

Application Note

使用用于 UVA 区域的 TI DLP® 技术进行系统设计的 注意事项



摘要

直接成像光刻和 3D 打印等先进技术通常使用针对电磁谱的紫外线区域进行优化的光敏材料。本应用报告探讨了使用设计用于在紫外光谱的 UVA 区域中运行的 TI DLP® UV 数字微镜器件 (DMD) 时的热、占空比、一般光学、一致性和高缩小倍数等设计注意事项。

内容

1 引言.....	2
2 热.....	3
3 占空比.....	4
4 光学.....	4
5 高倍率缩小系统.....	5
5.1 非相干源 (灯和 LED)	6
5.2 相干源 (激光)	9
6 结语.....	14
7 参考资料.....	14
8 修订历史记录.....	15

商标

DLP® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

紫外光谱的 UVA 区域覆盖介于 315nm 至 400nm 之间的波长。UV DMD 专门设计用于在 UVA 区域的较高部分运行。(有关特定工作波长限制,请参阅每个特定的 DMD 数据表。)波长和光子能量之间的关系由方程式 1 给出。其中:

$$E = (hc/\lambda) \quad (1)$$

- h 是普朗克常数
- c 是光速
- λ 是光的波长

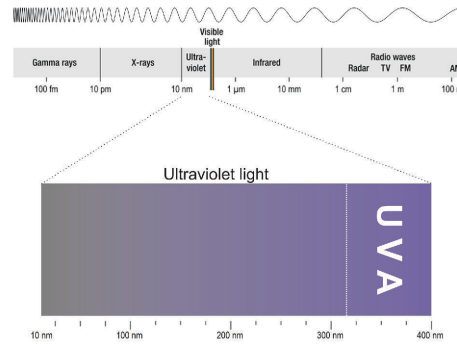


图 1-1. 紫外光谱的 UVA 区域

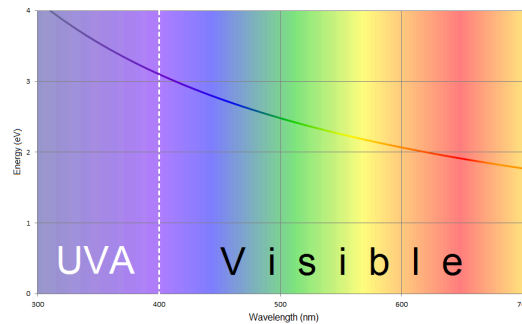


图 1-2. UVA 和可见光谱中的光子能量

由于方程式 1 的分子中的两个值都是常数,这表明光子能量仅取决于波长的倒数。波长越小,每个光子携带的能量就越高。因此,UVA 范围内的光(波长短于可见光区域的波长)每个光子携带的能量要多于可见光谱中的光。

除了每个光子中有更多的能量外，对于光敏材料而言，较短的波长光线也支持较小的特征成像，因为受衍射限制的光斑大小与波长和 f 数成正比。受益于较小光斑大小和每光子更高能量的应用示例包括直接成像光刻和各种类型的 3D 打印。前者通常使用光敏乳胶（称为光刻胶），后者使用光敏树脂。这些光刻胶和树脂材料对 UVA 光谱中较高光子能量的反应更敏感，可以提高固化速率，而较小的光斑则可以实现更清晰的细节。

用于 UVA 光谱的 UV DMD（例如 DLP7000UV、DLP9500UV 和 DLP9000XUV）采用了卓越的设计技术以及 UV 优化型窗口抗反射 (AR) 涂层。这些 DMD 搭配针对该频带中的波长进行优化的常用光刻胶和树脂以及在该光谱范围内现成可用的发光二极管 (LED) 和激光二极管，形成了出色的元件组合，便于制造针对 UVA 进行优化的系统。

TI DLP DMD 使用在两种物理状态之间切换的反射微镜来调制光。由于 DMD 的主要调制控制通过无机铝微镜的反射进行，因此与使用有机分子进行调制控制的空间光调制器 (SLM) 技术相比，这些器件对更短的波长具有更强的耐受性。有机分子在暴露于这些较短波长的光下时容易降解。Ref 1,2

