

文章编号: 1672-8785(2023)09-0001-07

用于红外焦平面探测器的2.95~5.05 μm 带通滤光膜

岳 威^{1,2} 王栩榕³ 韩 隆^{1,2} 韩永昶²
张 阔² 刘连泽² 李熙韬²

(1. 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015;
2. 华北光电技术研究所, 北京 100015;
3. 中国石油大学, 山东 青岛 266580)

摘 要: 中波红外焦平面探测器因在红外制导导弹、红外夜视仪等军事领域的重要性而被广泛关注, 其中带通滤光膜具有滤除杂散光和保护探测器的作用。本研究的目的是针对中波红外焦平面探测器滤光膜的关键技术问题, 通过分析、选材、优化等方法, 制备出性能良好的中波红外带通滤光膜。以 Ge 为高折射率材料和基底, 以 SiO₂ 为低折射率材料, 设计了带通膜系结构。不仅实现了在 0° 入射角下对 2.95~5.05 μm 波段大于 92% 的高透过率、通带宽度优于 3.7~4.8 μm 的常规应用, 而且对 2.95~5.05 μm 之外的其它波段也能达到良好的截止效果。经测试, 其光洁度、牢固性等各方面性能良好, 可以很好地应用于中波红外焦平面探测器。

关键词: 中波红外; 带通滤光膜; 透过率; 薄膜制备; 锗

中图分类号: O484 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.09.001

2.95–5.05 μm Bandpass Filter Film for Infrared Focal Plane Detectors

YUE Wei^{1,2}, WANG Xu-rong³, HAN Long^{1,2}, HAN Yong-chang²,
ZHANG Kuo², LIU Lian-ze², LI Xi-tao²

(1. National Key Laboratory of Solid-State Laser, Beijing 100015, China;
2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;
3. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Mid-wave infrared focal plane detectors have been widely concerned because of their importance in military fields such as infrared guided missiles and infrared night vision devices, where the bandpass filter film has the function of filtering stray light and protecting detectors. The purpose of this study is to prepare high-

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 固体激光技术国家重点实验室基金项目

作者简介: 岳威(1980-), 男, 甘肃兰州人, 研究员, 主要研究方向为光学薄膜技术。

E-mail: ywei2003@sina.com

performance bandpass filter film for mid-wave infrared focal plane detectors through analysis, material selection and optimization, aiming at the key technical problems of mid-infrared focal plane detector filter film. With Ge as the high refractive index material and substrate and SiO as the low refractive index material, the band-pass film system structure is designed, which not only realizes the high transmittance of 2.95–5.05 μm band greater than 92% and the passband width is better than 3.7–4.8 μm at 0° incidence angle. Moreover, it can achieve good cutoff effect for other bands except 2.95–5.05 μm . The test results show that it has good properties such as smoothness, solidity and so on. Therefore, the filter film can be well applied to mid-wave infrared focal plane detectors.

Key words: mid-wave infrared; band-pass filter; transmittance; thin film preparation; Ge

0 引言

带通滤光膜通常定义为在工作需求的波段范围内, 光学元件表面用以达成光能量选频滤波功能的介质涂层。焦平面探测器使用的滤光膜通带宽度目前多为 3.7~4.8 μm 。2013 年, 张建付等人运用长波通和短波通组合的方法, 减小了总设计厚度和镀制周期, 使其总厚度约为 8.65 μm 。通过改变工艺中 Ge 和 ZnS 的蒸发速度、改进蒸发 ZnS 材料时电子束的扫描、改善坩埚中的装载蒸发材料等工艺措施, 生产的宽带通滤光膜在目标中波红外范围内的透过率大于 96%^[1]。2015 年, 刘冬梅等人通过电子加热蒸发配合离子辅助淀积技术, 采用高折射率 Ti_3O_5 和低折射率 SiO_2 材料, 进行双面镀制而非单面镀制, 以解决单层膜厚的问题。他们制备出在 600~1200 nm 波段平均透过率高于 92% 的宽波段带通滤光片^[2]。2019 年, 岳威等人选用高折射率 Ge 与低折射率 SiO 材料, 并将 Al_2O_3 用作薄膜基底, 制备出了在 3.7~4.8 μm 范围内平均透射率大于 92%、截止透射率平均值小于 1% 的具有良好环境适应性的滤光片^[3]。

