

高斯光束斜入射非平行薄膜滤光片的反射光强分布

俞 侃¹ 黄德修^{1,2} 尹娟娟¹ 包佳祺¹

(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)

摘要 基于多光束干涉原理, 推导了非平行角度调谐薄膜滤光片在斜入射时的高斯光束反射光强表达式。在此基础上研究了高斯光束的入射角以及非平行滤光片两端面间所存在楔角对反射光强分布的影响。计算和实验结果都表明, 滤光片的反射光强分布不仅与入射角有关, 而且非平行滤光片两端面间楔角的大小和正负特性还会在一定程度上影响斜入射时滤光片的光场分布、反射率和隔离度。要保证滤光片在斜入射时反射率和隔离度的稳定, 既可以在切片时提高滤光片的平行度, 也可以通过在斜入射时保证楔角为负来实现。

关键词 几何光学; 薄膜滤光片; 高斯光束; 反射光强分布; 斜入射; 楔角

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0807003

Reflected-Intensity Distribution of a Thin-Film Filter with Oblique Incidence of a Gaussian Beam Under-Parallel Case

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

(¹ Wenhua College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
(² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on the multi-beam interference principle, a Gaussian beam reflected-intensity expression on a non-parallel angle-tuned thin-film filter in oblique incidence is derived. The influence of the reflected-intensity distribution with different incident angles, especially with different wedge angles of the non-paralleled thin-film filter is analyzed theoretically. Calculation and experimental results show that the reflected-intensity distribution, reflected-peak and the isolation degree are influenced by the wedge angle, incident angle and polarity of the wedge angle. In order to get stable reflected-characteristics and high isolation degree, the parallelism of the angle-tuned thin-film filter should be improved in fabrication or the polarity of the wedge angle in oblique incidence should be negative.

Key words geometric optics; thin-film filter; Gaussian beam; reflected-intensity distribution; oblique incidence; wedge angle

OCIS codes 130.7408; 310.6188; 140.3300

1 引 言

在密集波分复用系统中, 薄膜滤光片由于具有矩形度好、插入损耗低、温度不敏感等诸多优点, 在光电子学领域得到了广泛的应用^[1]。常规窄带滤光片由于偏振敏感性所以只能用于正入射的情况, 但是随着薄膜消偏振技术的发展, 现已涌现出一系列用于斜入射时的窄带角度调谐滤光片^[2,3]。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

剩余波长信号的正常传输, 更成为近几年的研究热点^[4]。基于角度调谐的三端口器件同常规两端口滤波器相比, 斜入射时窄带滤光片的反射光强分布特性对与器件的反射光谱稳定性和耦合装置的设计十分重要。一般入射到窄带滤光片上的激光光束为厄米-高斯光束, 其基模为高斯光束^[5]。在以往的研究工作中, 发现斜入射时滤光片的反射光斑的展宽幅度小于透射光斑的展宽幅度, 同时对反射率和隔离

收稿日期: 2012-03-29; 收到修改稿日期: 2012-04-26

基金项目: 校创新基金(J02005301)资助课题。

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

度影响不大^[6]。该工作假定滤光片的入射和透射两端面间为严格平行,但是在实际滤光片的制备和切片过程中,很难保证两个端面严格平行,在工艺条件不成熟的情况下其端面间的楔角可能较高。因而必须对高斯光束斜入射至非平行角度调谐滤光片后的反射光强分布、反射峰值和隔离度等情况进行研究。

本文从高斯光束的基本传输方程出发,利用多光束干涉原理对高斯光束斜入射至非平行滤光片后的反射光强分布特性进行了推导。重点研究了在斜入射条件下,非平行角度调谐滤光片的两端面间存在的楔角 ϵ (当前切片工艺下 ϵ 可做到 0.5°)对反射光强分布、反射率和隔离度的影响。

2 理论模型

研究对象是在前期工作中设计并制备的100 GHz信道间隔低偏振敏感性角度调谐滤光片。其在 15° 的角度调谐范围具有20 nm以上的有效波长调谐。该滤光片的膜系结构为^[7]

$$\left[\begin{array}{l} (\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7 \text{L}(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H} \\ 4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^8 \text{L}(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L} \\ (\text{LH})^8 \text{L}(\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7 \end{array} \right], \quad (1)$$