本应用手册探讨了充分提高使用 DMD 的系统在较短波长 UVA 下的性能的设计注意事项。

2 热

尽管 DMD 器件能够在这些较短的波长下工作，但这些器件并非完全不受较高能量含量的影响。在光谱的 UVA 部分工作时，DMD 阵列温度成为一个越来越重要的因素，因为更高的温度会提高对能量更高光子的灵敏度。

UVA DMD 数据表要求将 DMD 阵列温度保持在 30°C 或更低，20°C 至 25°C 为理想温度。这可以通过使用液体冷却系统或热电冷却器 (TEC) 等主动冷却方法来实现。但是，必须注意避免在封装上的任何两点之间或封装上的任何点与 DMD 阵列之间引入大于 5°C 的温度梯度。

将温度和热梯度保持在数据表中定义的规格范围内有助于提高 DMD 在与能量更高的光子配合使用时的出色性能。

3 占空比

在所有应用中，DMD 在平均值为 50% 的开态/关态占空比下运行是有利的，但在 UVA 波长下运行时，这一考虑因素变得更加重要。开态/关态占空比表示单个微镜在开态与关态的时长之比。在不同状态之间切换所需的切换时间被视为可以忽略不计，在确定此占空比时会将其忽略。

该占空比表示为开态占空比除以关态占空比。例如，75% 处于开态、25% 处于关态的像素的占空比表示为 75/25。请注意，表示占空比的两个数字始终总和为 100。

在近 50/50 占空比下运行时可以实现超长的 DMD 性能。在这种情况下，存在两种可能的运行情况：

1. 第一种情况是未跟踪 DMD 像素的占空比历史记录，因此不知道这些占空比历史记录。在这种情况下，只要 DMD 未主动点亮⁽¹⁾，以 50/50 运行 DMD 会将所有像素占空比历史平均值驱动回 50/50 占空比。DMD 在任意可用系统静态周期和所有可用系统静态周期中以 50/50 运行的时间越长，总历史平均值越接近 50/50 占空比。

小心

⁽¹⁾ 任何时候，在不需要 DMD 图案或未投影到制造表面上时，都必须禁用或关闭 DMD 照明子系统（灯、LED、激光）。请勿将 DMD 用作主要照明快门。

2. 第二种情况是各个像素的历史记录随时间推移进行跟踪。在这种情况下，在相同时间段内对每个像素应用反向占空比（如果未主动用于图形化）会导致每个像素的历史平均值接近 50/50 累积占空比。例如，如果像素在运行期间以 62/38 占空比驱动，那么在静态期间以 38/62 占空比驱动像素相同时间会使像素平均占空比接近 50/50。请注意，这也可以在更短的时间内以更高的反向占空比驱动，以便总平均值为 50/50。

4 光学

在放大倍数为一比一或更大的系统中，设计照明和输出光学元件时，使用小至 $f/2.4$ 的 f 数¹ f 数¹ 是实用且理想的。如果照明和投影 f 数匹配得过近，则会导致焦平面（制造表面）功率损失显著。对输出光瞳进行轻微填充可在光学系统中提供 DMD 倾斜变化容差。例如，使用 $f/3$ 照明到 $f/2.4$ 输出可使照明光瞳的图像保持在输出孔径内。[节 5.1](#) 中对这一点进行了更详细的论述。

TI 建议在系统设计中采用允许从标称入射角调整 $\pm 2^\circ$ 的照明调整机制。通常，照明锥以相对于窗口正常的 24° 角度为中心，因此对于 12° 倾斜角器件，输出锥以 DMD 正常角度为中心。 $\pm 2^\circ$ 调整允许将最亮的阶移入输出孔径。

