文章编号 1674-2915(2013)04-0557-06

1 555 nm 宽带通滤光膜的设计和优化

张金胜[1,2],张金龙[1],宁永强[1*],王立军[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对对空间通信的特殊需求,设计并制备了1 555 nm波段的高透过率、宽带通滤光膜,该滤光膜在高温高湿环境下能够稳定工作。根据薄膜设计理论,选取折射率差大的TiO_2和SiO_2作为镀膜材料,采用规整膜系进行膜系设计。借助Optilayer软件,采用针形优化和双面镀膜方法,得到优化的非规整膜系。采用直接与间接监控相结合的手段监控薄膜生长,并探讨了薄膜的生长条件。在电子束蒸发离子辅助沉积条件下,制备出中心波长处透过率达到97%,带宽为50 nm的滤光膜。在100 ℃高温和-30 ℃低温各保持3 h的条件下,波长漂移仅0.2 nm,具有高的稳定性和可靠性,满足空间通信的使用要求。

关 键 词:带通滤光膜;膜系设计;薄膜制备
中图分类号:O484.1 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130604.0557

Design and optimization of 1 555 nm broad-bandpass filter film

ZHANG Jin-sheng[1,2], ZHANG Jin-long[1], NING Yong-qiang[1*], WANG Li-Jun[1]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn*

Abstract: According to the special requirements of space communication, a 1 555 nm high transmittance and broad band-pass filter was designed and prepared to operate under high temperature and high humidity environments. TiO_2 and SiO_2 were selected as coating materials to produce a large refractive index difference and the Quarter-wave Optical Thickness(QWOT) film was designed based on the design theory. Then, the non-QWOT film was optimized by using the needle optimization and double sided coating by Optilayer software. The monitoring technique in the experiment was combined with direct monitoring and indirect monitoring, and the method were also discussed. A filter film with a transmittance of 97% in the center wavelength and a half-width of 50 nm was manufactured under electron beam evaporation by ion assisted. Experiments show that the

收稿日期:2013-05-16;**修订日期**:2013-07-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60876036, No. 51172225, No. 61204056);吉林省科技厅科技发展计划资助项目(No. 201105025, No. 20116011)

wavelength shift of the filter film is only 0.2 nm in a high temperature of 100 ℃ and a low temperature of −30 ℃ for 3 hours each. Moreover, the film maintains high stability and reliability, which meets the requirements of space communication.

Key words: band pass filter film; auto film design; film preparation

1 引 言

带通滤光膜能够消除杂散光对测量光信号的影响,能够屏蔽杂散光,提高信噪比,因此,在多通道光纤、激光陀螺、激光测距、密集波分复用(DWDM)光通信、激光通信等高新技术领域中发挥着越来越重要的作用[1-3],近年来受到越来越多的关注。

国内一些研究组开展了不同波段的带通滤光膜的研究[4-7],比如905、1 064和1 550 nm等波段。随着半导体激光器的发展,1 550 nm半导体激光器在空间通信中具有更高的传输速率[8],为了提高空间通信的传输速率,增大通讯容量,波分复用技术(WDM)将通信波长拓展到1 560 nm甚至到1 570 nm[9-11]。为了增大空间通信以及空对地通信系统光接收器件的精度和准确度,需要在接收器件的前端使用宽带宽的1 555 nm滤光膜,以抑制空间其他波段对它的干扰。当前对于中心波长1 555 nm,高透过率带宽为30 nm,半宽为50 nm的宽带通的滤光膜还未见报道。

本文通过光学直接监控的手段,使用直接光控为主[12]、晶振控制为辅的方法,精确地监控薄膜的厚度和生长速率。通过光控可对晶控的修正因子(Tooling factor)进行修正[13],而且被镀产品本身也起着监控片的作用,使得控制精度得到提升。薄膜生长过程中使用能量更大的LaB_6作为离子源阴极,调整合适的能量,在电子束蒸发离子辅助沉积条件下,制备的薄膜在高低温、高湿等条件下均能稳定工作。

2 膜系设计

2.1 薄膜材料的选择

在薄膜材料的选取中,TiO_2本身不稳定,易失氧,但通过适当能量的离子源辅助,增加试验中的氧气量,稳定生长温度为180 ℃,其折射率可达2.2,最终选择TiO_2为高折射率材料;SiO_2是一种常用的稳定性高的低折射率材料,具有损伤阈值高、耐腐蚀,吸收小的特点,通过实验测试其折射率为1.48,所以选择SiO_2作为低折射率材料。

