平行化,或者将平行光束汇聚进入光纤中去,以提高光纤系统的耦合效率。常见的光纤准直器有采用自聚焦棒透镜与光纤尾纤连接而成的 G-lens 准直器,还有由端面被研磨成球面的均匀介质棒制备的 C-lens 准直器。但是实际上从光纤端面出射的发散光束经过任何准直系统后并不能形成严格意义上的平行光束,而是形成了一种具有很小发散角的准平行光束。影响准直器准直性能的原因有两点:

1) 光纤衔接的透镜总会存在一定的相差,因此即使由一个点光源发出的球面波在经过任何真实透镜后也不能转变为绝对的平面波;

2) 从光纤端面任一点出射的方向各不相同的光线,会形成一个具有立体角(由光纤数值孔径决定)的光锥,从光纤端面所有各点出射的光束显然已不是由一个集合点发出的球面波,因此即使是无相差透镜也不能使这样的光束变为严格的平行光。

在相同的直径条件下,G-lens 准直器的准直性能略微优于 C-lens 准直器。且两者的准直效果在一定范围内都随着直径的增大而更好。经过准直器准直的光束往往呈现光束直径先稍稍收缩,在经过一段细腰后过渡为具有很小发散角的准平行光束,这个发散角远小于光纤端面出射光束的发散角。由于实验的对象是角度调谐滤光片,系统中存在着机

2 准直器发散角对滤波的影响

多腔窄带滤光片的基本结构为高/低折射率膜层相间,每层膜的光学厚度都是正入射中心 $\lambda/4$ 波长的整数倍^[5]。前期工作中设计并制备了一种低偏振 100 GHz 信道间隔的 4 腔角度调谐滤光片^[6],膜系结构如下:

械转动部分,同时考虑到斜入射时的光接触面积较大,故制备的滤光片面积也较大(5 mm×5 mm),因此滤光片距离准直器的距离较远,导致输入的近准直光束存在一定的发散角。实验是在武汉光迅科技股份有限公司完成的,器件使用的也是该公司生产的 C-lens 光纤准直器,其标准发散角约为 0.34°。

对于有一定微小发散角的近准直光束,在正入射时对滤光片的透射性能影响不大。但是在较大角度斜入射时,由于光束存在锥角,会使得叠加的光谱错开更多,从而会严重的影响透射特性,且这一现象会随着角度的增大变的更加明显。为简便起见用频率 $\nu=1/\lambda$ 来分析,当斜入射光束存在发散角 Ψ 时,设 ν_0 为发散角为零时斜入射的中心波长对应的频率,则存在以下推论^[8]:

多腔窄带滤光片的半峰全宽为

$$\nu' = [\nu_0^2 + (\Delta\nu)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu$ 为对应于发散角度 Ψ 引起的频率漂移,且

$$\Delta\nu = 1.5 \times 10^{-4} \frac{\Psi^2}{n^2} \nu_0. \quad (3)$$

同时,若发散角为零时的峰值透射比为 T_0 ,则存在发散角时的峰值透射比为

$$T' = \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \right) \right]^{1/2} T_0. \quad (4)$$

图 1 所示是利用薄膜软件 TFCal 计算得到的该膜系在 20°倾斜入射下的透射光谱。其中图 1(a)是入射光束没有发散角的情况,图 1(b)是入射光束发散角为 0.34°的情况。由图可知,没有发散角时透射性能很稳定,通带大于 0.4 nm,截止带小于 1.2 nm,没有损耗。当发散角为 0.34°时,通带降低到 0.2 nm,截止带展宽到 1.4 nm,矩形度降低严重,同时产生了发散损耗,损耗值达到了近 2 dB。

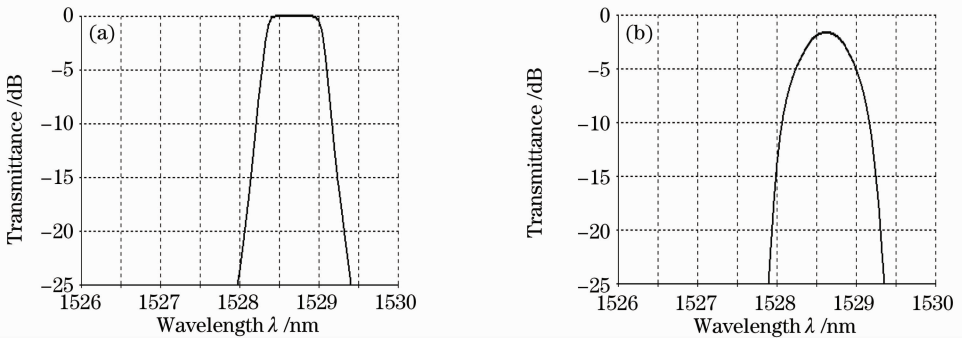


图 1 膜系(1)入射角为 20°时的透射率曲线。(a) 0 发散角,(b) 0.34°发散角

Fig. 1 Transmittance curves of the coating stack (1) at the incident angle of 20°. (a) 0 divergence angle, (b) 0.34°divergence angle

