

用于迷你LED背光的双折射光片

子谦和学生会员¹
员¹

 | 坤音SID学生会员¹ | 恩林祥学生委
| 李明春² |

Seok-Lyul Lee SID研究员² | 坤正天²

| 吴信生同学¹



¹光学和光子学学院, 中佛罗里达大学, 奥
兰多, 佛罗里达州, 美国

²澳光电子公司, 新竹, 台湾

信件

奥兰多中佛罗里达大学光学和光子学学
院, fl, 美
国。 电子邮件: swu@creol.ucf.edu

供资信息

a. 美国Vista公司。

摘要

提出了用于小型LED背光液晶显示器(LCD)的双折射光型薄膜(BLSFs), 并通过被动聚合物分散液晶(PDLC)薄膜进行了实验演示。这种薄膜表现出角度选择性散射特性, 这是通过适当的材料工程和良好的液晶垂直排列来实现的。它们只对角度而不是空间位置作出反应。通过直接将BLSF附着在LED上, 光的角强度分布可以从朗伯天状调整为棒状。进一步的仿真证明, 通过对角分布进行工程化, 需要较少数量的LED或相当短的光传播距离来保持良好的均匀性。这些BLSF有望在新兴的微型LED背光液晶显示器中得到广泛的应用, 并为未来设计其他光整形薄膜提供了线索。

关键词

角度选择性散射, 双折射光膜, 迷你LED背光, 聚合物分散液晶

1 | 引言

与有机发光二极管(OLED)显示器和微发光二极管(Micro-LED)显示器等自发射显示器相比, 传统的液晶显示器(LCD)在提供真正的黑色状态方面存在不足, 因此动态范围有限。为了与这些发射显示器竞争, 满足高动态范围的迫切需要, 迷你LED背光液晶显示器正在出现。^{1,2} 通过将背光划分为许多单独可调光的迷你LED区域, 可以实现超大的对比度和超过10位的颜色。³ 然而, 在这种方法中, 需要大量的微型LED, 导致成本大大增加, 因为不完善的传质产量和有限的缺陷映射和修复速度的微型LED芯片。此外, 对于智能手机来说, 直射背光仍然太厚。⁴ 进一步增加

微型LED的数量可以有效地降低背光厚度, 但会导致更高的成本。或者, 裁剪从微型LED发射的光的角度分布, 以便光可以在较短的传播距离内更快地传播, 在那里通常需要复杂的表面微结构。^{5,6}

在此, 我们提出并演示了一种用于微型LED背光液晶显示器的双折射光整形膜(BLSF)。所提出的BLSF是体积型的, 因此可以避免复杂的表面微结构。在实验中, 这种BLSF是通过聚合物分散液晶(PDLCs)来实现的。通过选择合适的液晶(LCS)和聚合物的折射率, 并提供足够强的垂直锚定在LC液滴上, 可以制备具有角度选择性散射特性的无源PDLC薄膜。这种PDLC薄膜可以有效地分散

通常入射光和增加透明度在一系列斜入射角，功能为 α

巴斯夫。这样的BLSF只响应入射光

在不同的角度，但在不同的空间位置。

通过将BLSF直接层压到LED上，输出光的角强度分布可以从朗伯天状设计为棒状。进一步的仿真表明，在BLSF的帮助下，在固定的传播距离下，需要更少的LED来保持高均匀性。

2 | 工作机制

为了更快地传播从微型LED发出的光，BLSF应该以正常的角度将光重新分配成大角度。这种与角度相关的光散射特性可以通过包含至少一个双折射材料的复合材料系统来实现。这里，以PDLC为例。