2.2 膜系设计和优化

膜系的设计不但与镀膜材料和膜系的结构有关,还与基底以及镀膜的工艺条件有关,根据多半波滤光片的设计公式[14]:

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0}{m\pi}\left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{x-1}\frac{(n_H - n_L)}{(n_H - n_L + n_L/m)}, \quad (1)$$

式中:$2\Delta\lambda$为通带的半高宽,λ_0为中心波长,m为干涉级次,x为高折射率材料的层数,n_H、n_L分别为高低折射率薄膜材料的折射率。为了增大带宽,选择折射率差较大的材料以及选择较少的高折射率材料层数。为了满足50 nm的半高宽要求,在镀膜材料选定的前提下,根据式(1)需要降低高折射率材料的层数。在镀膜过程中,更换晶控会造成不同晶控下膜层的厚度的变化,从而影响整个膜系的中心波长的漂移,因此,需综合考虑镀膜过程中薄膜的生长速率,以及晶控的使用寿命。设计初始膜系:Sub|(HL)^2H2LH(LH)^2LHLH6LHLHL(HL)^2H2LH(LH)^2L|Air,其中H表示$\lambda/4$光学厚度的高折射率材料TiO_2,L表示$\lambda/4$光学厚度的低折射率材料SiO_2,λ = 1 555 nm,通过Optilayer软件模拟出透射光谱图如图1中虚线所示。

从图1中虚线可以看出,优化前的透射率曲线在通带中间有凹陷,使得整个透过率下降,这是使用双半波法设计的典型膜系,由于两个半波曲线相交于彼此分开的两点而产生的。为了提高其透过率,使用Optilayer软件进行优化,在优化的过程中为了在工艺制备过程中能够很好地控制薄膜的生长,需要尽可能多地使用规整膜系,仅针对膜系的前后几层进行针形优化[15],通过软件优化后的透过率曲线如图1中实线所示。

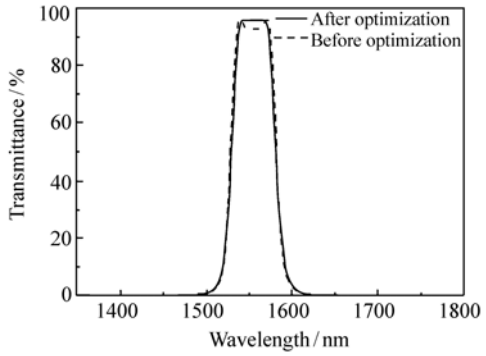


图 1　优化前后透过率理论曲线

Fig. 1　Transmittance theory curve before and after optimizations

优化后的膜系为:Sub|0.411393H 0.256162L 0.101549HLHLH2LH(LH)^2LHLH6LHLHL(HL)^2H2LH(LH)^2 1.000254L|,其中心波长处的透过率由优化前的 92.7% 提高到了 95.7%,半宽并未发生变化。

由于基底背面存在反射,为了进一步提高中心波长处的透过率,需要在基底的另一面镀减反膜,设计膜系使用中心波长在 1 555 nm 处的 2 层减反膜,其优化后的膜系为:Sub|1.677H0.682L|Air,其中 H 表示为 λ/4 光学厚度的高折射率材料 TiO_2,L 表示为 λ/4 光学厚度的低折射率材料 SiO_2,图 2 为减反膜的透射曲线。

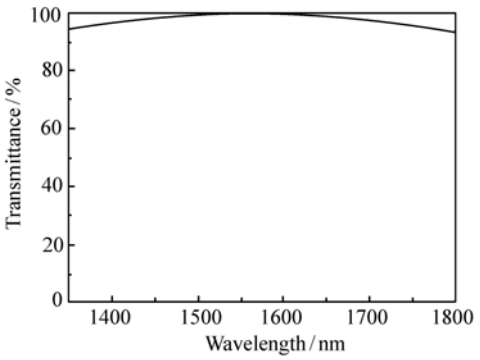


图 2　优化后减反理论曲线

Fig. 2　Anti-reflectance theory curve after optimization

单面透过率在中心波长处达到 99.96%,其主要难点在于精确控制膜厚,才能够满足设计的要求,通过软件对双面镀膜进行模拟,得到优化后的结果。图 3 为双面镀膜优化后的透射曲线,其最高透过率可达到 99.5%。在 1 540 ~ 1 570 nm透过率达到 99%,半宽为50 nm,满足要求。

