

文章编号: 0258-7025(2010)11-2855-05

斜入射角度调谐滤光片的反射光强分布

俞侃¹ 黄德修² 周坤¹ 尹娟娟¹ 包佳祺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 基于多光束干涉原理, 从高斯光束在自由空间的传输方程出发, 推导了高斯光束斜入射角度调谐窄带滤光片的反射光强以及透射光强的表达式。在此基础上研究了滤光片入射角对高斯光束反射特性的影响和关系。理论数值计算和实验结果都表明, 随着入射角度的增大, 滤光片透射光强的光斑会出现明显的展宽现象, 而其反射光强的光斑虽会在较大角度斜入射时出现一定的展宽, 但是展宽幅度远小于透射光斑的变化。故角度调谐窄带滤光片的反射端口在其调制范围内不需要跟透射端口一样进行光斑整形处理。

关键词 几何光学; 窄带滤光片; 高斯光束; 斜入射; 反射光强分布

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2855

Reflecting Intensity Distribution on the Angle-Tuned Filter in Oblique Incidence

Yu Kan¹ Huang Dexiu² Zhou Kun¹ Yin Juanjuan¹ Bao Jiaqi¹ 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 Based on the multi-beam interference principle and Gaussian beam transmission equation in the free space, the intensity expression of a Gaussian beam incidenting obliquely on an angle-tuned narrowband filter has been derived. According to the result, the influence and relationship of the incident angle on the reflection of a Gaussian beam have been investigated theoretically. The calculation and experiment results show that the size of the transmitting beam spot will be brodened obviously when the incident angle is increasing. However, the size of reflecting beam spot will be a little brodened for a relatively large incident angle, which extent is much less than that of the transmitting beam. The reflecting port of the angle-tuned narrowband filter does not need facular-shaping fitting as the transmitting port within its tuanble range.

Key words geometrical optics; narrowband filter; Gaussian beam; oblique incidence; reflecting intensity distribution

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角度调谐滤光片^[2~4], 这些结构各异的薄膜滤光片作为新兴的可调滤波器件以其低插损、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。而三端口可调谐滤波器由于其在选择性滤波的同时不影响其余波长信号的正常传输, 成为近几年的研究热

点^[5]。基于角度调谐的三端口器件同常规的两端口滤波器相比, 斜入射时窄带滤光片的反射光强分布特性对于该器件的性能以及接收耦合装置的设计就显得十分重要。因此, 本文对高斯光束斜入射至窄带滤光片后的反射光强分布特性进行研究。计算模拟和实验结果证明了在较大角度斜入射时, 窄带滤光片的反射光斑有一定的展宽, 但是幅度远小于透射光斑的展宽, 在器件的角度调谐范围内形变很小, 不必如透射光斑一样需要进行整形处理。

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-14

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

2 理论分析

研究的对象是自行设计的一种消偏振的信道间隔为 100 GHz 的角度调谐窄带滤光片^[6]。该窄带滤光片在斜入射时具有稳定的透射特性,通过对间隔层的调整消除了偏振光中心波长的分离现象,抑制了偏振相关损耗,可实现大于 20 nm 的有效波长

$$G / [(HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7 L(HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L(HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L(HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7] / A, \quad (1)$$

式中 H 和 L 分别表示光学厚度为四分之一参考波长的高低折射率膜层^[7]。作为两端口滤波器件,在前期工作中发现随着入射角度的增大该滤光片的透射光斑会产生展宽现象,在 15° 倾斜入射时光斑在水平方向展宽了约 1.75 倍,为此设计了整形棱镜组矫正其透射光斑^[8]。但要制备出三端口器件,就必须对窄带滤光片的反射光强分布进行详细的研究,并针对结果设计接收耦合装置。

对于该多层膜系,采用了薄膜理论中的有效界面法进行等效以简化计算^[9]。对于多层对称膜系,可从选定膜系的最中间一层进行分离,依次与两侧的膜层进行等效成为一个等效膜层,最终整个膜系组合可以用两个有效界面来表示。