有关这些及其他 DLP 光学系统注意事项的详细信息，请参阅（[TI DLP® 系统设计：光学模块规格](#)）。以下各节将介绍高倍率缩小系统的注意事项。

¹ 此处使用的 f 数定义为透镜 f 的有效焦距除以透镜光圈的孔径。

5 高倍率缩小系统

使用 DLP 技术的投影系统通常使用照明设计，如图 5-1 所示。请注意，平板状态不是 DMD 微镜工作状态，但在设计光学系统时必须考虑该状态。

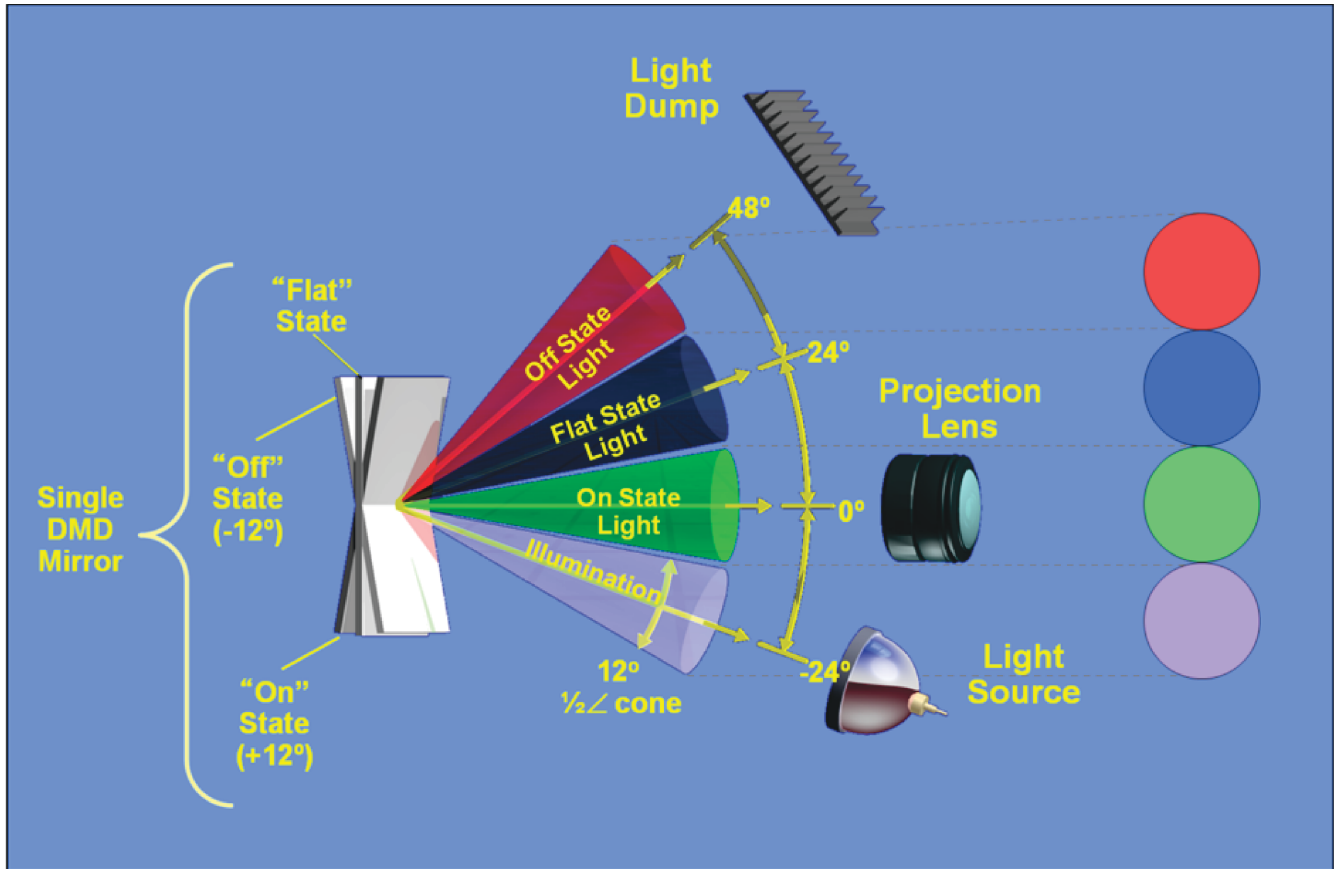


图 5-1. 典型投影系统光学元件

但是，某些光刻和 3D 打印系统使用 DMD 阵列图像缩小来处理非常小（低至 $1\mu\text{m}$ 或更小）的特征。图 5-2 展示了高倍率缩小系统输出孔径的小尺寸与典型投影光学系统的小尺寸。