在传统的散射型PDLCs中，LC分子通过相分离形成微米大小的液滴分散在聚合物基体中。⁷ 在每个液滴中，LCS在一定方向上对齐，以最小化自由能。然而，不同液滴之间的对准方向是随机的，这将在宏观上引起光散射。匹配LCS的普通折射率(n_o 聚合物的折射率(N_o 当施加足够的电压使所有液滴沿垂直方向对齐时(假设主机LC具有正的介电各向异性)，有源PDLC薄膜可以被切换为透明的)。⁸ 在电压导通状态下，选择性光散射可以是观察到，正常发病率显示在较大的斜入射角下，透射率和散射变得更强。^{9,10} 利用选择性捕集特性对OLED中的导波模式进行了解耦，并通过用反应性中间原固化PDLC前驱体可以实现一些垂直排列的无源PDLC薄膜 还有在强电下 领域。¹¹

在我们的情况下，所需的角散射特性被逆转，其中正常入射显示低透射率，并且在斜入射角范围内散射变弱。在这里，对齐LC液滴在垂直方向仍然是需要的。然而，聚合物的折射率被选择为不同的

LCS(N)的普通折射率 n_o 但匹配
所用LC在某一斜入射角 α (N)下的有效折射率 $n_p = n_{\text{伊美}}$ ，在哪里 $n_{\text{伊美}}$ 可以是卡尔-使用 n_{oe} 的非凡折射率 $1c$ ，还有 α 作为¹²

$$n = \frac{n_p}{n_o} = \frac{n_p}{n_o} \cos^2 \alpha + n_{oe}^2 \sin^2 \alpha$$

如图1所示，由于折射率失配，正常入射光(沿 z 方向)与偏振无关。在斜入射时，薄膜表现出偏振依赖性。理想情况下， p 偏振光看到 n_p 聚合物和 $n_{\text{伊美}}$ 液晶液滴(图1A)。作为的入射角增大，折射率失配，从而散射先减小， α 达到最小，然后再增大。另一方面，极化光看见了 n_o 的聚合物还有 n_o 的 $1c$ 液滴无论在什么入射角(图1B)。因此，由于聚合物内部光路长度的增加，它在斜入射时更加分散矩阵。这个原则适用去不是只是的 xz 平面，也是 yz 平面。如果LC液滴的对准不够好， s 极化的角选择性的损失可以抵消 p 极化的增益。因此，实现了LC的良好垂直对准液滴为了例如被动的电影是至关重要。

值得一提的是，3M已经通过实验证明了一种不同的角度依赖的双折射扩散器，该扩散器使用聚合物微珠-聚合物体系，其中聚合物微珠是各向同性的，聚合物基体是各向异性的。¹³ 通过在高温下拉伸复合材料，聚合物基体的光轴可以沿拉伸方向(例如 v 轴)对齐。而聚合物微珠则保持各向同性。这种复合

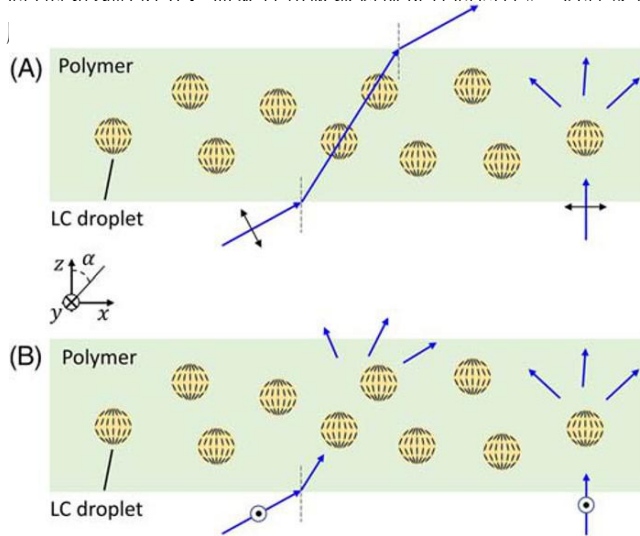


图1 在所提出的BLSF上入射(A)p极化和(B)s极化光束时工作原理的示意图

在YZ飞机上。在xz和yz平面上的不对称角特性阻碍了薄膜在液晶背光中的应用。此外，实验中实现的角选择性有点弱。因此，它仍然需要改进，以便应用于实际的微型LED背光系统。

