

# 低角度效应虹膜识别滤光片的研制

刘冬梅<sup>1\*\*</sup>, 岳鹏飞<sup>1\*</sup>, 付秀华<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 曹洪玉<sup>1</sup>, 李爽<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444

**摘要** 随着图像识别技术的不断发展,人脸识别系统对虹膜识别滤光片的要求不断提高,光在大角度入射时,光谱偏移量往往较大而导致识别失败,因此急需一种低角度效应良好的带通滤光片。利用光谱拆分原理设计了一种大角度、小偏移量的带通滤光片。通过调节氢气流量使得 Si-H 在增大折射率的同时仍能保持较低的吸收率,从而改善虹膜识别滤光片的角度效应。基于对薄膜材料沉积工艺的研究,采用一种特殊的膜系结构,解决了因薄膜内部结构疏松而发生的脱膜问题。测试结果表明,该膜系结构能满足虹膜识别滤光片的各项技术要求。

**关键词** 薄膜; 虹膜识别; 带通滤光片; 拆分技术; 角度效应; 折射率

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1131002

## Development of Iris Recognition Filter with Low-Angle Effect

Liu Dongmei<sup>1\*\*</sup>, Yue Pengfei<sup>1\*</sup>, Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Cao HongYu<sup>1</sup>, Li Shuang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China

**Abstract** With the development of image recognition technology, the demand for face recognition systems with an iris recognition filter is constantly increasing. With large incident angles, recognition failure often occurs owing to a large spectral offset; therefore, a bandpass filter with good low-angle effect is required. Herein, a bandpass filter with large angle and small spectral offset is designed based on the spectral splitting principle. By adjusting the hydrogen gas flow, the refraction index of Si-H is improved while maintaining the low absorption, enhancing the angle effect of the iris recognition filter. Based on available literature on the deposition of thin films, the problem of film removal due to its loose internal structure is solved herein by adopting a special film system structure; testing results show that this structure meets the technical requirements of iris recognition filters.

**Key words** thin films; iris recognition; bandpass filter; splitting technique; angle effect; refractive index

**OCIS codes** 310.6805; 310.1860; 310.6860; 310.4165

## 1 引 言

随着科技的创新,生物识别技术开始应用于手机等通讯设备中,如指纹识别、面部识别、虹膜识别<sup>[1]</sup>等。如今虹膜识别技术的应用范围越来越广泛,已应用于手机、平板电脑、门禁系统等,这是因为虹膜识别技术与其他生物识别技术相比更安全、便捷,为人们提供了更多的便利。在虹膜识别系统的使用中,虹膜识别滤光片的品质是影响其使用体验的重要一环。在实际应用中,虹膜识别系统的核心光学元件——滤光片需工作在特定的入射角下。当

光波的入射角超出特定的角度范围时,滤波特性会发生很大的改变,导致识别失败<sup>[2-3]</sup>。

科研人员早已开始研究光以大角度入射的情况,如:2004年,徐晓峰等<sup>[4]</sup>使用 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 两种材料设计了入射角为 0°~80°的多层减反射薄膜,其 p 偏振光和 s 偏振光在 600~700 nm 波段的透射率可达 95% 以上;2007年,徐晓峰等<sup>[5]</sup>使用 MgF<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 这 3 种材料设计了入射角为 0°~70°的多层减反射薄膜,其 p 偏振光和 s 偏振光在 400~700 nm 波段的透射率可达 90% 以上。然而,关于光以大角度入射到带通滤光片的研究目前还不多

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-06-28; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

\* E-mail: yuepengfeifilm@126.com; \*\* E-mail: sjx8811@sohu.com

见,其中关于虹膜识别滤光片的研究更是少见。

2018年,张睿智等<sup>[6]</sup>基于Si-H和SiO<sub>2</sub>材料研制了带通滤光片,当光的入射角为30°时,滤光片在940 nm波段下的偏移量为12 nm,通带的透射率约为90%;2016年,Hendrix等<sup>[7]</sup>基于Si-H和SiO<sub>2</sub>材料研制了滤光片,当光以30°角入射时,其在850 nm波段的偏移量为12.2 nm,通带透射率约为92%,且薄膜厚度超过5 μm。目前的报道都是基于有效入射角度为30°的虹膜识别滤光片。

根据调查所得数据分析可知,在日常的工作和生活中,有效入射角度为30°的滤光片并不能满足人们的需求。使用的角度超过30°后,滤光片的滤波特性会发生改变,导致识别失败,用户的使用体验不良。经测试可知,当有效入射角度为38°时,滤光片基本能够满足人们绝大多数情况下的使用需求,且光谱的偏移量在20 nm以内时都能满足虹膜识别系统的要求,而有效入射角度为38°的虹膜识别滤光片却罕有报道。

