

文章编号 1004-924X(2014)07-1774-07

高清激光显示中的色彩复现系统

付瀚毅^{1,2*}, 刘伟奇¹, 柳 华¹, 冯 睿¹, 康玉思¹, 陶淑苹¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:利用 60 吋全固态激光电视样机,建立了原有的电视色度信号向激光电视色度信号转换的模型。根据激光显示的特点,推导出以三色激光(红:660 nm,绿:532 nm,蓝:457 nm)为三基色的激光电视颜色系统与荧光粉电视三基色系统的矩阵转换关系。利用解码模块、现场可编程门阵列(FPGA)色域转换模块和编码模块搭建了激光三基色系统和普通电视三基色系统的色域转换电路,分析了电路中各个模块的作用及整个电路的工作过程,实现了对高清视频信号的色域转换。对比了不同颜色在转换后的激光电视上与荧光粉电视上的显示效果,对 11 个特征颜色的测量显示,其色域转换误差小于 9.8%。实验取得了很好的色域转换效果,成功地验证了高清激光电视的色彩复现能力。

关键词:激光电视;激光显示;颜色系统;色域转换;现场可编程门阵列

中图分类号:TN949.15

文献标识码:A

doi:10.3788/OPE.20142207.1774

Color-recurrent system in high-definition laser display

FU Han-yi^{1,2*}, LIU Wei-qi¹, LIU Hua¹, FENG Rui¹, KANG Yu-si¹, TAO Shu-ping¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: fuhanyi@163.com

Abstract: On the basis of an 60 inch all solid laser television(TV) prototype, a chrominance signal conversion model from an original TV to a laser TV was established. By researching the characteristics of laser display, the conversion matrix between traditional phosphor TV color system and laser TV color system was derived by using a three color laser (red:660 nm, green:532 nm, blue:457 nm) as primary-color. A gamut conversion circuit between the two color systems was given by utilizing a decode module, a Field Programming Gate Array(FPGA) controlling circuit and a coding module. The roles of these models and their working processing were analyzed, and the gamut conversion to the high-definition video signal was achieved. 11 feature colors displayed with the laser TV and the traditional phosphor TV respectively were measured and compared after conversion and the gamut conversion error is less than 9.8%. The experiment obtains an excellent result of gamut conversion and verifies the color-recurrent ability of high-definition laser TVs.

收稿日期:2013-05-28;修订日期:2013-07-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA030111, No. 2009AA032701)

Key words: laser television; laser display; color system; gamut conversion; Field Programming Gate Array(FPGA)

1 引言

近年来,随着人们对视觉要求的不断提高,人们也更为追求色彩的艳丽,这就要求显示设备能呈现更为丰富艳丽的画面。为了使显示设备展现更多更饱和的色彩,广色域显示成为未来一个重要的发展方向。激光显示技术作为新一代的显示技术,与其他显示方式相比,具有色域宽广、颜色饱和度高、无有害电磁射线辐射等优点。并且随着全固态激光器的迅猛发展,激光器的体积变得更加小巧、功率不断提高,激光电视的体积也随之大幅度缩减,不仅亮度有一定的提高,成本也大幅度地降低了。因此,激光显示技术受到了越来越多的关注^[1-2]。

传统的电视信号通过解码均产生 R、G、B(红、绿、蓝)三基色的强度调制信号。由于激光电视的三基色与现有的三基色不同,色域也比现有的 NTSC(National Television Standard Committee,美国)色域要大($\geq 160\%$ NTSC),若用现有的三基色调制的颜色控制信号直接调制激光三基色,定会出现颜色偏差和颜色混乱的现象。激光电视能否与现有的电视信号兼容,即激光电视能否适配传统的电视信号,呈现与普通电视相同的色彩,是激光电视技术的一个关键点。所以,要实现激光电视色彩复现,必须要对原始信号进行色域转换,建立彩色电视色度信号与激光色度信号之间的转换关系,才能使激光电视复现原有的色彩^[3-4]。

