

中国科技核心期刊

ISSN 1005 - 5630

CN 31 - 1504 / TH

光学仪器

Optical Instruments

第三十五卷 第三期

Vol. 35

No. 3

2013

ISSN 1005-5630



9 771005 563135

目次
CONTENTS

测试技术 (TESTING TECHNOLOGY)

- 基于共焦成像法的亚表层损伤散射仿真 王 辉, 田爱玲, 王春慧 (1)
Simulation of sub-surface damage scattering based on confocal imaging ... WANG Hui, TIAN Ailing, WANG Chunhui
LED 结温精密测量及相关因素分析 蒋一成, 朱腾飞, 慎月强, 等 (7)
Precision measurement of LED junction temperature and the analysis of relevant factors
..... JIANG Yicheng, ZHU Tengfei, SHEN Yueqiang, et al.
双目立体视觉的光学标定技术 刘晓利, 田 媛, 童 飞, 等 (11)
An optical calibration technology of binocular stereo vision LIU Xiaoli, TIAN Yuan, TONG Fei, et al.
光纤持气率测井仪响应规律的实验研究 牟海维, 杨韵桐, 姜兆宇, 等 (16)
Experimental study on the response characteristics of the optical fiber gas holdup logging instrument
..... MU Haiwei, YANG Yuntong, JIANG Zhaoyu, et al.

应用技术 (APPLICATION TECHNOLOGY)

- 血糖浓度的短波近红外定量分析 王 伟, 李振庆, 倪 一, 等 (20)
The quantitative analysis of glucose in human serum by short-wave NIR spectra
..... WANG Wei, LI Zhenqing, NI Yi, et al.
角膜地形图中调焦函数的选取及搜索方法 郑 浩, 隋成华, 王河林, 等 (25)
The selection of focusing function and searching method in corneal topography
..... ZHENG Hao, SUI Chenghua, WANG Helin, et al.
机器视觉在轮胎检测领域的应用研究 谢 璐, 黄 祎 (32)
Machine vision applications in the field of tire testing XIE Jun, HUANG Yi
一种基于小波域维纳滤波的图像复原算法 卢 勇, 刘泽昕 (36)
An image restoration algorithm based on wavelet domain Wiener filtering LU Yong, LIU Zexin

光学系统 (OPTICAL SYSTEM)

- 一种适用于 CPV 的太阳模拟器的光学结构与分析 王 瑜, 沈永财, 李湘宁, 等 (40)
Optical structure and analysis of a solar simulator for CPV WANG Yu, SHEN Yongcai, LI Xiangning, et al.
中阶梯光栅分光光路的设计 刘海涛, 黄元申, 李柏承, 等 (46)
Optical design of echelle optical splitting system LIU Haitao, HUANG Yuanshen, LI Baicheng, et al.

设计与研究 (DESIGN AND RESEARCH)

- 基于 DCT 变换的自适应图像水印实现 付天舒, 韩春杰, 隋 鑫, 等 (51)
Adaptive image watermark realization based on DCT transform FU Tianshu, HAN Chunjie, SUI Xin, et al.
散斑干涉条纹测量系统设计 盛 伟, 李季平, 陈加林, 等 (58)
Measurement system design of speckle interference fringes SHENG Wei, LI Jiping, CHEN Jialin, et al.
一种基于脊线的层级分水岭新算法 李春锋, 贾宏志, 谢娟敏 (63)
A novel hierarchy watershed algorithm based on ridge LI Chunfeng, JIA Hongzhi, XIE Juanmin

仪器及装置 (INSTRUMENTS)

- 小型化单横模单纵模激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器 胡文华, 任士龙, 刘传胜, 等 (70)
Miniature single transverse mode single longitudinal mode LD pumped Nd:YAG laser
..... HU Wenhua, REN Shilong, LIU Chuansheng, et al.

薄 膜 (FILM)

- 磁控溅射 $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{27}\text{Ga}_{17}$ 合金薄膜的光学反射特性研究 周 围, 刘 超, 孙 祺, 等 (77)
Research on optical reflective properties of $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{27}\text{Ga}_{17}$ alloy thin films fabricated by magnetron sputtering
..... ZHOU Wei, LIU Chao, SUN Qi, et al.
衬底温度对 $\text{Zn}_{0.98}\text{Cr}_{0.02}\text{O}$ 薄膜结构和磁性的影响 付长凤, 高宇飞, 刘 超, 等 (80)
Effect of substrate temperature on structure and magnetism of $\text{Zn}_{0.98}\text{Cr}_{0.02}\text{O}$ thin films
..... FU Changfeng, GAO Yufei, LIU Chao, et al.

