

doi:10.3788/gzxb20134211.1289

# 鱼雷光纤制导系统低损耗滤光片的研制

唐昊龙,付秀华,刘国军,杨永亮,寇洋

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

**摘要:**为满足鱼雷光纤制导系统的通信需要,实现鱼雷发射过程中与舰艇的信息交互,研制了一种低损耗通信滤光片.采用双离子束溅射技术作为镀膜方法,通过对几种靶材进行对比研究,依据低损耗滤光片的使用要求,选定新型合金靶材和 SiO<sub>2</sub> 靶材作为高低折射率溅射材料.以膜系设计理论为基础,通过膜堆的叠加来展宽短波截止带,依据等效折射率的概念优化匹配层厚度,使得滤光片的通带插入损耗降低了 0.12 dB.在薄膜制备中,采用光电极值法和平均时间法相结合的方式监控膜层厚度,依据实验数据进行反馈分析,对非规则膜层厚度按比例整体修正,提高了膜厚控制准确度.制备的滤光片经膜层性能测试,满足鱼雷光纤制导系统的使用要求.

**关键词:**薄膜;滤光片;溅射;光谱分析;光学特性;薄膜厚度;光通信

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)11-1289-6

## Study and Fabrication of Low Loss Filter Film in Torpedo Fiber Optic Guidance System

TANG Hao-long, FU Xiu-hua, LIU Guo-jun, YANG Yong-liang, KOU Yang

(School of OptoElectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To meet the torpedo fiber optic guidance system communication needs and achieve the information exchange between torpedo and ship, a kind of low-loss communication filter was designed and manufactured. The films were prepared by the depositing method of dual ion beam sputtering, through the comparative study of several targets. Based on the requirements of the low-loss filter, a new type of alloy target and SiO<sub>2</sub> target were chosen as sputtering materials. In order to broaden the shortwave cutoff region of the filter, the long-wave pass film was added behind the initial film, and the thicknesses of the matching layers were optimized, based on the concept of equivalent refractive index. The insertion loss of the pass-band of the filter was reduced by 0.12 dB. In the preparation of the film, the optical extreme value method and average time method were used to monitor layers' thickness. By using the method of correct the thickness of irregular layers in proportion, the layers' thickness control accuracy was improved. The proposed filter basically meets the demand of torpedo fiber optic guidance system through performance test.

**Key words:** Thin films; Filters; Sputtering; Spectrum analysis; Optical properties; Film thickness; Optical communication

## 0 引言

光纤传输技术的发展为鱼雷的远程导引提供了广阔的应用前景.采用光纤制导技术<sup>[1]</sup>后,鱼雷发射

过程中可与舰艇进行实时信息交互,扩大鱼雷作战区域的同时,还保证了鱼雷具有极高的命中率和超强的反对抗能力.因此光纤制导技术已成为世界各国竞相发展的鱼雷专项技术,如美国、德国、瑞典等

基金项目:国家重点实验室基金(No. 513020502)资助

第一作者:唐昊龙(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为光学薄膜. Email: thl19880514@163.com

导师(通讯作者):付秀华(1963-),女,教授,博士,主要研究方向为薄膜技术. Email: goptics@126.com

收稿日期:2013-07-15;录用日期:2013-08-26

国家正在研制的最先进重型鱼雷上均采用了光纤制导技术。

鱼雷光纤制导系统<sup>[2]</sup>采用了稀疏波分复用技术作为通信模式,其主要依靠薄膜滤光片实现光信号的复用和解复用.近年来,随着鱼雷射程的增加和反鱼雷武器干扰能力的增强,以往研究中得到的稀疏波分复用滤光片在性能方面的不足限制了鱼雷制导技术的发展<sup>[3]</sup>.为保证鱼雷作战信息高效传输的同时可抗干扰且保密性强,鱼雷光纤制导系统对通信滤光片提出了更高的技术要求。

本研究针对鱼雷光纤制导系统对低损耗滤光片的使用要求,选用了新型混合材料和 SiO<sub>2</sub> 作为高低折射率材料,通过组系数优化法提高了膜厚控制准确度,并对薄膜材料特性、薄膜设计和制备工艺进行了深入的研究。

