

因此 AA_1 段也是一段笛卡尔卵圆，通过相同的方法可以求得 AA_1 上 10 个点的坐标值及其单位法向量。

接下来， E_1 点发出的光线到达 AA_1 上的所有点发生折射到双自由曲面的后表面 B_1B_2 上，然后准直到 W_1 波前，由于系统是对称结构，则 E_1 点所有发出的光线到达 W_1 波前和 E_2 点所有光线到达 W_2 波前，其光程都相等，根据已知点的坐标及单位法向量信息和光程，即可求出下一段曲线 B_1B_2 以及 A_1A_2 上的离散点坐标，如此循环往复，通过不断迭代即可求出双自由曲面前后表面的面型数据，一直将微结构的上半部分计算完成，沿中心轴旋转对称即可得到微结构的完整面型。

SMS 法计算微结构面型的精髓在于通过两个自由曲面精确控制光源两个端点的光线走向，结合边缘光线理论认为扩展光源上所有点发出的光线都得到了控制，然而，由于对光源进行了切割，其相邻光源发出的光线势必会打到微结构上形成杂散光，因此本节对 SMS 方法进行了优化，计算原理如图 3.9 所示。

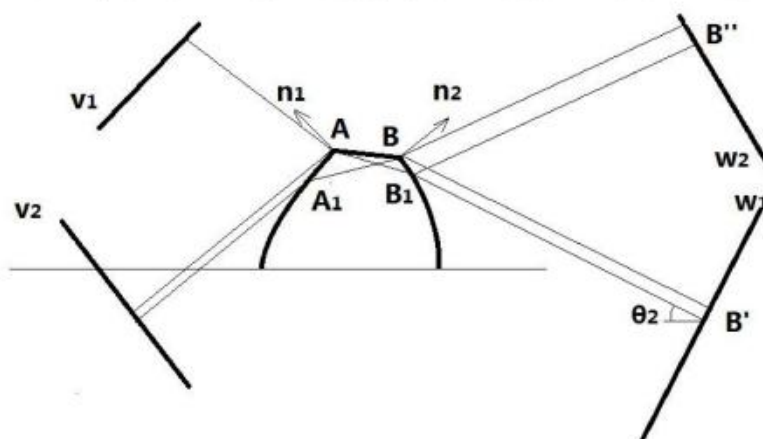


图 3.9 优化 SMS 方法设计微结构

Fig 3.9 Optimization of SMS method for microstructure design

将光源看做是 V_1 和 V_2 两段波前发出的光线， V_1 和 V_2 根据实际需要确定，这里将 60° 角度光线全部收缩到 25° ，因此 V_1 和 V_2 波前发出的光线分别为 $\pm 60^\circ$ ， V_1 和 V_2 波前发出的光线分别准直到 W_1 和 W_2 波前，其他的计算步骤与上述相同，通过优化算法计算出来的微结构面型如图 3.10 所示。

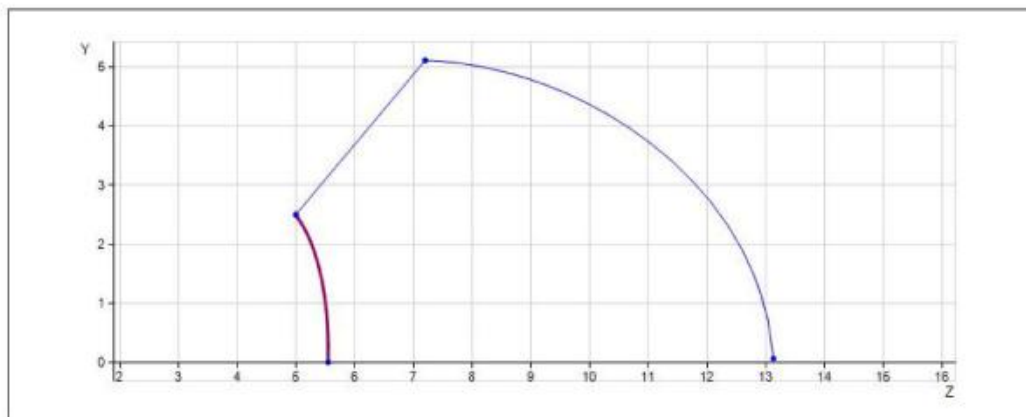
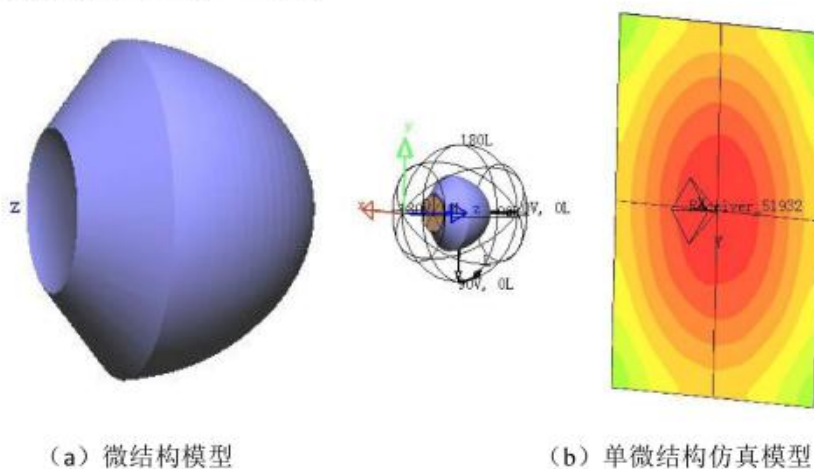


图 3.10 SMS 方法计算的微结构面型

Fig 3.10 Curve of microstructure designed by SMS method

3.2.2 单个双自由曲面微结构仿真

将计算得到的微结构面型数据导入 LightTools 仿真软件进行建模仿真，单个微结构及其仿真模型如图 3.11 所示。



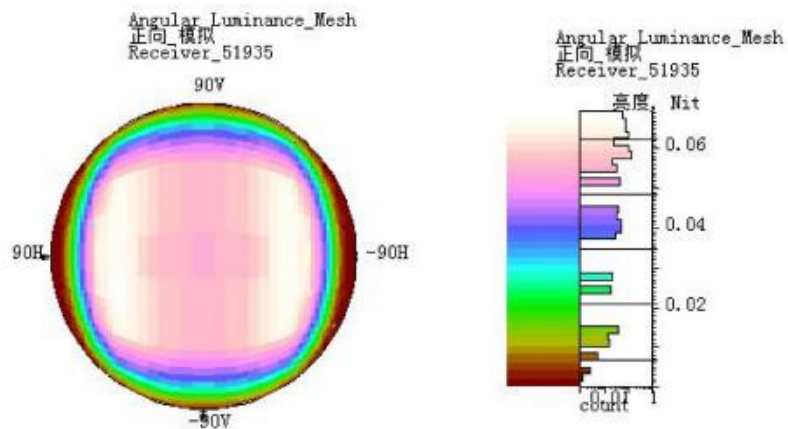
(a) 微结构模型

(b) 单微结构仿真模型

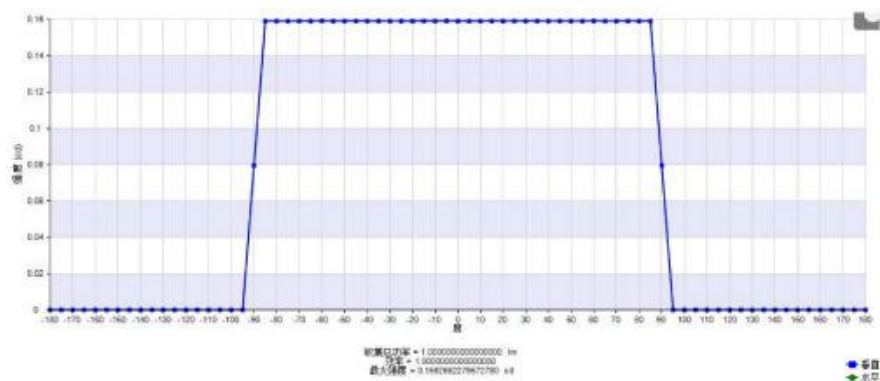
图 3.11 单个双自由曲面微结构及其仿真模型

Fig 3.11 Structure and simulation model of single double free-form surface microstructure

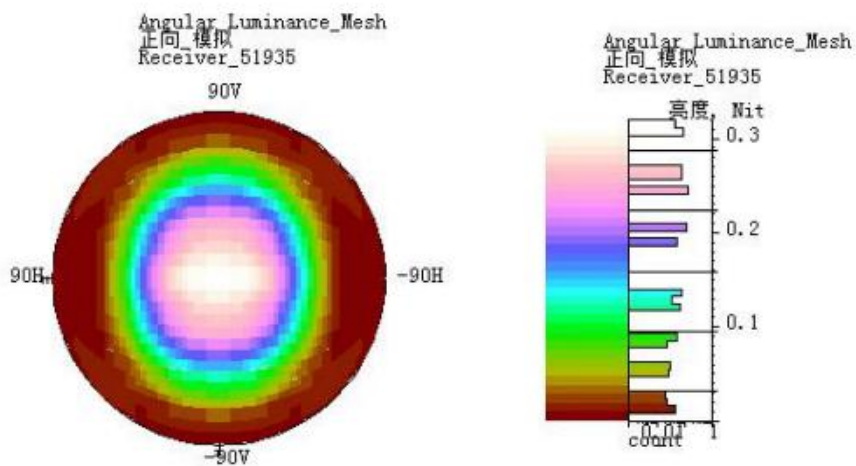
不加双自由曲面微结构和加微结构以后仿真得到的视角亮度分布和视角曲线如图 3.12 所示。



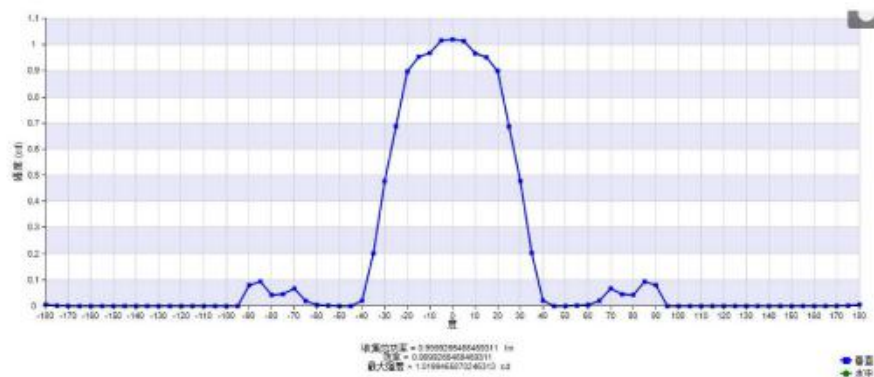
(a) 不加双自由曲面微结构视角



(b) 不加双自由曲面微结构视角曲线



(c) 加双自由曲面微结构视角



(d) 加双自由曲面微结构视角曲线

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

Fig 3.12 Viewing angle and curves with and without double free-form surface microstructure