近年来,虹膜识别技术在手机等通讯设备中的全面投入使用,掀起了科研人员对虹膜识别滤光片的研究热潮。然而,将入射角度(AOI)由30°增大到38°后,滤光片的偏移量会超过20 nm,导致识别精度下降,无法满足人们的正常使用需求,这是因为虹膜识别滤光片在倾斜使用时会产生偏振效应,且倾斜角度越大,偏振效应越强。为了削弱偏振效应的影响,笔者决定从材料角度展开研究。材料的折射率越高,其消偏振效果就会越好<sup>[8]</sup>。因此,通过选择折射率高的材料进行膜系设计,并对沉积工艺进行优化来提高材料的折射率,可以达到减小滤光片偏振效应的目的。

本文利用950 nm波段近红外光抗干扰成像能力强的特性<sup>[9]</sup>,以950 nm为中心波长,通过对材料进行分析、结构设计以及工艺参数优化,研制出了符合虹膜识别系统要求的带通滤光片。

## 2 材料性能的研究

虹膜识别滤光片的基本要求<sup>[6-7]</sup>是在可见波段截止而在近红外波段透过。由于950 nm波段的近红外光抗干扰成像能力强,因此通带位置设计在950 nm波段,透射率应保持在92%以上,越高越好,以免降低滤光片的识别精度。同时,从带通滤光片的制备难度和虹膜识别灵敏度等方面综合考虑,认为带宽定为52~58 nm较为合适。

虹膜识别系统对带通滤光片的通带透射率、曲

线陡度、截止深度、偏移量等有很高的要求,详细的设计要求如表1所示。

表1 滤光片的光谱设计参数

Table 1 Designed spectral parameters of filter

Item	AOI	
	0°	38°
Shift /nm	-	<20
Low-stopband (min) /nm	400	400
Low-stopband (max) /nm	890-920	870-900
SW-transmission (average) /%	<0.1	<0.1
SW-transmission (max) /%	<1.0	<1.0
Centre wavelength /nm	950	930
Passband /nm	925-975	905-955
Passband-transmission (average) /%	≥92	≥92
Full width at half maximum /nm	52-58	52-58
High-stopband (min) /nm	980-1010	960-990
High-stopband (max) /nm	1100	1100
LW-transmission (average) /%	<0.3	<0.3
LW-transmission (max) /%	<0.5	<0.5

根据设计要求,选择BK7玻璃作为基底。在可见波段至近红外波段,选择Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>和SiO<sub>2</sub>作为薄膜材料。在用已知薄膜折射率的情况下设计带通滤光膜过程中发现,间隔层的等效折射率与光谱的偏移量存在一定关系<sup>[10]</sup>,假定间隔层的等效折射率为 $n^*$ ,可使间隔层两侧高反射膜堆的反射相位为0或 $\pi$ ,即中心波长在 $2\pi n^* d \cos \theta / \lambda = m\pi$ 处( $d$ 为薄膜的物理厚度, $\theta$ 为光的入射角度, $m$ 为间隔层的偶数倍数),也就是说 $\lambda_0$ 是空气中的入射角 $\theta_0=0$ 时的中心波长,令 $g = \lambda_0 / \lambda$ ( $\lambda$ 为新的中心波长),可得

$$(2\pi n^* d / \lambda) \cos \theta = (2\pi n^* d / \lambda_0) g \cos \theta = m\pi, \quad (1)$$

$$g \cos \theta = 1, \quad (2)$$

令 $g = 1 + \Delta g$ ,则中心波长偏移量 $\Delta g = 1 / \cos \theta - 1$ ,则根据斯内尔定律 $\theta = \arcsin(\sin \theta_0 / n^*)$ 可知

$$\Delta g = \Delta \lambda / \lambda = \theta_0^2 / (2n^{*2}). \quad (3)$$

以上 $\theta_0$ 的单位为弧度,若 $\theta_0$ 的单位为度数,则斜向入射时中心波长的偏移量可表示为

$$\Delta g = \Delta \lambda / \lambda_0 = 1.5 \times 10^{-4} (n_0 / n^*)^2 \theta_0^2. \quad (4)$$

由(4)式可知:入射角 $\theta_0$ 一定时,若要使偏移量 $\Delta g$ 尽可能小,等效折射率 $n^*$ 应尽可能大,而Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>的折射率相对较小,因此应寻找更高折射率的材料。

查阅文献[11-12]可知:Si-H 材料目前常被用于近红外波段,由于其折射率很高,因此笔者决定采用磁控溅射技术制备 Si-H,在溅射硅靶过程中充入氢气,通过调节氢气的充气量和硅的比例,可以调节材料的折射率和吸收率。SiO<sub>2</sub>的折射率同样很小,故引入 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>作为中折射率材料进行设计。经过综合考虑,本文选择 Si-H 作为高折射率材料, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>作为中折射率材料, SiO<sub>2</sub>作为低折射率材料。