对比红外焦平面探测器中涉及的两个大气窗口, 可以发现中波红外焦平面探测器能获取物体的更多细节。此外, 基于中波红外带通滤光膜的探测器在红外制导导弹、工业设备监控技术和红外夜视仪等领域应用广泛^[4]。因此, 本文以中波红外带通滤光膜为对象开展膜系的设计与制备研究工作。这对红外焦平面探测器的支撑技术具有重要意义。本文主要研究 2.95~5.05 μm 带通滤光膜的设计、生产及测试。在完成薄膜结构设计和确定工艺方法后, 尝试制备满足设计要求的薄膜样品, 同时对样品进行相关光学指标的测试; 针对测试结果与设计值进行拟合迭代, 在调整滤光膜结构、减小滤光膜厚度的同时, 优化工艺参数, 成功研制了性能高、成本较低的带通滤光膜。

1 带通滤光膜的设计

国内外对于带通滤光膜的设计, 最主要的关注点在于调整膜层的光谱性能以满足工作指标。设计方法主要为多腔窄带滤光膜结构和长短通分光膜相结合的设计方案^[5]。表 1 列出了 2.95~5.05 μm 带通滤光膜的技术指标。

表 1 2.95~5.05 μm 带通滤光膜的技术指标要求

名称	指标
入射角	0°±5°
透射波段	2.95~5.05 μm
截止波段	0.3 μm ~2.6 μm & 5.5~10 μm
透射波段内的平均透射率	≥92%
截止深度	≤2%
通带宽度	2.1±0.3 μm

表 2 常用近红外基底材料的性能参数

基底	折射率 n	透明区/ μm	密度/(g/cm^3)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	硬度
氟化钙(CaF_2)	1.36~1.45	0.15~12	3.01~3.25	2500	4
锗(Ge)	3.96~4.4	1.7~100	5.35	938.25	6.0~6.5
硅(Si)	3.3~3.5	1.7~7	2.33	1414	6.5
硫系玻璃	2~3.5	2~15	3.20~4.66	/	5.5
氧化铝(Al_2O_3)	1.54~1.68	0.2~7	3.5~3.9	2980	9
氟化镁(MgF_2)	1.35~1.47	0.12~8.5	3.16	1255	6

1.1 基底材料的选择

常见的基底材料包括 Ge、Si、 Al_2O_3 、 CaF_2 、 MgF_2 、ZnS 和 MgO ^[6]。从以往常用选择中考虑, 参考文献中基底材料主要采用 Ge、Si 和 Al_2O_3 。在选择材料时, 更多考虑它与高低折射率薄膜材料之间的匹配关系, 而不完全是其自身的性质, 以此来提升膜系的附着力。本文选用 Ge 作为基底材料。表 2 列出了常用近红外基底材料的性能参数。

1.2 镀膜材料的选择

面向特定波段的红外焦平面探测器, 应考虑到探测器包含的指标: 中心波长、透过率、截止波长和通带宽度。选择红外薄膜材料时兼顾光学性能、机械性能、工艺可行性和环境适应性等^[7]。

锗(Ge)材料机械性能好、折射率大。锗本身是工业常用材料, 特别适合作为红外光学系统中的窗口; 同时化学性能稳定、耐腐蚀, 与类金刚石薄膜结合较好, 是镀膜材料的优秀选择。而且由于工艺成熟, 锗可以是研制的高折射率材料首选。

硒化锌(ZnSe)是目前 CO_2 激光器的首选材料, 对热冲击承受力高, 但是其机械强度低、易升华, 并且还有弱毒性, 因此并不适合作为低折射率材料。

一氧化硅(SiO)镀制工艺成熟, 机械性能好, 并且在 $7\ \mu\text{m}$ 后有吸收带, 利于截止, 与基片附着性能较好, 可以是研制的低折射率材料首选。

硫化锌(ZnS)镀制工艺成熟, 机械性能好。在很多资料中都采用了 ZnS 这一材料。它具有高密度结构, 也是不错的选择; 但是相对于

SiO , $7\sim10\ \mu\text{m}$ 仍有透过能量, 截止需要更多膜堆。

氟化钇(YF_3)和氟化镱(YbF_3)都有弱毒性, YbF_3 膜层强度好但有一定吸收, YF_3 折射率在透明区不稳定, 同时与锗基底结合力较差, 因此不予考虑。

碲化铅(PbTe)折射率高($n=5.5$), 有利于膜层的减少, 且易于蒸镀, 但在小于 $3.4\ \mu\text{m}$ 的波段具有较大的吸收, 对基底的温度变化比较敏感, 不适用于中波红外带通滤光片的研制。