- 数字电影滤光反射镜光谱设计 王银河, 吕少波, 姚春龙, 等 (84)
A design of filtering reflector spectrum for digital cinema WANG Yinhe, LV Shaobo, YAO Chunlong, et al.

综 述 (REVIEW)

- 仿生视觉系统的研究进展 邢 强, 戴振东, 王 浩 (89)
Research progress on artificial visual system inspired by compound eyes XING Qiang, DAI Zhendong, WANG Hao

文章编号: 1005-5630(2013)03-0084-05

数字电影滤光反射镜光谱设计*

王银河, 吕少波, 姚春龙, 雷鹏, 宋光辉, 李野

(沈阳仪表科学研究院 汇博光学技术公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 为了满足数字电影光学系统色温要求及提高光源能量利用效率,降低设计及光学薄膜镀制难度,计算了色温变化小、光源利用效率高的可见光高反射光谱波段。根据椭球滤光反射镜的工作原理及滤光薄膜的光谱特性,结合氙灯光源光谱及人眼的视觉函数,分析了可见光不同光谱波段对系统光效率及色度坐标的影响。获得了可见光波段光效利用率高,色度参数变化小的波段范围,解决了数字电影反光镜滤光薄膜可见光高反射波段初始设计问题。由滤光薄膜设计及镀制结果得到,405~690 nm 波长范围可作为数字电影滤光反射镜薄膜高反射区域,相比与氙灯光源光谱,x,y 色度偏差不超过0.001,理论反射光光效率达99%以上。

关键词: 视觉光学; 反射镜光谱; 数字电影; 光学薄膜; 色度坐标

中图分类号: O 433 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.03.017

A design of filtering reflector spectrum for digital cinema

WANG Yinhe, LV Shaobo, YAO Chunlong, LEI Peng, SONG Guanghui, LI Ye

(HB Optical Technology Co., Ltd., Shenyang Academy of Instrumentation Science, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to meet the color temperature, improve the efficiency of light energy in digital cinema system and reduce the difficulty for design and coating, the visible spectrum band with high efficiency and small changes in color temperature was calculated. According to the principle of ellipsoid reflector and the spectrum of thin film, together with the spectrum of xenon lamp and human visual function, the effects of different spectral bands on the optical efficiency and chromaticity coordinate of the thin film were analyzed. High light efficiency of visible spectrum and band range with slight change on chrominance parameter was obtained. Initial design of the reflector's thin film with high reflection region on visible spectrum for digital cinema system was solved. According to optical thin film design and deposition calculation, the visible wavelength region between 405~690 nm could be used as a high reflection region on the reflector's thin film for digital cinema system. In contrast with the spectrum of xenon light source, x, y chromaticity coordinate deviation is less than 0.001, and the theoretical reflection efficiency is higher than 99%.

Key words: visual optics; reflector spectrum; digital cinema; optical thin film; chromaticity coordinate

* 收稿日期: 2012-10-22

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项资金资助项目(K1020-26)

作者简介: 王银河(1981-),男,辽宁葫芦岛人,工程师,学士,主要从事光学薄膜方面的研究。

引言

数字电影是近年来迅速崛起的一种新的电影放映技术。由于其具有清晰艳丽的画面、无磨损的稳定放映效果、更低的发行成本等特点,在制作、储存、发行和放映上都有很大的优势^[1],已经逐步取代了胶片电影放映技术。数字电影放映机的核心为数字投影光学系统,包括光源系统、分色系统、数字微镜元件(DMD芯片)等。光源系统采用大功率氙灯光源,其光谱在紫外区及可见光范围与日光很接近^[2],配套集成设计的精密椭球组合滤光反光镜,因此具有出色的色彩还原性及亮度。理想的滤光反射镜一方面能够收集氙灯发出的可见光,提高光源的利用效率;另一方面能够滤除近紫外光及红外光,根据需要调整出射光的色温及显色特性。滤光光谱设计应保证可见光范围的波长高反射,近紫外光及近红外光高透射,光谱如图1所示。通过适宜光谱选择调整,使出射光颜色特性与日光接近,视觉特性好。但膜系设计及实际工艺难以实现这样理想的光谱要求,主要难点在于高陡度的截止及透射区、宽可见光反射区、接近于日光的光谱选择调整设计及镀制难以实现。从数字投影光学系统看,除滤光反射镜外还有多种薄膜器件,影响最终出射光的颜色特性。因此,实际的滤光反射镜光谱设计主要是保证影响光效率及光色度变化大的波长范围光高反射,近紫外及红外区高透射,通过优化设计薄膜膜系,来减小设计及镀制工艺难度。

