

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

一种日夜两用光学低通滤波器的研制

袁宏韬^{1,2}, 张贵彦^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:利用石英晶体的双折射效应和特殊红外截止滤光片设计并实现了一种日夜两用光学低通滤波器。该滤波器置于 CCD 摄像机传感器前可以有效地降低或消除离散光电探测器对不同空间频率目标成像所产生的拍频效应或条纹混叠现象,并能消除红外光对彩色还原的影响,从而提高了 CCD 摄像机成像的视觉效果。在分析光学低通滤波器原理和红外截止滤光片作用的基础上,设计了一种特殊的红外截止膜系,可使 CCD 摄像机白天成彩色像、夜晚成黑白像。采用双离子束溅射技术在石英晶体薄片上淀积了该膜系,经测试,光谱特性满足设计要求,成像效果理想。

关键词:光学低通滤波器;红外截止膜;双离子束溅射

中图分类号:O484.1;TN713 文献标识码:A

Design and manufacture of a day and night optical low pass filter

YUAN Hong-tao^{1,2}, ZHANG Gui-yan^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China*)

Abstract: An optical low pass filter (OLPF) used in front of the sensor of a CCD camera was designed according to the birefringent effect of quartz crystal and infrared cut-off optical filter. OLPF can reduce the frequency-mixing phenomenon effectively. When a object is imaged on the discrete photoelectric detector at different spatial frequencies, and eliminate the effect of infrared light on color rendition to improve image quality of the CCD camera. Especially, when the objects such as fringes or grates are imaged on the sensor of the CCD camera, it can enhance the image distinction and eliminate the effects of the disturbing fringes of false color. Based on analyzing the operational principle of OLPF and function of IR-CUT optical filter, a special IR-CUT coating is designed to make the CCD camera obtain colored image in daytime and black-white image at night. The coating is deposited on thin quartz crystal sheet with double ion beam sputter technique the measuring results show that the spectral character and image quality are perfect.

Key words: Optical Low Pass Filter(OLPF); infrared cut coating; double-ion beam sputtering

收稿日期:2005-08-10;修订日期:2006-04-14.

基金项目:国家“863”计划资助项目(No. 2001AA312100);中科院光电集团资助项目(No. KG CX2-405)。

1 引言

近 20 年来,数码影像技术进步很快,应用的领域也日益宽广,从数码相机(DSC)、数码摄像机(DVC)到影像电话(Video Phone)以及未来的第三代移动电话(G3)等,所有和数码影像有关的产品都要使用阵列式光电成像器件(如 CCD、CMOS)。由于 CCD 等固体图像传感器读取影像均采用非连续性取像方式,根据奈奎斯特定理,一个图像传感器能够分辨的最高空间频率等于它的空间采样频率 f_0 的一半,这个频率称为奈奎斯特极限频率 f_N ($f_N = f_0/2$)。在用 CCD 或 CMOS 获取目标图像信息时,当抽样图像超过系统的奈奎斯特极限频率时,在图像传感器上,高频成分将被反射到基本频带中,造成所谓纹波效应或莫尔效应,图像将产生周期频谱交叠混淆或称为拍频现象。这些混叠的信号将影响图像清晰度,甚至出现彩色条纹干扰。因此,必须采用预处理前置滤波技术,即采用光学低通滤波器(Optical Low Pass Filter,OLPF)^[1-3],降低 CCD 或 CMOS 光敏面上光学图像的频带宽度,以减少频谱混淆。

本文在简单分析 OLPF 的工作原理和红外截止滤光片所起的作用基础上,通过改进红外滤光片膜系设计,研制了一种新型的日夜两用光学低通滤波器,与传统 OLPF 相比,不需要移进移出滤光片就能使探测器在白天得到彩色图像,晚上得到高亮度的黑白图像。

2 光学低通滤波器工作原理

光学低通滤波器利用的是石英晶体的双折射作用,把栅格状目标的一束透射光分成两束—寻常光和异常光,迭加后可微量改变透射光强的空间分布。光学低通滤波器大都是由两块或多块石英晶体薄板构成的,放在 CCD 或 CMOS 传感器的前面。目标图像信息的光束经过 OLPF 后产生双折射(分为寻常光 o 光束和异常光 e 光束)。根据 CCD 或 CMOS 像素尺寸的大小和总感光面积计算出抽样截止频率,同时也可计算出 o 光和 e 光分开的距离。改变入射光束的偏振态将会形成差频的目标频率,达到减弱或消除低频干扰条纹、特别是彩色 CCD 或 CMOS 出现的伪彩色干扰条