从仿真结果可以看出，在单个光源下微结构对于视角收缩作用明显，半亮度视角从 60° 收缩到了 25° ，符合理论设计。其轴向视角亮度从 0.0549nit 提升到了 0.3192nit ，亮度提升了 481.4% 。

3.2.3 双自由曲面微结构阵列仿真

将计算得到的微结构进行阵列仿真，实际上由于微结构面型的数据量大且计算机硬件限制，设定仿真的模型尺寸为 3×3 阵列。如图 3.13 所示，将单个双自由曲面微结构切割成四边形，然后进行阵列拼接，用 LightTools 软件自带的布尔运算功能将微结构合成一个整体结构，仿真结果如图 3.14 所示。

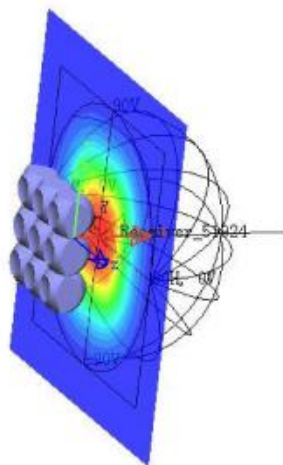
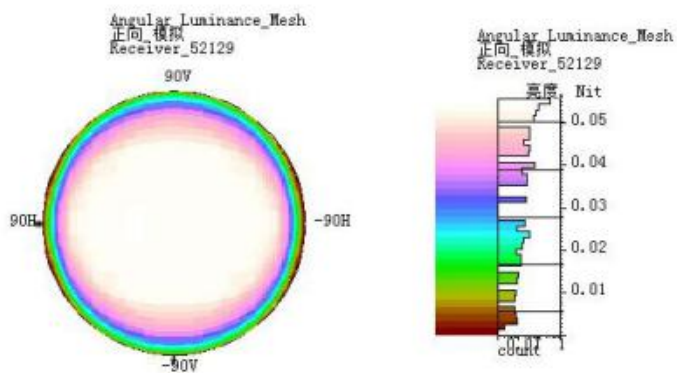
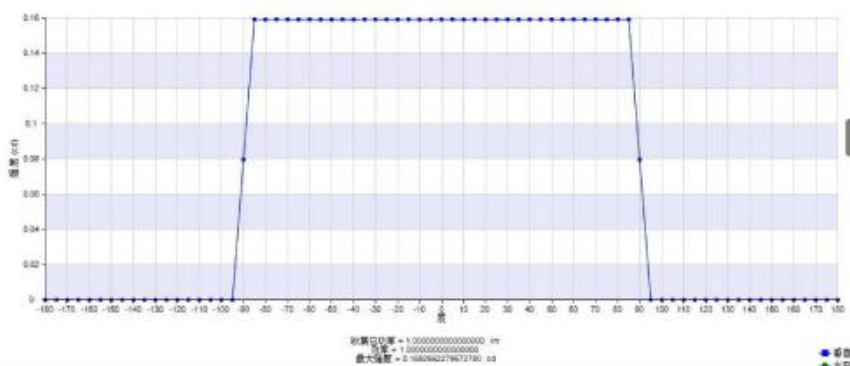


图 3.13 双自由曲面微结构阵列仿真模型

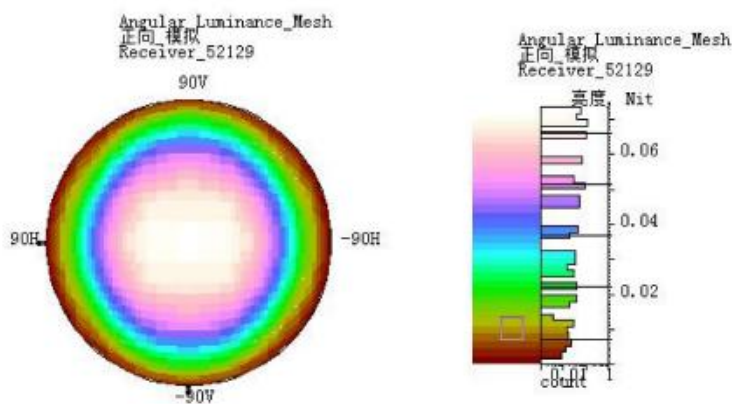
Fig 3.13 Simulation of double free-form surface microstructure array



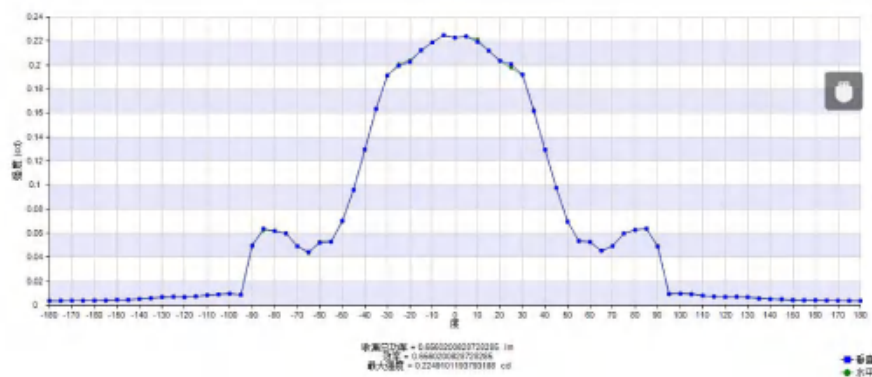
(a) 不加双自由曲面微结构阵列视角



(b) 不加双自由曲面微结构阵列视角曲线



(c) 加双自由曲面微结构阵列视角



(d) 加双自由曲面微结构阵列视角曲线

图 3.14 加双自由曲面微结构阵列前后仿真结果

Fig 3.14 Simulation results with and without double free-form surface microstructure array

从图中可以看出，加双自由曲面微结构阵列以后，其视角的确发生了收缩，且轴向视角亮度由 0.0548nit 提升到了 0.0735nit，亮度提升了 33.9%，但是仍然有不少大角度光线出射，利用 LightTools 仿真软件的逆向光线追迹功能对该部分光线进行逆向光线追迹，追迹结果如图 3.15 所示。

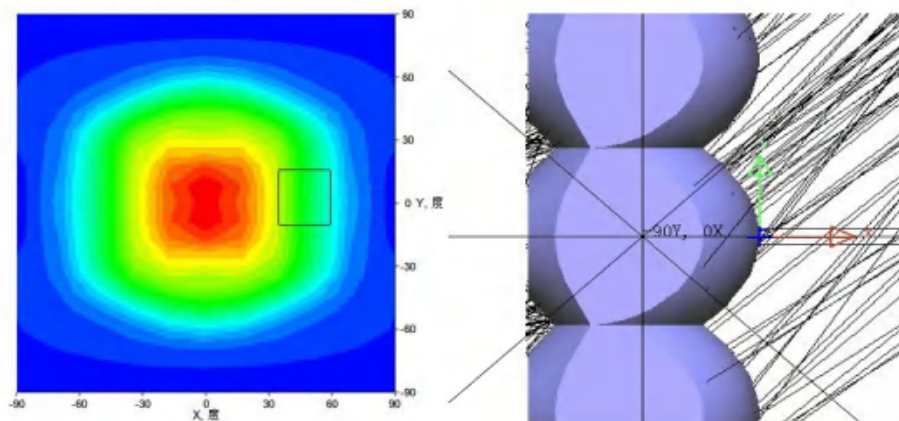


图 3.15 大角度光线分析

Fig 3.15 Analysis of large angle ray

对于大角度光线逆向光线追迹可以看出，大部分光线都是来自于前表面和后表面的拼接部分，而 SMS 方法对于初始点的坐标的选择比较敏感，初始点的位置不合适则面型就会无法计算出来，这就导致了双自由曲面前后面的连接面很难解决，另一方面，现有的加工工艺无法直接制作双自由曲面微结构，只能将两个曲面制作在两张薄膜上，这样就需要两张薄膜严格对准，增加了装配难度。虽然该方法没有完美解决针对扩展光源设计微结构的问题，但是后续随着光源尺寸的进一步缩小，或者微纳加工工艺进一步完善，使得单个微结构对应一个光源，则该问题就可以得到解决，或者直接利用该方法设计大透镜，再采取透镜减薄的方

法制成微纳结构，虽然步骤繁琐，却不失为一种可行的办法。

3.3 高亮光学膜设计

目前针对扩展光源的设计方法很少，比较常见的是同步多表面法，然而同步多表面法设计出来的结构是不小于光源大小的透镜结构，无法利用该方法计算微结构，还有一种方法为虚拟点光源法，即在扩展光源后方虚拟一个点光源，将扩展光源看做是点光源进行计算，然而该方法也只是近似计算，并不能对所有光线进行调制，仿真效果与计算结果存在不小的误差，本节提出一种基于扩展光源的计算方法，将扩展光源发出的光线进行视角收缩，从而达到提高轴向视角亮度的目的。

先针对一款实际的 Mini-LED 背光模组进行设计，单个 Mini-LED 芯片尺寸为 $250\mu\text{m}\times 535\mu\text{m}\times 120\mu\text{m}$ ，两个 Mini-LED 芯片之间的间距为 2.5mm ，大数量的 Mini-LED 芯片密集排布在背光腔的底部，呈矩形排列。Mini-LED 背光的结构和实测如图 3.2 所示。

微结构计算原理如图 3.16（左）所示。计算时，将微结构进行分段设计，其中，与 Mini-LED 芯片等宽的区域 S1，设定微结构为倾角等于 45° 的棱柱结构，扩展光源发出的光线经过这部分微结构时，大角度光线经过两次折射后变成小角度出射，小角度光线发生全反射后被放置在光源底部的反射膜重复利用，部分光线经过折射后进入到下一个棱柱结构被重复利用，极少数光线会变成大角度光线出射而浪费掉。而对于两个 Mini-LED 芯片之间的 S2 区域，该区域的微结构只能接收到 Mini-LED 发出的大角度光线，若仍然用倾角 45° 的棱柱结构，则会产生较大的光效损失，因此需要对该部分的微结构进行重新计算。其光路图如图 3.16（右）所示。