1 滤光反射镜工作原理及光谱设计要求

1.1 滤光反射镜工作原理

数字电影光学系统中采用大功率氙灯光源及大型椭球反光镜组合形成光源系统。椭球反光镜内表面镀制40~50层精密滤光薄膜,基于光学干涉原理,通过膜层界面反射可见光,有效滤除近紫外光及近红外光,其工作原理如图2所示:椭球反光镜有2个共轭焦点,将氙灯光源置于F1,光源发出的光线入射到滤光膜及椭球镜上,近红外光及近紫外光从反光镜外侧透过或被镜面吸收,可见光反射汇聚至F2,实现了只有氙灯光源发出可见光进入光学系统中。

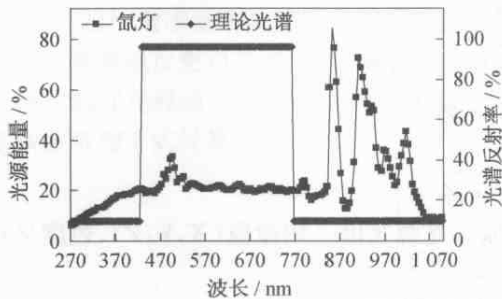


图1 氙灯与理想滤光光谱示意图

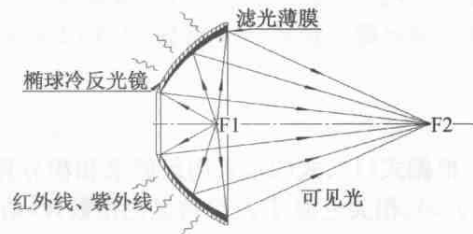


图2 滤光反射镜原理图

Fig. 1 Schematic diagram of xenon lamp and theory spectrum

Fig. 2 Principle diagram of the filtering reflector

1.2 滤光反射镜光谱设计要求

数字电影光学系统中滤光反射镜主要作用是提高光源的利用效率,即高反射可见光,同时为保护光路系统其他光学器件,将近紫外光及近红外光透射或吸收,使其不会进入光学系统中。滤光薄膜一方面要求具有高效反射氙灯光源发出的可见光,透射近紫外光及近红外光,同时保持反射光具有良好的显色特性。北美数字电影行业协会 DCI 数字电影行业标准规定出射光标准要求 x 、 y 色度坐标的误差变化在 ± 0.006 范围内;另一方面应尽可能提高反射光谱波段范围及反射率,提高氙灯光源的利用效率。由于滤光薄膜设计、镀制工艺、膜层应力、光线入射角度的效应等因素影响,难以实现图1中滤光光谱曲线要求。数字电影滤光反射镜光谱设计主要考虑在氙灯光源系统中,设计合适的高反射光谱波段及透射波段,保证光源可见光光谱波段的高反射,提高利用效率;同时出射光的颜色尽量接近于日光,降低薄膜设计及生产难度。

2. 氙灯光源色度特性计算

氙灯光源发出的光谱及能量分布 $\Phi(\lambda)$ 如图 3 所示, 光谱的色度坐标只与光源的光谱相对强度有关, 与绝对的强弱没有关系。光源光谱色度坐标采用 CIE1931 三刺激值计算, 如图 4 所示。

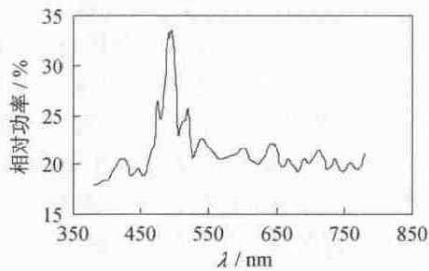


图 3 氙灯光源的光谱功率分布

Fig. 3 Relative energy of xenon lamp spectrum

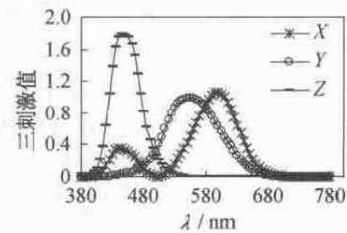


图 4 CIE1931 光谱三刺激值曲线

Fig. 4 Curves of CIE 1931 tristimulus values

氙灯光源发光光谱的三刺激值为 X, Y, Z 为:

$$\begin{cases} X = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\Phi(\lambda)$ 为氙灯光源相对光谱功率分布, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 为光谱三刺激值; CIE1931 系统下光谱色度坐标 x, y, z 计算公式为:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2), 采用近似求和积分算法^[3-5] 计算氙灯光源光谱三刺激值(X, Y, Z)、色度坐标参数(x, y, z)、相关色温 T 及平均显色指数 R , 结果如表 1 所示。

