

近红外光上转换发光显示器中干涉过滤膜的设计

陈瑞改 王琼华* 辛燕霞

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘 要 介绍了近红外光上转换发光显示器的结构及其原理, 为了进一步提高该显示器的亮度等性能并避免近红外光从屏上泄露, 根据多层干涉过滤膜设计原理设计了该显示器所需的两个多层干涉过滤膜: 一个为在可见光 420~800 nm 短波段高反射, 近红外光 800~1000 nm 长波段高透射特性的 LP 膜; 另一个为特性与之对应相反的 SP 膜. 采用对称膜的设计并用 MATLAB 语言进行了仿真优化, 得到了总层数为 21, 厚度分别为 1586.8 nm 和 2157.8 nm 的 LP 膜和 SP 膜, 该膜系在整个波段和较大角度范围内都具有很好的透反特性. 考虑多层薄膜制备中存在材料折射率和膜层厚度偏差, 该设计膜系具有较大的制造容差.

关键词 干涉过滤膜; 近红外光上转换发光; 显示器; 优化算法

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A

0 引言

近红外光上转换发光显示器是近年来研制的高性能新型显示器, 具有体积小、效率高、色彩鲜艳、亮度高、寿命长等特点, 且可实现真三维立体显示的众多优点. 目前国内外很多学者从事这个领域的研究, 并取得了一定的研究成果^[1~4], 现在仍是显示领域研究的热点. 为了进一步改善该类显示器的性能, 将多层膜理论运用于该显示器中两个光学膜的设计中. 为此, 本文将简介近红外光上转换发光显示器的原理结构, 阐述多层膜的设计方法, 并具体用计算机优化出膜层的结构参量, 给出多层膜的光学特性. 该膜系不仅在波段和较大角度范围内都具有很好的透反特性, 且具有较大的制造容差.

1 近红外光上转换发光显示器的工作原理及所需光学膜特性

图 1 为近红外光上转换发光显示器^[3,4]的原理结构图. 波长约 975 nm 的二极管激光器发出的近红外光通过束扫描和聚焦光学系统后照射到高效率的稀土掺杂氟化物的上转换材料发光屏上, 上转换

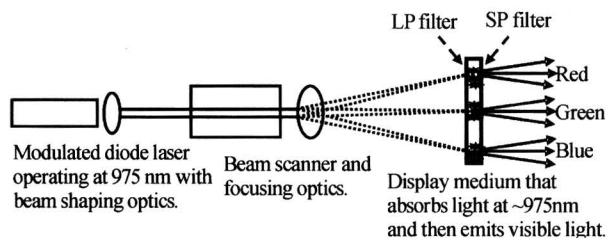


图 1 近红外光上转换发光显示器的原理结构图
Fig. 1 Schematic diagram of the optically written display based on up-conversion of near infrared light

材料吸收红外光后, 辐射出红、绿、蓝三种可见基色光, 从而实现彩色显示. 这种显示器较之现已成熟和正在开发的常规显示器(诸如阴极射线管、液晶、等离子体和有机电致发光显示), 具有体积小、效率高、色彩鲜艳、亮度高、寿命长等特点, 尤其可实现真三维立体显示^[5,6].

为了进一步提高该显示器的亮度和对比度等图像性能并避免红外光从屏上泄露造成对观众健康不利, 上转换材料发光屏的两边需设计两个特性相反的光学膜. 一是左边长波通干涉过滤膜(简称 LP-Long Pass), 即包括 975 nm 的 800~1000 nm 的长波段光尽可能透射, 可见光 420~800 nm 的短波段光尽可能反射; 二是右边短波通干涉过滤膜(简称 SP-Short Pass), 即包括 975 nm 的 800~1000 nm 的长波段光尽可能反射, 可见光 420~800 nm 的短波段光尽可能透射. 这样, 左边的 LP 膜让 975 nm 的激励激光尽可能透过以激发屏上上转换材料发光, 并同时让辐射回显示器的可见光反射回观众方向, 这都利于亮度的提高. 右边的 SP 膜将未被屏上发光材料吸收的红外光反射回屏上, 再次激发屏上材料发光, 一方面增加了亮度, 另一方面避免了剩余红外光射向观众, 不利观众的健康; 并同时让可见光尽可能射向观众, 增加图像亮度.