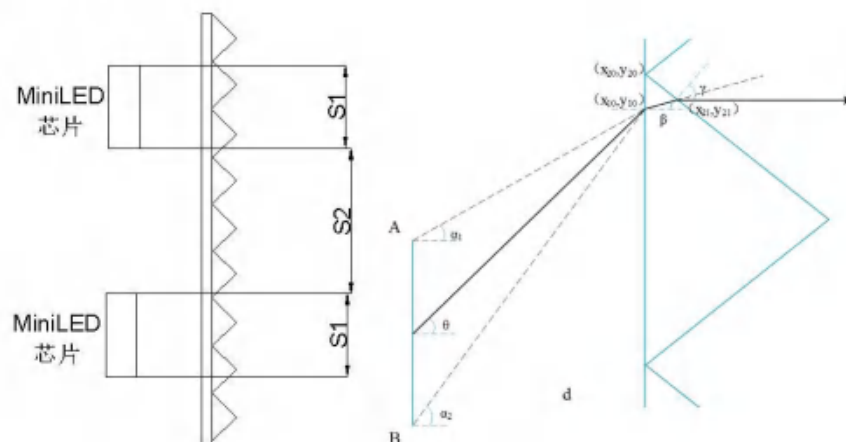


图 3.16 微结构设计原理及光路图

Fig 3.16 The design principle of microstructure and optical path

计算时, Mini-LED 芯片的中心位于原点处, 其两个端点分别为 A 和 B, 根据 Mini-LED 芯片的尺寸, 并且简化计算, 设定 AB 长为 $250 \mu\text{m}$, 微结构光学膜底面与光源之间的距离为 d , (x_{10}, y_{10}) 为两端点发出的光线与光学膜底面的某一交点, α_1 和 α_2 分别为两端点发出的光线与水平方向的夹角。设计时, 将两条光线夹角的角平分线处的光线经过两次折射偏转到轴向方向, θ 为两条光线的角平分线处光线与水平方向夹角。根据边缘光线原理, MiniLED 芯片发出的光线经过微结构后都会被调制到轴向方向附近, 从而实现视角收缩, 提升轴向视角亮度。

根据图 3.16 光路原理图与 Snell 定律, 采用数值迭代的方法进行计算, 即给出第一个点的坐标值, 通过改变下一个点的纵坐标值 y_{10} , 联立方程可以求得第二个点的坐标值, 再由第二个点求第三个点的坐标, 以此类推, 求得所有点的坐标值, 可以得到方程组 (3.5):

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arctan \frac{y_{10} - 125}{d} \\ \alpha_2 = \arctan \frac{y_{10} + 125}{d} \\ \theta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ n_1 \times \sin \theta = n_2 \times \sin \beta \\ n_2 \times \sin(\gamma - \beta) = n_1 \times \sin \gamma \\ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = \frac{y_{10} - y_{11}}{x_{11} - x_{10}} \end{cases} \quad (3.5)$$

其中, n_1 为空气折射率, n_2 为微结构材料折射率, (x_{20}, y_{20}) 为第二面的起始迭代计算点的坐标, (x_{21}, y_{21}) 为角平分线处的光线经过一次折射后与第二面的交点坐标。 β 为光线经过一次折射后折射光线与水平方向的夹角, 光线经过第二面发生折射后, 出射光线与第二面交点法线方向的夹角为 γ 。

根据 Mini-LED 芯片阵列的排布方式, 两个 Mini-LED 芯片的间距为 2.5mm , 为了保证微结构能够最大面积覆盖背光, 得到 100% 的填充率, 将距离 Mini-LED 光源中心 1.25mm 处的棱柱设为最边缘的棱柱结构, 将 1.25mm 分成 150 个棱柱微结构进行计算, 计算得到的 S1 和 S2 区域的面型结果如下图 3.17 所示。

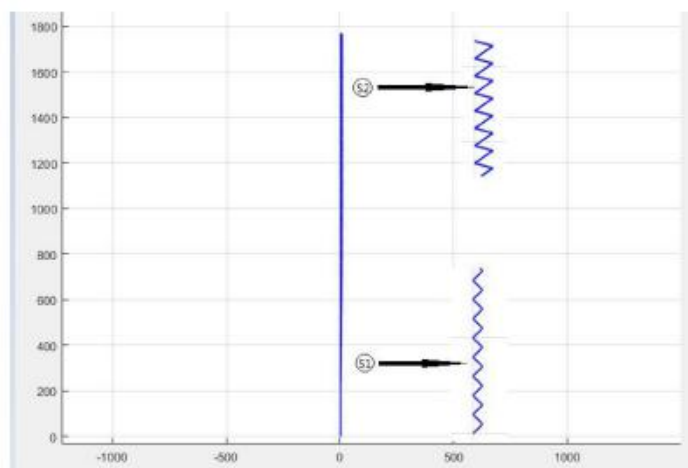


图 3.17 微结构面型

Fig 3.17 The curves of microstructure

3.3.2 微结构光学膜仿真

将计算得到的微结构面型离散数据点代入到 LightTools 仿真软件进行建模仿真，将数据点导入后得到的曲线进行回形旋转，得到的单个微结构的仿真模型如图 3.18 所示。

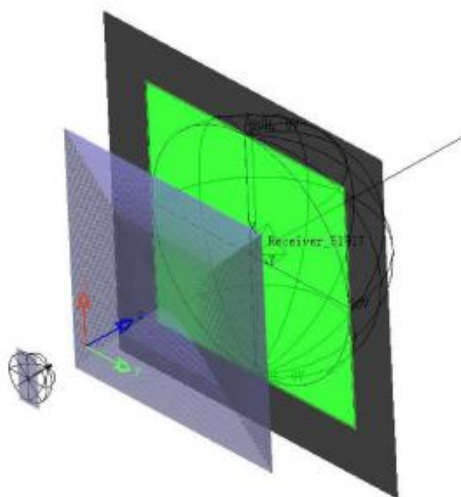


图 3.18 单个微结构仿真模型

Fig 3.18 Simulation model of single microstructure

仿真时，光源设定为 $250\mu\text{m}\times 535\mu\text{m}\times 120\mu\text{m}$ 的五面发光体，并且各向亮度均匀，微结构光学膜放置在距离光源 0.7mm 处，仿真光线为两千万条，仿真后光线走向如图 3.19 所示。

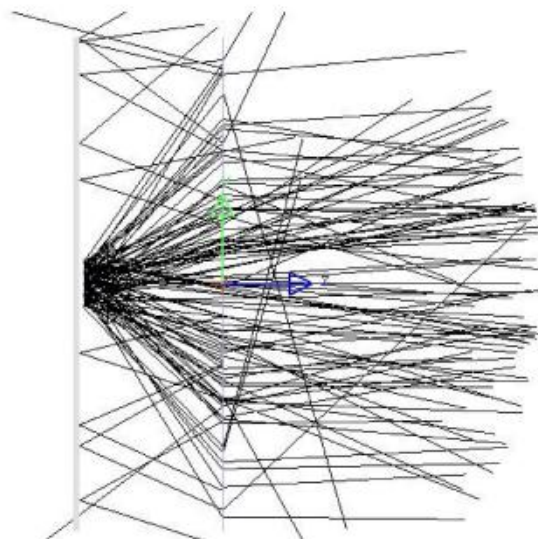
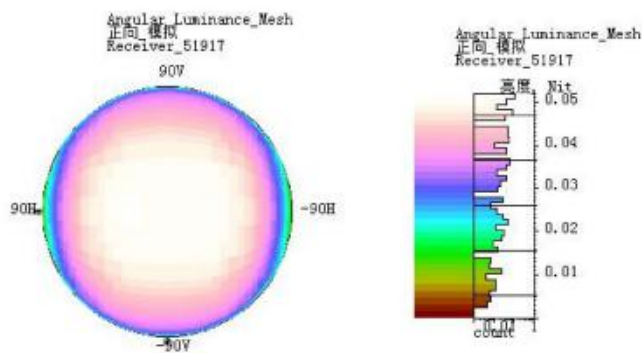


图 3.19 光线走向仿真

Fig 3.19 Simulation of light trace

从图 3.19 可以看出，扩展光源发出的光线经过微结构光学膜后，其光线大部分都会被收缩到轴向方向附近，从而达到提高轴向方向视角亮度的目的。而有极少量的光线会发生全反射后被反射膜重复利用，这是由 S1 区域的倾角 45° 的棱柱结构所造成的。

为了更加直观看到微结构光学膜的效果，在单个 Mini-LED 光源下，同时仿真了只加扩散膜和加双层棱镜膜和扩散膜的效果，并且将三种情况放在一起进行对比。得到的仿真视角图如图 3.20 所示。



(a)

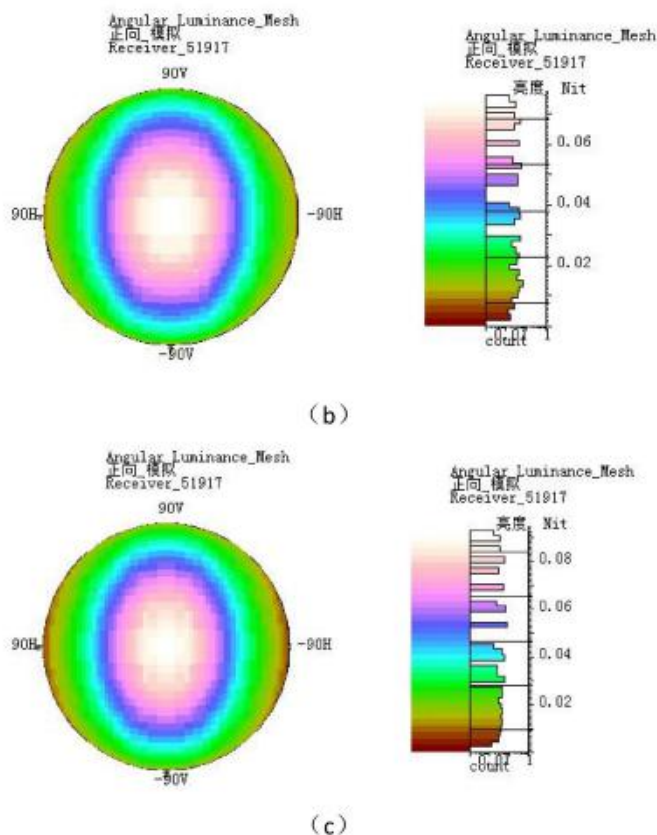


图 3.20 单个光源下视角图，(a) 只加扩散膜，(b) 加双层棱镜膜和扩散膜，(c) 加微结构光学膜和扩散膜

Fig 3.20 Viewing angle under single light source. (a) with diffuser film, (b) with two-layer prism films and diffuser film, (c) with designed microstructure film and diffuser film

从三种情况下的视角图可以看出，只加一层扩散膜的情况下，Mini-LED 芯片发出的光线视角很大，并且轴向方向视角的亮度很低。加了双层棱镜膜和扩散膜后，视角发生明显的收缩，并且轴向方向的亮度得到了提升，然而加了微结构光学膜和扩散膜以后，其视角收缩更加明显，并且轴向方向亮度提升也更多。提取仿真得到的轴向方向亮度数据，三种情况下的亮度数据如表 3.2 所示。

表 3.2 单个光源下轴向视角亮度

Fig 3.2 On-axis brightness under single light source

Case	扩散膜	双层棱镜膜+扩散膜	设计的光学膜+扩散膜
轴向视角亮度 (nit)	0.0516	0.0760	0.0935

从轴向视角亮度数据可以看出，在单个 Mini-LED 光源下，微结构光学膜对于轴向视角亮度的提升作用的确优于双层棱镜膜，相比于只加扩散膜的情况，加双层棱镜膜与扩散膜和加微结构光学膜与扩散膜后轴向视角亮度分别提升了 47.3% 和 81.2%。