在磁控溅射技术中,材料的折射率对反应气体流量与靶材比例的变化十分敏感。在保持靶材的功率不变的情况下,减小反应气体流量,可以增大材料的折射率,但随着折射率增大,材料的吸收率也会随

之发生改变,吸收率的变化会严重影响薄膜通带位置的透射率,因此,如何获得高折射率且吸收率小的薄膜还需要进一步对工艺参数进行研究。

从薄膜的设计原理出发,在带通滤光片中使用高折射率材料作为间隔层,可以使其偏移量更小,故选用 Si-H 材料作为间隔层。在进行单层膜实验时,主要的目的是改善 Si-H 材料的折射率和吸收率。在靶材功率、等离子体辅助沉积设备(ICP)功率等工艺参数不变的前提下,通过改变氢气流量设计了一系列梯度实验。氢气流量分别为 90, 100, 110, 120, 130 mL/min 时的光学常数曲线如图 1 所示。

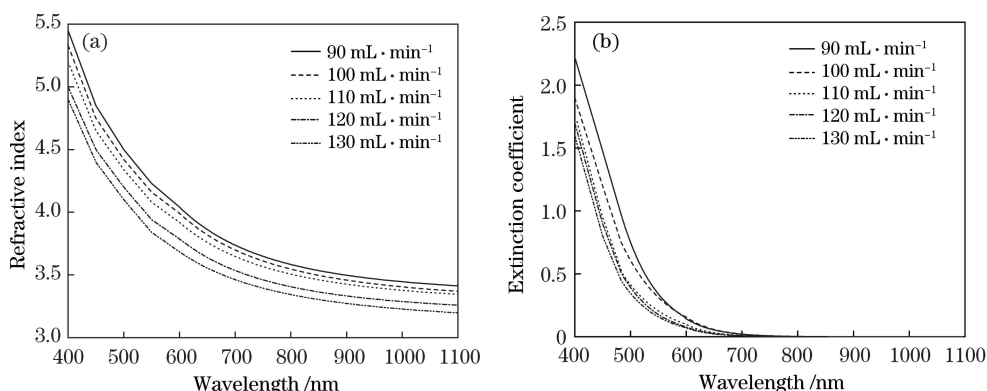


图 1 不同氢气流量下 Si-H 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 1 Optical constants of Si-H materials under different H<sub>2</sub> gas flows. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

不同氢气流量下 Si-H 在 950 nm 处的光学常数如表 2 所示。由表 2 可知:随着氢气流量增大, Si-H 材料的折射率  $n$  和消光系数  $k$  均降低;当氢气流量为 110 mL/min 时,制备的 Si-H 材料同时具备了高折射率和低吸收率特性。使用该组光学常数进行设计时,光谱的偏移量较小,而且通带位置的透射率较高。当氢气流量超过 110 mL/min 后, Si-H 的折射率明显降低,而吸收率下降的幅度很小,仍在  $10^{-5}$  量级。故选用氢气流量为 110 mL/min 的设计方案。

表 2 不同氢气流量下 Si-H 在 950 nm 处的光学常数

Table 2 Optical constants of Si-H at 950 nm under different H<sub>2</sub> gas flows

Gas flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	$n$	$k$
90	3.469	$1.79 \times 10^{-4}$
100	3.429	$1.37 \times 10^{-4}$
110	3.400	$3.93 \times 10^{-5}$
120	3.308	$3.40 \times 10^{-5}$
130	3.249	$2.28 \times 10^{-5}$

采用常规工艺制备的 Si-H 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 内应力较大,因此在多层膜的制备过程中,若将两种材料直接结合,就会导致内应力过大,进而发生崩膜现象。通过对 ICP 的功率进行调整,最终制备得到符合要求的 3 种材料,实验测得了这 3 种材料的光谱数据,采用 Optichar 软件拟合后得到的光学常数分别如图 2~4 所示。

设计中采用的材料的光学常数如表 3 所示。将表 3 中 Si-H 的光学常数与查阅到的数据进行对比后可知:当 Si-H 的折射率达到 3.4 以上时,消光系数会达到  $10^{-4}$  量级以上,此时的吸收率过大,增大了设计的难度;而 Si-H 材料在折射率和消光系数两方面比较均衡,可以降低设计和制备的难度。

表 3 设计中采用的各材料的光学常数

Table 3 Optical constants of materials used in design

Materials	$n$	$k$
Si-H	3.400	$3.93 \times 10^{-5}$
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2.015	$1.85 \times 10^{-6}$
SiO <sub>2</sub>	1.442	0