本文利用 60 吋全固态激光电视样机,建立了电视色度信号向激光电视色度信号转换的模型。将目前普遍采用的 NTSC 电视色域很好地映射到激光色域内,得到了激光三基色颜色系统与普通电视三基色系统的矩阵转换关系,并介绍了如何采用现场可编程门阵列(FPGA)实现高清视频彩色信号色域转换,以及电路中各个模块的作用和整个电路的工作过程。

2 色域转换模型

色彩复现首先要建立原有电视色度信号向激

光电视色度信号转换的模型。要针对不同波长激光的三基色建立相应的转换矩阵,从而推导出相应的转换关系,以适应不同情况下、不同系统之间的相互转换。

本文所述的三基色为 660 nm 的红光, 532 nm 的绿光和 457 nm 的蓝光。普通彩色电视选择传统的荧光粉电视^[5-6]。

用红绿蓝(R_L), (G_L), (B_L)来表示激光电视的颜色系统,用 R, G, B 三原色来表示普通荧光粉电视的颜色系统。同一个颜色在这两个不同的三原色颜色系统下,将有不同的三刺激值和色度坐标。这样就可以建立起激光电视和普通荧光粉电视两个颜色系统之间的转换关系,从而将普通荧光粉电视的三刺激值转换成适应激光电视颜色系统的三刺激值,使得在接受同样的信号时,激光电视显示的颜色与荧光粉电视相同^[7-8]。

在激光电视(R_L), (G_L), (B_L)系统中,假设匹配荧光粉电视中一个单位(R)原色所用的(R_L), (G_L), (B_L)三原色数量分别是 R_{Lr} , G_{Lr} , B_{Lr} ;匹配荧光粉电视中一个单位(G)原色所用的(R_L), (G_L), (B_L)三原色数量分别是 R_{Lg} , G_{Lg} , B_{Lg} ;匹配荧光粉电视中一个单位(B)原色所用的(R_L), (G_L), (B_L)原色数量分别是 R_{Lb} , G_{Lb} , B_{Lb} ,那么,根据格拉斯曼定律,(R), (G), (B)可分别用 R_{Lr} , G_{Lr} , B_{Lr} , R_{Lg} , G_{Lg} , B_{Lg} , R_{Lb} , G_{Lb} , B_{Lb} 表示,并且对于荧光粉电视中任意颜色(R)+(G)+(B)等于三套 R_L , G_L , B_L 项的总和。在荧光粉电视(R), (G), (B)颜色系统中,某一由 R 单位(R)原色、G 单位(G)原色、B 单位(B)原色相加组成的颜色可以分别用激光电视(R_L), (G_L), (B_L)系统中 R_{Lr} R, G_{Lr} R, B_{Lr} R; R_{Lg} G, G_{Lg} G, B_{Lg} G; R_{Lb} B, G_{Lb} B, B_{Lb} B表示^[9-10]。由此建立起他们与三刺激值之间的计算关系为:

$$\begin{cases} R_L = R_{Lr} R + R_{Lg} G + R_{Lb} B \\ G_L = G_{Lr} R + G_{Lg} G + G_{Lb} B \\ B_L = B_{Lr} R + B_{Lg} G + B_{Lb} B \end{cases} \quad (1)$$

式(1)即为激光电视与荧光粉电视之间的色度信号转换方程,式(1)也可用矩阵的形式表达:

$$\begin{pmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{L,r} & R_{L,g} & R_{L,b} \\ G_{L,r} & G_{L,g} & G_{L,b} \\ B_{L,r} & B_{L,g} & B_{L,b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2)$$

使用色度计测得荧光粉电视和激光电视三基色的色度坐标,带入式(2)即可求出矩阵:

$$\begin{pmatrix} R_{L,r} & R_{L,g} & R_{L,b} \\ G_{L,r} & G_{L,g} & G_{L,b} \\ B_{L,r} & B_{L,g} & B_{L,b} \end{pmatrix}.$$

荧光粉电视三基色在 CIE1964 系统下的坐标分别为:红(0.603 4, 0.349 9);绿(0.285 7, 0.584 7);蓝(0.153 7, 0.072 8)。

