

引言

在 TI DLP® 产品投影仪中，使用发光二极管 (LED) 不仅比使用 HID 灯、激光泵浦荧光体 (LaPh) 和激光光源具有显著的优势，而且比与 3LCD 投影仪更具竞争力。尽管 LED 目前无法提供其他光源可实现的高 (6000+) 流明，但确实可带来明显更好且具有成本效益的图像体验，即：出色的色彩饱和度和色彩平衡、高速色彩切换无需运动部件、无斑点、使用寿命长以及经久耐用。本文档介绍采用大功率投影 LED 的 DLP 投影仪的 LED 优势、系统选项和照明光学设计。

利用 LED 投影光源实现 DLP 投影的优势

在过去十年中，LED 的发光输出能力不断提高，现已达到或接近与主流投影仪市场的 HID 灯和 LaPh 投影仪相当的流明水平。单芯片 DLP LED 投影仪能够产生 3000 流明至 5000 流明的亮度，具体取决于 DMD (数字微镜器件) 和 LED 光源设计。

采用 LED 光源的投影仪系统具有多项显著优势。LED 投影仪显示美丽而鲜艳的色彩，可以完全覆盖 Rec.709 色域，这大大超过了采用其他竞争性投影技术的灯和 LaPh 系统的色域。

LED 投影的优势

- 广色域
- 使用寿命长
- 即时开/关
- 无斑点 (与激光不同，不需要去斑点)
- 通过脉冲操作提升亮度 (单芯片的优势)
- 高速开关时不会产生“辐条”或暗时间
- 通过黄色和/或青色的颜色重叠提升亮度 (单芯片)
- LED 发光输出逐年提高

因为 DLP 技术不需要或不依赖极化来产生亮像素或暗像素，所以 DLP 投影技术充分利用 LED 光源的非极化输出。DLP 可利用 LED 的全部光发射，而无需极化恢复技术。

大功率投影 LED 供应商

[ams OSRAM](#) 和 [Luminus Devices, Inc.](#) 是两家有名的生产 DLP 投影所用大功率 LED 的供应商。他们的产品组合包括带有封装和 LED 发射器的投影器件，其宽高比和[光学扩展量](#)与流行的 DLP 投影平台兼容。每个供应商都在持续开发针对高通量和热管理进行优化的大功率芯片和 LED 电路板。

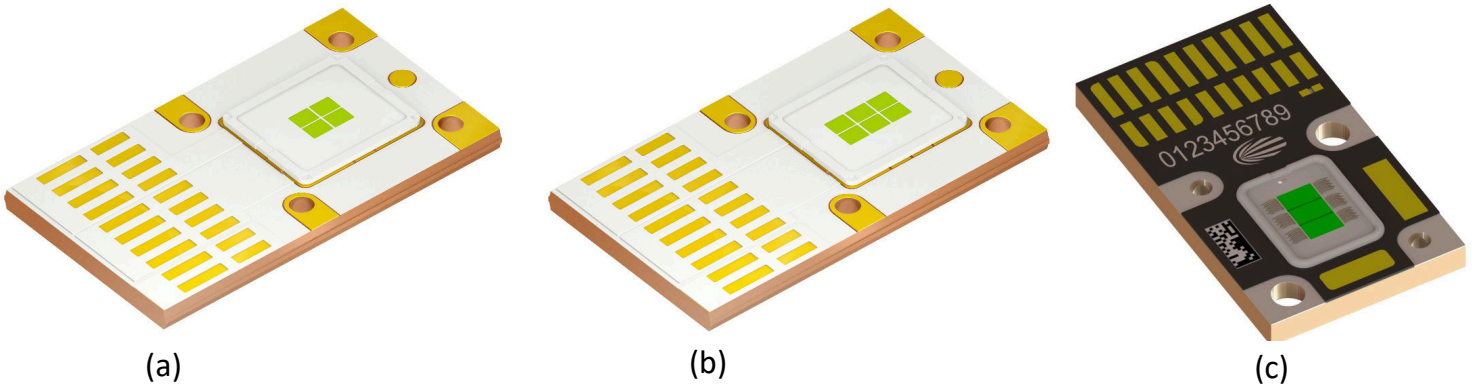


图 1. 投影用大功率 LED : (a) OSRAM P2AQ 转换型, (b) OSRAM P3AQ 转换型绿色, 以及 (c) Luminus PTM-130X。(P2AQ 和 P3AQ 的照片由 ams OSRAM 提供, PTM-130X 的照片由 Luminus Devices, Inc. 提供)。

LED 光谱和色域

投影用大功率 LED 有多种变体。典型的是蓝色和红色 LED, 而绿色 LED 更常见的是在发光表面上具有荧光层的蓝色 LED。这种类型的绿色 LED 称为荧光绿色或转换型绿色 (CG) LED。这些转换型绿色 LED 具有宽光谱发射波段, 可实现比标准“真绿色”LED 非常高的光通量。还有具有典型窄带 LED 光谱的真绿色 LED, 但与转换型绿色 LED 相比, 其发光输出更低, 因此很少用于投影。

还有其他 LED, 当其光谱添加到 R、G 和 B 时, 可增强投影系统的光通量或色域。还有一种波长较短的蓝色 LED, 用于将光发送到转换型绿色 LED 荧光体的顶部表面, 产生一个 4 通道系统。这种深蓝色 LED 通常称为顶部泵浦或蓝色泵浦 LED。蓝色泵浦 LED 可以将绿色 LED 的光通量输出提高多达 40%。但是, 如果红色 LED 无法发出足够的红色光来提供良好的白色色点, 则无法完全改进转换型绿色 LED。由于增加了顶部泵浦蓝色 LED, 4 通道系统的光量可增加大约 15%。一些供应商还提供波长更长的红色 LED。当将波长更长的红色 LED 的光与标准红色 LED 的光混合时, 将会增加可用的红光总量, 从而允许使用更多的顶部泵浦绿色光来提升亮度。波长更长的红色 LED 光还会增加投影仪的色域以及色量。蓝色、转换型绿色、琥珀色 (红色) 和长波长红色 LED 的光谱如图 2 所示。