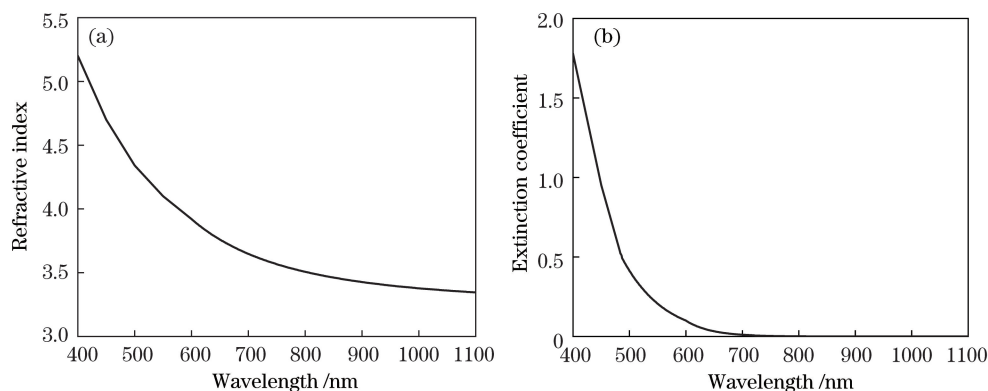


图 2 Si-H 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 2 Optical constants of Si-H materials. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

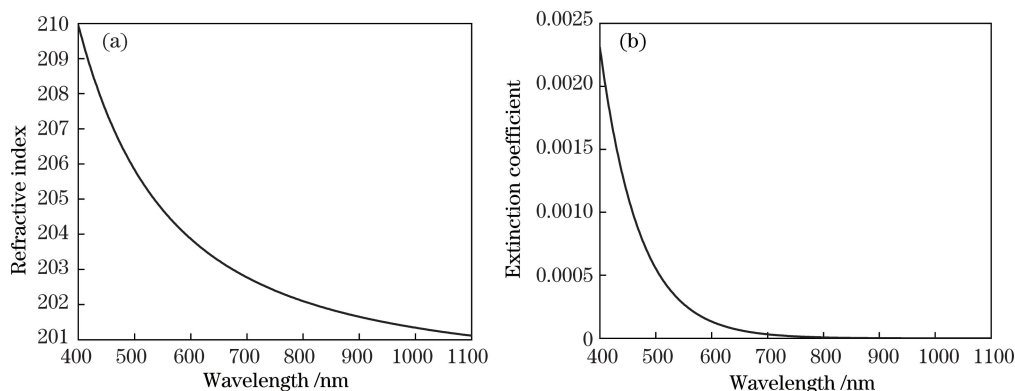


图 3 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 3 Optical constants of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> materials. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

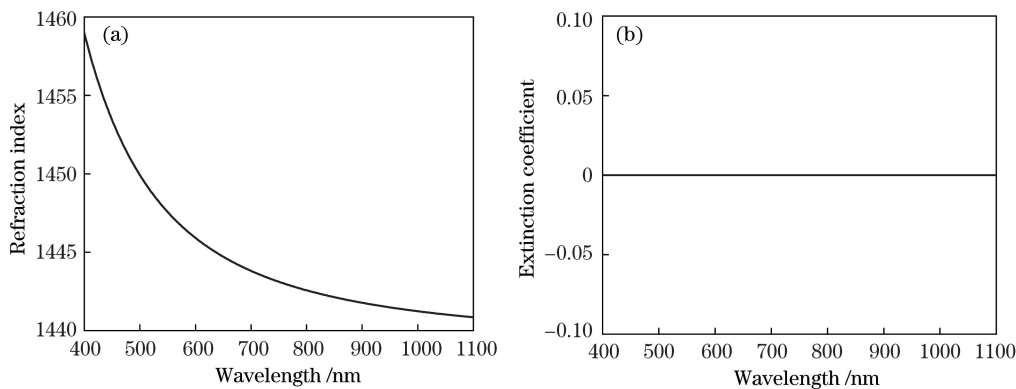


图 4 SiO<sub>2</sub> 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 4 Optical constants of SiO<sub>2</sub> materials. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

### 3 膜系设计

该带通滤光片的通带透射率较高,截止带透射率很低,如果采用单面设计,设计过程会十分复杂,而且膜层很厚,膜层数目很多,所以无论是从现有的制备工艺角度考虑,还是从后期的光谱调试角度考虑,单面设计方案基本无法实现。采用拆分技术<sup>[13]</sup>可将光谱的设计要求合理地分在两个面上。拆分

后,前表面膜系实现(950±25) nm 高透射,980~1100 nm 截止;后表面膜系在保证(950±25) nm 高透射的基础上对截止带进行深度截止。综合考虑后决定,前表面使用法布里-珀罗(F-P)干涉型膜系,后表面使用长波通干涉截止膜系。

#### 3.1 前表面膜系设计

F-P 干涉型膜系的膜层结构可以等效为 2 个反射层和 1 个间隔层的形式:反射层|间隔层|反射层,



分别使用高、中折射率材料作为间隔层,具体的2种形式为:Sub|(HM)<sup>s</sup>H2mM(HM)<sup>s</sup>H|Air和Sub|(HM)<sup>s</sup>2mH(MH)<sup>s</sup>|Air,其中:Sub为基底,Air为空气,H、M分别为高、中折射率材料,s为周期数<sup>[14]</sup>。