这是一个四腔结构的膜系,式中H和L分别表示光学厚度为 $1/4$ 参考波长的高低折射率膜层^[8],膜料

分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ,基底材料为BK7玻璃,折射率 $n_G = 1.5$,设计的正入射中心波长为1567 nm。其中(HL)或(LH)为镜层结构,(2L3H4L3H2L)为消偏振后的间隔层结构,各腔之间由一个低折射率材料的耦合层L进行串接。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,该多层膜系可以被等效为两个有效界面 M_1 和 M_2 ,其等效层的等效折射率经计算为 $n_M = 1.82$ ^[9]。

图1是一束振动方向垂直于 xz 平面的高斯光束以 α 角度沿 z 轴在薄膜滤光片的两个非平行有效界面间多次反射与透射的光路图。入射点是 o 点,入射方向是沿 z 轴反方向,图中 r_1 和 r_2 分别为有效界面 M_1 和 M_2 的反射系数, d 为高斯光束的入射点到第一个出射点的距离,可取为该多层薄膜在入射点处的平均膜厚。 ϵ 为非平行薄膜滤光片两个端面所成的楔角(图1描述楔角为正的情况)。 N 为与 z 轴垂直的考察面,该考察面到 o 点的距离为 z_0 。图中两界面间虚线为垂直于界面 M_1 的法线,实线为垂直于界面 M_2 的法线,两者之间的夹角大小也为 ϵ 。两界面间实心箭头为光束传输路径,空心箭头所指为对应反射光束与界面 M_1 的夹角。入射光束取近似为高斯分布的高斯光束计算其场强。

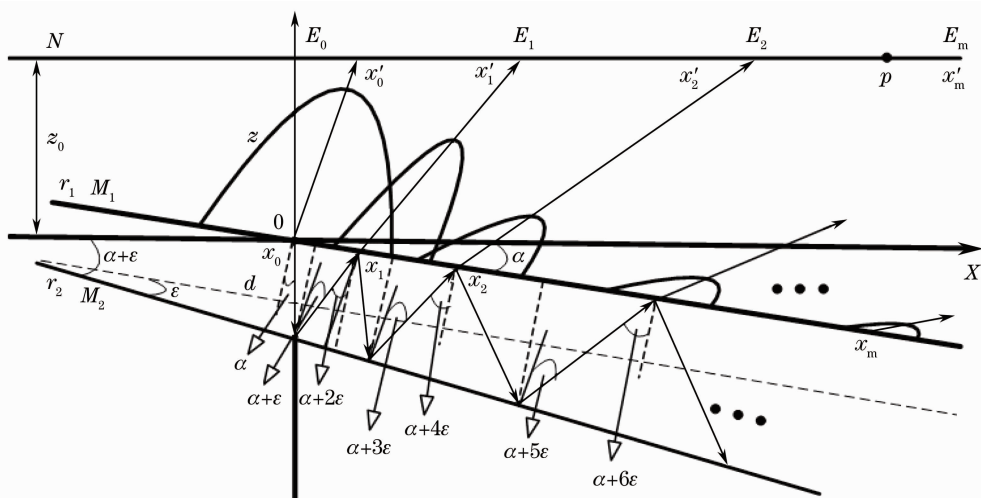


图1 高斯光束斜入射非平行薄膜滤光片的反射光路

Fig. 1 Reflected light through a non-parallel thin-film filter in oblique Gaussian beam

如图1所示,入射光束在两个界面内每经过一次反射,入射光线在界面上与其相应法线的夹角就会增大 ϵ 。入射高斯光束在非平行的薄膜干涉滤光片中经过 $m(m = 0, 1, 2, \dots)$ 次往返反射后的出射光束在界面 M_1 以及考察面 N 的交点分别为 x_m 和

x'_m ,其在考察面 N 上的场分布为 E_m ,光强为 $E_m E_m^*$ 。设第 m 次出射的光束在界面 M_1 上产生的位移为 Δx_m ,即 Δx_m 为第 m 次反射点 x_m 相对于直接反射点 x_0 在界面 M_1 上的距离。而 Δz_m 为从入射点传输到第 m 次反射点 x_m 处光束所经过的距离。相应到达

