

文章编号 1004-924X(2004)04-0393-05

应力变化对多层薄膜窄带滤光片透射光谱的影响

王成, 张贵彦, 肖孟超, 马莹, 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 利用薄膜应力公式和弹性力学的小挠度弯曲理论分析了在应力变化情况下, 多层薄膜应变与膜厚变化的关系, 并建立其数学模型, 提出多层薄膜各层厚度变化的不均匀性理论。利用这个模型在应力减小 200 MPa 条件下对 138 层 4 腔的 100 GHz 滤光片光谱进行了模拟, 与设计值比较发现中心波长增加了 0.562 nm; 0.5 dB 处的带宽比设计值减小 0.124 nm; 25 dB 处的带宽比设计值减小 0.01 nm; 谱线矩形化变差; 插损也有明显的增加。说明了应力变化引起的光学薄膜厚度变化的不均匀性是引起这种窄带干涉滤光片光谱退化的主要原因之一。实验结果为 100 GHz 的窄带滤光片热处理后中心波长增加 0.325 nm; 0.5 dB 处带宽减少 0.01 nm; 20 dB 处带宽增加 0.014 nm; 插损增加, 谱线通带变形严重, 纹波增大, 光谱退化了。实验结果与理论分析一致。

关键词: 光学薄膜; 光谱退化; 窄带滤光片; 应力

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

Influences of stress changes on transmission characteristics of multilayer thin film narrow bandpass filters

WANG Cheng, ZHAN Guiryan, XIAO Mengchao, MA Ying, QIANG Longsheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: On the base of film stress formula and microbending principle of elasticity, the relation between multilayer film strain and film thickness was analyzed. A mathematic model was established, and a new theory that thickness of multilayer film changes disuniform was brought forward. By using this model, the spectrum of 100 GHz filter with 138 layers and 4 cavities was simulated when the stress decreased by 200 MPa. Compared with the designed value, it was found that central wavelength increased by 0.562 nm, bandwidth decreased by 0.124 nm at 0.5 dB and 0.01 nm at 25 dB, rectangular spectrum deformed, and insert loss increased apparently. These demonstrated that uneven film thickness caused by stress change was the main reason that caused spectrum of narrow-band interference filter to degrade. Experimental results were that central wavelength of 100 GHz narrow-band filter increased by 0.325 nm after heat treatment, bandwidth decreased by 0.01 nm at 0.5 dB and 0.014 nm at 20 dB, insert loss increased, spectrum of pass band deformed badly, and ripple enlarged. The experimental result conforms to the theory analysis.

Key words: optics; thin film; spectrum curve degradation; narrow bandpass filter; stress

收稿日期: 2004-02-23; 修订日期: 2004-05-16.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA312100); 中国科学院光电科技集团项目(KGCX2405)

1 引言

薄膜窄带干涉滤光片是将光分成多个信道的技术途径之一,这种滤光片是由级联多个 F-P 腔组成^[1-5],其通带更加平坦,陡度更大。为了复用更多的波长,通带的带宽要求是亚纳米级,因此其可靠性和精确性要求十分苛刻,薄膜窄带滤光片采用离子辅助镀^[6]或离子束溅射镀^[7]等工艺镀制而成。此类工艺镀制的薄膜具有高堆积密度的无定形结构,通常表现为压应力。薄膜总应力包括:薄膜沉积过程中与不同参数(如:离子能量、流量等)有关的本征应力和由于薄膜之间或膜层与基片的热膨胀系数不同而产生的热应力。薄膜应力可能导致器件光谱透射曲线的退化和中心波长的漂移。为此一些科研人员作了许多研究,Haruo Takahashi^[8]分析了离子辅助镀制备薄膜窄带滤光片的温度稳定性,分析了不同基片上镀制 TiO₂/SiO₂, Ta₂O₅/SiO₂ 窄带滤光片的温漂大小,但没有指出谱形退化的分析,然而谱形退化是实际中确实存在的现象。Tei chen chen 等人^[9]分析了温度和应力对离子辅助镀方法沉积的 TiO₂/SiO₂ 多层介质薄膜窄带滤光片透射特性的影响,文章同时分析了波长漂移和谱形的退化,但文章认为谱形的退化是由于温度的不均匀性引起。

本文利用弹性力学的小挠度弯曲理论分析了窄带干涉滤光片中心波长漂移和光谱曲线退化的原因,并且在理论上进行了模拟计算,且利用 100 GHz 4 腔的 DWDM 窄带干涉滤光片进行了实验研究。

