

# 基于结构光 3D 成像技术的 945 nm 窄带滤光片研制

魏博洋<sup>1\*</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 付秀华<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李爽<sup>2</sup>, 周斌<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 5G 时代的到来, 结构光 3D 成像技术对不可见光接收模组窄带滤光片的要求不断提高。基于法布里-珀罗全介质型干涉仪膜系设计理论, 选择 Si-H 和 SiO<sub>2</sub> 分别作为高、低折射率材料, 采用光谱拆分法, 使用电感耦合磁控溅射技术和直流磁控溅射技术交替成膜, 以提高膜层的聚集密度, 降低膜层的粗糙度; 并通过辅助阳极降低成膜温度对通带光谱的影响。最终制备的滤光片以 945 nm 为中心波长, 对 926~952 nm 光的平均透过率达到 98.5%, 0°~38°通带偏移量为 13 nm。

**关键词** 薄膜; 3D 结构光; 窄带滤光片; 拆分法; 磁控溅射; 聚集密度; 辅助阳极

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1431001

## Development of a 945-nm Narrowband Filter Based on a Structured Light 3D Imaging Technology

Wei Boyang<sup>1\*</sup>, Liu Dongmei<sup>1</sup>, Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Li Shuang<sup>2</sup>, Zhou Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

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

**Abstract** With the advent of the 5G era, the requirement of structured light 3D imaging technology for the narrowband filter of the invisible light receiving module is significantly increasing. Based on the film design theory of the Fabuli-Boro full-medium type interferometer, Si-H and SiO<sub>2</sub> are selected as the high and low refractive index materials. Using the spectral resolution method, the inductively coupled magnetron sputtering technology and DC magnetron sputtering technology are used to alternately form the film to improve its aggregation density. The film's roughness is reduced. Besides, the film-forming temperature influence on the passband spectrum is reduced by the auxiliary anode. The final preparation takes a central wavelength of 945 nm. The average transmittance between 926 nm and 952 nm reaches 98.5%, and the offset of 0°-38° passband is 13 nm.

**Key words** thin films; 3D structured light; narrowband filter; resolution method; magnetron sputtering; aggregation density; auxiliary anode

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

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-03; 录用日期: 2020-11-14

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

通信作者: \*2824155502@qq.com

## 1 引言

20 世纪以来,三维(3D)成像技术备受人们关注。3D 显示技术包括眼镜式立体显示技术、裸眼式立体显示技术、四维光场、全息 3D 技术<sup>[1-4]</sup>,但前 3 种都是伪 3D 技术,只是给人以视觉上的立体感,并没有真正地还原物体。而全息 3D 技术难以实现高分辨彩色全息 3D 显示,且全息显示的每一帧都需要经过复杂的运算,其中包括傅里叶变换等过程,因此难以实现衍射级限制,从而无法提高色彩分辨率,全息 3D 技术的发展仍需要克服更多的困难。

通过查阅相关资料,发现结构光 3D 成像技术能够保存物体 3D 空间信息(包括 3D 形貌、灰度、颜色信息),并在重建过程中可以完整地恢复物体的 3D 特征<sup>[5-7]</sup>。图 1 为结构光 3D 成像技术示意图,首先由不可见光红外发射源向拍摄物体发射红外光,红外光的波长范围为 700~2500 nm,由于 800 nm 以下接近可见光的波长范围,因此波长小于 800 nm 的红外光极易受到可见光的干扰。而目前摄像头对 900 nm 以上的光感应较差,因此研究的红外波长主要集中在 800~900 nm。目前红外光发射源主要以垂直腔面发射器(VCSE)为主,利用 IR 接收组对被拍摄物体反射的红外光进行接收和处理,由于 VCSE 发射的是 940 nm 波长的红外光,因此在 IR 接收组需要将 940 nm 以外的红外光截掉,使 CMOS 只接收到 940 nm 的红外光。为达到此目的,需要使用窄带滤光片。窄带滤光片主要用于消除或过滤掉杂散光,以确保传感器(IR 接收组)接收到准确无误的信号,确保不会出现图像失真及乱码现象,实现大量数据实时传输<sup>[8-10]</sup>。