为了降低角度对偏移量的影响,应避免在主膜系中加入SiO<sub>2</sub>;否则将导致光谱的偏移量超出规定的技术指标,因此主膜系中仅使用Si-H和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>进行设计。考虑到膜层与基底的牢固度,插入SiO<sub>2</sub>作为第一层。由于Si-H内的应力为张应力,Si-H作为最外层会比较容易发生膜裂现象;而SiO<sub>2</sub>中的应力为压应力,可以增强膜层的抗裂能力。利用膜系设计软件进行模拟,分别使用SiO<sub>2</sub>和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>作为最外层,对比两者在水煮后出现少许脱膜现象的光谱,模拟结果显示:若将SiO<sub>2</sub>作为最外层,少许脱膜对光谱基本无影响;若将Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>作为最外层,少许脱膜对光谱的影响较大。考虑到薄膜的防水性能和对膜层的保护作用,决定在最外层使用SiO<sub>2</sub>。

滤光片的通带宽度是指半峰全宽(FWHM),通常以2Δλ表示。当间隔层为高折射率材料时,其计算公式为<sup>[15]</sup>

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_M^{2x} n_g}{m\pi n_H^{2x+1}} \cdot \frac{n_H - n_M}{(n_H - n_M) + n_M/m}, \quad (5)$$

式中:x为反射膜内高折射率膜的层数;n<sub>g</sub>为基底材料的折射率;n<sub>H</sub>为高折射率材料的折射率;n<sub>M</sub>为中折射率材料的折射率。

因选用高折射率材料Si-H作为间隔层,又已知n<sub>H</sub>、n<sub>M</sub>和基底材料的折射率n<sub>g</sub>,以及中心波长λ<sub>0</sub>,为了使通带宽度达到技术指标的要求,取m=2,x=1。

借助Macleod软件并采用多腔带通结构进行膜系设计,再根据详细的技术指标进行优化,优化后的膜系结构为:Sub|1.64L0.44H1.46M3.80H0.60M1.20H0.56M1.36H0.96M2.12H0.48M1.48H0.48M1.52H0.44M1.64H0.40M1.64H0.60M2.16H0.76M1.20H0.60M1.56H0.48M1.64H0.12M2.48H0.20M1.64H0.48M1.64H1.16M1.28H0.96M5.68H2.68L|Air,其中,L为低折射率材料。

前表面的理论设计光谱透射率如图5所示,是不考虑背面反射情况下的设计曲线。可以看出:当光的入射角为0°时,925~975 nm波段的平均透射率为99.41%,1000~1100 nm波段的平均透射率为0.03%;当光的入射角为38°时,905~955 nm波段的平均透射率为98.70%,980~1100 nm波段的

平均透射率为0.03%,光谱的偏移量为19.3 nm,薄膜厚度为4.4 μm。

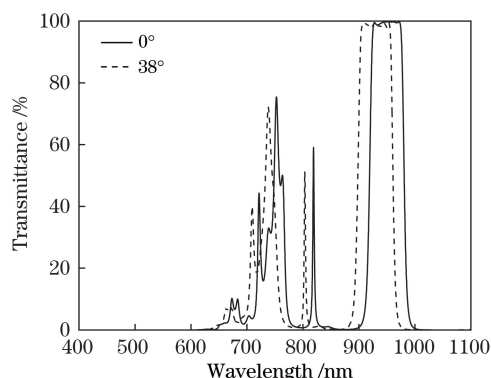


图5 前表面的理论光谱曲线

Fig. 5 Front surface theoretical spectral curve

### 3.2 后表面膜系设计

根据光谱设计要求,后表面选择长波通干涉截止型膜系作为初始膜系进行设计优化较为合理。长波通干涉截止膜系的初始膜系为Sub|(0.5HL0.5H)<sup>s</sup>|Air,利用Macleod软件进行设计,再根据光谱设计要求进行优化,优化后的膜系为:Sub|1.04H0.32L2.48H0.96L1.80H0.32L1.92H1.68L0.96H0.80L5.44H1.28L4.36H1.96L4.08H2.68L4.04H1.88L4.44H1.20L1.68H0.52L1.40H2.44L|Air。其理论光谱曲线如图6所示,是不考虑背面反射时的光谱曲线。从图6可以看出:在0°和38°入射时的光谱可保证(950±25) nm高透射的基础上,实现了400~800 nm波段截止,而且光以38°入射时的光谱同样符合技术指标的要求。将前、后表面膜系导入Macleod软件,叠加后的理论光谱曲线如图7所示。由图7可知,0°和38°均满足要求。

