

文章编号 1004-924X(2016)01-0045-05

基于等效层理论的薄膜滤光片 中心波长消偏振膜系设计

俞侃*, 包佳祺

(文华学院 信息科学与技术学部, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对薄膜滤光片倾斜入射时产生的偏振光中心波长分离现象和偏振相关损耗,本文利用等效层理论设计了倾斜入射下中心波长消偏振的 100 GHz 信道间隔滤光片膜系结构,实现了薄膜滤光片的角度和波长调谐。首先通过相位关系分析,计算了滤光片间隔层的消偏振等效折射率,实现了不同偏振光中心波长的对准。然后,根据等效层理论,设计三层对称膜层结构实现了对间隔层中心波长消偏振等效折射率的替换。与原有的五层规整低偏振薄膜滤光片相比,本文提出的膜系结构更为简单,对消偏振等效折射率的替换更为精确。仿真和实验结果表明:该膜系结构的薄膜滤光片能够实现 0~20° 倾斜入射的偏振光中心波长对准,偏振光波长偏离度小于 0.03 nm,波长调谐范围能达到 35 nm。

关键词:薄膜滤光片;消偏振膜系;等效膜层;倾斜入射;中心波长

中图分类号:O484.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0045

Design of thin film filter central wavelength depolarization stack based on equivalent layers theory

YU Kan*, BAO Jia-qi

(Department of Information Science and Technology, Wenhua College, Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: dunyiyu@hust.edu.cn

Abstract: When a thin-film filter is used in oblique incidence, the central wavelengths of the polarization light will be separated obviously, and it will cause serious polarization dependent loss. Therefore, this paper designs a 100 GHz channel spacing stack to depolarize in the central wavelength based on the equivalent layer theory and to realize the angle and wavelength tunes of the thin film filter. Firstly, the depolarization equivalent refractive index in the space layer of the filter was calculated by a phase analysis and to complement the alignment of the different polarization lights. Based on the equivalent layer theory, a symmetric three layer stack was designed to replace the depolarization equivalent refractive index of the spacer. As comparing with the original five layer low polarization thin film filter, the three layer spacer stack is simpler, and it is more accurate to replace the depolarization equivalent refractive index. The simulation and experimental results indicate that

收稿日期:2015-06-24; **修订日期:**2015-09-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205062);湖北省教育厅科学研究计划资助项目(No. B2014246);湖北省高等学校中青年科技创新团队计划资助项目(No. T201431);湖北省自然科学基金资助项目(No. 2012FFB02701)

the stack can align the polarization light central wavelength from 0° to 20° , in which the polarization light separation is less than 0.03 nm and the wavelength tuning range reaches 35 nm.

Key words: thin film filter; depolarization stack; equivalent layer; oblique incidence; central wavelength

1 引言

随着光通信技术和容量的发展,宽带可调谐滤波器在密集波分复用系统和光交换网络中的应用需求越来越高^[1]。由于具有插入损耗低、温度不敏感和矩形度高等诸多优点,多腔窄带薄膜滤光片在光通信领域得到了广泛的应用^[2]。当薄膜滤光片处于倾斜入射时,其间隔层等效光学厚度的降低会导致其透射的中心波长向短波方向发生漂移^[3]。同时其 p 偏振光的中心波长会与 s 偏振光的中心波长出现明显的分离^[4],从而导致平均光产生严重的偏振相关损耗并限制滤光片的倾斜入射角度^[5]。随着薄膜消偏振技术的发展,越来越多的可用于倾斜入射状态的薄膜滤光片被提出并投入使用^[6-7]。通过分析薄膜滤光片的相位关系,能得到实现偏振光中心波长对准的间隔层消偏振等效折射率的理论数值^[8];但是传统的消偏振膜系需要通过至少 5 层高低折射率膜层的搭配才能在数值上逼近该等效折射率的理论数值,而且较大的误差较大和复杂的膜系结构给制备增加了难度。