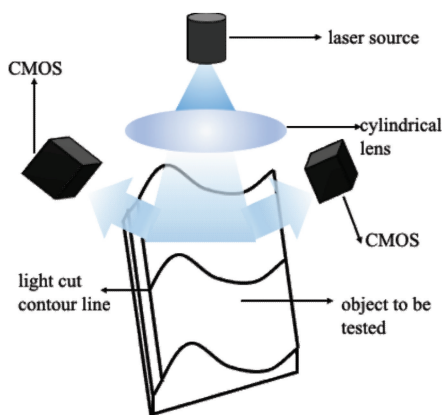


图 1 结构光 3D 成像示意图

Fig. 1 Schematic of structured light 3D imaging

随着 5G 时代的到来,结构光 3D 成像技术逐渐

被应用到数码通信领域,许多科研人员对结构光 3D 成像 IR 接收模组 945 nm 窄带滤光片进行了研究,发现目前主要存在以下问题:1)当对于入射角为  $0^\circ \sim 38^\circ$  时,通带偏移量较大,IR 接收模组不能准确接收物体反射光,导致成像质量下降。这是因为入射角的变化相当于滤光片倾斜带来的偏振效应,且这种偏振效应会随着入射角的增大而增强,随着材料折射率的增大而降低<sup>[11-12]</sup>。2)通带的透过率仅为 93% 且截止深度不够,导致颜色饱和度较差。对于  $(940 \pm 5)$  nm 窄带滤光片的研究,刘冬梅等<sup>[13]</sup>研制的 940 nm 低角度虹膜识别滤光片,当入射角为  $0^\circ \sim 38^\circ$  时,通带透过率仅在 93% 以上,偏移量为 19.2 nm,是目前以  $(940 \pm 5)$  nm 为中心波长的窄带滤光片在通带透过率和偏移量上的最好结果。

针对目前摄像头对 900 nm 以上的光感应较差以及滤光片通带透过率较低、偏移量超过 16 nm 的问题,本文以 945 nm 为中心波长,使用电感耦合磁控溅射技术和直流磁控溅射技术交替成膜,提高膜层的聚集密度,降低散射对通带透过率的影响,增加辅助阳极收集二次电子以降低成膜温度,研制出符合结构光 3D 成像 IR 接收模组的 945 nm 窄带滤光片。

## 2 薄膜材料的选取

依据结构光 3D 成像技术的使用要求,并考虑接收模组的使用需求以及制备难度,设计的带宽为 25~30 nm,相关技术指标如表 1 所示。其中,  $T_{50\%}$ 、 $T_{10\%}$  分别表示透过率为 50% 和 10%,  $T_{avg}$  表示透过率平均值,  $T_{abs}$  表示吸收率平均值,  $\Delta_{CW}$  表示入射角度范围。

表 1 滤光片的光谱设计参数

Table 1 Designed spectral parameters of filter

Item	Content	Specification
Incident angle $0^\circ$	Bandwidth@ $T_{50\%}$	$\leq 42$ nm
	Bandwidth@ $T_{10\%}$	$\leq 48.5$ nm
	$T_{avg}$ @934.2-961.8 nm	$\geq 98.5\%$
	$T_{abs}$ @934.2-961.8 nm	$\geq 90\%$
Incident angle $38^\circ$	Bandwidth@ $T_{50\%}$	$\leq 42$ nm
	Bandwidth@ $T_{10\%}$	$\leq 50$ nm
	$T_{avg}$ @925.6-951 nm	$\geq 98.5\%$
	$T_{abs}$ @925.6-951 nm	$\geq 90\%$
AOI shift	$\Delta_{CW}$ @ $0^\circ \sim 38^\circ$	$\leq 13$ nm

根据设计要求,以 D263T 玻璃为基底,在可见

及近红外波段的材料有 TiO<sub>2</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub>。对于膜料的选择要考虑膜料本身的机械牢固度、化学性能、应力。SiO<sub>2</sub> 折射率低,消光系数小,且在最外层具有保护作用,因此选择 SiO<sub>2</sub> 作为低折射率材料。倾斜入射时薄膜的相位厚度  $\delta = 2\pi nd \cos(\theta/\lambda)$ , 可以看作光学厚度为  $nd \cos \theta$  的材料,并且光学厚度随入射角变化,当倾斜角增大时,膜层的厚度减小。窄带滤光片厚度的变化占主导作用,而并非光学导纳,它会使滤光片的通带向短波长方向移动<sup>[14]</sup>。

对于腔层折射率为  $n^*$  的理想多层滤光片,  $m$  级次的峰值波长位置为

$$\frac{2\pi n^* d \cos \theta}{\lambda} = \frac{2\pi n^* \lambda_0}{\lambda_0} \cos \theta = m\pi, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为倾斜入射光的波长;  $\lambda_0$  为垂直入射光的峰值波长; 波数  $g = \frac{\lambda_0}{\lambda}$  用  $1 + \Delta g$  代替, 由于  $2\pi n^* d/\lambda_0 = m\pi$ , 有

$$1 + \Delta g = \frac{1}{\cos \theta}, \quad (2)$$

因此,

表 2 单层膜 Si-H 和 SiO<sub>2</sub> 的工艺参数

Table 2 Technological parameters of single layer Si-H and SiO<sub>2</sub>

Material	TG2-Si		TG3-Si		TG4-Si		ICP×2			
	Power / kW	Ar flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	Power / kW	Ar flow / (mL·min <sup>-1</sup> )	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> )
Si-H	8	100	8	100	8	100	3×2	100	0	20
SiO <sub>2</sub>	8	100	8	100	8	100	3×2	50	120	0

