

## 面向多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片设计

于志强<sup>1</sup>, 费书国<sup>1,2\*</sup>, 赵帅锋<sup>2</sup>, 郭志帅<sup>2</sup><sup>1</sup>沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;<sup>2</sup>沈阳仪表科学研究所有限公司, 辽宁 沈阳 110043

**摘要** 设计了一组应用于多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片。根据手掌皮肤在可见、近红外光谱波段反射率不同的特点,研究了掌纹识别滤光片的光谱特性参数及膜系设计。为提高系统获得的掌纹图像质量,采用四通道滤光片设计方案,光谱特性参数要求如下:中心波长为 $\lambda_1=470\text{ nm}$ 、 $\lambda_2=520\text{ nm}$ 、 $\lambda_3=630\text{ nm}$ 、 $\lambda_4=880\text{ nm}$ ;各通道的半宽度在 $8\sim 12\text{ nm}$ 范围内,透射率大于 $90\%$ ,平均截止背景深度大于 $\text{OD}6$ (即光谱透射率 $T<10^{-6}$ )。

**关键词** 薄膜; 光学薄膜; 多光谱掌纹图像采集; 滤光片; 光谱特性参数; 膜系设计

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2331001

## Design of Optical Thin-Film Filters for Multispectral Palmprint Image Acquisition Systems

Yu Zhiqiang<sup>1</sup>, Fei Shuguo<sup>1,2\*</sup>, Zhao Shuaifeng<sup>2</sup>, Guo Zhishuai<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;<sup>2</sup>Shenyang Academy of Instrumentation Science Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110043, China

**Abstract** Optical thin-film filters for multispectral palmprint image acquisition systems were designed. According to the different reflectance characteristics of palm skin in visible and near-infrared bands, we analyzed the spectral characteristic parameters and film design of palmprint recognition filters. For better quality of palmprint images obtained by the systems, a four-channel filter design scheme was adopted. The spectral characteristic parameters are required as follows: the central wavelengths  $\lambda_1=470\text{ nm}$ ,  $\lambda_2=520\text{ nm}$ ,  $\lambda_3=630\text{ nm}$ , and  $\lambda_4=880\text{ nm}$ . The full width at half maximum of each channel is  $10\text{ nm}$ . The transmittance is higher than  $90\%$ , and the average cut-off background depth is greater than  $\text{OD}6$  (spectral transmittance is less than  $10^{-6}$ ).

**Key words** thin films; optical thin-films; multispectral palmprint image acquisition; optical filter; spectral characteristic parameter; film design

**OCIS codes** 170.3880; 230.3990; 310.4165; 310.6860

## 1 引言

随着光电传感技术的快速发展,对于人体特征有效信息(虹膜、DNA、掌纹信息等)的提取要求越来越高。在生物识别图像采集系统中,通过光学薄膜滤光片对生物特征信息光谱进行分光与滤波后,经过传感器接收并转换成数字图像信号传输到系统进行后续的特征提取、特征比对等<sup>[1]</sup>。多光谱掌纹

识别是一种将多种信息特征进行融合的新型技术,目前法国 Le2l 实验室和日本本田研究院的最新研究成果表明,该项技术的识别精度可以达到  $99.9\%$  以上。多通道光学薄膜滤光片式多光谱图像采集技术,相比于传统的光栅色散、棱镜分光等技术,具有系统结构紧凑、结构简单和成本低的优势<sup>[2]</sup>。目前,多通道光学薄膜滤光片主要有以下几种类型<sup>[3]</sup>。1) 基于法布里-珀罗(F-P)标准具模型的多通道薄膜

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-30; 录用日期: 2021-06-11

通信作者: \*fsg@hb-sais.com

滤光片,其特点是膜层数少,结构简单,可用全介质薄膜来代替标准具的金属反射膜,可减少膜层的吸收,延长滤光片的使用寿命。2)基于金属掩模或光刻胶掩模方法的多通道薄膜滤光片,其制作方法是在基片上制作出所需要的某种可分离的掩模再进行镀制,在这种模型结构中,随着信号通道数量的增加,掩模套刻的次数也会增加,意味着在制备的过程中成品率较低。如若可以在正面同时镀制多个信号通道且在反面镀制多层膜堆来控制正面某一通道的状态,这样就可以解决由多次嵌套的掩模带来的生产率和成品率较低的问题。3)基于线性渐变滤光片式多通道光学薄膜滤光片,其工作机理是系统中阵