本文基于等效层理论分析了等效折射率和对称膜系结构参数之间的关系,提出了利用适当的对称层相位参数得到所需的间隔层消偏振等效折射率的计算方法。该方法通过对称的三层非规整膜系结构可以精确替换薄膜滤光片间隔层的消偏振等效折射率理论值。理论分析和实验结果表明,基于该三层对称结构间隔层的膜系,可以实现 20° 倾斜入射条件下消除偏振光中心波长分离现象,所获得的波长调谐量能涵盖 C 波段。

2 间隔层消偏振

在前期研究工作中,本课题组利用寻优算法得到了倾斜入射状态下中心波长消偏振的间隔层膜系结构^[9]。同时,王翀等人也推导了 p 偏振光和 s 偏振光中心波长的两个隐函数,并联合求出了对应入射角中心波长消偏振的等效折射率的理

论数值^[10],分别为:

$$\arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{XP}(\lambda)}{n_{XP}^2(\lambda) + q_{XP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)} + \arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{YP}(\lambda)}{n_{YP}^2(\lambda) + q_{YP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)} = \frac{2a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}, \quad (1)$$

$$\arctan \frac{2n_{MS}(N_M)q_{XS}(\lambda)}{n_{XS}^2(\lambda) + q_{XS}^2(\lambda) - n_{MS}^2(N_M)} + \arctan \frac{2n_{MS}(N_M)q_{YS}(\lambda)}{n_{YS}^2(\lambda) + q_{YS}^2(\lambda) - n_{MS}^2(N_M)} = \frac{2a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}, \quad (2)$$

式中: λ_0 是正入射时的参考波长, λ 是斜入射时的中心波长, θ_0 是倾斜入射角度, N_M 是间隔层的消偏振等效折射率, $n(\lambda)$ 和 $q(\lambda)$ 分别是间隔层等效导纳的实部和虚部。联立上述两个方程,得到在 20° 倾斜入射条件下间隔层消偏振的等效折射率 $N_M = 1.683$, 如图 1 所示。

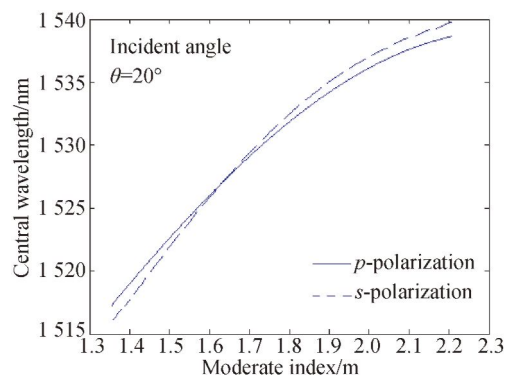


图 1 s 和 p 偏振光的间隔层等效折射率与中心波长的关系曲线

Fig. 1 Relation curves between spacer refractive index and central wavelength in s and p polarization lights

由于该间隔层的消偏振等效折射率在膜料库中没有对应的光学镀膜材料,所以只能通过搭配高低折射率材料去逼近该数值。本课题组已经以此为依据设计了一种 100 GHz 信道间隔的四腔角度调谐滤光片,通过同时使用 5 层高低相间的规整膜系材料来构成间隔层,以消除偏振光中心

波长的分离,从而使薄膜滤光片在倾斜入射时具有稳定的透射光谱和较低的偏振相关损耗。该滤光片的膜系结构为^[9]:

$$\left[\begin{array}{l} (\text{HL})^7 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^7 \text{L} \\ (\text{HL})^8 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^8 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^7 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^7 \end{array} \right], \quad (3)$$