激光电视三基色在 CIE1964 系统下的坐标分别为:红(0.697 2, 0.285 7);绿(0.193 6, 0.755 9);蓝(0.158 7, 0.024 1)。

经计算得出转换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} R_{L,r} & R_{L,g} & R_{L,b} \\ G_{L,r} & G_{L,g} & G_{L,b} \\ B_{L,r} & B_{L,g} & B_{L,b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.470 0 & 0.420 0 & 0.000 0 \\ 0.240 0 & 0.500 0 & 0.265 0 \\ 0.060 0 & 0.170 0 & 0.529 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

式(3)即为激光电视的三基色(波长为红光 660 nm,绿光 532 nm,蓝光 457 nm)与荧光粉电视三基色的转换矩阵。

3 色彩复现的硬件实现

在建立了色域转换的理论模型后,更重要的研究内容是如何通过电子学系统来实现在视频显示中对每一个像素的实时颜色变换。这涉及到两个方面的研究:软件方面要在保证转换精度的前提下,优化理论模型;硬件方面则需采用高速图像处理芯片,综合优化算法和硬件设计。

3.1 颜色转换的硬件处理过程

颜色变换硬件系统就是要实时完成 HDMI 高清视频信号的实时颜色变换处理。整个系统采用了 Silicon Image 公司的 SiI9135 HDMI 接收芯片,将高清视频信号实时转化为 RGB 三基色的图像格式,再在 Xilinx 公司的高端 FPGA 产品 Virtex-5 中进行实时颜色变换处理,将变换后的 RGB 信号经过 Silicon Image 公司的 SiI9134 HDMI 发送芯片转换为 HDMI 格式的高清视频信号,从而完成了整个高清视频信号的实时颜色变换。

颜色变换系统的整体结构框图如图 1 所示。

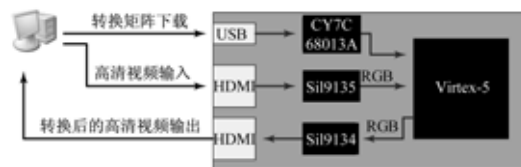


图 1 色域转换系统的结构框图

Fig. 1 Structure of gamut conversion system

这个系统的核心算法是将 RGB 格式的图像信号进行矩阵运算,转换公式如式(2)所示。

为了便于调整转换矩阵参数,采用上位机将转换矩阵下载到 FPGA 的方式来完成转换矩阵的配置。同时,由于转换矩阵的系数都是浮点数,FPGA 内部的整数乘法器是无法直接完成浮点乘法运算的,所以在上位机中还需要适当地放大转换矩阵的系数,将浮点系数转换为整数形式。在放大的同时,还需要将放大的倍数保存下来,与其他转换后的整数形式的系数一同下载到 FPGA 中,供 FPGA 进行矩阵乘法运算时使用。

3.2 上位机软件设计

上位机软件通过图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)获取用户输入的矩阵系数。由于这些系数都是浮点数,所以首先要确定浮点数转换为整数的放大倍数,然后将矩阵系数都转化为整数。当上述处理结束以后,就可以将配置参数通过 USB 接口下载到 FPGA 中,供 FPGA 内部的转换逻辑使用。

上位机软件处理的核心就是放大倍数的确定。确定放大倍数时,首先从用户输入的矩阵系数中提取最大值,再确定一个大于它的最小整数,记作 A_{ij} ;考虑到 RGB 颜色分量的值为 8 位,为了将用户输入的矩阵系数放大到最大,采用 $(0x400000/A_{ij})$ 作为放大参数,可以保证在乘法器工作过程中不会发生溢出,而且能够保证计算精度。GUI 界面如图 2 所示。程序流程如图 3 所示。