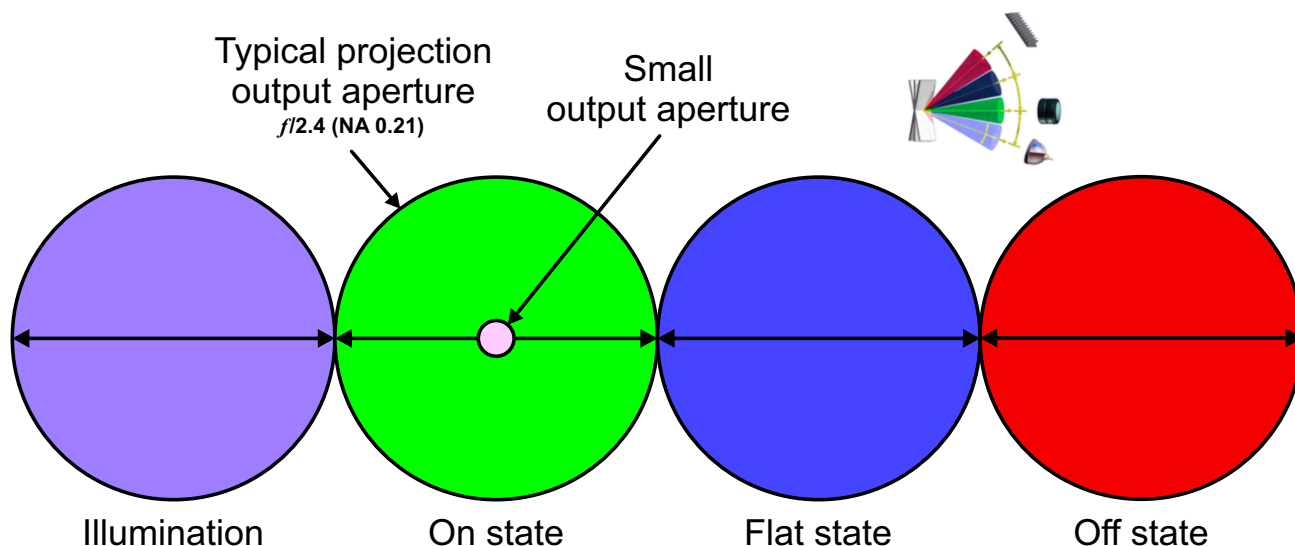


图 5-2. 投影透镜入射光瞳处的光分布（典型投影系统与高缩小倍数）

对于高缩小倍数典型的这些相对较小的孔径，应考虑分为两个区域：非相干源和相干源。

5.1 非相干源（灯和 LED）

如果宽带和 LED 源⁽²⁾使得 DMD 反射输出光束与输入光束的大小精确匹配，DMD 微镜倾斜变化可以将反射光束偏移，使反射光溢出到侧面并被输出孔径所遮挡，如图 5-3 的面板所示。这会导致总输出亮度出现意外损失，并增加图像亮度不均匀的可能性。

小心

⁽²⁾ 当 DMD 与非相干源一起使用时，必须在 DMD 的照明路径中使用一个滤波器，该滤波器几乎可消除小于 DMD 最小指定波长的所有波长（请参阅各个数据表规格）。某些 DMD 没有低于 LED 最小指定波长的显著光谱内容，因此无需使用滤波器。

