850 nm 滤光片的设计、制备及激光损伤特性

王建，徐均琪，苏俊宏，李绵，胡景波

（西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室，西安 710021）

摘 要：目的 采用热蒸发沉积技术制备可用于人脸部识别的 850 nm 滤光片，研究滤光片的激光损伤阈值以及薄膜内部的电场分布。**方法** 采用 TFC 膜系仿真设计软件完成 850 nm 滤光片的设计与优化。采用真空箱式镀膜机，通过增加挡板、调整监控波长，以离子束辅助热蒸发沉积技术完成滤光片的制备。**结果** 通过紫外-红外分光光度计实现了在中心波长透射率为 83.05%、其他波段 T<5%的光谱特性测试。采用 R-on-1 的激光损伤测试方法得到 TiO_2/SiO_2 组合滤光片的激光损伤阈值达 4.2 J/cm^2，ZnS/MgF_2 组合滤光片为 2.8 J/cm^2。TiO_2/SiO_2 组合滤光片空气-薄膜界面电场强度为 0.3474，ZnS/MgF_2 组合滤光片为 0.9357。分析显微镜下的微观结构得到，相比 TiO_2/SiO_2 组合，同一能量下，ZnS/MgF_2 组合的薄膜激光损伤斑较大，易出现损伤。**结论** 可以通过增加挡板、调整监控波长的方式实现窄带滤光片的制备。为了更好地获得激光损伤阈值较高的滤光片薄膜，在设计滤光片时尽可能地降低薄膜与空气界面处的电场分布，即界面处电场强度分布越小，薄膜表面抗激光损伤的能力越强。同时发现 TiO_2/SiO_2 组合滤光片激光损伤阈值大于 ZnS/MgF_2 组合滤光片。

关键词：薄膜；窄带滤光片；离子辅助；峰值透射率；激光损伤阈值；电场强度

中图分类号：O484 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)03-0112-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.014

Design, Fabrication and Laser Damage Characteristics of Optical Filters Using at the Wavelength of 850 nm

WANG Jian*, *XU Jun-qi*, *SU Jun-hong*, *LI Mian*, *HU Jing-bo

(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory,
Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to prepare 850 nm filter that can be used for face recognition by thermal evaporation deposition technique to study the laser damage threshold of the filter and the electric field distribution inside the film. The design and optimization of the 850nm filter was completed by the TFC film system simulation design software. The vacuum box coating

收稿日期：2019-06-10；**修订日期：**2019-09-05

Received：2019-06-10；**Revised：**2019-09-05

基金项目：陕西省国际科技合作与交流计划资助项目（2018KWZ-02,2016KW-036），陕西省自然科学基础研究计划（2016JZ025），西安市智能探视感知重点实验室项目（201805061ZD12CG45）

Fund：Supported by the International Science and Technology Cooperation and Exchange Program of Shaanxi Province (2018KWZ-02, 2016KW-036), Basic Research Program of Natural Science of Shaanxi Province (2016JZ025), Xi'an Key Laboratory of Intelligent Visiting Perception (201805061ZD12CG45)

作者简介：王建（1993—），男，硕士研究生，主要研究方向为薄膜及激光损伤。

Biography：WANG Jian (1993—), Male, Master's degree, Research focus: film and laser damage.

通讯作者：徐均琪（1973—），男，博士，教授，主要研究方向为薄膜技术。邮箱：jqxu2210@163.com

Corresponding author：XU Jun-qi (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: film processing technique. E-mail: jqxu2210@163.com

引文格式：王建，徐均琪，苏俊宏，等. 850 nm 滤光片的设计、制备及激光损伤特性[J]. 表面技术，2020, 49(3): 112-118.

WANG Jian, XU Jun-qi, SU Jun-hong, et al. Design, fabrication and the laser damage characteristics of optical filters using at the wavelength of 850 nm[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 112-118.

machine was used to prepare the filter by adding baffles, adjusting the monitoring wavelength and ion beam assisted thermal evaporation deposition technology. The spectral characteristics of the center wavelength transmittance of 83.05% and the other wavelength bands of T<5% were achieved by the ultraviolet-infrared spectrophotometer test. The laser damage threshold of TiO_2/SiO_2 combination filter obtained by R-on-1 laser damage test method reached 4.2 J/cm^2; and that of ZnS/MgF_2 combination filter was 2.8 J/cm^2. The air-film interface electric field strength of the TiO_2/SiO_2 combination filter was 0.3474; and that of the ZnS/MgF_2 combination filter was 0.9357. From the microstructure under the microscope, it was found that the ZnS/MgF_2 combination film had a larger laser damage spot and was more susceptible to damage than the TiO_2/SiO_2 combination under the same energy. The narrow band filter can be prepared by adding a baffle and adjusting the monitoring wavelength. In order to obtain a filter film with a higher laser damage threshold, the electric field distribution at the interface between the film and the air is reduced as much as possible when designing the filter, that is, the smaller the electric field intensity distribution at the interface, the more powerful the surface of the film in resistant to laser damage. At the same time, it is found that the laser damage threshold of TiO_2/SiO_2 combination filter is larger than that of ZnS/MgF_2 combination filter.