式中:H和L分别表示膜系结构中的高低折射率层,其材料分别为 Ta_2O_5 (折射率 $n_{\text{H}}=2.05$)^[11]和 SiO_2 (折射率 $n_{\text{L}}=1.46$),光学厚度均为四分之一中心波长^[12]。正入射时中心波长为1563 nm。但该膜系的5层规整膜系间隔层结构复杂,制备成本高,而且间隔层2L3H4L3H2L的实际等效折射率为1.66,与消偏振折射率的理论值相比还有一定的偏差,在实际使用中仅能满足 16° 倾斜入射范围内偏振光中心波长的对准。如图2所示,当该膜系的薄膜滤光片处于 20° 倾斜入射时,仍会出现较为明显的偏振光中心波长分离(约0.2 nm),产生约3 dB的偏振相关损耗。

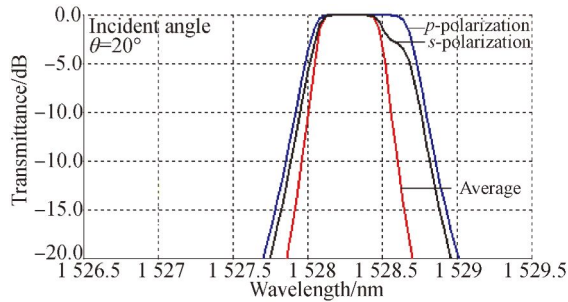


图2 在 20° 时膜系(3)的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of stack (3) at incident angle of 20°

3 对称层设计

基于等效层理论和对应的折射率及相位分析,利用已存在的高低折射率材料可以构建一个三层的对称膜系结构,用以替换任何中间折射率(折射率数值位于高低折射率之间)和相位厚度。对于一个 pqp 结构的三层对称膜系结构,只要已知材料折射率为 n_p, n_q ,对应的相位厚度为 δ_p 和 δ_q ,就可以通过调整其中每一层的相位厚度来得到数值位于 n_p 和 n_q 之间的任意等效折射率 N 以及对应的相位厚度 γ ,具体计算公式为^[13]:

$$\sin \delta_q = \frac{n_p/N - N/n_p}{n_p/n_q - n_q/n_p} \sin \gamma, \quad (4)$$

$$\sin 2\delta_p = \left[\frac{N}{n_p} \sin \gamma + B \sin \delta_q - A \cos \gamma \frac{\sin \delta_q}{\cos \delta_q} \right] / \left[\cos \delta_q + A^2 \frac{\sin \delta_q}{\cos \delta_q} \right], \quad (5)$$

其中:

$$A = \frac{1}{2} (n_p/n_q + n_q/n_p), \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{2} (n_p/n_q - n_q/n_p).$$

在对称膜系设计中仍使用 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率膜料,替换的膜层折射率为消偏振的间隔层等效折射率 $N_M=1.683$,替换的目标相位是 $\pi/2$ 。联立方程(4)~(6),可以得到一个3层的对称膜系间隔层结构:

$$0.302\text{H} \quad 0.35\text{L} \quad 0.302\text{H}. \quad (7)$$

由式(7)确定的材料的非规整膜系来替换原有的间隔层消偏振折射率理论值。依此本文设计了一种三腔100 GHz信道间隔的消偏振薄膜滤光片膜系结构,如式(8)所示。正入射时此滤光片的参考中心波长为1563 nm。

$$[(\text{HL})^8 0.302\text{H} \quad 0.35\text{L} \quad 0.302\text{H} (\text{LH})^8]^3. \quad (8)$$

在 20° 倾斜入射时膜系(8)的透射曲线如图3所示,薄膜滤光片的中心波长在1528 nm,较正入射时的1563 nm实现了约35 nm的波长调谐,能涵盖整个C波段。在倾斜入射时 p 偏振光和 s 偏振光实现了中心波长对准,偏振光波长分离度小于0.03 nm,平均光的透射光谱稳定性较好,矩形度较高。