表 1 氙灯光源的色度坐标及显色指数

Tab. 1 Chroma and CRI of xenon lamp

参数	色温 T	色度坐标 x	色度坐标 y	色度坐标 z	平均显色指数 R
数值	5 800 K	0. 325 405	0. 342 354	0. 332 241	95

3 滤光镜光谱理论设计

3.1 滤光光谱光效率计算

由于不同波长的光引起人眼的感觉程度是不一样的, 功率相同但波长不同的单色光, 人眼感觉到明亮程度不同, 其规律符合图 5 所示人眼视觉函数 $V(\lambda)$ ^[6]。对于 380~780 nm 范围内可见光光谱来说, 由于近紫外及近红外区域的光线人眼已很难识别, 实际光通量应以能够敏锐观察到的光线能量为基准计算, 若是人眼观察不到的光谱波长, 自然没有必要投影到屏幕上。因此, 根据人眼的视觉响应曲线去分析氙灯光谱, 更具有实际意义。对于人眼难以分辨的波长范围, 可以根据权重不作为高反射光谱要求, 以降低设计及镀制难度。氙灯光源光谱光效率计算基于明视觉函数下, 不同光谱范围的光辐射通量由下式求得:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

其中, $\Phi(\lambda)$ 为氙灯光源相对光谱功率分布, $V(\lambda)$ 为人眼的视觉函数。

通过计算得到氙灯的相对光谱功率分布曲线,如图 6 所示,根据式 3,计算不同光谱范围的光辐射通量。通过对比不同光谱计算影响光效最大波长范围,按照不同波段 $\lambda_1 - \lambda_2$ 光谱能量权重积分计算光效,如表 2 所示。从表中看出 445~670 nm 范围内光谱辐射通量已经达到了 99% 以上。因此,反光镜高反射波段应保证此波长范围。

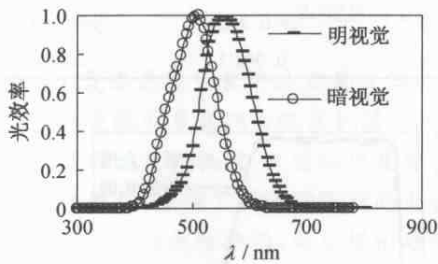


图 5 明、暗视觉 $V(\lambda)$ 函数

Fig. 5 Photopic and scotopic vision $V(\lambda)$

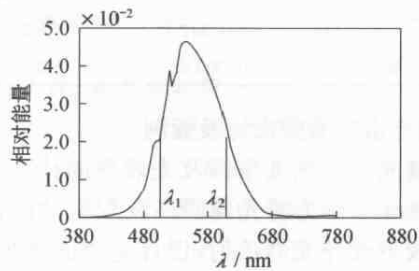


图 6 明视觉下氙灯相对光谱功率分布

Fig. 6 Relative energy of xenon lamp with photopic vision

表 2 滤光薄膜反射氙灯光谱范围与光效

Tab. 2 The efficiency and spectrum scope of thin film reflect xenon source

光谱范围/nm	380~780	405~705	435~680	445~670	460~660	475~650
计算总光效	100%	99.95%	99.67%	99.29%	98.37%	96.64%

3.2 滤光光谱色度参数计算

数字电影光学系统对于颜色的表现要求较高,这样能够实现色彩艳丽的影像画面。对于滤光反射镜的光学薄膜设计,要求反射氙灯发出的光线颜色变化小,保证光效同时,减少颜色失真。因此要求滤光光谱能够尽可能多地反射可见光,减小颜色的变化。通过光谱的三刺激值及色度坐标计算过程可以看出,色度坐标与氙灯光源的光谱功率分布及 XYZ 三刺激值都有着密切关系,经滤光反射镜薄膜反射后的光谱色度参数可用下式计算:

$$\begin{cases} X = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \\ Y = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \\ Z = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\rho(\lambda)$ 为反光镜薄膜反射系数;

