

微结构膜技术应用 – 浅谈灯具的防眩光设计

东莞市明悦光学材料有限公司

2024-4-21

为了得到舒适，高质量的照明环境，通过改进灯具来抑制眩光是非常有必要的。近年来，出口欧盟的室内灯具都有防眩光的标准，即 $UGR < 19$ ，甚至更低。其实早在 1995 年，CIE（国际照明委员会）已经提出了灯具防眩光的概念，并把 UGR（Unified Glare Rating）作为评价室内照明环境不舒适眩光的指标。随着 LED 芯片技术的发展，LED 灯具越来越亮，不舒适眩光也越来越严重。所以在 2014 年，欧盟将 UGR 限值做为灯具的一个强制标准，而不是像以前一样只是作为参考。

下列表格中列举了 CIE 规定的几类场所的 UGR 限值：

| 用途 | UGR 限值 |
|---------------|--------|
| 工厂，发电站，监控室 | 16 |
| 办公场所，设计制图室 | 16 |
| 机场，控制塔 | 16 |
| 日常办公场所 | 19 |
| 会议室 | 19 |
| 学校，教室 | 19 |
| 医院，病房 | 19 |
| 便利店，销售区域 | 22 |
| 餐厅，宾馆，用餐区，宴会厅 | 22 |

通常所说的“ $UGR < 19$ ”，只是满足了例如学校，办公场所的最基本眩光要求。其实在实际使用时，客户还是会倾向于 UGR 更小的灯具。如果看了下面 UGR 值与不舒适眩光程度的对应关系表，大家就会有所了解： $UGR = 19$ ，其实是代表不舒服。工作和学习场所的 UGR 值越小越好。

| UGR 值 | 不舒适眩光程度 |
|-------|---------|
| 28 | 严重刺眼 |
| 25 | 刺眼 |
| 22 | 略感晃眼 |
| 19 | 不舒服 |
| 16 | 略感不舒服 |
| 13 | 有轻微感觉 |

很多人都对 UGR 存在一个误解，认为它同功率，光效一样，是灯具本身的参数。其实，UGR 的含义是照明环境对于人眼的不舒适度，它是一个通过与产生眩光有关的各种参数计算得到的表征整个照明空间的不舒适眩光程度的值。简单来讲，UGR 值不仅与灯具有关，它与房间大小，房间的反射率，以及观察者的观察方向都有关系。

如果初次看到 UGR 的计算结果表格（如下图），大家都会疑惑，究竟哪个值才代表 UGR。实际上，表格中的每一个值，都是灯具在相应的房间环境中通过 UGR 计算模型得到的值。

表格的最左侧一栏，表明了房间的长（x）和宽（y），它们都以房间的高度（H）为单位。

在表格的顶部一栏，表明了房间的反射率，比如第一列数据中屋顶（ceiling）的反射率 70%，墙壁（walls）的反射率 50%，地面（working plane）的反射率 20%。