KEY WORDS: film; narrowband filter; ion assist; peak transmittance; LIDT; electric field intensity

近年来，随着科学技术的飞速发展，光学仪器因其具有检测灵敏度高、可实现非接触测量等优点，在各行各业中得到了广泛的应用。伴随着国家“天网”工程、“无人超市”和“安检”系统的不断推广，高效且准确地识别人脸信息对防止违法犯罪、实现快速支付、提高安检效率具有重要的意义。人脸识别是一项复杂的技术，通过光学扫描对人面部骨骼和眼部信息进行采集，并通过计算机进行计算与识别。在这一系统中，光学滤光片是核心部件，滤光片可以使识别背景保持同一状态，有效地避免了周围杂散光对采集信息准确性的影响。

滤光片因其用途广泛，在国内外都得到了长足的发展[1-6]。目前国内外研究者已通过光化学掩膜分离、组合设计、拆分、掺杂、等离子体纳米天线等方法成功制备了满足要求的滤光片[7-11]。窄带滤光片制备过程中出现中心波长漂移的问题，可以通过离子束辅助沉积技术有效解决[12]。对于窄带滤光片单面膜过厚而导致难以制备的问题，目前通常采用长短波膜系组合技术解决，即在基底的一面镀制长波通滤光片的膜系，另一面镀制短波通的膜系，进而实现窄带透光的作用[4,13]。张建付等[14]在 3~5 μm 宽带滤光片制备时发现，薄膜的蒸发速率、电子枪的扫描方式、膜料的装载方式等都会对滤光片的透光率产生一定的影响。在窄带滤光片制备过程中，为了实现每层膜光学厚度的误差自动补偿，可采用直接透射监控的膜厚监控方式[15]。近年来，国外学者提出一些新的方法，例如基于准一维光学晶体成功设计 1550 nm 窄带滤光片；通过等离子体金属-聚合物纳米复合制备柔性紫外带通滤光片，以满足激光方面的应用；采用 RAS 系统成功制备无散射的多层 UV-IR 截止滤光片[16-18]。Y. J. JEN 等[5]采用导纳图解法设计了 Ag-Si 组合多层滤光片，为消除与通带的边带而提出紧凑的四层结构来产生角度不敏感的光谱。

随着光学仪器在各行业的广泛使用，作为核心部件，滤光片的作用越发重要。尽管国内外的学者对滤光片做了一定的研究，但对用于人脸识别的 850 nm 或 940 nm 滤光片的研究较少，且只研究了滤光片的设计，通过组合法和拆分等方法制备滤光片，而对于滤光片的激光损伤特性、激光损伤阈值以及影响激光损伤的薄膜内部电场分布的研究更少。鉴于上述原因，本文通过增加挡板遮挡、调整监控波长的方法制备满足使用要求的滤光片，并对制备的滤光片进行激光损伤特性、损伤阈值及影响损伤的薄膜内部电场分布进行研究，这将有助于滤光片设计、制备及滤光片器件的性能评估。

1　实验

1.1　窄带滤光片的设计

带通滤光片有长波通与短波通的组合和 F-P 干涉滤光片两种结构。长波通和短波通组合结构虽然可以得到较宽的截止带和较深的截止度，却很难获得很窄的通带。F-P 干涉滤光片可以获得较窄的通带，但截止宽度较窄，且截止深度较浅。采用 TFC 膜系设计软件在玻璃基底上设计 850 nm 窄带全介质滤光片，设计波长 λ=850 nm，薄膜材料选择高折射率 ZnS、中折射率 TiO_2 和低折射率的 SiO_2。膜系结构为 G/(HL)^{3}3H(HL)^{3}H/A（13 层膜）和 G/(ML)^{2}M(ML)^{5}M(ML)^{2}M/A（19 层膜），其中 H 代表 ZnS，M 代表 TiO_2，L 代表 SiO_2（或 MgF_2），G 代表玻璃基底，A 代表空气。850 nm 窄带滤光片的设计曲线如图 1 所示。