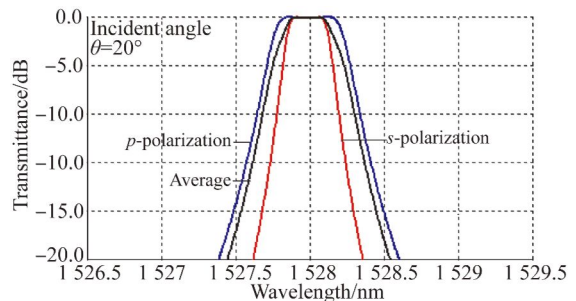


图3 在 20° 时膜系(8)的透射率曲线

Fig. 3 Transmittance curves of stack (8) at incident angle of 20°

4 实验结果

测试所用的消偏振薄膜滤光片是根据膜系

(8)制备的。为了增加透射率并抑制纹波,这里给膜系设计了增透膜,其厚度分别为 $0.71H$ 和 $0.58L$ 。实验使用的光源是 Agilent 83438A ASE 宽带可调谐光源。

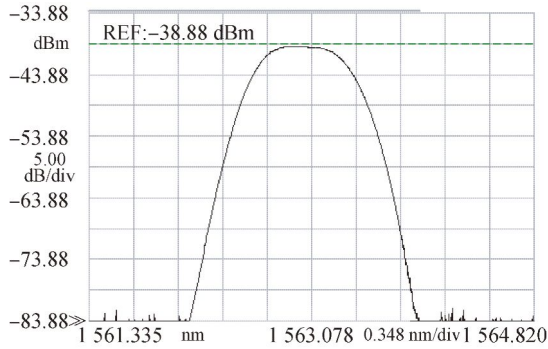


图 4 正入射时薄膜滤光片的测试光谱

Fig. 4 Measured spectrum of proposed film filter at normal incidence

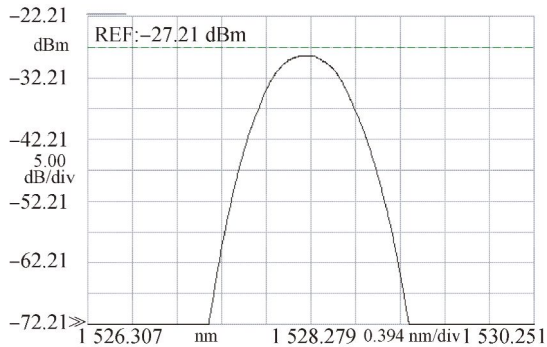


图 5 20° 倾斜入射时薄膜滤光片的测试光谱

Fig. 5 Measured spectrum of proposed film filter at 20° oblique incidence

图 4 和图 5 分别是在正入射和 20° 倾斜入射时该膜系薄膜滤光片在光谱仪上的测试曲线。如

图 4 所示,滤光片正入射时的透射曲线和理论设计一致,通带带宽大于 0.35 nm ,截止带带宽小于 1.2 nm ,透射光谱的矩形度较高且通带平坦,插入损耗小于 0.5 dB 。如图 5 所示,当滤光片处于 20° 倾斜入射时,由于透射光场的展宽致使接收耦合度的降低,导致透射光谱矩形度略有下降,但其透射光谱的谱形对称,没有产生明显的偏振光中心波长分离现象,通带带宽大于 0.3 nm ,截止带带宽小于 1.2 nm ,插入损耗小于 2 dB 。同时在 20° 倾斜入射时,其中心波长由正入射时的 1563 nm 移至 1528 nm ,完成了 35 nm 的波长调谐,能覆盖整个 C 波段。由此说明该滤光片具有较大的波长和角度调谐量,适用于倾斜入射状态。