3 | 样品制作和表征

为了实验证明所提出的BLSF的有效性，采用薄的垂直对准(VA)单元制备了PDLC薄膜。表面锚定层可以向表面附近的LC液滴提供良好的对准，减小液滴尺寸，缩小液滴尺寸分布。^{14,15} 在实验中，开发了一种PDLC前驱体混合物，由49.21重量%的ZLI-2144(Merck; 双折射 $\Delta n=0.19$)、4.90重量%的RM82(反应中间原)和45.89重量%的NOA60(含n的预 $p=1.56$)。后存在注射进入a 5- μm va 细胞，的将PDLC前驱体在紫外光照射下，辐照度为 $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 持续40分钟，无论是否施加 $4\text{V}/\mu\text{m}$ 电场。来表征它

选择性散射特性，将无源PDLC固定在旋转级上，设置为充满指数匹配油的圆柱形玻璃容器的中心。入射光(来自450nm激光二极管)在初始状态下垂直于PDLC，然后通过旋转PDLC来调整入射角。透射率归一化为不存在PDLC的情况，探测器的采集角度为 2.4° 。这里，角范围为 90° 在空气中测量。测量结果如图2所示。在没有电压的情况下固化的 $5\mu\text{m}$ PDLC(图2A中的蓝线)显示了一些与角度相关的透射率，表明表面锚定可以在一定程度上对齐LC液滴。然而，与 $4\text{V}/\mu\text{m}$ 固化的 $5\mu\text{m}$ PDLC细胞(图2A中的橙色线)相比，这种角度选择性要弱得多。也就是说，在表面锚定和电场的帮助下，可以得到几乎完全对齐的PDLC。

除了透射率测量外，还可以直观地观察PDLC的角度相关散射特性。如图3所示，PDLC薄膜(BLSF)被放置在摄像机和显示器之间。从显示器出来的光沿z轴线偏振。在正常的角度