利用有效界面法,该多层膜系可以等效为两个平行的有效界面 M_1 和 M_2 ,其等效层的有效折射率经计算为 $n=1.82$ 。图 1 为一束振动方向垂直于 xz 平面的高斯光束以 θ 角度沿 z 轴入射到有效界面的光路图,图中 r_1, r_2 分别为有效界面 M_1, M_2 的反射系数, z_0 为入射光束经自由空间输入到薄膜的距离, d 为多层薄膜的厚度。入射光束取近似为高斯分布的高斯光束计算其场强。

自由空间中沿 z 轴传输的高斯光束可以表示为^[10]

$$E(x, y, z) = A \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[\beta z - \arctan \left(\frac{z}{f} \right) \right] \right\} \exp \left[-i \frac{\beta(x^2 + y^2)}{2R(z)} \right], \quad (2)$$

式中 A 为高斯光束束腰中心处的振幅, ω_0 为高斯光束的腰斑半径,同时有

$$\beta = 2\pi n / \lambda, \quad (3)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}, \quad (4)$$

$$f = n\pi\omega_0^2 / \lambda, \quad (5)$$

$$R(z) = z + f^2 / z, \quad (6)$$

调谐。使用的高低折射率膜料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 。其中空气折射率 $n_A=1$,基底折射率 $n_G=1.5$,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 $n_L=1.46$,设计的正入射中心波长为 1563 nm。该滤光片的膜系结构为

此处 $R(z)$ 为光斑相对于束腰中心传输了距离为 z 后的高斯光束等相位面曲率半径, $\omega(z)$ 为光斑相对于束腰中心传输了距离为 z 后高斯光束等相位面上的光斑半径。

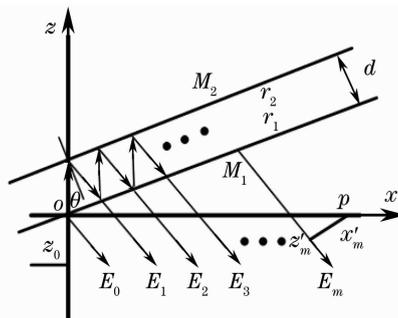


图 1 高斯光束斜入射薄膜滤光片的反射光路
Fig. 1 Light reflecting through a narrowband filter with an oblique Gaussian beam

3 计算机模拟与结果分析

由图 1 可知,当光束直接被 M_1 面反射的光束在考察面上的场分布为

$$E_0(x, y, z_0) = Ar_1 \frac{\omega_0}{\omega(z'_0)} \exp \left[-\frac{(x'_0)^2 + y^2}{\omega^2(z'_0)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[\beta z'_0 - \arctan \left(\frac{z'_0}{f} \right) \right] \right\} \times \exp \left\{ -i \frac{\beta [(x'_0)^2 + y^2]}{2R(z'_0)} \right\}, \quad (7)$$