表格中的数据被平分成左右两栏，左边数据（Viewed Crosswise）代表观察方向与灯具轴向垂直，右边

数据 (Viewed Endwise) 代表观察方向与灯具平行。

室内环境反射系数，通常面板灯的使用环境为第一列，即天花板反射率70%，墙壁50%，地板20%。

| ceiling/cavity | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | |
|-----------------|------------------|------|------|------|------|----------------|------|------|------|------|------|
| walls | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | |
| working plane | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | |
| Room dimensions | Viewed crosswise | | | | | Viewed endwise | | | | | |
| x = 2H y = 2H | 10.4 | 11.1 | 11.4 | 11.5 | 11.5 | 10.5 | 11.2 | 11.5 | 11.6 | 11.6 | |
| 3H | 11.1 | 11.4 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.2 | 11.5 | 11.6 | 11.6 | 11.6 | |
| 4H | 11.4 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | |
| 6H | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | |
| 8H | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | |
| 12H | 11.4 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.6 | 11.6 | 11.6 | 11.6 | 11.6 | |
| 4H | 2H | 10.7 | 11.9 | 11.0 | 12.1 | 12.4 | 10.8 | 11.9 | 11.1 | 12.2 | 12.4 |
| 3H | 11.6 | 12.6 | 11.9 | 12.9 | 13.2 | 11.6 | 12.7 | 12.0 | 12.9 | 13.2 | 13.2 |
| 4H | 11.9 | 12.8 | 12.2 | 13.1 | 13.4 | 12.0 | 12.9 | 12.3 | 13.2 | 13.5 | 13.5 |
| 6H | 12.1 | 12.9 | 12.5 | 13.2 | 13.6 | 12.2 | 13.0 | 12.6 | 13.3 | 13.7 | 13.7 |
| 8H | 12.1 | 12.8 | 12.5 | 13.2 | 13.6 | 12.2 | 13.0 | 12.6 | 13.3 | 13.7 | 13.7 |
| 12H | 12.1 | 12.8 | 12.5 | 13.2 | 13.6 | 12.2 | 12.9 | 12.7 | 13.3 | 13.7 | 13.7 |
| 8H | 4H | 11.9 | 12.7 | 12.4 | 13.1 | 13.4 | 12.0 | 12.8 | 12.5 | 13.2 | 13.5 |
| 6H | 12.2 | 12.8 | 12.6 | 13.2 | 13.7 | 12.3 | 12.9 | 12.8 | 13.3 | 13.8 | 13.8 |
| 8H | 12.3 | 12.8 | 12.7 | 13.2 | 13.7 | 12.4 | 12.9 | 12.9 | 13.4 | 13.8 | 13.8 |
| 12H | 12.3 | 12.8 | 12.8 | 13.2 | 13.7 | 12.4 | 12.9 | 12.9 | 13.4 | 13.8 | 13.8 |
| 12H | 4H | 11.9 | 12.6 | 12.3 | 13.0 | 13.4 | 12.0 | 12.7 | 12.4 | 13.1 | 13.5 |
| 6H | 12.2 | 12.7 | 12.7 | 13.2 | 13.6 | 12.3 | 12.9 | 12.8 | 13.3 | 13.7 | 13.7 |
| 8H | 12.3 | 12.7 | 12.8 | 13.2 | 13.7 | 12.4 | 12.9 | 12.9 | 13.3 | 13.8 | 13.8 |

Variations with the observer position at spacings:

| | | |
|----------|---------------|---------------|
| S = 1.0H | + 0.5 / - 0.7 | + 0.5 / - 0.6 |
| 1.5H | + 0.4 / - 0.3 | + 0.4 / - 0.5 |
| 2.0H | + 1.1 / - 0.8 | + 1.1 / - 0.8 |

CIE Pub.117, 4094 lm Total Lamp Luminous Flux Correct (8log(F/F0) = 4.9)

表中的UGR值需要加修正值4.9

灯具的 UGR 并不是单一值，它和灯具的使用环境有关。以目前 LED 出口灯具最常见的 600 x 600mm 面板灯为例，它的使用场所一般为办公场所和学校，房间大小通常最大为 4H8H，房间的反射率通常为第一列，即屋顶 70%，墙壁 50%和地面 20%。所以对于这样的大尺寸面板灯，UGR 的适用值一般为 4H8H 的第一列。

大家也会注意到，房间的反射率越低，UGR 值越高。这也很好理解，房间反射率越低，灯具光与房间背景光的反差越大，引起的眩光不舒适度也会提高。但这些低反射率的房间环境不适合安装面板灯。比如 UGR 表格最后一列，屋顶和墙壁的反射率只有 30%，一般为酒吧或娱乐场所，通常会使用射灯或筒灯。

有些客户会要求整表 UGR<19，这说明客户不确定灯具的最终使用环境，那么就要灯具满足在任何环境的 UGR 限值。这也是非常严苛的要求。

有些 UGR 表格采用了旧的计算方式，所以需要在表格中的所有 UGR 数据上手工加上修正值。如上表所示：“4049 lm total lamp luminous flus correct (8log(f/f0) = 4.9)”，表示需要加修正值 4.9。如果表中下方的注释写有“CIE Pub. 117 Corrected”，则表示数据是已经修正过的，不需再手工加修正值。