3.3.3 微结构阵列仿真

实际的 Mini-LED 背光为 30×24 颗 Mini-LED 芯片排布在背光腔底部，因此需要仿真微结构阵列下的效果，然而如果对总共 720 个微结构进行建模仿真则需要大量的计算，大大影响仿真效率，因此将 Mini-LED 背光仿真模型设定为 3×3 的光源阵列，并且相对应的建模 9 个微结构进行仿真，仿真模型如图 3.21 所示。

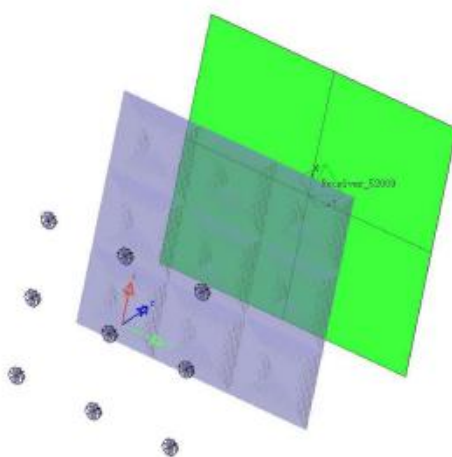
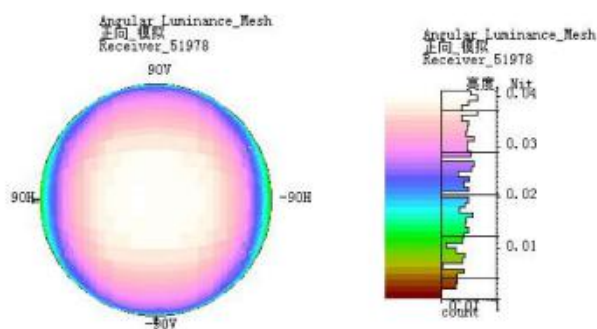


图 3.21 微结构阵列仿真

Fig 3.21 Simulation of microstructure array

同样的，作为对比，同时仿真了只加扩散膜和加棱镜膜与扩散膜这两种情况，仿真得到的视角图如图 3.22 所示。



(a)

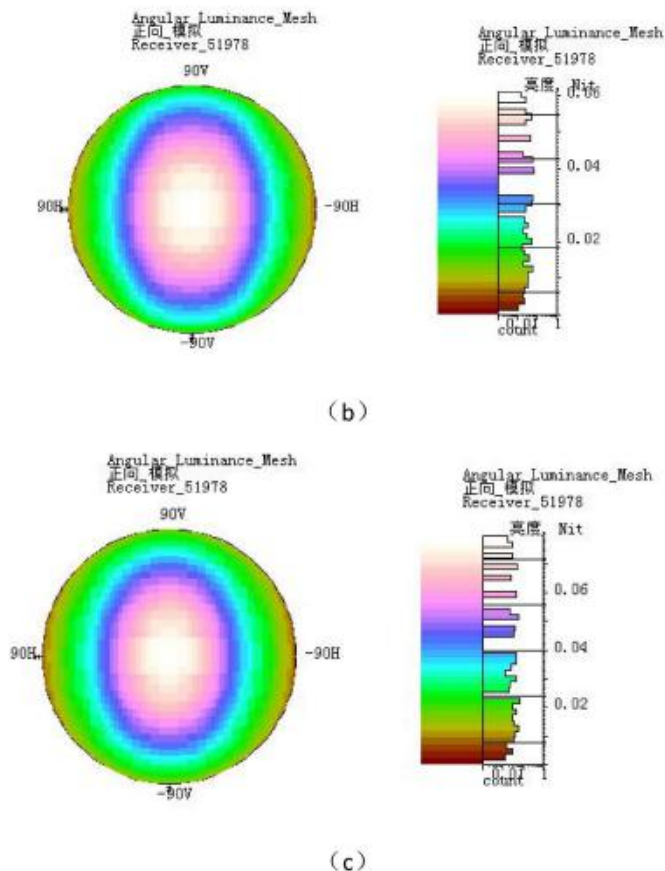


图 3.22 阵列光源下视角图，(a) 只加扩散膜，(b) 加双层棱镜膜和扩散膜，(c) 加微结构光学膜和扩散膜

Fig 3.22 Viewing angle under light source array, (a) with diffuser film, (b) with two-layer prism films and diffuser film, (c) with microstructure film and diffuser film

从上图可以看出，在第三种情况，即加了微结构光学膜和扩散膜以后，视角收缩效果最好，同样提取阵列后三种情况下的轴向视角亮度数据，如表 3.3 所示。

表 3.3 阵列光源情况下的轴向视角亮度

Tab 3.3 On-axis brightness under light source array

Case	扩散膜	双层棱镜膜+扩散膜	设计的光学膜+扩散膜
轴向视角亮度 (nit)	0.0526	0.0607	0.0797

可以看出，在阵列光源情况下，仍然是微结构光学膜对于轴向视角亮度的提升最为显著，相比于只加扩散膜的情况，加了双层棱镜膜与扩散膜和加微结构光学膜与扩散膜后，轴向视角亮度分别提升了 15.4%和 51.5%，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 31.3%，其效果优于棱镜膜。

虽然设计的微结构光学膜效果要优于双层棱镜膜的效果,但是微结构光学膜却需要严格对准光源,为了观察对准与否对于实际效果的影响程度,分别改变微结构光学膜与光源的距离 d 和微结构光学膜中心与光源中心对位误差 L ,观察其轴向视角亮度的变化。

首先,保持微结构中心与光源中心对准,只改变微结构光学膜与光源的距离 d ,将 d 从 $100\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 间隔 $100\mu\text{m}$ 变化,且其他参数保持不变,仿真各距离下的轴向视角亮度。结果如表 3.4 所示。

表 3.4 不同距离下轴向视角亮度

Tab 3.4 On-axis brightness under different distance between light source and microstructure film

d (μm)	100	200	300	400	500
轴向视角亮度 (nit)	0.0572	0.0633	0.0696	0.0751	0.0790
d (μm)	600	700	800	900	1000
轴向视角亮度 (nit)	0.0797	0.0808	0.0754	0.0690	0.0636

可以看出,微结构光学膜和光源之间的距离发生变化,轴向视角亮度也会随之改变,而随着距离的增加,轴向视角亮度呈现出先增加后减小的趋势,并且在距离为 $700\mu\text{m}$ 时达到最大值,这是由于计算微结构面型时,微结构与光源的距离就放置在 $700\mu\text{m}$ 的位置,变化关系如图 3.23 所示。

轴向视角亮度随距离的变化关系

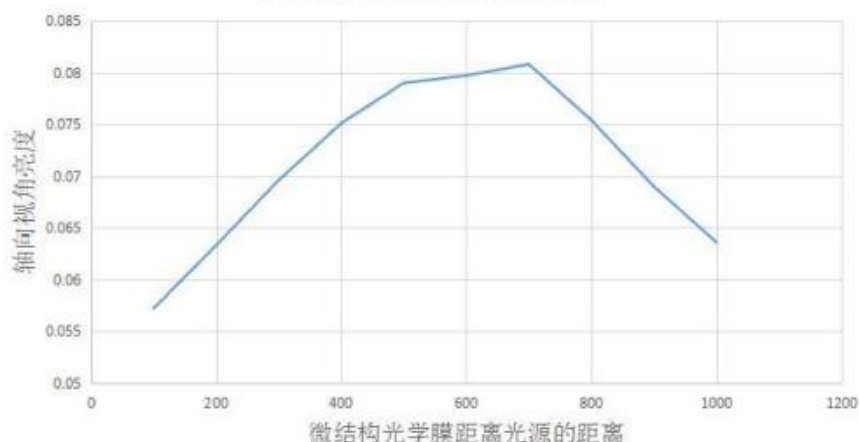


图 3.23 轴向视角亮度随距离的变化关系

Fig 3.23 The relationship between on-axis brightness and distance

因此,实际装配时,微结构光学膜的位置最好放置在距离光源 $700\mu\text{m}$ 的位

置, 效果达到最好。接下来保持微结构光学膜与光源的距离 d 保持不变, 光源中心与微结构光学膜的中心偏差值 L 从 0 到 $1250\mu\text{m}$ 进行变化, L 为 0 时, 即为对准情况, 仿真得到的轴向视角亮度变化如表 3.5 所示

表 3.5 不同对位误差下的轴向视角亮度

Tab 3.5 On-axis brightness of different alignment error

L (μm)	0	250	500	750	1000	1250
轴向视角 亮度 (nit)	0.0820	0.0730	0.0732	0.0560	0.0545	0.0600

从表中可知, 随着对位偏差的增加, 轴向视角亮度随之衰减, 当偏差达到 $1000\mu\text{m}$ 时, 轴向视角亮度衰减了 50.4%, 衰减程度较大, 因此实际装配时, 应注意微结构光学膜与 Mini-LED 芯片的对准, 从而达到最大程度的亮度提升。

以上三种方法都达到了实现针对 Mini-LED 背光的视角收缩效果, 然而, 第一种方法金字塔微结构对于轴向视角亮度提升不够高; 第二种方法得到的双自由曲面微结构在单个光源下对于亮度提升效果最好, 然而在光源阵列情况下会产生较大的劣化, 且现有的加工工艺很难实现双自由曲面微结构的加工, 因此该方法有待进一步改进。综合考虑, 第三种方法设计得到的微结构对于轴向视角亮度的提升效果优于双层棱镜膜, 且加工方便, 因此, 第四章选择了该种微结构进行样片制作并测试。

3.4 本章小结

为了提高 Mini-LED 背光模组的轴向视角亮度, 本章通过对 Mini-LED 背光进行视角收缩以达到目的, 并且分别通过三种方法进行了设计, 对比后选择了最佳的设计方法。第一节介绍了相比于单层棱镜膜能从两个方向上实现视角收缩的金字塔微结构设计, 对金字塔微结构的参数进行建模仿真, 得到最佳的面型。第二节对针对扩展光源设计的同步多表面法进行了优化改进, 对设计的双自由曲面微结构进行了单个微结构及阵列仿真及分析。第三节提出一种针对扩展光源的视角收缩设计方法, 并对微结构面型进行了计算, 通过建模仿真以后验证了方法的可行性。

第四章 微结构光学膜制备与测试

无掩模光刻技术，顾名思义，即为不需要掩膜版的光刻技术，其通过特定波长的光打在抗蚀剂材料上，完成对抗蚀剂材料的曝光，通过控制光束打在抗蚀剂材料上时间的长短从而控制曝光量，显影完成后，曝光量不同的位置会显现出高低差，从而实现了三维图形的制备。本章主要内容为对第三章设计的微结构光学膜进行加工制备，通过工艺参数的调整使得微结构形貌更加符合理论设计的结果，同时，对加工出的微结构光学膜的光学特性进行实际测试。

4.1 微结构光学膜的制备

第三章设计的微结构光学膜为具有不同高度信息的三维图形，微结构的总高度为 $15\mu\text{m}$ ，使用德国海德堡公司的 MLA100 型号无掩模光刻设备进行光刻加工，此光刻机的分辨率为 $1\mu\text{m}$ ，满足了加工需求，微结构的高度和形貌会对最终的结果产生较大的影响，因此需要对光刻材料与相应的工艺参数进行合适的选择。

4.1.1 光刻材料与性能参数确定

光刻胶分为正性胶与负性胶两种，两者的关键区别在于被曝光的区域是否会溶于显影溶液，正性胶被曝光的区域会溶于显影液，留下未曝光的区域，而负胶未曝光的区域才能溶于显影液，如果选用负性胶，曝光时顶部光刻胶会先接收曝光，显影过后表面部分光刻胶会发生交联反应全部被留下，就会形成一个平面，而未曝光区域会被全部去除，因此负性胶只适合于二维微结构的制备，对于本设计中的微结构光学膜不适用，故本次光刻选用 AZ4562 正性光刻胶作为曝光材料。对于基底材料，由于本次设计的微结构光学膜需要放置在 Mini-LED 背光中，观察其光学性能，因此基底材料需要选择为无色透明材料，而且光刻胶前烘过程需要升温到 95°C ，因此基底材料的耐热性要比较好，不能发生受热弯曲。背光中常用的基底材料主要有 PET、PMMA 和 PC 材料三种，其材料特性如表 4.1 所示。

表 4.1 三种材料的材料特性

Tab 4.1 The properties of three kinds material

材料	热变形温度 ($^\circ\text{C}$)	透光率 (%)	折射率	比重 (g/cm^3)	HRC 硬度	吸水率
PET	114	89	1.62	1.27	66	0.4

PMMA	90	92	1.49	1.19	95	0.4
PC	130	88	1.58	1.19	43	2

从表中可以看出 PC 材料的透光率最差，而 PMMA 材料虽然透光率最高，但是其耐热性较差，仅为 90℃，当前烘温度达到 95℃后，材料极易发生变形，因此，本次实验选用基底材料为 PET 材料。

4.1.2 光刻工艺流程

无掩模光刻流程与掩膜光刻类似，主要包括基片预处理、光刻胶旋涂、前烘、曝光和显影这几个步骤。具体的工艺参数如下：

(1) 基片预处理，目的是去除基片表面的灰尘杂质和自然氧化层等，保持表面的干净，如若不处理，则会影响到光刻胶在基片上的粘附性，在后续的工艺过程中产生脱落，并且杂质灰尘也会影响到后续光学测试。基片处理主要包括以下几个步骤：首先将基片浸没于丙酮溶液中，放置在超声清洗设备中超声震荡 5 分钟，再将基片浸没于乙醇溶液中超声震荡 5 分钟，去除掉基片表面的有机和无机杂质。最后将基片置于纯水中超声震荡 5 分钟，后取出并且用氮气枪吹干，置于无尘一次性培养皿中备用。

(2) 旋涂光刻胶，这是整个光刻工艺流程中极为重要的一环，光刻胶的厚度与均匀性会直接影响到图形的精度和分辨率。将处理好的基片放置于旋涂仪中吸附住，缓慢滴胶使其均匀流淌，然后静置 5 分钟后开始旋涂。旋涂的转速决定了胶层的厚度，转速越快，厚度越低。

(3) 前烘，将旋涂好的基片放置于热台上进行前烘，前烘的主要目的是蒸发光刻胶中的溶剂，增大光引发剂或光敏感剂在光刻胶中的比例，并且增加光刻胶在基片上的粘附力。前烘的温度与时间会对光刻胶的性能产生很大影响，温度过低且时间不足，则溶剂未挥发充分，光敏材料的比例就会降低，后期曝光时其精度就达不到要求，温度过高且时间过长，则胶层易发生断裂，且基片发生弯曲。本次实验选择从实验室温度缓慢升温到 60℃，保持加热 10 分钟，后缓慢升温至 95℃，继续加热 10 分钟，后取出等其自然冷却。

(4) 曝光，利用无掩模光刻设备进行曝光，这是光刻流程中最为关键的一步，直接决定了光刻图形的形貌。光刻时选用的曝光量对于最终的图形非常重要，曝光量过低时间短则会造成图形的高度不够，曝光量高且时间长则图形顶部也会接收到大量的光照，整个图形就会发生坍塌甚至糊掉。因此，选用合适曝光文件与光强显得至关重要。

(5) 显影，将曝光好的基片放置于特定的显影溶液中，其中未收到光照的部分不会发生反应，而曝光区域则会溶于显影液，且收到曝光量越大时间越长的

区域溶于显影液中光刻胶就越多。显影的时间也是影响图形质量的重要参数，显影时间过短则仍有光刻胶未被完全溶解，留下参与图案；显影时间过长，则本不应该溶于显影液的光刻胶也会发生部分溶解，造成图形残缺。显影约 5 分钟后观察其基本没有光刻胶溶于显影液后就将其取出，用纯水微微冲洗，去除表面残留显影液，然后用氮气枪吹干。

4.2 光刻工艺优化

4.2.1 旋涂工艺优化

如上文提及，旋涂工艺会对图形产生很大影响，旋涂的转速与光刻胶的厚度成反比，并且较低的转速会影响到胶层表面的平整度与均匀性。本设计中微结构的高度达到 $15\mu\text{m}$ ，那么旋涂的光刻胶厚度需要略微高于这个值，保留一定的预留层，产品说明书中旋涂厚度与转速的关系如下表 4.2 所示。

表 4.2 AZ4562 光刻胶厚度与旋涂转速关系

Tab 4.2 AZ4562 resist spin speed vs. thickness

转速 (rpm)	1000	2000	3000	4000	5000	6000
厚度 (μm)	12.23	8.77	7.16	6.20	5.55	5.06

从表中可以看出，转速为 1000rpm 时，最大厚度只有 $12.23\mu\text{m}$ ，由于实际所需的光刻胶厚度要达到 $15\mu\text{m}$ 以上，需要降低转速来获得更大的厚度，为了找到最佳的旋涂转速，通过选取一系列的转速进行试验以获得理想转速值，将转速从 300rpm 到 900rpm 进行变化，并且都以 104rpm/s 的加速度加速到最大转速后保持旋转 30s，然后继续以 104rpm/s 的加速度减速到 0。使用德国 Carl Zeiss 公司的 LSM700 共聚焦显微镜（如图 4.3 所示）对旋涂后的光刻胶厚度进行测试，得到甩胶厚度与转速之间的关系如图 4.1 所示。

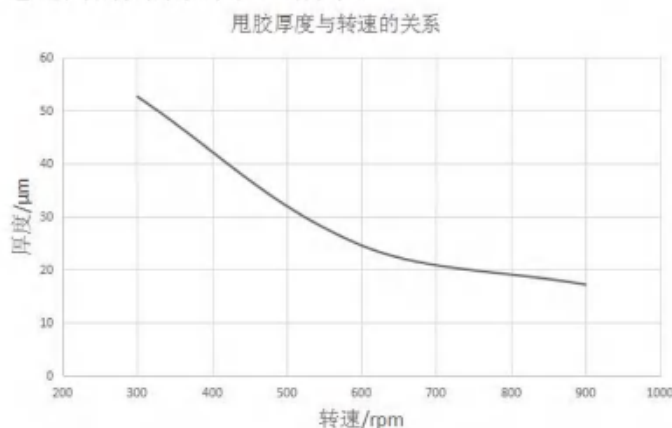


图 4.1 胶厚度与转速的关系

Fig 4.1 The relationship between spin speed and thickness

由图 4.1 可知, 为了达到较高的均匀性, 并且预留一定的胶层厚度, 旋涂转速选用 700rpm 最为合适。

4.2.2 曝光参数优化

常用的光刻机曝光文件有两种格式, 第一种是通过 SolidWorks 软件进行建模, 然后保存为 STL 文件格式就可以导入到光刻机电脑中进行识别加工, 第二种是通过计算软件直接计算每 $500\text{nm}\times 500\text{nm}$ 作为一个像素点的灰度值, 然后生成 BMP 格式文件导入光刻设备即可, 其灰度信息以灰色深浅进行呈现, 光刻设备可识别的灰阶数为 128 个, 那么只需要将微结构的高度信息转换为 128 个灰阶信息, 每一个像素点对应一个光刻单位则可以完成三维图形的加工。相比较而言, 第一种情况建模简单, 导入光刻设备以后更加方便修改, 但是光刻机识别的 STL 文件有尺寸限制, 单个曝光文件大小不得超过 $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 而第二种方法计算稍微复杂, 但是其尺寸没有限制, 本次设计的微结构光学膜单个微结构尺寸为 $2.5\text{mm}\times 2.5\text{mm}$, 其尺寸大大超过了 STL 文件的限制, 因此采用第二种方法, 生成的 BMP 灰度图如图 4.2 所示。

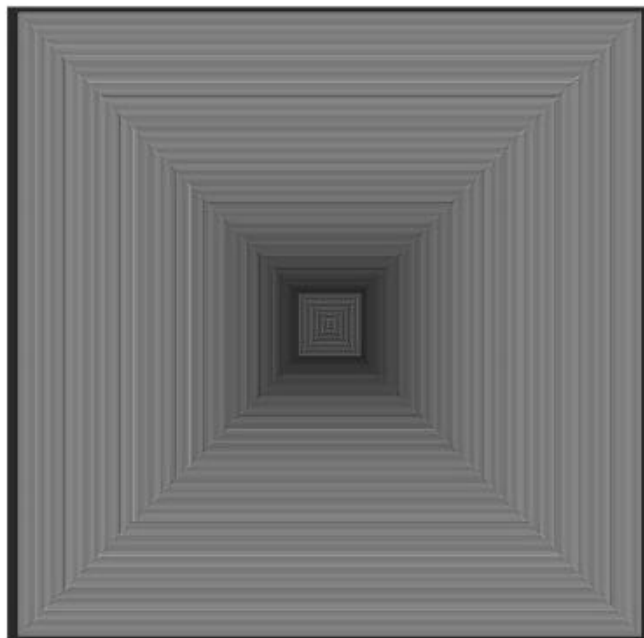


图 4.2 微结构光学膜的 BMP 图

Fig 4.2 BMP file of microstructure film

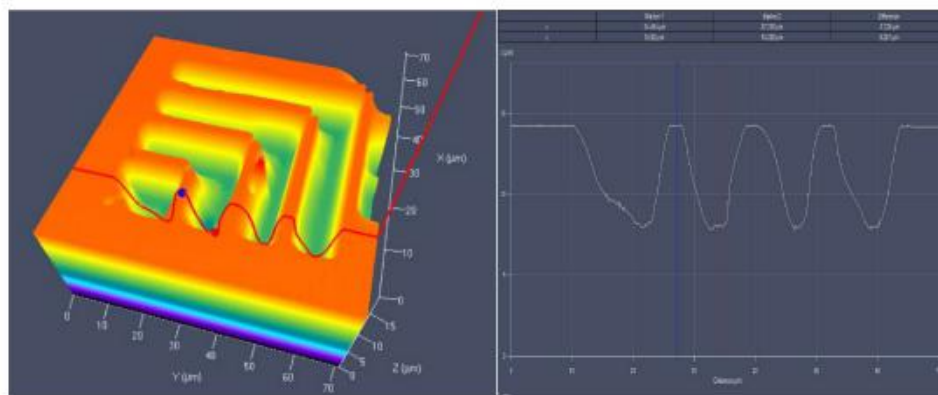
将 BMP 格式文件导入光刻机以后进行阵列加工, 为了寻找最合适的曝光值, 分别选择了光强从 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 到 $600\text{mJ}/\text{cm}^2$, 每隔 $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ 进行增加, 一共 7 组对样品进行曝光, 探究微结构最大高度与光强之间的关系, 经过完整的光刻流程后得到 7 组样片。利用共聚焦显微镜对 7 组样片的微结构形貌进行测试, 测试结

