

doi:10.3788/gzxb20154403.0331001

红外线治疗仪中宽波段带通滤光片的研究

刘冬梅,刘爽,付秀华,张静,何松霖

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

摘 要:研究了一种用于红外线治疗仪的新型滤光片.该滤光片通过对红外线治疗仪光源所发出的光进行选择性的滤波,能够降低部分波段光的承载能量,提高治疗仪的安全使用性能.针对红外线治疗仪对滤光片的使用要求,选择 Ti_3O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料,采用电子束加热蒸发方式,配合离子辅助沉积技术,利用石英晶控控制法对膜层厚度进行监控,通过反复优化各项工艺参量,制备出在 600~1 200 nm 波段平均透过率高于 92%,300~550 nm、1 270~2 000 nm 波段平均透过率低于 2% 的宽波段带通滤光片.研究中运用“拆分技术要求”的设计思想,对颜色片进行双面镀制,解决了单面膜层过厚难以制备的问题,降低了制备难度,易于批量生产.测试结果表明,该滤光片满足使用要求.

关键词:带通滤光片;膜系设计;拆分技术要求;红外线治疗仪;电子束蒸发;离子辅助沉积技术;石英晶控控制法

中图分类号:O484.4

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0331001-6

Study and Fabrication of Broad Band-pass Filters in Infrared Therapy Apparatus

LIU Dong-mei, LIU Shuang, FU Xiu-hua, ZHANG Jing, HE Song-lin

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

Abstract: Design and manufacture of a new type of filters which meet the infrared therapy apparatus needs. By selectively filtering for the light of the infrared light emitted by the therapy apparatus, reducing the portion of the band light carrier energy, improving the safety performance of the therapy apparatus. Based on the use requirements of the filters to infrared therapy apparatus, chose Ti_3O_5 and SiO_2 as high and low refractive index materials respectively. Thin films were prepared through electron beam evaporation method and ion-assisted deposition technique, and the thickness of the filter was controlled using crystal-controlled. By repeatedly optimizing technical parameters, the band-pass filter was prepared. The average transmittance of the filter is higher than 92% at the band of 600~1200nm, the average transmittance of the broad band-pass filter is less than 2% at the band of 300~550nm and 1270nm-2000nm. To solve the problem of the single sided film was too thick to prepared. Based on the concept of splitting technical requirements, the double-sided of the color filter were coated. The results show that the difficulty of preparation are reduced, and filters can be easily manufactured in a large scale, the filter meets the actual requirements.

Key words: Band-pass filter; Film system design; Splitting technical requirements; Infrared therapy apparatus; Electron beam evaporation; Ion beam assisted deposition; Crystal-controlled

OCIS Codes: 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310; 310.1210

基金项目:红外技术预研项目(No. 5131xxxx103)资助

第一作者:刘冬梅(1970—),女,教授,主要研究方向为现代光学薄膜技术及现代加工技术. Email: sjx8811@sohu.com

通讯作者:刘爽(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向为薄膜技术. Email: 15044166993@163.com

收稿日期:2014-07-31;录用日期:2014-10-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

宽光谱红外线治疗仪以其高效的治疗能力在医学领域发挥着重要的作用. 红外线可以穿透皮肤, 直接作用于肌肉、皮下组织等治疗部位, 通过杀死患病细胞达到治疗疾病的目的, 在医疗领域得到广泛的应用^[1]. 目前红外线治疗设备多使用红外线灯泡、红外线 LED 灯、红外线激光发生器等作为光源, 得到的光谱波长相对固定, 其中 300~550 nm、1 270~2 000 nm 波段的光具有较高的能量, 长时间照射易对皮肤造成伤害. 资料显示, 国内外对各种带通滤光片的研究已经取得了一定的成就, 但是对于截止带宽且截止率高的带通滤光片的研究并不多^[2-3].