列探测器的若干列像元一一对应于线性滤光片的光谱带,通过扫描的方式获取目标所携带信息。本文为实现对掌纹表层、纹路及掌静脉脉络三种可识别信息的分时获取,采用四通道旋转滤光片轮式结构,这种结构可提高系统对目标特征的可区分度,使系统具有更高的识别精度。

## 2 光谱性能指标的确定

滤光片的作用是对光谱信息进行分光与滤波,滤除噪声光,使摄像机得到更加纯净的信息,提高系统的信噪比,进而提高掌纹图像的采集质量。图 1 为掌纹图像采集示意图。

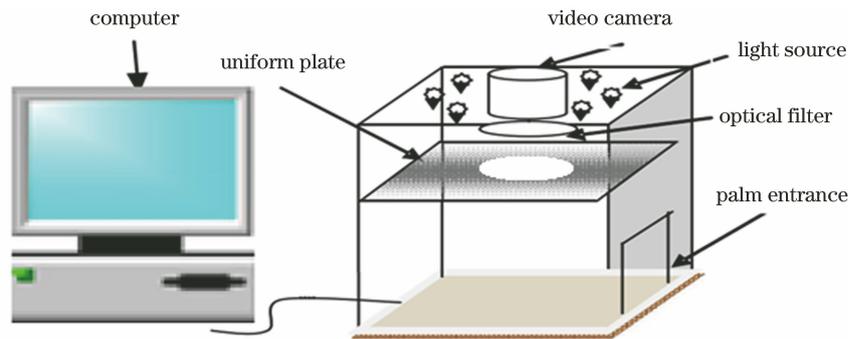


图 1 掌纹采集设备示意图

Fig. 1 Schematic of palm print acquisition equipment

掌纹图像采集设备选取了一种环形光源<sup>[4]</sup>,采用有序组合排列的单体 LED 照射匀光板,保证光线均匀地照射到手掌,尽可能地获取更多的掌纹信息。在可见光范围内,利用波长为 630 nm、520 nm、470 nm 三种光可获得清晰的掌纹表层、纹路信

息<sup>[5]</sup>;利用波长为 700~1000 nm 的可见光可获得掌静脉图像,并发现使用波长为 880 nm 的可见光获得的图像更清晰<sup>[6]</sup>。故本实验选用波长为 880 nm、630 nm、520 nm、470 nm 这 4 种典型的 LED 光源进行照射,光谱曲线如图 2 所示。

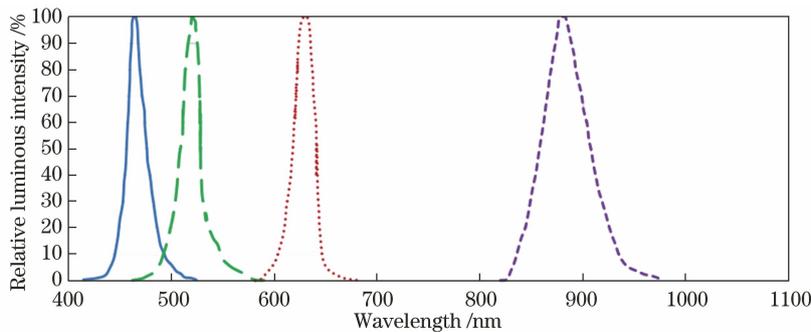


图 2 4 种 LED 光源光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of four LED light sources

选用普通 CCD 光谱摄像机为探测器,信噪比为 50 dB。该 CCD 相机可对亮度进行自动控制,其光电转换的量子效率曲线如图 3 所示<sup>[7]</sup>。

从图 3 可以看到,CCD 相机在 450~950 nm 处的光电转换效率相对较高,结合所选的 LED 光源,

并根据掌纹的各层组织在特定波长处的反射能力与皮层厚度、血红蛋白浓度和氧饱和度等相关参数有关,综合考虑,滤光片的透射率应保证在 90% 以上。由掌纹所确定特征波长位置处的光谱反射宽度,并使整个系统充分接收掌纹信息,通带半宽度定为