2 理论模型

假设作用于基片单位边缘长度上的力为 σ ,薄膜应力均匀分布并平行于表面。建立以中面(设基片的 1/2 厚度处)为 $x-y$ 平面,对称中心轴为 z 轴,坐标系如图 1。在薄膜-基片体系中,若基片是各向同性的,可以得到应力与曲率半径的关系为^[10]:

$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f} \frac{1}{R}, \quad (1)$$

或可以写为:

$$x = \frac{1}{R} = \frac{6\sigma(1-\nu_s)t_f}{E_s t_s^2}, \quad (2)$$

式中, x 为基片弯曲的曲率, R 曲率半径, t_f 为薄

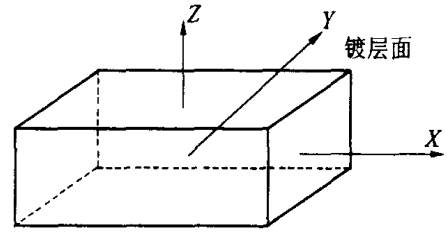


图 1 以中面为 XY 面的坐标系
Fig. 1 The coordinates with neutral plane as $X-Y$ plane

膜厚度, t_s 为基片的厚度, ν_s 为基片的泊松比, E_s 为基片的杨氏模量。又根据弹性力学的小挠度弯曲理论^[11],应变和曲率之间关系为

$$\varepsilon_x = x_x Z, \quad \varepsilon_y = x_y Z, \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 为 X, Y 方向的应变, x_x, x_y 分别是 X, Y 方向的曲率,在各向同性的介质中, $x_x = x_y = x$, 则 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$, Z 为测量点的坐标。由式(3)可知,在不同的 Z 处, xy 平面的应变与 Z 成正比,越远离中面,应变越大。这里假设薄膜和基片的泊松比相等即 $\nu_f = \nu_s = \nu$ 。再由泊松比的定义和弹性力学原理可以得出不同 Z 坐标处 X, Y, Z 方向的边长为

$$L_x = L_y = L_0 [1 + (1-\nu)\varepsilon] = L_0 [1 + (1-\nu)xZ], \quad (4)$$

$$L_z = L_0(1-\nu\varepsilon) \times (1-\nu\varepsilon) = L_0(1-2\nu\varepsilon + \nu^2\varepsilon^2). \quad (5)$$

在小挠度近似条件下, ε 是个小量,因此可以忽略二阶项,重新写为:

$$L_z = L_0(1-2\nu\varepsilon) = L_0(1-2\nu xZ), \quad (6)$$

L_0 为薄膜各方向原长度。由式(4)和式(6)可得薄膜体积为

$$V = L_x L_y L_z = L_0^3 [1 + (1-\nu)xZ]^2 (1-2\nu xZ), \quad (7)$$

忽略高阶项,得出

$$V = L_x L_y L_z = L_0^3 (1 + 2xZ - 4\nu xZ), \quad (8)$$

变形后薄膜的封装密度为

$$P = P_0 (1 + 2xZ - 4\nu xZ)^{-1}, \quad (9)$$

由薄膜折射率与封装密度的关系式^[12] $n = n_0 P + 1 - P$, n_0 为薄膜材料的折射率。设没有应变时薄

膜是致密的, 即 $P_0 = 1$, 应力作用下的折射率可得

$$n = n_0(1 + 2\gamma Z - 4\gamma^2 Z^2)^{-1/2} \quad (10)$$

折射率 n 也会随曲率 χ 的改变而改变。薄膜光学厚度变化

$$\Delta(nL_Z) = \Delta n L_Z + n \Delta L_Z, \quad (11)$$

分别对式(5)和式(10)求曲率的微分有:

$$\Delta L_Z = -2L_0 \gamma Z \Delta \chi, \quad (12)$$

$$\Delta n = -\frac{2n_0(1-2\gamma)Z\Delta\chi}{A^2}. \quad (13)$$

式中 $A = 1 + 2\gamma Z - 4\gamma^2 Z^2$ 。 L_0, γ, n_0 都是常数, 小挠度理论中认为在中面的任一根法线上, 薄板全厚度内的所有各点曲率是相同的, 所以曲率改变情况下, 薄膜光学厚度的变化量完全取决于其所处的位置 Z , 即 Z 越大, 薄膜光学厚度的变化量越大, 使薄膜厚度变化越不均匀。这种厚度变化的不均匀性可能是窄带滤光片薄膜光谱退化的主要原因。