本文针对红外线治疗仪中对宽光谱的特殊要求, 提出“拆分技术要求”的设计思想, 对颜色片进行双面镀制, 解决了单面膜层过厚难以制备的问题. 通过反复实验研制了宽波段带通滤光片, 使得具有较少能量且可以穿透皮肤的 600~1 200 nm 波段高透过, 300~550 nm、1 270~2 000 nm 波段高截止, 从而达到既可以对皮下组织进行治疗, 又不会因为长时间照射而损伤皮肤的目的, 提高了红外线治疗仪的安全使用性能.

1 膜料选择

根据红外线治疗仪的使用要求, 宽波段带通滤光片的具体技术要求如表 1.

表 1 宽波段带通滤光片的技术要求

Wavelength/nm	300~550	600~1 200	1 270~2 000
Transmission/%	<2	>92	<2

根据膜系设计原理, 选择高、低折射率材料进行设计, 由于 Ti_3O_5 在近红外区无吸收, 化学性能稳定, 耐酸碱腐蚀性强^[4], 且价格相对较低适合批量生产, 故选择 Ti_3O_5 为高折射率材料; SiO_2 具有良好的光学稳定性, 且与 Ti_3O_5 匹配良好, 因此选用 SiO_2 作为低折射率材料^[7], 常用的部分镀膜材料光学性能如表 2.

表 2 常用部分镀膜材料的光学性能

Materials	Transparent band/ μm	Refractive index/ μm
ZrO ₂	0.3~12	1.92(1 650 nm, 290℃)
H ₁	0.36~7	1.95(1 650 nm, 290℃)
Ta ₂ O ₅	0.35~10	2.05(1 650 nm, 290℃)
Ti ₃ O ₅	0.3~10	2.25(1 650 nm, 290℃)
SiO ₂	0.2~9	1.43(1 650 nm, 290℃)

2 方案设计

2.1 方案的初步设计

根据红外线治疗仪的使用要求, 利用膜系设计软

件 OptiLayer 及 TFCalc 进行设计. 以带通膜系 (Sub| (HL)ⁿ2H(LH)ⁿL(HL)ⁿ2H(LH)ⁿ| Air) 为基础膜系^[6], 其中 Sub 为基底, Air 为空气, H 和 L 分别代表 $\lambda/4$ 光学厚度的 Ti_3O_5 和 SiO_2 , 通过反复设计和优化该膜系仍无法满足红外线治疗仪中对滤光片的宽带通及宽截止的使用要求.

为解决此问题, 提出“拆分技术要求”的设计思想, 即将滤光片的整体技术要求进行细化拆分, 按拆分后的要求设计新的膜系, 并在 K9 基底上进行双面镀制, 通过双面叠加的方式满足设计要求. 初步拆分结果为: 基底 A 面实现 600~1 200 nm 高透射、1 270~2 000 nm 高截止, 基底 B 面实现 300~550 nm 高截止和 600~1 200 nm 高透射^[5].

2.1.1 A 面膜系设计

以 Sub|(0.5LH0.5L)^P|Air 为基础膜系, P 表示膜系中(0.5LH0.5L)的重复次数, 根据膜系设计理论, 高截止膜堆的截止带宽可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 / (1 - \Delta g) - \lambda_0 / (1 + \Delta g) \approx 2\Delta g\lambda_0 \quad (1)$$

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (2)$$

式中 n_H 和 n_L 分别代表高、低折射率材料的折射率. 经计算, 当 $n_H = 2.3$ 、 $n_L = 1.45$, 中心波长 $\lambda_0 = 1 650$ nm, 时, 截止带宽 $\Delta\lambda \approx 480$ nm, 不满足 1 200~2 000 nm 波段宽截止的技术要求. 因此采用在基础膜系上叠加膜堆的方法来展宽截止带宽^[8-10], 其膜系结构为: Sub|(0.5LH0.5L)^{-S}a1(0.5LH0.5L)^{-P1}a2(0.5LH0.5L)^{-P2}, 采用 Needle Optimization 和 Gradual Evolution 两种优化方式相结合的方法进行优化, 优化后的膜系为: Sub|0.1H0.3L0.2H0.2L0.3H0.1L...H0.3L0.1H1.4LH0.1L...0.1H0.7L0.3H0.1L0.6H0.5L|Air 理论设计曲线如图 1 所示, 膜系共 126 层, 物理厚度约为 16 667 nm.