综上所述, 薄膜高折射率材料选择锗, 低折射率材料选择一氧化硅。

1.3 带通滤光膜的设计与优化

本文相关的 $2.95\sim5.05\ \mu\text{m}$ 波段的带通滤光膜, 按照薄膜带宽基本定义是宽带通滤光膜。它通常由长波通和短波通滤光膜组合而成, 同时会有镀制在同一表面或者镀制在镜片正反两面这两种情况。此外, 多层膜系设计较为复杂, 在本文设计中采用 Filmaster 软件来辅助设计。

首先, 本文对长波通滤光膜进行设计和优化。在 Filmaster 软件中输入长波通滤光膜的基础膜系为 $G|(\frac{L}{2}H\frac{L}{2})^n|A$: H 为高折射率膜料锗, 其折射率为 4.0; L 为低折射率膜料一氧化硅, 其折射率 1.8; G 为基片材料锗, 其折射率为 4.0; A 为入射光介质空气, 其折射率约为 1。参考波长为 $6300\ \text{nm}$, 入射角为 0° , 未经优化的初始短波通透过率曲线和优化计算后的短波通透过率曲线分别如图 1 和图 2 所示。

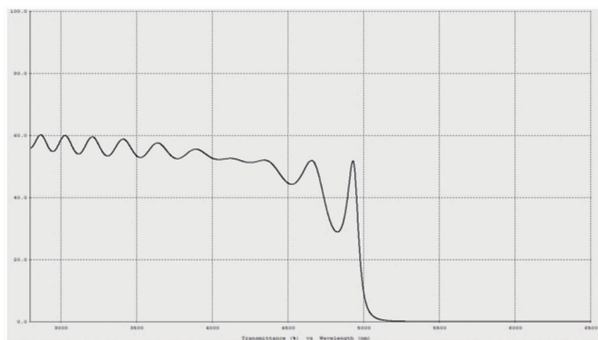


图 1 未经优化的初始短波通透过率曲线

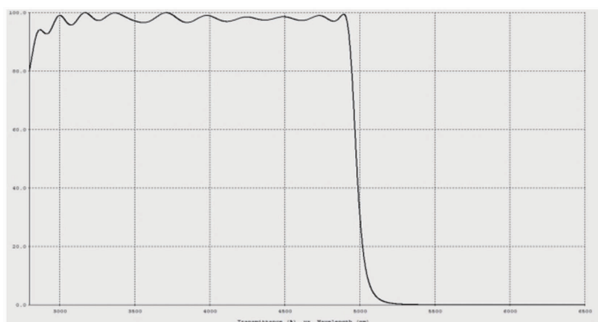


图 2 优化计算后的短波通透过率曲线

优化后的结构如下: 4/0.0732L 1.3447H 1.1073L 1.0448H 0.9888L 1.0079H 0.9919L 0.9890H 0.9969L 0.9850H 0.9989L 0.9980H 0.9988L 1.0273H 1.0311L 1.0427H 0.5218L/1。其中, H 为高折射率材料, L 为低折射率材料。

同理, 采用 $[(0.5HL0.5H)^n]$ 的基础膜系来设计长波通滤光片, 其参考波长为 2300 nm。图 3 为未经优化的初始透过率曲线图。此时, 截止波段满足设计要求, 但初步优化后的膜系设计存在大的通带波纹, 需要进行展宽与压缩。经膜系叠加、波纹压缩等优化步骤后, 得到了最低透射率在 95% 以上、通带较平坦的长波通滤光膜(见图 4)。

最终得到的膜系结构如下: 4/0.5082L 0.8802H 1.1087L 0.9400H 0.8922L 1.0485H 1.0931L 0.9105H 1.0123L 1.0363H 1.0843L 0.9069H 1.0121L 1.0645H 1.0237L 0.9329H 0.9366L 0.9796H 1.0531L 0.1361H 1.0271L/1。

