

文章编号: 0253-2239(2005)06-855-5

## 用于投影机的发光二极管照明单元\*

王蔚生 姜维 窦晓鸣

(上海交通大学光学工程研究所, 上海 200030)

**摘要:** 目前的投影机光源——高压汞灯存在寿命短、色温高、存在有害光线、发热集中等缺点,严重制约了投影机进入家庭应用领域。发光二极管的最近发展为其作为高压汞灯的替代光源提供了可能性。提出了一种由一个发光二极管、一个准直镜、一个前蝇眼透镜和一个后蝇眼透镜组成的用于投影机的发光二极管照明单元,由数个照明单元加上会聚透镜则构成一个基本的照明系统。发光二极管的发光经准直镜压缩光束发散角后被前蝇眼透镜分割为多个细光束,会聚透镜将每个细光束都叠加会聚到显示芯片上,实现光能量的会聚和光场再分布,以满足投影机对光通量和光场均匀性等方面的要求,后蝇眼透镜用于与后续光路的匹配。作为照明单元的一个应用实例,文中分析了一种单片式硅上液晶投影机。

**关键词:** 光学器件; 显示技术; 照明系统; 蝇眼透镜; 发光二极管

中图分类号: TH741.5 文献标识码: A

## A LED Light Unit for the Projector

Wang Weisheng Jiang Wei Dou Xiaoming

(Institute of Optics Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** For current light source of projector — UHP lamp, the disadvantages of short lifetime, high colour temperature, having harmful light, high heat density etc., restrict the application of projector in home entertainment. Recent development of LED provides the possibility of LED being a substitute light source of UHP lamp. A LED-based lighting unit composed of a LED, a collimating lens, a front fly-lens and a back fly-lens is brought forward. Several such lighting units make a basic lighting system of projector. The divergence angle of light beam from LED is compressed by collimator lens. Then the light beam is divided into several tiny light beams by the front fly-lens, and each tiny light beam will be converged to micro-display panel by converging lens. So, the light energy is gathered and the light field is redistributed. The requirements of projector on light flux and homogeneity could be met. The back fly-lens is used to match with following optical elements. As an application of the lighting unit, a signal panel liquid crystal on silicon projector is analyzed.

**Key words:** optical devices; technology of display; lighting system; fly-lens; LED

### 1 引言

投影机(包括前投影机和背投影机)主要有液晶投影机、硅上液晶(Liquid crystal on silicon, LCOS)投影机、数字光线处理器(Digital light processor, DLP)投影机。投影机对光源的光通量、色度、光束质量等均有很高的要求,目前绝大多数的投影机采用高压汞灯(UHP)等作为照明光源(有些影院投影机采用更高光通量输出的氙灯)。

高压汞灯很好地满足了投影机对光通量等方面的要求,但采用这种光源的投影机却存在如下缺点:

1) 光源的寿命很短,高压汞灯的寿命(光源光通量衰减 50% 的时间)通常只有几千个小时,氙灯的寿命则更只有几百个小时,加上光源的价格十分昂贵,导致了极高的光源使用成本;

2) 高压汞灯所发白光的色温通常在 8500 K 左右,与 6500 K(太阳的色温)的白光有较大的差距。

\* 国家博士后基金二等资助项目(2003034036)。

作者简介: 王蔚生(1967~),男,福建右田人,博士,副教授,主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: weisheng.wang@163.com

收稿日期: 2004-07-02; 收到修改稿日期: 2004-10-16

如果要调整白平衡点,则要采取抑制短波段色光的办法,这样就导致了光能量利用率的下降,在光源能量利用率和色平衡之间存在矛盾;

3) 高压汞灯的初始发光中包含较强的紫外光,需要采取各种措施消除紫外光,但残余的紫外光仍然对后续元件造成伤害。例如在液晶投影机中,常常使用有机偏振片作为检偏以及纯化(cleanup)偏振光的元件,而大多数有机偏振片对紫外光有较强的吸收<sup>[1]</sup>,最终将导致偏振片性能的退化而失效;

4) 光源发热量大、并且发热极为集中,必须很好地解决散热问题,在许多投影机中,冷却风道的合理设计是一个十分棘手的问题;