根据波长为(850±5) nm、半峰值带宽 < 50 nm、峰值透射率 T > 90%的设计要求，为了避免可见光波段杂散光的干扰，结合膜系设计曲线，选取型号为 HWB-780 的有色玻璃作为基底。该玻璃可以实现在波长 $\lambda \leqslant$ 750 nm 的所有光都被截止。HWB-780 有色玻璃的透射率曲线如图 2 所示。

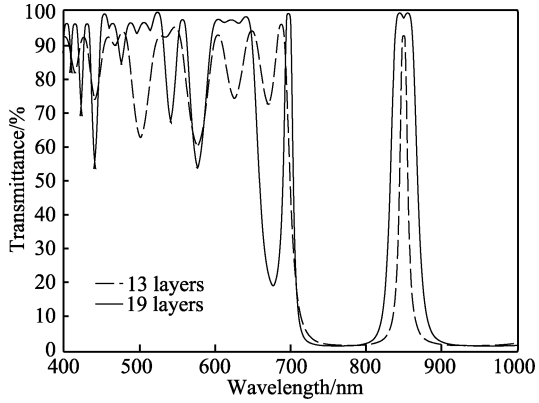


图 1　850 nm 窄带滤光片设计曲线
Fig.1 Design curve of 850 nm narrowband filter

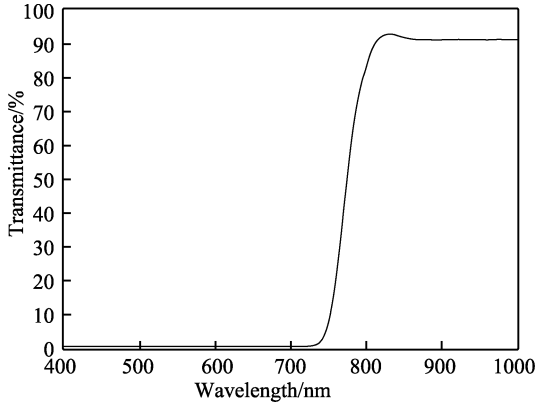


图 2　有色玻璃的光谱曲线
Fig.2 Spectral curve of colored glass

1.2　滤光片的制备

采用成都南光机械有限公司生产的 ZZS500-2/G 真空箱式镀膜机制备 850 nm 滤光片。考虑设备的监控波长范围为 450~800 nm，采用监控波长 λ=510 nm，通过加挡板减少膜厚的方式来制备滤光片。在薄膜制备过程中，为了保证基片均匀受热以及薄膜膜层的均匀性，基片在加热和镀膜过程中随着工件架一起旋转。薄膜材料受热后，蒸发向上迁移，最终沉积到基片上。通过增加挡板使得一部分薄膜材料分子在蒸镀过程中被挡板遮挡，沉积到挡板上，另一部分薄膜材料分子没有被遮挡而沉积到基片上，从而达到减少膜厚的目的。采用电子束热蒸发沉积 TiO_2、SiO_2、MgF_2 膜料，电阻热蒸发沉积 ZnS 膜料。在镀膜过程中，挡板的长度只要能对基片旋转镀膜过程中进行遮挡即可，因此只有挡板的宽度会影响膜层厚度，所以仅给出了挡板的宽度，此处使用的挡板宽度为 12 cm。通过调节工转反馈电流的方式来控制工件架的转速。根据薄膜光谱曲线中心波长所处的位置，调整监控波长，最终得到满足要求的滤光片。在制备薄膜时，为了保证薄膜材料的更好沉积以及薄膜的良好性能，使用 3∶1（体积比）的无水乙醇和乙醚混合液清洗基片，通过白炽灯加热烘干残留的醇醚混合液。将清洗、烘干后的基片装入真空室，随后抽真空，待本底真空度达到 3.0×10^{-3} Pa，进行膜料预熔。预熔膜料后，待真空度再次恢复到本底真空，基片达到预设温度时，充入气体开始镀膜，具体参数见表 1。采用西安工业大学研制的宽束冷阴极离子源进行离子束辅助沉积，具体的实验参数见表 2。真空箱式镀膜机的原理图及挡板尺寸如图 3 所示。

薄膜使用离子束辅助沉积。镀膜前，离子束轰击可以起到清洗、加热基片的作用。镀膜过程中，离子束轰击一方面破坏柱状结构，形成均匀填充生长；另一方面可以增加薄膜分子的横向迁移率，促使薄膜粒子间紧密结合，膜层更加致密。镀膜后，离子束轰击可以起到热处理的效果。