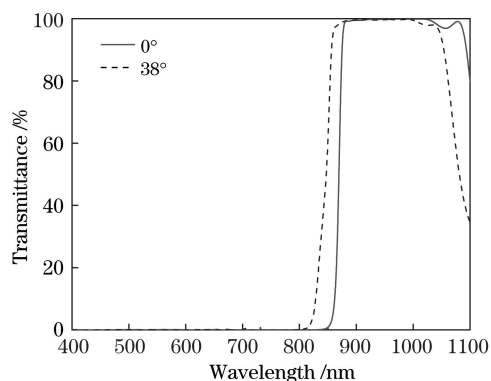


图6 后表面的理论光谱曲线

Fig. 6 Back surface theoretical spectral curve

## 4 薄膜的制备

采用射频磁控溅射技术制备Si-H、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>和

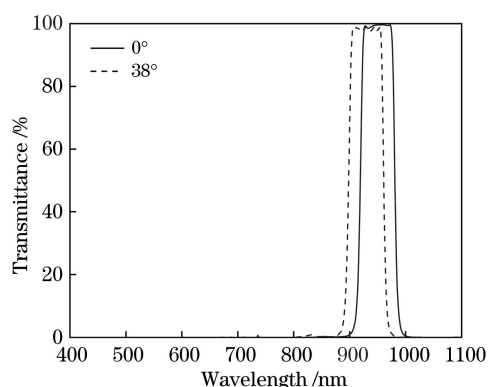


图 7 双面透射理论光谱曲线

Fig. 7 Double-sided transmission theoretical spectral curve

表 4 工艺参数

Table 4 Process parameters

Materials	TG1/2-Si			ICP * 2			
	Power /kW	Ar flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	Power /kW	Ar flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	O <sub>2</sub> flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> flow / (mL·min <sup>-1</sup> )
Si-H	13	280	3	600	0	110	0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	12	280	2	600	0	0	560
SiO <sub>2</sub>	15	280	4	120	240	0	0

## 5 测试结果与分析

光谱测试设备采用美国安捷伦公司生产的型号为 Cary 7000 的分光光度计,镀膜后的前、后表面光谱曲线分别如图 8 和图 9 所示。

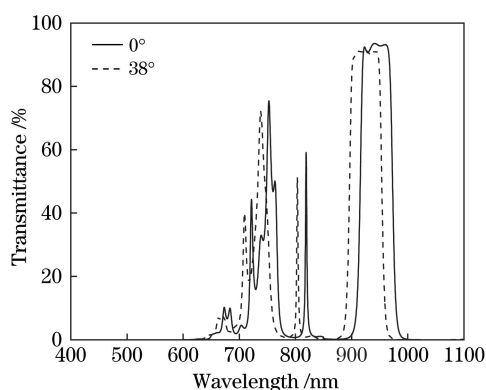


图 8 前表面的光谱测试曲线

Fig. 8 Front surface spectral test curve

将前、后表面镀膜的测试样片分别标记为 1 号和 2 号,再一起放入沸水中煮 0.5 h 后取出。目视 1 号样片颜色由黄色变为淡黄色,且为发雾态,光谱测试曲线发生了明显变化,透射率也明显降低,水煮后光谱的变化如图 10 所示。2 号样片目视未见颜色变化或明显脱膜,光谱测试曲线也无变化。通过逆向反演分析法<sup>[16]</sup>模拟 1 号样片最外层 SiO<sub>2</sub> 的厚

SiO<sub>2</sub> 薄膜,所用设备是光驰科技(上海)有限公司生产的型号为 NSC-15 的磁控溅射镀膜机,实验中使用两对高纯硅靶,靶与基底间的距离为 55 cm,本底真空度为  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa。此镀膜机配备了两台 ICP,在正式镀制前,将工件盘提速至 80 r/min,之后开启 ICP,对基底表面进行清洗,清洗 60 s 后开始镀制。在沉积过程中全程使用等离子体辅助沉积技术对薄膜进行辅助沉积,这样有助于提升薄膜的致密度。具体的实验参数如表 4 所示,其中, TG1/2-Si 是指实验所使用的两对靶材均为硅靶, ICP \* 2 是指实验过程中两个 ICP 在同时工作。