果如图 4.4 所示。

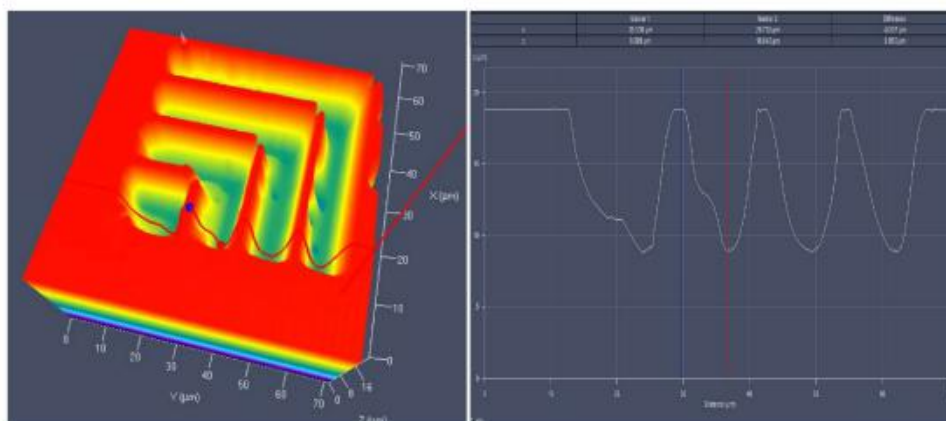


图 4.3 共聚焦显微镜 LSM700

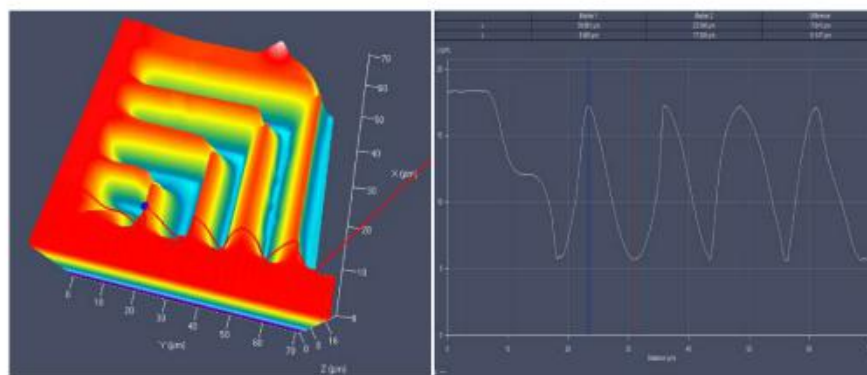
Fig 4.3 Laser confocal microscope LSM700



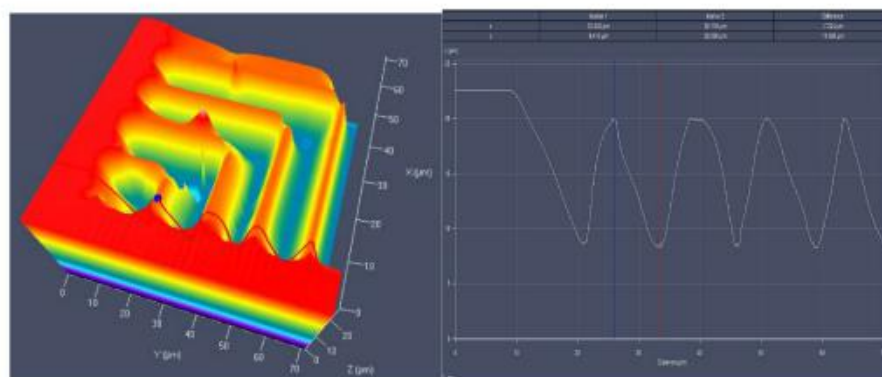
(a) 光强 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$



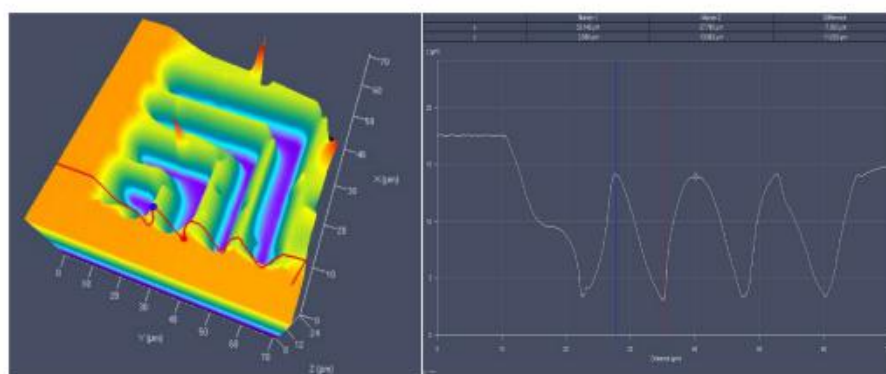
(b) 光强 $350\text{mJ}/\text{cm}^2$



(c) 光强 $400\text{mJ}/\text{cm}^2$



(d) 光强 $450\text{mJ}/\text{cm}^2$



(e) 光强 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$

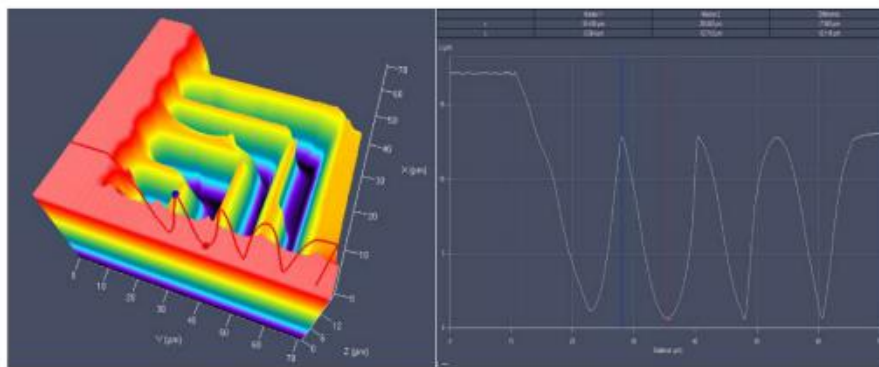
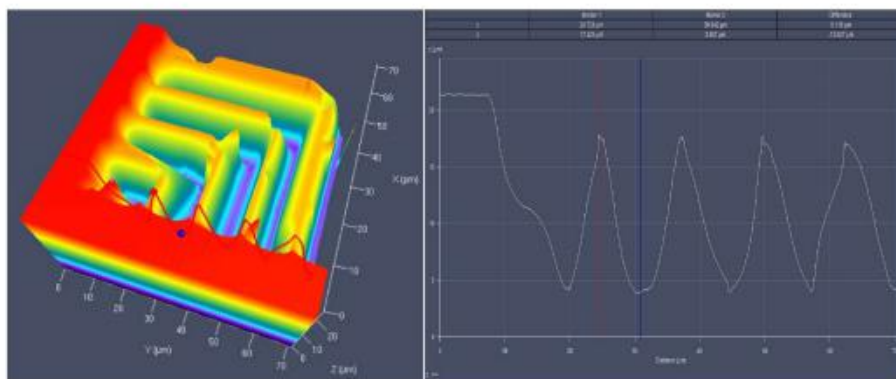
(f) 光强 $550\text{mJ}/\text{cm}^2$ (g) 光强 $600\text{mJ}/\text{cm}^2$

图 4.4 不同曝光光强下的微结构最大高度

Fig 4.4 The maximum height of microstructure of different exposure intensity

微结构高度与光强的变化关系如图 4.5 所示,可以看出随着曝光能量的增加,微结构高度呈现先增加后减小的趋势,出现这种趋势的原因是:开始时曝光能量增加,光刻胶中发生光化学反应后溶于显影液的感光剂随之增加,光刻图案就越深,高度也就越来越大,而随着曝光能量的进一步增加,光刻图案顶部接收能量较少的地方和不需要曝光的地方却受到了较大能量的曝光,产生了较多的感光剂,变得易溶于显影液,因此顶部微结构出现了坍塌,造成微结构高度不够,根据图 4.5 可以看出,当曝光能量为 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,微结构最大高度可以达到 $15.003\mu\text{m}$,比较符合设计的图形高度,因此可以确定最佳曝光光强为 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

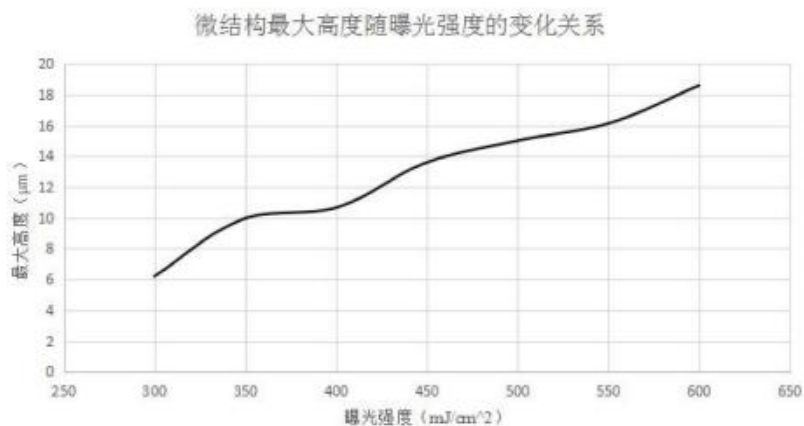


图 4.5 微结构高度与曝光能量的关系

Fig 4.5 The relationship between the height of microstructure and exposure intensity

选用最佳工艺参数对微结构母版进行加工制备，旋涂转速为 650rpm，经过前烘以后利用 MLA100 设备进行曝光，曝光能量为 500mJ/cm²，制备完成的微结构光学膜母版如图 4.6 所示。