5) 为处理彩色信号,在投影机中需要采用分色装置将光源的白光分解成为 R,G,B 三基色光,为了提高能量利用率,三基色通常使用尽可能大的光谱通道,但光谱通道越大,投影机的色彩则越差,在能量利用率与色彩要求上存在矛盾。

由于上述原因,尤其是光源使用成本较高的原因导致了投影机在我国家庭领域应用中的进展缓慢,尽管在最近一年里有了很大的增长,但绝对数值依然很小,据统计,2003 年中国用于家庭娱乐的液晶和数字光线处理器投影机仅为 3 万多台。

发光二极管(LED)具有寿命长、发热低、发光颜色纯的特点,以往发光二极管的最大缺点是发光功率太低,难以满足投影机对光功率的要求。近来,在大功率发光二极管方面已经取得了很大的进步,单个发光二极管就可以实现上百流明的光通量输出,使得采用多个发光二极管组合作为照明光源已经可以满足低光通量输出的投影机的要求。国际上对采用发光二极管照明的投影机的研究,最初的目标是输出光通量仅为数个流明的迷你型投影机,最近则逐渐转到输出光通量为数十流明或更高的光通量输出上,争取满足背投电视的需求,目前离这个目标还有一定的距离。2003 年初,Philips 公司和 Lumileds 公司发表了合作研制的几种发光二极管照明的液晶投影机,输出光通量为 4.4~11.5 lm<sup>[2]</sup>;2003 年 12 月在美国加州 Marina 举行的高清电视研讨会上,美国的 Qubic Light 公司展示了一种以发光二极管为照明光源的前投式投影机,投影面对角线为 1270 mm (50 英寸),报道对色彩的评价良好、对光通量仅提到很暗,没有具体数值;2003 年,日立公司也研制了一种采用发光二极管照明的投影显示器<sup>[3]</sup>;2004 年 5 月,3M 公司在 SID 展览会上则展示了一种采用发光二极管照明的、输出光通量为 80 lm、屏幕对角线

为 1067 mm(42 英寸)的数字光线处理器投影机。事实上,尽管发光二极管作为光源实际应用于投影机仅在两、三年取得了一定的进展,但在这方面的应用方案设想早在 1997 年就有人提出了相关的专利<sup>[4]</sup>,随着发光二极管功率的提高,这方面的专利申请数量有了相当的增加<sup>[5~10]</sup>。

在以往投影机的照明方案中,常使用蝇眼透镜作为光束分割与匀光的主要元件<sup>[11~14]</sup>,在液晶投影机中需要使用偏振光,还需要考虑偏振光的分色、合色<sup>[15~18]</sup>。本文提出了一种采用发光二极管照明的、用于投影机新型蝇眼透镜结构,该结构由相同照明单元来构成,照明单元针对单个发光二极管,利用一个准直镜压缩发光二极管的光束发散角,一对蝇眼透镜实现照明光场的均匀化,从而实现其对投影芯片的均匀照明。利用多个照明单元的组合可以将多个发光二极管发出的光以满足光场均匀度的要求照射到投影芯片上,从而满足投影机对光通量的要求,通过对该照明光源的各种形式组合,可以组成各种形式的发光二极管照明的投影机。

## 2 发光二极管照明单元的结构

### 2.1 投影机对照明系统的要求

投影机的照明系统由光源以及光源到显示芯片之间的光学元件构成,用于对显示芯片提供合适的照明。投影机由于显示芯片、结构、工作方式等方面的原因,对于照明系统的具体要求会有很大的差异,作为投影机的一个组成部分,照明系统必须满足各种投影机的特定要求。但一般来说,投影机对于照明系统会有以下主要要求:

1) 光通量:照明系统的光通量指由照明系统输出的照射到显示芯片上的光通量。投影机的输出光通量是投影机的一个重要技术指标,根据投影机的显示芯片、结构、镜头、工作方式等各方面的因素,对照明系统的输出光通量会有一些的要求;

2) 光场均匀度:指显示芯片上的光场均匀度。均匀度是投影机的一个重要指标,由于照明系统的均匀度将直接反映到投影屏幕上,一般要求照明系统的均匀度要优于投影机的均匀度;

3) 照明光束的发散角:在投影机的结构中,投影镜头和投影芯片之间插有其他光学元件,如液晶投影机有 X 型棱镜、数字光线处理器投影机有全反射棱镜(Total internal reflection, TIR),这样,在投影镜头和投影芯片之间会有较大的距离,即投影镜