## 1 技术要求

鱼雷光纤制导系统采用了抗微弯性能优异的 G.657B 光纤,该光纤以 1 550 nm 为中心波长的一段光谱具有低的损耗和色散,依据稀疏波分复用器件 ITU-TG694.2 技术指标<sup>[4]</sup>,结合鱼雷作战信息传送过程中低损耗、高信噪比和抗干扰性强等特点,低损耗滤光片的具体设计参量见表 1。

表 1 滤光片使用要求

Table 1 Design specification of the coating

Parameters	Specifications
Center wavelength/nm	1 551±0.2
Pass band region/nm	1 543~1 559
Stop band region/nm	1 260~1 538.5 & 1 563.5~1 620
Bandwidth of $T=-0.5$ dB/nm	>16
Bandwidth of $T=-35$ dB/nm	<25
Insertion loss of pass band/dB	<0.15
Ripple of pass band/dB	<0.1

1 260~1 538.5 nm 和 1 563.5~1 620 nm 高截止是为了在鱼雷信息传送过程中避免其它光信号的干扰.1 551 nm 是鱼雷作战信息的传输波长.通带损耗小于 0.15 dB、波纹在 0.1 dB 范围内变化是保证鱼雷作战信息高效传输的必要条件.由设计参量看出,滤光片在材料选取、膜系设计以及薄膜制备方面都有很大的难度。

## 2 材料的选取

选取合适的基板和薄膜材料可在一定程度上降低薄膜设计与制备的难度.材料选择时,要综合考虑其折射率、透明区域、材料吸收、应力匹配以及成膜牢固性等因素,由于研究中采用双离子束溅射法制

备薄膜,因此还应考虑工艺条件等方面的限制。

### 2.1 基底材料选取

WMS-13 玻璃常作为制备膜层较多的滤光片的基底材料<sup>[5]</sup>.在 1 550 nm 处折射率为 1.519,热膨胀系数为  $110(10^{-7}/^{\circ}\text{C})$ ,镀制在 WMS-13 玻璃上的薄膜在温度变化时光学厚度的改变小于  $1 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 薄膜材料选取

在鱼雷光纤制导系统的工作波段,通信滤光片一般采用 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 的膜料组合<sup>[6]</sup>进行研制.双离子束溅射法制备的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜折射率为 2.065、2.205 和 1.461,设计低损耗滤光膜时,由于 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的折射率低于 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,因此 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 的组合需要更多的膜层数,这会导致薄膜制备过程中膜厚累积误差变大,增加了滤光片的制备难度;但从吸收方面来说,Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 稍高于 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜,而低损耗滤光片层数普遍多于 100 层,即使薄膜材料微不足道的吸收也会大大增加滤光片的插入损耗,这样 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 的组合也并非最佳。

由文献<sup>[7]</sup>可知,把 Nb/Ta 以一定比例混合制成合金靶材,该靶材溅射过程中与 O<sub>2</sub> 结合生成混合材料.以 BK7 玻璃为基底,采用双离子束溅射的镀膜方法,分别对合金靶,铌靶和钽靶溅射 30 min,利用岛津分光光度计 UV-3150 对镀制完成的 3 个基片透射光谱进行测试,测试曲线如图 1。

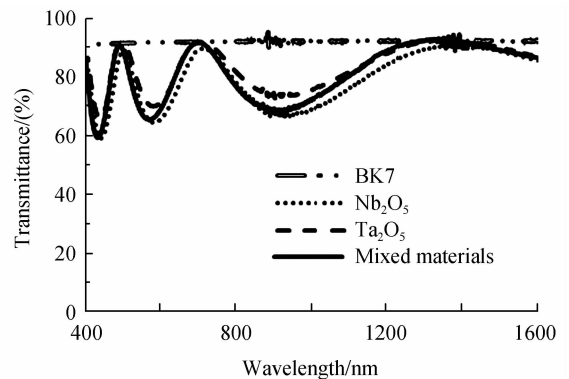


图 1 高折射率材料薄膜透射光谱测试曲线

Fig. 1 Spectral transmittance of the films prepared by different high refractive index materials

利用光度法对图 1 中测试数据反演计算<sup>[8-9]</sup>.反演时光学常量采用 Sellmeier 公式拟合,数学表达式为

$$n(\lambda) = \left( A_n + \frac{B_n \lambda^2}{\lambda^2 - C_n^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$k(\lambda) = \left[ n(\lambda) \left( B_1 \lambda + \frac{B_2}{\lambda} + \frac{B_3}{\lambda} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中  $A_n, B_n, C_n, B_1, B_2$  和  $B_3$  是拟合参量.计算得到的结果如表 2。

