

光学滤波片薄膜镀制工艺中的监控技术模拟分析*

张荣君^{1,2)} 谌达宇²⁾ 郑玉祥¹⁾ 邬云骅¹⁾ 李莉¹⁾ 周鹏¹⁾ 陈良尧^{1,2)}

¹⁾ 复旦大学光科学与工程系, 先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海, 200433;

²⁾ 复旦汇成先进光电子器件联合实验室, 上海, 200433)

摘要 在窄带滤波器件的研制过程中, 模拟分析了采用极值法对膜层厚度进行光学监控及其偏差对滤波器件光学特性的影响, 并给出了一个4腔DWDM滤波片的理想工艺曲线以及模拟计算所得到光学特性的分布曲线, 计算结果有利于指导高品质薄膜器件的研制, 并研制出符合工业应用标准要求3腔和4腔的100GHz, 200GHz的DWDM滤波片以及CWDM滤波片。

关键词 光通信, 窄带通滤波器件, 实时监控, 模拟分析。

SIMULATION STUDY FOR OPTICAL FILTER THIN-FILM DEPOSITION MONITORING *

ZHANG Rong-Jun^{1,2)} CHEN Da-Yu²⁾ ZHENG Yu-Xiang¹⁾ WU Yun-Hua¹⁾
LI Li¹⁾ ZHOU Peng¹⁾ CHEN Liang-Yao^{1,2)}

¹⁾ State Key Lab. For Advanced Photonics Materials and Devices, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²⁾ Fudan-huicheng Advanced Photonics Devices Joint Research Lab., Shanghai 200433, China)

Abstract The simulation study of the filter's optical character affected by the *In-situ* optical monitoring the layer thickness and its deviation during deposition process for the optical narrow band-pass filter thin film was reported. Both of the ideal monitor trace and the simulation of optical parameters distributing curve of the 4-cavity DWDM filter were given. The simulation results are very useful in the practice of high quality optical filter thin film deposition. The filters are designed to meet specific 100GHz, 200GHz DWDM and CWDM bandwidth requirements, and the three and four cavity narrow band-pass filters are produced for the industry application.

Key words optical fiber communication, narrow-bandpass filter, *in-situ* monitoring, simulation study.

引言

在光学薄膜的制备过程中, 最基本的工艺条件是必须对膜层厚度及其折射率进行准确监控。制这需要采取实时光学监控的方法, 即在实际薄膜制备过程中, 当膜层达到预定光学厚度时, 及时中止膜的生长。对膜厚的监控主要有石英振荡法和光学监控法等, 这方面已经有许多研究报告^[1-3], 其中, 光学监控又包括极值法、定值法、光度值法、变波长极值法以及宽波长极值法监控等。近年来, 应用于光通信DWDM系统的窄带通滤波片研究备受瞩目^[4,5], 尽管人们已熟悉多层介质薄膜窄带通滤波片的原

理, 但与理想计算原理相比, 实际器件的研制工艺过程却十分复杂, 研制成本昂贵。所以实际薄膜制备前, 需对工艺过程做精细的模拟分析, 包括薄膜的光学特性、实时监控、误差补偿分析等, 以提高薄膜器件研制的效率, 降低成本。

本文模拟分析了在窄带通滤波片的研制中, 采用光学极值法监控技术, 由膜层厚度偏差对整个滤波片光学特性产生的影响, 并给出了在理想镀膜工艺条件下, 100次模拟分析所得到的滤波器件光学特性的分布曲线, 并将所得结果用于指导高品质薄膜器件研制的实践, 研制出符合工业应用标准要求的的光学薄膜滤波片。

* 上海应用物理研究中心(批准号00JC14029)和复旦大学(批准号EX12357)资助项目

稿件收到日期2002-08-11, 修改稿收到日期2002-10-08

* The project supported by Shanghai Research Center for Applied Physics (No. 00JC14029) and Fudan University (No. EX12357)