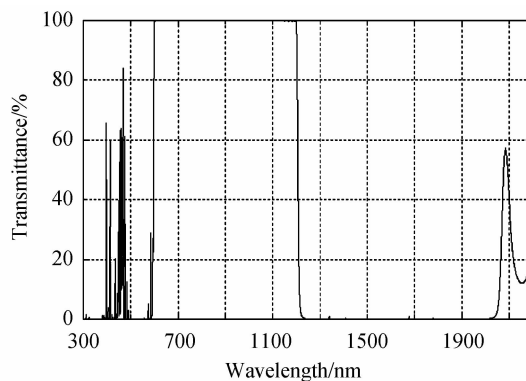


图 1 基底 A 面理论设计曲线

Fig. 1 Theoretical design curve of surface A on the substrate

2.1.2 B 面膜系设计

以 Sub|(0.5HL0.5H)^P|Air 为基础膜系, 膜系为: Sub|0.7(0.5HL0.5H)⁻¹³(0.5HL0.5H)⁻¹³|Air,

优化后的膜系设计曲线如图 2,该膜层共 47 层,物理厚度约为 2 774 nm.

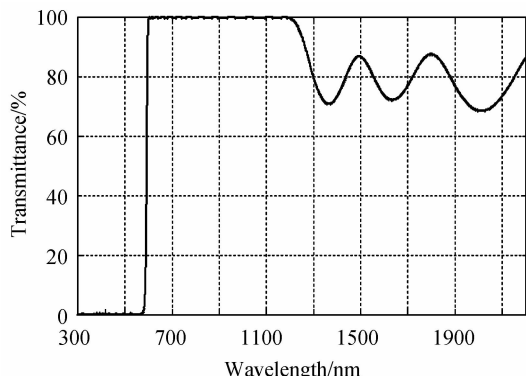


图 2 基底 B 面理论设计曲线

Fig. 2 Theoretical design curve of surface B on the substrate

2.1.3 AB 面叠加

AB 面叠加后的理论设计曲线如图 3 所示,在 300~550 nm、1 270~2 000 nm 波段平均透过率 $T < 1\%$,600~1 200 nm 波段平均透过率 $T \geq 95\%$.

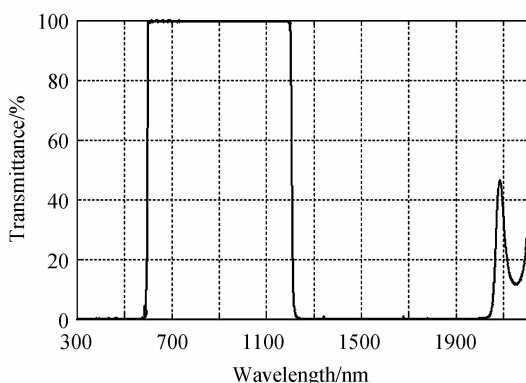


图 3 基底 AB 面叠加后理论设计曲线

Fig. 3 Theoretical design curve of surface B on the substrate

该谱线具有通带矩形度好、透过率高、截止度高等优点.但 A 面膜层数过多,膜层过厚;B 面膜系薄层及敏感层较多,故 A、B 面在实际制备过程中均存在制备难度较大,难以控制等缺点.

2.2 方案改进

考虑到膜层镀制的可操作性、可控制性和可重复性,进一步拆分技术要求,并采用截止型玻璃 CB535 颜色片作为基底,通过在颜色片 A、B 两面分别镀制膜层^[11],进一步降低滤光片的设计及制备难度.该方法能够有效减少 A 面膜层厚度,缩短制备时间,降低制备难度,提高成品率.CB535 颜色片在 200~550 nm 波段平均透过率 $T < 1\%$,600~2 500 nm 平均透过率为 90%,其光谱测试曲线如图 4.

