

光纤公共电视天线传输系统中短波通截止滤光片

吴博琦 董连和 孙艳军 冷雁冰 王 丽 张恒煦

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 短波通截止滤光片(SWPF)能够对公共电视天线(CATV)传输系统中的不同信号进行抑制和区分,是光纤CATV传输系统中的重要组成器件。为了降低传输噪声,改善信号传输质量,针对传输系统中截止滤光片的参数要求,选择适合的薄膜材料。通过建立膜系结构的等效层模型,对其求导模拟测试结果,并对膜料光控tooling值及对特定敏感度较高膜层的膜厚进行调整,解决了实际镀膜过程中的膜层失配问题,制备了采用较少膜层的短波通截止滤光片,在1110~1360 nm波段反射率小于1%,在1490 nm±20 nm波段透射率小于0.08%,在1550 nm±20 nm波段透射率小于0.05%。该滤光片可以满足CATV传输系统环境使用要求。

关键词 薄膜;短波通截止滤光片;膜系结构;公共电视天线系统;工艺改善

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0207001

Shortwave Pass Cutoff Filter of Optical Fiber Community Antenna Television Transmission Systems

Wu Boqi Dong Lianhe Sun Yanjun Leng Yanbing Wang Li Zhang Hengxu

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The shortwave-pass cutoff filter (SWPF) can be used into the community antenna television (CATV) to restrain and distinguish diverse signals. It is the important component in the CATV transmission systems. The film is studied in order to reduce the transmission noise and improve the quality of signals. On account of the demands for parameters of the cutoff filter during the transmission systems, the suitable material of the thin film is determined. The testing results are gained from the equivalent model of the film. The light-operated tooling values of the coating materials and the thickness of the specifically higher sensitive film are adjusted. Conclusively, the mismatching of the film is removed during the coating process. The SWPF with less layers is fabricated. The reflectance is less than 1% from 1100 nm to 1360 nm, while the transmittance is less than 0.08% at 1490 nm ±20 nm and the transmittance is less than 0.05% at 1550 nm±20 nm. It is found that the film can meet the requirements of CATV transmission systems.

Key words thin films; shortwave pass cutoff filter; film structure; community antenna television systems; process improvement

OCIS codes 310.1210; 310.1515; 310.6860

1 引 言

公共电视天线系统(CATV)已经成为人们日常生活学习中不可缺少的一部分,随着网络技术的发展,用

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)、高等学校博士学科点专项科研基金(20112216120005)、吉林省科技发展计划(20121816, 201201116)

作者简介: 吴博琦(1988—),女,博士研究生,主要从事光学微纳结构设计与加工方面的研究。

E-mail: xiancaitang@sina.com

导师简介: 董连和(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: custdong@163.com(通信联系人)

用户对CATV传输质量也有了越来越高的要求^[1-3]。光纤CATV传输系统中同时针对多个频道的信号进行传输,为了有效区分不同频道的通信信号,提高系统信噪比,改善光纤CATV信号的传输质量,短波通截止滤光片(SWPF)^[4-7]起到了关键作用。

通带波纹的压缩一直是SWPF研制的重难点,已有较多文献对其进行了研究^[8-12]。胡海洋等^[13]采用等效折射率匹配的方法制备了大尺寸宽带偏振薄膜。本文针对光纤CATV传输系统的使用要求,借鉴等效匹配的方法,并根据实际镀膜情况,对膜系结构进行理论分析,通过等效模型判断膜料失配问题,并根据带角度入射测试结果,对敏感度较高的膜层进行调整,减小了通带波纹,提高了通带的平均透射率。

2 膜系设计

针对光纤CATV传输系统对SWPF的要求,具体的膜系技术指标如下:入射角(AOI)为 $0^\circ \pm 5^\circ$,在波长1100~1360 nm处反射率 $R < 1.0\%$,1490 nm ± 20 nm处透射率 $T < 0.08\%$,1550 nm ± 20 nm处透射率 $T < 0.05\%$ 。

考虑到光学系统实际存在的安装误差,在实际的膜系设计中需要将入射角度作为膜系设计的考虑内容之一,因此在膜系设计过程中需要同时考虑 0° 入射和 5° 入射时的指标要求。