由于氙灯光谱与在可见光波段很接近^[7],可进行近似等效计算。较理想的情况是氙灯发出的可见光都能够被滤光薄膜完全反射,当 $\rho(\lambda)=1$ (λ 在 380~780 nm 范围内),这时式(1)与式(4)一致。由于实际光谱设计需要选择某一波长范围作为高反射区域来降低设计及实现难度,根据式(4)及式(2)可得 x 、 y 色度坐标的表达式如下:

$$\begin{cases} x = \frac{k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda}{k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda + k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda + k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda} \\ y = \frac{k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda}{k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda + k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda + k \int_{\lambda} \rho(\lambda)\Phi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

选择不同波长范围对高反射波段的光谱特性进行色度坐标计算结果如表 3 所示。从表中可以看出, 405~690 nm 色度坐标变化已不超过 0.001, 此波段范围可作为反射镜薄膜的高反射区域, 反射光的色度参数变化较小。

表 3 滤光薄膜反射光谱色度坐标参数

Tab. 3 The thin film parameter of chroma

光谱范围/nm	380~780	415~680	405~690	415~700	415~720
色度坐标	$x=0.3254$ $y=0.3424$	$x=0.3257$ $y=0.3452$	$x=0.3253$ $y=0.3432$	$x=0.3264$ $y=0.3450$	$x=0.3265$ $y=0.3450$
色坐标最大变化值	0.0000	0.0028	0.0009	0.0027	0.0026

3.3 滤光光谱的薄膜设计及镀制

结合滤光光谱色度坐标及光效率的计算, 405~690 nm 可作为滤光薄膜高反射区波段, 近紫外光及近红外光高透射, 设计光谱曲线如图 7 所示。滤光反射镜光学薄膜采用介质薄膜材料镀制, 通过 PVD 镀制方法, 在椭球镜内表面交替镀制 40~50 层 20~130 nm 不同厚度的 TiO₂、SiO₂ 薄膜。图 7 是根据设计目标优化的膜系光谱曲线及实际镀制光谱曲线, 设计及测试角度均为 0°。表 4 列出了设计值与实际值色度坐标、光利用效率的对比情况。从计算结果可以看出, 色度坐标与光利用率设计值与实际镀制值相差不大, 差值为 1.3%。优化设计的光谱曲线及镀制曲线并不能达到与设计目标完全一致, 不同高反射波段有 2%~3% 的起伏变化, 差异的原因主要是镀制过程成膜厚度误差及反射测试中存在的误差。

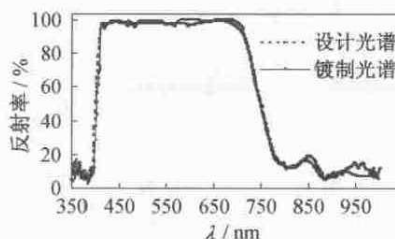


图 7 设计光谱与实际镀制光谱曲线(0°入射)
Fig. 7 Curves of the design and coating spectra

表 4 光谱设计及实际指标

Tab. 4 The thin film parameter of chroma

	理论设计 光谱	实际镀制 光谱	光谱与氙灯 光源偏差
色度坐标	x	0.326	0.325 ≤0.001
	y	0.343	0.342 ≤0.001
明视觉下光效利用率	98.8%	97.5%	—

4 结 论

根据氙灯光源的发光光谱曲线, 结合数字电影光学系统对色彩还原性及光亮度的要求, 得到了光效利用率高、颜色特性变化小的光谱波段。设计了适宜的滤光反射镜薄膜光谱曲线, 光谱曲线能够有效滤除近紫外光及近红外光, 高效反射可见光并使出射光具有与氙灯一致的颜色特性, 相比于氙灯光源全反射镜出射光谱, 光效达到 97.5%, x, y 色度坐标变化 < 0.001。

参考文献:

[1] 朱玮. 中国数字电影产业现状和发展[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 1-10.
 [2] 周太明, 周 详, 蔡伟新. 光源原理与设计[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2006: 365-366.
 [3] 荆其城, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 91-102.
 [4] 谭 力, 刘玉玲, 余飞鸿. 光源显色指数的计算方法研究[J]. 光学仪器, 2004, 28(1): 41-44.
 [5] 张 浩, 徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. 光学仪器, 2006, 26(4): 55-58.
 [6] 胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 17-18.
 [7] 于立轩. 数字电影放映氙灯使用经验[J]. 现代电影技术, 2008(7): 41-43.