2 光学干涉多层膜的设计原理与优化计算

下面将应用多层光学膜的设计理论, 结合近红外光上转换发光显示器中 LP 膜和 SP 膜的具体要求, 利用优化算法, 设计出光学膜结构并给出光学特性.

2.1 多层膜的计算公式和优化算法

由文献^[7~10]可知, 膜层的特征矩阵包含了膜系的全部光学特性, 通过研究膜系的特征矩阵来研

究干涉多层膜的光学特性. 多层膜的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & (i \sin \delta_j) / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

膜层的相位厚度

$$\delta_j = (2\pi \eta_j d_j \cos \theta_j) / \lambda \quad (2)$$

式中折射角 θ_j 由折射定理确定

$$\eta_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j & (\text{对于 P 偏振光}) \\ n_j \cos \theta_j & (\text{对于 S 偏振光}) \end{cases} \quad (3)$$

多层膜和基片衬底的组合导纳为

$$Y = C/B \quad (4)$$

偏振波的反射比为

$$R_p(R_s) = \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 + C} \right] \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 + C} \right]^* \quad (5)$$

多层膜的反射率

$$R = (R_p + R_s) / 2 \quad (6)$$

无吸收多层膜的透射率

$$T = 1 - R \quad (7)$$

为了设计出符合要求的多层膜, 需要对膜层参量进行优化. 优化是在高、低折射率材料确定的条件下, 对理论设定的各个膜层厚度 d 值进行优化. 本文采用的优化函数是

$$F = \sum_{i=1}^m |T(\lambda, d) - T_{\text{want}}| \quad (m = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{step}}} + 1) \quad (8)$$

式中 T 是由确定的 d 值通过理论公式计算出的透射率, T_{want} 是目标透射率, λ_{max} 、 λ_{min} 分别为整个波段的波长最大值和最小值, λ_{step} 是所取波长间隔. $|\dots|$ 里面适合任何膜层结构. 优化时, 考虑取 F 最小时的一系列 d 值. 本文采用 MATLAB 自带优化函数 `optimset()` 和 `fminunc(F)` 对膜层参量 d 进行优化.

2.2 多层干涉膜的设计及数值计算

结合所需多层干涉膜的特点和膜层设计理论, 采用由高折射率材料和低折射率材料交叉分布的对称膜系来构成如图 2 的多层膜. 采用最简单也是最常用的周期性对称膜系 $(0.5LH0.5L)^N$ 来实现多层膜的设计, 其中 N 代表膜层周期数. 考虑衬底在内, 所需膜系的结构为 $G|0.5LH0.5L|^N A$, 式中 G 代表衬底, A 代表膜层外的空气层, 膜层的实际层数为 $k = 2N + 1$.

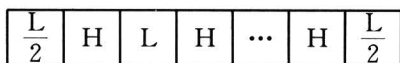


图 2 对称膜系构成的多层膜(H、L 分别代表高、低折射率层)

Fig. 2 The multi-layer filter formed from layer-symmetric films (H and L represent the layers having high and low refractive index, respectively)

选用折射率为 1.5 的玻璃作衬底, 二氧化钛 (TiO_2 , 折射率 $n_H = 2.4$), 二氧化硅 (SiO_2 , 折射率

$n_L = 1.46$) 分别为高、低折射率膜层材料. 取截止波段的中心波长 λ_0 为 634 nm, 周期膜层结构 $(0.5LH0.5L)^N$ 中 0.5L 取光学厚度为 $n_L d_L = \lambda_0 / 8$ 的一层 SiO_2 膜, H 取光学厚度为 $n_H d_H = \lambda_0 / 4$ 的一层 TiO_2 膜, 周期数 N 为 10, 实际要镀的膜层数 k 为 21 层. LP 膜在可见光 420~800 nm 的短波段目标透射率为 0, 在 800~1000 nm 的长波段目标透射率为 1; SP 膜在可见光 420~800 nm 的短波段目标透射率为 1, 在 800~1000 nm 的长波段目标透射率为 0.