Received 2002-08-11, revised 2002-10-08

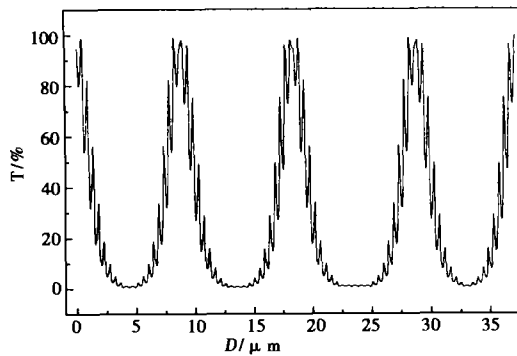


图1 透射率与膜层厚度关系理想工艺曲线
Fig.1 Ideal monitor trace of the 4-cavity DWDM filter

1 计算结果与讨论

图1为利用F-P多层介质薄膜滤波片的原理^[2,3],选用 Ta_2O_5 、 SiO_2 分别为高、低折射率镀膜材料,模拟计算所得的具有4个光学谐振腔的100GHz滤波片透射率与膜厚度关系的理想工艺曲线,中心透射波长为1550nm.膜系结构为:衬底|(HL)⁸H2LH(LH)⁸L(HL)⁸H6LH(LH)⁸L(HL)⁸H8LH(LH)⁸L(HL)⁷H8LH(LH)⁷L|空气,(其中,H、L分别代表高、低折射率材料膜层,数字表示膜层结构重复的数目).本文采用的计算方法为文献2所介绍的矩阵方法,对每一层膜使用一个 2×2 矩阵表示其特征,将每一个膜层所代表的矩阵连乘起来就得到了整个膜系的矩阵,然后进一步得到包括衬底在内的整个系统的特征矩阵,如下所示:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos\delta_r & i\sin\delta_r/\eta_r \\ i\eta_r\sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_m \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中, η_m 为衬底光学常数; η_r 为第 r 层膜的光学常数; δ_r 为第 r 层膜的相位厚度,正入射时相位厚度为

$$\delta_r = \frac{2\pi\eta_r d_r}{\lambda}. \quad (2)$$

式中 d_r 为第 r 层膜的几何厚度; λ 为监控光波波长.

得到系统的特征矩阵后用其分量 B 、 C 可以计算出系统的透射率 T :

$$T = \frac{4\eta_0\eta_m}{|\eta_0 B + C|^2}. \quad (3)$$

其中 η_0 为空气折射率.

在采用极值法光学监控镀膜过程的工艺中,理想的情况是通过光学监控系统,当光强达到如图1显示的各极值位置时,中止前级膜的生长,同时自动转为下级膜的生长,以确保每层的厚度都为 $1/4\lambda$.这需要在工艺中准确测量光强随膜层的变化关系,

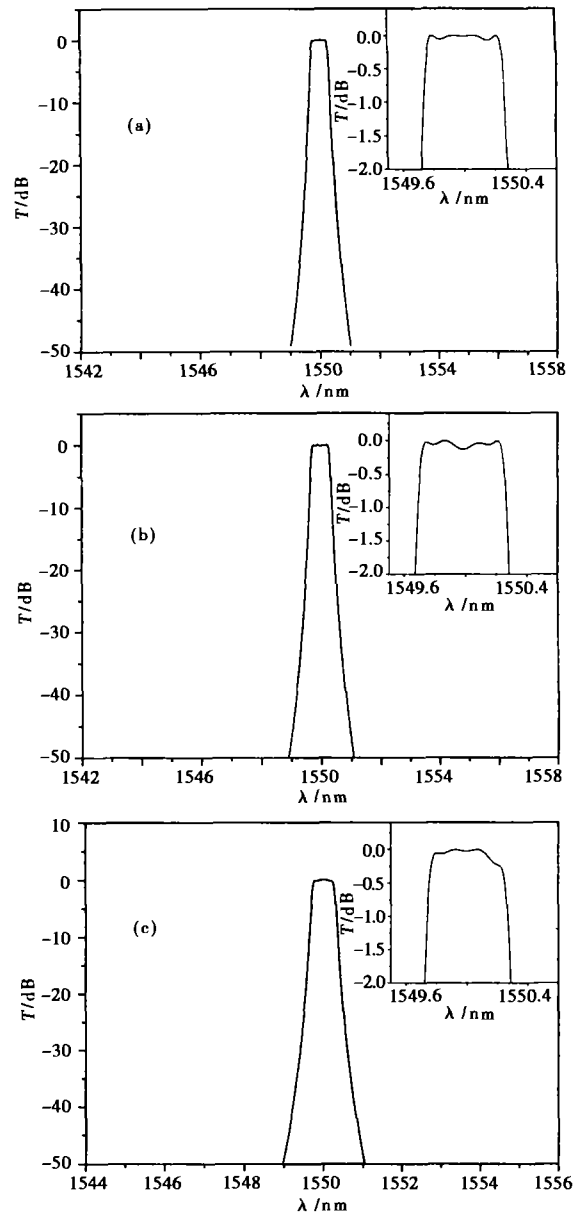


图2 所得滤波片的透射率曲线模拟计算结果.其中(a)为所有膜层正好在极值点位置转换,(b)和(c)对应于所有膜层在过极值点位置转换,过极值量分别为固定值(10nm)和随机值(呈正态分布且标准偏差为10nm)的模拟结果.图中插入的是透射率曲线顶部的放大

Fig.2 The simulation of transmittance trace of the filter, (a) all the layers terminate at the critical turning point, (b) and (c) all the layers terminate over the critical point, and the over value is fixed 10nm and random 10nm, respectively. The insert in the figures is the zoom in of the top of each figure

并定出极值位置,这就是极值法光学监控的基本原理.然而,在实际镀膜工艺过程中并非都能实现在极值处的可靠和准确转换.图2为所得滤波片的透射率曲线模拟计算的结果.其中(a)为所有膜层正