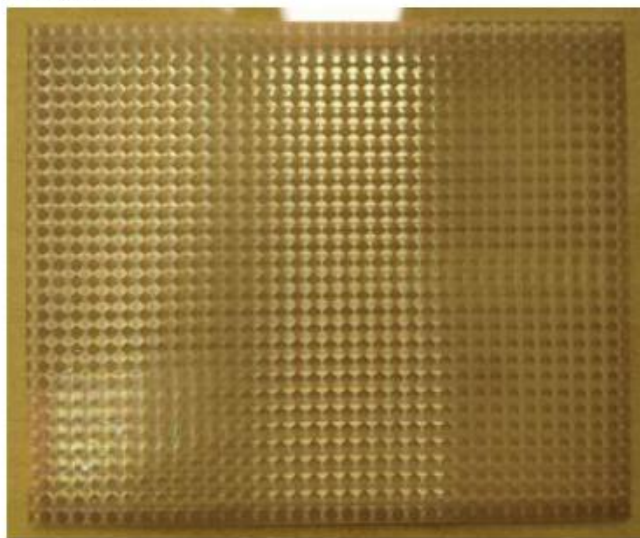


图 4.6 高亮微结构光学膜母版

Fig 4.6 The master of highlighting microstructure optical film

利用紫外压印技术对母版上的图案进行翻印，将图案转印到无色树脂材料上，转印后的微结构光学膜如图 4.7 所示，

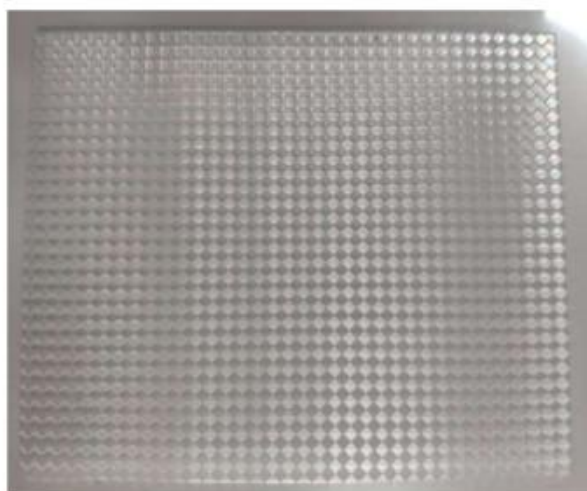


图 4.7 紫外压印后的微结构光学膜

Fig 4.7 Microstructure optical film after ultraviolet imprint

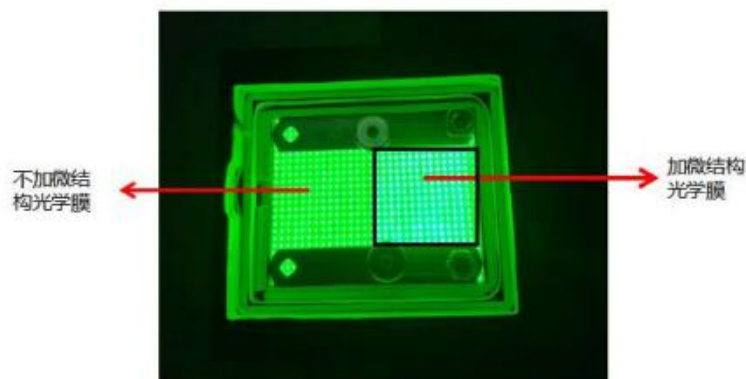
4.3 样品测试及分析

将制备好的微结构光学膜放置于 Mini-LED 背光模组中,使用日本 TOPCON 公司的亮度色度计 BM-7A (如图 4.8 所示)对其亮度进行测试,点亮背光模组时,电压设定为 18.65V,电流设定为 50mA。为了对比加微结构光学膜前后的背光显示效果,微结构将 Mini-LED 背光中的部分面积进行覆盖,为了保证其均匀性,实际使用时再放置一层扩散膜,效果如图 4.9 所示。对只加扩散膜、加两层棱镜膜与扩散膜和加微结构光学膜与扩散膜三种情况的轴向视角亮度进行了测试,结果如表 4.3 所示。

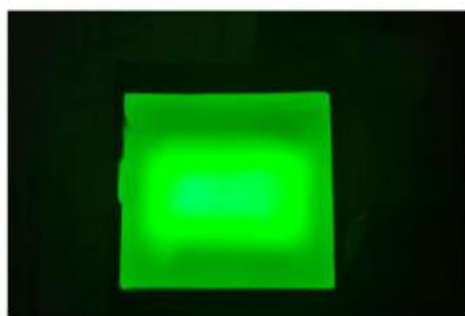


图 4.8 亮度色度计 BM-7A

Fig 4.8 Luminance chroma meter BM-7A



(a) MiniLED 背光+部分微结构光学膜



(b) MiniLED 背光+微结构光学膜+扩散膜

图 4.9 微结构光学膜亮度测试

Fig 4.9 Luminance test of optical film with microstructure

表 4.3 三种情况下的亮度测试结果

Tab 4.3 Luminance test results under three circumstance

Case	MiniLED 背光+扩散膜	MiniLED 背光+双层棱镜膜+扩散膜	MiniLED 背光+微结构光学膜+扩散膜
轴向视角亮度 (nit)	1.428×10^4	1.682×10^4	2.064×10^4

从测试结果可以看出, 相对于只加扩散膜的情况, 加双层棱镜膜和扩散膜后轴向视角亮度从 $1.428 \times 10^4 \text{ nit}$ 提高到了 $1.682 \times 10^4 \text{ nit}$, 亮度提升了 17.8%, 而加微结构光学膜和扩散膜后轴向视角亮度提高到了 $2.064 \times 10^4 \text{ nit}$, 亮度提升了 44.5%, 在 Mini-LED 背光模组里, 其亮度提升效果比双层棱镜膜提高了 22.7%。与第三章中仿真效果基本吻合, 些许的衰减是由于实际制备的微结构光学膜与理论设计形貌上仍然存在不可避免的误差, 且树脂材料折射率与理论有偏差也会造成其亮度提升效果衰减, 并且压印后的样片存在些许弯曲, 对于对位产生了误差。

接着测试三种情况下的均匀性, 采用国军标 9 点亮度测试法, 如图 4.10 所

示,测得的 9 点亮度结果如表 4.4 所示,其中,非均匀性 p_1 计算公式如下:

$$P_1 = \frac{Max(L_i) - Min(L_i)}{Max(L_i) + Min(L_i)} \times 100\% \quad (i=1,2,3...9) \quad (4.1)$$

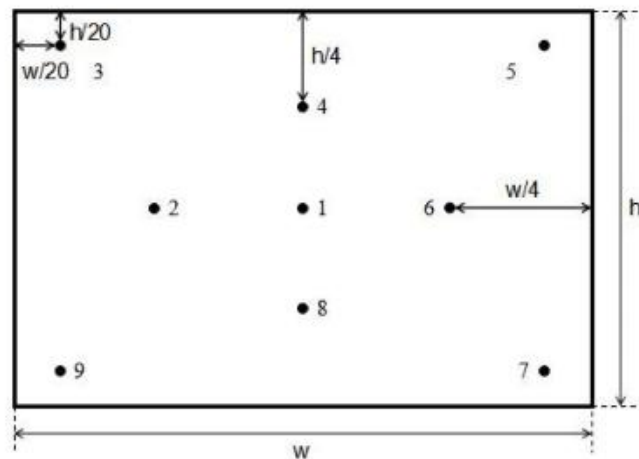


图 4.10 九点亮度测试示意图

Fig 4.10 Specific Locations of the nine test points

表 4.4 九点亮度测试结果

Tab 4.4 Luminance test results of 9 points

位置	Mini-LED 背光+扩散膜 (nit)	Mini-LED 背光+双层棱镜膜+扩散膜 (nit)	Mini-LED 背光+微结构光学膜+扩散膜 (nit)
1	10761	13120	18440
2	13430	16080	19090
3	14800	18100	16730
4	12470	13990	23310
5	14250	17550	22070
6	15060	18320	20430
7	13770	16280	21530
8	14800	18050	23310
9	15210	17920	21880
平均亮度	13839	16601	20487
非均匀性	17.13%	16.54%	16.43%

经过测试可知,加上微结构光学膜和扩散膜以后,其非均匀性降低到 16.43%,微结构光学膜在提升轴向视角亮度的同时,提高了均匀性,满足观看需求。

4.4 本章小结

本章主要对第三章仿真设计的微结构光学膜进行制备与实际测试。第1节主要对光刻制备所需的基底材料及光刻胶型号进行了选择,并且对光刻主要流程进行了介绍,详细说明了每一个步骤的作用及可能产生的误差会造成的影响;第2节对灰度光刻加工过程中会产生较大影响的参数进行选择优化,以确定能够制备出比较符合理论设计微结构形貌的最佳工艺参数;第3节对光刻加工并紫外压印后的微结构光学膜的光学性能进行了测试,与传统的双层棱镜膜的效果进行了对比,验证了微结构光学膜的效果满足设计需求。

第五章 总结与展望

5.1 全文总结

目前显示模块向着亮度越来越高、越来越轻薄化的趋势发展,本文选用了在厚度上极具优势的新型背光 Mini-LED 背光作为背光源,由于 Mini-LED 背光的视角较大,轴向视角亮度不高,而传统的两层棱镜膜对于 Mini-LED 背光的增亮效果不明显,本文利用非成像光学理论对 Mini-LED 背光模组进行了二次光学设计,提出了一种针对扩展光源进行计算的方法,得到一种可以提高 Mini-LED 背光轴向视角亮度的微结构光学膜,对该微结构光学膜进行了建模仿真验证其效果。最后通过光刻加工制作了微结构光学膜的样片,对样片的形貌及光学性能进行了测试。实际测试结果表明:本文提出的微结构光学膜的设计方法,能有效的提高 Mini-LED 背光模组的轴向视角亮度。

本文的主要工作内容包括:

(1) 介绍了现有针对液晶背光模块的厚度减薄设计和提高亮度的方法与国内外研究现状,并且介绍了针对 LED 的二次光学设计方法,对这些方法进行了比较分析,并在后文中对其中一种方法进行了优化改进。

(2) 提出了三种微结构光学膜的设计方法,第一种是基于棱镜膜的工作原理,在一张薄膜上制作金字塔微结构,实现两个方向上的视角收缩;第二种是对同步多表面方法进行了改进和优化,设计一种双自由曲面微结构;第三种是针对扩展光源,基于非成像光学和边缘光线理论设计了实现视角收缩的微结构光学膜。分别单个微结构及其微结构阵列进行了仿真分析,验证了方法是否可行。

(3) 根据设计结果,采用无掩模光刻设备制备出了微结构光学膜样片,对光刻工艺进行了优化,选择了最佳的工艺参数。利用紫外压印技术对样片进行了翻印,使图案转移到无色树脂材料上,去除了正性光刻胶带有颜色对特定波长光产生吸收的影响。

(4) 对微结构光学膜的形貌及光学性能进行测试,将实际测试结果和仿真结果进行比较,验证了方法的可行性。

本文的创新点有如下几点:

(1) 提出了针对扩展光源的表面微结构设计方法,利用该方法实现了扩展光源的视角收缩以提升轴向视角亮度,并且针对 Mini-LED 背光设计了微结构面型,验证了方法的可行性。