还是以面板灯为例，很多结构工程师都有这样的体会，UGR 值（4H8H 第一列，以下阐述的 UGR 值都为这个位置为例）如果原来就很高的话，比如 24 以上，通过改变灯具的设计，UGR 值可以很容易降低。但是在 19 附近或以下，UGR 值则非常难进一步降低。其实，UGR 值计算模型是一个对数函数，它和灯具的眩光量成对数反比关系。比如，如果 UGR 值降低 1，则表明灯具的整体眩光量减弱为原来的几分之一。注意，所谓眩光，即灯具中所有大于 65 度的高角度光。

在 LED 普及之前，传统的办公室防眩光灯具是格栅灯，它将荧光灯管隐藏到金属反射罩内部，遮蔽角

达到 30 度以上，外侧采用铝制格栅进一步遮蔽轴向眩光。这种灯具可以很容易做到 UGR<13。但对于 LED 面板灯，包括侧发光和直下式，其灯具结构本身是不适合做防眩光处理的，因为发光面为最外侧平面，高角度眩光很难被抑制，只能通过防眩光板或膜将高角度的光收束到中间工作面。

目前业内常见的面板灯防眩光产品主要有大陆和台湾生产的挤出成型棱晶板，德国 BWF 和 Yungbecker 的热压成型棱晶板，明悦光学的微结构防眩光膜以及贴合板。其中挤出成型棱晶板和热压成型棱晶板的结构都为 1~4mm 直径的金字塔形，六边锥形或圆锥形，通过这种结构将高角度光偏折到中间。

挤出成型棱晶板是由带有负棱晶结构的钢棍模具在透明塑料板挤出生成时，直接在表面压出棱晶形状。这种生产方式效率高，成本很低。但由于塑料热膨胀和吸水的影响，在高温成型时其结构的精度和一致性很难保证。另外钢棍模具在高温下连续棍压容易磨损，需要定期修复模具。由于钢棍模具工作温度的限制，这种棱晶板的基材通常为成型温度略低的 PS 和 PMMA，而对于成型温度高的 PC 就有很大困难。虽然部分公司声称做成了 PC 棱晶板的产品，但良率和品质较低，并且透明 PC 在成型时的结晶问题无法很好解决。

热压成型的棱晶板主要以德国 BWF 和 Yungbecker 的产品为代表。在热压生产前做出大尺寸的带有负棱晶结构的平面钢模（比如 600mm x 1200mm），然后将透明 PMMA 板材加热，由平面钢模热压成型。这种工艺相对于上述的挤出成型棱晶板有以下优点：

1. 热压成型棱晶板的光效较高。它的板材采用光学级透明 PMMA 板材，所以透过率更好。而挤出成型棱晶板内易产生杂质，光效较低。

2. 热压成型棱晶板的结构精度更高。因为热压成型的温度相对于挤出成型的温度较低，另外热压时间较长，在热压时会有几个时间区间分别控制温度和压力，以达到最大的结构精度。相比而言，挤出成型棱晶板的对某一位置的棱晶棍压成型时间只有短短几秒，很难保证精度。