下面分析曲率变化和薄膜厚度变化量的关系。热处理一般是薄膜后处理中比较常用的方法, 热处理可以使薄膜的应力减小^[12-15], 而这又可能是导致薄膜退化的一个原因。在基片厚度一定, $\Delta s = 0$ 时, 由式(2)求应力的导数

$$d\chi = \frac{6(1-\gamma)t_f}{Et_s^2} d\sigma, \quad (14)$$

近似写为:

$$\Delta\chi = \frac{6(1-\gamma)t_f}{Et_s^2} \Delta\sigma, \quad (15)$$

式(6)(10)(12)(13)(15)代入式(11)中可得

$$\Delta(nL_Z) = -12(1-\gamma)t_f L_0 Z \left[\frac{n_0(1-2\gamma)(1-2\gamma^2 Z^2)}{A^2} - \gamma(n_0 A^{-1} - A^{-1} + 1) \right] \frac{\Delta\sigma}{Et_s^2}, \quad (16)$$

$\Delta(nL_Z) > 0$ 表示薄膜光学厚度的增加, 相反表示薄膜光学厚度的减少。

3 计算结果与理论模拟

玻璃基片的杨氏模量为 85 GPa, 泊松比为 0.2; 高低折射率薄膜介质为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ; 在 1550 nm 处的折射率分别为 2.06 和 1.46; 四腔级联 F-P 结构薄膜总的物理厚度为 39.41 μm 。

利用式(16)计算薄膜光学厚度的变化情况, 设基片为 1 mm; 薄膜应力为 -2 GPa。应力变化设为 $\Delta\sigma = 200$ MPa, 表示压应力减小。计算中薄膜应力值代入其绝对值, 应力如果减小则代入其负值, 得出各层薄膜相对原设计 $1/4 \lambda$ 厚度曲线如图 2 所示, N 为滤光片的层数; Norm. D 为滤光片归一化的厚度值。可以看出应力改变后薄膜厚度变化不均匀。利用这些计算结果分别模拟变化前后的光谱变化。

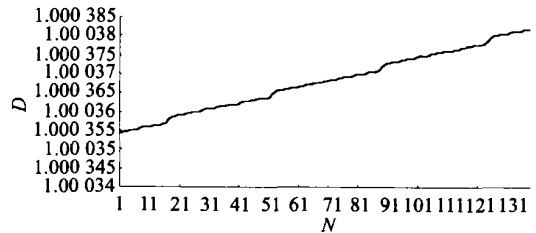
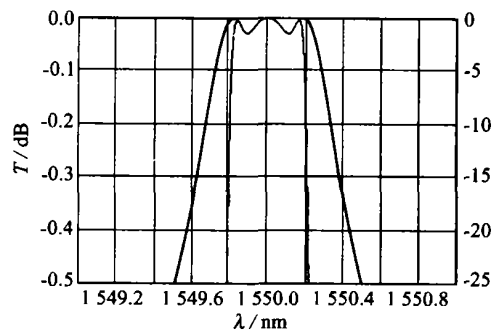
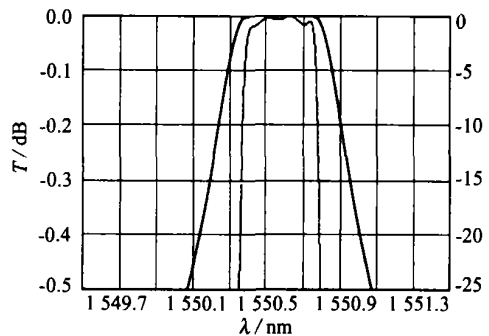


图 2 应力减少 200 MPa 后的各层归一化光学厚度
Fig. 2 Normalized optical thickness of every layer after stress reduction of 200 MPa



(a) 4 腔滤光片的理论设计的光谱曲线
(a) The oretical spectrum of the fourcavities filter



(b) 应力减小 200 MPa 后的模拟光谱曲线
(b) The simulated spectrum after the stress decreases by 200 MPa

图 3 设计的和应力减少 200 MPa 后的模拟光谱曲线
Fig. 3 The designed spectrum and the one after stress reduction of 200 MPa