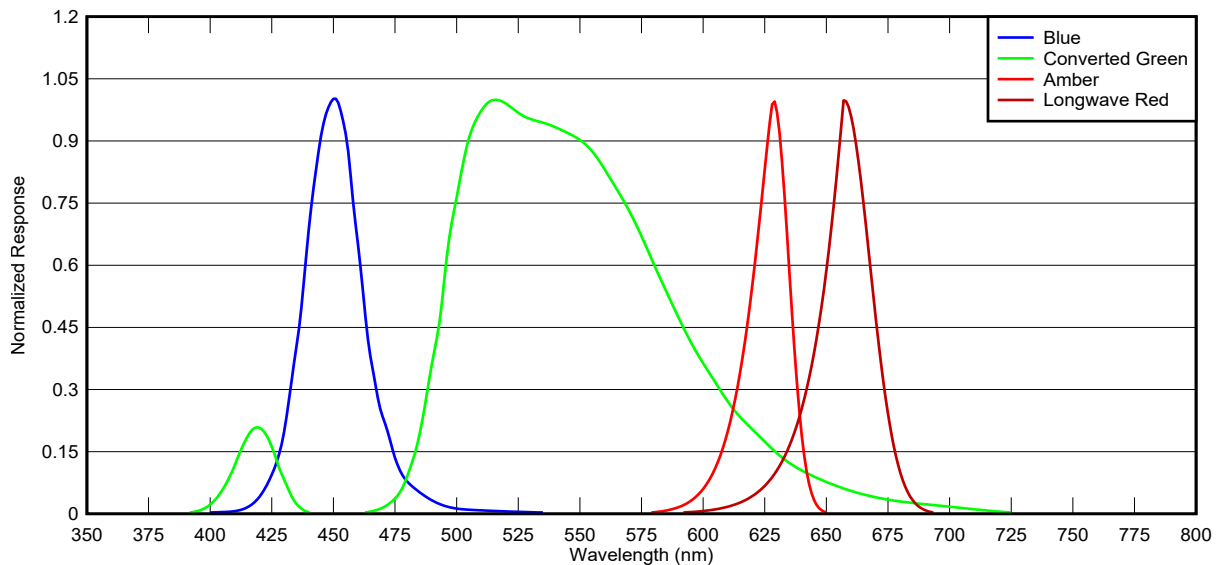


图 2. 大功率投影 LED 的典型光谱

红色、转换型绿色、蓝色 LED 光源投影仪的色度范围如图 3 所示。图 4 显示了添加长波长红色 LED 光源后投影仪的更大色度范围。

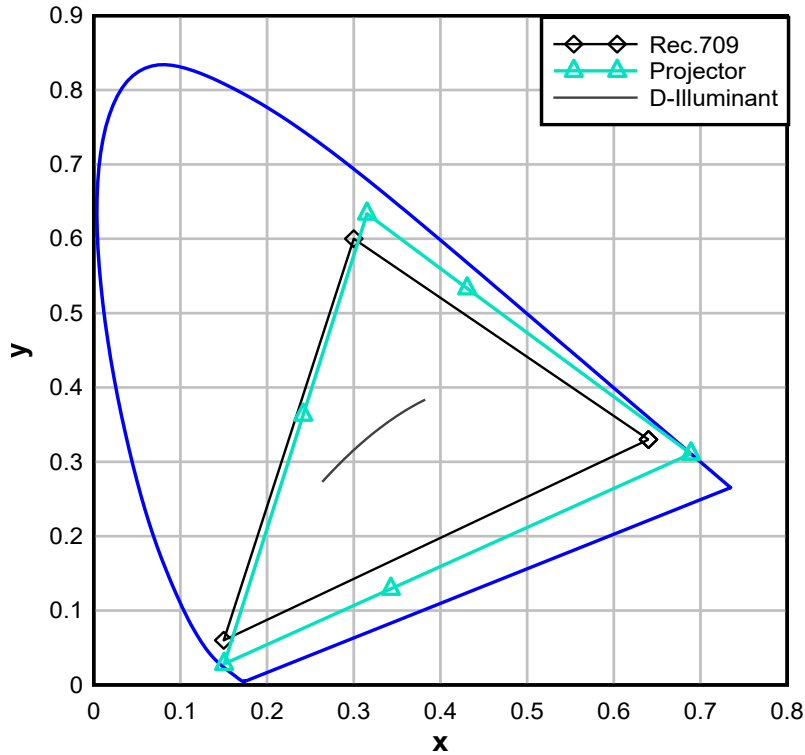


图 3. 红色、转换型绿色、蓝色 LED 投影仪的色度范围 (相对于 REC.709 色域)

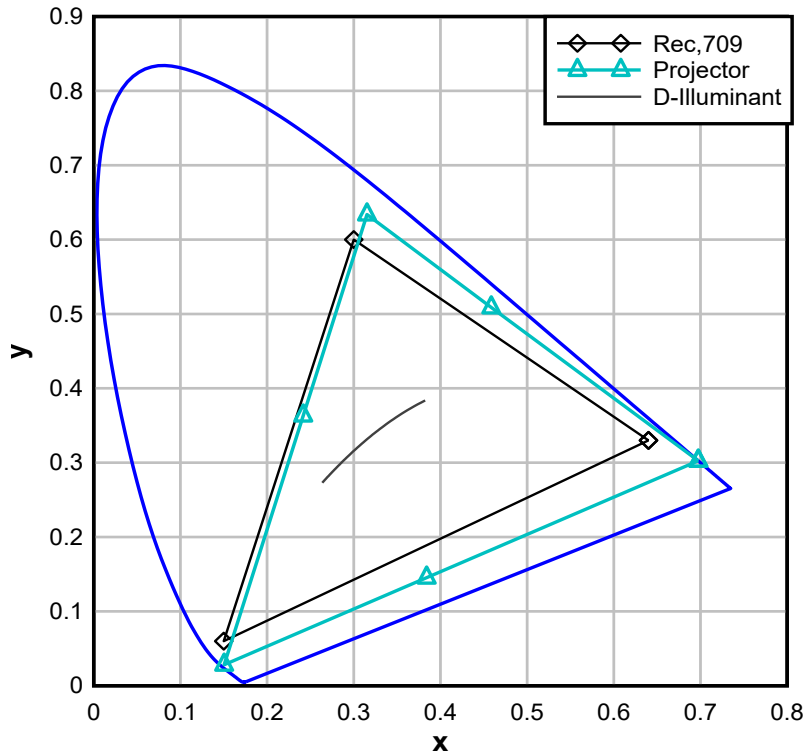


图 4. 红色、长波长红色、转换型绿色、蓝色 LED 投影仪的色度范围 (相对于 REC.709 色域)

LED 的选择或 LED、LED 尺寸和输出功率的组合在很大程度上取决于应用。一般而言，在 LED 光学扩展量超过 DMD 和投影仪系统的光学扩展量之前，LED 发射器表面积越大，投影仪流明数就越高。

用于 DLP 投影的 LED 选型

为应用选择 LED 时，首先要评估投影机系统吞吐量或光学扩展量。DMD 和投影系统 f/# 设置 LED 的这一光学扩展量值。为投影应用选择的 DMD 的宽高比与光学照明架构共同决定了 LED 的理想宽高比。理想的 LED 与投影设计的光学扩展量和宽高比都匹配。由于市售 LED 的尺寸和宽高比有限，设计人员需要为应用找到匹配度更佳的 LED。即使是匹配度更佳的 LED，可能还需要混用不同尺寸和功率输出水平的 LED 才能达到预期效果。