在设计过程中,为满足滤光片对 1 200~2 000 nm 波段范围高截止的技术要求,需由 A、B 两个膜系叠加实现,为防止叠加波段截止带出现较大次峰,在设计膜

系时需适当展宽截止带的设计宽带^[12].

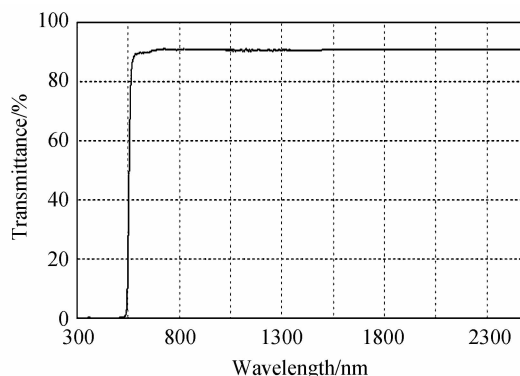


图 4 CB535 颜色片光谱测试曲线

Fig. 4 The test spectrum curve of the CB535 color filter

A 面以 $\text{Sub}|2(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{-p}|\text{Air}$ 为基础膜系,通过 TFCalc 软件进行膜系设计,设置优化目标为 580~1 200 nm 透射率大于 99.5%,1 200~1 600 nm 透射率小于 1%,利用随机优化的方式对靠近入射介质和基底的膜层进行优化,使其光学导纳相匹配,膜系为 $\text{Sub}|0.3\text{L}0.8\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.2\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.6\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.8\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.3\text{L}0.2\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.1\text{L}0.2\text{H}0.9\text{L}0.8\text{H}0.8\text{L}0.9\text{H}0.2\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.6\text{H}0.1\text{L}0.2\text{H}0.5\text{L}0.8\text{H}0.6\text{L}0.5\text{H}0.4\text{L}|\text{Air}$,中心设计波长为 1 380 nm,共 45 层,物理厚度约为 6.57 μm ,其理论设计曲线如图 5.

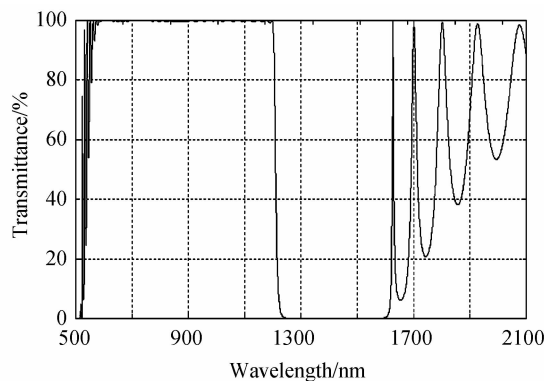


图 5 颜色片 A 面理论设计曲线

Fig. 5 Theoretical design curve of surface A on the color filter

B 面以 $\text{Sub}|2(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{-p}|\text{Air}$ 为基础膜系,膜系设计软件 OptiLayer 中 Needle Optimization 的优化方式进行优化,设置优化参量为 580 nm~1 200 nm 透过,1 600 nm~2 000 nm 截止,通过优化得到膜系结构为: $\text{Sub}|0.1\text{H}0.1\text{L}0.8\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.8\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.8\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.7\text{H}0.1\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.6\text{H}0.1\text{L}0.2\text{H}0.9\text{L}0.8\text{H}0.8\text{L}0.9\text{H}0.2\text{L}0.1\text{H}0.7\text{L}0.1\text{H}0.1\text{L}0.6$

