

## 3D 显示系统的互补多频宽角度色谱滤光膜

付秀华<sup>1\*\*</sup>, 郭宇怀<sup>1\*</sup>, 李爽<sup>2</sup>, 张静<sup>1</sup>, 孙宇勃<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** 基于波分式 3D 技术成像原理, 实现了一种宽角度互补三带通滤光膜的设计。通过对薄膜材料的研究, 选择合适的材料作为法布里-珀罗滤光片的等效间隔层, 改善了大角度入射时的能量分散现象, 提高了大角度入射时的通带透过率。通过调节电感耦合等离子体反应气体量, 降低了  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料的消光系数, 提高了薄膜在短波处的透过率。实验测试与分析结果表明, 所研制的互补三带通滤光膜在  $0^\circ\sim 30^\circ$  入射时的通带透过率均在 92% 以上, 且透射光符合色平衡指标, 满足设计要求。

**关键词** 薄膜; 3D 显示; 三带通滤光膜; 等效间隔层; 分形结构

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0531001

### Complementary Multi-Band Wide-Angle Chromatography Filters in 3D Display System

Fu Xiuhua<sup>1\*\*</sup>, Guo Yuhuai<sup>1\*</sup>, Li Shuang<sup>2</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Sun Yubo<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** A wide-angle complementary treble-bandpass filter is prepared based on the imaging principle of wavelength-division 3D technology. Via the investigation of film materials, suitable materials are selected as the equivalent spacer layer of the Fabry-Perot filter, which improves energy dispersion and enhance the bandpass transmissivity at a large incident angle of light. With the adjustment of the amount of the reactive gas of inductive coupled plasma, the extinction coefficient of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  material can be reduced and the film transmissivity at a short wavelength can be enhanced. The experimental test and analysis results show that the prepared complementary treble-bandpass filters process the transmissivity of larger than 92% at each bandpass when light incident at  $0^\circ\sim 30^\circ$ . Moreover, the transmitted light satisfies the color balance index and meets the design requirements.

**Key words** thin films; 3D display; treble-bandpass filter; equivalent spacer layer; fractal structure

**OCIS codes** 310.1860; 300.6550; 310.6805; 310.6860

## 1 引言

作为虚拟现实技术重要组成部分的 3D(Three Dimensional)立体显示已经成为现代显示技术发展的必然方向, 第五代移动通信技术时代的到来也为这种对复杂信息进行快速而准确传输的显示技术提

供了极大便利。当高品质影像内容得到及时传输时, 用户更希望借助大屏观看, 以满足更高的视听需求<sup>[1]</sup>。因此, 对于遭遇巨大挑战的传统电视行业而言, 将电视显示终端升级成 3D 信号接收终端将是电视媒体摆脱尴尬处境的契机。

国外对 3D 显示技术的研究相较成熟。Talcott

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-03; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20181097KJ)

\* E-mail: 625541444@qq.com; \*\* E-mail: goptics@126.com

等<sup>[2]</sup>利用 3D 平视技术进行了临床手术。Kim 等<sup>[3]</sup>利用中心对称多边带滤波技术,制备了一种可以全角度观看的全息 3D 显示器。Continental 公司利用衍射光栅和纳米结构,正在研发互联驾驶舱的车载 3D 技术显示器。Semrock 公司和 Iridian 公司实现了亮度损失低、串扰小的波分式三带通滤光膜。

国内对 3D 显示技术的研究起步较晚,近几年的研究重点集中在改善偏光式 3D 成像角度、增强裸眼 3D 技术分辨率和研制集成成像中的全息透镜阵列等方面<sup>[4-6]</sup>。对于波分式 3D 技术,郝琦<sup>[7]</sup>研制了一种波分复用式滤光膜。这种滤光膜的使用角度为  $0^\circ \sim 10^\circ$ ,当入射光角度大于  $10^\circ$  时,通带透过率严重下降,导致成像质量大幅降低;并且当入射光  $0^\circ$  入射时,出射光不满足近似白光的色平衡指标,从而制约了这种滤光膜在电视显示端的应用。而国内其他波分式 3D 显示的研究多集中在光学特性方面,对膜系设计和实际制备过程鲜有报道。

本文修整了基础膜系的结构,研究了材料的

光学特性,优化了制备过程中的工艺参数,设计并研制了可大角度使用的互补多频宽角度色谱滤光膜 (Complementary Multi-band Wide-angle Chromatography Filter, CMWCF)。

## 2 设计指标

波分式 3D 显示技术的原理如图 1、2 所示。将可见光按色谱分为红 (Red, R)、绿 (Green, G)、蓝 (Blue, B) 三个主要区域,其中红色区 R 光谱范围为  $740 \sim 590 \text{ nm}$ ,绿色区 G 光谱范围为  $590 \sim 480 \text{ nm}$ ,蓝色区 B 光谱范围为  $480 \sim 380 \text{ nm}$ ,再分别将 R、G、B 三个区间均分为 R1/R2、G1/G2、B1/B2 左右两组颜色。

CMWCF-A 组滤光片以 R1、G1、B1 作为透射光谱区,B 组以互补区 R2、G2、B2 作为透射区。LED 光源发出的光经过 A、B 两组有序排列的镜组,得到的两组差异化图像在被左、右眼接收时产生视觉差异,从而形成立体感。