确定 LED 尺寸

可以使用以下投影系统光学规格计算 LED 的理想尺寸：1) DMD 倾斜角、2) DMD 溢出、3) DMD 面积、4) DMD 照明 f/# 和 5) LED 收集角。如果光学扩展量以及宽高比匹配，则 LED 为理想的尺寸。

$$Etendue_{LED} \approx Etendue_{DMD} \quad (1)$$

DMD 和 LED 的宽高比匹配可以通过将光学扩展量拆分为各自的宽度和高度分量来计算。下面公式中的常用变量在表 1 中定义。

表 1. 用于设计 LED 匹配计算的变量定义

变量	定义
$d_{DMD_pixel_pitch}$	DMD 的像素间距
W_{width_pixels}	DMD 阵列水平方向的像素数
h_{height_pixels}	DMD 阵列垂直方向的像素数
<i>Overfill</i>	照亮 DMD 阵列的总光量比例
$\theta_{collection_angle}$	LED 准直器半收集角
$\theta_{width_axis_cone}$	投影光锥在水平方向上的半角
$\theta_{height_axis_cone}$	投影光锥在垂直方向上的半角
θ_{tilt}	DMD 微镜倾斜角

对于从侧面照明的 DMD 器件，理想的 LED 尺寸由用于计算 LED 宽度的方程式 2 和用于计算 LED 高度的方程式 3 给出。

$$W_{ideal_LED_Width} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot W_{width_pixels} \cdot \sin(\theta_{width_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot Anamorphism \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (2)$$

$$h_{ideal_LED_height} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot h_{height_pixels} \cdot \sin(\theta_{height_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (3)$$

Anamorphism (变形) 项是 DMD 上照明的延伸，与 DMD 微镜的照明方向和倾斜角相关。

$$Anamorphism = \frac{a}{\cos(2 \cdot \theta_{tilt})} \quad (4)$$

其中，系数 a 的值大于或等于 1.0，且基于特定的光学设计。

根据方程式 5，照明锥半角与 f/# 相关。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2 \cdot (f/\#)}\right) \quad (5)$$

对于从底部照明的 DMD 器件，理想的 LED 尺寸由用于计算 LED 宽度的方程式 6 和用于计算 LED 高度的方程式 7 给出。

$$W_{ideal_LED_Width} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot W_{width_pixels} \cdot \sin(\theta_{width_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (6)$$

$$h_{ideal_LED_height} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot h_{height_pixels} \cdot \sin(\theta_{height_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot Anamorphism \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (7)$$

对于沿对角线照明的 DMD 器件，理想的 LED 尺寸由用于计算 LED 宽度的 [方程式 8](#) 和用于计算 LED 高度的 [方程式 9](#) 给出。

$$W_{ideal_LED_Width} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot W_{width_pixels} \cdot \sin(\theta_{width_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot \sqrt{Anamorphism} \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (8)$$

$$h_{ideal_LED_height} = \frac{d_{DMD_pixel_pitch} \cdot h_{height_pixels} \cdot \sin(\theta_{height_axis_cone})}{\sqrt{Overfill} \cdot \sqrt{Anamorphism} \cdot \sin(\theta_{collection_angle})} \quad (9)$$

通过将理想的 LED 宽度和高度与实际的 LED 宽度和高度进行比较，可以计算 LED 与 DMD 的耦合效率，如 [方程式 10](#) 所示。

$$Coupling_{eff} = \min\left(\frac{W_{ideal_LED_Width}}{W_{actual_LED_Width}}, 1\right) \cdot \min\left(\frac{h_{ideal_LED_height}}{h_{actual_LED_height}}, 1\right) \quad (10)$$

DLP800RE DMD 的示例

以下是理想 LED 尺寸的计算示例和用于 DLP800RE DMD 的尺寸最接近的 LED。

DLP800RE DMD 的宽高比为 16:10，分辨率为 WUXGA，对角线为 0.8 英寸。

表 2. DLPA800RE DMD 光学特性

光学设计参数	值
d _{DMD_pixel_pitch} (mm)	0.009
W _{width_pixels} × h _{height_pixels}	1920 × 1200
Overfill	85%
θ _{width_axis_cone}	14.48° (f/2.0)
θ _{height_axis_cone}	14.48° (f/2.0)
θ _{collection_angle}	75°
Anamorphism	1.13
照明方向	对角线

根据上述 DMD 和光学系统参数以及对角线照明公式 [方程式 8](#) 和 [方程式 9](#)，得出理想的 LED 尺寸为 4.56mm x 2.85mm。市售 LED 的耦合效率可使用上述耦合效率公式进行计算。

表 3. LED 与 DLP800RE DMD 的耦合效率

	宽度 (mm)	高度 (mm)	耦合效率
OSRAM P2MQ	3.2	2.6	100%
OSRAM P3MQ	4.85	2.6	95.1%
Luminus PTM-130X	4.78	2.7	95.5%

还可以使用尺寸图来检查上述 LED 与理想 LED 的比较情况。每个 LED 尺寸都绘制在图表上，并与理想 LED 进行比较。如果 LED 完全包含在理想 LED 的尺寸内，则耦合效率为 100%。尺寸大于投影系统理想 LED 的任何 LED 都得不到高效收集。理想 LED 未被选定 LED 覆盖或匹配的区域表示未被选定 LED 使用的可用系统能力。OSRAM P2MQ 就是这方面的一个示例，LED 以 100% 的效率与投影系统耦合，但有超过 56% 的潜在 LED 区域可产生由投影系统耦合的光，从而让投影仪更明亮。在图 5 中，红色虚线框外但实心黑色框内的区域是未使用的 LED 区域。

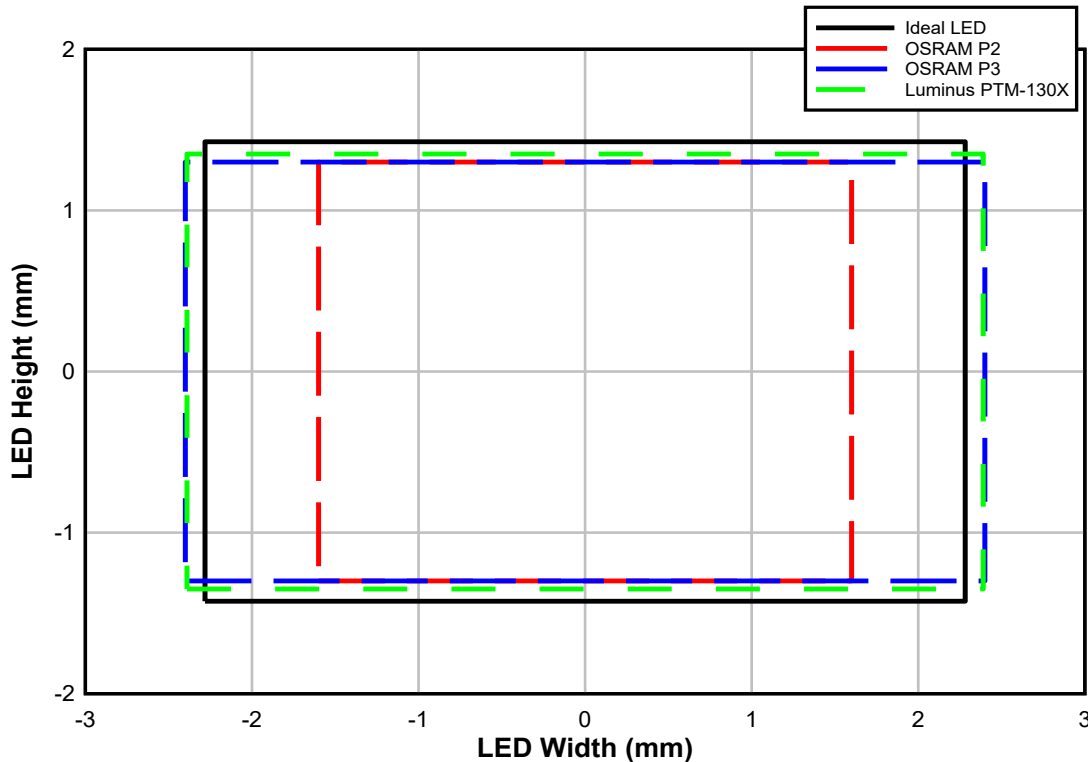


图 5. 不同尺寸 LED 与 DLP800RE WUXGA DMD 的耦合效率图

成本、尺寸和热控制也可能影响 LED 选型的决定。在这种情况下，要获得更大流明，可选择 OSRAM P3MQ 或 Luminus PTM-130X LED。如果注重尺寸较小的低成本投影仪，则 OSRAM P2MQ 或类似的 LED 可能更合适。