头具有较大的后工作距离。这就要求照明光束具有较小的发散角,光束中发散角角度较大的部分将不能进入投影镜头。

除了上述要求外,各种投影机还会根据自身的设计目的,提出不同的要求,照明系统的设计必须尽可能兼顾这些要求,在各种要求之间取得平衡。

## 2.2 照明系统结构

在运用发光二极管作为投影机的照明光源时,单个发光二极管难以满足投影机的光通量要求,需要使用多个发光二极管同时工作,当然,在能够满足光通量要求的情况下,应尽可能考虑使用较少的发光二极管、甚至使用单个发光二极管的可能性,因为,使用的发光二极管越多,照明系统的结构将越复杂、体积越大、光的能量利用率越低。

图 1 是本文提出的采用发光二极管为光源的投影机照明系统,图 1 中 1 为发光二极管,2 为准直透镜,3 为前蝇眼透镜,4 为后蝇眼透镜,5 为会聚透镜,6 为微显示芯片; $S_1$  为发光二极管与准直透镜物方主面的间距, $S_2$  为准直透镜像方主面到前蝇眼透镜的间距, $S_3$  为前蝇眼透镜到后蝇眼透镜的间距, $S_4$  为后蝇眼透镜到准直透镜的,  $S_5$  为会聚透镜到微显示芯片的间距。其中一个发光二极管、一个准直镜、一个前蝇眼透镜和一个后蝇眼透镜构成一个照明单元(图中的虚线部分),多个照明单元加上一个会聚透镜则构成了一个最简单的多光源照明系统,被照明物体——微显示芯片被放置在会聚透镜的焦平面上,在需要时投影芯片可以以倾斜的方式放置(数字光线处理器投影机有此要求),但其中心仍应放置在会聚透镜的焦点上。

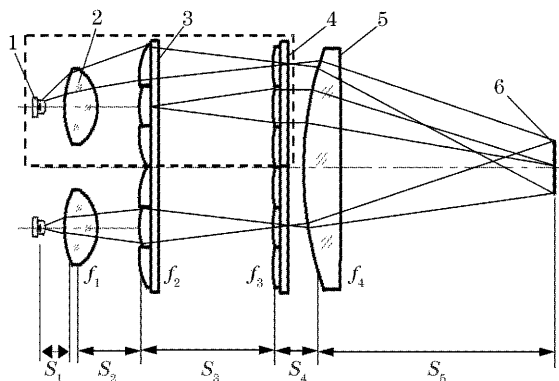


图 1 照明系统的结构

Fig. 1 The structure of lighting system

该照明系统的工作方式如下:光源发出的光首先由准直透镜转换为发散角较小的光束,光束在前蝇眼透镜处被分割为若干个细光束,每个细光束都

会被聚到后蝇眼透镜相应的单元附近,通过后蝇眼透镜后,再由会聚透镜会聚到显示芯片上。这样,在显示芯片上的光场是多个细光束叠加的结果,合理设计组成蝇眼透镜的单元,就可以满足投影机对光场均匀性的要求。

照明单元的两个蝇眼透镜均由数量相等的矩形透镜组成,矩形透镜的数量由投影机对光场均匀性的要求确定,均匀性要求越高,矩形透镜的数量则越多。

## 3 照明系统的分析

### 3.1 基本工作原理

如图 1 所示,被前蝇眼透镜分割的每个细光束在透过后蝇眼透镜和会聚透镜之后,被分布到投影芯片上,这样投影芯片上的每一个点都可以得到来自每个细光束的照明,这样就实现了所谓的光积分。

在本照明系统中有两组物像关系,一组是发光二极管通过准直透镜和前蝇眼透镜成像到后蝇眼透镜上,后蝇眼透镜矩形透镜的尺寸应大于在其上的发光二极管像。对于液晶投影机,需要在后蝇眼透镜的后面加一个偏振光束分裂器阵列(Polarization beam splitter array, PBS),发光二极管像的尺寸则应小于后蝇眼透镜矩形透镜长边的一半。光束在通过后蝇眼透镜之后,将再度发散,在到达投影芯片处的光束尺寸应略大于投影芯片的尺寸,光束在投影芯片处的尺寸  $W_{BP}$  可以根据下式作估算:

$$W_{BP} = W_2 \frac{S_4 + S_5}{S_3}, \quad (1)$$

式中  $W_2$  为前蝇眼透镜的尺寸,实际照射到投影芯片上的光束要略大于上述计算值。光束会聚在后蝇眼透镜上的光斑(即发光二极管像)尺寸应该尽量小,这样将有利于能量利用率的提高;