尽管 TFC 设计膜系均满足要求，但采用 ZnS/SiO_2 组合制备的薄膜的稳定性较差，薄膜放置一段时间后，会出现脱落的现象，即使采用离子束辅助沉积依然无法解决。这可能是由于薄膜应力不匹配造成的，因为 ZnS 薄膜和 SiO_2 薄膜内部应力类型都表现为压应力。使用 ZnS/MgF_2 组合的薄膜虽然薄膜应力匹配，薄膜比较稳定，但是滤光片在 850 nm 处的光学透射率相对较低。经过分析和实验测试，采用 TiO_2/SiO_2 组合制备得到中心波长透射率较高的窄带滤光片。

表 1　薄膜材料沉积工艺参数
Tab.1 Process parameters of film material deposition

Membrane material	Basal temperature/℃	Thermal evaporation method	Beams/mA	Steam resistance current/A	Vacuum degree of work/($\times10^{-2}$ Pa)	Deposition rate/(nm·s^{-1})
ZnS	170	Resistance thermal evaporation	—	160	1.2	0.35
SiO_2	170	Electron beam evaporation heat	30	—	1.2	0.42
TiO_2	170	Electron beam evaporation heat	110	—	1.2	0.23

表 2　离子束辅助沉积离子源参数
Tab.2 Ion source parameters of ion beam assisted deposition

Parameter	Cathodic current/mA	Anode voltage/kV	Vacuum/Pa	Gas flow/(mL·min^{-1})
Value	12	0.5	1.2×10^{-2}	2.6

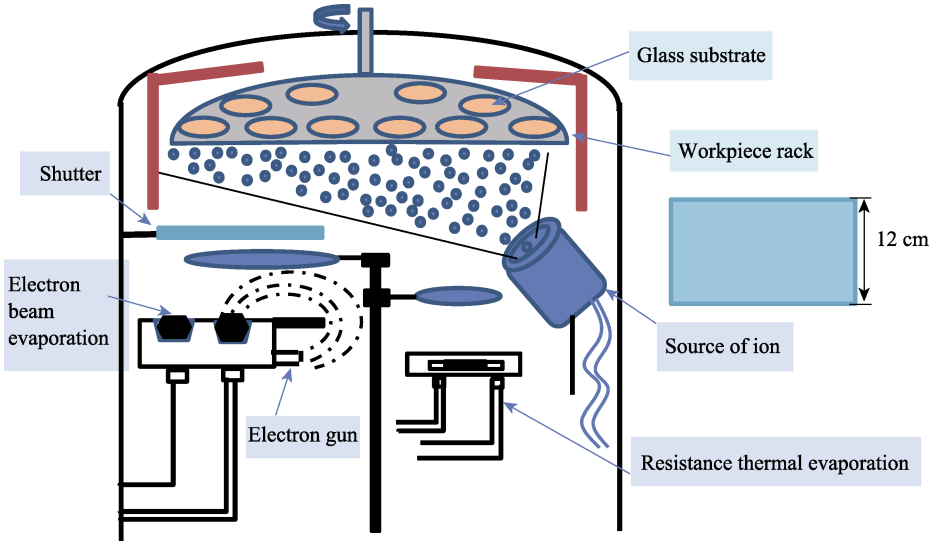


图 3　真空箱式镀膜机的原理及挡板尺寸

Fig.3 Schematic diagrams of the vacuum box coating machine and the size of the baffle

2　测试与分析

2.1　滤光片光谱特性测试

采用日立公司的紫外-红外分光光度计对制备的滤光片光谱特性进行测试，测试波段范围选择 700~1000 nm，测试结果如图 4 所示。图 4a、b 是采用 ZnS/SiO_2 组合制备的 13 层滤光片，虽然分别在中心波长 852 nm 和 848 nm 处有峰值透射率，但透射率只有 61.3%和 68.03%。图 4c 是采用 ZnS/MgF_2 组合制备的 13 层滤光片，其中心透射率为 61.43%，相对较低。图 4d 是采用 TiO_2/SiO_2 组合制备的 19 层滤光片，其峰值透射率达 81.35%，中心波长于 866 nm 处向长波方向发生漂移。需要通过减小监控波长的方式实现中心波长向短波方向移动，以满足要求。调整监控波长为 507 nm，并分析膜系敏感层，发现第 5、15、17、19 层膜厚度对中心波长处的峰值透射率影响较大。若这四层膜的厚度过厚，会导致中心波长的峰值透射率降低，所以在后续制备过程中，应适当减小第 5、15、17、19 层的膜厚度，最终得到中心波长 851 nm 处峰值透射率为 83.05%，如图 4e 所示，可基本上满足 850 nm 窄带滤光片的使用要求。