针对1100~1360 nm、1490 nm ± 20 nm及1550 nm ± 20 nm波段的指标要求,选择 Ta_2O_5 与 SiO_2 作为膜系设计的高、低折射率材料,Sub|(0.5 L H 0.5 L)^m HiGlass作为膜系设计的初始膜系,其中 m 代表膜堆叠加的次数,Sub为基底,Glass表示入射介质为BK7材料,H和L分别代表 Ta_2O_5 和 SiO_2 的1/4中心波长的光学厚度,借助Macleod膜系设计软件针对光纤CATV传输系统的参数要求设定优化目标,并且为了保证膜系设计能够成功地完成制备,限定膜层最小厚度为30 nm。结合Optimac优化方法进行优化设计,整理后得到的膜系为Sub|1.5755 H 0.7974 L 1.2869 H 1.2939 L……1.2539 L 0.7656 H 0.7893 L 1.6014 HiGlass,其理论光谱曲线如图1所示。

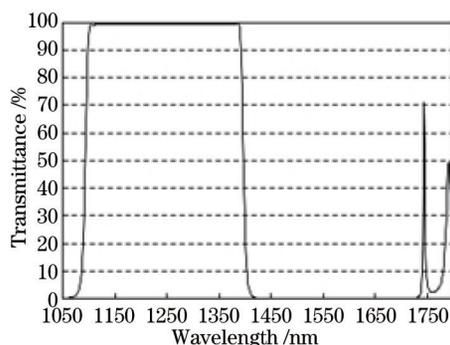


图1 短波通截止滤光片的理论设计光谱曲线

Fig.1 Theoretical spectral curve of SWPF

从如图1可知,理论设计中1100~1360 nm波段平均反射率为0.71%,1490 nm ± 20 nm平均反射率为0.0002%,1550 nm ± 20 nm平均反射率为0.0001%,满足使用要求。

3 薄膜制备

实验采用日本光驰OTFC-1300真空镀膜机镀制。该设备配有双电子枪和射频(RF)离子辅助蒸发系统,后者能对成膜前基片进行预清洗,在镀膜过程中给予沉积粒子较大的动能,增加膜层的附着力,改善膜层性能。

镀膜过程采用反射式Lightratiopeak的监控方式监控,这种监控方式能够通过光控光量值进行计算,从而实现对任意膜层厚度的监控,并且会根据实际监控的光量值判停,与光学极值法相比具有较高的监控精度。

实验中采用无水乙醇对BK7基片进行清洗,衬底温度为150 $^\circ$ C,本底真空为 1.5×10^{-3} Pa。根据膜料的特性,以及镀膜的稳定性,经过多次实验,选定 Ta_2O_5 与 SiO_2 的沉积速率分别为3.8 A/s与7.5 A/s。根据膜料的光控tooling值,镀膜过程中选用1550 nm作为监控波长。

4 测试结果分析

采用Lambda90可见近红外分光光度计对实验陪镀片进行测试,测试光谱曲线如图2所示。

由图2可知,在膜系透射带边缘产生了较大的波谷,不满足使用要求。选择 Macleod 软件对实际测试曲线进行模拟,模拟后发现 Ta₂O₅与 SiO₂的膜厚比例失配导致测试曲线不满足要求,其中实验中制备的 SWPF 透射光谱曲线模拟结果如图3所示。