8~12 nm 较为合适。信噪比  $R_{SN}$  可用光源的光谱能量分布  $I(\lambda)$  和 CCD 探测器的光谱探测灵敏度  $D(\lambda)$  表示为<sup>[8]</sup>

$$R_{SN} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)T(\lambda)D(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\lambda_1} I(\lambda)T(\lambda)D(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda_2}^{\infty} I(\lambda)T(\lambda)D(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

式中:  $T(\lambda)$  为窄带通滤光片的光谱透射率;  $\lambda_1, \lambda_2$  分

别为带通区域的边缘截止波长,  $350 \text{ nm} < \lambda < \lambda_1$  与  $\lambda > 1100 \text{ nm}$  为滤光片的光谱截止区域。待系统选用的光源与探测器确定后, 只需确定滤光片的光谱性能指标就可确定系统的信噪比。

根据(1)式并结合掌纹图像采集系统, 选用的光源为 LED, 探测器为 CCD 光谱摄像机, 本设计确定的光谱特性参数如表 1 所示, 其中 OD6 表示光谱透射率  $T=10^{-6}$ 。

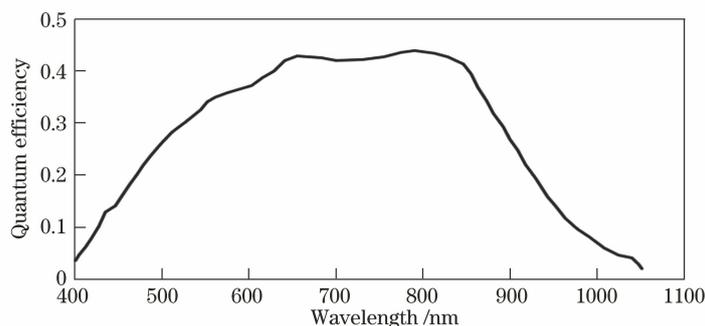


图 3 CCD 相机量子效率曲线

Fig. 3 Quantum efficiency curve of CCD camera

表 1 光谱特性参数

Table 1 Spectral characteristic parameters

Parameter	Value
Permissible error	$\pm 2 \text{ nm}$
Transmittance	$> 90\%$
Full width at half maximum	8-12 nm
Cut off range	400 nm- $\lambda_1, \lambda_2$ -1100 nm
Cut off depth	$> \text{OD6}$
(except passband)	

### 3 膜系设计

采用干涉截止膜堆叠加的设计方法, 在双面结

构设计中, 前表面(A 面)结构采用 F-P 模型, 其基本结构可表示为  $\text{Air}/(\text{HL})^x 2\text{mH}(\text{LH})^x \text{L}(\text{HL})^x 2\text{mH}(\text{LH})^x \dots / \text{Sub}$ 。其中 H、L 分别为高、低折射率材料,  $x$  为反射膜堆的叠加次数, 2mH 为间隔层, Sub 为基底材料。后表面(B 面)膜系采用截止膜堆叠加的方式进行组合。

#### 3.1 F-P 模型的基础理论

在 F-P 滤光片中, 利用史密斯方法将膜系中被选定的膜层分离, 使整个组合的膜系可以分离成两个有效的界面。考虑光在其任一膜层的反射透射特性, 可推导出多层膜的透射率表达式<sup>[8-9]</sup>

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \cdot \frac{1}{1 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 \left[ \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) \right]} \left/ (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 \right. \quad (2)$$

式中:  $R_1, R_2$  为分别 A、B 面反射膜堆的反射率;  $T_1, T_2$  为分别 A、B 面的透射率, 在计算过程中可近似为常数;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为 A、B 面在波长  $\lambda$  的反射相位;  $\delta = 4\pi n d \cos i / \lambda$  为间隔层的位相厚度, 其中  $n, d$  分别为多膜层的折射率和厚度,  $i$  为折射角。令  $T_0 = T_1 T_2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2$ ,  $F = 4\sqrt{R_1 R_2} / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2$ ,  $\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$ , 则  $T = T_0 / (1 + F \sin^2 \varphi)$ 。当  $\sin^2 \varphi = 1, R_1 = R_2$  时,  $T_{\min} = 1 /$