3 发散角的压缩

从上面的分析可知,若要在较大角度斜入射时仍能保证滤光片具有良好的透射特性和带宽指标,就必须解决近准直光束的发散角对滤光片的影响。虽然做不到实现完全平行的光束,但是要把输入光束的发散角降低到一个更小的程度以抑制带宽和损耗的变化。图 2 是该膜系在 20°斜入射且入射光束发散角为 0.12°时的透射曲线。如图 2 所示,当斜入射光束的发散角降低到 0.12°时,滤光片透射带宽和损耗的指标很好,几乎和理论设计一致。所以应该设法将正常 C-lens 的发散角(0.34°)压缩到原有的 1/3。

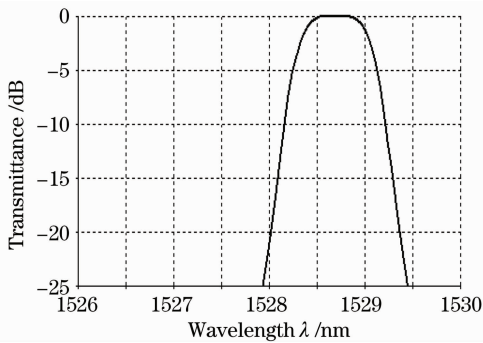


图 2 膜系(1)入射角为 20°时的透射率曲线。(0.12°发散角)

Fig. 2 Transmittance curves of the coating stack (1) at the incident angle of 20°. (0.12°divergence angle)

实际光学系统在近轴区成像时,在物像共轭面内有处式成立:

$$nuy = n'u'y' = J, \quad (5)$$

(5)式表示物体的大小 y 、成像光束的孔径角 u 和物体所在介质的折射率 n 的乘积是一个常数,这个式子称为拉格朗日-赫姆霍兹不变量。

根据(5)式可知,当两边介质都是空气,即介质

的折射率相等时,若能将入射的近准直光束扩束 3 倍,则扩束后的光束发散角能被压缩到原来的 1/3。所以可以通过棱镜组来实现近准直光束的扩束。

由于棱镜具有使光线向厚部偏折的特性,所以可采用双直角棱镜的设计方案实现对入射光束的扩束。图 3 所示的是一对顶角为 α 的直角棱镜,入射光束是 C-lens 准直器输出的近准直光束。设计要求棱镜组能实现入射光束扩束 3 倍,可以推导出每一个直角棱镜的压缩比 r 与棱镜顶角角度 α 的关系式为^[9]

$$r = \cos \alpha \cdot \sqrt{1 - (1.52 \sin \alpha)^2}. \quad (6)$$

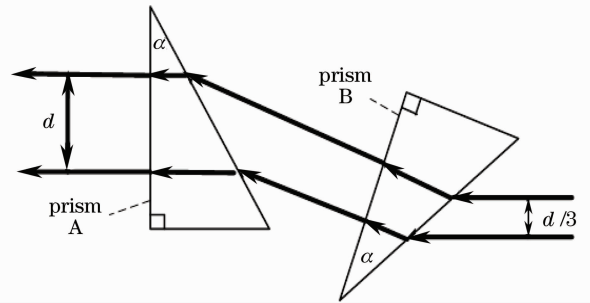


图 3 双棱镜扩束系统

Fig. 3 Double prisms expanding system

根据设计要求一对直角棱镜实现的压缩比是 0.33,则实现上每一个直角棱镜的压缩比 $r=0.57$ 。经过计算可以得到每一个直角棱镜的顶角 $\alpha=32^\circ$ 。

4 器件结构设计

设计了扩束棱镜组实现光束扩束和发散角压缩后,仅仅是解决了滤光片入射端发散角压缩的问题,但是在器件的光路结构上还必须考虑接收端另一个 C-lens 准直器的接收问题。所以还需要通过光路结构设计将扩束后的准直光束压缩回原有的光斑尺