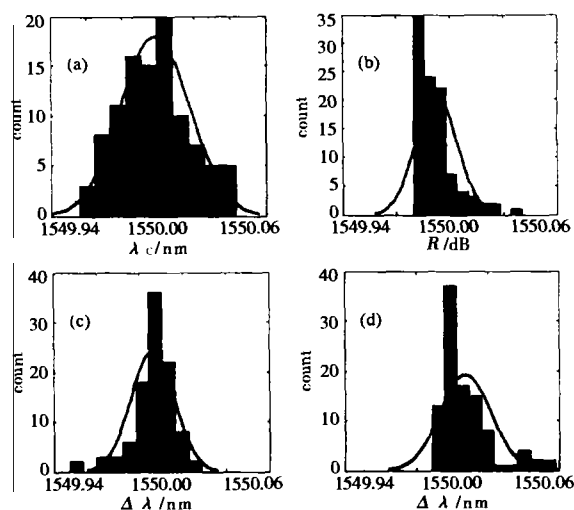


图3 实际镀制4腔滤波器件光学参数分布进行100次模拟计算的结果,其中(a)、(b)、(c)和(d)分别为中心波长、纹波、 -0.5dB 带宽和 -25dB 带宽等的分布曲线

Fig. 3 The simulation of optical parameter distributing curve of real 4-cavity filter, where (a), (b), (c) and (d) are the distributing curve of central wavelength (λ_c), ripple, band width (BW) at -0.5dB and -25dB , respectively

好在极值点位置转换,(b)和(c)对应于所有膜层在过极值点位置转换,过极值量分别为固定值(10nm)和随机值(呈正态分布且标准偏差为10nm)的模拟结果.图中插入的是透射率曲线顶部的放大.从图中可以看出,只有所有膜层正好在极值点位置转换,才能得到较理想的滤波片的透射率曲线(a),后2种情况(b)和(c)都会对滤波器的透射特性带来较大的影响,不但会影响到滤波片透射率曲线的波形,而且会带来较大的纹波,特别是后者更会对通带的波形造成影响.

由于镀膜工艺中光学极值监控等方法存在的限制,特别是在进行极值判断时即使光强信号上出现少许噪音,也会对极值判断的准确性造成影响,使得实际的工艺控制即使在理想器件的膜系设计和镀膜工艺条件下,获得的滤波器件的实际光学特性并非完全与设计值相符,而是有一定的误差分布.我们在理论工艺曲线上,叠加一定信噪比的白噪音,有意造成极值点的误判,从而使每一层膜的厚度都在极值点附近偏厚或偏薄地变化.根据蒙特卡罗方法的原理,我们对这一过程进行多次模拟后,可以得到最终器件各项参数的分布.由于薄膜产品的制造成本较高,这种手段的指导意义在于可以对产品进行合

格率评估,并由此对薄膜的设计进行指导,避免一些难于实现的设计方案.图3为用蒙特卡罗方法对实际镀制4腔滤波器件的光学参数分布进行100次模拟计算的结果,其中a、b、c和d分别为中心波长、纹波、 -0.5dB 带宽和 -25dB 带宽等的分布曲线.可以看出,在信噪比为100的随机噪音情况下,通带波纹将对器件质量产生严重影响,并伴随中心波长偏离设计值.

2 结论

本文根据全介质F-P多层介质薄膜滤波器件的设计原理,在完成窄带通滤波片膜系结构设计后,根据滤波器件的实际工艺条件,采用光学极值法监控技术,研究了在滤波器件的实际工艺过程中,膜层厚度偏差对滤波器件光学特性的影响.结果表明,膜层厚度的偏差对滤波器件的透射特性将带来比较大的影响,特别是随机偏差对通带波形的影响更大.同时,还对滤波器件的光学特性随工艺参数的分布进行了100次模拟计算,在信噪比为100的随机噪音情况下,通带波纹将对器件质量产生较大影响,并伴随中心波长偏离设计值.研究结果对实际镀膜工艺有积极的指导意义,利用模拟计算结果,已研制出符合工业应用标准要求的100GHz、200GHz、的DWDM滤波片及CWDM滤波片,其结果另文报道^[6].

REFERENCES

- [1] Fournier Bousquet A, Kowalczyk R. Optical filters: Monitoring process allowing the auto-correction of thickness errors. *Thin Solid Films*, 1972, **13**: 285 — 290
- [2] Christi Madsen K, Jian Zhao H. *Optical Filter Design and Analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [3] Zoller A, Boos M, Herrmann R, et al. Optical thickness monitoring of dielectric optical filters using a new in-situ phometer with high signal resolution and excellent long-term stability. *SPIE*, 1988, **1019**: 106— 113
- [4] Willey R R. Achieving narrow bandpass filters which meet the requirements for DWDM. *Thin Solid Films*, 2001, **398/399**: 1 — 9
- [5] Pan J J, Zhou F Q, Zhou M. Thin films improve 50GHz DWDM devices. *Laser Focus World*, 2002, **38**: 111 — 116
- [6] CHEN Da-Yu, ZHANG Rong-Jun, ZHU Wei-Dan, et al. Study of 100GHz narrow bandpass DWDM filters in the fiber optical communication. *J. Infrared Millim. Waves* (谌达宇, 张荣君, 朱伟丹, 等. 光通信 DWDM 系统的 100GHz 窄带滤波片设计和研制. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(1): 75—76