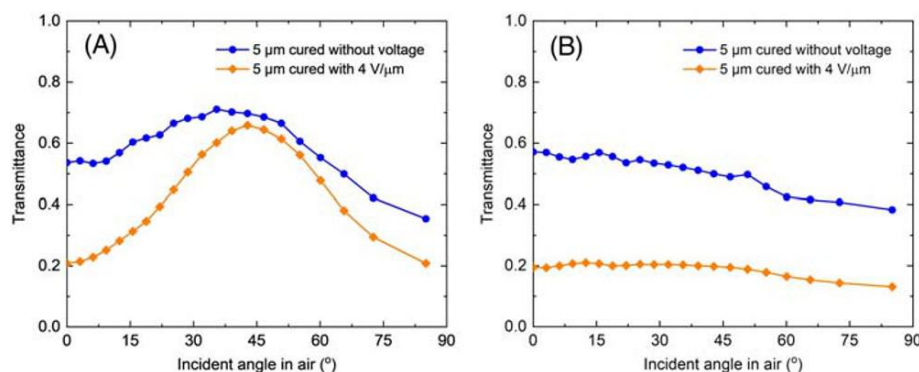


图2 玻璃中(A)极化和(B)s极化输入光的角度相关透射率测量

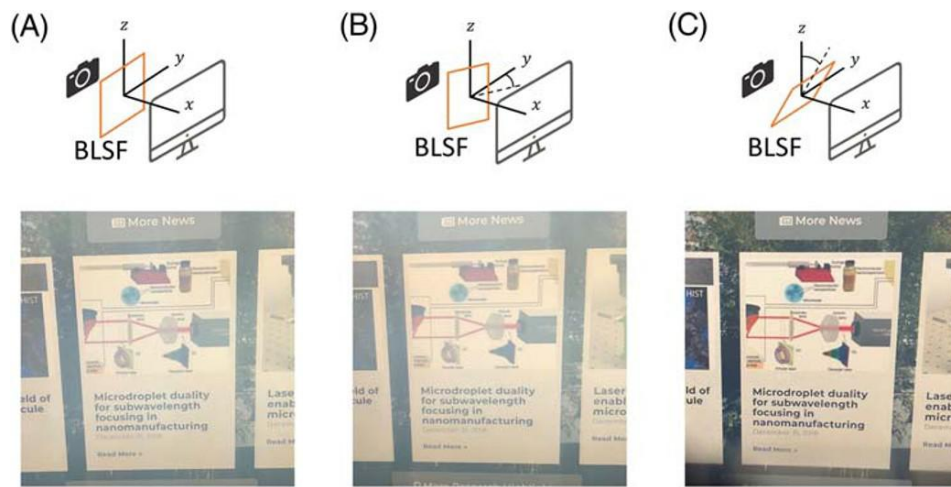


图3BLSF的视觉效果，其中BLSF是(A)在YZ平面上，(B)沿z轴旋转，和(C)沿y轴旋转。显示器沿z轴发出线

BLSF位于YZ平面(图3A), 捕获的图像是模糊的。沿着z轴旋转BLSF(图3B)会导致一个均匀的模糊图像, 因为偏振光总是散射的。然而, 沿着y轴旋转BLSF(图3C)可以大大减少雾霾。

为了表征LC液滴尺寸, 在图4中捕获并显示了偏光显微镜(POM)图像。液滴的大小为几微米, 液滴之间的尺寸变化较小。进一步减小液滴的尺寸以接近工作波长可能会导致更强的散射。但由于LC液滴不是单分散的, 因此在优化尺寸分布时必须谨慎, 因为亚波长液滴会导致较弱的散射。通过参照偏振片旋转薄膜, 大多数液滴的图案保持不变。这再次表明液滴大多垂直排列。

4 | 应用于迷你LED背光

接下来, 我们将我们的BLSF应用于商业蓝色LED(非极化光源), 并研究如何调整角强度分布。在表征中, 4个 $5\mu\text{m}$ PDLC薄膜在4V/ μm 固化在一起, 并直接附着在蓝色LED上。在这里, 利用四个薄膜来增加角度选择性散射的对比度。如图5所示, 没有BLSF的LED的角强度分布已经相当广泛, 在正常视图中有一个峰值。应用BLSF后, LED的角强度分布变得像蝙蝠一样, 峰值在40左右 $^\circ$ 。在空气中, 正常视野下的强度约为40时的77 $^\circ$ 。应该指出, 虽然BLSF不是用于光提取, 而是用于光整形, 但仍然需要相对较高的传输效率。在我们的测量中, LED和BLSF之间有一个气隙。因此,

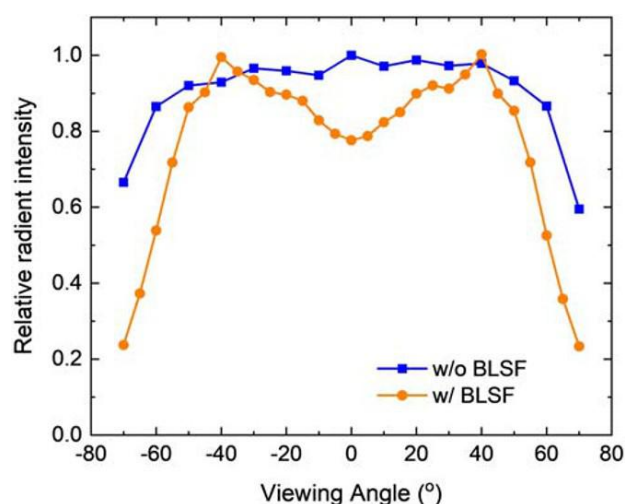
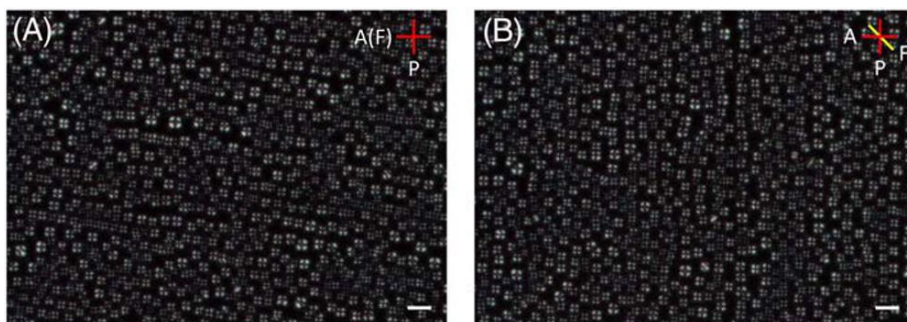