寸。出于减小器件数量利于集成和封装的原因,可以重复利用设计的棱镜扩束系统,反向使用就可以实现光束尺寸的还原。具体设计的器件光路结构如图4所示。

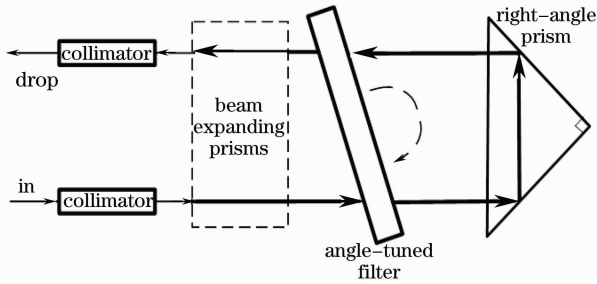


图4 器件的光路结构

Fig. 4 Optical structure of the filter

如图4所示,下端为输入的光纤准直器,经过棱镜组扩束系统后光斑扩束3倍,其发散角压缩到 0.12° ,经过角度调谐滤光片后实现第一次滤波。滤波后的透射光路经由一个直角棱镜返回到滤光片上,二次滤波后会反向的通过前面设计的棱镜组扩束系统,光束尺寸会压缩回原有大小。由于再次通过滤光片时仍是满足 0.12° 的发散角,所以再次滤波时发散角对透射稳定性影响不大,而压缩后即使发散角恢复到原有大小也对器件的滤波性能没有影响。同时,由于滤光片在斜入射时会由于本身的厚度产生一定的位移,但是二次滤波的使用能产生一个相同的反向位移实现补偿,从而能确保输入和输出光纤准直器的位置能保持不动。但是二次滤波,对滤光片透射特性的影响则必须考虑。所谓二次滤波,就是将经过角度调谐滤光片滤波后的透射光,作为光源再次输入滤光片进行第二次滤波。这样一来由于进行二次滤波的光源在透射通带外已经大量衰减,再次滤波后会使得通带外的插入损耗进一步增大,而通带内则只会再次增加滤光片本身引起的插入损耗。因此,双级滤波能在透射光谱通带基本不变的情况下实现截止带宽的压缩,能进一步提高

透射光谱的矩形度。经过计算得到了如图5所示的单次和二次滤波的透射光谱图形。

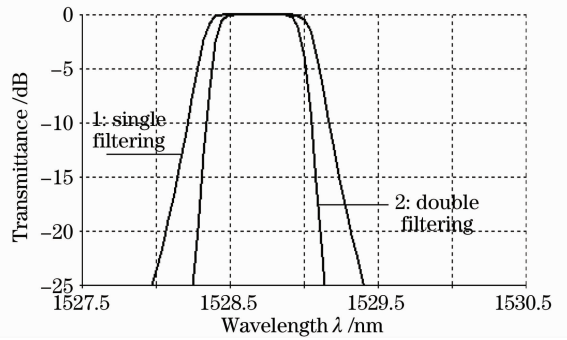


图5 膜系(1)入射角为 20° 时的透射率曲线

Fig. 5 Transmittance curves of the coating stack (1) at the incident angle of 20°

如图5所示,将单次滤波后的透射光作为光源输入滤光片二次滤波后,其通带带宽的指标变化很小,由原先的 0.43 nm 降低到了 0.37 nm ,基本和原带宽值相近。而通带外光强的衰减则进一步增大,截止带的带宽实现了较大的压缩,由原来的 1.12 nm 降低到了 0.82 nm 。其矩形度基本上达到了5腔滤光片才能具有的指标,因而具有更加良好的滤波特性。付出的代价是二次滤波会再次带入滤光片本身的损耗。制备的角度调谐滤光片其插入损耗小于 0.4 dB ,因此在经过二次滤波后,透射光谱的插入损耗应该小于 1 dB 。

5 实验结果

首先对角度调谐滤光片在不压缩发散角时的正入射和 20° 斜入射的透射光谱进行了测试,光谱如图6所示。

从图6所示的结果可以看出,当滤光片的正入射时通带平坦,通带带宽大于 0.4 nm ,截止带带宽小于 1.2 nm ,矩形度较高且没有产生较大的损耗,其插入损耗较低为 0.4 dB 。当 20° 斜入射时,由于发散角的