当然，热压成型棱晶板最大的缺点就是成本高。首先，大尺寸高精度钢模的开模成本高，另外大尺寸热压成型设备的投资成本也高，单片棱晶板的热压生产时间也较长。

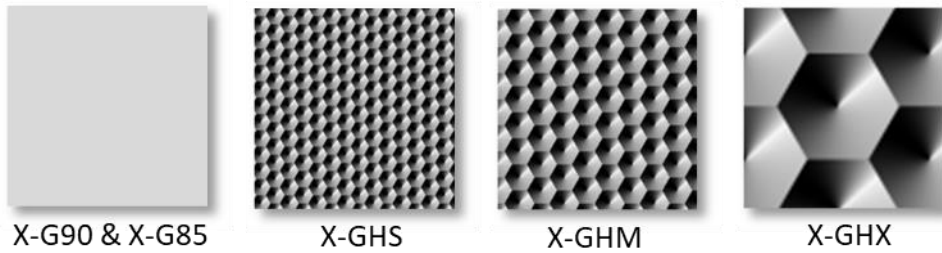
明悦光学的微结构防眩光膜完全不同于以上两种技术，它是通过 UV 转印的工艺将模具上的微结构“复印”在光学级透明 PET 膜上，这种微结构的材料为光学级透明 UV 胶，微结构的尺寸为 20~50um。UV 转印为低温工艺，不会对模具产生磨损，微结构的精度和保真度极高。另外 UV 转印为连续生产，效率很高。明悦光学防眩光膜常用 PET 基材的厚度有两种：7mil (0.175mm) 和 3mil (0.075mm)，加上微结构的总厚度有 0.21mm 和 0.1mm。

明悦光学的 7mil PET 基材防眩光膜可以直接应用于面板灯，通常采用透明板固定。另外一种较薄的 3mil PET 基材的防眩光膜主要用于贴合，即通过 UV 胶贴合工艺与透明的 PS，PMMA 或 PC 基板贴合，这样就极大的提高了产品的应用范围。比如，7mil PET 防眩光膜本身的阻燃等级为 V-TM2（TM 为 Thin Film，代表薄膜的阻燃等级，相当于 V2），如果客户有 V0 级别的阻燃等级要求，就可以与 V0 级别的 PC 板贴合。如果有更高的阻燃或灼热丝温度要求，甚至可以和玻璃贴合。另外贴合板的厚度非常灵活，可以根据客户要求定制。

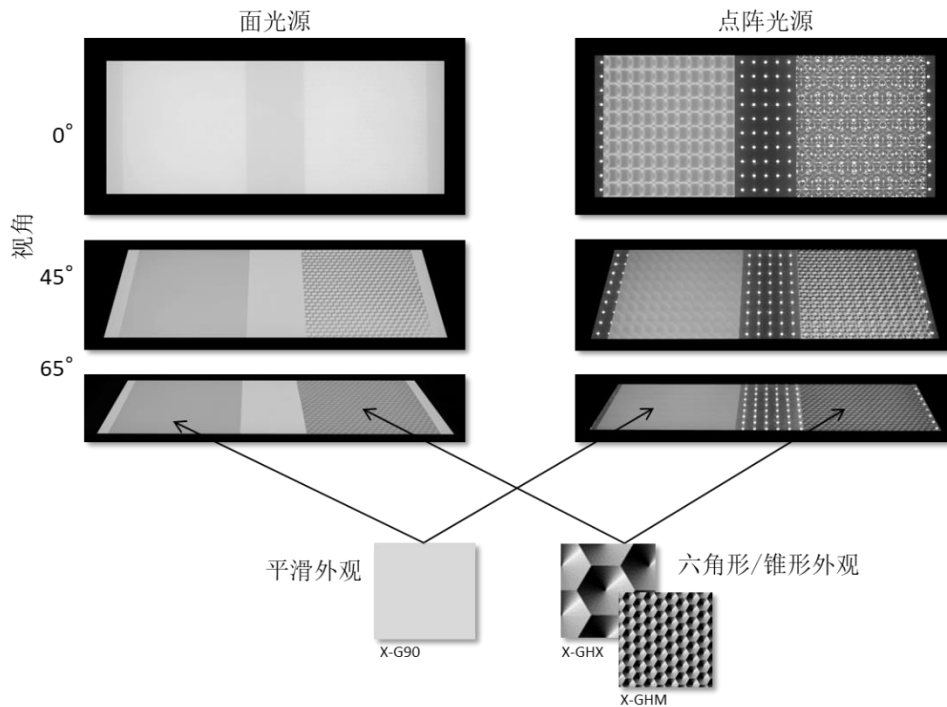
以下表格是 3 种防眩光产品的横向对比：

| | 挤出成型棱晶板 | 热压成型棱晶板 | 明悦光学微结构防眩光膜 |
|-------|----------|---------|-------------------------|
| 结构精度 | 低 | 高 | 高 |
| 防眩光效果 | 较差 | 好 | 好 |
| 光效 | 低 | 较高 | 高 |
| 生产成本 | 低 | 高 | 较低 |
| 基材种类 | PS, PMMA | PMMA | PET, 贴合板 (PS, PMMA, PC) |