纹的目的。图 1 所示为 OLPF 在光路中的工作原理。

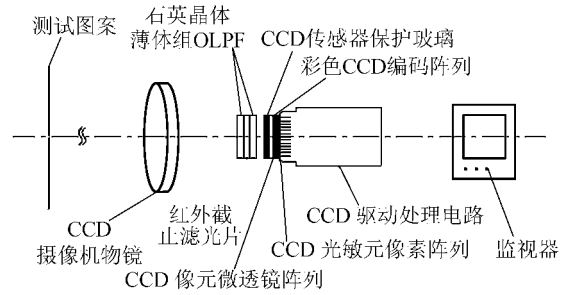


图 1 OLPF 在光路中的工作原理

Fig. 1 Operational principle of OLPF in optical path

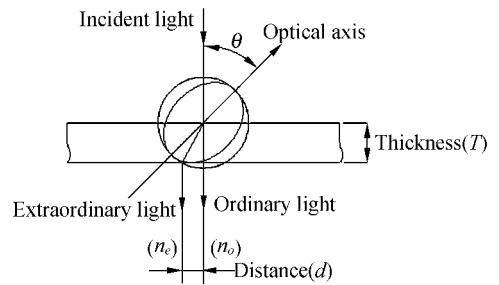


图 2 光线通过石英晶体后的双折射效果

Fig. 2 Birefringent effect of light passing through quartz crystal

如图 2 所示,根据 Fresnel 假设和 Huygens 原理来计算光的传播。入射光和光轴所形成的角度为 θ ,寻常光线的折射率为 n_o ,异常光线的折射率为 n_e ,寻常光线和异常光线分开的距离为 d , d 与石英晶体薄板厚度 T 有关,其关系式为:

$$d = T \times \frac{(n_o^2 - n_e^2) \tan \theta}{n_o^2 \tan^2 \theta + n_e^2}, \quad (1)$$

当 $\tan \theta = n_e/n_o$ 时,就可以得到最大的分开距离。当 $n_e \approx n_o$, $\theta = 45^\circ$ 时,公式可简化为

$$d = T \times \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}, \quad (2)$$

如图 3 所示,利用石英晶体的双折射特性,成像光束经过不同厚度的石英晶体薄板,光轴成 45° 角,就可使带有同一目标图像的信息被分成 o_1 光束和 e_1 光束,形成相对错开的像,分开的距离满足消除一维拍频干扰条纹分开的距离。经过第二片石英晶体薄板后,又将 o_1 光束、 e_1 光束分为 oo_2 、 oe_2 光束和 eo_2 、 ee_2 光束。通过晶体滤波片后,原来目标包含的空间频率的光束(该频率下的目标像有可能与 CCD 阵列水平方向或垂直方向

的空间频率叠加产生差拍的频率,这个频率刚好是在图像低频范围内,使所成的像产生干扰条纹的频率)会产生分离,使频率发生小量变化,分离的寻常光和异常光光强会减少一半。当分开距离 d 与条纹宽度相等时,光强为零;当条纹宽度是分开距离 d 的 $1/2$ 时,光强为 100% ;当条纹宽度是分开距离 d 的 $l/(2n+1)$ 时,就会成为梳型滤波;当条纹宽度比分开距离大时,已经变成几乎不受其影响的低通滤波器。由此可知,首先只要计算出 CCD 摄像机的总的频宽和奈奎斯特极限频率,然后计算出拍频现象的频宽并换算成空间距离,就可求得石英晶体薄板满足上述频率微小频移的厚度 T 。加入这样一组晶片,虽然不会增加高频成份,分辨率极限值不会提高,甚至于 CCD 光敏面的光照度还会减弱,但可达到消除干扰条纹的目的。当用彩色 CCD 摄像机拍摄彩色条纹或网格状目标景物时,不仅可达到消除伪彩色干扰条纹的影响,而且还能提高 CCD 视频图像视觉清晰度^[4]。

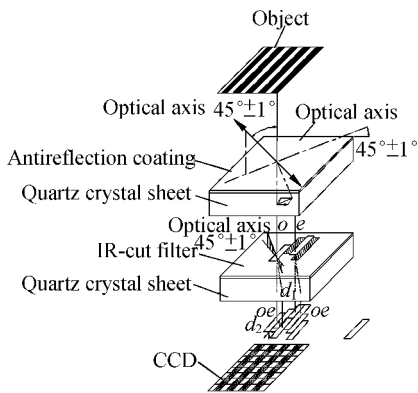


图 3 栅格状分布经过石英晶体后所形成的 o 光和 e 光分布

Fig. 3 Distribution of o light and e light formatted by grating-like distribution passing through quartz crystal