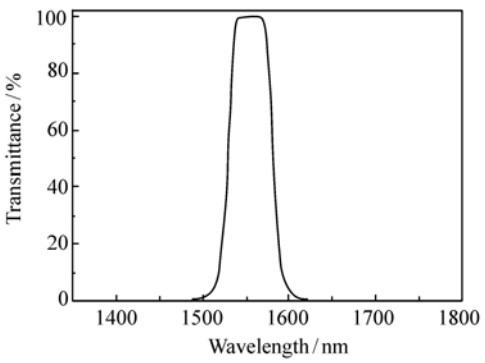


图 3　双面镀膜后的透射理论曲线

Fig. 3　Transmittance theory curve of thin film on double sides

3　薄膜制备

3.1　膜厚监控

薄膜厚度的准确监控直接影响着薄膜的透、反射光谱特性和偏振特性。当前膜厚监控手段主要以晶控及间接光控为主。晶控的监控精度与电子线路的稳定性、所用晶体的温度系数、石英晶体传感探头的特定结构以及相对于热蒸汽的合理定位等因素有着密切联系,导致其控制精度可能在 2% ~3%,但对于精密膜系,尤其是带通滤光膜,具有很大的局限性。间接光控技术由于测试片放置的位置不同,并不能完全地反映出载片位置的透过率,对于更加精密膜系来说,需要通过多次的调整后,才能满足要求。而直接光控技术将通过对转盘上的光控片进行实时监控,可以快速、准确地满足高难度、高精度的设计要求。

本文中薄膜的制备工作是使用 Leybold C 1110 型电子束蒸发镀膜机内完成的,其有效的晶控厚度为 10 μm,使用 OMS 5000 直接光控,使用电子束蒸发镀膜,APS 离子源辅助沉积,可使薄膜成膜致密,折射率稳定,附着力强。本实验使用光学直接监控为主,晶控监控为辅的监控方法,在光控无法满足的某些特殊膜层,通过在同一次实验中光控对修正因子的修正,使晶控也能够精确控制生长厚度。

3.2 制备工艺

制备过程中,不同离子源能量下,TiO_2折射率变化较大,镀膜前期需要对 TiO_2 进行预熔,防止在生长的过程中放气。用电脑自动控制电子束能量,在生长速率,温度,及充氧量恒定的前提下,实现对 TiO_2 折射率的稳定控制。TiO_2 速率设定为 0.3 ~ 0.4 nm/s,镀膜机可显示精度为0.01 nm/s,经过多次试验,其生长过程中速率可以稳定在 0.34 ~ 0.36 nm/s。SiO_2具有较高的稳定性,生长速率设定为 0.5 ~ 0.7 nm/s,其生长过程中速率可以稳定在 0.56 ~ 0.64 nm/s,生长速率波动较大受到镀膜材料不可预熔以及材料的颗粒大小和放置位置等的影响。经过多次的实验,其比较理想且较为稳定的工艺参数如表 1 所示。

表 1 生长条件参数

Tab. 1 Parameters of growth conditions

	Bias/V	Ar_2/(cm^3 · min^{-1})	O_2/(cm^3 · min^{-1})	p/Pa	Rate/(nm · s^{-1})
H	120	8	10	4.2×10^{-2}	0.35
L	120	13	0	3.5×10^{-2}	0.6

实验过程中,选用基底为 2 mm 厚的双面抛光一级 K9 玻璃(n = 1.52),在镀膜前使用乙醇溶液对基底两面进行清洁,用热蒸气法进行检查。清洗好之后将样片放入腔室内。当真空度达到 2×10^{-3} Pa 时,腔室开始加热,温度稳定在180 ℃时,选择光控和晶控共同控制的方式,在膜层拐点不明显的情况,即非规整膜层,用晶控控制,在规整膜层的情况下用直接光控极值法进行控制。选用光控的监控波长为1 555 nm,当光控的信噪比 <0.02%时,即可进行镀膜。