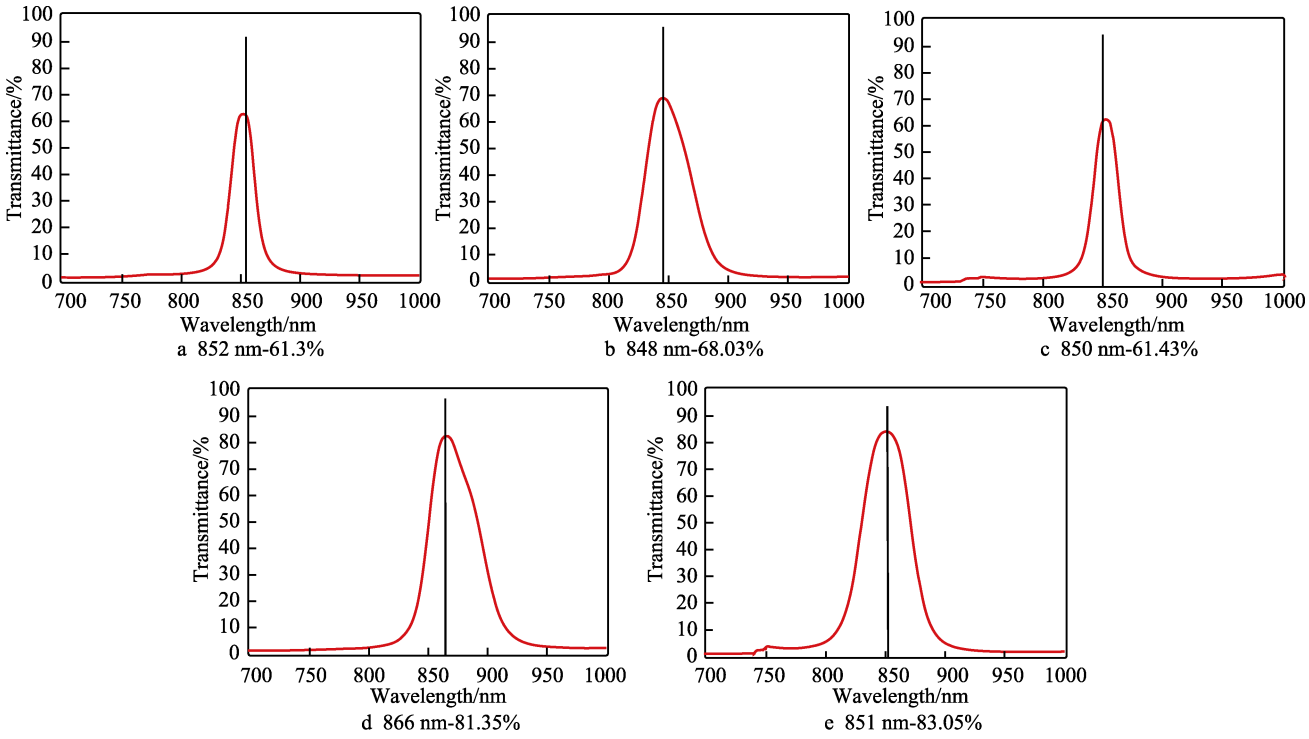


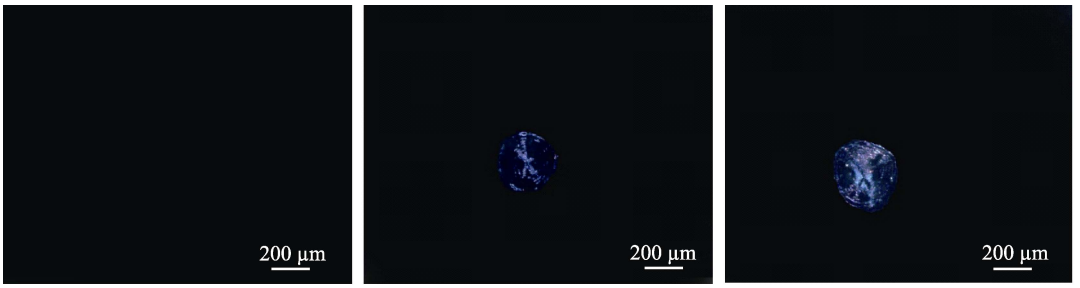
图 4　850 nm 窄带滤光片的光谱曲线

Fig.4 Spectrum curve of 850 nm narrowband filter

2.2　激光损伤测试

采用西安工业大学自主研发的激光损伤测试设备，对制备的 850 nm 窄带滤光片进行激光损伤测试。该设备既能进行激光损伤测试，同时可以实现激光预处理，整个损伤测试过程均选择 1064 nm 波长的激光。在显微镜下观察激光损伤后的微观损伤形貌，TiO_2/SiO_2 滤光片在不同激光能量下的损伤形貌如图 5 所示。在激光能量为 21 mJ 时，滤光片薄膜表面看不到明显的损伤斑。伴随着激光能量的不断增加，薄膜表面出现不同程度的损伤，损伤斑的直径不断扩张。薄膜吸收激光能量后，在温度升高的同时，进行短时间的急剧加热，导致局部热点附近产生热弹性压力和热应力，加剧了薄膜的损坏。采用 R-on-1 的方式对滤光片的激光损伤阈值进行测试，1064 nm 激光的光斑直径为 0.8 mm，测得 TiO_2/SiO_2 组合 850nm 滤光片的激光损伤阈值为 4.2 J/cm^2。

采用 ZnS/MgF_2 组合制备的 13 层滤光片的激光损伤形貌如图 6 所示。在激光能量小于 14 mJ 时，基底表面没有明显的损伤痕迹，不断增加能量，损伤痕迹愈发明显。相比较 TiO_2/SiO_2 微观结构，ZnS/MgF_2 组合的滤光片在能量相对低的情况下，薄膜表面的损伤

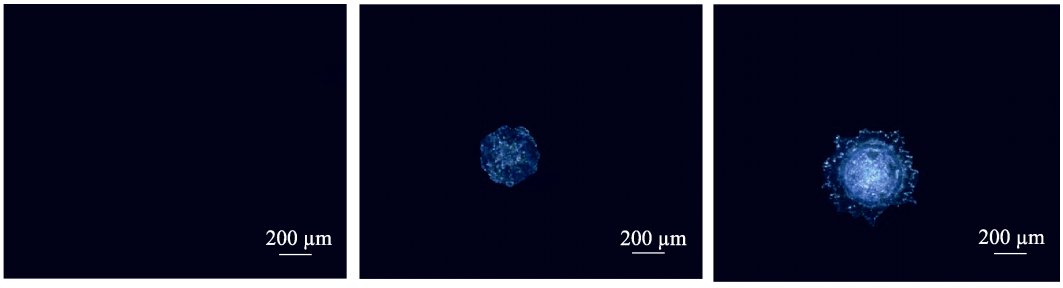


a 21 mJ　b 30 mJ　c 60 mJ

d 90 mJ　e 120 mJ　f 150 mJ

图 5　TiO_2/SiO_2 组合滤光片激光损伤形貌