界面 M_1 每一个反射光束上与其法线的内部夹角为 $\alpha + 2m\epsilon$ 。则利用光路的几何关系可以推导出

$$\Delta x_m = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{d \cos \alpha \cos(\alpha + \epsilon)}{\cos[\alpha + (2i-1)\epsilon]} \{ \tan[\alpha + (2i-2)\epsilon] + \tan(\alpha + 2i\epsilon) \} \right\}, \quad (2)$$

$$\Delta z_m = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{d \cos \alpha \cos(\alpha + \epsilon)}{\cos(\alpha + 2i\epsilon) \cos[\alpha + (2i-1)\epsilon]} + \frac{d \cos \alpha \cos(\alpha + \epsilon)}{\cos[\alpha + (2i+1)\epsilon] \cos[\alpha + (2i-1)\epsilon]} \right\}. \quad (3)$$

同理设第 m 次出射的光束在考察面 N 上产生的水平位移为 $\Delta x'_m$ ，且其相对于入射点多传输的纵向距离为 $\Delta z'_m$ 。在考虑薄膜的等效折射率 $n_M = 1.82$ 的情况可以推导出

$$\Delta x'_m = \Delta x_m \cos(\alpha + \epsilon) + [z_0 - d - \Delta x_m \sin(\alpha + \epsilon)] \frac{1.82 \sin 2m\epsilon}{\sqrt{1 - (1.82 \sin 2m\epsilon)^2}}, \quad (4)$$

$$\Delta z'_m = \Delta z_m + [z_0 - d - \Delta x_m \sin(\alpha + \epsilon)] / \sqrt{1 - (1.82 \sin 2m\epsilon)^2}. \quad (5)$$

在图 1 中设考察面 N 上的任一点 p 距离直接反射点 x'_0 的距离为 x' ，通过改变 x' 的大小就可以得到考察面 N 上任意点的反射光强分布。 p 点距离第 m 次光束出射的 x 轴距离为

$$X_m = |(x' - \Delta x'_m) \sqrt{1 - 1.82^2 \sin^2 2m\epsilon}|. \quad (6)$$

相对应的该点到第 m 次出射的光束的 z 轴距离为

$$Z_m = \Delta x'_m + 1.82(x' - \Delta x'_m) \sin 2m\epsilon. \quad (7)$$

而自由空间中沿 z 轴传输的高斯光束可以表示为^[10]

$$E(x, y, z) = A \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left[\beta z - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right]\right\} \times \exp\left[-i\frac{\beta(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right], \quad (8)$$

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，此处 $R(z)$ 为传输了 z 距离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。由此可知第 m 次出射的反射光束在 p 点所产生的光场为

$$E_m(X_m, y, Z_m) = k(r_1 r_2)^m \frac{\omega_0}{\omega(Z_m)} \times \exp\left[-\frac{X_m^2 + y^2}{\omega^2(Z_m)}\right] \times \exp\left\{-i\left[\beta Z_m - \arctan\left(\frac{Z_m}{f}\right)\right]\right\} \times \exp\left\{-i\frac{\beta[X_m^2 + y^2]}{2R(Z_m)}\right\}, \quad (9)$$

式中 $k = \sqrt{1 - r_1^2} \sqrt{1 - r_2^2}$ 。因此，在 p 点处总的反射光场为各次反射光束在该点所产生的场强的叠加，即

$$E_t = \sum_{m=0}^N E_m(X_m, y, Z_m). \quad (10)$$

由图 1 可知当在非平行薄膜内反射光束的角度满足条件 $\alpha + (2m+1)\epsilon \geq \pi/2$ 时，反射的光束将不再到达界面 M_1 而从滤光片的侧面逃逸，由此可得叠加级数为

$$N = \left[\frac{\pi}{4\epsilon} - \frac{\alpha}{2\epsilon} - \frac{1}{2} \right], \quad (11)$$

式中 $[\]$ 表示取整，则在 p 点处总反射光场的叠加强度振幅分布为

$$I = E_t E_t^* = k^2 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N (r_1 r_2)^{m+n} \frac{\omega_0^2}{\omega(Z_m) \omega(Z_n)} \times \exp\left[-\frac{X_m^2 + y^2}{\omega^2(Z_m)}\right] \exp\left[-\frac{X_n^2 + y^2}{\omega^2(Z_n)}\right] \times \cos\left\{\beta(Z_n - Z_m) + \arctan\left(\frac{Z_m}{f}\right) - \arctan\left(\frac{Z_n}{f}\right) + \frac{\beta}{2} \left[\frac{X_n^2 + y^2}{R(Z_n)} - \frac{X_m^2 + y^2}{R(Z_m)} \right] \right\}. \quad (12)$$

当处于大角度斜入射时，界面不平行所引入的楔角 ϵ 会使得叠加的光谱错开更多，不仅会对滤光片的反射光强分布带来影响，还会对滤光片的反射率以及带宽都会带来影响。若用频率 $\nu = 1/\lambda$ 来分析该入射角度下滤光片对应的透射波长，设 ν_0 为楔角为 0° 时斜入射的中心波长对应的频率，当滤光片存在楔角 ϵ 时，则在该入射角度下可以推论^[11] 多腔窄带滤光片的半峰全宽为

$$\nu' = [\nu_0^2 + (\Delta\nu)^2]^{1/2}, \quad (13)$$

式中 $\Delta\nu$ 为对应于楔角 ϵ 引起的频率漂移，其中

$$\Delta\nu = 1.5 \times 10^{-4} \frac{\epsilon^2}{n_M^2} \nu_0. \quad (14)$$

同时，若发散角为 0° 时的峰值透射率为 T_0 ，则存在楔角 ϵ 时的峰值反射率为

$$R' = 1 - \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \right) \right]^{1/2} T_0. \quad (15)$$

由此可见，当非平行滤光片的平行度越差，即两端面间楔角 ϵ 越大时，引起的频漂就越大。会导致

透射波长剩余反射率的增加,从而降低反射光谱在该波长处的隔离度。同时由于相应情况下透射光谱半峰全宽的增加,滤光片反射光谱的截止带带宽也会随之增加。

3 计算结果和分析

在图 1 中只用图示法描述了楔角 ϵ 为正的情况,而实际使用时也存在楔角 ϵ 为负的情况。由于前期实验需要加工楔角接近 1° 的非平行角度调谐滤光片^[12],所以根据(12)式,计算了 15° 斜入射时滤光片楔角分别为 $\pm 1^\circ$ 时的反射光束的光强分布图。其中 $A = 1, \omega_0 = 0.25 \text{ mm}, d = 41 \text{ }\mu\text{m}, r_1 = r_2 = 0.99, z_0 = 10 \text{ mm}$ 。由于前面的分析模型中 α 为片

内入射角,而不是实际外部斜入射角度。所以同样经过 Snell 定理的换算可以知道在片外入射角为 15° 时,相对应的片内入射角 $\alpha = 8.2^\circ$ 。图 2 为在滤光片楔角 ϵ 为 1° 和 -1° 的条件下以 15° 斜入射时的反射光强分布。当滤光片两端面间平行度较差且楔角为正时,反射光场在多次反射并叠加后出现较为严重的展宽现象,由于能量的分散故导致反射光场的中心振幅大为降低,但光强分布没有出现多峰值现象。而在负楔角的情况下由于楔角引起的展宽方向和正楔角时相反,因此会对斜入射角度引起的展宽有一定回拉效应,导致反射光斑的展宽程度较低,故场强峰值会略高一些。