表 2 高折射率薄膜材料光学常量

Materials	Refractive index at 1 551 nm	Absorption coefficient at 1 551 nm
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.065	0.96 × 10 <sup>-4</sup>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.202	8.08 × 10 <sup>-4</sup>
Mixed materials	2.181	2.35 × 10 <sup>-4</sup>

从表 2 可看出,在低损耗滤光片的工作波段,混合材料薄膜的折射率介于 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 之间,且吸收系数约为 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的 1/4. 利用 TFCalc 软件进行模拟设计知,采用混合材料/SiO<sub>2</sub> 设计出的低损耗滤光片薄膜层数少于 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 30 余层,通带插入损耗明显低于 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 所设计的滤光片. 因此选用合金靶和 SiO<sub>2</sub> 靶可弥补上述材料的缺陷.

### 3 膜系设计

低损耗滤光片膜系设计时主要考虑 3 个问题: 1) 满足薄膜的光学性能; 2) 为确保膜系可在具体的设备上完成,需考虑该设备的监控准确度; 3) 避免某些材料单层薄膜偏厚造成镀膜现象.

针对鱼雷光纤制导系统的使用要求,以法布里珀罗型干涉滤光片的设计理论为基础,通过多腔串置的形式使通带矩形化<sup>[10]</sup>,采用主体参量寻优法,并利用遗传算法作为寻优手段<sup>[11]</sup>,得到初始膜系: Sub | (HL)<sup>-3</sup> 4H (LH)<sup>-3</sup> L (HL)<sup>-2</sup> H 3L HL 2H (LH)<sup>-4</sup> L (HL)<sup>-4</sup> 4H (LH)<sup>-2</sup> 3L H L H L (HL)<sup>-4</sup> 4H (LH)<sup>-2</sup> 3L HL H L (HL)<sup>-4</sup> 4H LH 3L (HL)<sup>-2</sup> H L (HL)<sup>-4</sup> 4H LH 3L (HL)<sup>-2</sup> H L (HL)<sup>-4</sup> 4H (LH)<sup>-2</sup> 3L HL H L (HL)<sup>-4</sup> 4H (LH)<sup>-2</sup> 3L H L H L (HL)<sup>-4</sup> 2H LH 3L (HL)<sup>-2</sup> H L (HL)<sup>-3</sup> 4H (LH)<sup>-3</sup> L | Air, 设计波长为 1 551 nm, 其中 Sub 为 WMS-13 基底, Air 为空气, H 和 L 分别代表 1/4 波长厚度的混合材料薄膜和 SiO<sub>2</sub>, 为避免滤光膜应力过大,初始膜系选择了混合材料作为间隔层<sup>[12]</sup>. 初始膜系导入至 TFCalc 膜系设计软件中,得到图 2 所示的光谱曲线.

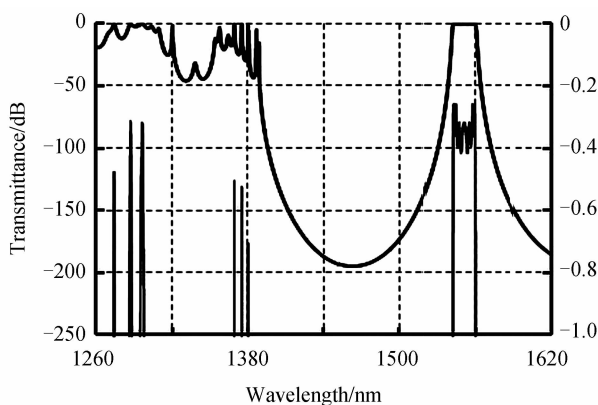


图 2 初始膜系理论设计曲线

Fig. 2 Theoretical design curve of initial coating

由图 2 可知设计的滤光片短波截止带宽和通带插入损耗不能满足设计要求. 因此需对初始膜系进行改进. 为减小短波截止带展宽后对通带透射率产生的影响,在初始膜系后迭加了多组长波通膜堆<sup>[13]</sup>,膜系再次导入 TFCalc 软件中,运行 analyze 程序,得到图 3 所示的设计曲线.