3 红外截止滤光片的作用及其改进设计

在使用 CCD 或 CMOS 图像传感器拍摄彩色景物时,由于它们对颜色的反应与人眼不同,所以必须将它们能检测到而人眼无法检测的红外线部分除去,同时调整可见光范围内对颜色的反应,使影像呈现的色彩符合人眼的感觉。因此,在低通滤波晶片表面镀上 IR-CUT 膜(干涉式)或配磷

酸玻璃(吸收式)使用。传统的 IR-CUT 膜和磷酸玻璃只是单纯将红外线滤去让可见光透过,这使得夜间的成像效果差。要想解决这个矛盾,使白天和黑夜都能通过同一台摄像机来提供图像,可以在白天使用滤光片,夜晚移去滤光片。滤光片的移来移去靠小机关来完成,但小机关有寿命的限制。针对这一问题,本文设计了一种特殊的红外截止膜系^[5],具有可见和红外两个透射带,将其镀制到低通滤波器的石英晶体薄板上即可实现白天成彩色像,夜晚成黑白像。膜系设计光谱参数如表 1 所示:

表 1 膜系设计参数

Tab. 1 Design specification of the IR-CUT coating

Wavelength(nm)	Transmission(%)
440~600	>90%(AVG.)
645±15	~50%
665~785	<3%
820~870	>85%(AVG.)
895~920	~50%
360~1100	<3%

其中 $440\sim 600\text{ nm}$ 为白天成彩色像波段, $820\sim 870\text{ nm}$ 为夜间成黑白像波段。设计曲线如图 4 所示。

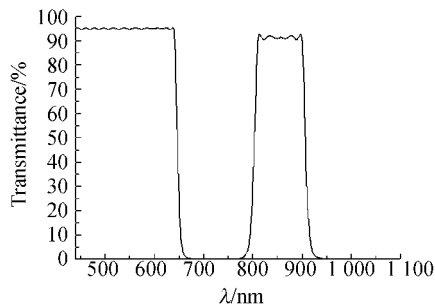


图 4 红外截止膜系的设计光谱曲线

Fig. 4 Design curve of the IR cut coating

4 红外截止膜系的镀制

4.1 实验装置

实验使用双离子束溅射沉积薄膜系统,其具有长期稳定工作的特点,在对沉积速率准确定标

的条件下,可监控任意膜厚的光学膜层,而且监控精度很高。主、辅离子源采用美国 Veeco 公司生产的 16 cm 和 12cm 射频离子源,射频频率为 13.56 MHz,16 cm 离子源为聚焦型,12 cm 离子源为发散型。主离子源使石英放电室中的 Ar 气发生电离,产生的 Ar^+ 由屏栅极正电压聚焦后又经加速栅极的负电场加速,经中和器电子中和后轰击靶材,溅射出靶材的分子或原子;12 cm 辅助离子源产生 Ar^+ 和 O^- 离子,主要作用是在成膜前对基片进行预清洗并使基片表面活化,改善膜

基过渡层的结构和性质,同时在沉积过程中对溅射材料的分子或原子进行辅助轰击,增加膜层的附着力和堆积密度。实验所用的材料为 Ta(纯度为 99.9%)和 SiO_2 (纯度为 99.99%)靶,溅射离子源、靶和基板互成直角,即靶平面和基板平面成 45° 角,并在溅射时靶材以 $\pm 3.5^\circ$ 角扫描。夹具采用单轴高速旋转式金属夹具。

在离子束溅射镀膜过程中,离子源对成膜速率、膜厚均匀性及光学机械特性起着重要作用,表 2 列出了该系统溅射 Ta 和 SiO_2 的主要技术参数。

表 2 溅射金属 Ta 和 SiO_2 的离子源沉积参数

Tab. 2 Ion sources deposition parameters for sputtering Ta and SiO_2

Material	Ionsource	Beam		Accelerator		RR power		Neutralizer	
		U/V	I/mA	U/V	I/mA	Forward/W	Relected/W	Emission/mA	Forward/W
SiO_2	16 cm	1250	600	250	11	355	5	900	60
	12 cm	400	76	600	2	150	0	152	30
Ta	16 cm	1250	600	250	11	355	5	900	60
	12 cm	550	150	250	3	275	4	300	40