(2) 优化了 Mini-LED 亮度增强光学膜的制备工艺,制备出了符合设计要求的光学膜样片,对该光学膜样片进行实际测试,证明了光学膜满足设计要求。

5.2 研究展望

随着液晶显示技术的不断发展,人们对于平板显示要求也越来越高,高亮度、轻薄化成为显示器发展的重要指标,Mini-LED背光以其独特的优势必将在未来的平板显示市场中大放光彩,故而对于Mini-LED背光模块的光学设计也变得越来越重要。本文针对于此进行了高亮微结构光学膜的设计,成功地提升了轴向视角亮度,替代了两层棱镜膜,提高光效同时降低了成本,但是仍然存在值得继续深入研究的地方:

(1) 本文中利用边缘光线理论对Mini-LED芯片作为扩展光源进行了二次光学设计,虽然其视角被收缩到了轴向方向附近,但不同于SMS方法,其所有光线的角度并没有完全得到控制,该算法还有完善改进的空间。

(2) 该方法只是在二维平面上对光线调制进行设计,并没有推广到三维空间情况下,未来可以通过取三维空间上扩展光源的四个端点计算空间角进行三维微结构形貌的计算,使之更加精确。

(3) 通过无掩模光刻设备对微结构光学膜进行了实际制备,但加工出的微结构形貌和理论设计仍然存在误差,需要继续摸索光刻工艺进行调整,通过光刻结果进行反向补偿重新设计微结构可以得到更加精确的三维形貌微结构。

参考文献

- [1] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 王安祥, 张伟光, 郎凤超, 杨连祥. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11 (5): 695-710.
- [2] 陈曦, 郭英男, 李论. 平板显示产业发展新动能[J]. 现代电信科技, 2016, 46 (2): 1-7.
- [3] 姜子杰. 平板显示技术现状和发展前景[J]. 科技风, 2015 (10): 223-223.
- [4] 顾一鸣. 浅谈平板显示技术现状和发展趋势[J]. 电子世界, 2016 (13): 17-17.
- [5] 张芳. 我国平板显示技术现状及发展趋势[J]. 中国科技财富, 2012.
- [6] 丁沐沂, 李驰. 平板显示技术的现状与展望[J]. 计算机工程应用技术, 2010, 6 (34): 9854-9856.
- [7] 高鸿锦, 董友梅. 液晶与平板显示技术[M]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [8] 刘芬. 液晶电视 LED 背光侧出式区域调光算法研究[D]. 合肥工业大学, 2015.
- [9] Anandan M. Progress of LED backlights for LCDs[J]. Journal of the Society for information Display, 2008, 16(2): 287-310.
- [10] 李其功. 液晶像源 LED 背光的高亮薄型化研究[D]. 合肥工业大学, 2018.
- [11] 曹保柱. 基于 LCD 的集成成像立体显示技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [12] 龚占双. OLED 显示技术及应用实践之研究[J]. 军民两用技术与产品, 2018, 8: 52-52.
- [13] 徐海燕. 浅谈 OLED 显示技术及其应用[J]. 环球市场, 2017, 20.
- [14] Choi K J, Lee J Y, Shin D K. Investigation on slot-die coating of hybrid material structure for OLED lightings[J]. Journal of Physics & Chemistry of Solids, 2016, 95: 119-128.
- [15] 马东阁. OLED 显示与照明——从基础研究到未来的应用[J]. 液晶与显示, 2016, 31(3): 229-241.
- [16] 马航. 基于量子点的电致发光器件关键技术研究[D]. 北京交通大学, 2017.
- [17] 陈雯柏, 马航, 叶继兴, 李邓化. 量子点发光二极管的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54 (11): 28-40.
- [18] Pan J, Quan L N, Zhao Y B. High Efficient Perovskite-Quantum-Dot Light-Emitting Diodes by Surface Engineering[J]. Advanced Materials, 2016, 28(39): 8718-8725.
- [19] Kong Y L, Tamargo I A, Kim H. 3D Printed Quantum Dot Light-Emitting Diodes[J]. NANO LETTERS, 2014, 14(12): 7017-7023.
- [20] 前瞻产业研究院. 照明产业转型升级及 LED 行业发展趋势预测[J]. 电器工业, 2019 (3): 9-13.
- [21] 吴诗聪. Mini-LED: 助力下一轮 LCD 技术发展[J]. 光电子技术, 2018, 38 (3): 145-148.
- [22] Wu T Z, Sher C W, Lin Y. Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next

- Generation Display Technology[J], Applied Sciences-Basel, 2018, 8(9): 1557-1573.
- [23] Feng X, Sun X, Zhang Q. Development Trend of LCD Technology[J] SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 46(S1): 207-211.
- [24] Tan G J, Huang Y G, Li M C. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight[J], Optics Express, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [25] Feng D, Jin G F, Yan Y B, Fan S S. High quality light guide plates that can control the illumination angle based on microprism structures[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(24): 6016-6018.
- [26] Chien C H, Chen Z P. Fabrication of a novel integrated light guiding plate by micro electro mechanical systems technique for backlight system[C]. SPIE, 2006.
- [27] 徐平, 黄燕燕, 张旭琳, 黄洁锋, 李贝贝, 叶恩, 段守富, 苏志杰.集成导光板研制[J]. 深圳大学学报(理工版), 2013(4): 428-431.
- [28] 李德君, 刘刚, 吕国强, 方旭东, 冯奇斌.直下式 LED 背光模组的超薄设计[J].液晶与显示, 2014, 29(6): 1101-1105.
- [29] Li C Y, Pan J W. High-efficiency backlight module with two guiding modes[J]. Applied Optics, 2014, 53(8): 1503-1511.
- [30] Lee J H, Lee H S, Lee B K, Simple liquid crystal display backlight unit comprising only a single-sheet micropatterned polydimethylsiloxane(PDMS) light-guide plate[J]. Optics Letters, 2007,32(18): 2665-2667.
- [31] Tagaya A, Nagai M, Koike Y, Yokoyama K. Thin liquid-crystal display backlight system with highly scattering optical transmission polymers[J]. Applied Optics, 2001, 40(34): 6274-6280.
- [32] Okumura T, Tagaya A, Koike Y, Horiguchi M, Suzuki H. High-Efficiency Backlight for Liquid Crystal Display Having no Optical Films[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2004, 418(1): 299-313.
- [33] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces[J]. Journal of the Optical Society of America, 2002, 19(3): 590-595.
- [34] Ries H, Muschaweck J. Tailoring freeform lenses for illumination[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4442: 43-50.
- [35] Parkyn B, Pelka D. Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2006, 6338: 633808-633808-7.
- [36] 李敏, 沈为民, 黄杰, 王乐, 王少雷, 贺志华, 佟飞.基于 SMS 法的大功率 COB 光源窄光束设计[J].光电工程, 2014, 41(10): 49-54.

- [37] 梁雪.LED(准直)光源的SMS非成像光学设计方法[D].浙江工业大学, 2013.
- [38] 梁雪, 王赛, 庞宇峰.自由配光设计中的复合抛物面三维同步多表面方法[J].照明工程学报, 2015, 26(2): 83-88.
- [39] 刘莎, 王丹, 杨照坤, 冯翔, 孙晓, 邱云, 董学.TFT-LCD技术发展趋势浅析[J].液晶与显示, 2018, 33(6): 1007-2780.
- [40] 李联益.TFT-LCD显示技术与应用[J].韶关学院学报, 2012, 33(4): 46-49.
- [41] 俞伟华.TFT-LCD液晶显示技术及其应用[J].自动化仪表, 2001, 22(12): 25-28.
- [42] 尹慧娟.液晶显示特定指向视角技术研究[D].合肥工业大学, 2017.
- [43] 桂诗信, 袁焯, 李正荣, 杨新军, 张青.不同光学膜组合对TFT-LCD显示性能影响的研究[J].光电子技术, 2018(4): 271-273.
- [44] Feng Q B, Li Q G, Wang Y, Lv G Q. The design and optimization of lens array for LED backlight in LCD imagine engine of helmet-mounted display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2017, 25(5): 312-319.
- [45] 庞晓峰.导光板网点设计与优化[J].电子科技, 2015(11): 65-68.
- [46] 胡金刚.LCD背光模组用新型抗老化光扩散膜的设计、制备及性能研究[D].东南大学, 2015.
- [47] 吴美瑞.集光型增亮微结构专利技术综述[J].中国科技信息, 2018(15): 21-23.
- [48] 陈玲玲.光学增亮膜技术综述[J].价值工程, 2015, 34(30): 123-125.
- [49] 季振强, 董连和, 王丽, 吴博琦, 尹航.背光模组LED侧照明微棱镜膜的研究[J].液晶与显示, 2014(4): 533-537.
- [50] 李亚明, 张飞.光刻技术的发展[J].电子世界, 2014(24): 464-465.
- [51] 张鹏.浅谈半导体光刻技术的发展趋势[J].工程技术(全文版), 2016(8): 255.
- [52] Berthou T. High-power Laser Interference Lithography Process On Photoresist: Effect Of Laser Fluence And Polarisation[J]. Applied Surface Science, 2009, 25(10): 0169-4332.
- [53] 冯伯儒, 张锦, 侯德胜, 陈芬.微光刻技术的发展[J].微细加工技术, 2000(1): 1-9.
- [54] 彭祎帆, 袁波, 曹向群.光刻机技术现状及发展趋势[J].光学仪器, 2010, 32(4): 80-85.
- [55] 段晨, 宗明成, 范伟, 孟璐璐.浸没式光刻机对焦控制技术研究[J].光学学报, 2018, 38(9): 195-200.
- [56] 阮晓鹏.自由曲面灰度掩膜设计及微针工艺研究[D].大连理工大学, 2014.
- [57] 周静, 阳泽健, 高福华, 杜惊雷.利用灰度掩膜光刻技术制备螺旋相位片[J].四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(5): 1107-1112.
- [58] 张恒煦.基于DMD无掩模光刻质量控制研究[D].长春理工大学, 2016.
- [59] 黄胜洲.基于DMD无掩模光刻技术及其微透镜快速成型方法的研究[D].中国科学技术大学, 2017.

攻读硕士学位期间的学术活动及成果情况

1) 参加的学术交流与科研项目

- (1) 大尺寸超高清液晶面板产品开发项目，安徽省科技重大专项计划项目（项目编号：17030901053），2016 年至今。
- (2) 超薄超高亮 Mini-LED 背光产品研发及产业化，安徽省科技重大专项计划项目（项目编号：18030901002），2018 年至今。

2) 发表的学术论文（含专利和软件著作权）

- (1) 汪勇, 冯奇斌, 郭敏, 王梓, 吕国强.用于 MiniLED 背光模组的亮度增强薄膜设计与制备[J].应用光学. (已录用)
- (2) Feng Qibin, Li Qigong, Wang Yong, Lv Guoqiang. The design and optimization of lens array for LED backlight in LCD imagine engine of helmet-mounted display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2017, 25(5): 312-319. (SCI, EI 收录)

厚德 笃学 崇实 尚新