LED 的选择最终取决于产品性能和成本目标。但是，要为设计找到最佳的 LED，首先需要评估光学扩展量、宽高比和耦合效率。这些 LED 耦合值可用于制定投影仪系统流明预算。

LED 准直器光学元件

LED 具有多种形式的光收集光学元件。投影应用中较为常见的准直器是高收集角双透镜透射光学设计。双透镜准直器与聚焦或聚光光学元件结合使用，在光隧道的输入表面或蝇眼阵列 (FEA) 的第二个透镜表面形成 LED 的图像。

准直器的 LED 发射与角度和目标收集角

准直器必须设计为以大约 70°-80° 范围的半锥角从 LED 高效率地收集光线，以确保大比例收集由 LED 发出的总光量。可以假设 LED 发射是朗伯发射，发射锥角为 ±90°。LED 发出的总光量百分比由方程式 11 近似得出。

$$\text{Relative collection} = \sin^2(\theta_{\text{collection_angle}}) \quad (11)$$

图 6 显示当半收集角在 70°-80° 范围内时，此百分比介于 LED 发光量的 88% 和 97% 之间。如果收集超过 80° 的光，以光学性能和表面损失来衡量，回报率会下降；如果收集低于 70° 的光，则收集的 LED 发射光将过少，而导致效率损失过大。

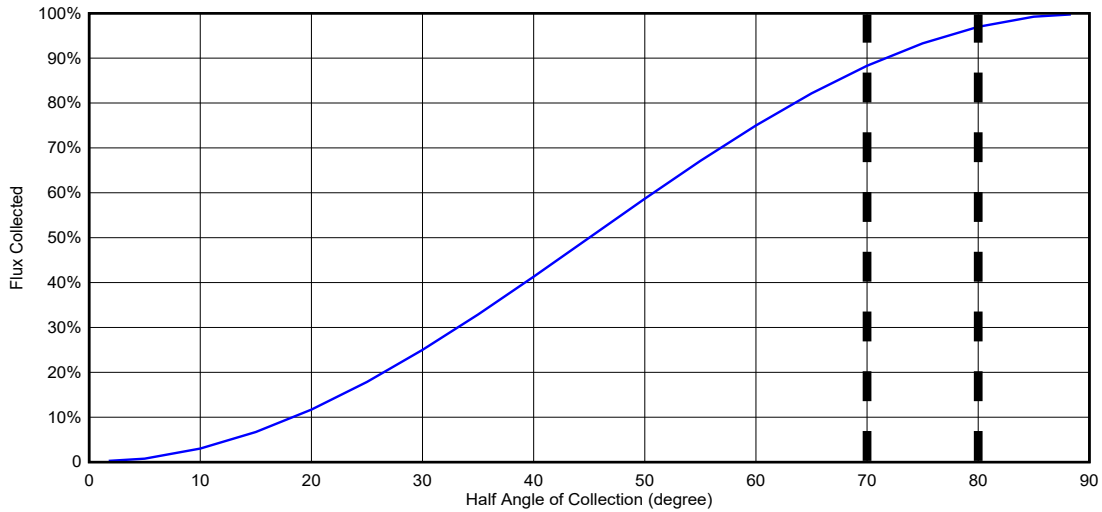


图 6. LED 光发射比例与准直器透镜收集角的半角之间的关系

准直器设计示例

准直器光学元件的典型设计由小球形玻璃元件和另一个较大的玻璃或塑料非球面元件组成。第一个准直器透镜非常靠近 LED，必须吸收大量热量。玻璃元件既用于实现高折射率，又用于避免塑料光学元件在靠近高亮度 LED 的位置发生任何软化或熔化。第二个准直器可以是玻璃或塑料，通常为非球面，可帮助进行大角度光线误差校正。典型准直器的示例如下所示。

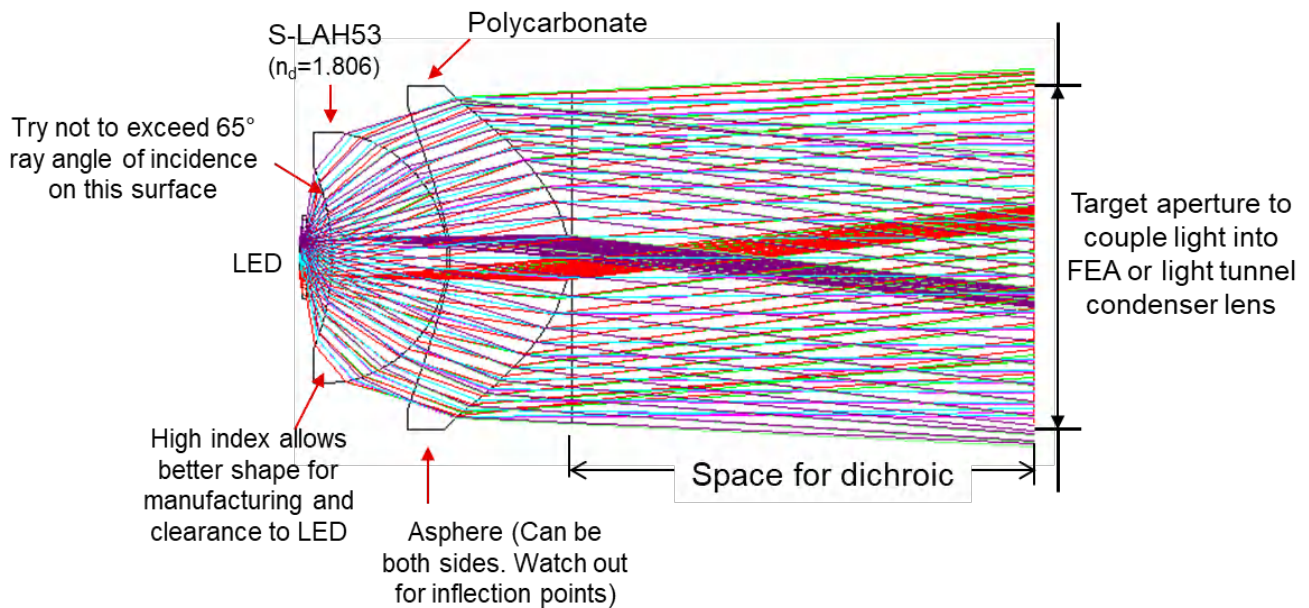


图 7. 准直器光学设计示例和关键设计注意事项

对于投影设计，尽可能减小准直器尺寸非常重要。较小的准直器可降低成本并减小光学布局。当准直器光学元件较小时，每个色彩通道的透镜可以靠得更近，从而对整个 LED 光源形成较小的机械包络。LED 准直器的直径受 LED 发射器对角线尺寸、LED 发射的收集角以及第一个准直器透镜与 LED 发射器的接近度的影响。需要在机械安装、准直器与 LED 对齐、制造成本、收集效率和光学质量之间进行权衡，以确定投影应用的更佳准直器设计解决方案。