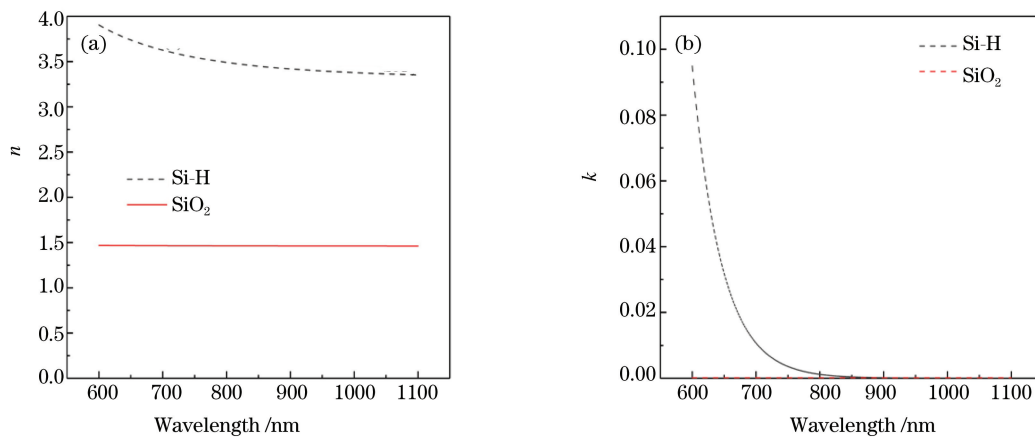


图 2 Si-H 和 SiO<sub>2</sub> 膜层的折射率  $n$  和消光系数  $k$ 。(a) 折射率; (b) 消光系数

Fig. 2 Refractive index  $n$  and extinction coefficient  $k$  of Si-H and SiO<sub>2</sub>. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

### 3 膜系设计

所设计的结构光 3D 成像系统使用的是窄带滤

$$\Delta g = \frac{1}{\cos \theta} - 1. \quad (3)$$

如果在空气中的入射角是  $\theta_0$ , 那么

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_0}{n^*}\right). \quad (4)$$

漂移量  $\Delta g$  可用  $\theta_0$  和  $n^*$  表示, 倾斜效应就可以简单地由腔层折射率和入射角的大小表征。漂移量为

$$\Delta g = \frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\theta_0^2}{2n^{*2}}. \quad (5)$$

由此可得到, 折射率  $n^*$  越大, 滤光片受到的影响越小。目前薄膜材料的折射率较小, 通过查阅相关资料<sup>[15]</sup>, 发现 Si-H 折射率较高, 且已被广泛应用于红外波段, 并且可以通过改变 H<sub>2</sub> 的通入量来改变材料的折射率和消光系数。因此, 本实验选用的高折射率材料为 Si-H, 低折射率材料为 SiO<sub>2</sub>。

通过调整靶材(TG)的功率、H<sub>2</sub> 的通入量确定 Si-H 的折射率和消光系数, 工艺参数如表 2 所示, 其中, TG2-Si 表示二号位为硅靶。实验得到 Si-H 和 SiO<sub>2</sub> 两种材料的光谱常数, 通过 Optilayer 软件拟合得到的光学常数如图 2 所示。

光片, 其通带透过率高、截止深度大, 因此选择全介质滤光片, 反射层由高、低折射率相间的介质材料组成, 间隔层由偶数个半波片组成。采用拆分方法, 即

前表面为全介质滤光片,对 934~960 nm 波长的光高透,后表面用长波通,对 680~900 nm 波长的光进行深度截止。

### 3.1 前表面设计

所使用的全介质滤光片由反射板和高低相的介质材料组成,间隔层由偶数个半波片组成。当层数一定时,用高折射率介质作为最外层将得到最大反射率<sup>[16]</sup>,因此基础膜系为  $\text{Air}/(\text{HL})_n 2m\text{H}(\text{LH})_n/\text{Sub}$ ,  $\text{Air}/\text{H}(\text{LH})_{n-1} 2m\text{L}(\text{HL})_{n-1}\text{H}/\text{Sub}$ , 其中, H 表示高折射率材料, L 表示低折射率材料, Sub 表示基底,  $n$  为高反射膜堆叠加的周期数,  $m$  为间隔层的干涉级次,干涉级次一般取 1 或 2,若间隔层的干涉级次超过 3,表面的粗糙度增加,峰值透过率降低。在不考虑间隔层的情况下,多层膜组成的反射膜中高折射率材料的层数为  $x$ ,那么半宽度为

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

为了满足光谱要求,选择高折射率材料为间隔层。借助 Macleod 软件,采用单半波膜系进行设计,再根据具体指标进行优化,优化后的膜系结构为:  $\text{Sub}|0.47\text{L}0.12\text{H}0.09\text{L}0.06\text{H}0.12\text{L}0.53\text{H}0.26\text{L}0.3\text{H}0.19\text{L}0.37\text{H}0.02\text{L}0.66\text{H}0.16\text{L}0.31\text{H}0.19\text{L}0.32\text{H}0.06\text{L}1.66\text{H}0.13\text{L}0.36\text{H}0.17\text{L}0.39\text{H}0.06\text{L}1.65\text{H}0.08\text{L}0.34\text{H}0.2\text{L}0.35\text{H}0.05\text{L}2.12\text{H}0.05\text{L}0.07\text{H}0.06\text{L}0.26\text{H}0.32\text{L}1.54\text{H}0.03\text{L}0.1\text{H}0.02\text{L}0.22\text{H}0.03\text{L}0.03\text{H}0.13\text{L}|\text{Air}$ , 不考虑后表面反射的光谱如图 3 所示。

