

LCOS 微投影显示中 照明系统的 研究和设计

**The Study and Design of the Illumination
System in LCOS Micro-display Projector**

甄艳坤 著

中国原子能出版社

2012年出版 中国原子能出版社 中国原子能出版社 中国原子能出版社

ISBN 978-7-5022-9717-6

9 7875022 971776

ICOS 微投影显示中 照明系统的 研究和设计

甄艳坤 著

中国原子能出版社

地址: 北京市 210010 中国原子能出版社 电话: 010-62111111

网址: <http://www.cnea.com.cn> 邮编: 100010

图书在版编目(CIP)数据

LCOS 微投影显示中照明系统的研究和设计 / 甄艳坤
著. — 北京 : 中国原子能出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-5022-9717-6

I. ①L… II. ①甄… III. ①投影显示器—照明技术—研究 ②投影显示器—照明技术—系统设计 IV.

①TN873

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 050222 号

内 容 简 介

投影显示系统主要由照明系统和投影成像系统两部分组成,其中照明系统作为投影显示系统的重要组成部分,对于投影图像亮度和均匀性起到了决定性作用。本书以 LCOS 微投影显示中照明系统为重点,介绍了非成像光学理论在投影显示照明系统中的运用,并对所设计的照明系统模型进行光学追迹研究和分析,主要内容包括:非成像光学在投影显示照明系统设计中的应用、照明系统中光源和光学元件的模拟分析、LCOS 微投影显示中照明系统设计等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作。

LCOS 微投影显示中照明系统的研究和设计

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张琳

责任校对 冯莲凤

印刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经销 全国新华书店

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 8

字数 143 千字

版次 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-9717-6 定价 42.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

投影显示系统主要由照明系统和投影成像系统两部分组成,其中照明系统作为投影显示系统的重要组成部分,对于投影图像亮度和均匀性起到了决定性作用。本书以 LCOS 微投影显示中照明系统为重点,介绍了非成像光学理论在投影显示照明系统中的运用,并对所设计的照明系统模型进行光学追迹研究和分析。

第 1 章为绪论,介绍三种采用不同微显示芯片的主流投影显示技术,并分别对其光学结构和基本工作原理进行阐述,同时补充介绍另外几种非主流投影显示技术。第 2 章是介绍非成像光学基本概念和投影显示照明系统的设计基本理论,其中非成像光学在投影显示照明系统设计中的应用是整本书的重要理论基础。第 3 章是在以上理论上,将非成像光学中的光学扩展量概念运用到投影显示照明系统设计中去,对几种在投影显示照明系统设计中经常采用的光学元件的工作原理进行了模拟分析。其中,针对用于 UHP 光源所发出的光束进行收集、循环利用的球形回复反射器 SR (Spherical Retro-reflector),经过改造后所设计的特殊抛物面回复反射器 SPR(Special Parabolic Retro-reflector),后者可以使系统收集光能效率提高 6%,有利于进一步提高 UHP 光源微投影显示系统的光能利用率;针对用于 LED 光源所发出的大角度光线进行收集和整形作用的 TIR 透镜,将采用光线追迹和结构优化相结合的方法,以系统光能利用率和照明均匀性为基元构建评价函数,对 TIR 透镜进行优化设计。第 4 章是在以上理论研究和模拟分析的基础上,分别针对 UHP 和 LED 光源,将优化和改造得到的照明光学元件运用到微投影显示的照明系统设计中,并结合投影成像系统设计了四套单片式 LCOS 微投影显示系统模型,通过光线追迹模拟结果,对系统性能进行了评价分析和对比。第 5 章是对所做的工作进行总结,并指出下一步工作研究方向。

本书的撰写得到了西安石油大学优秀学术著作出版基金资助,作者在此表示最衷心的感谢。由于作者自身水平有限,加之投影技术中照明光源和芯片技术发展迅速,难免有疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 投影显示技术简介	1
§ 1.2 本书主要内容	11
参考文献	11
第 2 章 非成像光学在投影显示照明系统设计中的应用	15
§ 2.1 非成像光学基本理论	16
§ 2.2 投影显示照明系统设计基本理论	20
§ 2.3 非成像光学在投影显示照明系统设计中的应用	30
§ 2.4 小结	31
参考文献	32
第 3 章 照明系统中光源和光学元件的模拟分析	35
§ 3.1 光学模拟软件简介	35
§ 3.2 光源模型	42
§ 3.3 反光碗模型	45
§ 3.4 锥形光棒模型	53
§ 3.5 复合抛物面集光器模型	61
§ 3.6 TIR 透镜模型	67
§ 3.7 小结	91
参考文献	91
第 4 章 LCOS 微投影显示中照明系统设计	96
§ 4.1 UHP 光源系统	96
§ 4.2 LED 光源系统	107
参考文献	116
第 5 章 总结	117