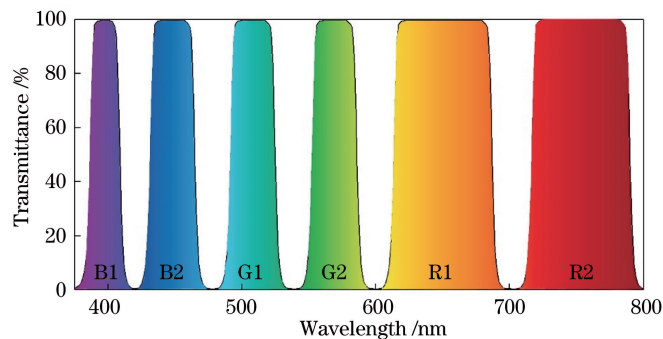


图 1 可见光波段的色谱分类

Fig. 1 Visible light classified by color spectrum

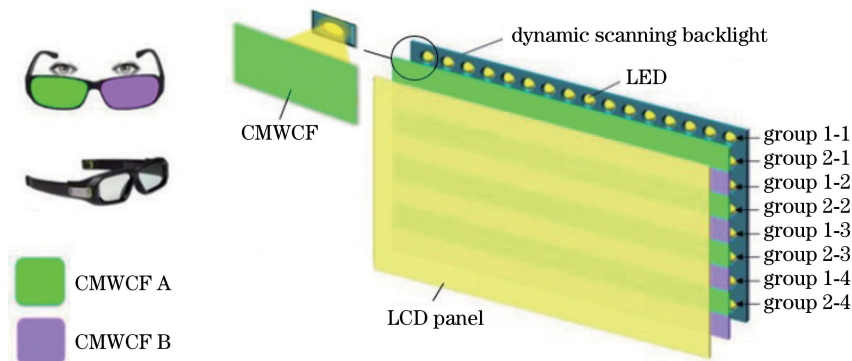


图 2 波分式 3D 技术的成像原理

Fig. 2 Imaging principle of wavelength-division 3D technology

由图 2 可以看出,LED 发出的部分光会以大角度入射到滤光片中,根据斜向入射时光谱的相位偏移公式  $\delta = 2\pi n d \cos \theta_0 / \lambda_0$  ( $\delta$  为相位变化量, $n$  为折

射率, $d$  为物理厚度, $\theta_0$  为入射角度, $\lambda_0$  为中心波长)可知,光线以大角度  $\theta$  入射时,出射光谱会向短波方向偏移。因此,考虑到使用时不能产生串扰现

象,设计指标需要考虑以下几点。

1) 当光线以大角度入射时,保证偏移后的出射光仍在原色区内。以红色区 R 为例,即光谱偏移后 CMWCF-A 的 R1 区不能偏移至 CMWCF-B 的 G2 区内;CMWCF-B 的 R2 区也不能偏移至 CMWCF-A 的 R1 区内。

2) 为了满足视觉需求,需要尽可能满足出射光的色平衡指标,即 Commission International Eclairage(CIE)颜色指标中的颜色通道  $a$ 、 $b$  值应尽可能小。因此需要根据 R、G、B 三色光在合成白光时的比例关系<sup>[8]</sup>,对光谱偏移前后三带通的位置和宽度进行优化,保证颜色均衡。

3) 在确保以上两点的情况下,尽可能展宽通带宽度以传输更多画面信号。由于入射光的角度越大通带偏移量越大,为了保证通带不偏移出原有区间,就需要缩小通带宽度,但过窄的通带会限制信号传输,因此最大入射角度不宜过大。

利用 Macleod 设计软件对两组滤光片进行模拟,最终确定光线的最大入射角为  $30^\circ$ ,此时能够保证光谱偏移前后的通带位置均在原色区内,且入射角为  $0^\circ \sim 30^\circ$  时两组滤光片的出射光颜色合成接近白色。

根据以上分析并结合实际制备技术,最终确定了 CMWCF 的设计指标,具体参数如表 1、2 所示。

表 1 CMWCF-A 的设计指标

Table 1 Design specifications of CMWCF-A

Index	Incident angle of $0^\circ$	Incident angle of $30^\circ$
Average transmissivity /%	$<1@400-415$ nm	$<1@400-407$ nm
	$<1@437-487$ nm	$<1@426-472$ nm
	$<1@523-603$ nm	$<1@508-583$ nm
	$<1@637-780$ nm	$<1@618-780$ nm
Average transmissivity /%	$\geq 92@424-432$ nm	$\geq 92@413-420$ nm
	$\geq 92@495-516$ nm	$\geq 92@482-500$ nm
	$\geq 92@615-630$ nm	$\geq 92@596-609$ nm
Center wavelength /nm	500-505	485-490
$a$	$-2 \leq a \leq 2$	$-8 \leq a \leq 8$
$b$	$-2 \leq b \leq 2$	$-8 \leq b \leq 8$

表 2 CMWCF-B 的设计指标

Table 2 Design specifications of CMWCF-B

Index	Incident angle of $0^\circ$	Incident angle of $30^\circ$
Average transmissivity /%	$<1@400-453$ nm	$<1@400-440$ nm
	$<1@482-550$ nm	$<1@468-533$ nm
	$<1@592-672$ nm	$<1@574-645$ nm
	$<1@729-780$ nm	$<1@707-780$ nm
Average transmissivity /%	$\geq 92@460-469$ nm	$\geq 92@447-457$ nm
	$\geq 92@559-574$ nm	$\geq 92@543-557$ nm
	$\geq 92@680-712$ nm	$\geq 92@659-689$ nm
Center wavelength /nm	565-570	550-555
$a$	$-2 \leq a \leq 2$	$-8 \leq a \leq 8$
$b$	$-2 \leq b \leq 2$	$-8 \leq b \leq 8$