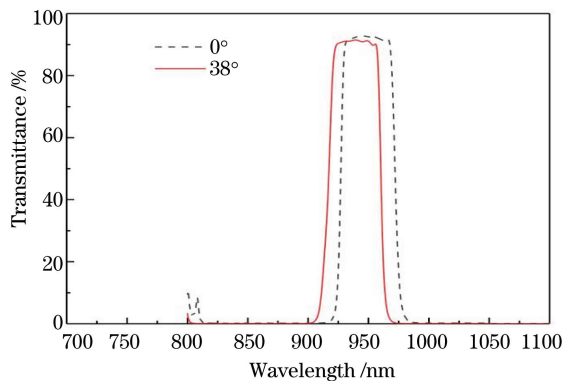


图 3 前表面理论光谱设计曲线

Fig. 3 Theoretical spectral design curves of the front surface

### 3.2 后表面设计

由于只通过前表面设计时透射率峰值的两边会出现旁通带,且通带透过率不能满足光谱测量需求,因此采用长波通进行后表面设计,基础膜系为  $\text{Sub}/(0.5\text{HL}0.5\text{H})/\text{Air}$ ,利用 Macleod 软件进行优化设计,优化后的膜系为:  $\text{Sub}|0.35\text{L}0.02\text{H}0.13\text{L}0.03\text{H}$

$0.18\text{L}0.02\text{H}0.2\text{L}0.02\text{H}0.19\text{L}0.02\text{H}0.19\text{L}0.3\text{H}0.17\text{L}0.02\text{H}0.16\text{L}0.06\text{H}0.11\text{L}0.03\text{H}0.18\text{L}0.03\text{H}0.2\text{L}0.02\text{H}0.17\text{L}0.03\text{H}0.5\text{L}0.02\text{H}0.16\text{L}0.02\text{H}0.27\text{L}|\text{Air}$ 。图 4 所示为后表面反射光谱设计曲线。将前表面和后表面叠加,得到的光谱如图 5 所示,可以看到,0°和 38°入射角的光谱均满足设计需求。

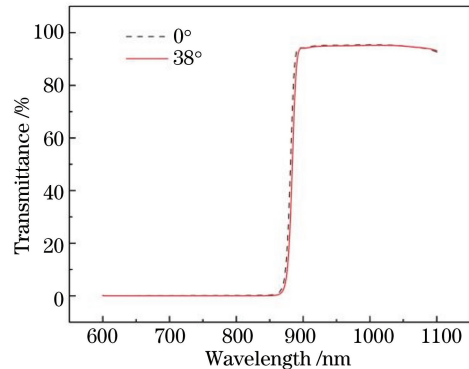


图 4 后表面反射光谱设计曲线

Fig. 4 Design curves of reflection spectra of rear surface

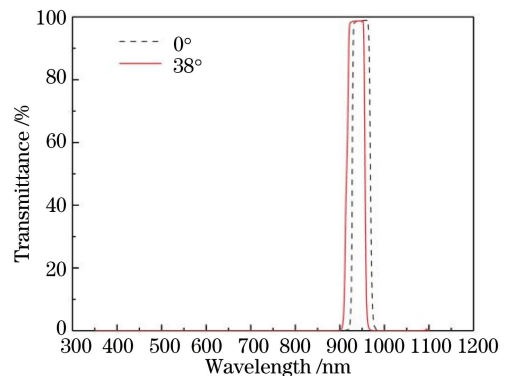


图 5 双面透射理论曲线

Fig. 5 Theoretical curves of double-sided transmission

## 4 薄膜制备与分析

本实验通过射频磁控溅射技术制备 Si-H 和  $\text{SiO}_2$  薄膜,实验设备为光驰科技(上海)有限公司生产的 OWLS 型平面溅射机,该设备配有三对绑定靶,靶材电源为射频源,同时还配有两台电感耦合等离子体(ICP)。由于本实验的制备方法为反应溅射,因此将 ICP 的气体管道充入靶材,在镀膜前首先对靶材进行预溅射,预溅射时间为 1 h,以避免靶材被氧化。在镀膜之前首先对基板进行 ICP 清洁,时间为 500 s,排除表面灰尘、油污等对膜层的影响。两种材料的成膜工艺参数如表 3 所示,两种材料单层膜的镀膜时间为 1200 s,通过 Optilayer 软件计算出光学常数和薄膜的物理厚度,将两种材料的光学常数代入设计模型,得到每一层介质在该工艺下的