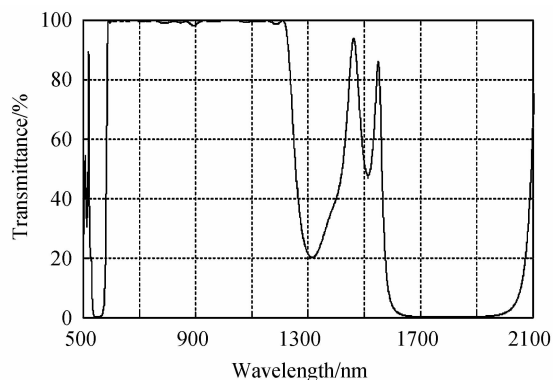


图 6 颜色片 B 面理论设计曲线

Fig. 6 Theoretical design curve of surface B on the color filter

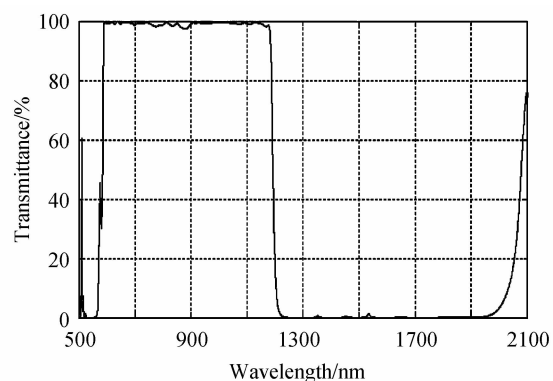


图 7 颜色片双面叠加的理论设计曲线

Fig. 7 Theoretical design curve of the double-sided coatings on the color filter

H0. 1L0. 2H0. 9L0. 8H0. 8L0. 8H0. 4L | Air, 中心设计波长为 1 800 nm, 共 46 层, 物理厚度约为 4.9 μm , 其理论设计曲线如图 6. 通过 AB 面叠加得到的双面理论设计曲线如图 7. 在 300~550 nm、1 270~2 000 nm 波段平均透过率 $T < 2\%$, 600~1 200 nm 波段平均透过率 $T \geq 95\%$. 其各项光谱特性均满足设计要求.

3 滤光片制备

滤光片采用 OPCO-900 型真空镀膜机进行制备, 设备配有双 e 型电子枪、环形坩埚和八孔位坩埚、考夫曼离子源、SQC-310 型晶控仪等.

选择合理的离子源参量对基片表面进行离子源清洗预处理, 离子源清洗可以有效地去除表面吸附的杂质, 活化基片表面, 提高膜层与基底表面之间的结合力^[13].

在薄膜制备过程中, 利用石英晶控控制法来控制非周期膜系^[14]. 由于双面的膜系均为非周期膜系, 膜层层数较多、厚度较大, 而采用石英晶控控制法进行监控时, 在每层均将产生一定的误差, 从而形成一个较大的累积误差, 此误差将会对光谱特性产生严重影响. 故在制备过程中需要对充氧量、蒸发速率、基底温度及离子源参量等进行反复优化及实验分析. 优化后的各项主要参量如表 3、表 4.

表 3 离子源的参量

Table 3 The ion source parameters

Plate voltage/V	Acceleration voltage/V	Anode voltage/V	Neutralizing current/A	Cathodic current/A	Ionbeam current/mA
415	275	55	13.5	27	50

表 4 工艺参量

Table 4 Technical parameters

	Substrate temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Flow rate of O_2/sccm	Vacuum degree/Pa	Deposition rate/nm/s	Power /%
Ti_3O_5	290	23	1.5×10^{-2}	0.3	25
SiO_2	290	40	1.5×10^{-2}	0.7	10

4 测试结果与误差分析

4.1 光谱测试与分析

采用日本岛津 UV-3150 型分光光度计对所制备的滤光片进行测试, A 面光谱测试曲线如图 8 所示, 在通带 750 nm 处出现透过率 T 为 75% 的半波孔, 并且曲线整体向长波移动 70 nm.