图5 测量的角强度分布的商业蓝色LED没有(蓝色)和(橙色)BLSF。将所有数据点归一化为特定数据点(0 $^\circ$, w/o BLSF)

来自空气/BLSF接口的反射将降低光效率。这种减少可以通过在BLSF中应用减反射涂层或消除气隙来减轻。同时, BLSF还将引入一些背散射。好的背反射器可以更有效地回收光线。然而, 这里的关键是重塑光的角分布。对于迷你LED背光来说, 像蝙蝠翼一样的角分布可以比像朗伯天一样的角分布更快地传播光。因此, 在背光系统中引入遮光膜可以有效地降低背光厚度或/并减少微型LED的数量。

为了研究这种角度分布变化对微型LED背光系统的影响, 我们建立了一个简化的光跟踪模拟模型。如图6A所示, 尺寸为 $200\times 200\mu\text{m}$ 的微型LED² 设置在具有d的晶格常数(螺距)的方形晶格中, 并且接收器放置在远离迷你LED背板的1毫米处。通过将图5中描述的角强度分布分配给

图是4 制作的BLSF的偏振光学显微镜图像, 其中(A)薄膜与分析仪平行, (B)薄膜在45 $^\circ$ 去分析器。分析器; F, 薄膜; P, 偏振片。标尺: 10 μm