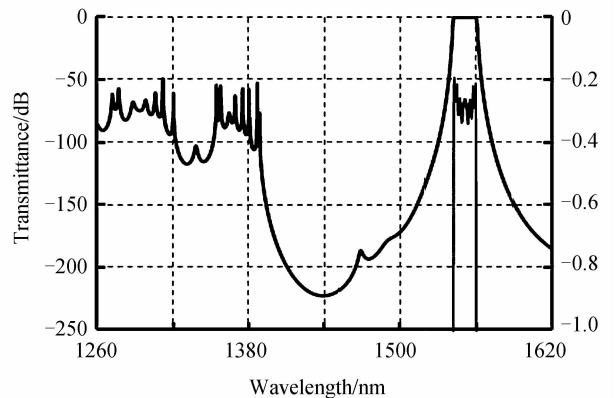


图 3 展宽短波反射带后设计曲线

Fig. 3 Theoretical design curve of filter that the shortwave cutoff region has been broadened

由图 3 可看出滤光膜截止波段已满足了设计要求,但通带透射光能量仍不满足使用要求,其原因是多层膜在通带的等效折射率与入射介质的折射率匹配性差,在中心波长处存在剩余反射率导致的. 针对这一原因,利用等效折射率的概念<sup>[14]</sup>在滤光片膜系后添加匹配层,使多层膜的等效折射率与入射介质达到匹配,应用 TFCalc 软件的 optimize design 模块进行优化,并通过 Macleod 软件对设计结果进行验证,确定膜系为: Sub | (HL)<sup>-3</sup> 4H (LH)<sup>-3</sup> L ... (HL)<sup>-3</sup> 4H (LH)<sup>-3</sup> 1.500 L 0.876 2H ... 0.489 9H 0.459 9L 0.924 3H 2.754 7L | Air, 理论设计曲线如图 4 所示. 考虑到基片背面反射会对通带透过率产生影响,在基片背面设计了一个增透膜,具体形式 Sub | 1.628 6H 1.708 6L 1.575 6H 1.052 6L | Air. 将两膜系分别导入至 TFCalc 软件的 layers front 和 layers back 中,得到图 5 所示的光谱曲线.

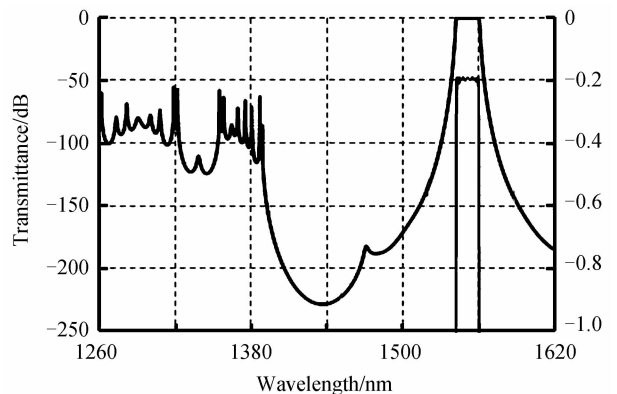


图 4 迭加匹配层后的膜系设计曲线

Fig. 4 Theoretical design curve of filter that matching layers has been added

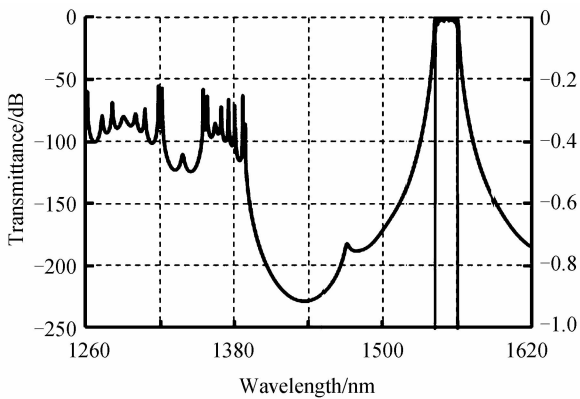


图5 双面镀膜时理论设计曲线

Fig. 5 Theoretical design curve of both faces coating

## 4 薄膜制备

滤光片是在美国 VEECO 公司生产的 SPECTOR 离子溅射镀膜机上制备的. 配有 IONTECH 生产的 16 cm 和 12 cm 射频离子源, 溅射系统工作稳定, 长时间运行时, 其工作气压、束流密度和加速电压等不稳定性都可控制在 0.5% 以内. 薄膜沉积过程中, 真空室内真空度浮动范围可控制在 2% 以内, 基板温度数值变化少于 0.5%.