第 1 章 绪 论

进入 21 世纪,随着电视广播媒体和计算机媒体的出现和迅猛发展,以及网络技术的普遍应用和信息技术的进步,整个社会的生活和生产环境发生了巨大的变革,社会全面进入了多媒体信息化时代,信息的种类也逐渐丰富多彩,再也不仅仅只是单调枯燥的数字文本,更多的是以图像、声音等多媒体形式出现。为了在多种场合获得大屏幕、多色彩、高亮度以及高分辨率的显示效果,作为图像信息的主要载体,投影显示产业已经取得了极大的进步。通过投影显示方式获得大屏幕显示效果,可以克服采用直接显示方式所带来的体积庞大、重量和成本增加等一系列问题,并且在微电子、光学技术以及其他附属技术的发展和强有力的技术支持下,投影显示已经从家庭娱乐、商用等领域推广到军事指挥、大型会议等更多领域,成为大屏幕显示^[1,2]的主流方式。

§ 1.1 投影显示技术简介

投影技术发源于 19 世纪早期,是在 19 世纪末 20 世纪初电影的发明和流行的基础上推广开来的,其中基于微显示芯片的投影显示技术,是利用光学系统将对角线尺寸约为 0.45~1.3 英寸的微显示芯片所产生的图像放大后投影在屏幕上。它结合了光学和成熟的半导体技术,是一种性价比高的实现大尺寸高分辨率显示的途径^[3]。

基于微显示芯片的投影显示技术与成熟的 CRT 投影显示技术相比,主要区别在于 CRT 投影显示技术^[4,5]是将输入信号源分解到红、绿、蓝三个 CRT 管的荧光屏上,此时在高压作用下荧光粉的发光信号经过放大、会聚,在屏幕上显示出彩色图像,是一种通过在显示器件上直接形成高亮度的图像,再由光学系统成像在屏幕上的显示方式,而前者是采用自身并不发光的微显示芯片作为空间光调制器,通过图像动态输入信号来改变显示芯片自身的反射率、折射率等光电特性,以进一步控制外光源照明光束,将显示芯片控制的图像信息投影到屏幕上。虽然 CRT 显示投影技术具有图像显示色彩丰富、还原性好、具有丰富的几何失真调整能力等优点,但是由于图

像分辨率与亮度之间相互制约,整体操作复杂,移动性也不好,已经随着其他投影显示技术的发展而逐渐退出市场。

目前利用微显示芯片开发的投影显示系统,在技术上已经相当成熟,主要采用以下 3 种微显示芯片:TFT-LCD(Thin Film Transistor Liquid Crystal Devise)、LCOS(Liquid Crystal on Silicon)、DLP(Digital Light Processor)。

§ 1.1.1 TFT-LCD 投影显示技术

TFT-LCD 投影显示技术又名透过型液晶投影技术,它采用具有快速反应和高对比度的透过式液晶光阀作为空间光调制器^[6,7],是三种投影显示技术中起步较早和发展最成熟的技术。液晶是介于液体和固体之间的物质,本身并不发光,但是液晶分子的排列可以在电场的作用下发生变化,TFT-LCD 投影显示技术正是利用液晶的光电效应,通过电信号控制液晶单元的透光率,以达到准确控制通过液晶单元的光线的目的,从而在屏幕上产生具有不同灰度层次及颜色的图像^[1]。

TFT-LCD 投影显示技术是一种采用外光源照射的被动式投影方式,按照 TFT-LCD 显示芯片的片数,系统可分为三片式和单片式结构。在单片式系统中,选用了一片 TFT-LCD 显示芯片作为空间光调制器,整个系统具有体积小,重量轻,操作、携带极其方便,成本低等优点。但是由于 TFT-LCD 显示芯片上覆盖有栅格,光线透过率低,造成最后投影效果亮度低,尤其是高分辨率时情况更为严重,所以一般单片式 TFT-LCD 投影显示系统只适用于低端产品。目前 TFT-LCD 投影显示系统一般选用三片式结构,图 1-1 为典型的三片式 TFT-LCD 投影显示系统结构示意图。由光源发出的光经过由反光碗、复眼积分器、偏振转换系统以及分色系统组成的照明系统后,光束被均匀化并整理成偏光方向,同时光束分离成红绿蓝三原色,照射到与各颜色相对应的三片 TFT-LCD 显示芯片上;电信号经过模数转换,调制加载到显示芯片上,通过控制液晶单元的开启、闭合,从而控制光路的通断,再用合色棱镜将各液晶光阀调制了的光束合成,由投影镜头投射在屏幕上形成彩色图像^[1]。此结构的优点在于由于采用红、绿、蓝三原色独立照明的 TFT-LCD 显示芯片,可以通过分别调整每个彩色通道的亮度和对比度,以得到高保真色彩的投影效果,但必须保证三种颜色的光线精确汇聚是此类三片式结构的一个不利因素^[8]。

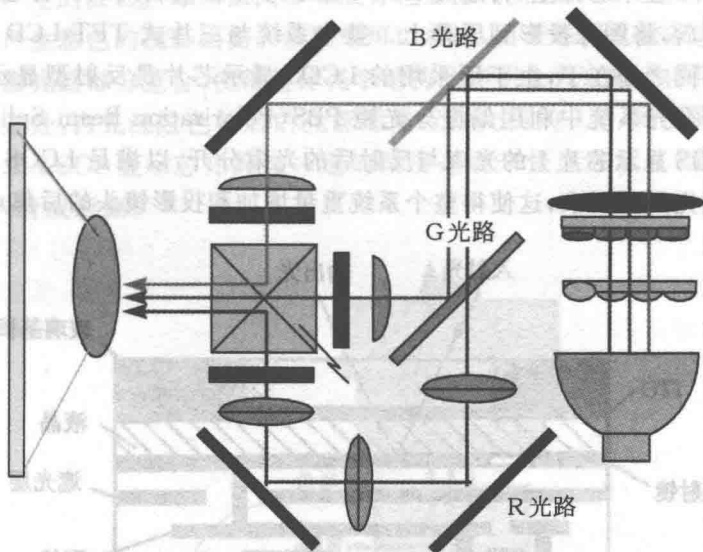


图 1-1 三片式 TFT-LCD 投影显示系统结构示意图

§ 1.1.2 LCOS 投影显示技术

LCOS 投影显示技术是一种反射型液晶投影技术,采用的也是一种以液晶光电效应为基础的反射式显示芯片作为空间光调制器,是半导体技术与液晶技术相结合的新技术^[9,10]。LCOS 显示芯片的基本结构如图 1-2 所示,在硅片上利用半导体制作驱动面板(CMOS-LCD),然后在电晶体上利用研磨技术磨平,并镀上铝当作反射镜,形成 CMOS 基板,然后将 CMOS 基板与含有透明电极的玻璃(ITO)基板贴合,注入液晶进行封装^[1]。由于驱动电路隐藏在金属反射电极的背面,液晶工作在反射状态,所以显示芯片开口率可达 90% 以上,即使增加像素点也不会降低开口率。与 TFT-LCD 显示芯片的光能利用率相比,LCOS 显示芯片光能利用率达到 40%,大大超过了后者,解决了 TFT-LCD 显示芯片构造上高分辨率和高亮度相对立的问题。

目前 LCOS 显示芯片的设计、制造都已经取得了非常显著的发展,分辨率从 320×240 到 2048×2048 的 LCOS 显示芯片已经应用于投影显示产品^[11,12]中。同样按照 LCOS 显示芯片的片数,LCOS 投影显示系统结构也分为三片式和单片式结构。如图 1-3 所示,LCOS 投影显示系统的三片式结构从整体上分为 RGB 三条光路^[13],光源所发出的光束经过照明系统的均匀化并整理成偏光方向后,来自每一基色的光照射到与自己颜色相对

应的 LCOS 显示芯片上,再通过 LCOS 显示芯片的调制反射和合色棱镜的光束合成后,将图像投影到屏幕上。整个系统与三片式 TFT-LCD 投影显示系统不同之处在于,由于所采用的 LCOS 显示芯片是反射型显示器件,需要在分合光系统中利用偏振分光镜 PBS(Polarization Beam Splitter)将入射 LCOS 显示芯片上的光束与反射后的光束分开,以满足 LCOS 显示芯片的偏振光照明要求,这使得整个系统重量增加和投影镜头的后焦点变长。

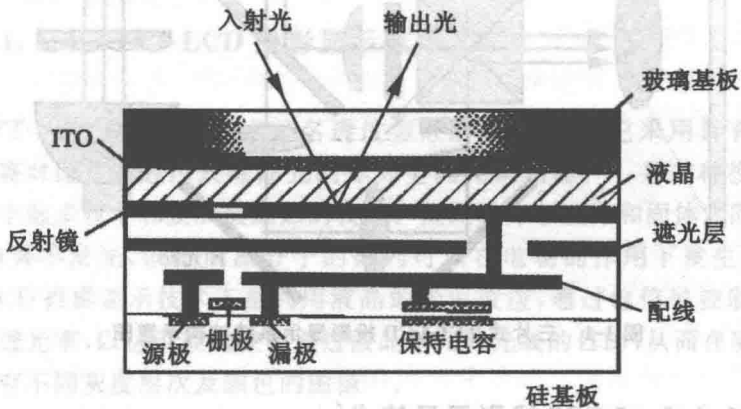


图 1-2 LCOS 显示芯片结构截面图

相较于三片式 LCOS 投影显示系统,目前单片式 LCOS 投影显示系统更具有一定的发展空间,图 1-4 是单片式 LCOS 投影显示系统结构示意图,其最大的优点在于仅需要一块 LCOS 显示芯片,通过色轮^[14]快速旋转切换方式将光源产生的白光形成循序的红、蓝、绿三原色光,并将三原色光与显

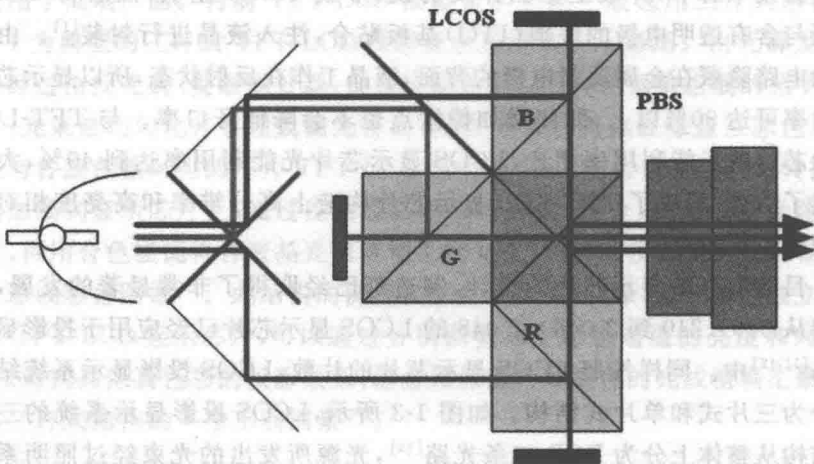


图 1-3 三片式 LCOS 投影显示系统结构示意图

示芯片产生的红、蓝、绿画面同步形成分色影像,再借助人眼视觉特性,最后在人脑产生彩色的投影画面。从图中可以看出,由于采用反射方式,照明光路和投影光路部分重合,使得整体光学结构的体积会大大减小,但也有一定的不足之处:白光经过色轮后的光源通量仅为先前的 1/3,亮度明显降低,并且要求 LCOS 显示芯片具有一定的反应速度来快速完成红、蓝、绿画面的切换、合成影像。

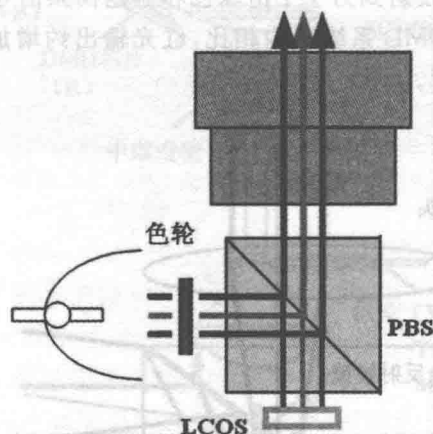


图 1-4 单片式 LCOS 投影显示系统结构示意图

§ 1.1.3 DLP 投影显示技术

DLP 投影显示技术^[15]是一种新型数字信息投影显示技术,整个投影显示系统采用美国德克萨斯仪器公司开发的由数以千计的微反射面构成的数字式微反射镜器件 DMD(Digital Micro-mirror Device)作为空间光调制器。DMD 是把电、机械、光学功能集成在一个半导体芯片上的微光学机电系统,具有单片集成化、高速动作特点的数字光开关的反射型矩阵,可用于捕捉、接收、存储数字信息^[16,8],其在 DLP 投影显示系统中的工作原理如图 1-5 所示^[17]。

从图 1-5 中可以看出,DMD 的每个微反射面代表一个显示芯片的像素,可通过视频信号来控制这些微反射面,以达到让光线进入投影镜头光路并聚焦到投影屏上形成一个像素,或偏离投影透镜光路,关闭像素的目的。

DLP 投影显示系统根据 DMD 芯片的数目分成单片、两片和三片 DLP^[18]投影显示系统,分别应用于便携式投影产品、大型拼接显示墙、超高亮度投影机^[8]。如图 1-6 所示,在两片式 DLP 投影显示系统中^[6],使用了

两片 DMD 显示芯片,所采用色轮不用红、绿、蓝滤光片,而是使用两个辅助颜色:品红和黄色,其中品红滤光片允许红光和蓝光通过,而黄色滤光片可通过红光和绿光,滤光的结果是红光一直通过滤光系统,蓝光和绿光在品红—黄色滤光片交替旋转中通过,实质上各占用一半透光时间。通过色轮选择的光线直接入射到双色分光棱镜系统上,其中连续的红光被分离出来入射到专门用来处理红光和红色视频信号的 DMD 芯片上,而按照顺序通过的蓝色与绿色光投射到另一个由绿色和蓝色视频信号驱动的 DMD 芯片上,此结构与单片 DMD 系统结构相比,红光输出约增加 3 倍,蓝光和绿光输出约增加 50%^[19]。

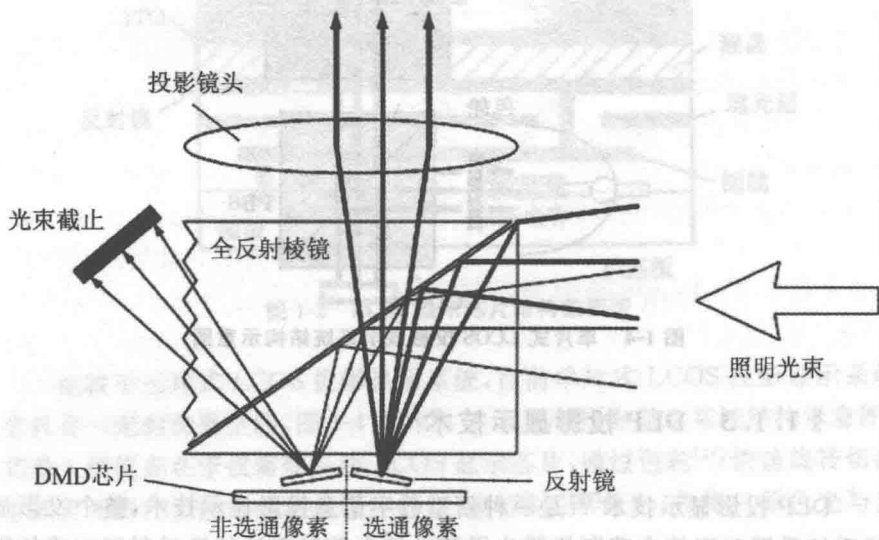


图 1-5 DMD 在 DLP 投影显示系统中的工作原理图

DMD 作为数字式器件在投影显示系统中得到应用,使得 DLP 投影显示技术与 TFT-LCD 和 LCOS 投影显示技术相比,具有以下优势^[4,8]。

1)数字优势:在 DLP 投影显示系统中外来图像数据无需经过数模(D/A)转换,不仅可直接调制成像,所得到的图像噪声减小、画面质量稳定,还可通过数字化控制直接无限次地彩色复制,精确地再现数字图像。

2)反射优势:由于构成 DMD 显示芯片像素的微反射面之间的间距很小,这使得 DMD 显示芯片具有比 LCOS 显示芯片更高的光能利用率。

3)分辨率优势:由于 DMD 显示芯片上每个微反射镜间隔不足 $1\ \mu\text{m}$,这使得将图像投影成具有更高可见分辨率的无缝隙图像成为可能。只要相对可视距离和投影图像画面大小调节合适,所得到的图像画面会没有像素

结构感,表现平滑、细腻、自然。

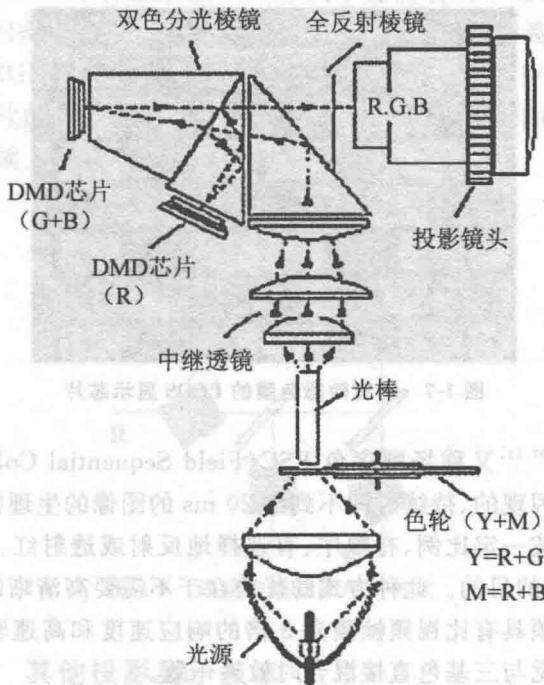


图 1-6 两片式 DLP 投影显示系统结构示意图

§ 1.1.4 投影显示中的彩色化方式

在以上三种投影显示技术中,都必须采用一定方式,按照三基色原理,将红、绿、蓝基色以一定比例混合,以期得到最终的彩色画面。在投影显示技术中,是采用空间或时间混色作为彩色化方式,这两种方式都是通过积极利用人眼生理上的特点来达到图像彩色化目的。

空间混色^[20]利用人眼空间细节分辨率差的生理特点,当平面上的三个基色光点足够小且充分靠近,人眼所感到的是三种基色光混合后所具有的颜色。在实际应用中有两种变形模式,一种如图 1-1 所示体积过大的三片式结构,使用三块显示芯片,分别调制红、绿、蓝光源,经过调制后的三种基色光同时到达屏幕,给出一个较亮的投影图像。另一种是将显示芯片的一个像素设计成由三个小于 0.1 mm 左右的子像素构成,每个子像素覆盖红、绿、蓝基色滤色膜。采用后一种混色模式的显示芯片有效显示面积只是全部面积的 1/3,降低了全色显示芯片的空间分辨率,同时显示芯片的微滤色膜会造成光线通过显示芯片单元时,影响损失 40% 以上的能量。图 1-7 是

带有微滤色膜的 LCOS 显示芯片^[21]。

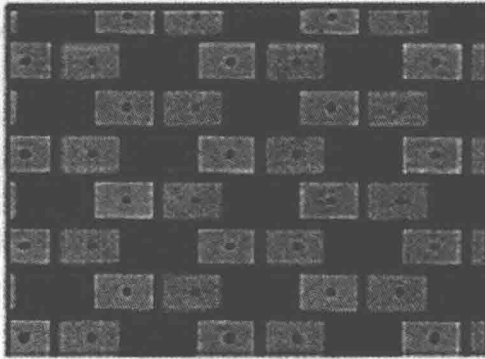


图 1-7 带有微滤色膜的 LCOS 显示芯片

时间混色^[22,23]又称场顺序色 FSC(Field Sequential Color),利用人眼不能区分快速闪现的、持续时间不到约 20 ms 的图像的生理特点,在短时间内让显示芯片按一定比例、有顺序、有选择地反射或透射红、绿和蓝三基色光,以达到混色的目的。此种方式的优势在于不需要高清晰的显示芯片,但是显示芯片必须具有比视频帧频高 3 倍的响应速度和高速驱动电路,才能保证产生的视觉与三基色直接混合时效果一致。

三基色之间的切换手段如图 1-8 所示,用色轮对全色光源分色产生时序光,或直接由一定频率的时钟信号驱动由红、绿、蓝三基色组成的三基色时序^[24]光源来实现,这样减少了制作微滤色膜的复杂工艺,有利于提高系统显示分辨率。

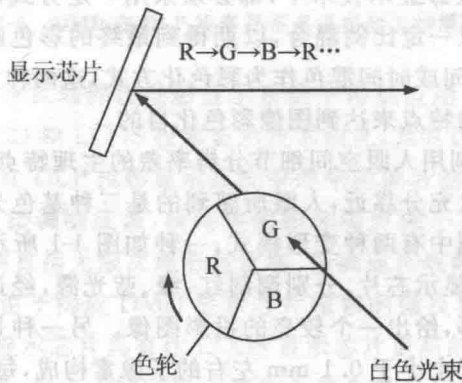


图 1-8 色轮场顺序色方式

在以上这些三基色之间的切换过程中,由于在某一时间范围内,只让一

种颜色的光进入系统光路,所以总会有至少 $2/3$ 的能量损失。为了克服以上切换手段的缺点,有效地防止 FSC 方式中光能利用率低的问题,采用如图 1-9 所示的扫描照明光学系统^[25],其中 RGB 三基色每路光束通过棱镜的旋转,使得 RGB 三基色每次都同时照射显示芯片上的 $1/3$ 面积,并且保证其在显示芯片的照明位置连续变化,总的来说这是一种 RGB 三基色光在显示芯片上连续上下滚动的的时间混色手段。

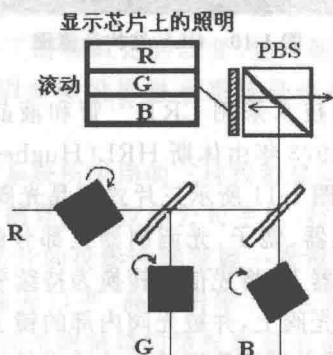


图 1-9 滚动扫描场顺序色方式

§ 1.1.5 其他投影显示技术

随着光源技术和显示芯片制作工艺的进步和发展,在现有投影显示技术的基础上,新型投影显示技术不断出现,针对投影市场中不同领域的需求,设计出了许多产品。

GLV(Grating Light Valve)^[8,26]投影显示技术是由美国斯坦福大学和 Silicon Light Machine 公司研发的专利技术,也称为栅状式光阀投影显示技术。其基本原理与 DLP 投影显示技术类似,也是以微机电原理为基础,通过控制某一单元的光线反射情况来决定图像的显现与否。与 DLP 投影显示技术不同的是:在 GLV 投影显示技术中的光线反射器件是由一条条带状的反射面组成,而不是 DMD 显示芯片中的微小透镜。带状反射面根据基板上提供的电压,进行极小幅度的上下移动,决定光线的反射与偏折,再加上其反射装置的高度切换,完成影像的再现。如图 1-10 所示^[27],GLV 投影显示技术的主要优势在于:GLV 是采用线型排列的空间光调制器,可经过高速度扫描形成面型显示区域,而非其他投影显示中所直接使用的面型显示芯片,这使得 GLV 显示器件的生产质量大幅度提高,具有更稳定的运行性、更方便的应用性。

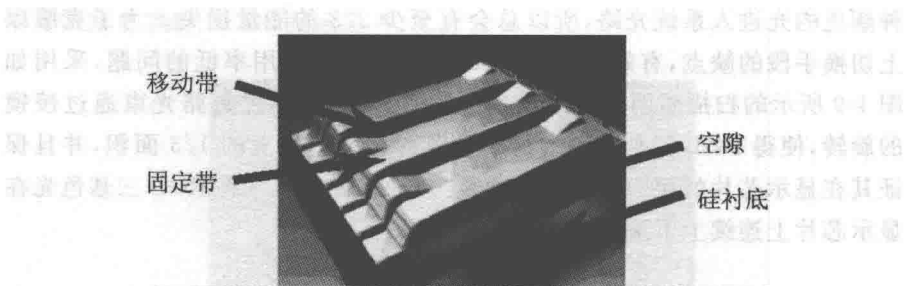


图 1-10 GLV 结构示意图

液晶光阀投影显示技术采用 CRT^[28]管和液晶光阀作为空间光调制器,其中液晶光阀是在 1973 年由休斯 HRL(Hughes Research Laboratory)实验室开发成功^[6]。如图 1-11 所示三片式液晶光阀投影显示结构示意图,一般光阀^[26]由光电转换器、镜子、光调制器三部分组成,通过 CRT 输出的光信号照射到光电转换器上,将光信号转换为持续变化的电信号;当外光源产生的一束强光投射到光阀上,并被光阀内部的镜子反射后,通过光调制器改变光学特性,并被紧随光阀的偏振滤光片滤去其他方向的光,最终被投射到屏幕上的光与 CRT 信号相一致。液晶光阀投影显示技术在克服 CRT 投影显示技术亮度较差缺点的同时,充分发挥了传统 CRT 投影显示技术的高分辨率优势。由于此类投影系统的价格较高,体积也较大,光阀不易维修,通常只适用于光线较强、观众较多的场合中使用,所以目前还没有太大的市场销售份额。

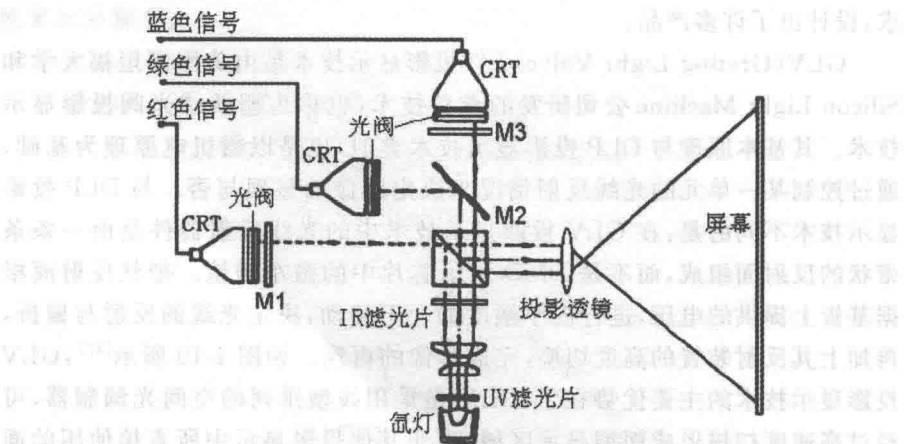


图 1-11 三片式液晶光阀投影显示结构示意图

§ 1.2 本书主要内容

传统的投影显示光学系统的尺寸结构都比较大,已经不能满足消费者对投影显示系统小型化^[29,30]、移动化的要求。随着微显示芯片的发展和制作工艺的不断完善,基于微显示芯片的投影显示系统在分辨率、亮度、重量以及体积等方面都发生了潜移默化的改变,整体朝着系统小型化、移动化、长使用寿命方面改进,因此微投影显示系统是未来投影显示产业发展的重点。

在目前微投影显示系统所采用的三种投影显示技术中,DLP 投影显示技术的关键部分掌握在德克萨斯仪器公司手里,技术普及还需要一定的时间,而 TFT-LCD 显示芯片的投影性能发展一直没有取得很大的进展。在这种情况下采用具有高开口率、高分辨率、省电和低成本等诸多优点的 LCOS 显示芯片作为空间光调制器的微投影显示系统,无疑是未来投影市场的最具有潜力的竞争者。

结合以上两因素,本书以 LCOS 微投影显示照明系统为对象,以设计具有高系统光能利用率、照明均匀性和小系统体积的投影显示系统为目标,对投影显示照明系统进行研究和设计。其主要内容如下:以非成像光学为理论基础,将光学扩展量概念运用到投影显示照明系统设计中,并通过光学模拟软件仿真对反光碗、光棒、CPC 集光器以及 TIR 透镜等光学元件在投影显示照明系统的功能和效果进行模拟,以掌握这些光学元件的光学特性,为下一步对光学元件进行优化设计和改造打下基础;针对不同光源的发光特性和照明系统所要达到的照明要求,对已有的光学元件模型进行优化设计和改造,以进一步提高整体投影显示系统的性能;分别采用 UHP 和 LED 作为照明光源,将经过优化设计和改造的光学元件灵活运用构造不同照明系统,并将其与投影成像系统相结合,设计出不同的 LCOS 微投影显示系统方案,并对系统整体光线追迹结果,进行系统性能分析和对比,以验证所设计的光学元件是否有益于照明系统性能的提升。

参考文献

- [1](日)小林俊介,(日)内池平树.大屏幕显示[M].北京:科学出版社,2003.
- [2]叶明勤.大屏幕显示技术的发展[J].世界广播电视,2003,17(2):

71-73.

[3]王勇竞. 微显示技术的进展[J]. 现代显示, 2003(2): 4-7.

[4]张爱华, 张志强. 投影机原理及应用[J]. 农业与技术, 2004, 24(5): 183-184.

[5]艾曼灵. 大屏幕投影显示发展动态及新体制新技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.

[6]晏磊, 孙道虎. 数字投影技术数字成像技术进展(四)[J]. 影像技术, 2002(2): 1-5.

[7]Furuhashi T, Kawabe K, Hirakata J I, et al. Invited paper: high quality TFT-LCD system for moving picture[C]. SID Symposium Digest of Technical Papers. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2002, 33(1): 1284-1287.

[8]3LCD、LCOS、单/3片式 DLP 成像原理及优缺点比较[DB/OL]. 2015. http://www.360doc.com/content/15/0326/01/256680_458082023.shtml.

[9]耿卫东, 张永利, 代永平, 等. 基于 LCOS 芯片的微型电视系统设计与实现[J]. 液晶与显示, 2004, 19(6): 458-461.

[10]Bowron J W, Schmidt T C. New high-resolution reflective liquid crystal light valve projector: Electrohome DLV 1280[C]. Projection Displays IV. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3296: 105-116.

[11]赵汉鼎, 阎双耀. LCOS 液晶器件在投影机中的应用[J]. 半导体技术, 2001, 26(3): 32-34.

[12]贺银波, 熊静懿, 吴国忠, 等. LCOS 投影显示技术及应用[J]. 光学仪器, 2002, 24(2): 38-47.

[13]Meuret Y, De Visschere P. Optical engines for high-performance liquid crystal on silicon projection systems[J]. Optical Engineering, 2003, 42(12): 3551-3557.

[14]Dobler M. An improved framesequential color projector with modified CdSe-TFTs[J]. SID'91 Digest, 1991: 427-429.

[15]Seime L, Hardeberg J Y. Colorimetric characterization of LCD and DLP projection displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2003, 11(2): 349-358.

[16]Ford E H. Projection optical system for a scanned LED TV display[C]. Optical Scanning 2002. International Society for Optics and Pho-