此处的 x'_0 为 ox 轴上任一点 p 到 E_0 轴线或其延长线之间的距离

$$x'_0 = x \cos 2\theta, \quad (8)$$

相应的 z'_0 为光束轴线由腰斑处传输到与 p 点对应轴线处的距离

$$z'_0 = z_0 + x \sin 2\theta. \quad (9)$$

经过一次往返后的反射光束的光斑中心在考察面上相对于入射点处的光斑中心有一个侧向的位移 ΔX

$$\Delta X = 2d \sin \theta / \cos^2 \theta, \quad (10)$$

往返 m 次后的反射光束在该面上的侧向位移为 ΔX_m

$$\Delta X_m = 2md \sin \theta / \cos^2 \theta. \quad (11)$$

同样在滤光片中往返 m 次后的反射光束到达考察面后相对于入射点多传输的距离为 ΔZ_m

$$\Delta Z_m = 2md (1/\cos \theta + \tan^2 \theta). \quad (12)$$

如图 1 所示在 ox 轴上任一点 p 到 o 点的距离为 x , 则该点到往返 m 次后的反射光束的传输轴线之间的距离为 x'_m

$$x'_m = (x - \Delta X_m) \cos 2\theta, \quad (13)$$

相应的光束轴线传输到 z' 点的距离为 z'_m

$$z'_m = z_0 + \Delta Z_m + (x - \Delta X_m) \sin 2\theta. \quad (14)$$

因此往返 m 次后反射光到达考察面上的场分布为

$$E_m(x'_m, y, z'_m) = k(r_1 r_2)^{m-1} \frac{\omega_0}{\omega(z'_m)} \times \exp\left[-\frac{(x'_m)^2 + y^2}{\omega^2(z'_m)}\right] \times \exp\left\{-i\left[\pi + \beta z'_m - \arctan\left(\frac{z'_m}{f}\right)\right]\right\} \times \exp\left\{-i\frac{\beta[(x'_m)^2 + y^2]}{2R(z'_m)}\right\}, \quad (15)$$

式中 $k = A(1 - r_1^2)r_2$, 因此反射光束总的场分布为

$$E_r = E_0 + \sum_{m=1}^{\infty} E_m(x'_m, y, z'_m), \quad (16)$$

从而反射光束的强度分布为

$$I_r = E_r E_r^* = \left[E_0 + \sum_{m=1}^{\infty} E_m(x'_m, y, z'_m)\right] \times \left[E_0 + \sum_{m=1}^{\infty} E_m(x'_m, y, z'_m)\right]^*. \quad (17)$$

以上分析中 p 为 x 轴上任意一点, 改变 x 的大小就可以得到参考面上任意点的光强分布。由于在 15° 斜入射时, 滤光片的透射中心波长位置在 1545.2 nm , 假设输入的波长是包含该透射波长的一个连续光谱, 经过计算得到了在 15° 斜入射时该透射波长的剩余反射光强分布以及非透射波长的反射光强分布, 分别如图 2(a) 和 2(b) 所示。其中 $A=1, \omega_0=0.25 \text{ mm}, d=41 \text{ }\mu\text{m}, r_1=r_2=0.99, z_0=10 \text{ mm}, m=100$ 。

由图 2 可知, 在 15° 斜入射时对于透射波长经过滤光片的干涉作用基本实现全透射, 其反射光强极小(小于 2×10^{-3}), 可以忽略不计。而对于反射的剩余波长, 在 15° 斜入射时, 滤光片反射端口的光强分布略有变化, 在水平方向上展宽约 1.08 倍。整体光强分布仍基本呈现轴对称均匀分布, 对于反射端口的准直器而言, 不会由于光斑展宽过大引起模场不匹配从而产生很大的插入损耗, 因此不必利用整形棱镜组来实现光斑的压缩。

根据同样的方法, 也可以通过坐标变换得到透射光强的表达式为

$$I_0 = E_t E_t^* = k^2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (r_1 r_2)^{m+n} \frac{\omega_0^2}{\omega(z_m)\omega(z_n)} \exp\left[-\frac{x_m^2 + y^2}{\omega^2(z_m)}\right] \times \exp\left[-\frac{x_n^2 + y^2}{\omega^2(z_n)}\right] \cos\left\{\beta(z_n - z_m) + \arctan\left(\frac{z_m}{f}\right) - \arctan\left(\frac{z_n}{f}\right) + \frac{\beta}{2}\left[\frac{x_n^2 + y^2}{R(z_n)} - \frac{x_m^2 + y^2}{R(z_m)}\right]\right\}. \quad (18)$$

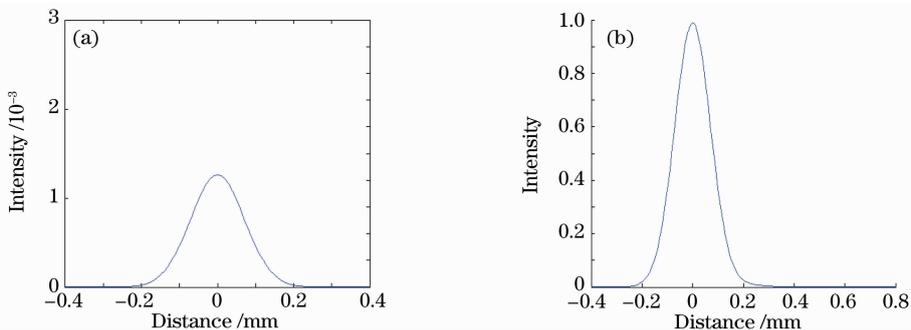


图 2 高斯光束 15° 斜入射滤光片后的反射光强分布。(a) 透射波长, (b) 反射波长

Fig. 2 Reflecting intensity distribution with a Gaussian beam on the filter at the incident angle of 15° .