低损耗滤光片的光谱特性是由多层膜和每层膜的物理厚度决定的, 也既由每层膜的折射率和物理厚度所决定. 保证制备工艺的稳定性 and 重复性, 精确地控制每层膜的折射率和物理厚度是极其重要的. 薄膜沉积时, 折射率的控制依赖于薄膜的制备工艺, 物理厚度的控制依赖于膜厚控制系统的准确度. 为此, 每次制备滤光片时, 应严格遵照优化后的制备工艺参量, 并保证挡板、镀膜基片以及溅射靶材等位置不变, 这样才能获得薄膜折射率与沉积速率的良好一致性. 滤光片制备前, 将通过多次实验得到的薄膜材料折射率和沉积速率的数据导入膜厚实时监控软件的控制系统中, 使得光控拟合更精确. 为减少薄膜沉积时的膜厚监控误差, 利用 TFCalc 软件的 compute monitor curve 功能, 得到滤光片膜系在监控波长为 1551 nm 处的光电极值法监控曲线, 以此对膜厚监控策略的选取问题进行深入研究.

图 6 为滤光膜前两腔的极值法光学监控曲线, 其后各腔与之类似. 从图 6 中可看出滤光膜各腔内的周期膜系监控信号变化较明显, 可采用光控极值法直接监控膜层厚度; 连接膜系腔与腔之间的耦合层, 如第 14 层和第 32 层的监控信号变化非常小, 对于光学监控来说容易引起较大误差, 因此对第 14 层采取平均时间监控法监控. 考虑到 14 层的实时工艺状态与第 10 层和第 12 层比较接近, 为减少膜厚误差, 第 14 层的沉积时间采用第 10 层和第 12 层沉积

时间的平均值. 实验结果表明, 采取平均时间监控满足厚度准确度要求, 对于其后各腔之间的耦合层也采取同样措施监控; 膜系后迭加的优化层为非周期膜系, 无法采用光控极值法进行监控, 需直接采用时间监控法监控膜层厚度.

低损耗滤光片的制备工作分为两步, 首先按照优化后的制备工艺在实验片上镀制增透膜, 调整为最佳结果后, 放入正式件进行镀制; 利用同样的制备工艺在基片另一面镀制最终设计的滤光膜. 通过多次实验验证, 滤光片的制备工艺具有较高稳定性和重复性, 可应用于低损耗滤光片的批量生产.

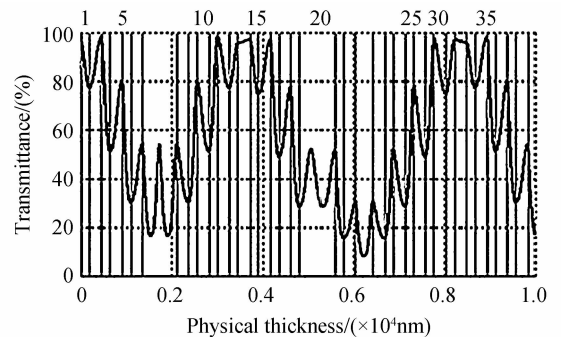


图6 极值法监控曲线

Fig. 6 The monitoring curve of extremum method

## 5 测试结果与分析

### 5.1 光谱特性的测试与分析

测试装置由 Agilent 光波测量系统和外光路、测试平台组成. 测试过程中, 首先不放待测基片进行预测, 为正式件的测试提供基准; 预测完毕后, 放入待测基片进行测试, 并通过计算机中的测试软件模块对两次测试数据自动计算, 测试结果如图 7.

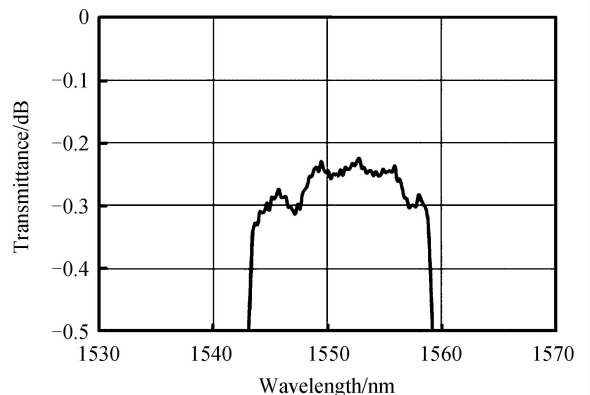


图7 监控位置测试曲线

Fig. 7 Measured transmittance curve of monitoring points

从图 7 中光谱测试曲线可看出: 滤光片通带最大插入损耗为 0.33 dB, 与滤光片的设计结果相差较大, 无法满足鱼雷光纤制导系统的使用要求.