表 3 工艺参数

Table 3 Process parameters

Material	TG1/2/3-Si				ICP1/2			
	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> )	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> )
Si-H	8	100	0	35	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	8	100	120	0	3	100	0	0

实际厚度,并根据 Outilayer 计算的物理厚度得到两种材料的沉积速率,用每一层介质在该工艺下的实际厚度除以两种材料的沉积速率,得到每一层介质的镀膜时间,薄膜制备流程如图 6 所示。

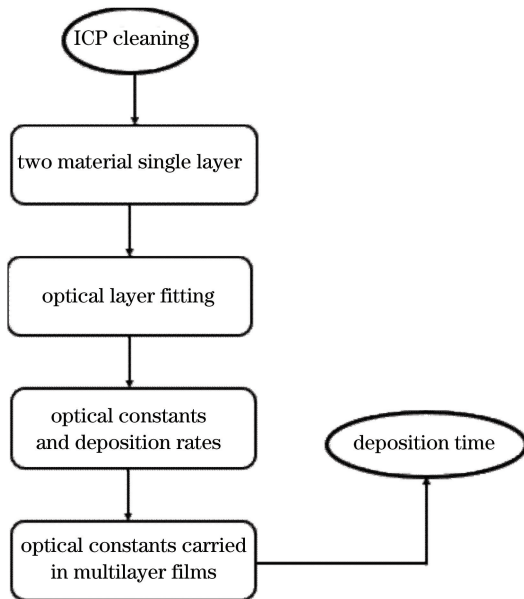


图 6 薄膜制备流程图

Fig. 6 Flow chart of thin film preparation

通过美国安捷伦公司生产的型号为 Cary 7000 的分光光度计对光谱进行测量,测量结果如图 7 所示。

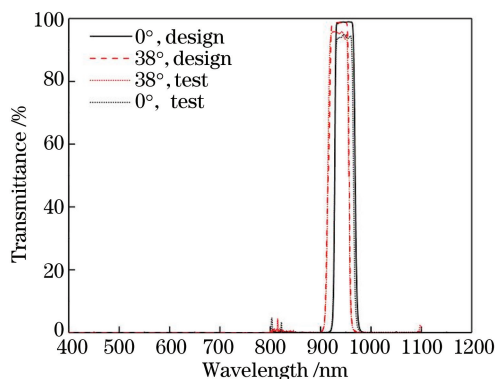


图 7 光谱测试曲线

Fig. 7 Spectral test curves

根据目前光谱测试结果,其通带透过率低于设计光谱,并不满足实验要求。将测试样品水煮 10 min 后,再用 3M 胶带进行测试,出现脱膜现象。中心波长  $\lambda_0$  向短波方向移动,且通带透过率降低,经分析有以下 3 个方面的原因。

1) 采用反应溅射方法制备 Si-H 和 SiO<sub>2</sub> 时,没有 ICP 轰击(电感耦合辅助沉积),薄膜的聚集密度降低,膜层疏松,导致脱膜。而水汽进入薄膜后,薄膜折射率降低,导致通带光谱透过率减小<sup>[17-18]</sup>,可通过改善 SiO<sub>2</sub> 的制备工艺,如采用交流电感耦合磁控溅射技术,提高膜层的聚集密度。

2) 薄膜散射损耗会导致通带透过率下降,粗糙度越大,表面散射损耗越大<sup>[19]</sup>,且在膜层切换时,会引入界面过渡层,增大界面散射损耗。使用原子力显微镜(AFM)和扫描电镜(SEM)分别测量膜层的表面粗糙度和膜层内部组织,测量结果如图 8 所示,其中  $R_a$  表示膜层的粗糙度。

采用反应溅射方法和直流磁控溅射方法制备的 Si-H 材料的表面粗糙度测量结果如图 9 所示。可以看到,直流磁控溅射方法制备材料的粗糙度小于反应溅射方法制备材料的粗糙度。两种溅射方法的靶材电压变化情况如图 10 所示,直流磁控溅射方法的电压要比反应溅射方法的电压更加稳定,在靶的功率固定不变的情况下,当使用反应溅射方法沉积硅靶时,其靶电压随着氢气分压而发生变化,这是由靶面上的金属和反应物之间的二次发射系数差别造成的<sup>[20]</sup>。在磁控溅射技术中,原材料为高致密性的单晶硅靶,被 Ar<sup>+</sup> 离子溅射后以原子的形式沉积到基板表面,这些原子获得足够的动能,在基板表面发生迁移运动,所形成的薄膜表面光滑,缺陷数量少、尺寸小。而靶材电压为这些原子提供动能,反应溅射电压不稳定,不能持续为原子提供稳定的能量输出来支撑其作迁移运动,导致薄膜表面产生缺陷。