镀制过程中可以选择双面分别镀制截止分光膜或者将带通滤光膜全部镀制在基底一

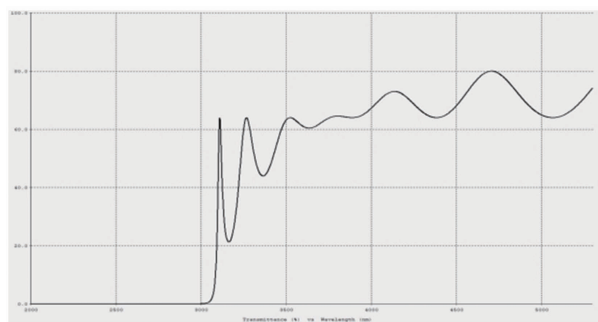


图 3 未经优化的长波通初始透过率曲线

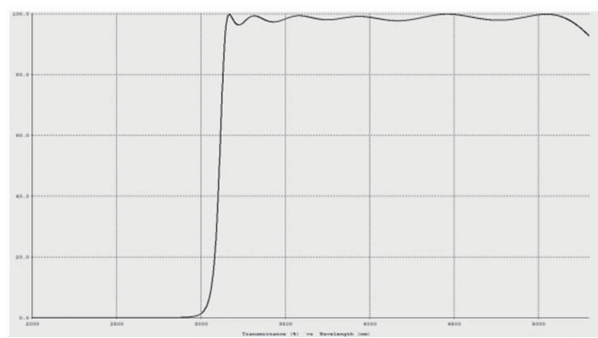


图 4 优化计算后的短波通透过率曲线

侧, 另一侧镀制通带范围内的增透膜的方式。后一种方式对镀膜设备的控制精度要求更高^[8]。图 5 为 2.95~5.05 μm 带通滤光膜的设计透过率曲线图。可以看出, 带通滤光膜在 2.95~5.05 μm 范围内的平均透过率高于 95%, 抑制范围内的平均透过率低于 1%。通带范围内的波纹度主要由材料色散和反射带交叠产生的影响导致, 同时在实际镀膜的过程中, 工艺误差导致的波动程度通常高于设计偏差。

2 带通滤光膜的制备与测试

2.1 单层材料试验

锆和二氧化硅用作镀膜材料时, 在实际镀制正品之前, 需要确定其折射率、吸收值和色散值等光学参数^[9]。通过镀制 6~8 个单层规整膜堆, 测试通带波段内的透过率高低极值。以柯西公式 $n=n_0 + D/\lambda$ 为基础, 结合设计软件进行拟合。 n_0 和 λ 分别为基片折射率和测试波长, D 为由每个测试极值点透过率得出的拟合参数^[10], 单层材料的光谱图如图 6 和图 7 所示。