本文用 MATLAB 语言^[11] 进行编程, 通过多次优化, 算出两个多层干涉膜的参量如表 1. LP 膜和 SP 膜的总厚度分别为 1586.8 nm 和 2157.8 nm.

表 1 多层干涉膜参量

| 层数 K | 折射率 n | LP 膜厚 d/nm | SP 膜厚 d/nm | 层数 m | 折射率 n | LP 膜厚 d/nm | SP 厚度 d/nm |
|------|-------|------------|------------|---------|--------|------------|------------|
| 空气 | 1 | | | 12 | 2.4 | 59.1359 | 98.7427 |
| 1 | 1.46 | 98.5951 | 176.6832 | 13 | 1.46 | 109.2849 | 159.2874 |
| 2 | 2.4 | 40.5580 | 107.2350 | 14 | 2.4 | 69.6121 | 95.5009 |
| 3 | 1.46 | 63.3513 | 174.9927 | 15 | 1.46 | 104.5365 | 160.6853 |
| 4 | 2.4 | 46.9401 | 101.7109 | 16 | 2.4 | 66.4668 | 99.3888 |
| 5 | 1.46 | 73.9062 | 167.6359 | 17 | 1.46 | 125.2922 | 157.7673 |
| 6 | 2.4 | 49.6921 | 119.6140 | 18 | 2.4 | 67.5215 | 100.6227 |
| 7 | 1.46 | 90.4458 | 25.1304 | 19 | 1.46 | 93.5662 | 173.8336 |
| 8 | 2.4 | 54.0176 | 25.1304 | 20 | 2.4 | 56.6784 | 108.7785 |
| 9 | 1.46 | 60.1286 | 170.1559 | 21 | 1.46 | 127.7877 | 176.8242 |
| 10 | 2.4 | 38.2980 | 97.2447 | 玻璃衬底 | 1.50 | | |
| 11 | 1.46 | 90.9494 | 158.0762 | 总厚度(nm) | 1586.8 | 2157.8 | |

2.2 多层膜的光学特性分析

根据上述设计的膜系结构和参量, 得出 LP 膜和 SP 膜对垂直入射光的透射率—波长特性曲线如图 3. 可以看出 LP 膜在可见光 420~750 nm 短波段透射率小于 10%, 在 850~1000 nm 的长波段透射率大于 97%, ; SP 膜在可见光 420~750 nm 的短波段光目标透射率大于 93%, 在 850~1000 nm 的长波段透射率接近 0. 这已能很好地满足图 1 系统的实际要求.

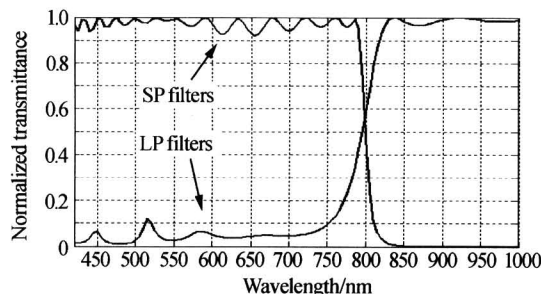


图 3 LP 膜和 SP 膜对垂直入射光的透射率—波长特性曲线
Fig. 3 The simulated wavelength-dependent transmittance of the LP and SP filters in the case of normal incident

由于在图 1 系统的实际光路中, 光对膜层的入射角会在一定范围内, 如 30° , 多层膜不仅要在垂直

入射时满足透射要求,还要在这个角度范围内也满足要求,因此,本文研究了透射率与入射角之间的关系. 选取 LP 膜和 SP 膜两个不同波段 420~800 nm、800~1000 nm 内有代表性的波长 530 nm 和 975 nm 来分析透射率—角度特性,其关系曲线分别如图 4 和图 5. 可以看出 0~30° 角度范围,LP 膜在波长 530 nm 处透射率小于 3%,在波长 975 nm 处透射率大于 96%;SP 膜在波长 530 nm 处透射率大于 94%,975 nm 波长透射率小于 0.1%. 由此可见 LP 膜和 SP 膜在 0~30° 范围内都有很好的特性.