Fig.5 Laser damage morphology of TiO_2/SiO_2 combination filter



a 14 mJ　b 30 mJ　c 60 mJ

d 70 mJ　e 80 mJ　f 90 mJ

图 6　ZnS/MgF_2 组合滤光片激光损伤形貌

Fig.6 Laser damage morphology of ZnS/MgF_2 combination filter

斑直径较大。这说明在相同的激光能量下，相比较 TiO_2/SiO_2 组合的 19 层膜滤光片，ZnS/MgF_2 组合的滤光片更容易发生损伤。测得 ZnS/MgF_2 组合的 13 层滤光片的激光损伤阈值为 2.8 J/cm^2，略低于 TiO_2/SiO_2 组合制备的 19 层滤光片的激光损伤阈值。分析和对比给出不同组合滤光片的成本及适用范围，见表 3。

表 3　不同组合滤光片的成本及适用范围
Tab.3 Cost and scope of application of different combination filters

Material combination	Preparation of the difficult	Cost	Scope of application
TiO_2/SiO_2	Difficult	Higher	Require higher ability to resist damage, good robustness
ZnS/MgF_2	Easily	Lower	Damage threshold and firmly demand is not high

结合损伤阈值分析，从表 3 及图 4 中可以看出，19 层膜的透射率高于 13 层膜，激光损伤阈值也高于 13 层膜。由于膜层厚度较厚，随之增加薄膜的制备难度和成本，所以该滤光片适用于激光损伤要求较高、牢固性要求良好的环境中。