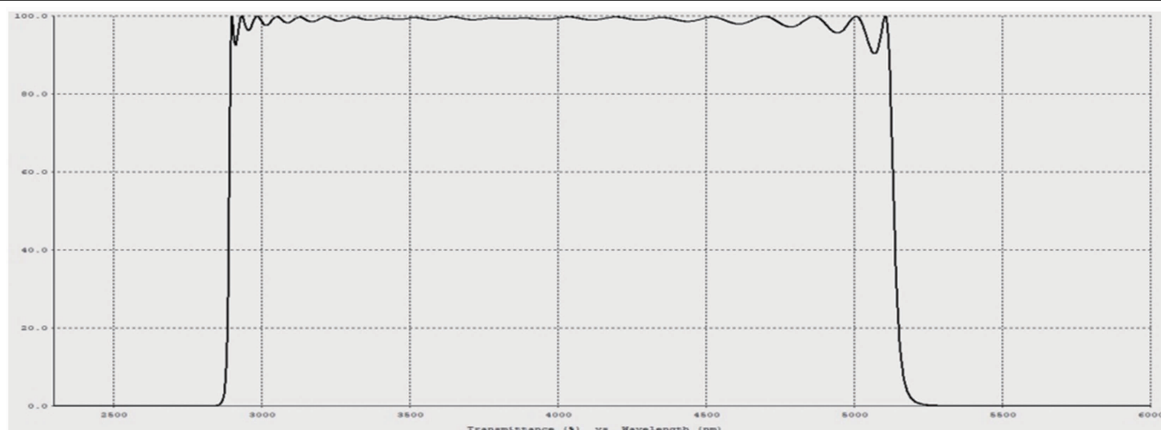


图 5 带通滤光片的透射率曲线图

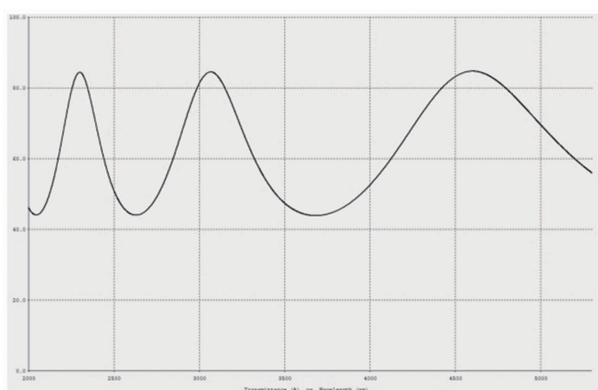


图 6 铬材料的光谱曲线

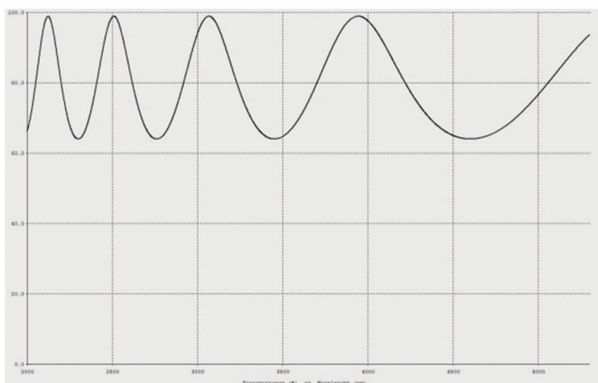


图 7 二氧化硅材料的光谱曲线

2.2 薄膜制备

采用德国 Leybold 公司生产的光学全自动真空镀膜机制备带通滤光膜。该镀膜机的结构由膜层厚度控制系统、薄膜沉积系统以及真空系统三部分组成。在辅助抽气系统中采用了“机械泵+罗茨泵+油扩散泵”结构。薄膜沉积系统使用的是 4 组电阻蒸发源、2 把 E-beam 电子枪以及先进等离子体源 (Advanced Plasma Source, APS)。膜层厚度监控系统则由石英晶

体振荡控制器以及 OMS5000 光学监控系统组成。

真空电子束蒸发铬材料, 钼舟加热蒸发一氧化硅材料, 石英晶振监控蒸发速率和薄膜厚度。镀制前铬基片在超声机中分步进行清洗, 用异丙醇加热脱水后装机, 加热至 120℃; 真空度达到 3×10^{-3} Pa 后开启离子源, 用辅助蒸发 40% 的能量预处理 8 min, 然后分层进行监控蒸发。此过程中离子束能量和速率、真空度必须在设定范围内波动, 否则折射率会出现复变, 光谱特性难以和设计值拟合; 另外牢固度和环境特性也会因受到影响而降低^[11]。薄膜镀制工艺参数如表 3 所示。

表 3 薄膜镀制工艺参数

参数	数值
真空度	2.0×10^{-4} mbar
基片加热温度	100℃
铬沉积速率	0.9 nm/s
一氧化硅沉积速率	1.5 nm/s
离子源的偏置电压	150 V
离子源的环流	1.5 A

初步试制设计的带通滤光膜的截止透过率小于 2%, 通带内平均透过率大于 85%, 但通带波纹存在较大的波动, 仍有一定的提升空间。从透过率方面分析, 薄膜的最大透射率为 98%, 带通滤光膜的结构设计表现良好, 但是通带波纹的控制还有提升空间。

2.3 薄膜光谱与环境可靠性测试

利用红外光谱仪 (测试波长范围为 1.44~

24 μm , 特征分辨率为 0.01 μm) 对带通滤光膜的光谱特性进行测试。铬基底面型 N 、局部光圈 ΔN 和表面粗糙度 rms 分别为 1、0.5 和 0.5 nm。实测光谱曲线如图 8~图 10 所示。透射带 2.95~5.05 μm 工作波段内的平均透过率高于 92%, 反射区的平均透过率仅为 1%。光谱透射曲线的过渡带陡度满足需求, 符合带通滤光膜的设计要求。实物图如图 11 所示。