如图 3 所示。(a) 为设计的 4 个 F-P 腔 100 GHz 的光谱曲线;(b) 为设计的 4 个 F-P 腔 100 GHz 在 -2 GPa 作用下, 应力减少 200 MPa 后的模拟光谱曲线。图 3(a) 设计结果为中心波长 1 550 nm, 0.5 dB, 25 dB 带宽分别为 0.565 nm, 1.000 nm;(b) 中可以读出中心波长为 1 550.562 nm; 0.5 dB, 25 dB 处带宽分别为 0.441 nm, 0.99 nm, 从(a), (b) 中比较得出中心波长增加, 谱线矩形化变差, 图(b) 中 0.1 dB/Div 可以明显看出光谱的变形。

4 实验研究

热处理可以使薄膜的应力减小^[12-15], 文献[15]中介绍离子溅射镀制的单层 SiO_2 在 300°C 热处理下薄膜应力由原来的 $-520 \sim -890$ MPa 减少到 $-480 \sim -610$ MPa。依据前述理论分析, 对离子辅助镀设备制备的 100 GHz 4 腔的 DWDM 窄带干涉滤光片进行实验研究。

实验中建立如图 4 的测量装置来测量热处理前后的透射光谱图。LED 宽带光源的光经单模光纤、光耦合器和光纤准直器平行投射到样品膜表面, 通过样品的光经光纤准直器和单模光纤由光谱分析仪(OA)接收处理和分析。本文使用的 OSA 为 Advantest Q8384, 波长分辨率为 0.01 nm。光功率计和光耦合器的作用是确保入射光垂直于样品膜表面, 光纤准直器的光斑直径约为 1 mm。

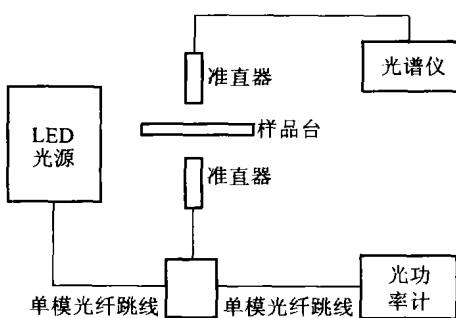
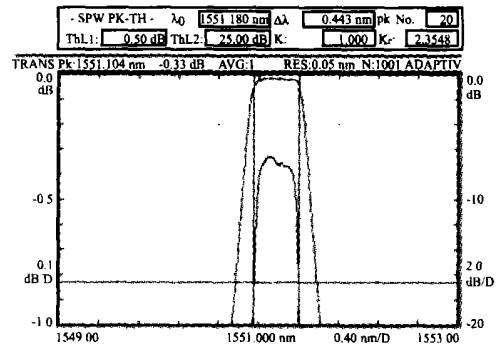


图 4 测量装置图

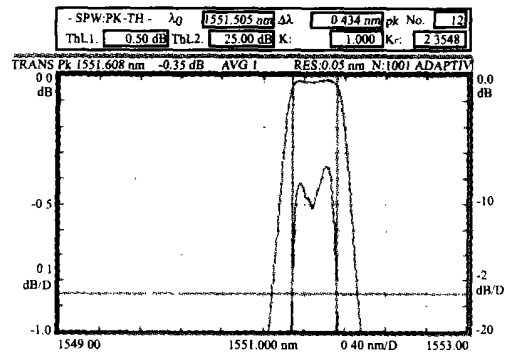
Fig. 4 Schematic of the measurement setup

图 5 (a) 为用 Leybold-APS 实际镀制的 100 GHz, 4 个 F-P 腔的 DWDM 窄带干涉滤光片光谱图, 中心波长为 1 551.18 nm; 0.5 dB 和 20 dB 处

带宽分别为 0.443 nm 和 0.895 nm; 对此滤光片进行热处理, 方式为自然升温到 300°C 保温 10 min, 迅速降温到室温。室温下测量的光谱如图 5 (b)。光谱中中心波长为 1 551.505 nm; 0.5 dB 和 20 dB 处带宽分别为 0.433 nm 和 0.909 nm, 比较(a), (b) 两个光谱图可以看出, 中心波长增加了 0.325 nm; 0.5 dB 处带宽减少 0.01 nm; 20 dB 处带宽增加 0.014 nm; 说明光谱曲线矩形化变差, 通带插损增加, 通带纹波变大, 光谱退化了。由式(16) 得出应力作用下, 应力变化后产生不均匀膜厚变化, 因此导致实验光谱的退化。



(a) 实际制备的 4 腔滤光片的光谱
(a) Spectrum of deposited four cavities filter



(b) 实际制备的 4 腔滤光片热处理后的光谱
(b) The spectrum of eposited four cavities filter after heat treatment

图 5 热处理前后的光谱图

Fig. 5 Spectrum before annealing and after annealing

5 结论

利用薄膜应力公式和弹性力学的小挠度弯曲

理论分析了多层薄膜应变与膜厚变化的关系,建立了理论模型,得出多层薄膜各层厚度变化的不均匀,越远离中面变化越剧烈。对1.0 mm基片上的138层4腔100 GHz窄带滤光片利用所推导的公式对在 $\Delta\sigma=200$ MPa压应力减小情况下,对每一层薄膜光学厚度变化进行了计算,并对其结果用膜系设计软件进行了模拟,与设计值比较发现中心波长增加了0.562 nm;0.5 dB处的带宽比

设计值减小0.124 nm;25 dB处的带宽比设计值减小0.01 nm;谱线矩形化变差;插损也有明显的增加。100 GHz的窄带滤光片热处理前后比较中心波长增加0.325 nm;0.5 dB处带宽减少0.01 nm;20 dB处带宽增加0.014 nm;插损也增加;谱线变形,光谱退化了。充分说明了薄膜光学厚度不均匀变化是引起这种窄带干涉滤光片光谱退化的主要原因之一。

参考文献:

- [1] BAUMEISTER P. Bandpass filters for wavelength division multiplexing: modification of the spectral bandwidth[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(28): 6609-6614.
- [2] VERLY P G. Accurate design of square bandpass interference filters[J]. *SPIE*, 1999, 3738: 262-267.
- [3] MACLEOD A. Challenges in the design and production of narrow band filters for optical fiber telecommunications[J]. *SPIE*, 2000, 4094: 47-57.
- [4] FABER R, ZHANG K Q. Design and manufacturing of WDM narrow band interference filters[J]. *SPIE*, 2000, 4094: 58-64.
- [5] TONGQUN M, NANSHAN J, FANGCHE ZH. Development of DWDM filter manufacture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(5): 488-494.
- [6] MARTIN P J, MACLEOD H A, NETTERFIELD R P, et al. Ion beam assisted deposition of thin film[J]. *Appl. Opt.*, 1983, 22(1): 178-184.
- [7] DEMIRYONT H, SITES J R, GEIB K. Effect of oxygen content on the properties of tantalum oxide films deposited by ion beam sputtering[J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(10): 490-495.
- [8] TAKAHASHI H. Temperature stability of thin film narrow bandpass filters produced by ion assisted deposition[J]. *SPIE*, 1994, 2253: 1343-1352.
- [9] CHEN T CH, KUO J. Wei lung lee and Cheng chung lee. Influences of temperature and stress on transmission characteristics of multilayer thin film narrow bandpass filters[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40: 4087-4096.
- [10] 田民波,刘德令.薄膜科学与技术手册[M].北京:机械工业出版社,1991:144-146.
MINBO T, DELING L. *Handbook of thin film science and technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 144-146. (in Chinese)
- [11] 陈国荣.弹性力学.[M].南京:河海大学出版社,2002:206-216.
CHEN G R. *Elasticity* [M]. Nanjing: Publishing house of NanJing. HoHai University, 2002: 206-216. (in Chinese)
- [12] RASTOGI R, DHARMADHIKARI V, DIEBOLD A. Stress variation with temperature time and its correlation to film structure and deposition parameters[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, A9(4): 2453-2458.
- [13] MURAKAMI M. Deformation in thin films by thermal strain[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, A9(4): 2469-2476.
- [14] 向鹏,金春水. Mo/Si多层膜残余应力的研究[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 62-67.
XIANG P, JIN CH SH. Measurement of residual stress in molybdenum/silicon multilayer coatings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 62-67. (in Chinese)
- [15] TILSH M, SCHEUER V, TSCHUDI T. Effects of thermal annealing on ion beam sputtered SiO₂ and TiO₂ optical thin films[J]. *SPIE*, 1997, 3133: 163-175.

作者简介:王成(1977-),男,内蒙古通辽人,2002年获长春光学精密机械学院理学硕士学位,长春光学精密机械与物理研究所读博士研究生,主要研究方向为光学薄膜、激光技术。E-mail: ccwangcheng@163.net