在前期通过 APS 源释放等离子体对基底进行表面清洗和活化,生长过程中的光学监控曲线如图 4 所示。

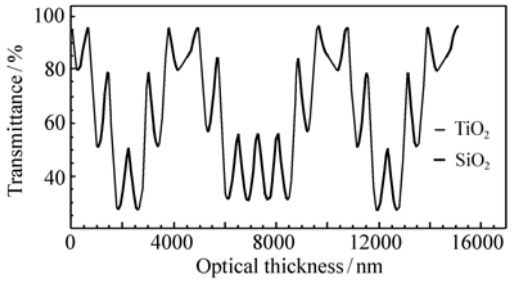


图 4 直接光控变化曲线

Fig. 4 Direct monitoring curve

图中不同材料的光控曲线用不同颜色表示,横坐标表示的是光学厚度,纵坐标表示的是光控接收端测得的透过率,随着薄膜厚度的增加,透过率会发生周期性的变化,厚度为 $\lambda/4$ 的膜层,可使用光控极值法进行精确生长。在前 3 层和最后一层以及中间两腔的连接层,采用光控极值法并不能做出十分精确的判断,需要使用晶控控制,在光控极值法生长过程中记录有生长的 $\lambda/4$ 的晶控值,可对晶控的修正因子进行修订,保证在一次试验中,更加接近设计理论值。OMS5000 直接光控具有自动误差补偿功能,使用的是 Herrmann 的线性误差补偿[16],实践表明其光控精度可达到 ±0.05%。

4 测试结果

4.1 薄膜的光谱特性测试

采用 Perkinelmer 公司的 Lambda 1050 分光光度计测得其透射光谱如图 5 所示。

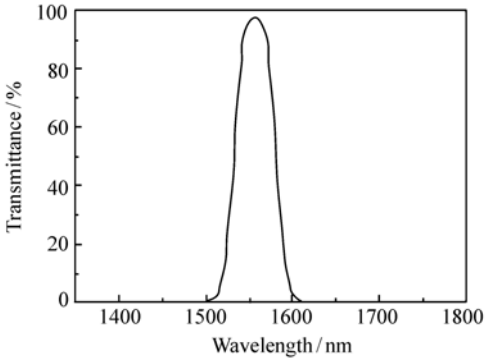


图 5 透过率实验曲线

Fig. 5 Experiment curve of transmitance

由图 5 可知,1 555 nm 中心波长处的透过率达到 97%,半高宽为 50 nm,对于截止区域的透过率为 0。其中心透过率实际值较理论值有所下降,分析其主要原因是在生长的过程中有膜层厚度的累计误差,虽然每层膜能够尽量小减小误差,但对于滤光片,累计的误差对于中心波长厚度有很大的影响。还有薄膜的折射率在整个生长过程中与设计值存在一定偏差,也会导致透过率下降,再者就是测量的过程中测量误差和薄膜的吸收和散射。要达到理论值和实际值完全一致,还需要在工艺和测试方法上进行深入的研究。

4.2　薄膜的高低温测试

温度特性对带通滤光膜的影响非常敏感,在膜层聚集密度 <1 的情况下膜层就会呈现柱状结构,吸潮后就会使膜层的折射率发生变化,最终导致膜系的中心波长发生漂移。为保证温度在 -30 ~ 100 ℃能够正常使用,将样片放入100 ℃去离子水中 3 h,在 -30 ℃环境下放置24 h,薄膜未发生脱落,开裂现象,其在测试前后的透过率曲线如图 6 所示,在温度 130 ℃,波长发生了 0.2 nm 的漂移。

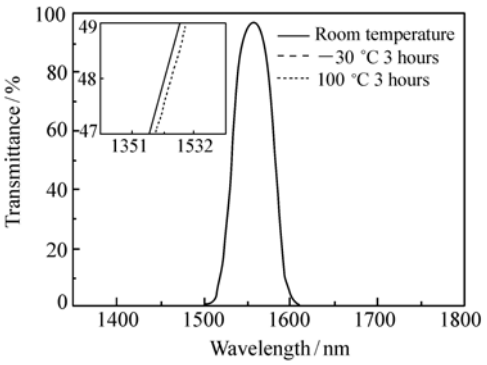


图 6　高低温测试后样品透过率曲线

Fig. 6　Transmittance curve of sample after high and low temperature

高温沸水实验得出波长并未发生明显漂移。说明通过离子辅助沉积手段制备的膜层更加致密,应力小,水分渗入对其没有影响。可以得出离子辅助沉积是制备高稳定,高品质薄膜的有效方法。

4.3　薄膜的附着力测试

附着力的测试有压痕法、张拉法、剥离法等方法,这里采用较为方便的剥离法进行测试,在测试的过程中,使用了 3M No. 610 型号测试胶带粘在薄膜表面,然后垂直剥离胶带,反复进行 50 次,薄膜未发生脱落现象。

5　结　论

设计了半宽为 50nm 的带通滤光膜并使用 Optilayer 软件通过针形优化和双面镀膜的方法增加其中心波长的透过率,其理论透过率为 99.5%。使用直接光控和晶控相结合的监控方法在电子束蒸发离子辅助沉积技术下,制备出了在 1 555 nm处透过率达到 97% 的滤光膜,其半宽为 50 nm。样品经过 100 ℃水煮环境以及 -30 ℃的高低温测试,波长未发生明显漂移,能够承受恶劣工作环境的考验,满足使用要求。但透过率较理论值有一定差距,通过优化镀膜工艺参数来提高透过率将成为今后改进的方向。

参考文献:

[1] GHOSH R,GHOSH K K,CHAKRABORTY R. Narrow band filter using 1D periodic structure with defects for DWDM systems[J]. *Opt. Commun.*,2013,289:75-80.