(a) transmitting wavelengths, (b) reflecting wavelengths

由图 3 可知, 当以 15° 斜入射时多次反射引起的透射光强分布逐渐减小, 产生叠加使得透射光强分布不再呈现高斯型, 透射光斑在水平方向上会出现

展宽和扩束的现象, 同时透射峰值也会出现一定程度的位移。但是整体看, 光强分布仍是一个能量中心, 没有出现光斑分离现象。对于透射端口的准直

器而言,则必须要利用整形棱镜组来实现光斑的压缩才能降低耦合损耗。

4 实验结果

在自行搭建的实验平台上对该角度调谐窄带滤光片在不同角度斜入射时的反射光和透射光的模场进行了测试,实验中使用的放大自发辐射(ASE)宽光源,再接模场分析仪对窄带滤光片的反射端口模场分布进行检测。反射光模场分布的检测使用的是多刀口扫描光束质量分析系统,它能测试出激光光束的截面形状、椭圆度和主次轴角度等。图4显示了其在0°和15°斜入射时反射光斑模场的分布和形状,图5显示了15°斜入射时透射光斑模场的分布

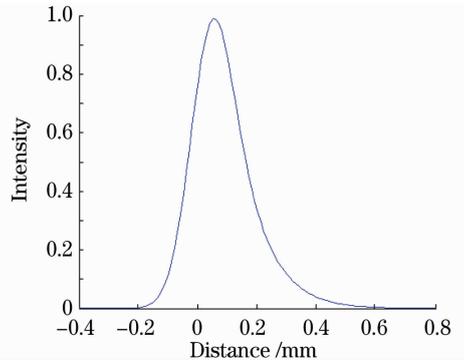


图3 高斯光束 15°斜入射滤光片后的透射光强分布
Fig. 3 Transmitting intensity distribution with a Gaussian beam on the filter at the incident angle of 15°和形状,其中十字架位置标示出了光强的峰值位置。

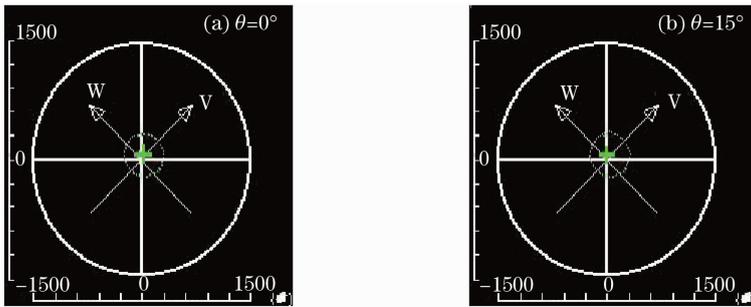


图4 滤光片的反射光强分布
Fig. 4 Reflected intensity distribution on the filter

从图4可以看出,正入射时窄带滤光片反射光斑是一个标准圆形,反射光强的峰值位于中心位置。当以15°斜入射时其反射光斑仍基本是一个圆形,跟正入射相比基本一致,没有明显的变化,整体对反射端准直器的接收影响不大。因此,可暂不需对其进行整形处理,可直接用准直器接收。从图5可以看出,透射光强分布在15°斜入射时已经出现了明显的展宽,能量中心也出现了偏移,因此进行光斑整形处理十分必要。

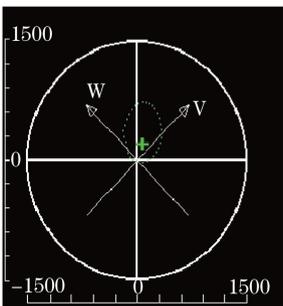


图5 滤光片在15°斜入射时的透射光强分布
Fig. 5 Transmitting intensity distribution on the filter at the incident angle of 15°