2.3　电场强度分析

对制备的 ZnS/SiO_2 组合的 13 层滤光片和 TiO_2/SiO_2 组合的 19 层滤光片进行薄膜内部的电场强度分析。对其电场强度进行归一化处理，电场强度分布曲线如图 7 所示。分析发现，13 层滤光片空气-薄膜界面的电场强度为 0.9357，19 层滤光片为 0.3474。已有研究表明，在空气-薄膜界面处，薄膜最容易出现损伤，且界面处的电场强度越大，薄膜的激光损伤阈值越低。结合电场强度分析，对于 19 层滤光片而言，13 层滤光片界面处的电场强度较大，激光损伤阈值较低，易出现激光损伤。

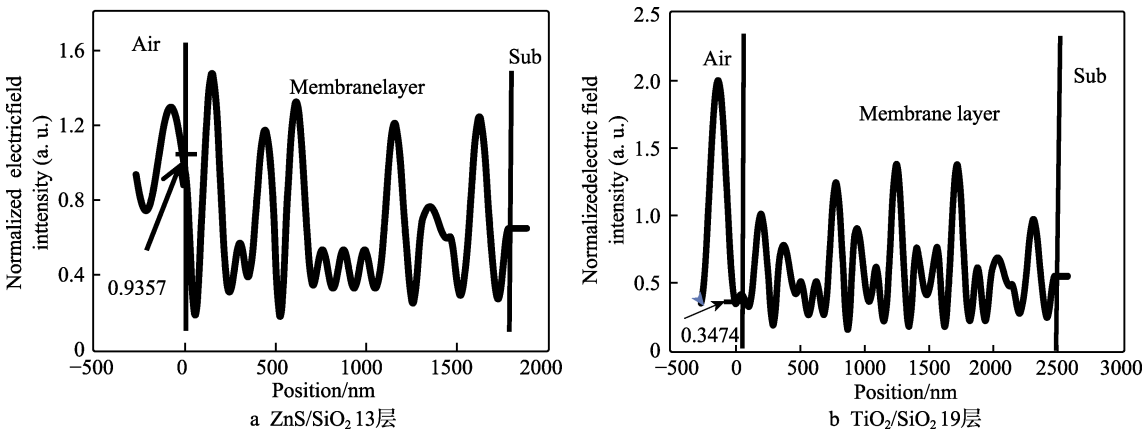


图 7　滤光片薄膜内部电场强度分布
Fig.7 Internal electric field intensity distribution of filter film: a) ZnS/SiO_2 13 layers; b) TiO_2/SiO_2 19 layers

2.4　其他性能

根据 GJB 2485—95 对光学薄膜附着力的测试标准，对 TiO_2/SiO_2 组合、ZnS/MgF_2 组合薄膜，采用宽度为 2.5 cm 的 3M 剥离胶带紧贴薄膜样片表面，然后沿着膜面的法线方向迅速提起，薄膜表面都未出现脱落、损伤现象。

3　结论

1）采用 TFC 膜系设计软件设计、电子束热蒸发沉积技术制备了 850 nm 人脸识别窄带滤光片。分别制备了 ZnS/SiO_2 和 ZnS/MgF_2 组合、膜系为 $G/(HL)^3 3H(HL)^3H/A$ 的 13 层滤光片及 TiO_2/SiO_2 组合、膜系为 $G/(ML)^2M(ML)^5M(ML)^2M/A$ 的 19 层滤光片。

2）在薄膜稳定性、光谱特征方面，ZnS/SiO_2 组合、膜系为 $G/(HL)^3 3H(HL)^3H/A$ 的 13 层滤光片因为膜层材料不匹配的原因，稳定性差，出现膜层脱落，且中心波长透射率 $T \leqslant 68\%$。ZnS/MgF_2 组合、膜系为 $G/(HL)^3 3H(HL)^3H/A$ 的 13 层滤光片虽然应力匹配，薄膜稳定性好，但中心波长的透射率较低。TiO_2/SiO_2 组合、膜系为 $G/(ML)^2M(ML)^5M(ML)^2M/A$ 的 19 层滤光片中，TiO_2 薄膜表现为张应力，SiO_2 薄膜表现为压应力，保证了薄膜良好的稳定性，且达到中心波长透射率为 83.05%，基本上满足滤光片的使用要求。

3）对制备的滤光片进行激光损伤阈值的研究，采用 R-on-1 的方法测得 TiO_2/SiO_2 组合的 19 层滤光片激光损伤阈值为 4.2 J/cm^2，高于 ZnS/MgF_2 组合的 13 层滤光片（激光损伤阈值为 2.8 J/cm^2）。在相同的激光能量下，相比较 TiO_2/SiO_2 组合的 19 层滤光片，ZnS/MgF_2 组合的滤光片更容易发生损伤，即 TiO_2/SiO_2 组合的 19 层滤光片具有较高的抗激光损伤能力。