$(1 + F)$ , 且 F-P 模型两侧反射膜堆的反射率越大, 得到的  $F$  数越大, 截止深度值越大。

由(2)式可知, 当  $\varphi$  为  $\pi$  的整数倍时, 透射率最大。假设在  $\varphi = 2k\pi$  处透射率达到峰值, 此时在峰值一半处的相位差  $\Delta\varphi = \epsilon$ , 则

$$\sin^2 \left[ \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) \right] = \sin^2 \left[ \frac{1}{2} \left( 2k\pi \pm \frac{\epsilon}{2} \right) \right] \approx \frac{\epsilon}{4} \quad (3)$$

$$\text{当 } R_1 = R_2 \text{ 时, } \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \left(\frac{\epsilon}{4}\right)^2} = \frac{1}{2},$$

可得到半角宽度  $\epsilon$

$$\epsilon = 2(1 - R_1) / \sqrt{R_1}. \quad (4)$$

固定  $n, d, i$  为常数, 对  $\delta$  求微分可得  $d\delta = -4\pi nd \cos i d\lambda / \lambda^2$ , 令  $d\delta = \epsilon$ , 取  $d\lambda = \Delta\lambda_k$  (第  $k$  个透射带的半宽度), 并由  $2nd \cos i = k\lambda$  (光程差为  $\lambda$  的整数倍), 可得到通带半宽度的表达式为

$$\Delta\lambda_k = \frac{\lambda^2 \epsilon}{4\pi nd \cos i} = \frac{\lambda^2}{2\pi nd \cos i} \frac{(1 - R_1)}{\sqrt{R_1}} = \frac{\lambda}{\pi k} \frac{1 - R_1}{\sqrt{R_1}}. \quad (5)$$

### 3.2 设计思路

本实验的设计思路分为以下几个部分<sup>[10]</sup>:

1) 确定通带中心波长为  $(\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ .

2) 由  $\lambda_0 = 2nd / m$  确定干涉级次  $m$ ,  $m$  的取值在一定的限制范围内, 通常情况取  $m = 1, 2, 3$ .

3) 确定反射膜层的叠加次数  $x$ . 对于高折射率中间层,

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{4n_G n_L^{2x} (n_H - n_L)}{\pi m n_H^{2x+1} (n_H - n_L + n_L / m)}, \quad (6)$$

对于低折射率中间层,

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{4n_G n_L^{2x-1} (n_H - n_L)}{\pi m n_H^{2x} (n_H - n_L + n_L / m)}, \quad (7)$$

式中:  $2\Delta\lambda$  为通带宽度;  $n_H, n_L$  分别为高、低折射率材料的折射率;  $n_G$  为玻璃基底的折射率.

4) 通过调节匹配层、耦合层及腔数等参数, 形成多半波结构, 获得高透射、矩形度及陡度较好的通带.

5) 设计 400~1100 nm 的截止膜系 (通带除外). 干涉截止膜系由长波通  $(0.5HL0.5H)^s$  和短波通  $(0.5LH0.5L)^s$  两种结构叠加,  $s$  为循环次数. 截止区的带宽只与  $n_H$  和  $n_L$  的比值有关, 而与  $s$  无关, 该比值越大, 截止范围越宽; 而  $s$  越大, 截止深度值越大, 本文为了获得足够大的截止深度值, 取循环次数  $s = 16$ .

### 3.3 520 nm 滤光片的设计

在可见光、近红外波段, 4 种波长的设计方法基本一致, 本文以  $\lambda_2 = 520$  nm 为设计波长进行详细说明. A 面采用  $\text{Air} / [(HL)^x 2mH(LH)^x L]^n / \text{Sub}$  为基础膜系结构. H 为  $\text{TiO}_2$ , 折射率  $n_H \approx 2.35$ ; L 为  $\text{SiO}_2$ , 折射率  $n_L \approx 1.46$ ; Sub 为 K9 玻璃, 基底的折射率  $n_G \approx 1.52$ . 当  $m = 3$  时, 经 (5)~(7) 式计算得出  $x \approx 2$ , 并采用三腔 F-P 结构, 得到相关系数  $m = 3, x = 2, n = 3$ , 另增加两个反射堆  $(HLH4LHLH)$  来提高波形的矩形度<sup>[11-17]</sup>. 此时 A 面的主膜系的结构为:  $HLH4LHLHLHLHL6HLHLHLHLHL6HLHLHLHLHL6HLHLHHLH4LHLHL$ . A 面的总膜层数为 52 层, 物理厚度为 5143.24 nm. 在 516~524 nm 波长范围内进行膜层厚度优化, 使每个膜层的厚度在 20~120 nm, 得到  $T \approx 95\%$ , 其光谱的通带透射率曲线和截止深度曲线如图 4 和图 5 所示.