3) Si-H 通带范围内存在自由载流子(电子和空穴)吸收。一特定波长的吸收系数可表示为

$$\beta = S_e n_0 + S_h P_0, \quad (7)$$

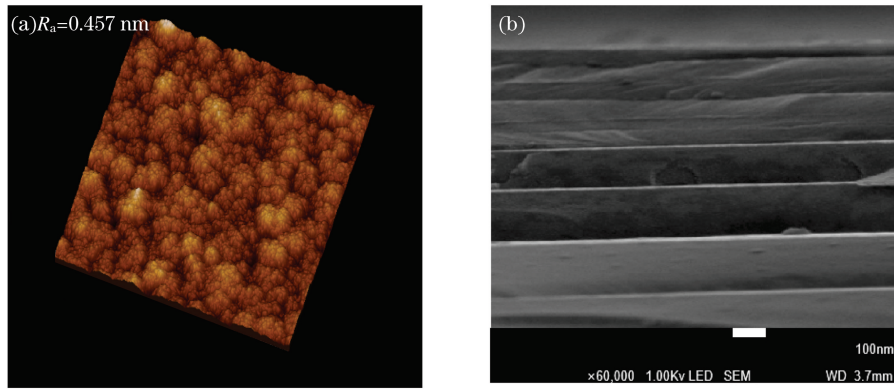


图 8 反应溅射镀制滤光片表面的测量结果。(a)AFM 图像;(b)SEM 图像

Fig. 8 Measuring results of filter fabricated by reactive sputtering. (a)AFM image; (b)SEM image

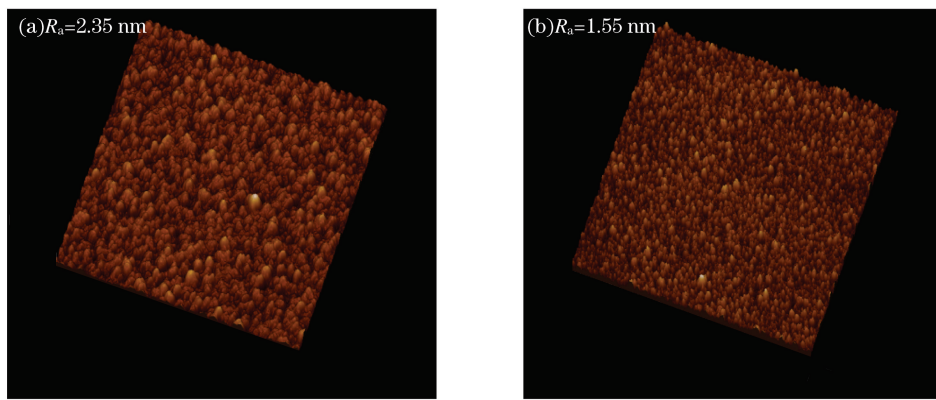


图 9 两种溅射方法得到的 Si-H 表面粗糙度照片。(a)反应溅射;(b)直流磁控溅射

Fig. 9 Surface roughness of Si-H fabricated by two sputtering methods. (a) Reactive sputtering; (b) DC magnetron sputtering

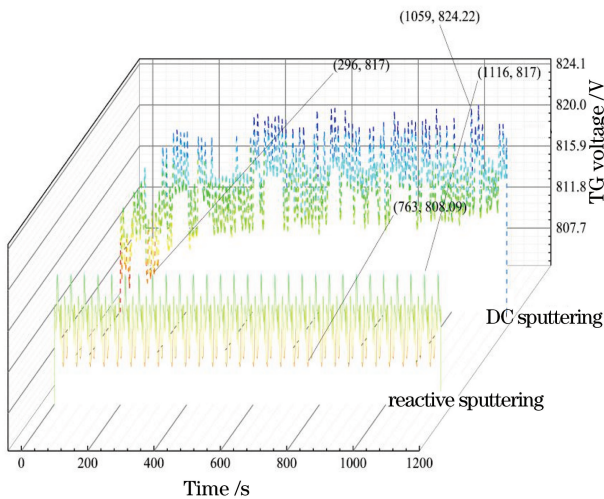


图 10 靶材电压波动图

Fig. 10 Voltage fluctuation diagram of target material

式中： $n_0$ 为电子浓度； $P_0$ 为空穴浓度； $S_e$ 和  $S_h$ 分别为电子和空穴对光子的吸收截面，且空穴对光子的吸收截面远大于电子对光子的吸收截面<sup>[21]</sup>。Si-H 为半导体材料，根据半导体理论

$$n_0 p_0 = n_i^2, \quad (8)$$

式中： $n_i$ 为本征载流子浓度，只与温度有关。当电子浓度和空穴浓度达到平衡时，由(6)式和(7)式可得到吸收系数：

$$\beta = s_e n_0 + \frac{s_h}{n_0} n_i^2. \quad (9)$$

Si-H 的能隙为 1.12 eV，随着温度升高，本征激发产生的自由载流子浓度可表示为

$$n_i = K T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right), \quad (10)$$

式中： $K$ 为玻尔兹曼常数； $T$ 为热力学温度； $E_g$ 为禁带宽度。由(9)式和(10)式可知，随着温度升高，自由载流子数量增加，Si-H 吸收增强，导致通带的透过率下降。