实测光谱显示, 平均透过率已超过 92%, 4.26 μm 处下降的尖峰是 CO_2 气体吸收峰。带通滤光膜在设计波段实现了 $T > 92\%$ 的高透过



图 11 2.95~5.05 μm 滤光片的实物图

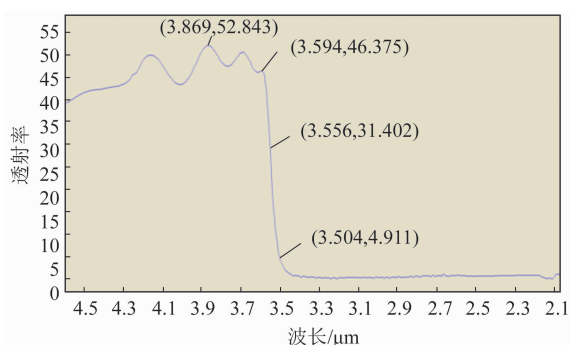


图 8 短波通滤光膜的实际测试曲线

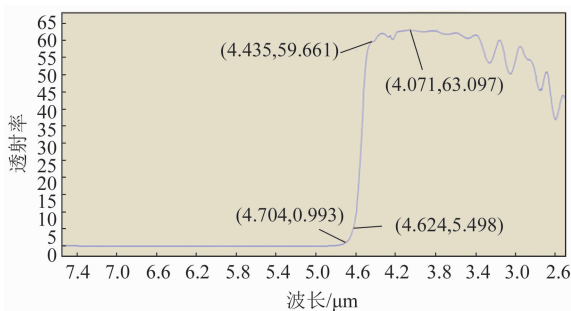


图 9 长波通滤光膜的实际测试曲线

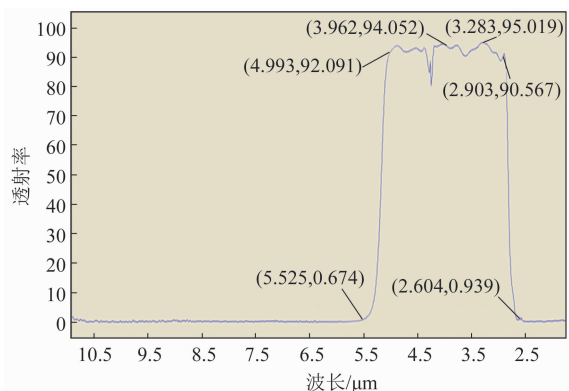


图 10 带通滤光膜的实际测试曲线

率, 在截止带的平均透过率 $T < 1\%$, 透过能量的波动情况是由镀制因素的随机误差引起的。通带波纹度和截止带波纹度均平整, 该项指标符合设计要求。同时对滤光片进行附着力试验, 在表面未看到明显裂纹和气泡。薄膜力学特性测试采用剥离法, 薄膜未出现脱落现象, 说明带通滤光膜有较好的附着力, 符合设计要求。

3 结束语

本文主要讨论了用于红外焦平面探测器的 2.95~5.05 μm 带通滤光膜。主要指标如下: 在 0° 角入射的情况下对 2.95~5.05 μm 波段的光束具有 92% 以上的高透过率, 同时对 0.3~2.6 μm 和 5.5~10 μm 波段的光束能够达到明显的截止效果。相对于常规使用的 3.7~4.8 μm 通带范围明显展宽。主要设计制备方法对中红外光学薄膜研究具有一定的参考价值。

后续工作中将持续关注此类滤光膜通带透过率由材料和工艺控制误差导致的波动问题, 同时膜层的应力、稳定度、牢固度等可靠性问题要在设计中结合使用数据持续优化。

参考文献

- [1] 张建付, 杨崇民, 刘青龙, 等. 中波红外 3 μm ~5 μm 宽带通滤光片的研制 [J]. 应用光学, 2013, 34(4): 695-699.
- [2] 刘冬梅, 刘爽, 付秀华, 等. 红外线治疗仪中宽波段带通滤光片的研究 [J]. 光子学报, 2015, 44(3): 7-12.

- [3] 岳威, 梁灵芬, 王嘉欣, 等. $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 中红外带通滤光膜研制 [J]. *红外*, 2019, **40**(8): 19–23.
- [4] 唐晋发, 顾培夫. *现代光学薄膜技术* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [5] 范正修. 光学薄膜及其进展 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 268–272.
- [6] 申振峰. 特定折射率材料及光学薄膜制备 [J]. *中国光学*, 2013, **6**(6): 900–905.
- [7] 陈朝平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备 [J]. *应用光学*, 2012, **33**: 595–598.
- [8] 姚李英, 金永浩, 邵建达, 等. 超宽超窄矩形带通滤光片的设计 [J]. *光学仪器*, 2001, **23**(5–6): 19–22.
- [9] Rancourt J D, Poirier Michel. Coating Design of a Broad Band Visible Transmitting Filter with Sharp Ultraviolet and Infrared Cut-on and Cut-off Transitions [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(4): 103–108.
- [10] 朱华新, 王彤彤, 高劲松, 等. 宽通带宽截止带通滤光片研究 [J]. *人工晶体学报*, 2014, **43**(5): 1296–1301.
- [11] 季一勤, 刘华松, 张艳敏, 等. 光学薄膜常数的测试与分析 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 513–518.
- [12] 申振峰. 特定折射率材料及光学薄膜制备 [J]. *中国光学*, 2013, **6**(6): 900–905.