5 结 论

本文使用适当的间隔层等效折射率,消除了倾斜入射时薄膜滤光片产生的偏振光中心波长分离现象,从而抑制了偏振相关损耗。然而在实际可制备的膜料中往往无法找到对应间隔层消偏振等效折射率的镀膜材料,使用多层高低折射率逼近该等效折射率的常规方法又存在较大的误差。本文基于等效层理论的对称膜系特性提出了一种计算方法,通过 3 层对称的高低折射率材料取代了间隔层的消偏振等效折射率,较之原有的 5 层规整低偏振薄膜滤光片的膜系结构更为简单,对消偏振等效折射率的替换更为精确。理论分析与实验结果表明,该膜系可以实现薄膜滤光片 20° 倾斜入射时偏振光中心波长的重合,偏振光波长的偏离度小于 0.03 nm ,波长调谐范围能达到 35 nm 。

参考文献:

- [1] 王喜昌,庞启,徐文军,等. 基于线性滤波器的布拉格光纤光栅解调系统的稳定性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2785-2790.
WANG X CH, PANG Q, XU W J, *et al.*. Stability of demodulation system for fiber Bragg grating based on linear filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2785-2790. (in Chinese)
- [2] 顾培夫,白胜元,李海峰,等. 密集波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, 22(7):

794-797.

GU P F, BAI SH Y, LI H F, *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 794-797. (in Chinese)

- [3] 俞侃,包佳祺,黄德修,等. 斜入射滤光片的偏振相关损耗抑制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 101-105.

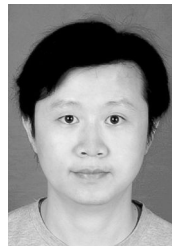
YU K, BAO J Q, HUANG D X, *et al.*. Restraining technology on the polarization dependent loss of the thin-film filter in oblique incidence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 101-105. (in Chinese)

- [4] ANTONIO J E, CASTILLO A, MAY D A. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(3): 324-326.
- [5] XIE J, CHEN Y P, LU W J, *et al.*. Tunable optical bandpass filter with multiple flat-top bands in nano-structured resonators [J]. *Opt. Eng.*, 2011, 50(3): 0340051-0340055.
- [6] YU K, LIU Y Y, BAO J Q, *et al.*. Design of angle-tuned wedge narrowband thin film filter [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2014, 56(3): 71-75.
- [7] YU K, YIN J J, BAO J Q, *et al.*. Design of non-polarization angle-tuned narrowband thin film filter [J]. *Optik*, 2014, 125(1): 397-400.
- [8] YU K, LIU W, HUANG D X. A novel three-port tunable filter and crosstalk analysis [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2008, 50(8): 2163-2167.
- [9] 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.
YU K, LIU W, HUANG D X, *et al.*. Optimal design and arithmetic on the stack of the angle-tuned filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(9): 1287-1291. (in Chinese)
- [10] 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研究 [J]. *光学学报*, 2005, 25(5): 707-711.
WANG CH, LUO B, PAN W. 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. (in Chinese)
- [11] 刘华松,姜承慧,王利栓,等. 热处理对离子束溅射 Ta_2O_5 薄膜特性的影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2645-2651.
LIU H S, JIANG CH H, WANG L SH, *et al.*. Effects of annealing on properties of Ta_2O_5 thin films deposited by ion beam sputtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2645-2651. (in Chinese)
- [12] 叶鑫,倪锐芳,黄进,等. 自组合法制备的亚波长纳米多孔二氧化硅薄膜 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1233-1239.
YE X, NI R F, HUANG J, *et al.*. Sub-wavelength nano-porous silica anti-reflection coatings fabricated by dip coating method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1233-1239. (in Chinese)
- [13] CHEN X M, MA J X, YANG Y T, *et al.*. Design of 50 G nonpolarizing dense wavelength division multiplexer angle-tuning bandpass filter [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(28): 5271-5275.

作者简介:



俞侃(1978—),男,浙江宁波人,博士,副教授,2005年、2009年于华中科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事薄膜光学和LED照明技术等方面的研究。E-mail: duniyu@hust.edu.cn



包佳祺(1980—),男,浙江宁波人,硕士,讲师,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计和薄膜光学等方面的研究。E-mail: baojiaqi@163.com