通过 TFCalc 软件对测试光谱曲线进行分析模拟, 发现导致误差的主要原因为: 1) 石英晶体控制的厚度和实际厚度之间存在差异; 2) 残余蒸镀的累积误差造成的影响. 针对上述造成误差的原因, 通过以下方式对误差进行修正:

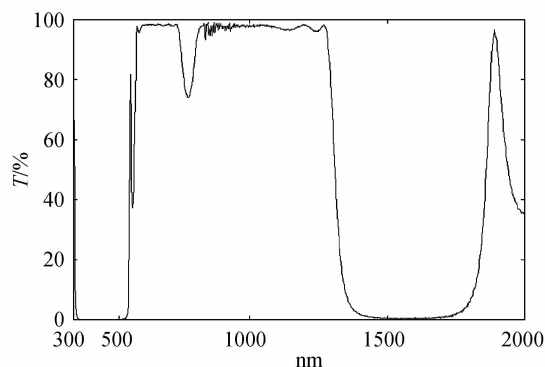


图 8 A 面测试光谱曲线

Fig. 8 The test spectrum curve of surface A

1) 晶控与实际误差之间的差异

石英晶体控制法是直接对膜层的物理厚度进行检测,而晶振片和基片之间存在位置差异^[15],并且晶振片和基片表面性质不同,故而造成监控厚度与实际厚度之间存在差异.实验过程中通过工具修改因子(Tooling Factor)能够在一定程度上对非周期膜层的厚度差异进行修正.在TFCalc软件中的Interactive Analysis功能模块中,将 Ti_3O_5 和 SiO_2 膜层分别设置为两个Group,根据实际测试曲线对Group Factor进行调整,工具因子的计算公式为

$$\text{New Tooling Factor} = \text{Group Factor} \times \text{Original Tooling Factor}.$$

通过模拟分析, Ti_3O_5 和 SiO_2 的Group Factor分别为0.98和1.02时,将此值与晶控仪中原有的Tooling Factor相乘得到新的Tooling Factor.

2) 残余蒸镀量的控制

在薄膜蒸镀过程中,每层膜均是以关闭挡板来结束蒸镀过程,但在关闭挡板之后仍会存在“延迟误差”即残余蒸镀值,从而使薄膜的物理厚度发生微小改变.残余蒸镀值的确定是基于反复实验的基础上,通过对每一次实验每一层的残余蒸镀值求取平均值来获得.残余蒸镀值的大小与膜料类型、膜层数及厚度有关,且不具有严格的重复性^[16-18].但每层膜的平均残余蒸镀值趋于相对稳定.各层残余蒸镀值如图9.

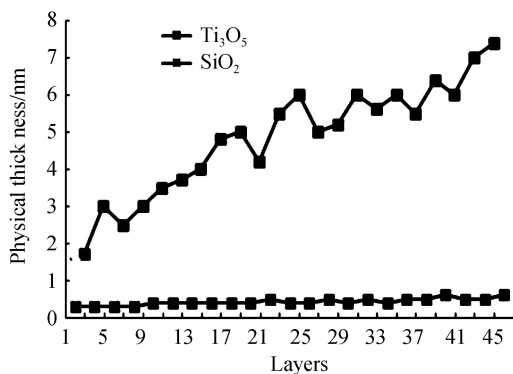


图9 各层残余蒸镀值

Fig. 9 Layers of the residual evaporation amount

需要强调的是每层残余蒸镀值虽然很小(零点几个纳米到几个纳米不等),但几十层的累计误差将对薄膜的光学性能产生较大的影响,故而在薄膜制备过程中,需在膜层预设的物理厚度中考虑此残余蒸镀量的影响,以提高控制准确度.

利用调整后的工艺对颜色片的前后表面分别进行镀制,其实际测试光谱曲线如图10~12.

从图中可以看出,此滤光片在300~550 nm、1 270~2 000 nm波段平均透过率 $T < 2\%$,600~1 200 nm波段平均透过率 $T > 92\%$,满足使用要求.