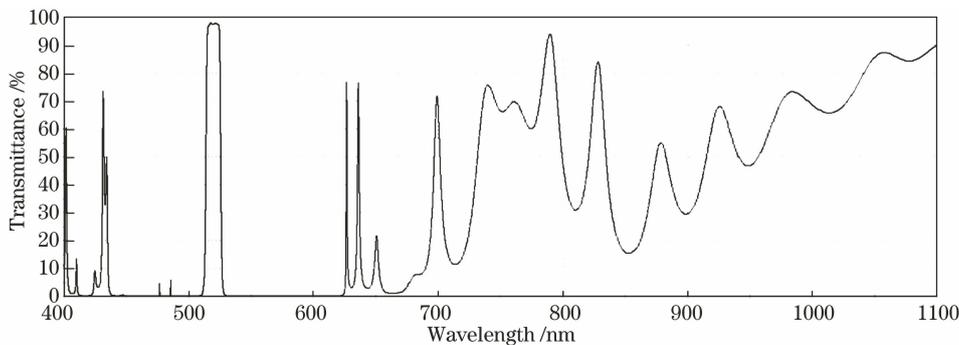


图 4 A 面通带透射率曲线

Fig. 4 A-plane transmittance curve

根据 A 面的截止深度曲线, 并经过多次计算、模拟、优化, 最终选定 3 个截止膜系叠加, 其中参考波长分别为 425 nm、680 nm、854 nm. 一个长波通干涉截止膜系  $(0.5HL0.5H)^{16}$ , 被用于截止短波区域 (400~482 nm); 两个短波通截止膜系  $(0.5LH0.5H)^{16}$ , 被用于截止长波区域 (600~1100 nm). 在基本膜系的最

外层增加一层  $\text{SiO}_2$  (L 层) 来与空气界面匹配, 达到增透的效果. 采用 Macleod 设计软件中的单纯形优化方法, 优化后 B 面的结构为  $(0.807L1.747H0.807L)^{16} (1.615L1.747H1.615L)^{16} (0.501H0.997L0.501H)^{16} 1.292L$ . B 面的总膜层数为 97 层, 物理厚度为 6137.64 nm, 其截止深度曲线如图 6 所示.