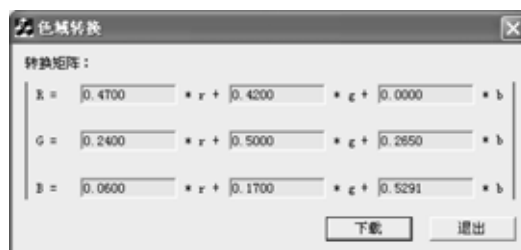


图 2 上位机 GUI 界面

Fig. 2 GUI interface of upper monitor

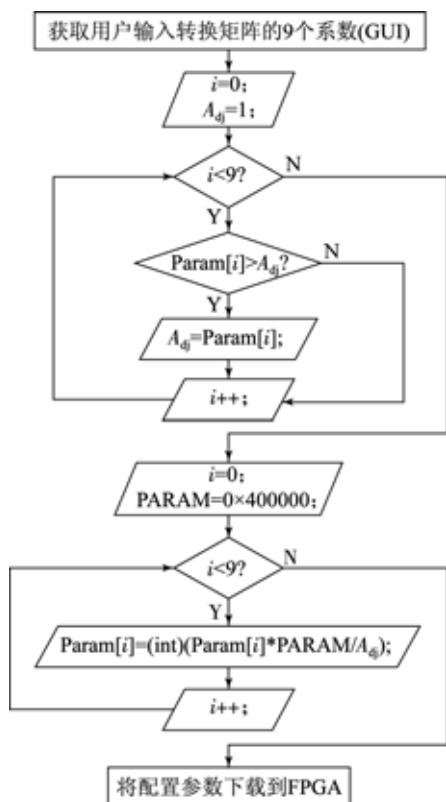


图 3 程序流程
Fig. 3 Stream of program

3.3 FPGA 的算法设计

用 FPGA 对从 SiI9135 输入的 RGB 信号进行乘法运算,通过应用 FPGA 内部的硬件乘法器,可以达成对高清视频信号的实时颜色转换。因为 FPGA 内部采用的乘数均为上位机放大的系数,所以在对乘法器输出进行累加之后,还要利用上位机传来的缩放因子进行缩小处理,以期达到正确的转换结果。转换后的 RGB 信号由 FPGA 输出到 SiI9134,并最终转化为 HDMI 标准的信号输出。

因为 RGB 三基色的处理方式完全一致,所以本文以 R 通道的处理方式为例加以描述,其处理步骤为:

- (1)使用 3 个 FPGA 内部的乘法器将输入的 RGB 3 种颜色分量分别与变换矩阵的系数相乘;
- (2)对三个乘法器的输出进行加法运算;
- (3)对加法运算结果与放缩因子进行乘法运算,将加法运算结果调整到正确数值(这个处理是针对上位机放大处理的一个逆过程,根据放大的倍数进行相应的缩小)。

FPGA 内部处理流程如图 4 所示。

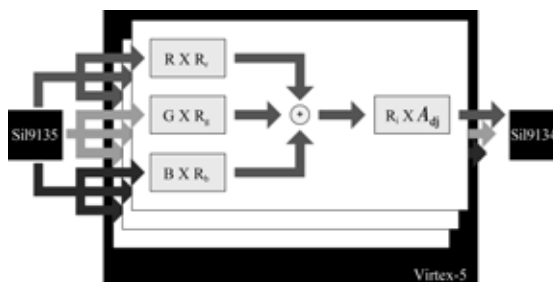


图 4 FPGA 处理流程
Fig. 4 Stream of FPGA gamut conversion

4 实验结果

利用课题组研制的 60 吋激光电视进行测试,实验现场如图 5 所示。



图 5 实验现场
Fig. 5 Experiment scene

用 Photo Research 公司生产的 PR-715 色度计测量激光电视和荧光粉电视显示的颜色。激光电视直接接收普通电视信号时,三基色在 CIE1964 系统下的坐标分别为: R(0. 697 2, 0. 285 7), G(0. 193 6, 0. 755 9), B(0. 158 7, 0. 024 1)。

普通电视信号经过色域转换系统转换后再输入到激光电视中,用色度计测得转换后激光电视三基色在 CIE1964 系统下的坐标分别为: R(0. 598 3, 0. 317 0), G(0. 288 7, 0. 627 7), B(0. 165 5, 0. 068 3)。

荧光粉电视三基色在 CIE1964 系统下的坐标分别为: R(0. 603 4, 0. 349 9), G(0. 285 7, 0. 584 7), B(0. 153 7, 0. 072 8)。