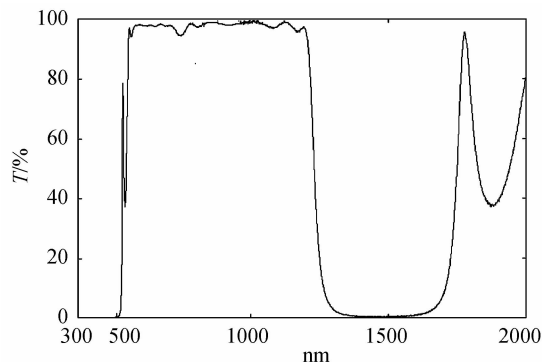


图10 经过调整工艺后镀制颜色片的A面测试光谱曲线
Fig. 10 The test spectrum curve of surface A on the color filter after adjustment process

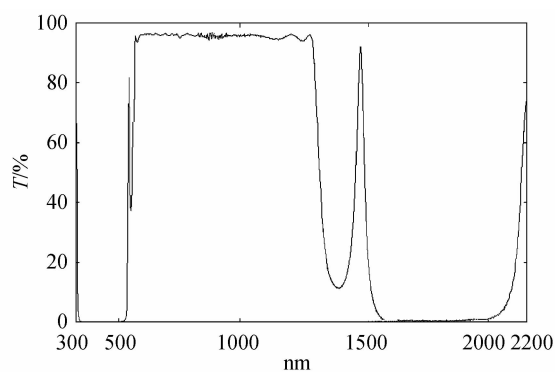


图11 经过调整工艺后镀制颜色片的B面测试光谱曲线
Fig. 11 The test spectrum curve of surface B on the color filter after adjustment process

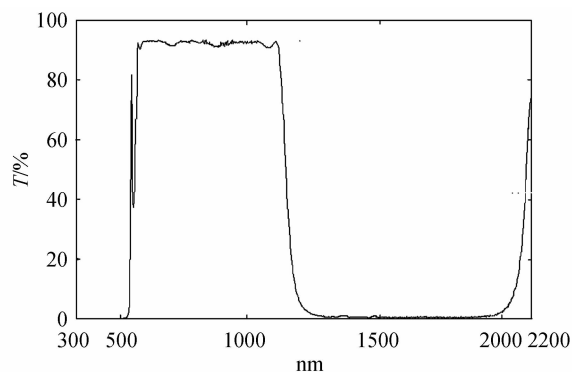


图12 经过调整工艺后镀制的宽波段带通滤光片测试光谱曲线

Fig. 12 The test spectrum curve of broad band-pass filter after adjustment process

4.2 环境测试

按国标的要求测试内容为

1) 附着力测试:参照美国国标,用宽2 cm胶带紧紧粘在滤光片表面,用垂直于滤光片表面的拉力快速的将胶带从滤光片迅速拉起5次,无脱膜现象.

2) 高低温测试:将滤光片放入低温箱,由室温降到 -50°C ,保持2 h;将滤光片放入高温烘烤箱,由室温升到 70°C ,保持2 h,膜层未有明显变化.

3) 机械强度测试:用手持式擦拭具,在橡皮摩擦头外裹两层干燥脱脂纱布保持 4.9N(500 g)压力顺着同一轨迹对膜层进行摩擦,膜层表面无损伤。

上述测试完成后再次测试样品的透射率光谱,光谱曲线基本没有变化。

5 结论

本文针对红外线治疗仪中滤光片的具体要求,在设计过程中提出了“拆分技术要求”的设计思想,通过在颜色片上实现双面镀制膜系的方法,解决了滤光片设计难、制备难、批量生产难等问题。在研制过程中,通过对各项工艺参数的反复优化、对晶控监控误差及残余蒸镀误差的有效改善,解决了制备过程中半波孔及曲线漂移等问题的影响,最终制备出了在 600~1 200 nm 波段平均透过率 $T > 92\%$, 300~550 nm, 1 270~2 000 nm 波段平均透过率 $T < 2\%$ 的宽波段带通滤光片。虽然本文所制备的滤光片满足了红外线治疗仪的使用要求,但由于颜色片本身存在一定程度的吸收、残余蒸镀值不具有重复性等因素的存在,导致设计结果和制备结果仍存在一定的差异,如何进一步提高控制准确度仍是需要解决的难题。