通过分析磁控溅射的工作原理<sup>[22]</sup>，可了解温度降低的原因。电子在电场  $E$  的作用下，电子与氩原子发生电离，产生  $Ar^+$  离子和新的电子， $Ar^+$  离子获得能量并在电场的作用下轰击靶材，被轰击后的靶原

子沉积到基板上,新的电子受到正交磁场的作用,在靶材四周做摆线运动,进而不断轰击靶材,随着碰撞次数的增加,二次电子能量被消耗殆尽,通过增加辅

助阳极来收集二次电子,以降低基板的温度(图 11)。最终使用 AFM 和 SEM 对滤光片进行测量,结果如图 12 所示;多层膜光谱测试曲线如图 13 所示。

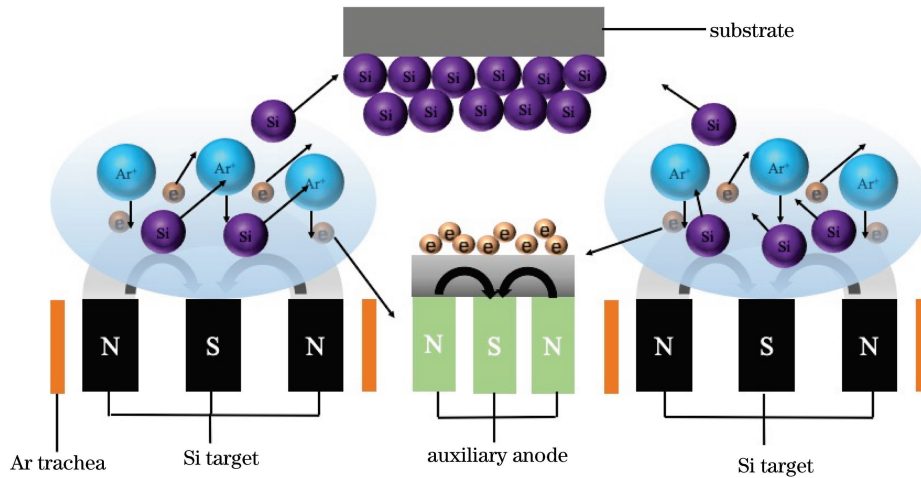


图 11 辅助阳极工作原理

Fig. 11 Working principle of auxiliary anode

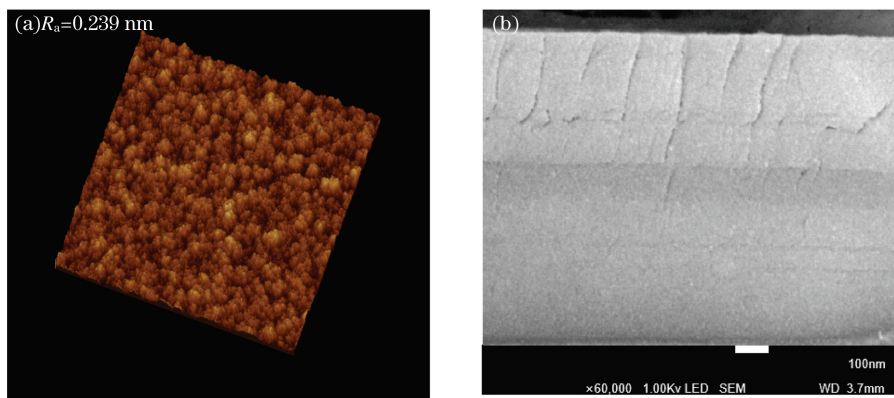


图 12 电感耦合和直流磁控溅射镀膜制滤光片表面的测量结果。(a)AFM 图像;(b)SEM 图像

Fig. 12 Measuring results of filter fabricated by inductively coupled and DC sputtering. (a)AFM image; (b)SEM image

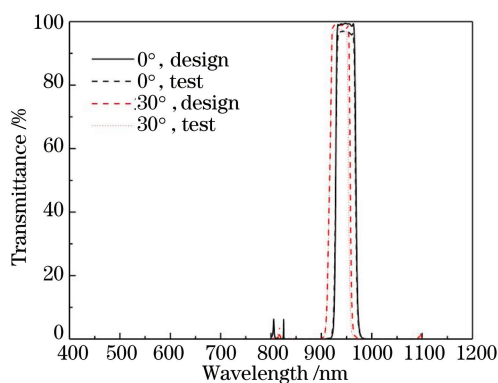


图 13 光谱测试曲线

Fig. 13 Spectral test curves

对制备好的滤光片水煮 10 min 再进行牢固度测试,将黏度大于 3 N/cm<sup>2</sup> 的胶带分别贴在滤光片的前、后表面,并用力压紧到平整无气泡,拉膜方向