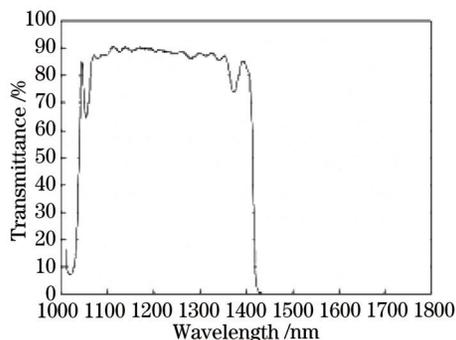


图2 短波通截止滤光片的测试光谱曲线

Fig.2 Measured transmittance curve of the shortwave pass cutoff fiber

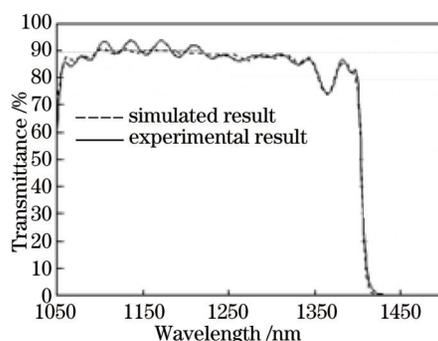


图3 短波通截止滤光片测试曲线模拟图

Fig.3 Simulated transmittance curve of the shortwave pass cutoff fiber

对模拟结果分析后发现,根据实验结果能够得到多组与测试曲线结果相近的 Ta₂O₅和 SiO₂的匹配组合,为了更好地获得准确的模拟结果,对膜系及测试结果进行分析。SWPF的膜系设计和制备的重难点主要是在实际制备过程中,实际膜层厚度与理论膜层厚度具有一定差值,导致膜厚失配,在通带区域产生了较深的波谷。根据等效层计算公式可知,膜系结构可以等效成 P/Q/P 膜系结构,其中 P 和 Q 表示等效后的高低折射率,则通带等效折射率可以表示为

$$E = \eta_p \frac{\left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right]^{1/2}}{\left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right]}, \quad (1)$$

式中 η_p 为等效高折射率, η_q 为等效低折射率, δ_p 与 δ_q 分别表示等效高低折射率的光学厚度,那么通带波谷的反射率可以表示为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - \frac{E^2}{\eta_g}}{\eta_0 + \frac{E^2}{\eta_g}} \right)^2, \quad (2)$$

式中 η_0 为入射介质折射率, η_g 为基底折射率。对(2)式求导可得

$$\frac{dR}{dE} = - \frac{\frac{8\eta_0}{\eta_g} E \left(\eta_0 - \frac{1}{\eta_g} E^2 \right)}{\left(\eta_0 + \frac{1}{\eta_g} E^2 \right)^3}, \quad (3)$$

当 $\eta_0 = 1$, $\eta_s = 1.52$ 时, (3)式可以简化为

$$\frac{dR}{dE} = -\frac{48.64E^3 - 147.866E}{E^8 + 6.08E^6 + 13.862E^4 + 14.047E^2 + 5.338} \quad (4)$$

由(4)式可知,当 $E > 1.2329$ 时, $dR/dE > 0$ 。由于波谷处等效折射率 $E > 1.52$, 则 $dR/dE > 0$, 因此当高折射率材料比例偏大时候, E 增大导致反射率增大, 透射率变小; 当低折射率材料比例偏大时, E 减小导致反射率减小, 透射率增加。根据这一情况, 判断实际镀膜的失配情况, 从而对测试曲线进行分析。测试过程中通过改变入射角进行测量透射曲线, 并判断改变角度测量后的波谷变化情况, 测试结果如图 4 所示。在 20° 入射时, 长波透射带的波谷变小, 根据测试前分析的结果, 判断为 SiO_2 膜厚比例偏高, 导致测试曲线出现较深的波谷。根据 20° 入射的测试结果, 选择其中 SiO_2 膜层偏厚的模拟结果, 对光控 tooling 值进行重新调整, 再次进行测试, 测试结果如图 5 所示。

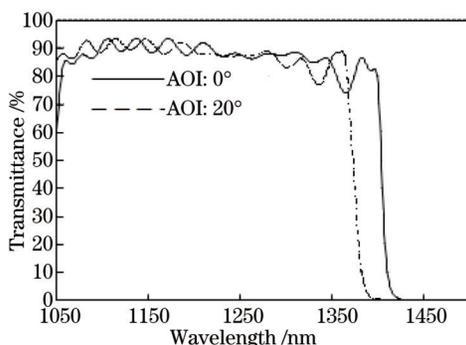


图 4 测试片 0° 入射与 20° 入射条件下测试光谱曲线

Fig.4 Measured transmittance curves of the film with the incident angle of 0° and 20°

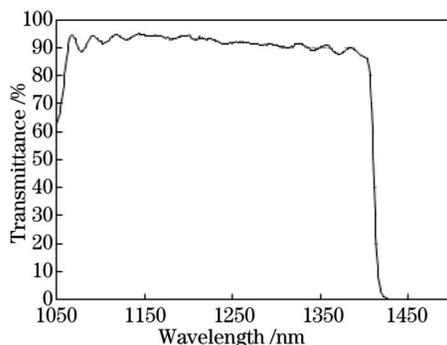


图 5 调整每层膜厚度的测试曲线模拟图

Fig.5 Simulated result of transmittance curve after the thickness of each layer is adjusted