另一组物像关系是前蝇眼透镜与投影芯片之间,前蝇眼透镜位于后蝇眼透镜的焦平面上,投影芯片位于会聚透镜的焦平面上,后蝇眼透镜的焦距  $f_3$ 、会聚透镜焦距  $f_4$ 、前蝇眼透镜尺寸  $W_2$ 、投影芯片尺寸  $W_P$  之间满足下面的关系:

$$f_3/f_4 = W_2/W_P, \quad (2)$$

在这里后蝇眼透镜起到光孔转接的作用,其目的是为了保证在投影芯片上能够得到均匀的、边缘清晰的照明。由于  $f_3 \approx S_3$ ,  $f_4 \approx S_4$ , 所以  $W_{BP} > W_P$ , 光能量在这里会有一定的损耗,减小  $S_4$  将有助于能量利用率的提高。

### 3.2 蝇眼透镜的设计

在图 1 中,前蝇眼透镜是由多个不尽相同的矩

形透镜组成,后蝇眼透镜由多个相同的矩形透镜组成,矩形透镜的数量与前蝇眼透镜相同,并与前蝇眼透镜上的矩形透镜一一对应。

发光二极管发出的光通过准直镜后,被前蝇眼透镜分割为多个细光束,并会聚到后蝇眼透镜上相应的矩形透镜附近。前蝇眼透镜由  $m \times n$  个不尽相同的矩形透镜组成, $m$  和  $n$  既可以是奇数、也可以是偶数,矩形透镜的数量取决于投影机对光场均匀性的要求。对于中心不在光轴上的矩形透镜,透过矩形透镜中心的光线(细光束的主光线)与光轴是不平行的,如图 2 的虚线所示,这样,所成的像将偏离矩形透镜的轴线,最终将导致照明光束偏离投影芯片,需要对此进行校正,一种校正方法就是在这些矩形透镜的后面加一光楔,使得细光束的主光线在通过光楔后能与光轴平行,光楔的角度可以由下式确定:

$$\theta = \alpha / (n - 1), \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为细光束主光线与光轴的夹角, $n$  为光楔材料的折射率。

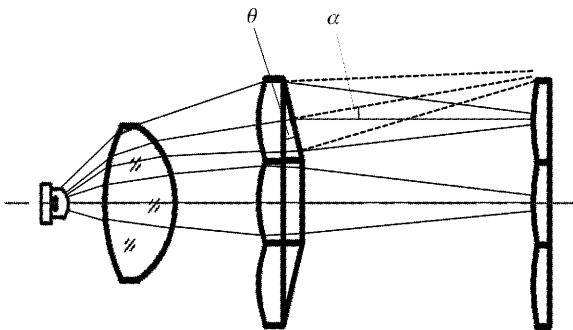


图 2 轴外光束的校正

Fig. 2 Correction of off-axis beam

上述结构对于光线校正的效果是比较好的,但在制作上有一定的困难。另一种校正方法如图 1 中所示,它是将一个圆形透镜偏心地切割出一个矩形透镜,这样在效果上也相当于一个球面透镜与一个光楔的组合,与图 2 不同的是,前蝇眼透镜的输出面成为一个平面,这样的改变在工艺上是有利的。在试制蝇眼透镜时,先制造独立的矩形透镜,然后将这些矩形透镜在一块基板上胶合得到蝇眼透镜样品。

后蝇眼透镜是由多个相同矩形透镜组成的,矩形透镜的数量与前蝇眼透镜相同,并在空间位置上与组成前蝇眼透镜的矩形透镜一一对应。

使用上述照明系统的投影机将具备以下优点:

1) 发光二极管具有很长的寿命,目前的发光二极管衰减 50% 的时间已经达到 10 万小时,是寿命最长的高压汞灯的 10 倍,可以保证投影机的整个寿

命期不再需要更换光源;