由于离子束溅射系统具有长期稳定运行的优点,离子源工作加速电流、加速电压的变化误差可控制在 1% 内,薄膜的沉积速率相对稳定,这使得运用时间来监控膜厚成为可能。以各膜层的沉积时间作为膜厚控制参数,通过时间来控制膜厚的优点是对沉积速率进行准确定标后可以镀制任意厚度的非规整膜系。通过计算机对各膜层厚度优化后所得的膜系结构为任意膜厚的非规整膜系,采用传统的光控法或晶控技术难度较大,而采用时间来控制则很容易实现,且镀制的重复性、稳定性及成品率有很大提高。通过定标得到的沉积速率, Ta_2O_5 为 0.305 nm/s, SiO_2 为 2.71 nm/s, 以此计算出各膜层所需的时间。

4.2 实验结果

采用 Lambda19 型分光光度计对镀制的膜系进行了测试。图 5 给出了实际测试光谱曲线(实线),为了方便对比,图中也给出了设计曲线(虚线),通过两条曲线的对比可以看出,制备的红外截止膜系的各项指标均满足设计要求,其中曲线

在 850~900 nm 波段的毛刺是由分光光度计在此波段更换探测器造成的。图 6 给出了将此型光学低通滤波器应用到 CCD 成像光路中所成的彩色像和黑白像,其中黑白像是在完全黑暗条件下拍摄的,从图中可见,彩色像和黑白像成像质量都很理想。

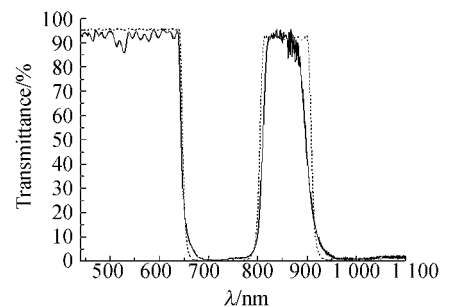


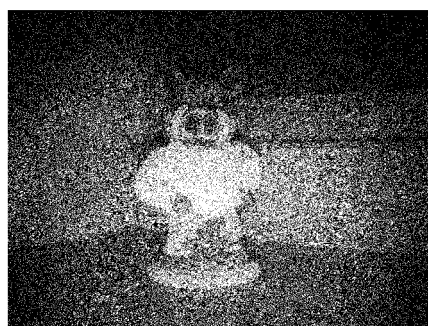
图 5 红外截止膜系实测透过率曲线

Fig. 5 Experimental transmittance curve of IR cut coating



(a)彩色像

(a)Color image



(b)黑白像

(b)Black and white image

图 6 彩色与黑白图像

Fig. 6 Color and Black-white image

5 结 论

利用石英晶体的双折射效应制成的光学低通滤波器放在 CCD 或 CMOS 传感器前能起到减弱或消除低频及伪彩色干扰条纹的作用,本文在分析 OLPF 的工作原理和红外截止滤光片所起的

作用基础上,通过特殊膜系的设计改进了红外截止滤光片的光谱特性。采用双离子束溅射系统在石英晶片上镀制了多层膜系,测试光谱曲线符合设计要求,应用到 CCD 成像光路中,得到了理想的成像效果,从而实现了白天成彩色像,夜间成黑白像的设计构想。

参考文献:

- [1] 吴翔,倪旭翔,陆祖康. 光电图像传感器中的光学低通滤波器[J]. 光电子·激光, 2001,12(11):1123-1125.
WU X, NI X X, LU Z K. The optical low-pass filter in photoelectric image sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12 (11):1123-1125. (in Chinese)
- [2] LIN B, CHEN ZH B, CAO X Q. The performance of optical low pass filter[J]. *SPIE*, 2003, 5279:204-207.
- [3] 潘炜,张晓霞,罗斌,等. 一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究[J]. 光学精密工程,2005,13(6):627-632.
PAN W,ZHANG X X,LUO B,*et al.* Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(6):627-632. (in Chinese)
- [4] 林家明,杨隆荣. 光学低通滤波器技术及其在 CCD 摄像机中的应用[J]. 光学技术 1999,(6):87-89.
LIN J M,YANG L R. Technique of the optical low-pass filter and its application in CCD camera[J]. *Optical Technique*, 1999, (6):87-89. (in Chinese)
- [5] MACLEOD H A. Thin-film optical filters[C]. *Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, Third Edition*, 2001. Chapter6.2, 223-255.

作者简介:袁宏韬(1978—),男,理学硕士,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,从事光学薄膜理论及工艺研究。