### 3 理论设计

#### 3.1 等效间隔层

根据给定的三带通设计要求,基础膜系考虑采用全介质多半波法布里-珀罗滤光片。全介质多半波法布里-珀罗滤光片有两种基本结构,等效间隔层为高折射率材料结构  $\text{Sub} | (\text{HL})^x 2m \text{H} (\text{LH})^x | \text{Air}$  和等效间隔层为低折射率材料结构  $\text{Sub} | (\text{HL})^x \text{H}$

$2m \text{L} \text{H} (\text{LH})^x | \text{Air}$ ,其中 H 为高折射率材料,L 为低折射率材料,Sub 为基板,Air 为空气层, $m$ 、 $x$  为任意正实数。

在使用中频磁控溅射设备制备低折射率材料  $\text{SiO}_2$  时,压应力较大,是相同厚度下  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  等常见高折射率材料的两倍<sup>[9]</sup>,因此为了降低膜层应力的累计,初始结构采用以  $2m \text{H}$  为等效间隔层的法布里-珀罗滤光片,此时通带的半峰全宽为

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

式中： $\Delta\lambda_h$  为半峰全宽， $n_S$  为基板折射率， $n_H$  为高折射率材料的折射率， $n_L$  为低折射率材料的折射率。斜向入射时中心波长位置的偏移量为

$$\Delta g = \Delta\lambda/\lambda = \theta_0^2/2(n^*)^2, \quad (2)$$

式中： $\Delta g$  为中心波长位置的偏移量； $\Delta\lambda$  为中心波长的变化量； $\lambda$  为新的中心波长； $n^*$  为等效间隔层材料的折射率。

当斜向入射时，S 光和 P 光的等效折射率不同。对于第一级次，即  $m = 1$  时，S 光的等效折射率  $n_S^*$  为

$$n_S^* = (n_H n_L)^{1/2} (1 + K_H \theta_0^2), \quad (3)$$

P 光的等效折射率  $n_P^*$  为

$$n_P^* = (n_H n_L)^{1/2} (1 - K_H \theta_0^2), \quad (4)$$

式中： $K_H = \left(\frac{n_L - n_H}{2n_H n_L}\right)^2$ 。

将(3)、(4)式代入(2)式中，得到

$$\lambda_S - \lambda_P = \frac{(n_H - n_L)^2}{2n_H^3 n_L^3} \theta_0^4 \cdot \lambda_0, \quad (5)$$

式中： $\lambda_S$  为光线斜向入射条件下 S 光偏移后的中心波长； $\lambda_P$  为光线斜向入射条件下 P 光偏移后的中心波长。

对于可见光波段常用的高低折射率材料  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$ ，当中心波长为 550 nm、最大入射角为  $30^\circ$  时，由(5)式得到 S 光、P 光的光谱偏移位置之差  $\lambda_S - \lambda_P \approx 0.38$  nm，从该结果可以看出，以高折射率材料作为等效间隔层时，在光线大角度入射条件下，S 光和 P 光的光谱偏移位置有一定差异，且 S 光比 P 光的偏移量更大，这样会导致出射光能量分散、通带透过率降低。

若考虑间隔层材料改用低折射率材料  $2mL$ ，同样取第一级次  $m = 1$ ，此时 S 光的等效折射率为

$$n_S^* = \frac{n_L}{[1 - (n_L/n_H) + (n_L/n_H)^2]^{1/2}} (1 - K_L \theta_0^2), \quad (6)$$

P 光的等效折射率为

$$n_P^* = \frac{n_L}{[1 - (n_L/n_H) + (n_L/n_H)^2]^{1/2}} (1 + K_L \theta_0^2), \quad (7)$$

式中： $K_L = \frac{(n_H + n_L)(n_H - n_L)^2}{4n_H n_L (n_H^3 + n_L^3)}$ 。

将(6)、(7)式代入(5)式，得到

$$\lambda_S - \lambda_P = -\frac{(n_H - n_L)^2}{2n_H^3 n_L^3} \theta_0^4 \cdot \lambda_0. \quad (8)$$

从(8)式看出，以低折射率材料作为间隔层时，在光线大角度入射条件下，P 光比 S 光的偏移量大。结合(5)式和(8)式推断，当间隔层采用等效中间折射率材料时，如以 2L2H2L 或 2H2L2H 代替 6H 或 6L，可以使 S、P 偏振光的偏移量几乎相同。

以 6H 为等效间隔层，中心波长为 550 nm 的法布里-珀罗滤光片在  $30^\circ$  入射角下出射光的光谱偏移情况如图 3 所示。由于 S 光、P 光的偏移位置不同，平均光通带能量分散，波纹较深，矩形度较差，这种现象会增大后期膜系优化过程的难度，需要更多的匹配层来消除通带波纹并抑制截止带透过。

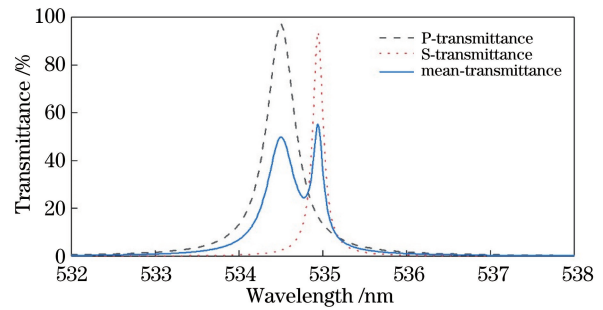


图 3 在  $30^\circ$  入射角下，等效间隔层为 6H 时法布里-珀罗滤光片的透射光谱

Fig. 3 Transmittance spectra of F-P filter with equivalent spacer layer of 6H at incident angle of  $30^\circ$

因此，为了简化设计，方便后续膜系优化，将上述间隔层材料 6H 用等效中间折射率材料 2H2L2H 代替，在大角度入射下，出射光的 S 光、P 光的光谱偏移位置相近，有效避免了能量分散现象的发生<sup>[10]</sup>。