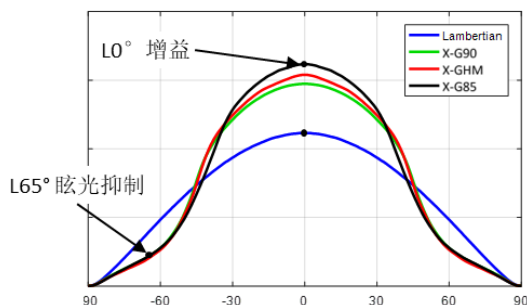
明悦光学目前已开发的防眩光膜有 4 种图案，分别为磨砂面（X-G90 和 X-G85），超小六边形（X-GHS），小六边形（X-GHM），以及大六边形（X-GHX）。如下图所示。



防眩光膜的微结构本身是由透明材料制成，图案是由于微结构的朝向不同所呈现的视觉效果。当把防眩光膜平放在面光源上，然后从大角度观察（比如大于 65 度），这时图案较为明显。有眩光膜放置的区域会明显变暗，说明眩光被有效抑制。下图是磨砂面（X-G90）和小六边形（X-GHM）防眩光膜在面板灯上从不同角度观察的视觉效果。与棱晶板不同，微结构防眩光膜在灯具点亮时看起来较为柔和，因为微结构人眼是不可见的，而棱晶板的大颗粒结构在灯具点亮时会比较刺眼。



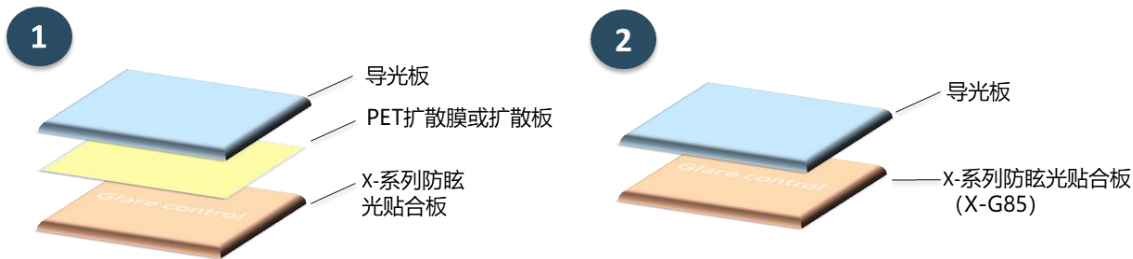
明悦光学防眩光膜的工作原理是通过薄膜表面的微结构将高角度的光抑制，并集中到中心。下图为面板灯加防眩光膜前后的光分布对比。面板灯本身的光分布为朗伯分布，如蓝线所示。如果加上明悦光学防眩光膜，则光分布如红线所示。这时眩光（>65 度的高角度光）被抑制，中心有效光被增强。



明悦光学防眩光膜的防眩光效果可以用 65 度光强 / 0 度光强来定量描述，这个比值越小说明眩光抑制效果越好。下面表格列举了明悦光学的 5 种防眩光膜的光学参数，可以看出，六边形图案越大，防眩光效果越好。但总体而言，明悦光学的 5 种防眩光膜的光学特性差异不大，对于图案的选择主要以客户对于灯具外观的偏好为主。