制备的滤光片通带不平整的因素很多, 有膜料的色散、膜层折射率非均匀性以及膜层厚度控制误

差积累等.本实验中,膜层的折射率和沉积速率是对单层膜计算标定的,色散在膜系设计时已经考虑到了,它在制备过程中变化很小可以忽略不计.计算得到的沉积速率只是个平均值,严格意义上它是随时间动态改变的.对于采用时间控制的非周期膜系,虽然沉积速率导致的单层膜厚误差很小,但是累积效应却是不可忽略的,这正是造成滤光膜通带插入损耗大、波纹不平整的原因.

准确找出每层膜的厚度误差难度很大,可行的办法是分别找出两种材料的厚度变化规律<sup>[15]</sup>.利用 TFCalc 软件反馈分析,将滤光片膜系优化层中的 H 层和 L 层分别设定为 group1 和 group2,以分光光度计测量得到的光谱数据作为目标进行优化,并利用 Macleod 软件对优化结果进行验证,得到 H 层和 L 层的组优化系数分别为 1.021 5 和 0.982 2.常规情况下,膜系中 H 层和 L 层的组系数均为 1,因此可认定实际制备的 H 层镀厚了 2.15%,L 层镀薄了 1.78%.按此比例进行计算,分别将膜系已优化部分中的所有 H 层光学厚度减少 2.15%,将 L 层的光学厚度增加 1.78%,制备滤光片前,把修正后的膜层厚度数据导入镀膜机的膜厚监控程序中,再次进行实验的测试结果如图 8.

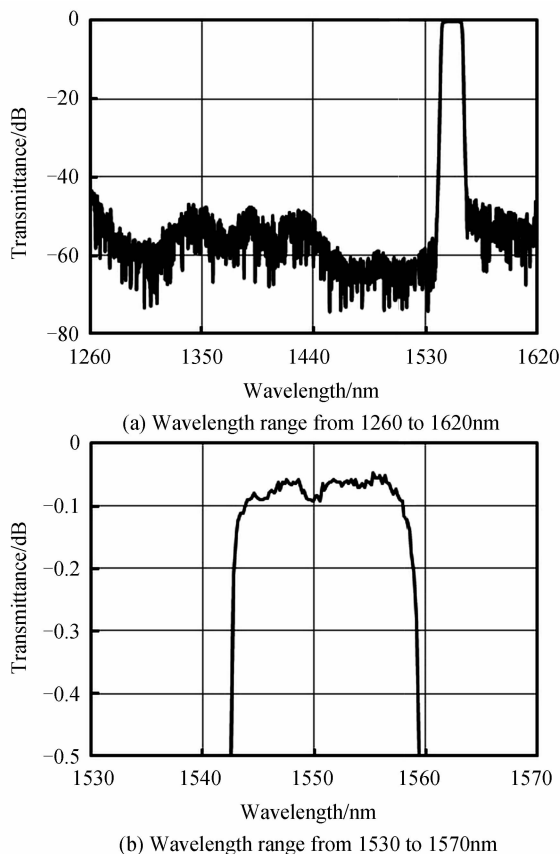


图 8 改进工艺后制备的滤光片测试曲线

Fig. 8 Measured curve of filter after improved process

由图 8 中测试曲线可看出,镀制后的基片通带

中心波长为 1 551.1 nm,在 -0.5 dB 处通带宽 17.1 nm,在 -35 dB 处带宽 24.2 nm,峰值最大插入损耗 0.09 dB,通带波纹在 0.04 dB 范围内变化,截至区截止度均低于 -40 dB,满足了低损耗滤光片的使用要求.

## 5.2 高低温测试

滤光片经过 200℃ 阶梯型高温退火后,观察到膜层表面无褶皱现象,膜层应力匹配合适.

## 5.3 附着性测试

用 2 cm 宽剥离强度不小于 2.94 N/cm<sup>2</sup> 的胶带纸粘牢在膜层表面,重复 20 次垂直迅速拉伸样品表面薄膜,膜层无脱落、无损伤.