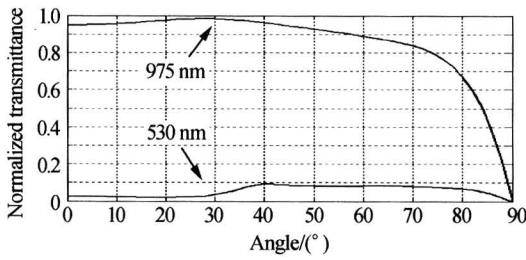


图 4 LP 膜在波长 530 nm 和 975 nm 透射率—角度特性曲线

Fig. 4 The simulated angle-dependent transmittance of the LP filter at the wavelength of 530 nm and 975 nm

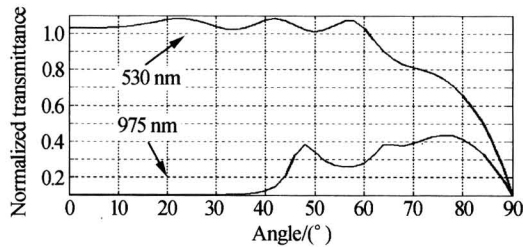


图 5 SP 膜在波长 530 nm 和 975 nm 透射率—角度特性曲线

Fig. 5 The simulated angle-dependent transmittance of the SP filter at the wavelength of 530 nm and 975 nm

在多层薄膜制备中,存在由设备和工艺引起的材料折射率以及膜层厚度的微小偏差,由此导致多层膜光学特性的偏差. 这就要求设计的膜系具有较大的容差. 选取高低折射率材料的折射率 n 和每层膜厚度 d 都有 $\pm 3\%$ 波动时,分别计算透射率—波长可见特性曲线,其结果如图 6 和图 7. 可以看出,在光 420~750 nm 短波段以及在 870~1000 nm 的长

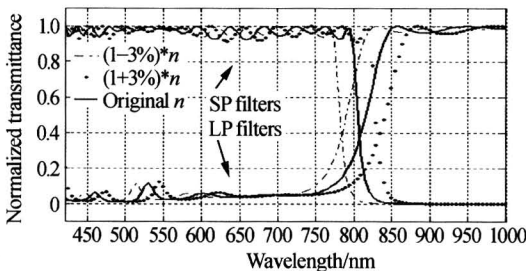


图 6 折射率 n 有 $\pm 3\%$ 波动时 LP 膜和 SP 膜的透射率—波长特性曲线

Fig. 6 Refractive index tolerance of the LP and SP filters

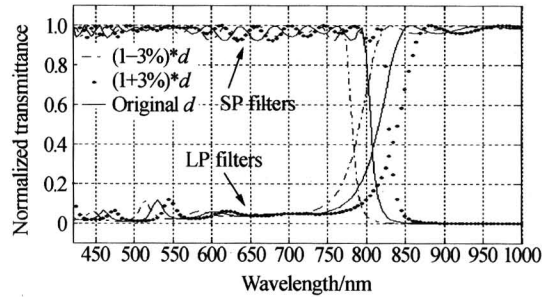


图 7 膜厚有 $\pm 3\%$ 波动时 LP 膜和 SP 膜的透射率—波长特性

Fig. 7 Film thickness tolerance of the LP and SP filters 波段, LP 膜和 SP 膜的透射率—波长特性曲线的波动保持在 $\pm 3\%$ 范围内.