参考文献

- [1] ZHOU Min, NING Ning, HUANG Jian-qiong, *et al.* Comparison of local effect of different type of ultra-red treatment equipments to burned patients[J]. *West China Medical Journal*, 2005, **20**(2): 367-368.
周敏, 宁宁, 黄建琼, 等. 不同型号红外线治疗仪对烧伤病人局部升温效果的比较[J]. *华西医学*, 2005, **20**(2): 367-368.
- [2] ZHANG Bai-seng, CHEN Tao, XIONG Yu-qing, *et al.* Design and preparation of medium-wave infrared short-wavelength pass-filter[J]. *Vacuum Cryogenics*, 2010, **16**(3): 148~152.
张佰森, 陈焱, 熊玉卿, 等. 中波红外短波通滤光片的设计与镀膜技术研究[J]. *真空与低温*, 2010, **16**(3): 148~152.
- [3] YE Zi-yu, WANG Duo-shu, ZHANG Bai-seng, *et al.* Development of infrared pass-band filters with wide rejection band [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, **29**: 39~41.
叶自煜, 王多书, 张佰森, 等. 宽截止长波红外带通滤光片的研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, **29**: 39~41.
- [4] GONG Da-wei, FU Xiu-hua, GENG Si-yu, *et al.* Design and manufacture of infrared double waveband laser filter films[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(3): 293~298.
宫大为, 付秀华, 耿似玉, 等. 红外双波段激光滤光膜的研制[J]. *中国光学*, 2011, **4**(3): 293~298.
- [5] 钟迪生. 真空镀膜—光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001, 235~241, 252~265.
- [6] CHEN Chao-ping, SHI Jian-tao, GUO Rui, *et al.* Design and preparation of mid-infrared band-pass filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(3): 595~598.
陈建平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备. *应用光学*, 2012, **33**(3): 595~598.
- [7] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006, 118~123.
- [8] FU Xiu-hua, WANG Gang, LIU Dong-mei, *et al.* Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 10107001-10107006.
付秀华, 王刚, 刘冬梅, 等. 可见与红外制导系统高通滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 10107001-10107006.
- [9] ZHANG C H, WANG Y T, LU W Q. Single-wavelength monitoring method for optical thin-film coating[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(6): 1439-1444.
- [10] FU Xiu-hua, KOU Lei-lei, ZHANG Jing, *et al.* Fabrication of optical filter film for visible and near-infrared laser communication system[J]. *Chinese Journal of 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研制[J]. *中国激光*, 2012, **39**(12): 1207001.
- [11] LI Shan, FU Xiu-hua, SU Jia-ni, *et al.* Fabrication of filter film using in lida ranging system[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2010, **39**(5): 853~856.
- [12] 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, 贾岩, 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.
- [13] FU Xiu-hua, WANG Gang, LIU Dong-mei, *et al.* Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 0107001.
王刚, 付秀华, 刘冬梅, 等. 可见红外制导系统高通滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 0107001.
- [14] ZHAN Mei-qiong, ZHANG Dong-ping, YANG Jian, *et al.* Thickness monitoring by quartz crystal oscillation for optical coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585-588.
占美琼, 张东平, 杨健, 等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 585-588.
- [15] SHEN Yi, LIU Dong-mei, FU Xiu-hua, *et al.* Research and preparation of the ultraviolet communication filters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(12): 1207005.
沈弈, 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.
- [16] FU Xiu-hua, SUN Ying-jie, LIU Dong-mei, *et al.* Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0331002.
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反膜的研制[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 0331002.
- [17] LIU Dong-mei, WANG Xiao-juan, FU Xiu-hua, *et al.* Design and fabrication of near-infrared narrow-band filters with wide rejection band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0131002.
刘冬梅, 王晓娟, 付秀华, 等. 近红外宽截止窄带滤光膜的研制[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0131002.
- [18] FU Xiu-hua, HE Song-lin, JIA Xing-ming, *et al.* Study and fabrication of the dual band-pass in Grain screening system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1216001.
付秀华, 何松霖, 贾星明, 等. 粮食筛选系统中双通道带通滤光膜的研制[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1216001.