对于 LED 而言，并没有标准的光学准直器，因为它们高度依赖于完整的投影仪光学系统要求。然而，一旦针对特定 LED 设计了 LED 准直器，就可以将这些设计重复用于类似的投影仪系统。已经使用其他方法（如 3 个透镜准直器）来提高 LED 准直的耦合效率和图像质量。通常情况下，无需为准直器使用第 3 个透镜元件，因为与准直器光学元件增加的尺寸和成本相比，所带来的改进通常微不足道。对于一些投影系统，制造成本是一项重要动因，此时使用单透镜 LED 准直器光学元件。光学校正将单透镜准直器限制为 60° 以下的收集角，此时光收集效率较低。

LED 光源布局选项

每个 LED 光源和 LED 准直器的光路需要组合成单条光路，用于输入到照明中继光学元件。有几种不同的排列方式，每一种都有其特定的属性。可以根据具体要求优选特定的布局：如为了更适合给定的热设计，或是为了实现更小的尺寸或更大的流明。

LED 光源组合选项和布局

对于许多投影应用，红色 LED 可限制投影图像的总色彩平衡流明水平。离开准直器透镜的光与 FEA 或光隧道之间的耦合效率在这些平面之间的间隔最小时达到最高。如果对于每个色彩通道，某个特定布局在准直器透镜与光隧道或 FEA 之间具有不同的距离，建议将红色 LED 放置在到 FEA 或光隧道的最短光路上，以更大限度地提高红光的吞吐量。

顶部泵浦 (TSP) 或 RGBB LED 排列增加了一个深蓝色 LED，以照亮涂有荧光粉的转换型绿色 LED 的顶部。TSP 排列允许同时从两侧激励荧光粉，从而将转换型绿色 LED 的光通量提高多达 40%。由于红色 LED 输出有限，当系统为获得典型投影仪白点进行色彩平衡时，所有这些增加的绿色光通量都不可用。

通过在 TSP 4 通道 LED 光源中添加长波长红色 LED（或红色激光），可以更多地使用来自 RGBB 系统的 TSP 绿光。所添加的长波长红色 LED 通道可同时改善红色的亮度和色彩饱和度。

图 8 展示了适用于 RGB、RGBB、RGBB+ 长波长红色以 P3 色度范围排列的可能的光源布局示例。滤光片 f1、f2、f3 和 fg 是二向色滤光片。

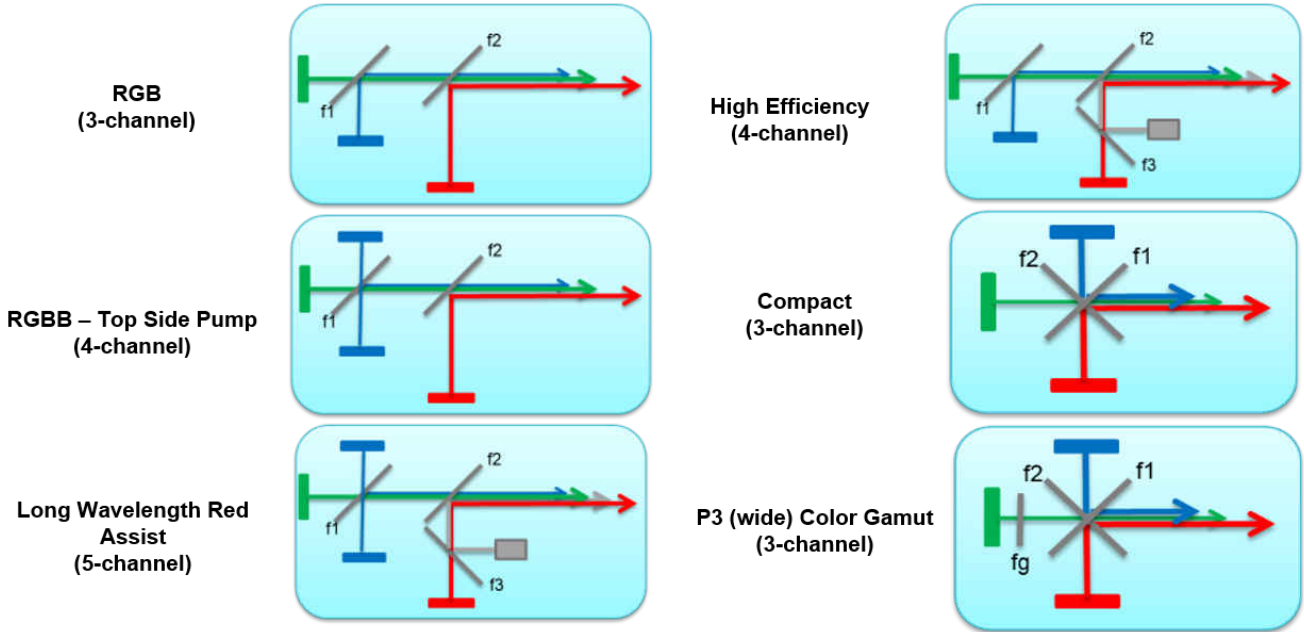
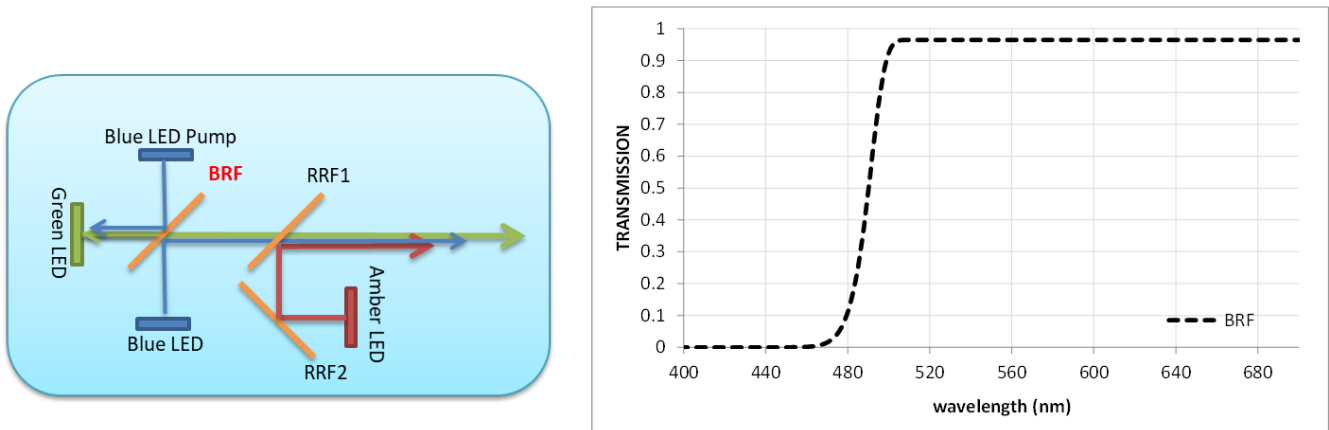