替换等效间隔层后，在大角度入射下，出射光的 S 光、P 光和平均光的光谱偏移情况如图 4 所示。可以看到，此时出射光的 S 光、P 光的光谱偏移位置

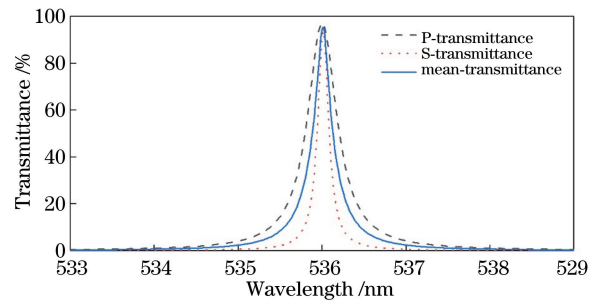


图 4 在  $30^\circ$  入射角下，等效间隔层为 2H2L2H 时法布里-珀罗滤光片的透射光谱

Fig. 4 Transmittance spectra of F-P filter with equivalent spacer layer of 2H2L2H at incident angle of  $30^\circ$

相近,因此其平均光的通带情况得到明显改善。

半峰全宽公式为

$$\Delta\lambda_h = \frac{T}{m\pi}\lambda_0, \quad (9)$$

式中:  $T \approx \frac{4n_L^{2x} n_S}{n_H^{2x+1}}$ 。

由(9)式可知,当等效间隔层为 2H2L2H 时,通带的半峰全宽略小于以 6H 为等效层的半峰全宽。

### 3.2 分形结构

本次的光谱设计要求较为复杂,以普通结构的法布里-珀罗滤光片为初始膜系,即使进行大量的优化处理,仍然难以得到理想波形。因此本文采用一种分形结构的方式,对法布里-珀罗滤光片的周期结构进行设置,得到通带位置可以自由变化的三带通滤光片<sup>[11-13]</sup>。

单腔室的法布里-珀罗滤光片是一个最简单的分形结构,结构为(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>,该结构关于中心等效间隔层αH对称。分形结构是一种局部相对于整体自相似的特殊结构,根据这个特点,可以得到双通道滤光片的基本膜系为(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>βL(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>,其结构除了关于等效间隔层βL对称之外,对称的两个子膜系也关于自身间隔层αH对称。进而得到三带通滤光片的基本膜系为(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>βL(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>γL(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>βL(HL)<sup>x</sup>αH(LH)<sup>x</sup>,上述α、β、γ均为任意正实数。

例如,将三带通滤光片的分形对称结构设置为HLαHLHβLHLαHLHγLHLαHLHβLHLαHLH,以550 nm为中心波长,固定α=2,β=1.2,对γ进行相对独立的调整,结果如图5所示。

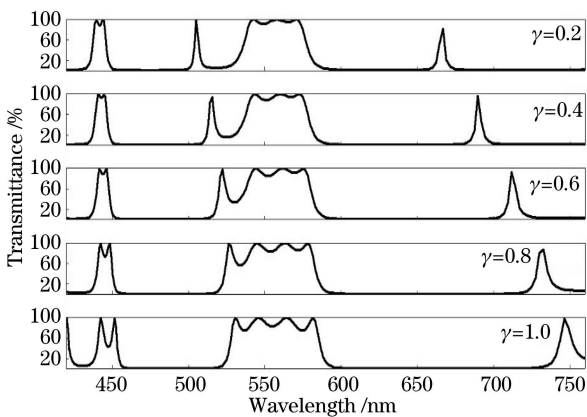


图 5 当 α=2, β=1.2 时不同 γ 下三带通的位置

Fig. 5 Treble-bandpass positions at different γ when α=2 and β=1.2

同样,固定 α=2, γ=0.8, 对 β 进行相对独立的调整,结果如图 6 所示。

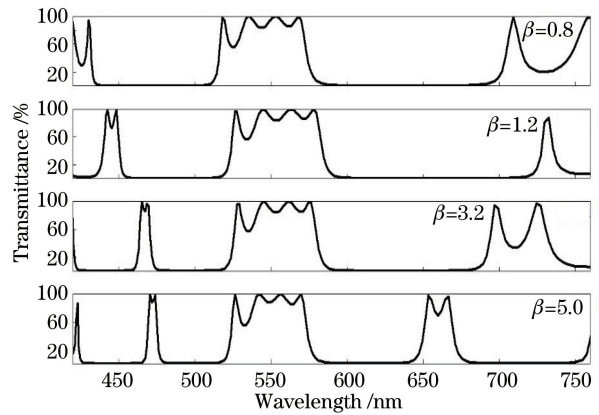


图 6 当 α=2, γ=0.8 时不同 β 下三带通的位置

Fig. 6 Treble-bandpass positions at different β when α=2 and γ=0.8

从图 5 和图 6 可以看出,在调整单一参数时,另外两个通带位置不会完全固定,但其相对位置是可以调整的,因此在实际设计时,需要不断调整参考波长和 α、β、γ 三个参数,使初始光谱的通带位置和宽度与设计目标更接近,以选择合适的初始结构。

最终确定 CMWCF-A 片的初始结构参数为: x=4, α=0.91, β=0.22, γ=1.62, 等效间隔层为 2H2L2H, 中心波长为 502.5 nm。CMWCF-B 片的初始结构参数为: x=4, α=2, β=0.6, γ=0.39, 等效间隔层为 2H2L2H, 中心波长为 568.3 nm。优化膜系后,在单面镀膜且不考虑后表面未镀膜所产生的反射现象条件下,得到的设计曲线如图 7、8 所示。