4）通过分析薄膜内部的电场强度分布，表明在薄膜-空气界面处，薄膜最容易出现激光辐照损伤，且界面处的电场强度越大，薄膜的激光损伤阈值越低。

参考文献：

[1] 侯海港. 检测 CO_2 气体用窄带滤光片设计与制备[D]. 江苏: 江苏大学, 2017.
HOU Hai-gang. Design and fabrication of narrow-band filter for CO_2 gas detection[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2017.

[2] 贾钰超. 3.31 μm 窄带滤光片的设计与制备[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
JIA Yu-chao. Design and preparation of 3.31 μm narrow bandpass filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.

[3] 杨洁. 905 nm 带通滤光片制备工艺的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
YANG Jie. Research of preparation craft about 905 nm bandpass filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.

[4] 赵会聪. 带通滤光片的镀制及抗辐照性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHAO Hui-cong. Evaporation and research on anti-radiation of bandpass filter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[5] JEN Y J, LIN M J. Design and fabrication of a narrow bandpass filter with low dependence on angle of incidence[J] Coatings, 2018, 8(7): 231.

[6] WANG F, CHENG Y Z, WANG X, et al. Narrow band filter at 1550 nm based on quasi-one-dimensional photonic crystal with a mirror-symmetric heterostructure[J]. Materials, 2018, 11(7): 1099.

[7] 潘永强, 陈佳. 微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 78-82.
PAN Yong-qiang, CHEN Jia. Design and fabrication of microstructure narrowband filter[J]. Journal of applied optics, 2017, 38(1): 78-82.

[8] 周言敏, 李建芳, 王君. 基于组合法的 850 nm~950 nm 滤光片设计与制备[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2012, 11(6): 39-41.
ZHOU Yan-min, LI Jian-fang, WANG Jun. 850 nm to 950 nm filter design and preparation based on the set of legal[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2012, 11(6): 39-41.

[9] 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.
LIU Dong-mei, LIU Shuang, FU Xiu-hua, et al. Study and fabrication of broad bandpass filters in infrared therapy apparatus[J]. Actaphotonicasinica, 2015, 44(3): 7-12.

[10] ATTALLAH M, FAROUK M, EI-KORASHY A, et al. Copper doped phosphate glass as an optical bandpass filter[J]. Silicon, 2017, 10(2): 547-554.

[11] KHOSHDEL V, JOODAKI M, SHOKOOH S M. UV and IR cutoff filters based on plasmonic crossed-shaped nano-antennas for solar cell applications[J] Optics communications, 2019, 33(4): 275-282.

[12] 刘长亮. 近红外宽截止窄带滤光膜的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
LIU Chang-liang. Research on near-infrared narrowband filters with wide rejection band[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.

[13] 王航, 熊长新, 何光宗. 组合结构的中波红外带通滤光片研制[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(4): 83-86.
WANG Hang, XIONG Chang-xin, HE Guang-zong. Design and preparation of medium wavelength infrared band pass combined filter[J]. Optics &optoelectronic technolocy, 2015, 13(4): 83-86.

[14] 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.
ZHANG Jian-fu, YANG Chong-min, LIU Qing-long, et al. Study and preparation of midwave infrared 3 μm~5 μm broad band pass filter[J]. Journal of applied optics, 2013, 34(4): 695-699.

[15] 吴晓鸣, 李辛, 王一坚, 等. 大尺寸 1064 nm 波段 HfO_2/SiO_2 高损伤阈值窄带滤光片的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 212-218.
WU Xiao-ming, LI Xin, WANG Yi-jian, et al. Fabrication of large size 1064 nm HfO_2/SiO_2 narrow band filters with high laser damage threshold[J]. Laser & optoelectronics progress, 2016, 53(4): 212-218.

[16] GARIMA K, BIPIN K G, PAWAN K, et al. Fabrication of a flexible UV band pass filter using surface plasmonmetal polymer nanocomposite films for promising laserapplications[J]. Applied materials & interfaces, 2014, 6(11): 8407-8414.

[17] SUGAWARA T, AGATSUMA S, SAMORI S, et al. Scatterless SiO_2/Nb_2O_5 multi-layered UV-IR cut filter prepared by RAS system[C]// Optical Interference Coatings 2016. Tucson, Arizona United States: Optical Society of America, 2016.