图 8. LED 光源布局选项

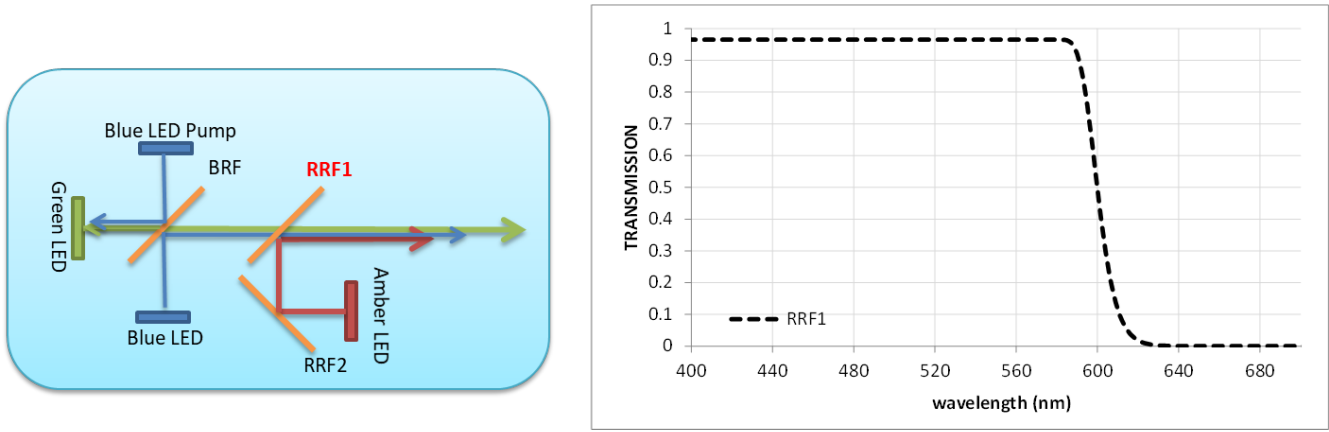
二向色滤光片设计

需要使用二向色滤光片将各种颜色的 LED 光组合到一条路径中。在每种情况下，颜色要么被透射，要么被反射。设计人员可以选择每个二向色滤光片的滤光片截止点位置。这些二向色滤光片曲线是围绕真实的 90%-10% 斜率和 50% 点偏移制造公差以及所需的色点和光通量设计的。目标是将所有这些因素和性能目标结合在一起，以实现更佳的滤光片设计。下面的图表是 LED 光源的二向色滤光片曲线示例，可用作定制设计的起点。以下二向色组合滤光片均为 45 度入射角 (AOI)。



PARAMETER	BAND	UNIT	VALUE	COMMENT
TRANSMISSION	400 nm - 470 nm	%	<= 1.0	AVERAGE
TRANSMISSION	490 nm	%	+/- 1%	
TRANSMISSION	510 nm - 700 nm	%	>= 96.0	AVERAGE
SLOPE		nm	<= 20	10% TO 90% SLOPE
POLARIZATION		random		
MEASUREMENT ANGLE OF INCIDENCE		45	DEGREES	

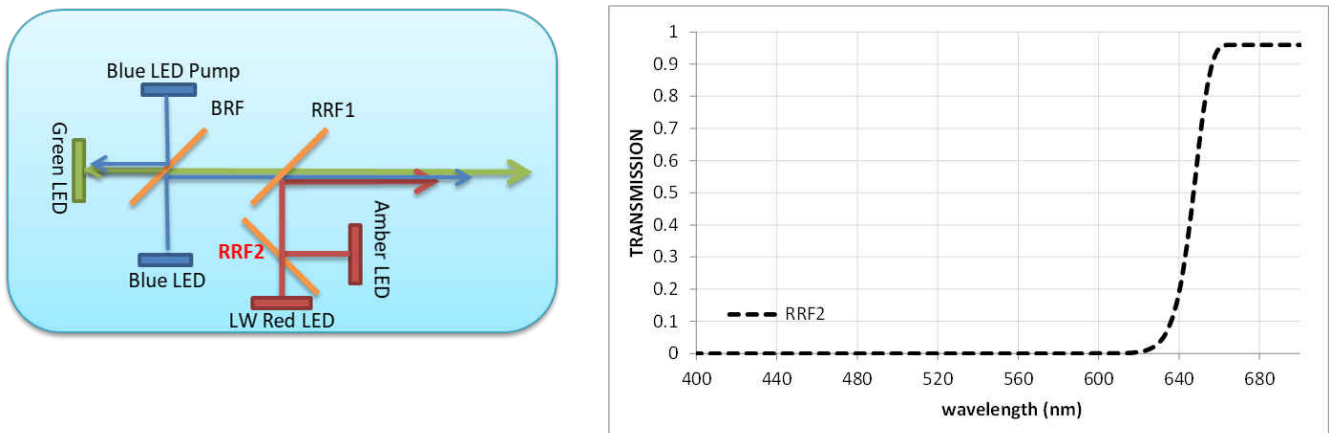
图 9. 蓝色/绿色二向色滤光片设计 (蓝色反射滤光片, BRF)



PARAMETER	BAND	UNIT	VALUE	COMMENT
TRANSMISSION	400 nm - 580 nm	%	>= 96.0	AVERAGE
TRANSMISSION	600	%	50	+/- 1%
TRANSMISSION	620 nm - 700 nm	%	<= 1.0	AVERAGE
SLOPE		nm	<= 20	10% TO 90% SLOPE
POLARIZATION		random		
MEASUREMENT ANGLE OF INCIDENCE		45	DEGREES	