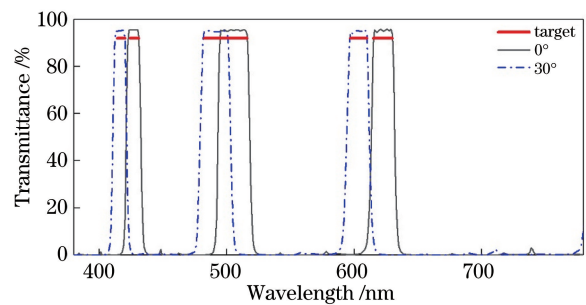


图 7 单面镀膜条件下 CMWCF-A 的理论光谱曲线

Fig. 7 Theoretical spectral curves of CMWCF-A with single-sided coating

如图 7、8 所示,CMWCF-A、B 在光谱偏移前后,通带平均透过率均大于 92%,截止区的平均透过率小于 1%,满足设计要求。

在实际制备时,不能保证每层的实际厚度与设计一致,因此通过 Macleod 软件对膜系进行 0.5%

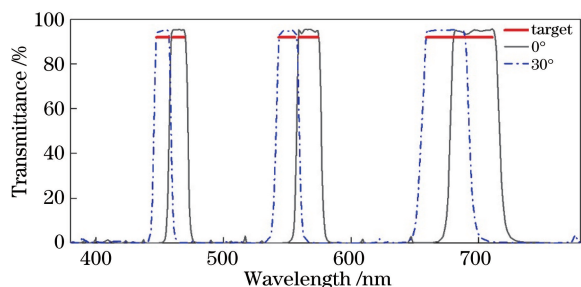


图 8 单面镀膜条件下 CMWCF-B 的理论光谱曲线  
Fig. 8 Theoretical spectral curves of CMWCF-B with single-sided coating

随机误差模拟,得到 $0^\circ$ 入射角下 CMWCF-A、B 两个膜堆的误差模拟光谱,模拟结果如图 9、10 所示。

由图 9、10 可以看出,膜层的总敏感程度较低,虽然误差会导致通带波纹有一定变化,但是整体的透过率仍然满足设计要求,适于实际制备。

最终的 A 片膜系为 0.6H 0.2L 1.1H 1.3L 1.3H 1.3L 2.1H 0.4L 2.8H 0.9L  $\cdots$  2.3H 1.6L 0.4H 0.1L 0.7H, 共 69 层。B 片膜系为 1.2L 1.7H 0.8L 0.7H 0.1L 1.6H 0.7L 0.5H 0.4L 1.3H  $\cdots$  2.7H 0.4L 0.5H 0.7L 1.0H, 共 68 层。

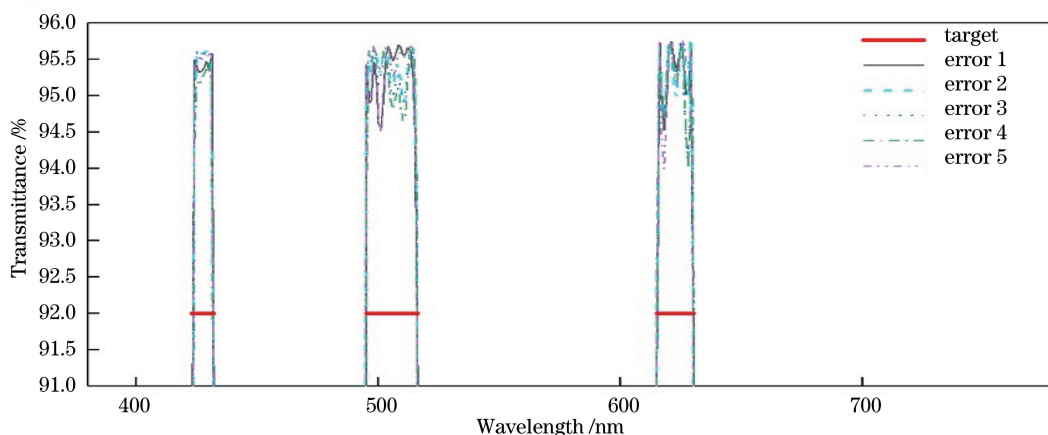


图 9 CMWCF-A 的随机误差模拟光谱

Fig. 9 Theoretical spectral curves of CMWCF-A obtained by random error simulation

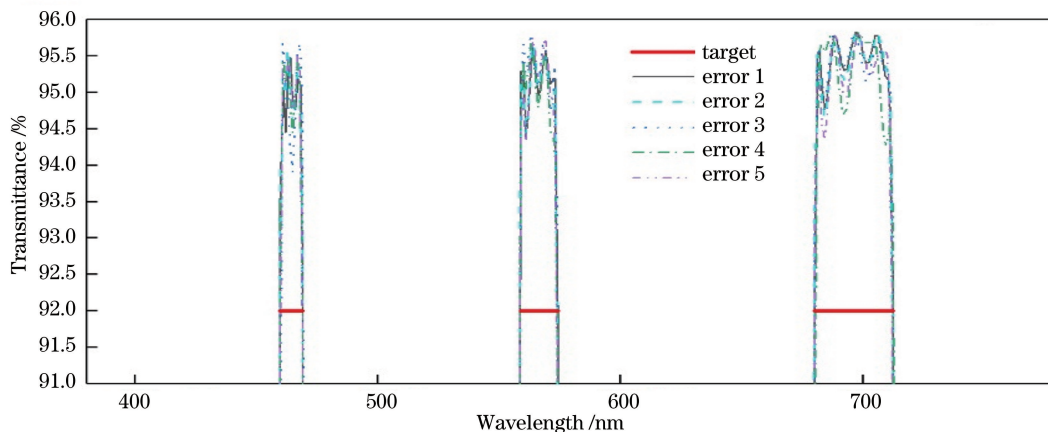


图 10 CMWCF-B 的随机误差模拟光谱

Fig. 10 Theoretical spectral curves of CMWCF-B obtained by random error simulation