经过模场的测试分析,直接用单芯准直器对角度调谐窄带滤光片的反射光谱进行了接收测试,正

入射和15°斜入射时的测量光谱如图6所示。

由图6可见,在正入射和15°斜入射时角度调谐滤光片反射端口的光谱波形稳定,插入损耗小于2 dB,插损值的变化量小于0.2 dB,由图还可见其隔离度接近30 dB,满足器件设计指标要求。所以说明斜入射时滤光片反射端口的光强分布变化远远小于透射端口的变化值,从而使接收耦合装置的设计可以大大简化。

5 结论

基于多光束干涉原理,从高斯光束在自由空间的传输方程出发,推导了高斯光束斜入射窄带滤光片时的反射光强表达式,数值模拟了反射光束的光强分布。并利用模场分析仪验证了这一推导结果,实测了不同角度下不带整形器件的反射端口光谱变化图。理论和实验结果表明,随着入射角度的增大,窄带滤光片的反射光强分布会呈现出一定程度的展宽,但是光斑的展宽程度远比透射光斑的展宽小得多,因此对接收端准直器的接收耦合影响不大,不需要如透射端接收时进行光斑整形。对于斜入射干涉滤波器件,尤其是市场上急需的三端口滤波器件的

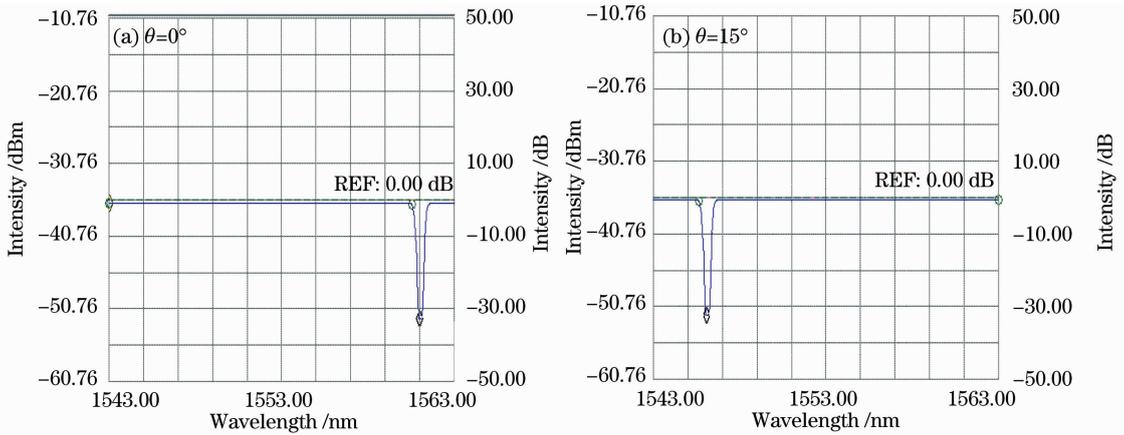


图 6 滤光片反射端口测量光谱

Fig. 6 Measured spectrum of the filter with the reflected port

设计和制备都有一定的指导意义。

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及进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 525~539
- 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, **7**(4): 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.*. A novel three-port band-pass tunable filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 670~673
俞 侃, 刘 文, 黄德修等. 一种新型三端口可调谐带通滤波器的结构设计及分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 670~673
- 6 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

- 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 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. 角度调谐滤光片光斑整形设计与实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1375~1379

- 9 Wang Chong, Luo Bin, Pan Wei. Algorithm of seeking precise refractive index value of spacer for controlling angle-tuned filter' polarization characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 707~711

王 翀, 罗 斌, 潘 炜. 角度调谐滤光片偏振控制的间隔层折射率寻优算法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 707~711

- 10 Li Miao, Wang Li, Wang Xiqing. Focal switch of Hermite-cosine-Gaussian beams passing through an astigmatic lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1510~1515

黎 淼, 王 莉, 王喜庆. 厄米-余弦-高斯光束通过像散透镜的焦开关[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1510~1515