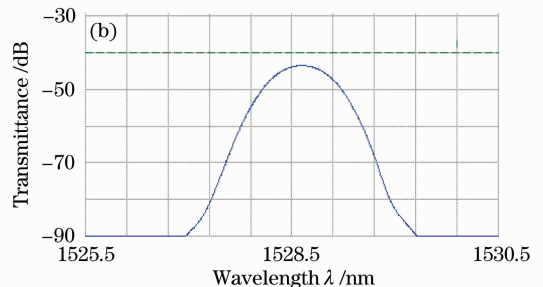
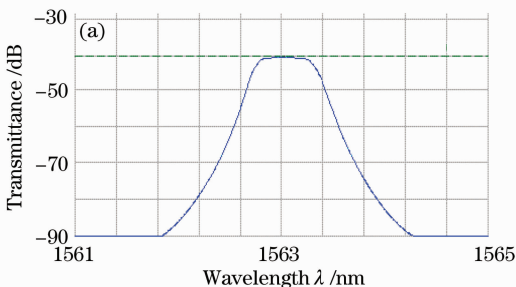


图6 膜系(1)的透射光谱曲线。(a)正入射,(b)在 20° 入射

Fig. 6 Transmission spectrum of the stack(1) (a) at normal incidence, (b) at the incident angle of 20°

影响从光谱的透射波形看,通带带宽降低到0.22 nm。截止带带宽展宽到1.36 nm,矩形度降低明显且出现了明显的发散损耗,插入损耗达4 dB。

使用了扩束棱镜组以及二次滤波的结构后,再次对滤光片的透射光谱进行了测试,光谱如图7所示。由图可知,采用了扩束棱镜压缩了输入近准直光束的发散角后,透射光谱的透射特性比较稳定,带宽和损耗没有出现明显的变化。同时二次滤波技术的使用,进一步压缩了截止带带宽。20°斜入射时透射光谱的通带带宽有0.35 nm,截止带的带宽降低到了1.0 nm。较之图6(a)可以明显看出透射曲线的边带得到了进一步的抑制,滤波的矩形度还得到了进一步的提高。由于透射光谱2次通过滤光片,所以插入损耗有所增加,在约1 dB,但是满足器件插损小于2 dB的要求。

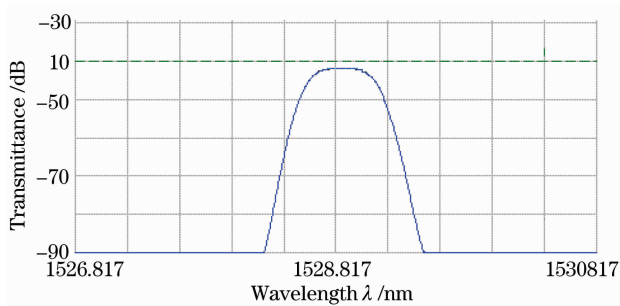


图7 20°倾斜入射时二次滤波的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the double filtering at the incident angle of 20°

6 结 论

斜入射时角度调谐滤光片的透射特性跟光纤准直器的发散角关系密切,由于在器件中使用的光纤准直器的输出近准直光束都存在一定的发散角,所以本文基于格朗日-亥姆霍兹不变量定理设计了一种棱镜扩束系统以降低准直光束的发散角。而且通过器件光路结构的设计,利用二次滤波技术实现了位移补偿和光束还原,提高了耦合效率和矩形度。

理论分析和实验结果都证明该方法是简单可行的,对角度调谐器件的设计和使用具有较高的指导意义和较大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xiaoguang. Development and progress of mitigation and compensation techniques for optical fiber polarization mode dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 525~539
张晓光. 光纤偏振模色散的缓解与补偿技术研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 525~539
- 2 Yoshihiko Suemura, Ahi 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 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
- 4 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥-透镜系统的光束传输与变换[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 5 Zheng Zhengrong, Gu Peifu, Chen Haixing *et al.*. Design and preparation of super broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2026~2029
郑臻荣, 顾培夫, 陈海星等. 超宽带减反射膜的设计和制备[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2026~2029
- 6 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu. 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. 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
- 7 Luo Zhenyue, Liu Xu, Shen Weidong *et al.*. Novel design method for initial structure of dispersion compensation filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2619~2623
罗震岳, 刘 旭, 沈伟东等. 新型色散补偿薄膜的初始结构设计方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2619~2623
- 8 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters*[M]. Zhou Jiulin Yin Shubai Transl.. Beijing: National Defence Industry Press, 1974. 82~83
麦克劳德. *光学薄膜技术* [M]. 周九林, 尹树白译. 北京: 国防工业出版社, 1974. 82~83
- 9 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Design and research of facular-shaping on the angle-tuned filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1375~1379
俞 侃, 刘 文, 黄德修等. 窄带滤光片光斑整形设计与实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1375~1379