#### 4 制备工艺及参数

根据设计要求,选择 K9 玻璃作为本次实验的基板。K9 玻璃的折射率约为 1.5163,在可见光波段有较好的透过率,在单面镀膜且忽略表面散射对其影响的条件下,其峰值透过率为 95.8%。由于本

次设计的膜系结构复杂、膜层数多,因此材料的消光系数和由膜层间体散射累计造成的光能损失会对膜层的透过率有较大的影响<sup>[14-15]</sup>。

对于可见光波段常用的  $\text{SiO}_2$ ,其成膜时以层状结构生长,面型结构较好; $\text{Si-O}$  键属于较稳定的化合键,化合物性质稳定<sup>[16]</sup>。 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  结构稳定,材料聚集密度高,且应力较小,溅射过程中对反应气流

量的敏感程度较低,可以通过改变反应气体的流量来调整材料的光学参数。

根据以上分析,最终选择  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  为高低折射率材料以制备 CMWCF。

表 3 制备工艺参数

Table 3 Process parameters for fabrication

Material	TG		ICP		
	Power /kW	Ar flow rate / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Power /kW	Ar flow rate / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$\text{O}_2$ flow rate / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )
$\text{Nb}_2\text{O}_5$	7	50	2		50
$\text{SiO}_2$	$6\times 2$	$60\times 2$	2		50

实验前用超声波清洗基底,擦拭后装入真空室,抽真空至电离真空规示数到达  $1.0\times 10^{-4}$  Pa 时,用 ICP 辅助沉积设备清洁基板并成膜。

首先对 A 膜系进行镀制,镀制完成后,利用 Cary7000 分光光度计,在狭缝宽度为 1 nm 条件下测量其光谱,结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出,与目标光谱相比,测试光谱向短波方向发生微小偏移,且通带 B1 处的矩形度

实验设备使用光驰 OWLS1800 型平面溅射机,配备两台电感耦合等离子体 (Inductive Coupled Plasma, ICP) 辅助沉积设备、一对靶和两对硅靶 (Target, TG)。实验中的设备主要参数如表 3 所示。

较差。

结合温度在镀膜过程中的变化,分析导致光谱偏移的原因:镀膜前期基板表面温度较低,膜料分子从基板获得的能量较少,这对膜料分子在基板表面的热运动和生长迁移会起到一定的抑制作用,致使膜层内部留有较多空穴,最终导致膜层聚集密度和折射率整体偏低<sup>[17-18]</sup>。因此在镀膜前,利用小功率 ICP 辅助沉积设备对基板进行预加热处理。

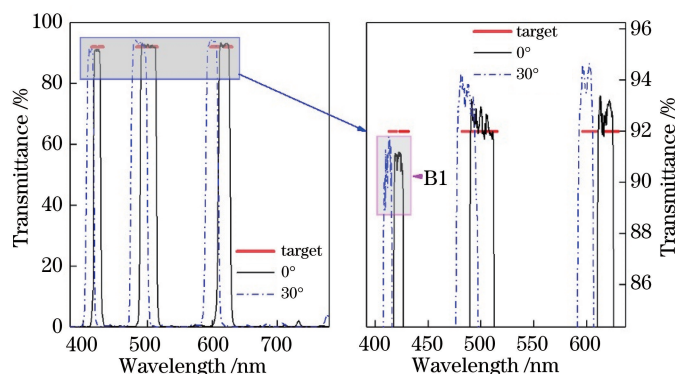


图 11 初步制备的 CMWCF-A 的测试光谱曲线及局部放大

Fig. 11 Test spectral curves of CMWCF-A at first preparation as well as local magnification

经分析, B1 处的矩形度较差,这是由于膜层总厚度较大,高折射率材料  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  在短波处的消光系数较大,出现能量损失。对于中频磁控溅射技术,反应气体流量和靶材功率等对材料消光系数的影响较大<sup>[19-20]</sup>。本次实验通过改变反应气体的流量来改善  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料在短波处的消光系数。

在保证 ICP 辅助沉积设备功率和 TG 功率不变的情况下,通过调整反应气体的流量,利用 Woollam 公司 M-2000 椭圆偏振仪测得几组  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料的光学常数,结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出,当  $\text{O}_2$  流量为  $35\sim 70\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  时,材料的折射率变化很小,但消光系数的变化明显,在波长 550 nm 处,  $\text{O}_2$  流量为  $35\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的消光系数比  $\text{O}_2$  流量为

$60\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的消光系数的两倍还大。

但是过快的  $\text{O}_2$  流量会导致靶材从金属模式转变为中毒模式,生成的  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  覆盖在靶材表面,阻碍反应继续发生,进而溅射速率降低。根据分子自由程公式  $\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma p}$  ( $\bar{\lambda}$  为分子平均自由程,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $\sigma$  为分子横截面,  $p$  为压强) 可知,在温度  $T$  和分子散射截面  $\sigma$  近似不变的情况下,过高的氧压会降低膜料分子的平均自由程和迁移率,也会导致溅射速率降低。通过计算可知,当  $\text{O}_2$  流量从  $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  增加到  $60\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  时,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  的沉积速率从  $0.371\text{ nm/s}$  变为  $0.368\text{ nm/s}$ ,但是当  $\text{O}_2$  流量从  $60\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  增加到  $70\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积速率迅速降低为