激光电视转换前后三基色色域三角形与荧光粉电视三基色色域三角形对比分别见图 6、图 7。

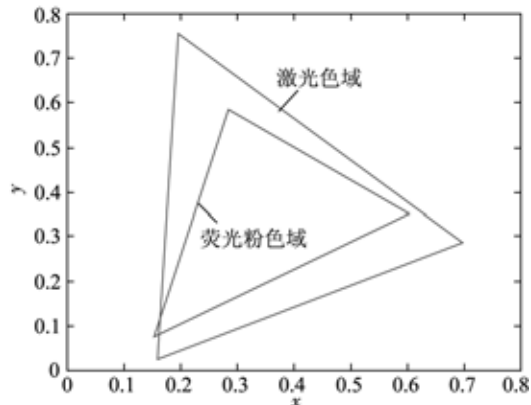


图 6 荧光粉电视色域三角形与转换前激光电视色域三角形

Fig. 6 Gamut triangles of phosphor TV and laser TV before gamut conversion

从图 6 可以看出,激光三基色所形成的色域没有完全包含荧光粉三基色的色域,这主要是因为蓝色激光的波长偏短,因而给颜色转换带来一定的偏差。

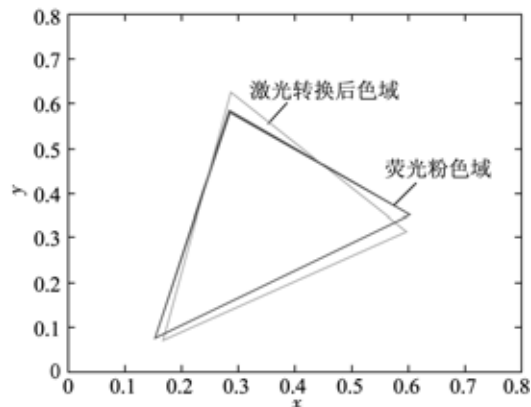


图 7 荧光粉电视色域三角形与转换后激光电视色域三角形

Fig. 7 Gamut triangles of phosphor TV and laser TV after gamut conversion

图 7 中激光电视转换后三基色色域几乎与荧光粉电视三基色色域重合。用计算机连接激光电视和荧光粉电视,输入不同 RGB 值颜色的色块图像,并用色度计分别对每种色块在荧光粉电视上和经色域转换后的激光电视上显示的色度坐标进行测量及对比,结果如表 1 所示。

表 1 不同颜色由荧光粉电视和转换后的激光电视显示的色度坐标对比

Tab. 1 Gamut comparison between phosphor TV and Laser TV after gamut conversion

项目 RGB	荧光粉电视 色坐标(CIE1964)		激光电视经转换后 色坐标(CIE1964)		转换误差/%
	x	y	x	y	
255/0/0	0.603 4	0.349 9	0.598 3	0.317 0	4.77
0/255/0	0.285 7	0.584 7	0.288 7	0.627 7	6.62
0/0/255	0.153 9	0.072 8	0.165 5	0.068 3	7.31
128/128/0	0.375 9	0.523 2	0.381 7	0.505 2	2.94
128/0/128	0.182 3	0.095 5	0.168 8	0.106 1	8.34
0/128/128	0.186 2	0.203 5	0.201 3	0.205 2	5.51
128/128/128	0.201 2	0.178 6	0.182 3	0.174 4	7.20
255/255/0	0.362 9	0.529 0	0.391 1	0.556 3	6.12
255/0/255	0.214 5	0.111 3	0.192 6	0.120 3	9.80
0/255/255	0.194 3	0.229 6	0.182 8	0.241 2	5.43
255/255/255	0.221 6	0.217 7	0.240 6	0.198 5	8.70

图 8 为红色在未经色域转换的激光电视、荧光粉电视和经过色域变换后在激光电视上显示的

效果(彩图见期刊电子版)。可以看出,激光电视在转换之前的颜色饱和度很高,与荧光粉电视有



图8 红色在色域转换前的激光电视(左)、荧光粉电视(中)和经过色域转换后的激光电视上的显示效果(右)