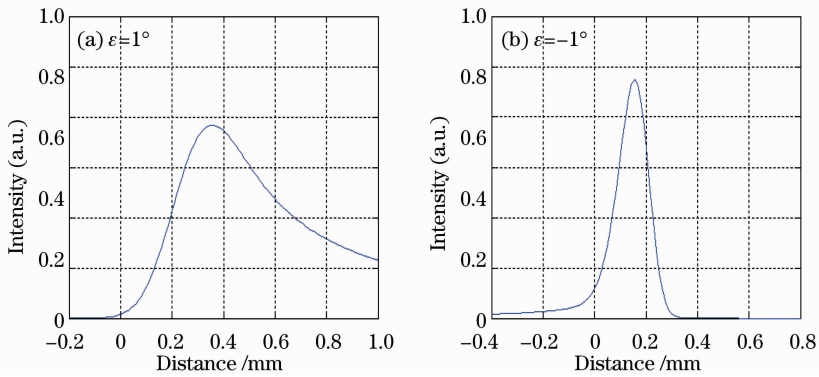


图 2 15° 斜入射时反射光强分布

Fig. 2 Reflected-intensity distribution with the incident angle of 15°

4 实验结果

采用多刀口扫描光束质量分析系统对楔角接近 1° 的非平行角度调谐窄带滤光片在 15° 斜入射条件下的反射光的模场进行了测试。图 3 为 $\epsilon = \pm 1^\circ$ 时滤光片在 15° 斜入射时的反射光斑模场的分布,其中楔角的正负特性可由水平旋转滤光片实现。其中

十字架位置标示出了光强的峰值位置。由图可知,在非平行条件下滤光片 15° 斜入射时的反射光斑会出现较为明显的展宽现象,其中正楔角在的光斑展宽更多,分布接近于一个椭圆,且峰值偏离中心的程度也较大。测试结果与理论分析具有较好的一致性。

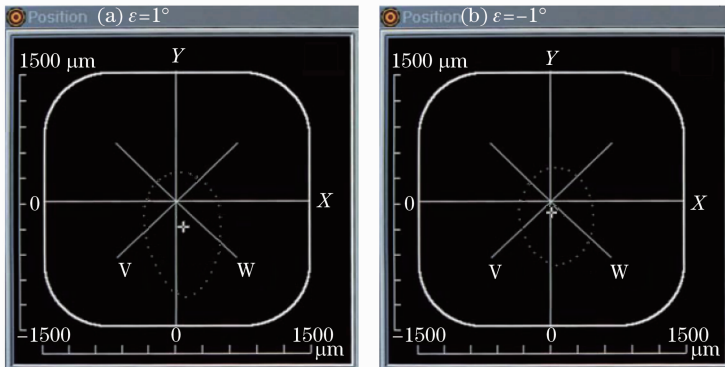


图 3 非平行滤光片 15° 斜入射时的反射光强分布

Fig. 3 Reflected-intensity distribution on non-parallel filter with the incident angle of 15°

对于三端口滤波器而言,反射端口的光谱特性也十分重要,将决定着系统的隔离度和对直通多信道的串扰。分别对在 4.8° 和 15° 斜入射条件下对该楔角接近 1° 左右的角度调谐滤光片的反射光谱也进行了测试。如图 4 所示,在 4.8° 较小入射角的情况下,反射口的光谱截止带小于 1.2 nm ,隔离度大于 30 dB ,且此时楔角的正负特性对光谱的影响很小,难以在光谱图上观测出明显区别。而当入射角增大至 15° 时,楔角的正负特性对光谱的影响就明显起来。图 5 为 $\epsilon = \pm 1^\circ$ 时滤光片在 15° 斜入射时的反射光谱。根据光谱图,在楔角 $\epsilon = 1^\circ$ 时隔离度不足 25 dB ,说明反射光谱中存在较大的透射波长剩余反射,对应的透射中心波长的透射率也会降低;截止带大于 1.6 nm ,导致透射波长的矩形度较差,引起反射光谱中相邻直通信道的额外损耗。这与前面分析的随着楔角的增大,滤光片反射率的降低以及半峰全宽的展宽具有一致性。而当楔角 $\epsilon = -1^\circ$ 时,系统的隔离度可达 30 dB 以上,截止带小于 1.2 nm ,陷波的矩形度较好,能满足系统的低串扰使用。这与

前面分析的随着负楔角的特性具有一致性。说明滤光片的平行度在正入射或较小角度斜入射时对光谱特性的影响较低,但是在较大角度斜入射时平行度对器件的光谱性能则有着非常重要的影响。必须尽可能提高平行度对楔角进行抑制或保证楔角与入射角的方向相反。