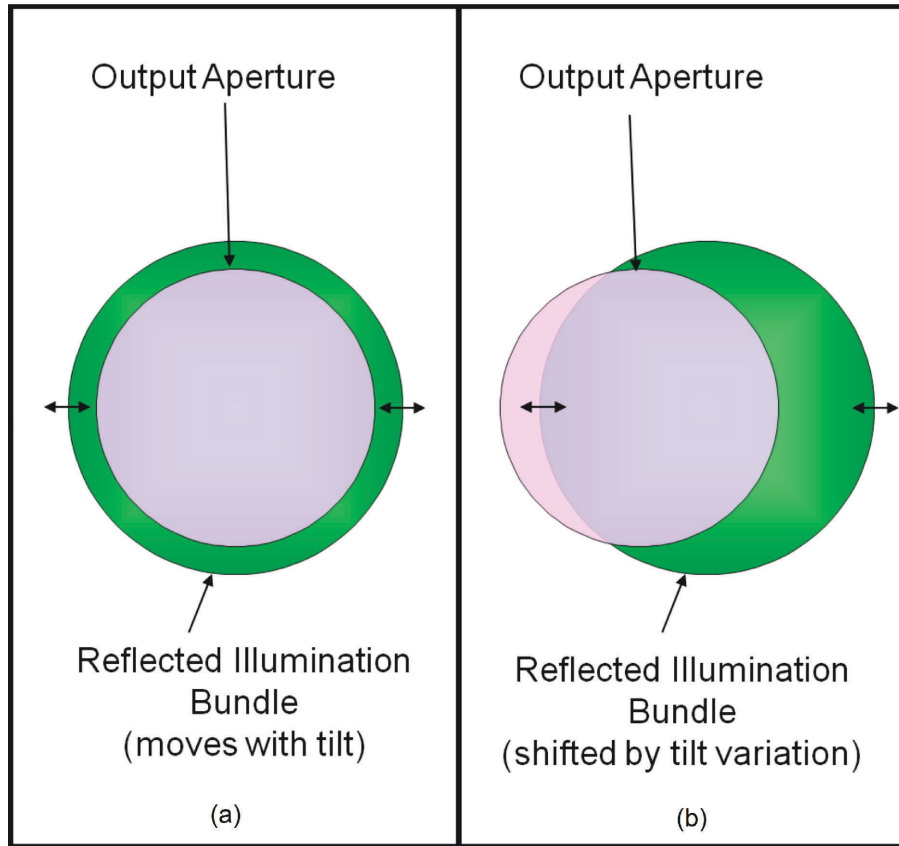


图 5-3. 小输出孔径

为了以容差捕获所有光并适应微镜倾斜变化，理想的方法是使照明捆绑包小于输出孔径。这样可以捕获所有的光，如图 5-4 中所示：

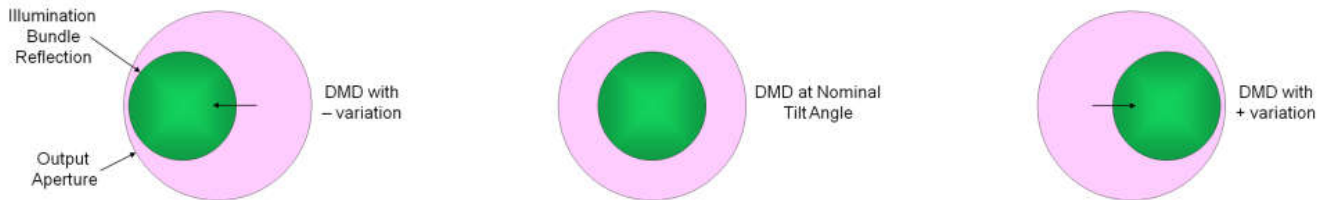


图 5-4. 倾斜变化时的反射照明移动

对于当前支持 UVA 的 DMD，倾斜变化规格为 $\pm 1^\circ$ 。在输出孔径处，反射的照明移动了该量的 2 倍，即 $\pm 2^\circ$ ，因为反射的射线移动了反射表面的 2 倍。建议输出孔径的直径比照明束大 4° ，以涵盖该范围（ -2° 至 $+2^\circ$ ）。本示例假设采用标称 12° 照明，不包括按照前面节 4 中的建议调整照明角度。

因此，为了提供 4° 容差，输出端的最大 f 数（最小孔径）存在有效限制。即使对于角度范围为零度的出色准直照明光束，孔径仍具有 $f/14.3$ 等效值，即一个角度直径为 4° 的圆锥。

这就导致了在此公差下可达到的缩小倍数的实际限制。 f 数小于 1 的光学元件很难构建。如果使用 $f/1$ 的限值，则 13 倍的缩小倍数是可能的最大缩小倍数。图 5-5 中的图显示了两条曲线。品红色曲线是 DMD 输出孔径上锥体的角直径，它在制造表面产生 $f/1$ 锥体。绿色曲线是照明捆绑包的允许角度直径，用于保持照明捆绑包和输出孔径之间的 4° 裕度。请注意，允许的照明锥直径在 13 倍缩小后达到零。