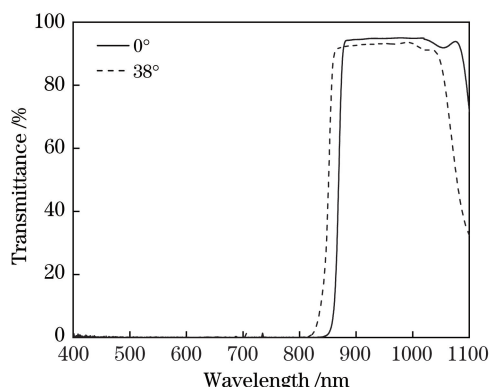


图 9 后表面的光谱测试曲线

Fig. 9 Back surface spectral test curve

度,发现 SiO<sub>2</sub> 脱膜。经分析可知,在沉积过程中 ICP 功率过低,使得薄膜的外部保护层(SiO<sub>2</sub>层)的内部结构疏松,在高温、高湿的环境下水汽易进入膜层,引发脱膜;而且材料的折射率发生了改变,造成 1 号样片水煮后的光谱曲线发生明显变化,因此需要对 SiO<sub>2</sub> 的制备工艺进行优化。为了提高 SiO<sub>2</sub> 膜层的致密性,在镀制 SiO<sub>2</sub> 膜层时将 ICP 功率增大至 4 kW, Si-H 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜层的工艺不变。将镀制完成后的样片进行光谱测试和水煮测试,调整工艺后水煮 0.5 h 的光谱测试曲线如图 11 所示。仔细观察样品可以发现,水煮后样品颜色无变化,且无明显的脱膜现象,水煮前后的光谱曲线基本一致,无明显变

化。通过调整 SiO<sub>2</sub> 的制备工艺解决了水煮脱膜问题,提升了薄膜在高温、高湿环境下的防水汽性能。

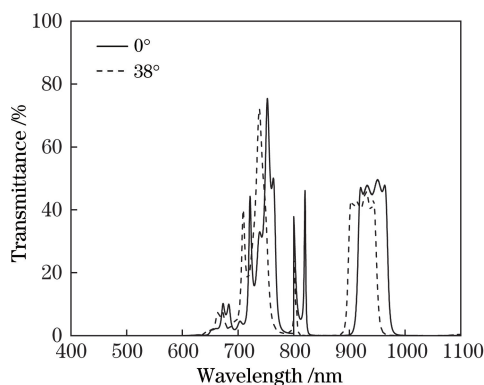


图 10 1 号样片水煮 0.5 h 后的光谱测试曲线  
Fig. 10 Spectral test curve of sample 1 after boiling for 0.5 h

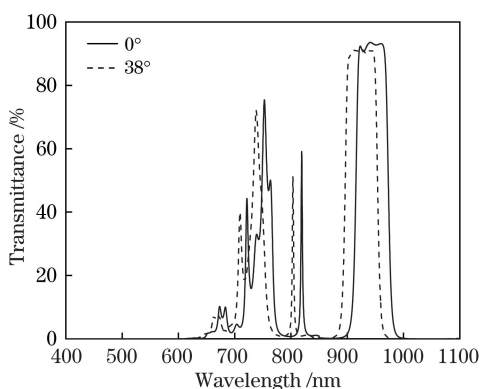


图 11 调整工艺后,1 号样片水煮 0.5 h 后的光谱测试曲线  
Fig. 11 Spectral test curve of sample 1 after adjusting the process and boiling for 0.5 h

双面镀膜的设计曲线与实际测试曲线的对比如图 12 所示。从图 12 可以明显看出:双面镀膜后的各项测试数据均符合技术指标要求,但实际测量曲线的透射率比设计曲线稍低一些。这是因为虽然通过提高 SiO<sub>2</sub> 层的 ICP 功率,提升了薄膜表面的致密性,但薄膜内部采用的仍是低 ICP 功率的工艺,导致薄膜内部结构较为疏松。同时,由于前表面的膜层数目较多,多层累计产生的散射所造成的能量损失较大。此外,薄膜中很多 Si-H 膜层的厚度较厚,因此 Si-H 的总厚度在膜层总厚度中所占比例较高,而 Si-H 的吸收率在 10<sup>-5</sup> 量级,多层叠加起来会导致吸收率偏大,这也会造成额外的能量损失。

对双面镀膜样品的前、后表面分别进行牢固度测试,将黏性不小于 3 N·cm<sup>-2</sup> 的胶带粘在薄膜表面,用力压平胶带,确保平整无气泡,再沿着与薄膜表面垂直的方向用力快速拉起胶带,两侧膜层重复 10 次均未发现脱膜。