3 结论

近红外光上转换发光显示器发光屏的两边设计 LP 膜和 SP 膜后可以提高图像亮度并避免了红外光从屏上泄露不利观众的健康. 上述采用的对称膜的设计以及优化算法得到总层数为 21,厚度分别为 1586.8 nm 和 2157.8 nm 的 LP 膜和 SP 膜,它们所需要的波段不仅在垂直入射而且在 0~30° 的角度范围都达到很好的特性. 即便考虑多层薄膜制备中存在材料折射率以及膜层厚度偏差,LP 膜和 SP 膜的光学特性仍保持在较小的波动范围内,即这两种多层干涉过滤膜具有较大的制造容差. 作者所在实验室正在进行上转换发光显示器的研制,实验结果与分析将在后续文章中给出.

参考文献

- 冯鸣,阮双琛,杜晨林,等. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器中频率上转换产生可见光的实验研究. 光子学报, 2004, **33**(6): 648~650
Feng M, Yuan S C, Du C L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 648~650
- 范文慧,赵卫,刘英,等. 电子俘获材料的红外上转换效率. 光子学报, 1999, **28**(2): 188~192
Fan W H, Zhao W, Liu Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 188~192
- Wang Q H, Bass M, Rapaport A, et al. Photo-luminescent screens for optically written displays based on up-conversion of near infrared light. *Electronics Letters*, 2004, **40**(16): 987~989
- Rapaport A, Bass M. Review of the properties of up-conversion phosphors for new emissive displays. *International Symposium of Society for Information Display*, 2004, Seattle, 1237~1239
- 陈晓波,李美仙,闻鸥,等. Er : ZBLAN 玻璃的光束上转换立体显示的初步研究. 光谱学与光谱分析, 2003, **23**(3): 431~434
Chen X B, Li M X, Wen O, et al. *Spectroscopy and*

- Spectral Analysis*, 2003, **23**(3): 431~434
- 6 Downing E, Hesselink L, Ralston J, *et al.* Three-color, solid-state, three-dimensional display. *Science*, 1996, **273**: 1185~1189
- 7 张幼文. 红外光学工程. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 99~158
Zhang Y W. Infrared Optic Engineering. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1982. 99~158
- 8 M. 弗朗松. 光学滤光片. 徐森祿译. 北京: 科学出版社, 1986. 35~52
M. Francon. Optical Filters. Xu S L Translating. Beijing: Science Press, 1986. 35~52
- 9 顾培夫, 杨毓铭, 陈海星, 等. 用于波分复用系统的多峰干涉滤光片. 光子学报, 2003, **32**(7): 837~839
Gu P F, Yang Y M, Chen H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 837~839
- 10 张小晖, 陈清明, 杨光, 等. 具有鲁棒性的矩形窄带滤光片的自动设计. 光子学报, 2001, **30**(8): 1019~1023
Zhang X H, Chen Q M, Yang G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 1019~1023
- 11 张志勇. 精通 MATLAB 6.5 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 102~198
Zhang Z Y. Mastery of MATLAB 6.5. Beijing: Beijing University Aeronautics and Astronautics Press, 2003. 102~198

Interference Filters in the Optically Written Display Based on Up-conversion of Near Infrared Light

Chen Ruigai, Wang Qionghua, Xin Yanxia

School of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu 610064

Received date: 2005-03-17

Abstract The structure and principle of an optically written display based on up-conversion of near infrared light is presented. In order to improve the screen luminance and avoid the leakage of infrared light, two multi-layer interference filters are designed for the display. One is called LP filter, which has low transmittance for visible light between 420~800 nm, and a high transmittance for infrared light between 800~1000 nm; The other is called SP filters with opposite characteristics. Layer-symmetric films are used to design the filters and MATLAB is used to simulate and optimize the design. The obtained LP and SP filters have good characteristics within the whole wavelength bandwidth and the incident angles of 0°~30°. The 21-layer LP and SP filters have a total thickness of 1586.8 nm and 2157.8 nm, respectively. The manufacturing tolerances on material refractive index and film thickness are reasonably large.

Keywords Interference filter; Up-conversion of near infrared light; Display; Optimization method



Chen Ruigai was born in 1978 in Henan province. She is a graduate student in Sichuan University. Her recent research interest is information display technology.