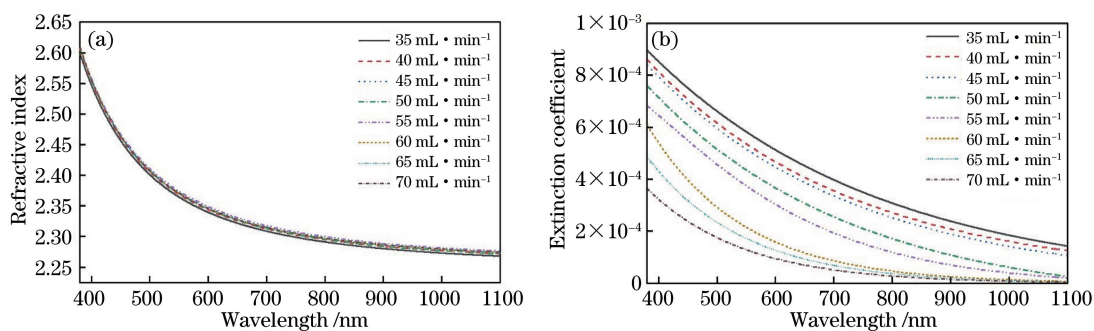


图 12 不同 O<sub>2</sub> 流量下 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料的光学常数。(a) 折射率;(b) 消光系数

Fig. 12 Optical constants of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> under different oxygen gas flows. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

0.293 nm/s, 速率下降明显。除了沉积速率降低外, 过快的 O<sub>2</sub> 流量还会使制备的膜层结构疏松, 聚集密度低, 内部体散射增加, 在宏观上的结果就是膜层透过率降低, 表面雾化严重<sup>[21-22]</sup>。

结合以上分析, 最终选择 O<sub>2</sub> 流量为 60 mL·min<sup>-1</sup> 的工艺制备多层膜, 该工艺下其折射率及消光系数可以满足设计需求, 其单层膜光谱曲线及光学常数分布情况分别如图 13 和图 14 所示。

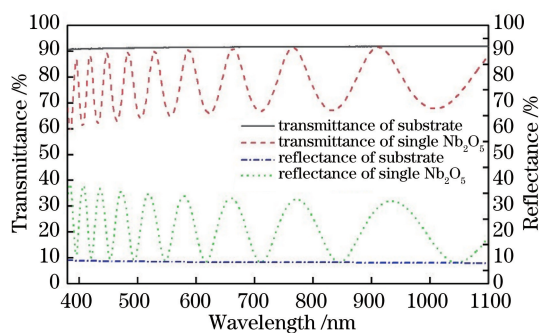


图 13 60 mL·min<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> 流量下单层 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的光谱

Fig. 13 Spectra of single-layer Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> under oxygen gas flow of 60 mL·min<sup>-1</sup>

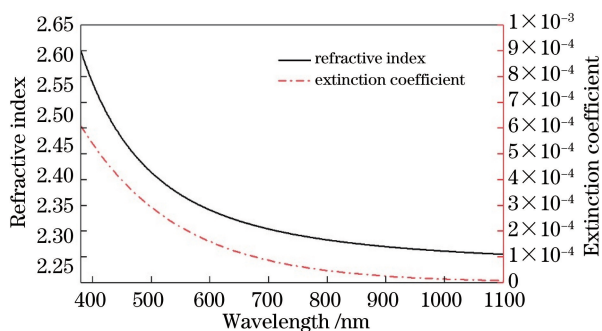


图 14 60 mL·min<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> 流量下单层 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的光学常数

Fig. 14 Optical constants of single-layer Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> under oxygen gas flow of 60 mL·min<sup>-1</sup>

利用 ICP 辅助沉积设备使基板表面升高到 120 °C 时再次镀膜, 镀膜结束后在对膜层进行结合

力测试, 发现 3M 胶带拉扯三次后有轻微裂膜现象。经分析, 可能是由于在 ICP 辅助沉积设备加热基板时, 基板表面被破坏, 粗糙度变大, 膜层与基底的结合力变差。因此, 在膜层前增镀 100 nm 的 SiO<sub>2</sub> 层, 以改善基底表面的面型。对膜系进行简单优化并镀制, 最终得到 A 片的测试光谱如图 15 所示。

镀制 A 片完成后, B 片镀制过程与其类似, 最终 B 片的测试光谱如图 16 所示。

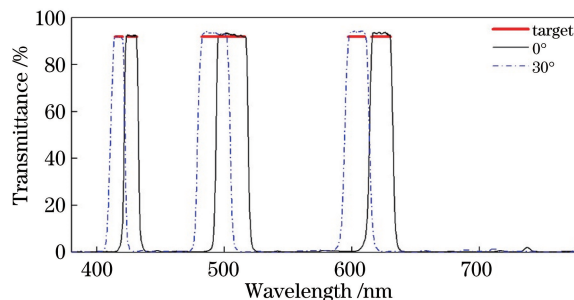


图 15 CMWCF-A 的光谱测试结果

Fig. 15 Test spectral results of CMWCF-A

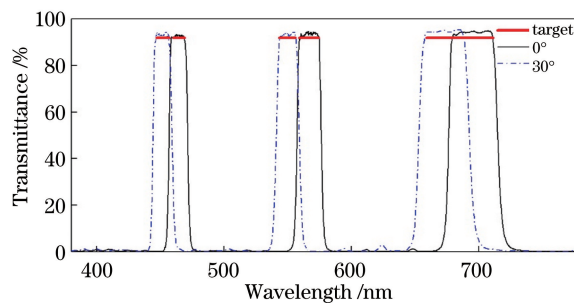


图 16 CMWCF-B 的光谱测试结果

Fig. 16 Test spectral results of CMWCF-B

由图 15、16 可以看出, 改善制备工艺后, 光谱结果满足设计需求。每个通带偏移前后的透过率均大于 92%, 高于 Semrock 公司和 Iridian 公司所实现的 90% 平均透过率和文献[7]的 80% 平均透过率。