2) 发光二极管是一种冷光源,单个发光二极管的发热比常用的高压汞灯等要低得多,尽管多个发光二极管总的发热并不小,但发热比较分散,因而对系统散热的技术要求较低;

3) 可以在投影机中使用红、绿、蓝三基色的发光二极管,因而在这类投影机中不需要使用分色装置;

4) 采用发光二极管为照明光源的投影机中,色平衡的实现可以有两种办法:在三基色同时照明的场合(即空间混光的工作方式,液晶投影机较多采用这种工作方式),采用不同数量的三基色发光二极管实现色平衡;在三基色顺序照明的场合(即时间混光的工作方式,数字光线处理器投影机较多采用这种工作方式),通过控制三基色发光二极管发光时间的相对比例以实现色平衡,色平衡的实现不需要牺牲光能量;

5) 发光二极管发光的谱线宽度通常在 20 ~ 35 nm 之间,颜色的纯度较好,而在使用高压汞灯的投影机中,为了有较高的光能量利用率,在分光系统中 R, G, B 三基色滤光片的谱线宽度通常在 70 nm 左右,颜色的纯度较差,从效果上看,发光二极管能够显示更丰富的颜色,显色性能较好。

## 4 设计实例

图 3 是应用本照明系统的单片式硅上液晶投影机设计实例的顶视图,该投影机主要用于个人及小范围的图像显示。硅上液晶芯片位于 PBS 棱镜的后方,投影机镜头的光轴垂直于纸面,图像的投射方

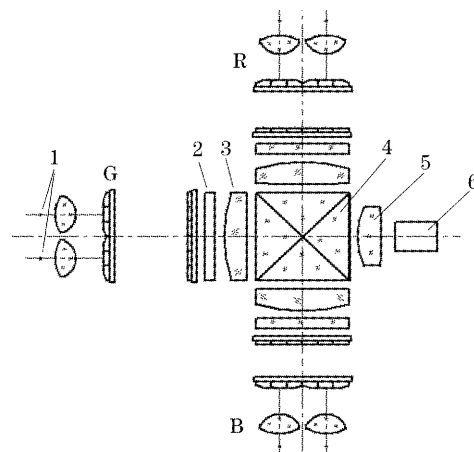


图 3 采用发光二极管照明的单片式硅上液晶投影机设计方案

Fig. 3 Scheme of a LED-based single-panel LCOS projector

向垂直于纸面向外(镜头和硅上液晶芯片图中均没有画出),采用的硅上液晶芯片尺寸为 12.7 mm (0.5 英寸),分辨率为 800 pixel×600 pixel。

在该投影机中,整个照明系统采用了 R,G,B 三路照明,以提供实现彩色显示需要的三基色照明,三基色分别采用 4 个 1 W 的发光二极管,发光二极管的单管输出光通量分别为 25 lm(R),25 lm(G),5 lm(B)。为了给投影芯片提供正常工作所需要的偏振光照明,在后蝇眼透镜与会聚透镜之间插入 PBS 阵列 2 作为偏振转换元件,三基色的合色采用 X 型棱镜 4,为降低 X 型棱镜对合色膜系角度范围的要求,光束的会聚采用两个会聚透镜 3 和 4 实现,会聚光束进入 PBS 棱镜 6,由 PBS 斜边的反射膜反射后到硅上液晶上,图像调制由硅上液晶实现,最后通过投影镜头投射到屏幕上。投影机以时序方式工作,R,G,B 的显示时间分别占据一个显示周期的 16.3%,36.9%,46.8%(色度计算依据参考文献 18 的部分内容<sup>[18]</sup>),设计的主要光学指标如下:

输出光通量: 6.7 lm

白场色坐标:  $x = 0.313$ ,  $y = 0.329$  (色温为 6500 K,即太阳的色温)

照明均匀度:  $\pm 8.2\%$

镜头 F 数: 2.4

## 5 结 论

分析了现有投影机光源——高压汞灯所存在的缺点,提出了一种用发光二极管作为高压汞灯替代光源的照明单元结构,利用该照明单元组成的投影机照明系统可以有效地将多个发光二极管所发出的光能量加以利用,同时满足投影机对照明均匀度的要求。作为本照明单元的一个具体应用,介绍了采用本照明单元的一种采用发光二极管照明的、单片式硅上液晶投影机的设计实例。实际上,利用本文的照明单元还可以组成一些应用范围更广泛的应用系统,如背投电视的光学引擎等。