## 6 结论

选择混合材料和 SiO<sub>2</sub> 作为薄膜材料,利用 Macleod 和 TFCalc 软件进行设计和分析,采用双离子束溅射的沉积技术,配合使用多种膜厚监控手段,通过对测试数据进行工艺反馈分析,修正了低损耗滤光片膜系中优化层的厚度整体偏差,解决了薄膜制备过程中出现的膜厚监控误差问题.研制出的滤光片具有较低的通带插入损耗,经实验验证满足了鱼雷制导系统的使用要求,但该滤光片与理论设计仍存在差距,如何改进薄膜制备工艺来缩小这一差距是今后研究的重点.

## 参考文献

- [1] CAO Zi-qiang. Technology of fiber-optical guidance and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 53-55. 曹自强. 光纤制导技术及其应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(S1): 53-55.
- [2] LIU Xue-chen, HU Peng, ZHAO Yan. An optical transmission technique for fiber wire-guided torpedo [J]. *Torpedo Technology*, 2013, **21**(1): 34-38. 刘雪辰,胡鹏,赵岩. 鱼雷光纤线导光传输技术研究[J]. *鱼雷技术*, 2013, **21**(1): 34-38.
- [3] WU Jing, SHANG Hai-ying, WEI ZHNG-shi. Development of fiber optic guidance technologies and devices[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2006, **39**(4): 7-11. 吴静,商海英,韦正世. 光纤制导技术及器件的发展[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2006, **39**(4): 7-11.
- [4] 胡先志,李永红,胡佳妮,等. 粗波分复用技术及其工程应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2005:113-117.
- [5] GU Pei-fu, CHEN Hai-xing, LU Wei, et al. Temperature stability of the central wavelength for WDM thin film bandpass filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 33-36. 顾培夫,陈海星,陆巍,等. 波分复用薄膜带通滤光片的中心波长温度稳定性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 33-36.
- [6] SZYMANOWSKI H, ZABEIDA O, KLEMBERG J, et al. Optical properties and microstructure of plasma deposited Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2005, **23**(2): 241-247.
- [7] KOMIYAMA S, TSUJI E, AOKI Y, et al. Growth and field crystallization of anodic films on Ta-Nb alloys[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2012, **16**(4): 1595-1604.

- [8] YUAN Wen-jia, ZHANG Yue-guang, SHEN Wei-dong, *et al.* Characteristics of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by ion beam sputtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(4): 688-693.  
袁文佳, 章岳光, 沈伟东, 等. 离子束溅射制备 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 光学薄膜的特性研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(4): 688-693.
- [9] DUAN Wei-bo, ZHUANG Qiu-hui, LI Da-qi, *et al.* Optical characteristics of silicon thin film in short-wave infrared band and 1.30 μm bandpass optical filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 285-288.  
段微波, 庄秋慧, 李大琪, 等. 硅薄膜的短波红外光学特性和 1.30 μm 带通滤光片[J]. 光学学报, 2012, **32**(10): 285-288.
- [10] JIA Yu-chao, LI Gang, BAI Yu-zhuo, *et al.* Study of factors influencing half bandwidth rectangularity and steepness in design of narrow band-pass filter[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(8): 448-452.  
贾钰超, 李刚, 白玉琢, 等. 窄带滤光片设计中通带半宽度、矩形度和陡度的影响因素研究[J]. 红外技术, 2012, **34**(8): 448-452.
- [11] YU Kan, LIAO Jian-feng, ZHANG Xiao-dan, *et al.* Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 181-185.  
俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 等. 基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 181-185.
- [12] GU Pei-fu, BAI Sheng-yuan, LI Hai-feng, *et al.* Design of DWDM thin-film interference filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794-797.  
顾培夫, 白胜元, 李海峰, 等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 794-797.
- [13] YANG Yong-liang, LIU Guo-jun, FU Xiu-hua, *et al.* Study and fabrication of filter film in laser identification between friend or foe system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 318-324.  
杨永亮, 刘国军, 付秀华, 等. 激光敌我识别系统中滤光膜的研制[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 318-324.
- [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, 123-131.
- [15] MU Xin, FU Xiu-hua, ZHAO Yan, *et al.* Design and manufacture interference filter applied in criminal investigation and test optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 259-262.  
牟鑫, 付秀华, 赵燕, 等. 刑侦检测光学系统中干涉滤光片的设计与制备[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 259-262.