在 LED 光源 0° 和 30° 入射的条件下, 利用 CM3600A 显微测色仪测试样片的颜色参数, 其透



射光  $a$ 、 $b$  值的测试结果如表 4 所示。

表 4 CMWCF 的颜色测试结果

Table 4 Test color results of CMWCF

CMWCF	Incident angle of $0^\circ$		Incident angle of $30^\circ$	
	$a$	$b$	$a$	$b$
CMWCF-A	0.9062	-1.4661	-7.1692	0.5296
CMWCF-B	1.9111	0.2231	7.4693	1.8267

从表 4 可以看出,CMWCF-A、B 片的颜色测试结果满足设计需求。

## 5 结 论

结合大角度入射时 CMWCF 出射光的通带位置和通带宽度的要求,以及 R、G、B 三色光合成白光时的比例关系,确定了 CMWCF-A、B 片的技术参数。基于光学薄膜理论,通过替换等效间隔层材料和设置分形结构,设计了合适的初始膜系结构,并利用设计软件 Macleod 对膜系进行了优化,得到了适宜制备的滤光膜设计。通过对实验结果的反演分析,增加了单层膜制备时的反应气体流量,优化了多层膜起始阶段的制备工艺,解决了薄膜短波透过率低、膜层与基底结合力不好等问题。最终研制出了通带平均透过率 $\geq 92\%$ 、截至带平均透过率 $\leq 1\%$ 且膜层附着力良好的互补三带通滤光膜,满足电视终端显示的使用需求。通过减小膜层厚度并降低膜层累计应力,将膜层镀制在树脂基板表面以扩大使用范围,这是未来研究工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Ma Y F. Application and development of 5G technology in radio and television [J]. Digital Technology & Application, 2019(3): 24-25.  
马云飞. 5G 技术在广播电视中的应用与发展[J]. 数字技术与应用, 2019(3): 24-25.
- [2] Talcott K E, Adam M K, Sioufi K, et al. Comparison of a three-dimensional heads-up display surgical platform with a standard operating microscope for macular surgery[J]. Ophthalmology Retina, 2019, 3(3): 244-251.
- [3] Lin S F, Kim E S. Optical in-line holographic three-dimensional video display with omnidirectional viewing zones based on a center-symmetric multi-sideband filtering method [J]. Optics Communications, 2018, 426: 570-583.
- [4] Liu P. Research on orthogonally polarized 3D display [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 46-54.  
刘璞. 正交偏振 3D 显示系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 46-54.
- [5] Gao X, Sang X Z, Zhang W L, et al. Viewing resolution and viewing angle enhanced tabletop 3D light field display based on voxel superimposition and collimated backlight [J]. Optics Communications, 2020, 474: 126157.
- [6] Zhang Y, Weng X Y, Liu P H, et al. Electrically high-resistance liquid crystal micro-lens arrays with high performances for integral imaging 3D display [J]. Optics Communications, 2020, 462: 125299.
- [7] Hao Q. Development of multi-passband filters for the application of 3D glasses based on wavelength multiplexing approach [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018: 42-50.  
郝琦. 基于波分式 3D 眼镜多通道滤光膜的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2018: 42-50.
- [8] Tian R Z, Zhou Y, Xing T Y, et al. Simulation software for white light synthesis [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(4): 936-940.  
田润知, 周媛, 邢天阳, 等. 白光合成模拟软件及其应用[J]. 电子器件, 2018, 41(4): 936-940.
- [9] Chen H C, Huang C Y, Cheng P W. Stress mechanisms of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  thin films sputtered on flexible substrates investigated by finite element method[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 449-457.
- [10] Tang J F, Gu P F, Liu X, et al. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 203-272.  
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: 203-272.
- [11] Cai Y. Research on Short-wavelength infrared Dual-band-pass filter and its spectrum at cryogenic Temperature [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 17-23.  
蔡渊. 红外双色滤光片的研制及其低温光谱研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 17-23.
- [12] Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4056: 50-64.
- [13] Wang S W, Chen X S, Lu W, et al. Fractal independently tunable multichannel filters [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(21): 211113.
- [14] Yang C. Interface roughness control of optical thin films and anti-scattering properties[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018: 34-45.  
杨琛. 光学薄膜界面粗糙度调控及减散射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018: 34-45.
- [15] Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized Bi-directional reflectance distribution function [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0329002.  
章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的

- 粗糙表面偏振特性[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0329002.
- [16] Ji Y Q, Liu H S. Silicon dioxide optical thin film materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2018: 3-30.  
季一勤, 刘华松. 二氧化硅光学薄膜材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 3-30.
- [17] Usha N, Sivakumar R, Sanjeeviraja C, et al. Niobium pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) thin films: rf power and substrate temperature induced changes in physical properties[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 1945-1950.
- [18] 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.
- [19] Coşkun Ö D, Demirela. The optical and structural properties of amorphous  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  thin films prepared by RF magnetron sputtering [J]. Applied Surface Science, 2013, 277: 35-39.
- [20] 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.
- [21] Lai F C, Lin L M, Huang Z G, et al. Effect of thickness on the structure, morphology and optical properties of sputter deposited  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  films [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(4): 1801-1805.
- [22] Berg S, Nyberg T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes [J]. Thin Solid Films, 2005, 476(2): 215-230.