## 参 考 文 献

- Matsushita Seiichi, Kakuta Shiryou. *The Newest Technology of Liquid Crystal — Property, Material, Application* [M]. Wang Dianfu, Sun Hongjun transl., Beijing: Chemistry Industry Press, 1991. 201 (in Chinese)  
松本正一,角田市良. 液晶的最新技术——物性·材料·应用 [M]. 王殿福,孙红军译. 北京:化学工业出版社,1991. 201
- Matthijs H. Keuper, Steve Paolini, Gerard Harbers. Ultra-compact LED based image projector for portable applications[C]. *SID 03 DIGEST*, 713~715
- Hiroki Kaneko, Tetsuya Ohshima, et al.. Desktop autostereoscopic display using compact LED projector[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5006**: 109~117
- Setomoto Tatsumi. Full Color LED Light Projector[P]. 1997, Japanese Patents, 09-012242
- Nakatani Toshihiro, Ogawa Masahiro. Reflector and lens for LED lamp, and spot projector[P]. 2002, Japanese patents, 2002-350248
- Hara Hideo, Koizumi Fumiaki. LED array panel and lighting device[P]. 2001, Japanese patents, 2001-179854
- Hara Hideo. Light source device and projector device[P]. 1999, Japanese patents, 11-217202
- Yokoyama Osamu, Miyashita Satoru, Kamakura Hiroshi et al.. Projector display comprising light source units[P]. 2004, US patents, 20040027545
- Kou Jisong. Rear projection display device by using LED as light source[P]. 2001, Chinese patents, 01228947.7 (in Chinese)  
寇纪淞. 发光二极管为光源的背投显示设备[P]. 2001, 中国专利:01228947.7
- Fan Chaoxun, Ren Ping. Solid source for liquid crystal projector [P]. 1998, Chinese patents, 98228589.2 (in Chinese)  
范朝勋,任平. 液晶投影机固体光源灯[P]. 中国专利:98228589.2
- Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang et al.. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587~591 (in Chinese)  
周平,陆巍,林宇翔等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 587~591
- Zhang Zengbao, Weng Zhicheng, Cong Xiaojie et al.. Design on a fly lens array illumination system applied in LC rear projection TV[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 126~129 (in Chinese)  
张增宝,翁志成,丛小杰等. 液晶背投电视中蝇眼透镜阵列照明系统的设计[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(2): 126~129
- Zheng Zhenrong, Liu Xu, Li Haifeng et al.. Lens array method used in LCD projective system[J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29**(3): 177~180 (in Chinese)  
郑臻荣,刘旭,李海峰等. 液晶投影显示系统中的透镜阵列方式[J]. 激光与红外, 1999, **29**(3): 177~180
- Zheng Zhenrong. Tolerance analysis for fly's eye illumination system for LCLV projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 593~597 (in Chinese)  
郑臻荣. 液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 593~597
- Zhang Yueguang, Gu Peifu, Liu Xu et al.. Color-separation multiplayer systems used for thin film transistor-liquid crystal display[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 791~794 (in Chinese)  
章岳光,顾培夫,刘旭等. 薄膜晶体管液晶投影仪中的偏振分色薄膜[J]. 光学学报, 1999, **19**(6): 791~794
- Yao Liying, Yi Kui, Yang Jian et al.. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1116~1118 (in Chinese)  
姚李英,易葵,杨健等. 应用于投影显示系统的偏振分光镜的设计和制备[J]. 光学学报, 2002, **22**(9): 1116~1118
- Li Zaiqing, Yu Bolin, Jiao Shulan. *Foundation of Colour Measurement* [M]. Beijing: China Technical Standard Press, 1980. 26~30, 45~53 (in Chinese)  
李在清,喻柏林,焦书兰. 颜色测量基础[M]. 北京:中国技术标准出版社,1980. 26~30, 45~53
- Li Yigui, Tetsuo Endo, Kazuhiro Hane. Projection type micro-optical encoder based on MEMS technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 1005~1007 (in Chinese)  
李以贵,远藤哲生,羽根一博. 基于微机电系统技术的投影型光学编码器[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 1005~1007