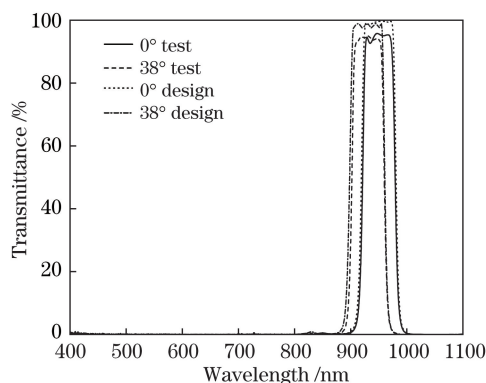


图 12 设计曲线与实际测试曲线的对比

Fig. 12 Comparison of design curve and actual test curve

## 6 结 论

基于 F-P 干涉型膜系和长波通干涉截止膜系的设计理论,利用 Macleod 膜系设计软件设计低角度效应的虹膜识别带通滤光片,并采用磁控溅射技术制备了低角度效应的虹膜识别带通滤光片。通过实验和逆向反演分析,改善了滤光片的角度效应,解决了薄膜在环测中因保护层内部结构疏松而脱膜的问题,薄膜的附着力良好。光在 0°~38° 入射时,制备的薄膜通带透过率保持在 93% 以上,偏移量为 19.2 nm,各项数据均能满足虹膜识别带通滤光片的技术指标。采用 Si-H、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 这 3 种材料进行设计和制备,不仅减少了膜层数量和减小了薄膜厚度,降低了生产成本,而且在不影响滤光片使用效果的前提下,缓解了虹膜识别系统使用时角度受限的情况,极大地提高了人们在移动设备上使用虹膜识别系统时的便捷性。开发高折射率、低吸收率和应力小的新材料,使其在光以大角度入射的条件下,光谱通带透过率更高且偏移量更小是下一步的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] He X F. Research on key technology of live iris recognition[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 1-6.  
何孝富. 活体虹膜识别的关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 1-6.
- [2] Shao B B, Wang P, Lu J C, *et al.* Influence of laser incidence angle on transmission characteristics of bandpass multilayer thin-film filters[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2009, 26(6): 1457-1460.  
邵碧波, 王平, 卢嘉春, 等. 激光入射角对干涉带通滤光片输出性能的影响[J]. 光谱实验室, 2009,

- 26(6): 1457-1460.
- [3] Bai S Y, Gu P F, Liu X, *et al.* Optical stability of thin film filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 576-580.  
白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 576-580.
- [4] Xu X F, Zhang F S, Fan B. The study of antireflection coatings of 600-700 nm at wide angle incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9): 1173-1176.  
徐晓峰, 张凤山, 范滨. 宽角度入射 600~700 nm 波段减反射薄膜的研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(9): 1173-1176.
- [5] Xu X F, Du X L, Xing H Z, *et al.* Study of antireflection coatings of 400-700 nm for broad angle range[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, 18(7): 886-888.  
徐晓峰, 杜西亮, 邢怀中, 等. 宽角度入射 400~700 nm 波段减反射薄膜的研究[J]. *光电子•激光*, 2007, 18(7): 886-888.
- [6] Zhang R Z, Tang J, Wang Y, *et al.* The method for preparing high refractive index silicon hydride film, high refractive index silicon hydride film, filter stack and filter: 201711061130.6[P]. 2018-03-27.  
张睿智, 唐健, 王迎, 等. 高折射率氢化硅薄膜的制备方法、高折射率氢化硅薄膜、滤光叠层和滤光片: 201711061130.6[P]. 2018-03-27.
- [7] Hendrix K D, Bradley R A, Grigonis M, *et al.* Optical filter and sensor system: US 9354369[P/OL]. 2016-05-31[2019-05-29]. <https://patents.glgoo.top/patent/US9354369B2/en>.
- [8] Zu X Y, Li L, Fu X H. Development of spectroscopic film for visible light depolarization medium[J]. *Science & Technology Information*, 2015, 13(4): 1-3.  
祖兴宇, 李琳, 付秀华. 可见光消偏振介质分光薄膜的研制[J]. *科技资讯*, 2015, 13(4): 1-3.
- [9] Zhang H J, Wang J Y. Anti-interference imaging system based on 940 nm active infrared illumination [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(1): 18-21, 32.  
张海劲, 王金玉. 基于 940 nm 红外光主动照明的抗干扰成像系统[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(1): 18-21, 32.
- [10] Li Z Z. Thin film optics and coating technology[M]. 5th ed. Taipei: Yi Hsien Publishing Co., Ltd., 2016: 243-244.  
李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 5 版. 台北: 艺轩图书出版社, 2006: 243-244.
- [11] Lairson B M, Mosier J, Gibbons K, *et al.* Reduced angle-shift infrared bandpass filter coatings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6545: 65451C.
- [12] Mao K N. Angle insensitive color filters covering the visible region[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 3-8.  
毛克宁. 可见光波段角度不敏感滤光片的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 3-8.
- [13] Fu X H, Liu W Q, Yin S P, *et al.* Dual-bandpass filter in infrared thermal imaging system for methane detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1231001.  
付秀华, 刘文奇, 尹士平, 等. 红外热成像甲烷探测系统的双通带滤波器[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1231001.
- [14] Xiong S F, Fu X H, Liu D M, *et al.* Study and fabrication of narrow-band filter film in methane gas detection and recognition system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0303003.  
熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 甲烷气体探测与识别系统窄带滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0303003.
- [15] Tang J F, Gu P F, Liu X, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 144-146.  
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: 144-146.
- [16] Xiong S F, Fu X H, Liu D M, *et al.* Narrow-band filter based on infrared absorption characteristics of methane gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1023003.  
熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 基于甲烷气体红外吸收特性窄带滤波器的研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 1023003.