与滤光片垂直。重复以上步骤拉膜 10 次,并没有出现脱膜现象。

## 5 结 论

首先采用双面拆分法设计单通道滤光片,前表面为法布里-珀罗全介质干涉型膜系,后表面为长波通干涉截止膜系,并借助 Macleod 软件进行膜系设计及优化。使用直流磁控溅射技术和电感耦合磁控溅射技术,制备出符合结构光 3D 成像 IR 接收模组的 945 nm 窄带滤光片。针对膜层疏松导致的脱膜问题,使用电感耦合磁控溅射技术制备 SiO<sub>2</sub>,以提高膜层聚集密度。通过分析 Si-H 制备过程中靶材电压的变化情况,发现直流磁控溅射靶材电压比反应溅射电压更稳定,且直流溅射制备的 Si-H 粗糙度小于反应溅射制备的 Si-H。

通过增加辅助阳极降低薄膜温度,避免通带透过率下降,以及角度效应引起的中心波长偏移。最终制备的滤光片界面散射和表面粗糙度降低,且入射角为  $0^{\circ}\sim 38^{\circ}$  时,滤光片的偏移量为 13 nm,通带透过率为 98.5%,满足结构光 3D 成像 IR 接收模组 945 nm 窄带滤光片的指标。

## 参 考 文 献

- [1] Matusik W, Pfister H. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3):1015805.
- [2] Scheiman M, Wick B. Clinical management of binocular vision: heterophoric, accommodative, and eye movement disorders [J]. Optometry & Vision Science, 1994, 71(6):678-679.
- [3] Liu J, Liu Y, Qi H, et al. 3D video rendering adaptation: a survey[J]. 3D Research, 2015, 6(1): 1-13.
- [4] Cao X M, Sang X Z, Chen Z D, et al. Computer generated hologram of complex three-dimensional object based on a two-dimensional color image and the depth map[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0609002.  
曹雪梅, 桑新柱, 陈志东, 等. 基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609002.
- [5] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.  
苏显淦, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [6] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age? An introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 9-53.  
左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗? 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 9-53.
- [7] Chen T F, Zhao J B, Wu X. New calibration method for line structured light sensor based on planar target [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112004.  
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112004.
- [8] Kong W J, Zheng B B, Yun M J, et al. Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005006.  
孔伟金, 郑併斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三
- 基色窄带滤光片的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005006.
- [9] Zhang J Q, Wang X Y, Zhang X J, et al. Effects and corrections of incidence light cone on transmission characteristics of narrowband filter[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0131001.  
张军强, 王笑夷, 张新洁, 等. 光锥角对窄带滤光片透射率的影响及补偿方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0131001.
- [10] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 020001.  
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 020001.
- [11] Zu X Y, Li L, Fu X H. Development of visible light depolarizing medium dispersing thin films [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.
- [12] Xie Z T, Yu G Y. Optimization design method for high performance tunable filter [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0831001.  
谢钟涛, 余桂英. 高性能可调谐滤波片的优化设计方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0831001.
- [13] Liu D M, Yue P F, Fu X H, et al. Development of iris recognition filter with low-angle effect [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1131002.  
刘冬梅, 岳鹏飞, 付秀华, 等. 低角度效应虹膜识别滤光片的研制 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1131002.
- [14] MacLeod H A. Physics of thin films [J]. Optica Acta, 1979, 26(7): 839-840.
- [15] Zhang R Z, Tang J, Wang Y, et al. Preparation method for high-refractive index hydrogenated silicon film, high-refractive index hydrogenated silicon film, light filtering lamination and light filtering piece: CN107841712A [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: CN107841712A [P]. 2018-03-27.
- [16] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.  
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.
- [17] Lairson B M, Mosier J, Gibbons K, et al. Reduced angle-shift infrared bandpass filter coatings [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6545: 65451C.



- [18] Chen G, Liu D Q, Ma C, et al. Optical spectra and surface morphologies of near-infrared narrow band-pass filters using dual ion beam sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2131001.  
陈刚, 刘定权, 马冲, 等. 双离子束溅射制备近红外窄带通滤光片的光谱和表面形貌[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2131001.
- [19] Sun S Z, Jin C S, Yu B, et al. Research on surface roughness related coating processes of Mo/Si multilayers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1031002.  
孙诗壮, 金春水, 喻波, 等. Mo/Si 多层膜表面粗糙度相关镀膜工艺的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1031002.
- [20] Jiang X C. Development and application for large-area reactive sputtering technology [J]. *Vacuum*, 2002, 39(3): 1-9.  
姜燮昌. 大面积反应溅射技术的最新进展及应用[J]. *真空*, 2002, 39(3): 1-9.
- [21] Yang X, Tian C Y. Effect analysis of temperature rising on narrowband filter performance[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2016, 31(6): 26-27, 69.  
杨旭, 田春雨. 温升对窄带滤光片性能的影响分析[J]. *光电技术应用*, 2016, 31(6): 26-27, 69.
- [22] Tian M B, Li Z C. *Film technology and film materials* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 90-95.  
田民波, 李正操. *薄膜技术与薄膜材料* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 90-95.