由图 5 可知, 在对光控 tooling 值进行重新调整后, 透射带长波区域的波谷有了明显减小, 但是透射带的平均透射率仍然不满足指标要求。通过单独对每层膜厚进行调整后, 判断每层膜厚的轻微误差导致测试曲线透射率不满足使用要求。考虑到模拟结果可能存在的不确定性, 为了解决这一情况, 选择其中敏感度较

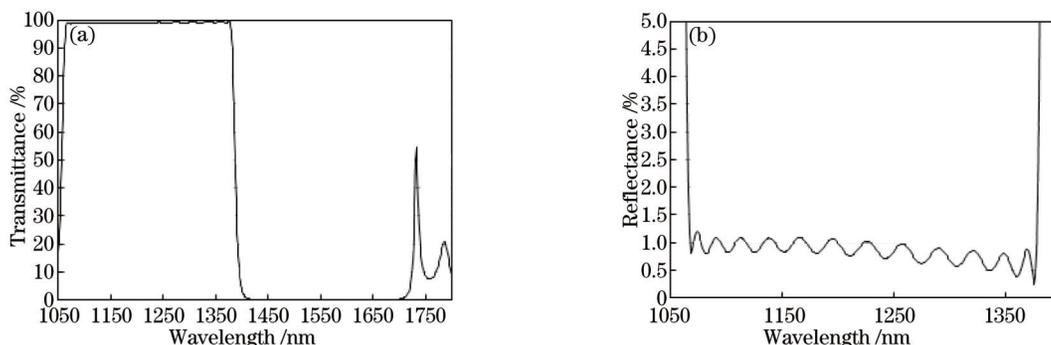


图 6 特定膜层厚度调整后 0° 入射条件下 (a) 透射和 (b) 反射测试曲线

Fig.6 Measured (a) transmittance and (b) reflectance curves after process optimization with the incident angle of 0°

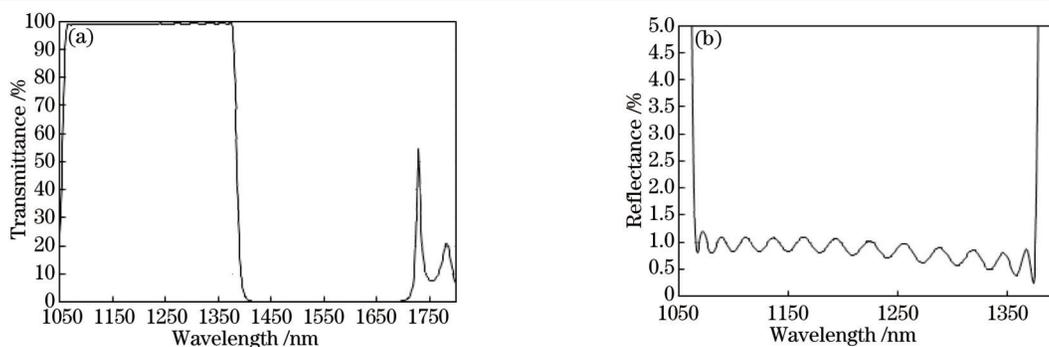


图7 特定膜层厚度调整后的5°入射透射测试曲线

Fig.7 Measured (a) transmittance and (b) reflectance curves after process optimization with the incident angle of 5°

大的膜层进行调整,用膜层调整弥补其他膜层在制备中产生的误差,根据实际模拟情况,选择第9、10、11、12层膜层进行调整,其他层不改变膜层厚度,选择背面已镀1100~1360 nm波段抗反射增透膜(AR)的测试片再次进行实验,在0°入射和5°入射条件下,测试结果如图6、图7所示。

由图6和图7可知,对9~12层膜层厚度进行修正后,0°入射时1100~1360 nm波段区域内反射率平均值 $R=0.967%$,1490 nm±20 nm波段区域内 $T=0.0016%$,1550 nm±20 nm波段区域内 $T=0.0012%$ 。5°入射时1100~1360 nm波段区域内反射率平均值 $R=0.964%$,1490 nm±20 nm波段区域内 $T=0.0016%$,1550 nm±20 nm波段区域内 $T=0.0012%$ 。测试结果均满足光纤CATV传输系统的使用要求。