[2] 张静,付秀华,潘永刚. 卫星激光通信滤光膜的研制[J]. 光子学报,2012,41(3):303-306.
ZHANG J,FU X H,PAN Y G. Design and fabrication of satellite laser communication filter coating[J]. *Acta Photonica Sinica*,2012,41(3):303-306. (in Chinese)

[3] 岳威,洪冬梅,刘国喜,等. 用于激光测距的 1572 nm 窄带滤光膜[J]. 强激光与粒子束,2010,22(8):1819-1822.
YUE W,HONG D M,LIU G X*et al*.. 1572 nm narrow-band filter in laser telemeter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2010,22(8):1819-1822. (in Chinese)

[4] ZHANG M,YE P,ZHANG F*et al*.. NOLM-based wavelength conversion with FBG band-pass filter for optical packet switching[J]. *Chin. Opt. Lett.*,2003,1(1):3-5.

[5] 贺才美,付秀华,孙钰林,等. 多波段激光滤光膜的研制[J]. 中国激光,2009,36(6):1550-1554.

HE C M, FU X H, SUN Y L, *et al*.. Study and fabrication of multi-band laser filter film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(6): 1550-1554. (in Chinese)

[6] 耿似玉, 付秀华, 谭志, 等. 双通感红外日夜两用型滤光膜的研制[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 903-906.
GENG S Y, FU X H, TAN Z, *et al*.. Design and manufacture of day-and night double sensitive infrared filter film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 903-906. (in Chinese)

[7] 沈羿, 刘冬梅, 付秀华, 等. 紫外光通信滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207005.
SHEN Y, LIU D M, FU X H, *et al*.. Research and preparation of the ultraviolet communication filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(12): 1207005. (in Chinese)

[8] 付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, *et al*.. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)

[9] PARVIZI R, ALI N M, HARUN S W, *et al*.. Multi-wavelength Brillouin fiber laser using dual-cavity configuration[J]. *Laser Phys.*, 2011, 21(1): 205-209.

[10] YOSHIDA E, SHIMIZU N, NAKAZAWA M. A 40-GHz 0.9-ps regeneratively mode-locked fiber laser with a tuning range of 1530-1560 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(12): 1587-1589.

[11] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, *et al*.. The Lunar Laser Communications Demonstration (LLCD)[C]//Third IEEE International Conference on Space Miuion Challenges for Information Technology (SMC-IT), July 19-23, 2009 Pasadena, USA, 2009.

[12] HARRO H, RAINER G, WERNER K, *et al*.. Direct optical monitoring in deposition plants[J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(4): 88-94.

[13] 张泉, 苏哲湘, 陈耿晖, 等. 高质量非规整多层膜自动制备的研究[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(3): 335-339.
ZHANG Q, SU Z X, CHEN G H, *et al*.. High performance irregular multi-layer coating machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 335-339.

[14] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 146-154.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al*.. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 146-154.

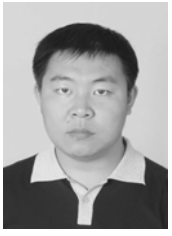
[15] TIKHONRAVOV A V, TRUBETSKOV M K, DEBELL G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(28): 5493-5508.

[16] HERRMANN R, ZOLLER A. Automated control of optical layer fabrication processes[J]. *SPIE*, 1983, 401: 83-92.

作者简介:

张金胜(1986—),男,河南新乡人,博士研究生,2009年于中国矿业大学获得学士学位,主要从事镀膜及半导体光电子器件方面的研究。E-mail: zhangjs.ciomp@gmail.com

宁永强(1965—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,博士生导师,1987年于吉林大学获得学士学位,1990年于北京有色金属研究总院获得硕士学位,1999年于中国科学院长春物理研究所获博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



张金龙(1975—),男,吉林舒兰人,工程师,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理所获得硕士学位,主要从事无铝量子阱边发射大功率半导体激光器研究及散热、封装、镀膜工艺开发。E-mail: PLed3588@sina.com.cn

王立军(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1973年于吉林大学获得硕士学位,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn