

单位代码: 10359  
学 号: 2016170020

密 级: 公开  
分 类 号: TN27



**合肥工业大学**  
Hefei University of Technology

# 硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

(专业硕士)

论文题目: Mini-LED背光模组高亮显示研究

学科专业: 仪器仪表工程

作者姓名: 汪 勇

导师姓名: 冯奇斌 副教授

完成时间: 2019年4月



单位代码：10359

密 级：公开

学 号：2016170020

分类号：TN27

合肥工业大学

Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

论文题目：Mini-LED 背光模组高亮显示研究

学位类别：专业硕士

专业名称：仪器仪表工程

作者姓名：汪勇

导师姓名：冯奇斌 副教授

完成时间：2019 年 4 月

合 肥 工 业 大 学

学历硕士学位论文

**Mini-LED** 背光模组高亮显示研究

作者姓名：\_\_\_\_\_ 汪勇 \_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_ 冯奇斌 副教授 \_\_\_\_\_

学科专业：\_\_\_\_\_ 仪器仪表工程 \_\_\_\_\_

研究方向：\_\_\_\_\_ 微纳测量技术及系统 \_\_\_\_\_

2019 年 4 月

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Research on High Luminance for Mini-LED  
Backlight Unit**

By

Wang Yong

Hefei University of Technology

Hefei, Anhui, P.R.China

April, 2019

# 合肥工业大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合合肥工业大学专业硕士学位论文质量要求。

## 答辩委员会签名（工作单位、职称、姓名）

主席：合肥工业大学	教授	黄强先
委员：安徽大学	教授	李桂华
合肥工业大学	副教授	刘文文
合肥工业大学	副教授	潘成亮
合肥工业大学	副教授	张迪

导师：合肥工业大学 冯安民



## 学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行独立研究工作所取得的成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文成果做出贡献的个人和集体，本人已在论文中作了明确的说明，并表示谢意。

学位论文中表达的观点纯属作者本人观点，与合肥工业大学无关。

学位论文作者签名：汪勇 签名日期：2019年5月27日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：除保密期内的涉密学位论文外，学校有权保存并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子光盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库，允许采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：汪勇

指导教师签名：汪勇

签名日期：2019年5月27日

签名日期：2019年5月27日

论文作者毕业去向

工作单位：

联系电话：

通讯地址：

E-mail：

邮政编码：

# 致 谢

光阴似箭，日月如梭，三年的研究生时光犹如白驹过隙般即将结束，非常感谢能够拥有在合肥工业大学深入学习的机会，经过这三年的时光，我经历了许多，收获了许多，也成长了许多。值此之际，我想要对那些一路走来帮助我，支持我，一直陪伴我的老师、家人、同学和朋友表示真诚的感谢。

首先，我想对我的导师冯奇斌老师表示崇高敬意和感谢。三年的时光里，冯老师以身作则，亲力亲为，以最热情饱满、认真严谨的态度对待科研工作，给我树立了榜样作用，同时，在我遇到困惑不解的时候，冯老师总是耐心的给我指导，激励着我不断前进；在生活中，冯老师和蔼可亲，如朋友一般照顾着我们，关心着我们是否吃饱穿暖，不仅如此，还告诉我们为人处世，待人接物的道理，引领者我们向健康积极的方向发展。没有冯老师，就没有我今天取得的成就。

诚挚的感谢吕国强老师。吕老师不辞辛苦的给与我工作上的指导与意见，帮助我发现了许多研究工作中的问题与缺陷，并且悉心的指导我该如何解决。吕老师学识渊博，经常帮助我们了解学术科研领域的最新成果与发展态势，如同指路明灯一般指导我们，给我们提出了许多宝贵的意见，从吕老师身上我学到了许多，我的学习能力、发现问题及解决问题能力都有了长足的进步。

感谢尹慧娟师姐，程鑫师兄，李其功师兄，在我刚刚来到实验室的时候，是他们关心我，帮助我，让我感受到了家的温暖，并且带着我做实验，给我提供资料文献，让我能够很快的入手工作。感谢武晨晨，张旭，洪纯和刘子学，三年的硕士生涯，他们陪我一起度过，我们一起学习进步，相互扶持。感谢黄丹师弟，郭敏师弟，在我紧张的科研工作中，他们帮我分担了许多，给与我极大地帮助。此外，感谢我的室友们，学习之余的时光里，我们一起欢笑，一起玩闹，有你们陪伴是我极大的荣幸。

最后，感谢我的家人，你们一直在背后默默付出，支持着我，时时刻刻关心着我的生活，我的学习，因为有你们的无私关怀，我才有了不断学习，努力前进的动力。

感谢每一个关心我帮助我的人，希望你们能够事事顺心，生活美满，一生幸福快乐！

作者：汪勇

2019年4月23日

## 摘 要

液晶显示作为当前主流的显示器件，已经在航空航天、家用电器、通讯设备等等领域得到越来越广泛的应用，和人们的生活息息相关，密不可分。随着平板显示技术的不断发展，人们对于液晶显示的要求越来越高，液晶显示向更大、更轻薄更高分辨率发展。背光模组是液晶显示器的重要组成部分，其提供的光线的亮度、色度、均匀性、视角及背光模组的厚度等都对显示器的最终性能有很大的影响。Mini-LED 背光模组作为一种新型的背光，在厚度和均匀性等方面极具优势，然而其视角较大，导致其轴向视角亮度不够，因此针对 Mini-LED 背光模组的提高轴向视角亮度设计具有重要意义。

本文针对 Mini-LED 背光模组提出了三种亮度增强设计方案，第一种是根据双层增量膜的工作原理，在一层基底上设计金字塔微结构，相比于单层棱镜膜，其能从两个方向上实现视角收缩，从而提升轴向视角亮度，对影响到轴向视角亮度提升效果的参数进行仿真优化，确定金字塔微结构的最佳参数；第二种是运用针对扩展光源的同步多表面方法设计双自由曲面微结构，根据实际应用对该方法进行了改进优化。对设计得到的双自由曲面微结构进行了单个微结构及 3×3 微结构阵列的建模仿真，对仿真结果进行分析，针对遇到的问题提出改进方案；第三种是针对扩展光源提出一种设计方法，对 Mini-LED 芯片发出的光线进行调制，基于斯涅尔定律和边缘光线原理建立了方程组，迭代计算得到单自由曲面微结构面型，对单个微结构及微结构阵列进行了建模仿真，验证了方法的可行性。综合分析，选择第三种作为最终设计方案。

利用无掩模光刻设备对设计得到单层微结构光学膜进行了制备。对无掩模光刻工艺参数进行了优化，最终得到符合要求的微结构光学膜，通过紫外压印技术将微结构图案转印到无色树脂材料上，排除了光刻胶对光产生吸收造成的影响，将微结构光学膜放入 Mini-LED 背光模组中进行测试，测试结果表明：相比于只加扩散膜的情况，加了双层棱镜膜与扩散膜和加单层微结构光学膜与扩散膜后其轴向视角亮度分别提升了 17.8%和 44.5%，加微结构光学膜和扩散膜比加棱镜膜和扩散膜后的轴向视角亮度提高了 22.7%，其效果要优于双层棱镜膜，测试结果表明本文提出的设计能够有效地提升 Mini-LED 背光模组的轴向视角亮度。

关键词：Mini-LED 背光模组；扩展光源；微结构；无掩模光刻



## ABSTRACT

As nowadays mainstream display device, Liquid Crystal Display (LCD) has been widely used in aviation equipment, household appliance, mobile devices, and many other applications, which has been closely related to people's lives. With the continuous development of flat panel display technology, the requirements for liquid crystal display become higher and higher, LCD is required to be more larger, thinner and higher resolution. Backlight module plays an important role on LCD characteristics, including brightness, color gamut, uniformity, angle of view and thickness. As a new type of backlight, Mini-LED backlight unit has great advantages in thickness and uniformity. However, the viewing angle is large that leads to relatively low brightness at normal direction. Therefore, it is of great significance for the design of Mini-LED backlight unit to improve the brightness at normal direction.

In this paper, three kinds of brightness enhancement schemes for Mini-LED backlight unit are proposed. The first one is to design pyramid microstructure on a single layer of substrate according to the working principle of double-layer brightness enhancement films. Compared with single layer prism film, it can shrink the angle of view in two directions, and as a result, the brightness at normal direction is increased. The parameters affecting the brightness at normal direction are simulated and optimized to determine the optimal parameters of the pyramid microstructure. The second is using Simultaneous Multiple Surface method for extended source to design double free-form surface microstructure. The method is improved and optimized according to the practical applications. A single microstructure and  $3 \times 3$  microstructure array are modeled and simulated. The simulation results are analyzed and an improve scheme is put forward to solve the problems encountered. Thirdly, a designed method for extended light source is proposed to modulate the light emitted from the Mini-LED die. Based on Snell's law and edge light principle, a set of equations is set up, and the single free-form surface microstructure is obtained by iterative calculation. The feasibility of the method is verified by modeling and simulation of single microstructure and microstructure array. Based on simulations results of three methods, the third method is selected as the final design scheme.

The single-layer microstructure optical film is fabricated by maskless lithography device. The process parameters of maskless lithography are optimized and the microstructure optical film that complys with the design is obtained. The

microstructure pattern is transferred to colorless resin material by UV imprint technology, and the influence of photoresist on the absorption of light is eliminated. Then, the microstructure optical film is put into the Mini-LED backlight unit for testing. The results show that compared with the case of only adding diffusion film, the brightness at normal direction with the two-layer prism films and diffuser increases by 17.8%. The brightness at normal direction with microstructure optical film and diffuser increases by 44.5%, 22.7% higher than double-layer prism films. The test result shows that the proposed design can effectively improve the brightness at normal direction of the Mini-LED backlight unit.

**KEYWORDS:** Mini-LED backlight unit; extended light source; microstructure; maskless lithography

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 课题研究目的和意义.....	5
1.4 论文工作内容和章节安排.....	6
第二章 相关基础知识介绍.....	7
2.1 液晶显示器的结构及原理.....	7
2.2 LED 背光模块介绍.....	7
2.3 光刻技术.....	9
2.4 本章小结.....	12
第三章 <b>Mini-LED</b> 背光模组的高亮光学膜设计.....	13
3.1 金字塔微结构的设计.....	13
3.2 同步多曲面方法设计.....	16
3.2.1 同步多曲面法理论设计.....	16
3.2.2 单个双自由曲面微结构仿真.....	21
3.2.3 双自由曲面微结构阵列仿真.....	23
3.3 高亮光学膜设计.....	26
3.3.2 微结构光学膜仿真.....	28
3.3.3 微结构阵列仿真.....	31
3.4 本章小结.....	34
第四章 微结构光学膜制备与测试.....	35
4.1 微结构光学膜的制备.....	35
4.1.1 光刻材料与性能参数确定.....	35
4.1.2 光刻工艺流程.....	36
4.2 光刻工艺优化.....	37
4.2.1 旋涂工艺优化.....	37
4.2.2 曝光参数优化.....	38
4.3 样品测试及分析.....	43
4.4 本章小结.....	46
第五章 总结与展望.....	47
5.1 全文总结.....	47
5.2 研究展望.....	48

参考文献.....	49
攻读硕士学位期间的学术活动及成果情况.....	52

## 插图清单

图 1.1	AMOLED 显示的基本结构.....	2
图 1.2	QLED 显示的基本结构.....	2
图 2.1	TFT-LCD 基本结构.....	7
图 2.2	侧入式背光结构.....	8
图 2.3	直下式背光结构.....	8
图 2.4	BEF 工作原理.....	9
图 2.5	光刻工艺流程.....	10
图 2.6	正性胶和负性胶曝光结果.....	10
图 2.7	MLA100 光刻直写设备.....	12
图 3.1	金字塔微结构模型.....	13
图 3.2	Mini-LED 背光模组.....	14
图 3.3	金字塔微结构光学膜仿真模型.....	14
图 3.4	单个光源下视角亮度分布图, 从左到右、从上到下依次为不加微结构、 倾角 30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°、65°、70°的金字塔微结构.....	15
图 3.5	轴向视角亮度随材料折射率的变化关系.....	16
图 3.6	SMS 方法的应用.....	17
图 3.7	SMS 方法设计双自由曲面微结构.....	18
图 3.8	通过光程计算光学扩展量.....	18
图 3.9	优化 SMS 方法设计微结构.....	20
图 3.10	SMS 方法计算的微结构面型.....	21
图 3.11	单个双自由曲面微结构及其仿真模型.....	21
图 3.12	不加双自由曲面微结构和加微结构的视角及曲线图.....	23
图 3.13	双自由曲面微结构阵列仿真模型.....	23
图 3.14	加双自由曲面微结构阵列前后仿真结果.....	25
图 3.15	大角度光线分析.....	25
图 3.16	微结构设计原理及光路图.....	26
图 3.17	微结构面型.....	28
图 3.18	单个微结构仿真模型.....	28
图 3.19	光线走向仿真.....	29
图 3.20	单个光源下视角图, (a) 只加扩散膜, (b) 加双层棱镜膜和扩散膜, (c) 加微结构光学膜和扩散膜.....	30
图 3.21	微结构阵列仿真.....	31



图 3.22 阵列光源下视角图, (a) 只加扩散膜, (b) 加双层棱镜膜和扩散膜, (c) 加微结构光学膜和扩散膜.....	32
图 3.23 轴向视角亮度随距离的变化关系.....	33
图 4.1 胶厚度与转速的关系.....	37
图 4.2 微结构光学膜的 BMP 图.....	38
图 4.3 共聚焦显微镜 LSM700.....	39
图 4.4 不同曝光光强下的微结构最大高度.....	41
图 4.5 微结构高度与曝光能量的关系.....	42
图 4.6 高亮微结构光学膜母版.....	42
图 4.7 紫外压印后的微结构光学膜.....	43
图 4.8 亮度色度计 BM-7A.....	43
图 4.9 微结构光学膜亮度测试.....	44
图 4.10 九点亮度测试示意图.....	45

## 表格清单

表 1.1	小间距 LED、Mini-LED 和 Micro-LED 性能对比.....	3
表 3.1	各倾角金字塔微结构对轴向视角亮度的影响.....	16
表 3.2	单个光源下轴向视角亮度.....	30
表 3.3	阵列光源情况下的轴向视角亮度.....	32
表 3.4	不同距离下轴向视角亮度.....	33
表 3.5	不同对位误差下的轴向视角亮度.....	34
表 4.1	三种材料的材料特性.....	35
表 4.2	AZ4562 光刻胶厚度与旋涂转速关系.....	37
表 4.3	三种情况下的亮度测试结果.....	44

## 第一章 绪论

### 1.1 课题背景

随着显示技术的不断发展，平板显示（Flat Panel Display, FPD）在生活及军用等各个领域都得到了广泛的应用，其市场份额不断地扩大，传统的阴极射线管（Cathode Ray Tube, CRT）由于体积笨重、能耗大、不够环保等等本身的固有缺陷，已经逐渐被平板显示所取代。目前，主流的平板显示技术包括液晶（Liquid Crystal Display, LCD）显示技术、有机发光二极管（Organic Light Emitting Diode, OLED）显示技术、量子点发光二极管（Quantum Dot Light Emitting Diode, QLED）显示技术、亚毫米发光二极管（Mini-LED）显示技术和微发光二极管（Micro-LED）显示技术等<sup>[1-7]</sup>。

LCD 是当前应用最广泛的显示器件，具有能耗低、分辨率高、轻薄、寿命长和无辐射等优点。近年来，LCD 显示技术一直保持着飞速的发展，虽然国内的 LCD 技术起步较晚，但是随着技术的不断完善，我国的 LCD 显示技术与韩国、日本等发达国家的差距正在不断缩小。作为一种非主动显示器件，LCD 需要背光模组来提供均匀的面光源，故而背光光源对于显示亮度和体积、重量都有着直接影响。随着社会的发展，消费者对液晶显示器的需求日渐提高，液晶显示器向着更加轻薄，分辨率更高的方向发展，如何使背光模组更加轻薄成为目前研究工作的重要指标<sup>[8-11]</sup>。

OLED 又称为有机发光半导体，其技术起源于美籍华裔科学家邓青云教授。OLED 可分为有源矩阵驱动 OLED（Active Matrix Organic Light Emitting Diode, AMOLED）和无源矩阵驱动 OLED（Passive Matrix Organic Light Emitting Diode, PM OLED），两者的区别主要在于驱动方式不同，前者采用独立的薄膜电晶体控制每个像素，每个像素都可以连续独立发光，后者单纯以阳极和阴极构成矩阵状，以扫描方式点亮每个像素，每个像素都是在短脉冲下瞬间高亮发光，两者相比，前者多应用于大尺寸和高分辨率面板显示，驱动电压低，但是成本高，工艺复杂。而后者的生产相对简单，成本低，但是驱动电压较高。典型的 AMOLED 显示的基本结构如图 1.1 所示<sup>[1]</sup>。OLED 主要特点是自发光性、广视角、高对比度、低耗电、高反应速率、全彩化及制程简单等，并且其具有可以实现薄型化及柔性照明等特点，已经渐渐应用于生活多个领域中，如头盔显示、手机通讯设备和 MP3 等。目前 OLED 技术仍处于发展阶段，其固有的产品寿命问题仍亟需解决，且 OLED 显示器生产良率低，作为高端显示屏，其价格上也比液晶显示器要高<sup>[12-15]</sup>。

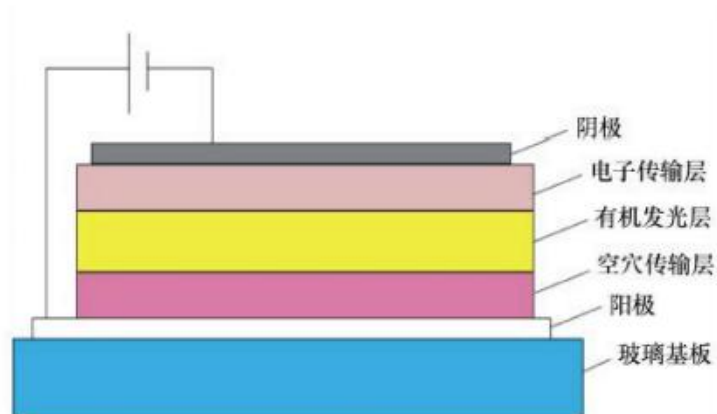


图 1.1 AMOLED 显示的基本结构

Fig 1.1 Basic structure of OLED display

QLED 显示属于自发光显示技术，其基本结构如图 1.2 所示<sup>[1]</sup>。QLED 显示技术的关键是量子点，量子点是一种无机半导体纳米晶体，其晶粒直径在 2~10 纳米之间。量子点电光特性很独特，当受到光或电的刺激，量子点便会发出色纯度非常高的高质量单色光，光线的颜色由量子点的组成材料和大小形状决定。QLED 因其高亮、纯色性高、良好的稳定性而受到广泛地关注，也使得 QLED 技术在生物医疗、半导体器件、显示的领域拥有极大的前景<sup>[16-19]</sup>。

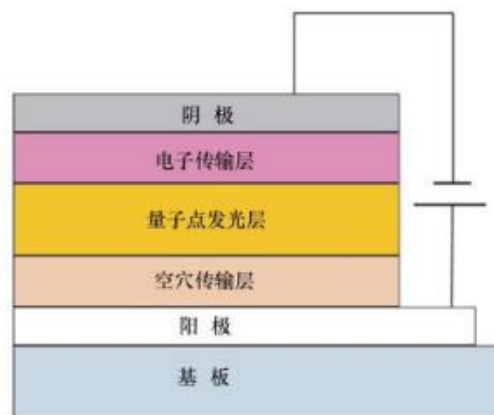


图 1.2 QLED 显示的基本结构

Fig 1.2 Basic structure of QLED display

Micro-LED 即为 LED 微缩化和矩阵技术，属于自发光显示技术。其结构是微型化 LED 阵列，也就是将 LED 结构设计进行薄型化、微小化和阵列化以后，然后将 Micro-LED 巨量转移到电路基板上，再利用物理沉积技术生成上电极及保护层，形成微小间距的 LED，可以让 LED 单元小于  $50\mu\text{m}$ ，与 OLED 一样能够实现每个像素单独定址，单独驱动发光。其优势在于既继承了无机 LED 的高

效率、高亮度、高可靠度及反应时间快等特点，又具有自发光无需背光源的特性，体积小、轻薄并且节约电能<sup>[1]</sup>。Mini-LED 也被称为亚毫米发光二极管，是由晶元光电首次提出的尺寸约为 100 $\mu\text{m}$  的 LED 组成。Mini-LED 介于传统 LED 与 Micro-LED 之间，相比于传统的 LED 其尺寸更小，分辨率更高，且在耗能、反应时间和可视角上具有一定的优势，而对比于 Micro-LED，两者最大的区别在于封装技术，目前，Mini-LED 采用倒装 COB 和“四合一”技术即可进行封装，可兼容大部分生产设备，但 Micro-LED 由于尺寸小，需要芯片巨量转移技术才可完成封装，这一技术要求高，尚未成熟，因此 Mini-LED 凭借优于传统 LED 和技术生产易于 Micro-LED 的优势，愈发得到关注，小间距 LED、Mini-LED 和 Micro-LED 之间的对比如表 1.1 所示<sup>[20-24]</sup>。

表 1.1 小间距 LED、Mini-LED 和 Micro-LED 性能对比

Tab 1.1 Performance comparison of small pitch LED, Mini-LED and Micro-LED

	尺寸	技术	封装技 术	NTSC 色域	最大可 视角 (垂直 /水平)	寿命	反应时 间	平均能 耗
小间距 LED	500 $\mu\text{m}$	自发光	SMD/C OB	110%	160° ~170° /160° ~170°	10 万小 时	>纳秒 级	高
Mini-L ED	100~20 0 $\mu\text{m}$	自发光 /背光	倒装 COB/ “四合 一”	80%~11 0%	178° /178°	10 万小 时	纳秒级	低
Micro-L ED	< 100 $\mu\text{m}$	自发光	巨量转 移	140%	178° /178°	8-10 万 小时	纳秒级	低

## 1.2 国内外研究现状

目前针对背光模块的增亮与薄型化研究已经比较成熟，很多设计通过微结构对光线进行调制，来达到背光模组薄型化和增亮的效果。



2004年, Feng Di 等人提出一种集成导光板, 其上下表面刻有棱镜结构, 通过下表面结构将光束角进行收缩, 上表面棱镜结构调整出光均匀性, 最终替代反射膜、扩散膜与棱镜膜的作用, 大大减小了模组厚度。但是其设计没有做出成品, 并且光损失较大<sup>[25]</sup>;

Chao-Heng Chien 等人在 Feng Di 的设计基础上, 通过光刻与热压印技术在导光板上制作出双棱镜微结构, 结果显示其均匀性达到了 85%以上, 由于其微棱镜结构只是通过调整底角进行优化, 相较于自由曲面来说, 其光效还可以进一步提高<sup>[26]</sup>;

2013年, 徐平等研制 1.8inch 新型集成导光板, 其上下表面分别熔合非球面半柱状微结构阵列和微棱镜结构阵列, 实现目前典型背光模组中双层正交棱镜膜、扩散膜和导光板 4 层复杂膜系的功能。通过调整非球面函数系数, 实现出射光在  $\pm 25^\circ$  角度范围内汇聚。然而, 其设计的光效以及均匀性不高, 分别为 76.37%和 71.28%<sup>[27]</sup>;

2014年, 李德君等提出采用逆棱微结构的扩散板的背光模组来降低混光高度从而实现 LED 背光模组超薄设计的方法。该方法在扩散板下表面制作微结构, 起到一定降低混光高度的效果<sup>[28]</sup>;

Li Chang-Yi 等人提出使用一层导光板和一层扩散板, 而不需要增亮膜的背光模组, 其导光板上刻有微结构, 通过调整微结构的排列来提高光效和均匀性。与传统侧入式背光想比, 其光效与均匀性提升了 2 倍<sup>[29]</sup>;

Joo-Hyung Lee 设计了一种 PDMS 集成导光板, 通过在导光板上表面制作倒梯形微结构, 实现导光板出射光线的角度调制。最终提高了其主视角亮度, 并且均匀性达到 73.3%, 但是现有的微结构加工工艺很难制作出倒梯形微结构, 因此很难加工<sup>[30]</sup>;

Akihiro Tagaya 等提出使用一种高散射光传输 (HSOT) 聚合物替代传统材质导光板, 使用该材质导光板以后, 导光板上方只需要一层棱镜膜就可以达到传统的棱镜膜与扩散膜的效果<sup>[31]</sup>。2003年, Takamitsu Okumura 在此基础上, 提出一种不需要任何膜系的导光板, 在 HSOT 聚合物导光板底部加工微棱镜结构, 通过棱镜结构的参数系数及其排布控制光线传输, 达到均匀的效果<sup>[32]</sup>。

目前针对背光模组薄型化的设计, 都是通过改变导光板材质或者在其上下表面加工微结构进行调光, 从而取代传统背光模组中某些膜系的效果, 而微结构都是微棱镜结构或是非球面半柱状结构, 通过调整微结构的排布方式进行优化, 而没有针对微结构面型进行设计, 这就造成了很大的光损失浪费。

针对 LED 的二次光学设计是提高亮度的经典办法, 由于自由曲面具有很高的自由度, 可以通过更少的元件达到更优的效果, 因此得到越来越广泛的应用。

自由曲面的设计方法主要有以下几种：

2002年，H. Rise 等人提出通过剪裁光学透镜的面型来控制光束的发散方向，获得相应的能量分布，即裁剪法。运用裁剪法进行照明设计，尤其是等能量分布或者均匀照明分布，是比较流行的一种方法，其成果也是比较普遍的。但这种方法的数学模型需要用 Monte-Amphere 方程，由于其方程不易求解，所以该方法还是具有一定的局限性<sup>[33]</sup>；

偏微分方程法是通过求解偏微分方程得到数值构造自由曲面透镜。利用这种方法计算自由曲面透镜的过程中，目的性很强，并且运算速度很快，但是微分方程的可解性很低，在很多情况下得到虚数解，并且这种设计只适合小光源、近照明的具有旋转对称结构的简单情况<sup>[34]</sup>；

2006年，一种实现均匀方形光斑照明的方法被提出，即网格划分法，其在能量守恒定义的基础上，通过建立光源各个发散角度的光线和接收面对应位置的映射关系，构造光学方程组，对建立的方程组进行迭代计算，从而得到透镜侧面曲线上离散点的坐标数据。这种方法多用于道路照明系统设计中，求解简单，并且可得到精确的数值，通过增加网格数目提高结果的精确度，可以实现 LED 点光源效果良好的矩形均匀照度光斑<sup>[35]</sup>；

以上设计方法只是针对点光源进行设计，在扩展光源下效果明显劣化。1990年 Minano 提出同步多曲面法（SMS），运用非成像光学理论同时进行透镜的多个自由曲面设计计算，相对于单曲面透镜，两个自由曲面能更好地控制 LED 扩展光源发散光线的走向，减少损耗提高其光学效率。李敏等人通过该方法设计出基于 LED 扩展光源均匀照度的自由曲面透镜，并且实现光束的准直<sup>[36]</sup>。张航梁雪等人也通过该方法设计出 LED 准直器实现远场均匀照明<sup>[37]</sup>。2015年，梁雪等人将该方法实现矩形均匀配光，提出三维同步多表面设计方法。然而，该方法也具有较大的局限性，首先设计出的结构不会小于光源的尺寸，第二，对于自由曲面的初始点选择极为严格，第三，计算较为复杂，数据量较大<sup>[38]</sup>。

综合以上考虑，本文基于非成像光学和边缘光线理论，针对 MiniLED 进行二次光学设计，得到微结构形貌，并且进行加工制备，最后对样品进行形貌测试和光学性能测试，达到收缩视角提高亮度的目的，替代了双层棱镜膜，提高光效降低成本。

### 1.3 课题研究目的和意义

背光模组薄型化技术与增亮技术作为液晶显示领域的关键技术，一直备受关注。而目前国内外关于该方面的研究主要集中在利用特殊结构来替代某些膜系结构，或者直接在导光板上加工微结构来达到目的。MiniLED 背光作为一种新型背光，其通过大数量的 MiniLED 芯片密集排布，能够在更小的范围内实现区域

调光,对比于传统的背光模组,其能够在更小的混光距离内实现更好的亮度均匀性,进而大大降低背光模组的厚度。然而 MiniLED 背光的出射光线视角过大,轴向视角亮度不够,很难达到应用需求。经过测试,传统的双层棱镜膜对于 MiniLED 背光的增亮效果也不明显,因此需要重新设计微结构光学膜来替代双层棱镜膜的效果,从而达到提高背光的亮度和降低厚度及尺寸的需求,同时,本设计方法还提出了一种针对扩展光源的计算方法,该方法不局限于 MiniLED 背光的情况,在其他直下式背光中依然适用。

#### 1.4 论文工作内容和章节安排

本文主要研究设计了一种针对 MiniLED 背光模块的实现视角收缩从而提升轴向视角亮度的微结构光学膜,通过无掩模光刻技术对设计图形进行光刻加工,制备出实际的样品,并对样品进行形貌测试和光学性能测试。

主要研究内容包括:(1)采用非成像光学和边缘光线理论,结合 Snell 定律进行迭代计算,推导出微结构光学膜的理论计算公式,得到了微结构光学膜表面形貌的离散数据;(2)将表面形貌数据带入到 LightTools 仿真软件进行建模仿真,观察其是否符合设计要求;(3)利用无掩模光刻设备对设计图案进行光刻加工,并且探究了最佳的工艺参数,最终对加工出来的样品进行实际测试。

论文各章节安排如下:

第一章,绪论。探讨了平板显示技术的发展现状,分析了三种主流显示技术的优缺点;分析了背光模组薄型化研究在国内外的现状,以及针对光源进行二次光学设计的一些方法,指出了微结构光学膜的优点;介绍了本课题的研究目的意义及工作内容。

第二章,对相关的基础知识进行了介绍。首先介绍了液晶显示器的工作原理及组成部分,着重介绍了液晶背光模块的组成及作用,然后介绍了后续用到的无掩模光刻技术的设备及工艺流程。

第三章,微结构光学膜的设计。利用非成像光学理论,结合边缘光线理论和 Snell 定律,对微结构光学膜的微结构形貌进行设计,并且对其微结构在单个光源下以及光源阵列条件下进行了建模仿真。确定了微结构的面型。

第四章,微结构光学膜的实际加工与测试。使用无掩模光刻设备进行加工制备,对影响到图案质量的各种参数进行优化选择,并且对加工出的样品进行了测试,与仿真结果进行验证。

第五章,总结与展望。总结本文内容及创新点,根据微结构光学膜样品对设计、仿真及加工提出改进方案,为以后微结构光学膜的改进设计做铺垫,展望今后的研究方向。

## 第二章 相关基础知识介绍

### 2.1 液晶显示器的结构及原理

液晶显示器是一种采用液晶为材料的显示器。液晶是介于固态和液态之间有机化合物。将其加热会变成透明液态，冷却后会变成结晶的浑浊状态。在电场作用下，液晶分子会发生排列上的变化，从而影响通过其的光线变化，这种光线的变化通过偏光片的作用可以表现为明暗的变化，最终通过对电场的控制实现了光学的明暗变化，从而达到显示图像的目的。

典型的 TFT-LCD 结构如图 2.1 所示<sup>[1]</sup>，在上、下两层玻璃基板之间夹一层液晶材料，形成平行板电容器，其中上玻璃基板贴有彩色滤光片，下玻璃基板则有薄膜晶体管镶嵌，上下两块偏光板的光学偏振方向互相垂直，即相位差为  $90^\circ$ 。背光模组用来提供均匀的照明光源。以不加电压液晶面板为亮态（即常白态）为例，背光源发射出来的非偏振光通过下偏光板成示线偏振光。如果某个像素位置有电压，该像素区域的液晶的旋光特性将消失，通过液晶的光线的偏振状态不变，因此光线无法通过上偏光板，则该像素显示状态为暗。此外，因为上层玻璃基板与彩色滤光片贴合，彩色滤光片使每个像素包含红蓝绿三原色，从而使其呈现出某一特定的颜色，这些不同颜色的像素呈现出来的就是面板前端的图像<sup>[39-41]</sup>。



图 2.1 TFT-LCD 基本结构

Fig 2.1 Basic structure of TFT-LCD

### 2.2 LED 背光模块介绍

LED 背光模组作为液晶显示的重要组成部分，其提供的光线的亮度、色度、均匀性、视角以及背光模组的厚度等都对显示器的最终性能有很大的影响。根据光源位置不同，LED 背光模组主要分为侧入式 LED 背光和直下式 LED 背光两种。侧入式 LED 背光的光源放置在出光面的侧边，其结构如图 2.2 所示<sup>[42]</sup>。光源发出的光线从侧边进入到导光板内，并通过全反射向前传播，导光板底部布有网点



结构，会破坏全反射条件，使光线能够从上方出射出去，形成均匀面光源，网点的密度和大小会对面光源成像的均匀性产生非常大的影响。

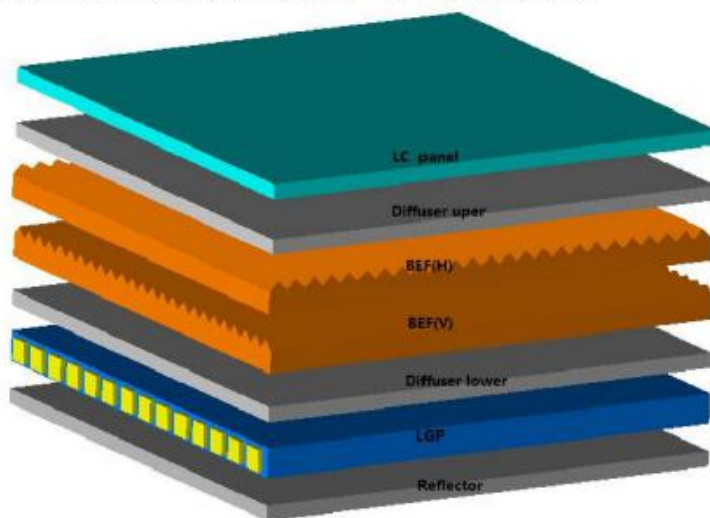


图 2.2 侧入式背光结构

Fig 2.2 Structure of side-lit backlight unit

直下式 LED 背光的光源排布在背光底部，不需要导光板，光源发出的光线经过扩散膜后出射。因此 LED 的配光曲线直接影响到成像面的均匀性及亮度。直下式 LED 背光结构如图 2.3 所示。

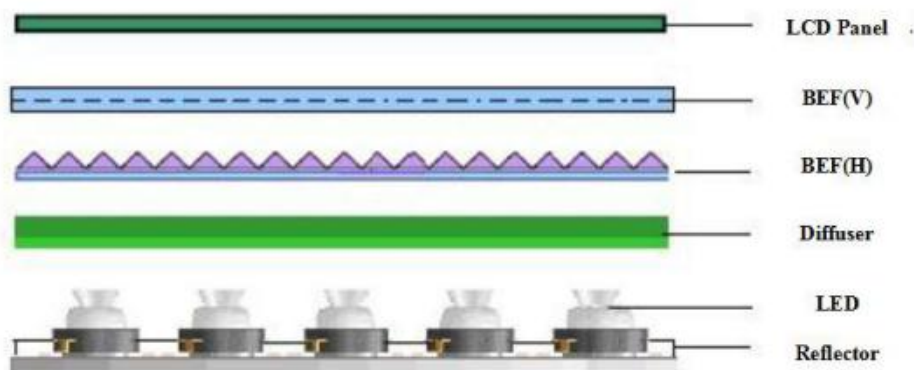


图 2.3 直下式背光结构

Fig 2.3 Structure of direct-lit backlight unit

背光模组主要组成部分从下至上依次为：反射膜、LED 光源、导光板、扩散膜和增量膜（Brightness Enhancement Film, BEF）。侧入式背光的反射膜布置在导光板下面，直下式背光的反射膜布置在光源下方，其具有高反射率，能够将发生反射回来的光线反射回去，加大光能利用率，提高背光模组亮度<sup>[43-44]</sup>。

导光板存在于侧入式背光模组中，常用聚甲基丙烯酸酯作为材料，其作用是



将点光源转换为面光源，并且通过底部的网点结构破坏光的全反射条件，将光线引导到垂直方向，对于光强均匀分配起着十分重要的作用。一般距离光源越近的地方网点结构尺寸和密度都越小，远离光源的地方网点尺寸和密度都会增大<sup>[45]</sup>。

扩散膜位于导光板上方，其主要作用是将光束引向垂直于 LCD 面板的方向，并把光能均匀化。按照工作原理，扩散膜主要分为扩散粒子型和表面浮雕型两种。表面浮雕型主要是通过基底表面设计并加工特殊几何形状的微结构，对光线进行调制来扩散光线；扩散粒子型扩散膜则是主要由 GPPS、MS、PMMA 和 PC 等作为基材，加入一些有机光扩散剂或无机光扩散剂及其他一些增韧剂、抗老化助剂等，把他们充分混合均匀后通过挤出机挤出，然后通过特定的模头挤出成一定厚度的板材，然后通过 CNC 裁切成背光模组所需的尺寸。光线通过这些扩散粒子后会不断发生折射，最终达到匀光的效果<sup>[46]</sup>。

BEF 放置在扩散膜的上方，是当今使用最广泛的增亮产品。它适用于小到手机显示屏大到液晶电视的各个尺寸的液晶显示模块。几乎所有的液晶背光源里面都使用了 BEF。BEF 的主要作用是改善光的角分布，它可以将从扩散片射出的均匀地向各个角度发散的光汇聚到轴向角度上，也就是正视角度上，从而提升轴向亮度<sup>[47-49]</sup>。一般的背光模块会放置两层正交的 BEF，对两个方向上的视角进行收缩。BEF 的工作原理如图 2.4 所示<sup>[42]</sup>。

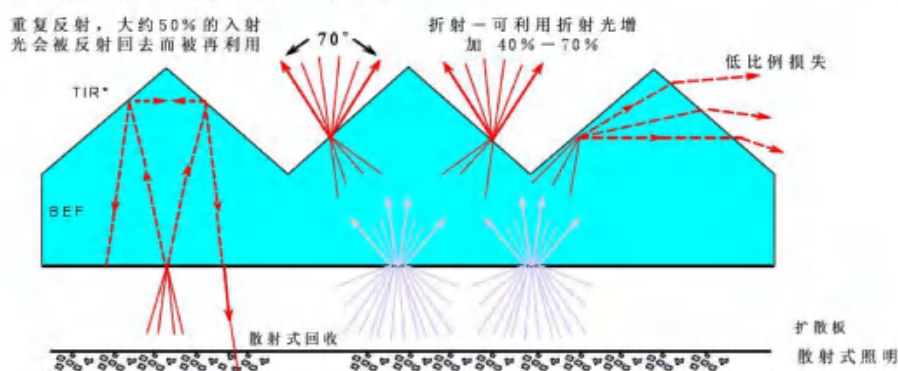


图 2.4 BEF 工作原理

Fig 2.4 Principle of BEF

其中，约 37% 的光线经过棱镜膜后发生折射变成小角度 ( $\pm 35^\circ$  范围内) 出射，约 5 成的光线会发生全反射后被反射膜重复利用，11.8% 的光线经过折射后被下一个棱镜结构重复利用，也有约 5% 的光线会变成大角度光线出射而浪费掉，总的来说，一般的背光模组加上 BEF 以后轴向亮度能提升 1 倍左右。

### 2.3 光刻技术

光制造是指通过光与物质的相互作用实现材料的成形与改性的过程。光刻技术是应用于光制造的典型实例。传统的光刻技术是一种类似于照相复制的曝光与

刻蚀相结合的技术,通过曝光和显影工序把集成电路掩膜版的版图图形转移到光刻胶上,然后通过刻蚀工艺再转移到基片上,在基片表面生成微、纳米尺度的集成电路图形层。光刻技术作为半导体工业的主流工艺技术,极大地促进了集成电路的发展。光刻所能够达到的最小线宽决定了集成电路工艺水平的高低<sup>[50-51]</sup>。

目前,微纳制造中应用最多的几种新型光刻技术包括准分子光刻技术、极紫外光刻技术、电子束光刻、离子束曝光技术、X射线光刻技术和纳米压印光刻等。光刻工艺的主要流程包括基片预处理、涂胶、前烘、曝光、后烘和显影等步骤<sup>[52-53]</sup>,如图 2.5 所示。光刻工艺中所使用的光刻胶又称为光抗蚀剂,其材料性能影响着光刻图案的质量。光刻胶又分为正性胶和负性胶两种,两者之间的主要区别就在于曝光区域和未曝光区域哪部分溶于显影液,正性胶经过紫外光照射之后,光刻胶中的光敏感剂吸收光子发生光化学反应,使原本抑制光刻胶溶于显影液中的光感化合物变为感光剂,该感光剂会以较大速率与显影液反应,使得曝光区域极易溶于显影液。而负性胶与正性胶相反,其曝光区域不发生改变,而未曝光区域才会溶于显影液,两者区别如图 2.6 所示。

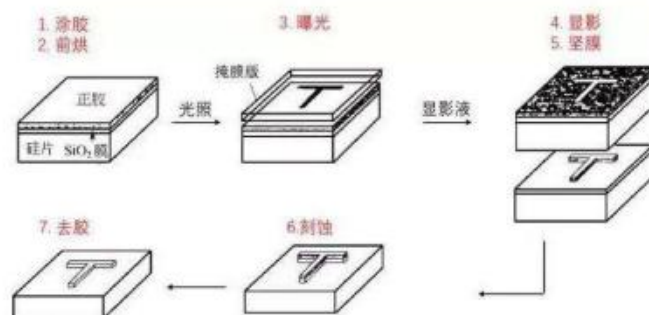


图 2.5 光刻工艺流程

Fig 2.5 Process of lithography

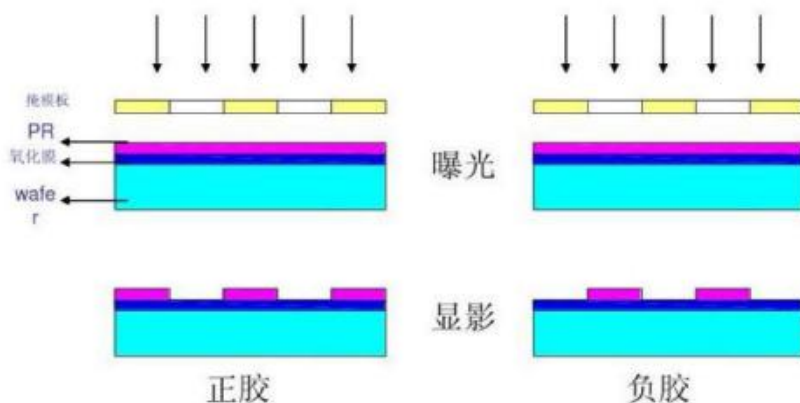


图 2.6 正性胶和负性胶曝光结果

Fig 2.6 Exposure effect of positive and negative photoresist

光刻设备是实现微纳加工技术的重要设备,随着人们对光刻精度需求不断提升,光刻图案日渐复杂,光刻机也不断地进行着改良与创新,曝光波长从最初的436nm发展到13.5nm,如今的曝光精度已经达到7nm,光刻技术的分辨率正在不断地提高以满足人们的需求,目前世界上光刻机最大的三家生产厂商为ASML、Nikon和日本的Canon,其中ASML公司的Twinscan系列光刻机是当前光刻精度最高、产线加工能力最强的光刻机型,而国内对于光刻技术的研究起步较晚,主要研发单位有长春光机所和上海微电子装备有限公司等,与国际水平仍然存在较大的差距<sup>[54-55]</sup>。

光刻技术可分为掩膜光刻技术和无掩模光刻技术,掩膜光刻技术又主要分为接触式曝光、接近式曝光和投影式光刻三类,接触式曝光掩模版会直接和光刻胶接触,虽然光刻速度快、焦深大且产量高,但是掩模版容易与光刻胶发生粘黏,导致图案受损;接近式曝光掩模版与光刻胶存在一定的间隙,避免了粘黏现象的发生,掩模版也可以重复利用,降低了成本,但是容易发生衍射效应,影响图案精度;投影式曝光利用了光学投影成像,将掩模版上的图案移到光刻胶表面进行曝光,分辨率得到极大提升,然而其焦深较小,图案的深宽比很难做大。总的来说,掩膜光刻技术加工效率高,曝光面积大,但是其掩模版制作复杂,造价高昂。为了降低成本,并且实现更精细光刻加工,无掩模光刻技术登上了舞台,这种技术不需要掩模版,省去了大量的成本,且操作简单,分辨率高,可以加工出复杂的具有不同高度信息的三维图形。无掩模光刻技术分为带电粒子光刻直写技术和基于数字微反射镜(Digital Micromirror Device, DMD)的数字光刻技术,带电粒子光刻技术是控制电子束或离子束在不同位置的曝光量以实现复杂三维图案的高度控制,这种光刻技术的分辨率很高,但是加工周期长效率低,且成本较高。DMD数字光刻技术是将具有位置高度信息的三维图案导入PC端,生成一系列“虚拟”的数字掩膜图案,包含了三维图案中不同位置的灰度信息,对应相应的高度,通过DMD对光束曝光时间的控制实现曝光量大小调节,从而加工出三维图案<sup>[56-59]</sup>。

本文使用的是德国Heidelberg公司的MLA100光刻直写设备,它采用的是基于DMD的数字灰度光刻系统,曝光精度为1 $\mu\text{m}$ ,满足本文中设计图案的加工需求,设备外观如图2.7所示。



图 2.7 MLA100 光刻直写设备

Fig 2.7 Lithography equipment of MLA100

#### 2.4 本章小结

本章主要介绍了本文所涉及的一些相关理论知识介绍,第 1 节介绍了液晶显示器的结构及原理;第 2 节介绍了显示器背光模块的构成及各组成部分的作用;第 3 节介绍了微结构光学膜加工制备所用到的光刻技术知识,以及相关的加工设备。



### 第三章 Mini-LED 背光模组的高亮光学膜设计

传统的双层棱镜膜对于 Mini-LED 背光模组的轴向视角亮度提升作用不大，针对该问题，本文设计了一种微结构光学膜，大大提升了 Mini-LED 背光模组的轴向视角亮度。本设计方法主要是结合棱镜膜的工作原理，先分析了几种典型微结构对于 Mini-LED 背光模组轴向视角亮度提升效果，再根据 Mini-LED 芯片的尺寸及排布方式，设计了一种微结构光学膜，可以将扩展光源发出的光线收缩到轴向方向附近。相较于两层棱镜膜，该微结构光学膜只需要一层光学膜，降低了厚度，减少了成本，并且其对于 Mini-LED 模组的轴向视角亮度提升效果要优于双层棱镜膜。

#### 3.1 金字塔微结构的设计

传统的背光增亮主要是通过两层棱镜膜从两个方向上对视角进行收缩，从而提高轴向视角亮度，根据两层棱镜膜的工作原理，设计在一层光学膜上加工金字塔结构，直接通过一层微结构在两个方向上实现视角收缩，单个金字塔微结构模型如图 3.1 所示。

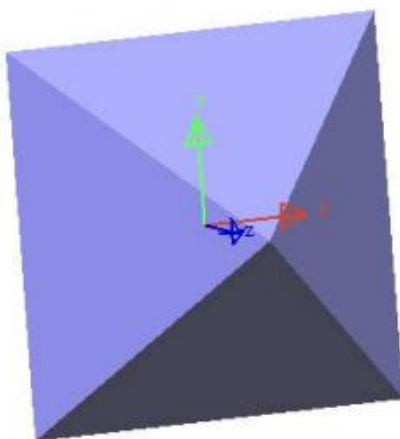


图 3.1 金字塔微结构模型

Fig 3.1 Model of pyramid microstructure

利用 LightTools 仿真软件进行建模仿真。现有的 MiniLED 背光模组如图 3.2 所示，MiniLED 芯片发出的光线各向均匀。将金字塔微结构在 LightTools 软件中通过设置表面纹理结构进行阵列仿真，仿真模型如图 3.3 所示。



图 3.2 Mini-LED 背光模组

Fig 3.2 Mini-LED backlight unit

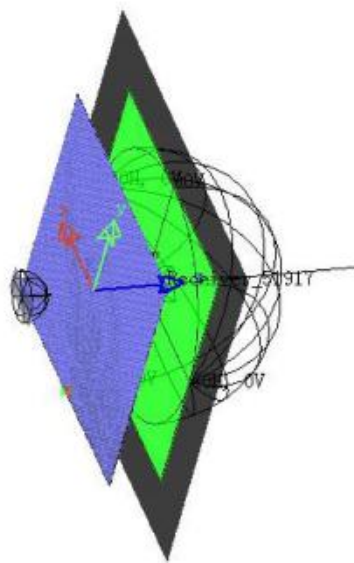


图 3.3 金字塔微结构光学膜仿真模型

Fig 3.3 Simulation model of pyramid microstructure optical film

仿真时，光源的总光线数设置为两千万条，金字塔微结构光学膜的材料折射率为 1.49，为了观察不同金字塔微结构倾角对于轴向视角亮度提升的影响，将倾角从  $30^\circ$  到  $70^\circ$  渐变，步进设置为  $5^\circ$ ，仿真得到的视角如图 3.4 所示，具体的轴向视角亮度数据如表 3.1 所示。



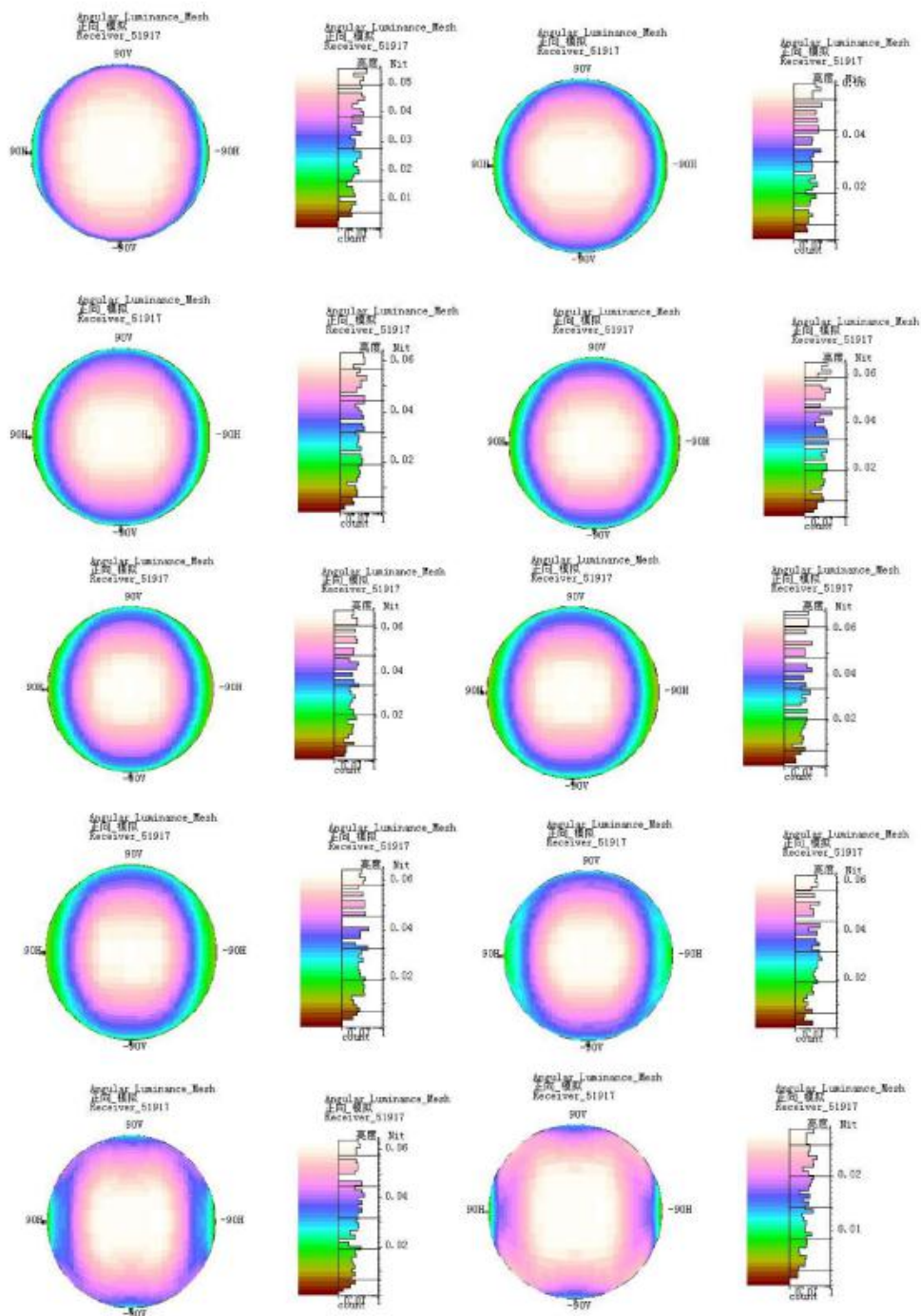


图 3.4 单个光源下视角亮度分布图，从左到右、从上到下依次为不加微结构、倾角 30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°、65°、70°的金字塔微结构

Fig 3.4 Luminance distribution with viewing angle under single light source, without and with pyramid microstructure with inclination angles from 35° to 70°

表 3.1 各倾角金字塔微结构对轴向视角亮度的影响

Tab 3.1 The influence of on-axis brightness under different inclination angle pyramid microstructure

Case	不加微结构	倾角 30°	倾角 35°	倾角 40°	倾角 45°
轴向视角亮度 (nit)	0.0549	0.0602	0.0631	0.0654	0.0682
Case	倾角 50°	倾角 55°	倾角 60°	倾角 65°	倾角 70°
轴向视角亮度	0.0680	0.0648	0.0626	0.0626	0.0281

从表 3.1 可以看出，当金字塔微结构的倾角逐渐增大时，轴向视角亮度呈现出先增加后减小的趋势，当微结构倾角为 45° 时，轴向视角亮度最高，说明在该种情况下微结构光学膜对于亮度提升作用最明显。

材料的折射率会影响微结构对于光线的调制效果，为了了解折射率对于轴向视角亮度的影响，设定材料折射率从 1.3 到 1.6 变化，仿真得到轴向视角亮度随材料折射率的变化关系，并进行曲线拟合，结果如图 3.5 所示。

轴向视角亮度与折射率的关系

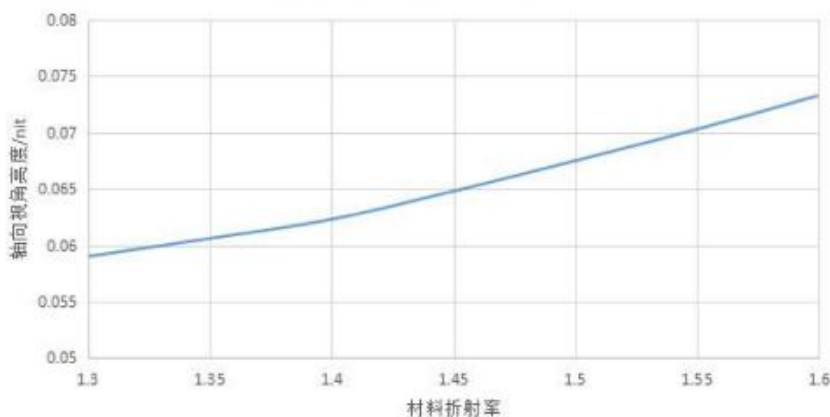


图 3.5 轴向视角亮度随材料折射率的变化关系

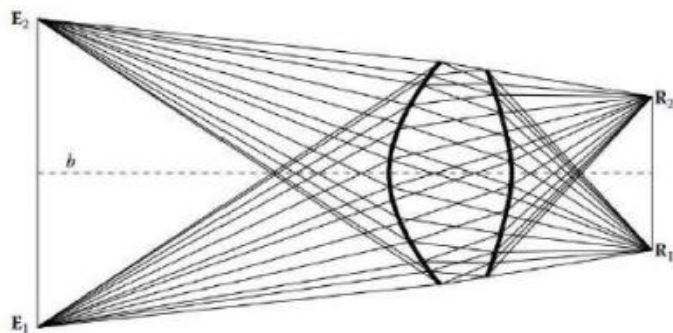
Fig 3.5 The relationship between on-axis brightness and material refractive index

可以看出，材料折射率越高，对于视角收缩作用越明显，其轴向视角亮度越高。

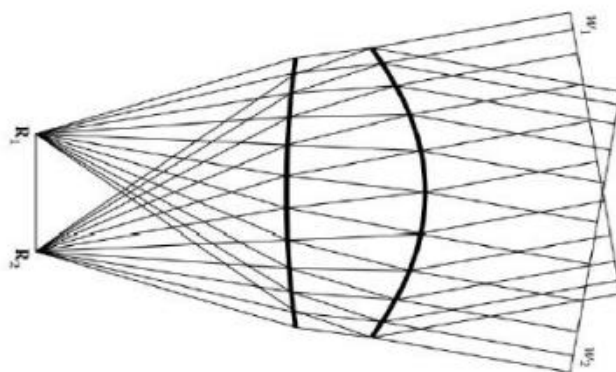
## 3.2 同步多曲面方法设计

### 3.2.1 同步多曲面法理论设计

同步多表面法 (Simultaneous Multiple Surface, SMS) 最初由 Juan C.Minano 提出, 是一种用来设计太阳能聚光器的方法, 可针对以下两种问题进行设计, 一种是将扩展光源发出的光线全部聚焦到另一平面上, 另一种是将光源发出的光线进行准直, 如图 3.6 (a) 和 (b) 所示:



(a)



(b)

图 3.6 SMS 方法的应用

Fig 3.6 Application of SMS method

在本次设计中, 需要对 Mini-LED 芯片发出的光线进行视角收缩, 以达到提高轴向视角亮度的目的, 因此, 选用第二种方案进行设计。本次设计目标为将光源发出的光线全部收缩到  $25^\circ$  范围内, 这是因为 SMS 方法对于初始条件的选择比较敏感, 如果收缩的角度过大则会造成面型计算不出来, 选择  $25^\circ$  能够得到理想的面型结果。设计方法如图 3.7 所示。

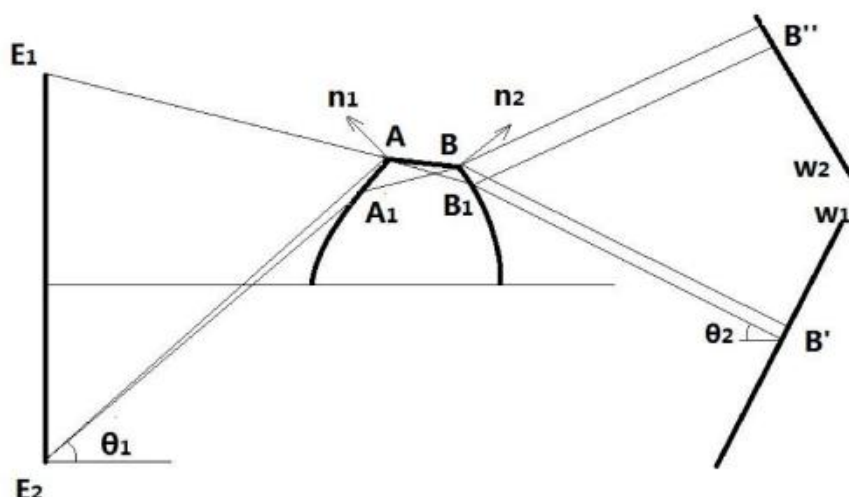


图 3.7 SMS 方法设计双自由曲面微结构

Fig 3.7 Design of double free-form surface microstructure with SMS method

$E_1$  和  $E_2$  为光源的两个端点，由于该方法设计出的双自由曲面结构尺寸不小于光源的尺寸，因此需要对光源进行切割，本次设计令光源大小为  $10\mu\text{m}$ 。然后计算出微结构进行阵列。 $E_1$  发出的光线经过微结构调制会全部准直到  $W_1$  波前， $E_2$  发出的光线经过调制会全部准直到  $W_2$  波前， $W_1$  波前和  $W_2$  波前的法线方向与水平方向夹角为  $25^\circ$ 。

首先需要计算光学系统的扩展量，光学扩展量描述了光学系统传输光能的能力，光束的光学扩展量等于光束在其角度和位置区域内的积分，可表示为

$$E = \int dpdqdx dy \quad (3.1)$$

式中， $p = nL$ ， $q = nM$ ，其中  $n$  为光束所在介质的折射率， $L$  和  $M$  为光线的方向余弦。光学扩展量还可以通过光程来进行计算，如图 3.8 所示。

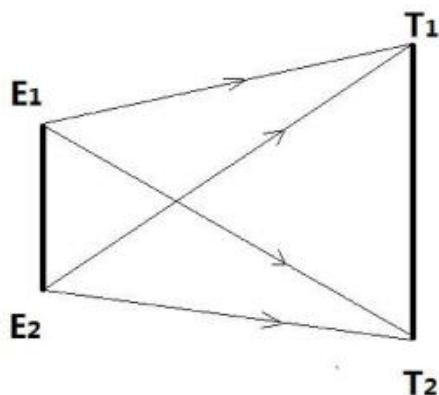


图 3.8 通过光程计算光学扩展量

Fig 3.8 Calculation of extendue by optical path



图中，光源  $E_1E_2$  出射并入射到目标面  $T_1T_2$  上的光学扩展量可表示为：

$$e = 2 \times (E_1T_2 - E_1T_1) \quad (3.2)$$

式中， $E_1T_2$  和  $E_1T_1$  表示光程。光束经理想光学系统后，其光学扩展量不变，系统所接收的光束将传输至目标面。

接着，通过光学扩展量来计算初始点的坐标，其中，A 的位置坐标给定，则 A 点接收到的  $E_1$  和  $E_2$  点发出的光线的光学扩展量  $e_1$  可以通过式 3.2 求得，目标面波前  $W_1$  和  $W_2$  的位置固定，则 B 点发出的光线到达  $W_1$  和  $W_2$  波前的光学扩展量  $e_2$  也可通过光程表示出来，为了保证光学扩展量守恒， $e_1 = e_2$ ，则 B 点的位置坐标可通过 A 点坐标及光学扩展量求出。

下一步计算初始点 A 和 B 的单位法线向量，令  $E_2$  发出的光线达到 A 点以后折射到 B 点，再次发生折射准直到  $W_1$  波前，则通过矢量形式的 Snell 定律可求得 A 点和 B 点的单位法向量。矢量形式的 Snell 定律表示为：

$$n_0\mathbf{O} - n_1\mathbf{I} = [n_0^2 + n_1^2 - 2n_0n_1(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2}\mathbf{N} \quad (3.3)$$

其中， $\mathbf{N}$  为该点的单位法向量， $\mathbf{I}$  和  $\mathbf{O}$  分别为入射光线和出射光线的单位向量， $n_1$  和  $n_0$  分别为空气和微结构介质的材料折射率。图 3.6 中，入射光线  $E_2A$  的单位向量和出射光线  $AB$  的单位向量已经求得，则利用式 3.3 即可求得自由曲面上 A 点的单位法向量，同理，入射光线  $AB$  经由 B 点折射沿  $BB'$  出射光线也可通过 Snell 定律求得 B 点单位法向量。

$E_1$  发出的光线到达 A 点以后会发生折射到  $B_1$  点，然后再次折射到  $W_1$  波前，由入射向量  $E_1A$  和 A 点的单位法向量结合式 3.3 即可求得出射光线  $AB_1$  的单位法向量，此时只能确定  $AB_1$  的方向，而不能确定  $B_1$  点的具体坐标，这里需要结合光程进行计算，可以看出，经过 A 点到达 B 点和  $B_1$  点的光线都会折射到  $W_1$  波前，那么，可以将  $BB_1$  看作是 A 点出射光线，准直到  $W_1$  波前的笛卡尔卵圆 (Cartesian Oval)。则所有 A 点发出的光线折射后准直到  $W_1$  波前的光线光程都相等，即光程  $l$  为：

$$l = n_0AB + n_1BB' = n_0AB_1 + n_1B_1B_1' \quad (3.4)$$

由于经过 A 点到达  $BB_1$  之间上所有点都会折射到  $W_1$  波前，故所有光路的光程都相等，将  $BB_1$  点之间分为 10 段计算，即求出 10 个点的坐标，这样做是为了计算得到面型上更多的离散点数据，保证面型更加精确，结合式 3.4 和式 3.3 即可求出这些点的坐标及对应单位法线向量。

光源上  $E_2$  点发出的光线经过  $A_1$  点折射到 B 点然后被准直到  $W_2$  波前，根据光线可逆原理，将此条光路看作是波前  $W_2$  发出的光线到达 B 点然后折射到  $A_1$  点，接着汇聚到  $E_2$  点，同理，经过 B 点折射到 A 点的光线也会汇聚到  $E_2$  点上，