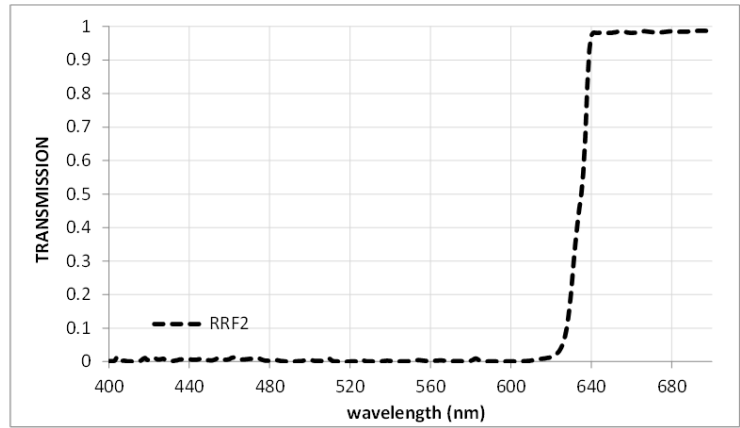
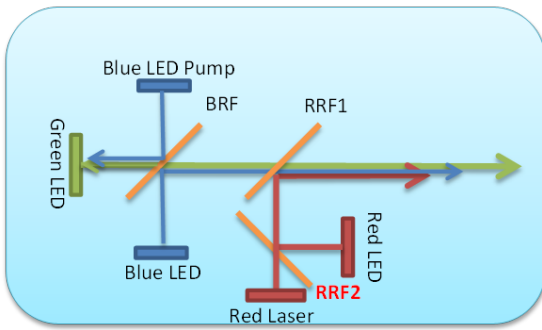
图 10. 蓝-绿/红二向色滤光片设计 (红色反射滤光片 1 , RRF1)

如果使用长波长红色辅助 LED 配置，则滤光片曲线会根据长波长红色 LED 或红色激光的波长而变化。示例二向色滤光片曲线如下面的各图所示，一条曲线适用于红色 LED/长波长红色 LED，而另一条曲线适用于红色 LED/红色激光。



PARAMETER	BAND	UNIT	VALUE	COMMENT
TRANSMISSION	400 nm - 627 nm	%	<= 1.0	AVERAGE
TRANSMISSION	647	%	50	+/- 1%
TRANSMISSION	667 nm - 700 nm	%	>= 96.0	AVERAGE
SLOPE		nm	<= 15	10% TO 90% SLOPE
POLARIZATION		random		
MEASUREMENT ANGLE OF INCIDENCE		45	DEGREES	

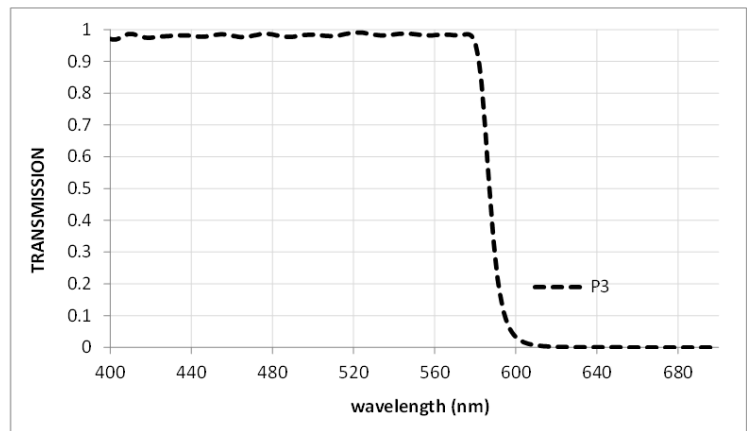
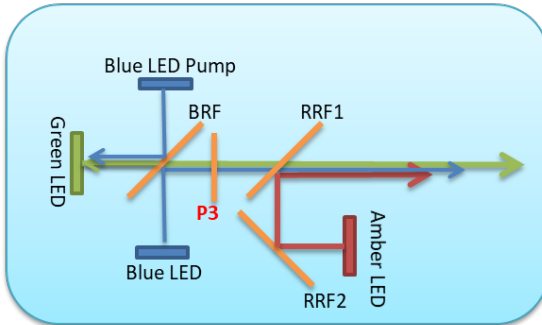
图 11. 长波长红色 LED 滤光片设计 (红色反射滤光片 2 , RRF2)



PARAMETER	BAND	UNIT	VALUE	COMMENT
TRANSMISSION	400 nm - 614 nm	%	<= 1.0	AVERAGE
TRANSMISSION	634	%	50	+/- 1%
TRANSMISSION	654 nm - 700 nm	%	>= 96.0	AVERAGE
SLOPE		nm	<= 15	10% TO 90% SLOPE
POLARIZATION		random		
MEASUREMENT ANGLE OF INCIDENCE		45	DEGREES	

图 12. 红色激光滤光片设计 (红色反射滤光片 2, RRF2)

对于达到 P3 色彩标准的高质量饱和色彩，除了长波长辅助配置外，还可以在绿/蓝组合二向色滤光片之后过滤绿光，以形成更饱和的绿色。这种宽色域的代价是牺牲长波长红色辅助投影仪大约 15% 的流明，但允许几乎 P3 色度范围的投影。如果可以将此滤光片移入或移出光束，则投影仪可以在高亮度模式（移除了滤光片）或影院模式（色彩达到饱和）下运行。此二向色滤光片垂直于光路放置，因此 AOI 为 0°。



PARAMETER	BAND	UNIT	VALUE	COMMENT
TRANSMISSION	400 nm - 567 nm	%	>= 96.0	AVERAGE
TRANSMISSION	587 nm	%	50	+/- 1%
TRANSMISSION	607 nm - 700 nm	%	<= 1.0	AVERAGE
SLOPE		nm	<= 20	10% TO 90% SLOPE
POLARIZATION		random		
MEASUREMENT ANGLE OF INCIDENCE		0	DEGREES	

图 13. P3 色度范围 LED 滤光片设计

LED 光源布局及示例

准直器光学设计、架构选择 (RGB、RGBB、RGBB+长波长红色)、颜色滤光片选择和照明架构相结合,共同构成了投影系统 LED 光源的实用布局。图 14 至图 16 显示了投影系统的更常用 LED 光学布局的几个示例。