| 产品型号 | 外观效果 | 眩光抑制 L65° / L0° (% of CBCP, 典型值, 数字越小越好) | UGR 2x2英尺 4000流明 典型值 | 有效光增强 L0° X-系列 / L0° 朗伯光源 (典型侧发光面板灯) | | 半高宽角度 (典型) | 在LED灯具 中的光效 (典型) |
|------------------|--------------|---|-------------------------------|--|-----------------|---------------|------------------------|
| | | | | X-系列 | X-系列 加 K-E80 | | |
| X-G90 | 平滑 | 15% | 17.7 | 125% | 150% | 90° | 89-93 % |
| X-GHS | 1.5 mm 六角形图案 | 15% | 17.5 | 130% | 160% | 90° | 89-93 % |
| X-GHM | 2.4 mm 六角形图案 | 13% | 17.3 | 130% | 160% | 90° | 89-93 % |
| X-GHX | 10 mm 六角形图案 | 12% | 17.2 | 130% | 160% | 90° | 89-93 % |
| X-G85 | 平滑和亮点隐藏 | 13% | 17.5 | 135% | 160% | 85° | 89-93 % |
| X-G85 + X-GHM | 双层膜叠加 | 9% | 16.3 | - | 180% | 75° | 85-91 % |
| 朗伯分布光源 | (作为对比) | 40% | | 100% | 100% | 120° | 100% |

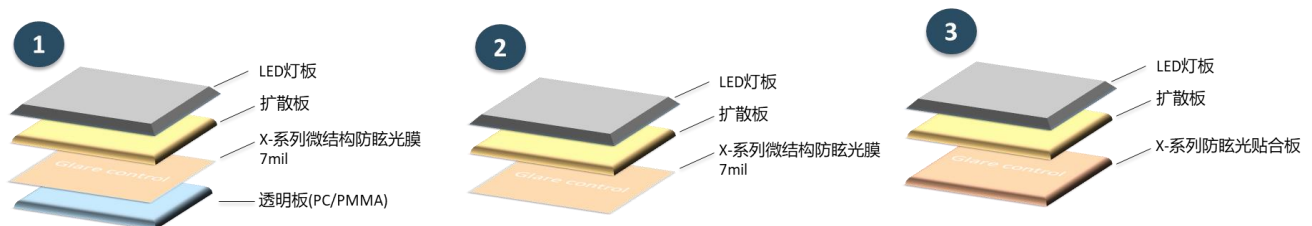
对于侧发光的面板灯，明悦光学防眩光贴合板的安装方式有以下 2 种，如下图所示。注意，无论采用哪种安装方式，防眩光膜或贴合板的微结构面都要朝外，否则就没有防眩光效果。



第 1 种安装方式最为常见，既导光板 + PET 扩散膜或扩散板 + 明悦防眩光贴合板。防眩光贴合板本身有一定的挺度，可以放在最外侧。贴合板的基材通常 MS, PMMA 或 PC。

第 2 种安装方式为导光板 + 明悦 X-G85 防眩光贴合板。由于节省了中间的扩散板，所以对于防眩光板的遮蔽性有一定要求，通常采用明悦光学的 X-G85 贴合板。

对于直下式面板灯，明悦光学防眩光膜或贴合板的安装方式有以下 3 种：

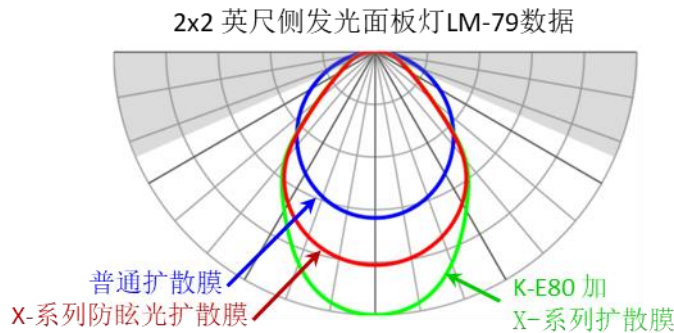


以上 3 种安装方式都需要扩散板，因为直下式面板灯的 LED 亮点仅靠防眩光膜是隐藏不了的，一定要通过扩散板隐藏灯珠。

对于灯具的设计工程师来说，最关心的问题是用了防眩光膜之后，灯具的 UGR 测试结果能否满足客户的要求。一般情况下，4000lm 光通量的 600x600mm 侧发光面板灯，采用明悦光学的 X-GHM 或 X-GHX 防眩光膜在第 1 种安装方式下，可以做到 UGR 整表<19。其中 4H8H 的第一列可以做到 UGR<17。这时面板灯的光效可以做到 100lm/W 以上。如果降功率使用 LED 芯片，其整灯光效最高可以做到 140lm/W。