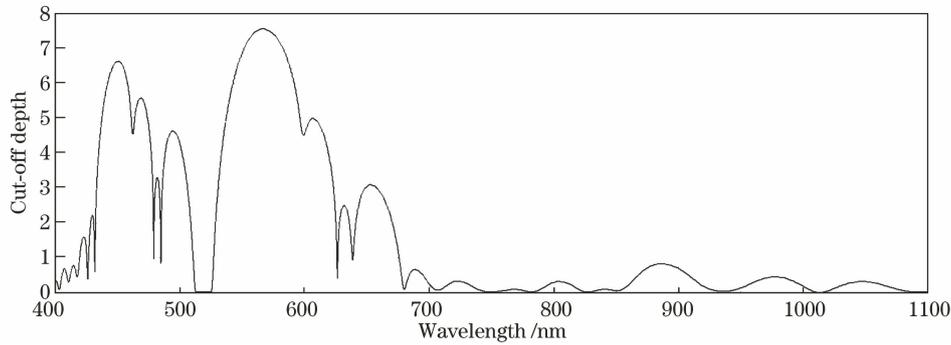


图 5 A 面截止深度曲线

Fig. 5 Cut-off depth curve of A-plane

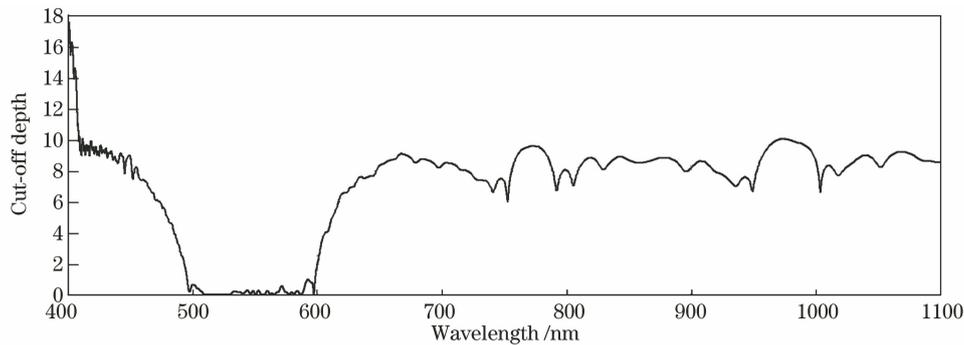


图 6 B 面截止深度曲线

Fig. 6 Cut-off depth curve of B-plane

通过 Macleod 膜系设计软件的 Stack 模块进行 A、B 面叠加,由于干涉叠加效应,透射光谱区域并不光滑,因此再次采用单纯形优化方法对膜层厚度进行优化,优化叠加后的光谱曲线如图 7 所示。

结合 3.2 节的公式计算得到中心波长  $\lambda_0$  为 519.826 nm,通带半宽度为 10.8 nm。

采用对 520 nm 滤光片的设计方法分别对 470 nm、630 nm、880 nm 3 种光学薄膜滤光片进行设计,区别在于 B 面截止膜系的参考波长的选取,三通道的参考波长、总膜层数及总膜层厚度如表 2 所示。最终设计的四通道滤光片的光谱曲线如图 8 所示,光谱性能指标如表 3 所示。

表 2 470 nm、630 nm、880 nm 滤光片的具体膜层指标

Table 2 Specific film indexes of 470 nm, 630 nm, and 880 nm filters

Central wavelength /nm	470	630	880
Total number of film layers on side A	52	52	52
Total film thickness on side A /nm	5354.44	5872.63	6654.39
Total number of film layers on side B	97	97	97
Total film thickness on side B /nm	6087.41	6325.96	7032.42
Reference wavelength /nm	430,625,840	510,736,920	554,726,1000

表 3 四通道滤光片的光谱性能指标

Table 3 Spectral performance index of four channel filter

Central wavelength /nm	470	520	630	880
Transmittance /%	91.4	90.7	93.6	92.8
Full width at half maximum of passband /nm	9.7	10.8	11.4	11.7

#### 4 可行性分析

最终设计的四通道滤光片 A 面有 52 层, B 面有 97 层,并且各层膜的厚度均在 20~120 nm 范围

内,可采用离子源辅助电子枪蒸发的方法镀膜。在镀膜过程中,采用一种高精度膜厚光学监控方法,针对监控波长的选择所引起的误差进行模拟,并利用石英晶体振荡法对膜层材料的蒸发速率进行监控。

根据以往的实验结果<sup>[18-20]</sup>,对于所选取的材料 TiO<sub>2</sub>,将蒸发速率控制在 0.3 nm/s 左右并保证真空室内的氧分压,使得膜层充分氧化;将 SiO<sub>2</sub> 的蒸发速率控制在 0.7 nm/s 左右,并保证均匀平稳蒸

发,从而降低对膜层厚度的监控误差,保证各膜层分布均匀,光谱性能指标的控制误差在 2 nm 以内;在透射率方面,由于误差的累积,波纹变大,透射率可能会降低,但可保证在 90%以上,满足应用要求。