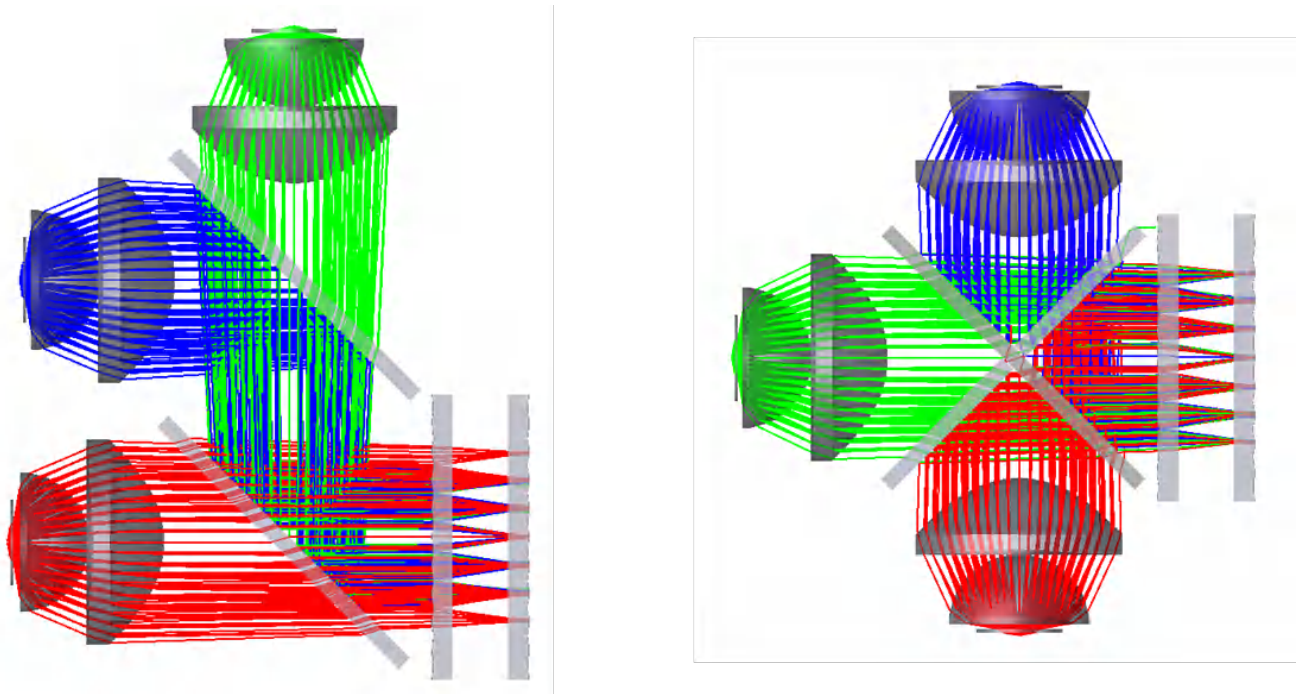


图 14. RGB 标准布局和 X 板布局

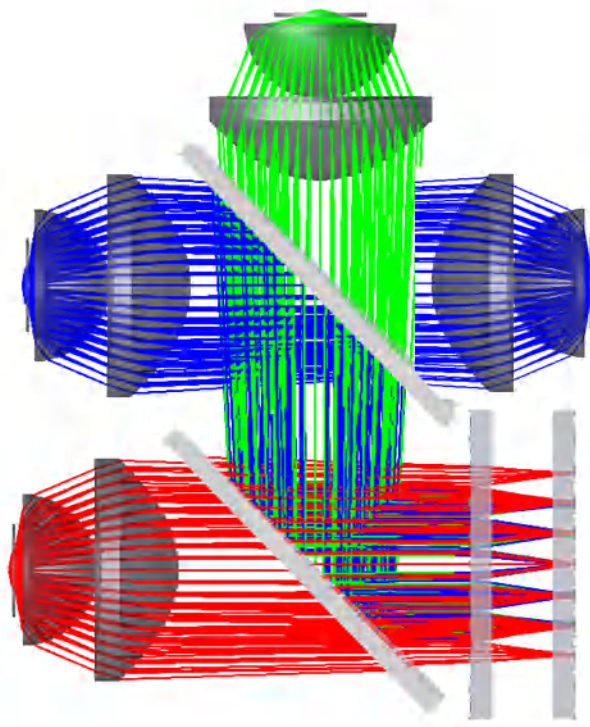


图 15. RGBB 布局示例

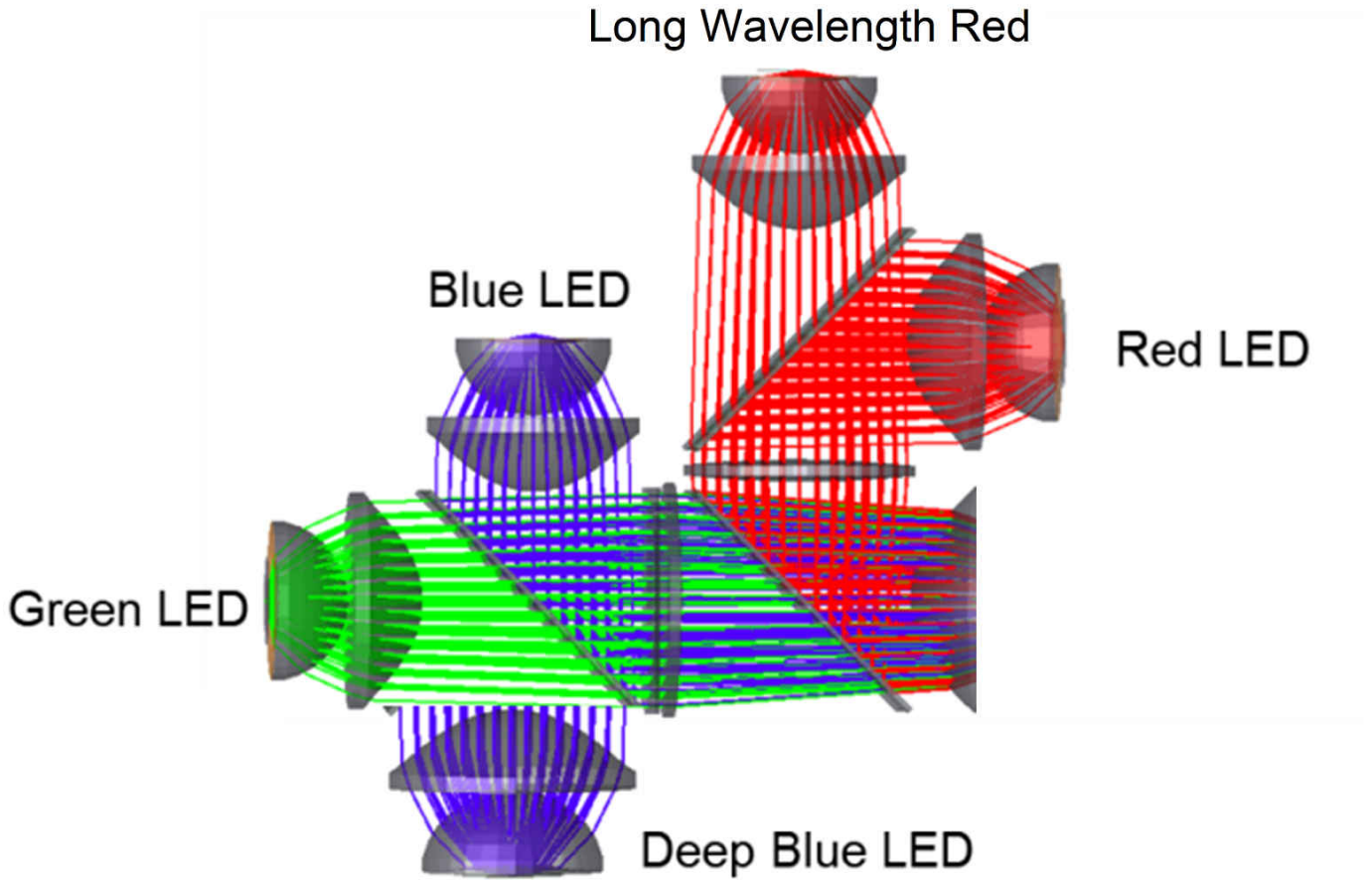


图 16. RGBB + 长波长红色布局示例

总结

LED 作为投影机光源的快速发展使得单芯片、高流明 LED 投影机成为可能。与单芯片 DLP 投影技术配合使用时，LED 光源在效率、可靠性和图像质量方面具有优势。因此，这类系统可生成具有宽色域且生动鲜明的彩色图像。随着 LED 成为所有应用的主要光源，大功率 LED 的效率和亮度将不断提高。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司