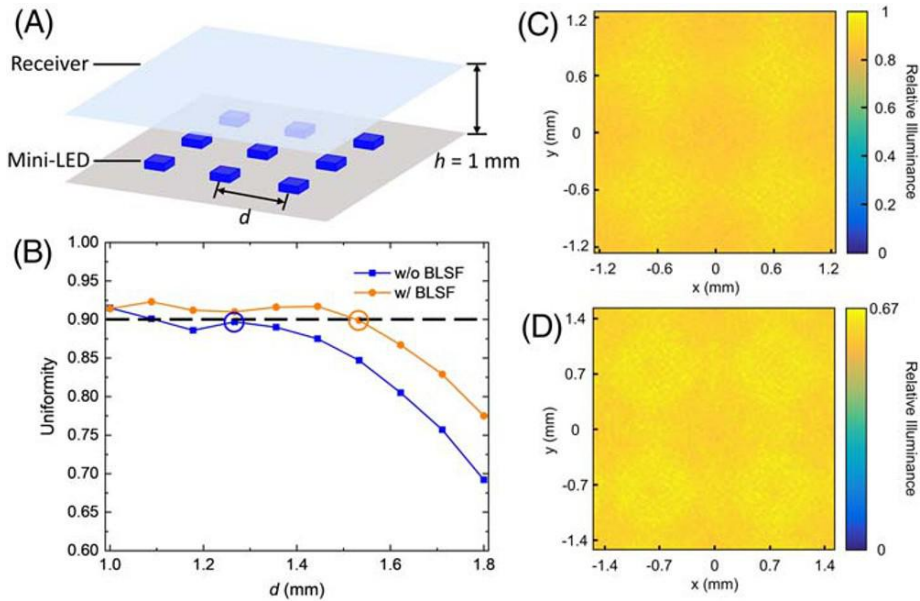


图6 简化射线追踪模型示意图；(B)两个迷你LED背光的均匀性作为LED螺距长度d的函数，其中蓝色圆和橙色圆的归一化光照度分布分别在(C)和(D)中绘制

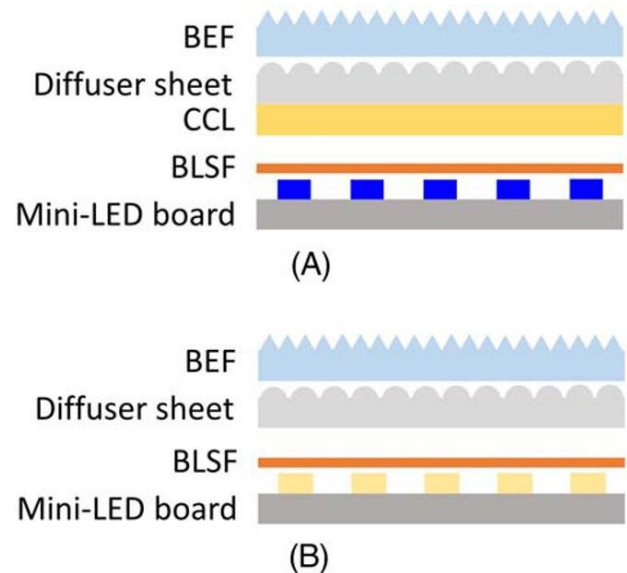
发光二极管并给每个LED设置固定的总发射功率，可以在接收平面上获得光的均匀性，其计算方法是：

$$\text{均匀性} = 1 - \frac{i_{\text{马克斯}} - i_{\text{敏}}}{i_{\text{马克斯}} + i_{\text{敏}}}, \quad \delta \frac{2}{\delta}$$

我在哪_{马克斯} 还有我_敏 分别表示接收平面上的最大照度和最小照度。模拟均匀性作为d的函数 对于这两个角强度分布，如图6B所示。如果我们设置90%的目标均匀性，那么没有BLSF的LED和具有BLSF的LED的最大俯仰分别约为1.26和1.53mm。这两种情况在图6B中圈出，相应的归一化照度分布在图6C(没有BLSF)和图6D(有BLSF)中绘制。照度分布图尺寸为2d×2d，包含四个迷你LED。通过使用BLSF，约32%(=1-[1.26/1.53]²)的微型LED可以保存，以达到相同的均匀性。另一方面，具有BLSF的LED的最大相对照度约为无BLSF的LED的67。这意味着，每个LED的发射功率需要0.5倍的升压，以匹配密集排列的LED的最大照度。节省的LED号码也可以转移到减少背光厚度。例如，如果螺距保持不变，应用BLSF的LED将显示较短的传播距离，同时保持相同的均匀性。

应该指出，我们的仿真模型是简化为概念证明的目的。在实际情况下，亮度增强薄膜(BEFs)和/或其他薄膜

仍然需要缩小光的角分布，将照度均匀性转化为亮度均匀性，并在进入LC模块之前对光进行去极化，使通过LC模块偏振片后的光强分布保持均匀。背反射器也有助于回收来自BLSF的反射光。¹⁶ 然而，由于BLSF的有效厚度仅为20 μm左右



图是7 使用BLSF的两种迷你LED背光配置：(A)蓝色LED加彩色转换层(CCL)；(B)白色LED。该BLSF可以直接连接到LED上，在光进入LC模块之前，仍然需要额外的扩散片和/或亮度增强膜(BEFs)来去极化和缩小角度分布