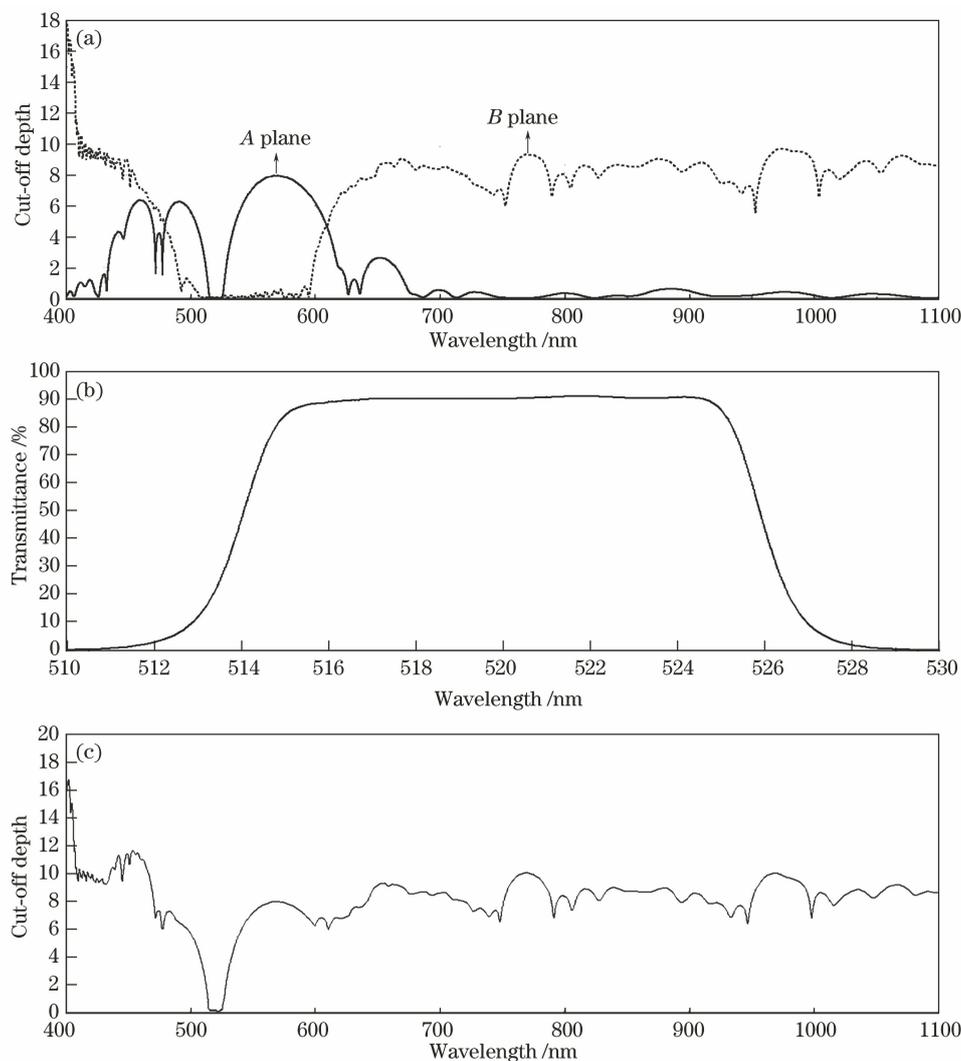


图 7 优化叠加后的光谱曲线。(a)双面截止深度曲线;(b) 520 nm 滤光片透射率曲线;(c) 520 nm 滤光片截止深度曲线

Fig. 7 Spectral curves after optimized superposition. (a) Double-sided cut-off depth curves; (b) transmittance curve of 520 nm filter; (c) cut-off depth curve of 520 nm filter