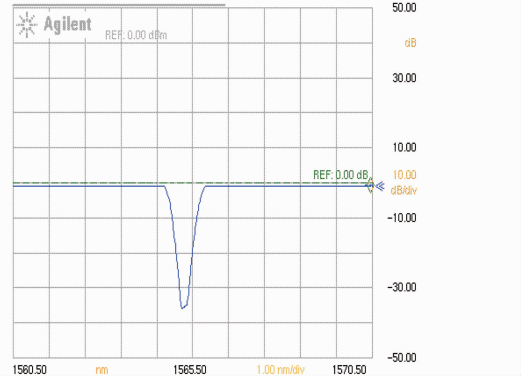


图 4 滤光片 4.8° 斜入射时的反射光谱

Fig. 4 Measured reflected-spectrum of filter with the incident angle of 4.8°

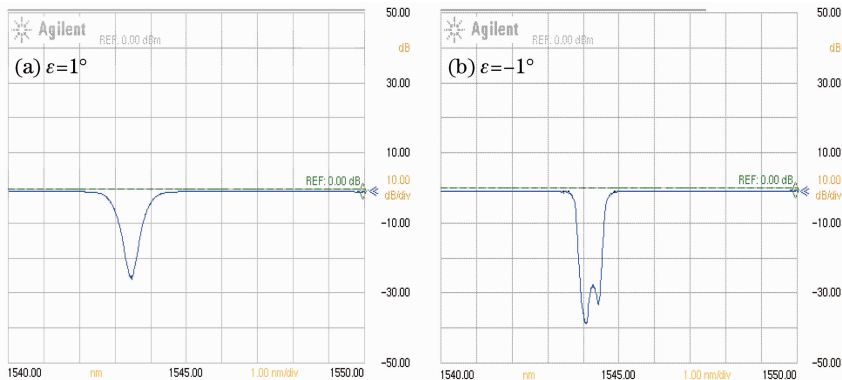


图 5 滤光片 15° 斜入射时的反射光谱

Fig. 5 Measured reflected-spectrum of filter with the incident angle of 15°

5 结 论

利用高斯光束传播方程和多光束干涉原理,推导了斜入射状态下非平行多腔窄带滤光片的反射光强表达式,研究了非平行滤光片楔角参量的大小以及正负特性对滤光片反射特性的影响,并利用模场分析仪和光谱仪对推导结果进行了验证。理论和实验结果表明,在斜入射条件下,滤光片的平行度对于其反射模场分布和隔离度的影响重大。

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, Ahio Tajima, Naoya Henmi *et al.*. An adaptive wavelength tunable optical filter employing an angled-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 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. A novel three-port bandpass 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

5 Xia Guangqiong, Wu Zhengmao. Transmission characteristics after a Gaussian beam incident obliquely on a Fabry-Perot interferometer under non-resonant case[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 24~29

- 夏光琼, 吴正茂. 非共振条件下高斯光束斜入射法布里-珀罗干涉仪的透射特性[J]. 光学技术, 2004, **30**(1): 24~29
- 6 Yu Kan, Bao Jiaqi, Huang Dexiu *et al.*. Research on divergence-angle suppression techniques in the collimator system of angle-tuned filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0213001
- 俞 侃, 包佳祺, 黄德修等. 角度调谐滤光片准直系统发散角抑制技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0213001
- 7 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
- 8 Zhang Yueguang, Wang Ying, Sun Xuezheng *et al.*. Design and fabrication of short-wave/long-wave infrared dichroic beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 597~601
- 章岳光, 王 颖, 孙雪铮等. 红外短波/长波分色片的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 597~601
- 9 Yu Kan, Huang Dexiu, Zhou Kun *et al.*. Reflecting intensity distribution on the angle-tuned filter in oblique incidence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2855~2859
- 俞 侃, 黄德修, 周 坤等. 斜入射角度调谐滤光片的反射光强分布[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2855~2859
- 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
- 11 H. A. Macloed. Thin-Film Optical Filters[M]. Zhou Jiulin, Yin Shubai Transl.. Beijin: National Defense Industry Press, 1974. 82~83
- H. A. Macloed. 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
- 12 Yu Kan, Ji Zijuan, Huang Dexiu *et al.*. Transmitted-intensity distribution of a narrowband thin-film filter with oblique incidence of Gaussian beam under non-parallel case[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013001
- 俞 侃, 吉紫娟, 黄德修等. 非平行条件下高斯光束斜入射窄带滤光片的透射光强分布[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1013001

栏目编辑: 韩 峰