我们的情况是，将BLSF应用于现有的迷你LED背光系统有助于减少LED的数量和/或背光厚度。另一个方面是，对于白色背光来说，如果只使用蓝色LED，则单独的颜色转换层是必不可少的。但幸运的是，BLSF本质上是宽带的。因此，它们非常有希望直接应用于白色LED。这两种配置，蓝色LED与颜色转换层和白色LED，分别如图7A, B所示。

BLSF的光学特性也可以根据不同的应用要求进行定制。以PDLC为例，通过对所用LC和聚合物的折射率进行工程化，可以调谐最大透过率的角度，只要 n_p 火柴_{伊美}在 α 。通过控制 n 之间的指数失配也可以调节散射强度 p ，还有不和/或PDLC薄膜的总厚度。大的变异性确保了几乎任意裁剪LED角分布的潜力。更重要的是，具有良好的空间均匀性，这样的BLSF只响应不同的角度，而不是空间位置。因此，这些电影可以是放置在接近了在附近去没有注册问题的LED，使背光单元可以非常紧凑。

5 | 结论

提出了一种新的双折射光型薄膜(BLSF)，用于小型LED背光液晶显示器，并用无源PDLC薄膜进行了实验演示。这种薄膜在正常角度散射，但在设计的角度 α 高度透明，实现方法是将聚合物基体中的LC液滴垂直对准，并将聚合物的折射率与LC的有效折射率在设计的角度匹配， α By将一堆4个 $5\mu\text{m}$ 薄膜(导致总有效厚度为 $20\mu\text{m}$)覆在蓝色LED上，这是一种类似蝙蝠的角强度分布，峰值为 40° 是得到的。进一步的模拟表明，有了这样的BLSF，大约32%的LED可以节省，同时保持90%的均匀性。在塑造角度分布方面，BLSF具有很大的设计自由度，只响应入射角，而不是空间位置，这使得它紧凑和无注册，并且可以潜在地工作在白色LED。这项工作不仅应该在微型LED背光液晶显示器中找到应用，而且还应该为未来的光整形薄膜设计提供线索。

供资信息

这项研究得到了美国Vista公司的支持。

ORCID

子谦和<https://orcid.org/0000-0003-3560-2987>

昆音<https://orcid.org/0000-0002-5624-4915>

吴新生<https://orcid.org/0000-0002-0943-0440>

参考资料

1. 黄毅, 谭G, 苟F, 李MC, 李SL, 吴ST. 微型LED和微型LED显示器的前景和挑战. *J Soc Inf Disp*. 2019;27(7):387-401.
2. 吴T, 谢CW, 林Y, 等. 迷你LED和微型LED: 下一代显示技术的有前途的候选人. *APPL SCI*. 2018;8(9):1557.
3. 谭G, 黄勇, 李MC, 李SL, 吴ST. 高动态范围液晶显示与迷你LED背光. *选择快递*. 2018;26(13):16572-16584.
4. 郑B, 邓Z, 郑杰, 等. 一种先进的高动态液晶智能手机. *SID Symphum Dig技术文件*. 2019; 50(1):566-568.
5. Masuda T, Watanabe H, Kyoukane Y, 等. 迷你LED背光HDR兼容移动显示器. *SID Symphum Dig技术文件*. 2019;50(1):390-393.
6. 黄CH, 康CY, 常世, 等. 超高光提取效率和超薄迷你LED溶液由自由曲面芯片规模封装阵列. *晶体*. 2019;9(4):202.
7. Doane JW, Golemme A, West JL, Whitehead JB, Wu BG. 聚合物分散液晶显示应用. *Mol Cryst Liq Cryst*. 1988;165(1):511-532.
8. Doane J, Vaz N, Wu BG, Zumer S. 向列相微滴的场控光散射. *掌声菲斯莱特*. 1986;48(4):269-271.
9. 蒙哥马利GP. 聚合物分散液晶薄膜对偏振光的角度依赖性散射. *选择足球是一个*. 1988; 5(4):774-784.
10. 瓦兹娜, 史密斯GW, 蒙哥马利GP. 一种由分散在UV固化聚合物中的液晶液滴组成的光控膜. *Mol Cryst Liq Cryst*. 1987;146(1):1-15.
11. 姜杰, 麦克格劳G, 马荣, 布朗J, 杨DK. 选择性散射聚合物分散液晶薄膜用于有机发光二极管的光增强. *选择快递*. 2017; 25(4):3327-3335.
12. 叶P, 顾C. 液晶显示器光学纽约: 约翰威利和儿子; 1999年.
13. 奥尼尔MB, 斯托弗CA, 韦伯MF, 发明家; 3M创新物业公司, 受让人. 直接照明背光与角度依赖双折射扩散器. 美国专利 8,007,118美元. 20118月30日.
14. 林毅赫, 任宏, 吴斯特. 高对比度聚合物分散液晶在一个 90° 扭曲的牢房. *掌声菲斯莱特*. 2004; 84(20):4083-4085.
15. 林英赫, 任HW, 吴英赫, 梁X, 吴ST. 钉扎效应对薄聚合物分散液晶相分离动力学的影响. *选择快递*. 2005;13(2):468-474.
16. 金B, 金J, 欧姆WS, 康S. 消除多片LED阵列直接背光系统中的热点, 具有最佳的图案反射器, 具有均匀的照度和最小的系统厚度. *选择快递*. 2010;18(6):8595-8604.