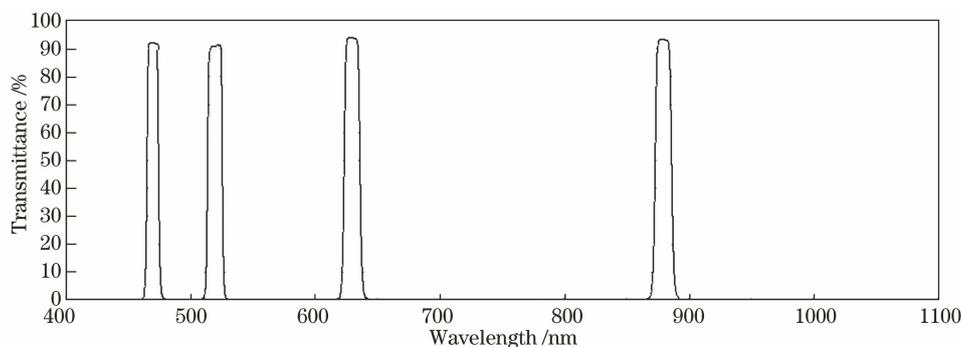


图 8 四通道滤光片的透射率光谱曲线

Fig. 8 Spectral curve of transmittance of four-channel filter

## 5 结 论

针对图像采集系统设计了一种滤光轮式四通道光学薄膜滤光片,应用基于干涉截止膜系叠加的设计方法,以 520 nm 滤光片为例,采用双面膜系设计结构,总膜层数为 149 层,透射率  $T_{520\text{ nm}}$  约为 90.7%,通带半宽度为 10.8 nm,截止深度大于 OD6,470 nm、630 nm、880 nm 三通道滤光片均满足设计指标。

## 参 考 文 献

- [1] Cui J R. The research on recognition and fusion methods based on multispectral and 2D/3D palmprint [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. 崔金荣. 基于多光谱和 2D/3D 掌纹的识别与融合方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] Chen J. Development of microstructure narrowband filter[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017. 陈佳. 微结构滤光片的研制[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
- [3] Jin B. Design, fabrication and measurement of multichannel thin film filters [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 金波. 多通道薄膜滤光片的设计、制备与测试[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] Yuan W Q, Yang B. Research on light source for non-contact hand imaging acquisition system [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7): 783-787. 苑玮琦, 杨冰. 非接触手成像系统图像采集光源的研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 783-787.
- [5] Zhong X W. Study of non-contact multi-spectral hand imaging light system [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015. 钟晓雯. 非接触多光谱手成像光学系统研制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [6] Wu W. Technique study of palm vein image recognition[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013. 吴微. 手掌静脉识别技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [7] Fu Q, Xiangli B, Jing J J. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0211001. 付强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0211001.
- [8] Cao J Z, Xu P, Li J Z. Fundamentals of thin film optics and thin film technology[M]. Beijing: Science Press, 2014. 曹建章, 徐平, 李景镇. 薄膜光学与薄膜技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 140-148. 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 140-148.
- [10] Hou H G. Design and fabrication of narrow-band filter for CO<sub>2</sub> gas detection[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. 侯海港. 检测 CO<sub>2</sub> 气体用窄带滤光片设计与制备[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [11] Zhu Y Q. Design of three-channel filter based on F-P filter[J]. Vacuum, 2019, 56(5): 74-76. 朱元强. 基于 F-P 滤光片的三通道滤光片的设计[J]. 真空, 2019, 56(5): 74-76.
- [12] Wang J, Xu J Q, Su J H, et al. Design, fabrication and laser damage characteristics of optical filters using at the wavelength of 850 nm [J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 112-118. 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.
- [13] Meng Y C, Tan W H, Huang Z M. An iterative formula for the reflection coefficient of multi-layer thin film and its application in the design of optical all pass filter[J]. Chinese Journal of Lasers B, 2002, 11(2): 144-148.
- [14] Zhang M. Wavelength optimization based on the influence factors of optical narrow band filter [J]. Information & Communications, 2020, 33(1): 31-33. 张明. 基于光学窄带滤光片影响因素的波长优化[J]. 信息通信, 2020, 33(1): 31-33.
- [15] Yoneshima K, Fujii G, Nakamura M. A study on robust design method for narrow band precision optical filter against temperature fluctuation[J]. The Proceedings of Conference of Hokuriku-Shinetsu Branch, 2017, 2017.54: I033.
- [16] Anusha N P, Sharan A. Design of narrow band multi-channel optical filters using zero index medium [J]. International Journal of Modern Physics B, 2018, 32(15): 1850188.
- [17] He Z Y, Jiao H F, Cheng X B, et al. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0231002. 贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报, 2014,

34(2): 0231002.

- [18] Lu W. Ultra narrow band pass optical thin film filter and film thickness generation method: CN1354371A [P]. 2001-12-07.  
陆卫. 超窄带通光学薄膜滤光片及膜层厚度产生方法: CN1354371A [P]. 2001-12-07.
- [19] Li S. Study and fabrication of 905 nm narrow band-pass filter [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.  
李珊. 905 nm 窄带滤光片的设计与制备 [D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [20] Duan Y B. Design and preparation technology of multi-channel narrow band filter [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.  
段营部. 多通道窄带滤光片的设计与制备技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2020.