对于同样尺寸更高光通量的面板灯，比如 4600lm，如果要做到整表 UGR<19，可以将普通的 PET 扩散膜或 PS 扩散板替换为明悦光学的微结构扩散膜 K-E80，然后再加防眩光膜。当然这样做会增加成本。

K-E80 是一款高光效，高亮点隐藏的微结构扩散膜，主要用于直下式灯具。它有一个特点，在微结构面朝外使用时可以收束出光角，比如 120 度的朗伯光源如果经过 K-E80 可以被收束为 82 度。这样配合防眩光膜使用进一步降低 UGR 值。下面图示的光分布曲线显示了面板灯中 K-E80+防眩光膜对于中心光的增益和眩光的抑制效果。一般来说，采用同样的明悦光学防眩光膜，如果用 K-E80 替换普通扩散板，UGR 可以进一步降低 1。



小面积的筒灯或条形灯的眩光控制更加困难，因为 UGR 和灯具的发光面积成反比。对于直下式筒灯，常用的做法是将发光面隐藏在灯具内部，筒灯内侧采用镜面反射腔以增加遮蔽角，并减少眩光。对于侧发光的超薄筒灯，由于发光面几乎位于最外侧平面，只能靠防眩光膜收束角度。如果一层防眩光膜达不到 UGR 限值，甚至需要两层膜。

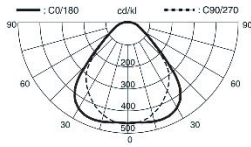
以下是明悦光学防眩光产品在灯具行业的部分应用案例，以供大家参考：

1. Philips Lighting 的 Slim Surface LED 系列。Slim Surface 为直径为 5 英寸的侧发光超薄筒灯，或是小尺寸方形面板灯，主要用于家居照明。它的结构为导光板 + K-E40 微结构扩散膜 + X-GHM 防眩光膜。因为灯具面积比较小，所以防眩光最外侧没有透明板做支撑。这款超薄筒灯将外壳边缘向下延伸，达到了很好的防眩光效果，实测 UGR<16 (4H8H)。

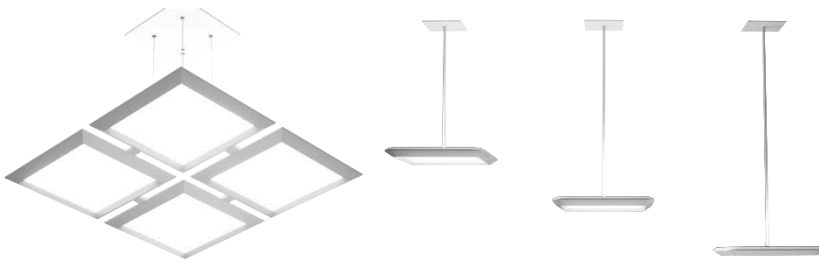


2. 英国 Luxonic 公司的 MICROLUX 系列面板灯。这款灯具采用了明悦光学的蝙蝠翼扩散膜，外侧为防眩光贴合板（1.5mmPMMA 基材）。它的光分布曲线在一个方向几乎为平场照明，同时又实现了防眩光，非常适合高端办公场所照明。MICROLUX 系列所用的防眩光膜为明悦光学定制图案，中间区域为 X-GHM 小六边形，边缘区域为 X-G90 磨砂面。

LIGHT CONTROL



3. Peerless Lighting 公司的 Vellum Quad Pendant 系列面板灯。这款灯具为侧发光面板灯，上下出光。在下方出光采用了明悦光学的 0.5mmPC 基材 X-G90 防眩光板，以达到眩光抑制。



4. Focal Point Lighting 公司的 Zephyr 系列面板灯。这款灯具采用了明悦光学的 K-E80 微结构扩散膜和 X-GHM 防眩光贴合板，在做到高光效的同时，将 UGR 控制的很低。



如果需要了解更多明悦光学的产品信息，请访问明悦光学网站：

www.mingyue-opt.com