作者传记



他于2016年获得南京大学材料物理学士学位，目前正在佛罗里达中部大学光学和光子学院攻读博士学位。他目前的研究兴趣包括

新型液晶器件、纳米晶和颜色科学。

昆音于2016年从天津大学获得光学电子学学士学位，目前正在佛罗里达中部大学光学和光子学院攻读博士学位。她目前的研究兴趣包括用于增强现实和虚拟现实显示的光学元件。

恩林祥于2014年获得学士学位，2016年获得硕士学位，两人都来自台湾新竹国立交通大学。目前，他正在佛罗里达中部大学光学和光子学院攻读博士学位。他目前的研究集中在微型LED和微型LED显示器上。

李明春2000年获得台湾冯家大学电子工程学士学位，2005年获得台湾国立中山大学硕士学位。目前，他是AU光电公司的经理，负责液晶电池材料和工艺技术的开发。

Seok-Lyul Lee于1992年获得韩国光州大学电子通信工程学士学位，并于2010年获得韩国国立大学硕士学位。目前，他是一个

导演和奥友。他是条纹场开关(FFS)液晶显示器的主要发明者之一。他为移动、平板和使用FFS模式监控TFT-LCD产品的开发和商业化做出了贡献。他于2012年获得SID特别表彰奖，2018年获得SID研究员奖。

田坤成2004年获得台湾国立台湾大学电机工程学士学位，2010年获得台湾国立台湾大学光子学和光电子学博士学位。目前，他是非盟光电公司的高级工程师。他的工作主要集中在先进的液晶显示器上。

吴信生是中佛罗里达大学光学和光子学学院的帕伽索斯教授。他是佛罗里达发明家名人堂(2014年)的前六名入选者之一，也是国家发明家学院的特许研究员(2012年)。他是IEEE、OSA、SID和SPIE的研究员，在南京大学(2013年)和交通大学(2017年)的荣誉教授)。他是2014年OSAEstherHoffmanBeller奖章的获得者，2011年SIDSlottow-Owaki奖，2010年OSAJosephFraunhofer奖，2008年SPIEG。g。斯托克斯奖和2008年SID扬·拉杰克曼奖。目前，他担任SID荣誉和奖励委员会主席。

如何引用这篇文章：何Z，尹K，

湘E-L，等。用于迷你LED背光的双折射光片。足球信息显示。2020; 28: 476 - 482.

<https://doi.org/10.1002/jsid.908>