Fig.8 Red color displayed with laser TV before (left) and after (right) gamut conversion, phosphor TV (middle)



图9 60吋激光电视播放样片的显示效果

Fig.9 Sample video displayed with 60 inch laser TV

很大的差别;而转换之后的激光电视和荧光粉电视显示的红色,两者在视觉上是几乎相同的,转换误差在视觉允许的范围內。

图9为激光电视经色域转换系统转换后播放高清视频的效果(彩图见期刊电子版)。可以看出,激光电视完美地实现了高清视频信号的实时转换与播放。

5 结 论

本文建立了普通电视色度信号与激光电视色度信号之间的转换关系,并利用 Silicon Image 公司的 SiI9135 HDMI 接收芯片、SiI9134 HDMI 发送芯片和 Xilinx 公司的高端 FPGA 产品 Virtex-5 实现了激光电视高清视频的色彩转换;同时成功地搭建了激光电视的高清色彩复现系统,取得了令人满意的效果,色域边缘映射误差 $<9.8\%$ 。该结果验证了60吋全固态激光电视的颜色复现和信号兼容能力。

参考文献:

- [1] 彭毅,邢廷文,张雨东,等.激光电视实时颜色校正方法研究[J].信息终端,2007,31(4):33-35.
PENG Y, XING T W, ZHANG Y D, et al.. Research of real-time color correct method for laser TV[J]. *Information Terminal*, 2007, 31(4): 33-35. (in Chinese)
- [2] 孙红进,帅仁俊.激光扫描显示对视觉感知的影响[J].液晶与显示,2007,24(4):547-551.
SUN H J, SHUAI R J. Effects of laser scanned display on visual perception[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 24(4): 547-551. (in Chinese)
- [3] 张岳,郝丽,柳华,等.激光显示的原理与实现[J].光学精密工程,2006,14(3):402-405.
ZHANG Y, HAO L, LIU H, et al.. Principle and realization of laser display technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 402-405. (in Chinese)
- [4] 刘颖帅,王金城,于佳,等.激光投影显示色彩管理系统[J].激光杂志,2009,30(3):60-61.
LIU Y SH, WANG J CH, YU J. Laser projection display color management system [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(3): 60-61. (in Chinese)
- [5] 田志辉,刘伟奇,柳华,等.激光显示中的色域转换系统[J].液晶与显示,2007,22(4):423-427.
TIAN ZH H, LIU W Q, LIU H, et al.. Color gamut conversion system in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(4): 423-427. (in Chinese)
- [6] 康玉思,田志辉,刘伟奇,等.超薄前投激光显示系统研制[J].应用光学,2012,33(5):832-836.
KANG Y S, TIAN ZH H, LIU W Q, et al.. Ultra-thin front projector for laser display system [J]. *Journal of Applied Optic*, 2012, 33(5): 832-836. (in Chinese)
- [7] 陈旭,冯玉涛,刘伟奇,等.大屏背投激光显示广角镜头的设计[J].光学精密工程,2011,19(5):

945-950.

CHEN X, FENG Y T, LIU W Q, *et al.*. Design of large dimension and rear projecting lens in laser display system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):945-950. (in Chinese)

- [8] ZHENG Q, YAO Y, LI B, *et al.*. Experimental study of the generation of a blue laser by intracavity frequency doubling of a CW Nd:GdVO₄ laser with lithium borate [J]. *Applied Optics*,

2009, 48(16):2979-2982.

- [9] YAO Y, ZHENG Q, QU D P, *et al.*. All-solid-state continuous-wave frequency-doubling Nd:YVO₄/LBO laser with 2.35 W output power at 543 nm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23):3758-3760.

- [10] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

JING Q CH, JIAO SH L, YU B L, *et al.*. *Colorimetry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)

作者简介:



付瀚毅(1985—),男,吉林长春人,主要从事光学设计,光学检测等方面的研究。E-mail:fu_hanyi@163.com

导师简介:



刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,主要从事 193 光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲索干涉仪制造方面的研究。E-mail:liuwq@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)