4 环境测试

1) 机械牢固度测试:采用3M胶带对膜层表面紧密粘贴并沿薄膜垂直方向迅速拉起,重复几次,薄膜未有脱膜现象;

2) 水煮测试:将测试片放在离子水中进行加热沸腾2 h后,使用手术刀片进行刮擦测试,观察未有脱膜现象;

3) 高温测试:将短波通截止滤光片放置于300 °C的高温中进行烘烤2 h后,逐步进行阶梯退火,观察膜层表面未出现明显的皱褶现象;

4) 湿度测试:将基片放置在湿度为95%的环境下,12 h后,膜层表面未有明显的变化。

5 结论

采用电子束加热真空蒸镀研制SWPF。针对SWPF的膜系特点建立数学模型并进行分析,根据模拟结果对膜料的光控tooling值进行修正,并选择敏感度较大的特定膜层调整膜层厚度,有效地减小了通带波纹,提高了通带透射率和镀膜成功率。

参考文献

- 1 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205001.
张 银,陈明阳,张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205001.
- 2 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Li Bifeng, et al.. Affect analysis of atmospheric turbulence on fading characteristics in free-space optical system over different environments[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0513001.
吴晓军,王红星,李笔锋,等. 不同传输环境下大气湍流对无线光通信衰落特性影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0513001.
- 3 Ren Lixia, Zhang Shuangyou, Qian Cheng, et al.. Radio-frequency transfer over a long-distance fiber link based on analog phase shift compensation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405005.
任丽霞,章双佑,钱 程,等. 基于模拟移相补偿的长距离光纤频率传输[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405005.
- 4 C Y Li, H H Lu, C L Ying, et al.. A full-duplex CATV/wireless-over-fiber lightwave transmission system[J]. Opt Express, 2015, 23(7): 9221-9232.

- 5 A Kaur, K S Bhatia, S Singh, *et al.*. Different types of modulation analysis used for CATV transmission system[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(20): 5952-5955.
- 6 K Yu, X Zhou, J Wang, *et al.*. A non-polarization short-wave-pass thin film edge filter[J]. *Optoelectron Lett*, 2014, 10(4): 247-249.
- 7 Fu Xiuhua, Kou Leilei, Zhang Jing, *et al.*. Fabrication of optical filter film for visible and near-infrared laser communication system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1207001.
付秀华, 寇雷雷, 张 静, 等. 可见与近红外激光通信系统光学滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1207001.
- 8 Zhao Xingmei, Shi Jiantao, Guo Hongxiang. Film system design for short-wavelength pass filter[J]. *J Appl Opt*, 2006, 27(5): 415-418.
赵兴梅, 师建涛, 郭鸿香. 短波通滤光片膜系设计[J]. *应用光学*, 2006, 27(5): 415-418.
- 9 Zhang Baisen, Chen Tao, Xiong Yuqing, *et al.*. Design and preparation of medium-wave infrared short-wavelength pass filter[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2010, 16(3): 148-152.
张佰森, 陈 焘, 熊玉卿, 等. 中波红外短波通滤光片的设计与镀制技术研究[J]. *真空与低温*, 2010, 16(3): 148-152.
- 10 Huang Wei, Zhang Yundong. Method for eliminating the half-wave hole of short-wave passed filter[J]. *Opt Instrum*, 1999, 21(4-5): 145-148.
黄 伟, 张云洞. 消除短波通截止滤光片半波孔的方法[J]. *光学仪器*, 1999, 21(4-5): 145-148.
- 11 X Ma, Y Wang, J Shao, *et al.*. Elimination of the half-wave hole for short-wave pass filter[C]. *Fifth International Conference on Thin Film Physics and Applications International Society for Optics and Photonics*, 2004, 5774: 377-380.
- 12 Sun Ke. Deposition of short-wave pass filter film on molding optical glass aspherical lens[J]. *Vacuum*, 2012: 44-49.
孙 可. 模造光学玻璃非球面镜片短波通滤光膜的镀制[J]. *真空*, 2012: 44-49.
- 13 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Tang Zhaosheng. Preparation and testing of large size wideband film polarizer[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(2): 117-122.
胡海洋, 范正修, 汤兆胜. 大尺寸宽带偏振薄膜的制备与测试[J]. *中国激光*, 2000, 27(2): 117-122.

栏目编辑: 王晓琰