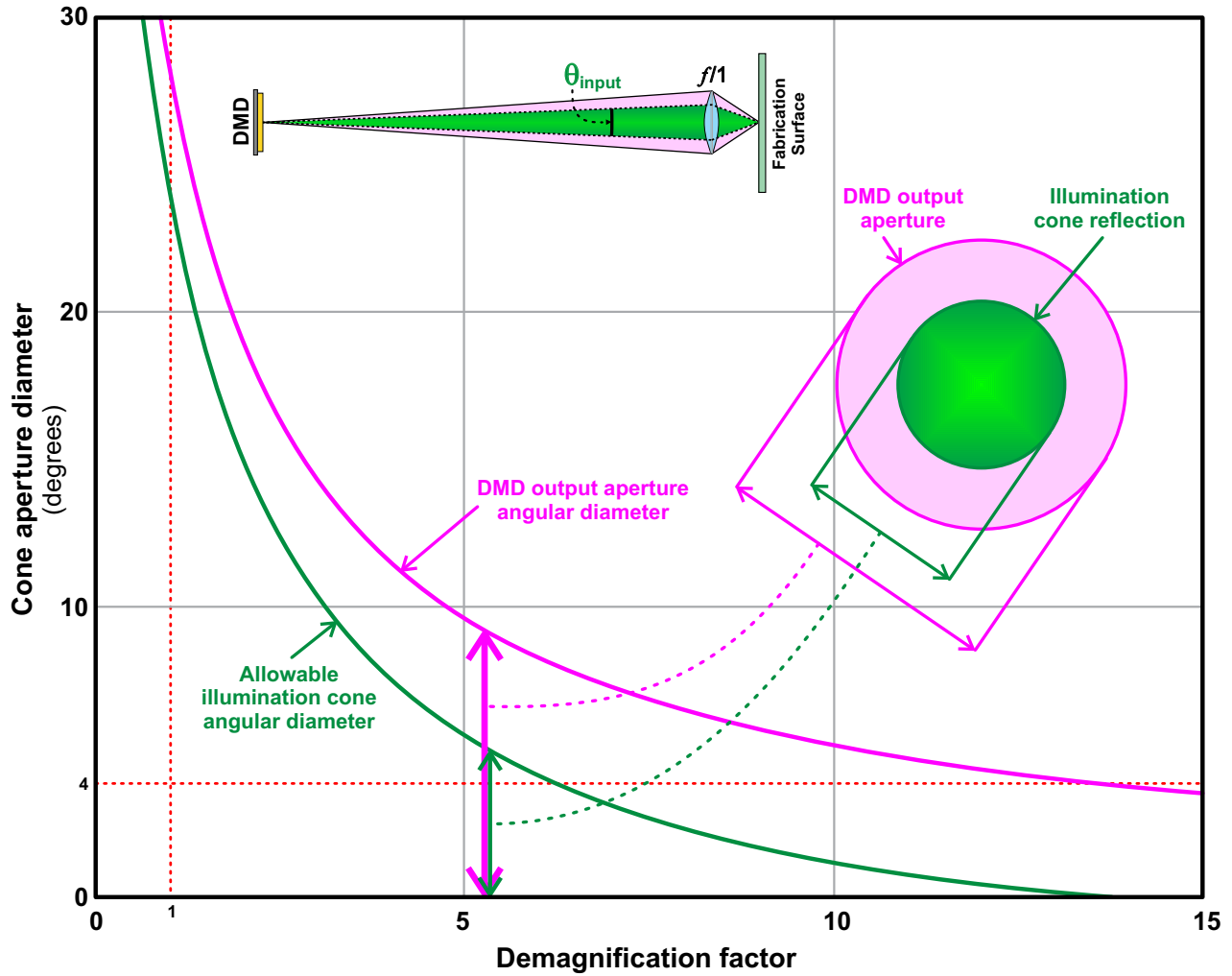


图 5-5. DMD 输出孔径直径与缩小倍数间的关系

方程式 2 近似计算给定 f 数值的可实现的最大缩小倍数。

$$\frac{\cot\left(\frac{\theta_{\text{input}} + 4^\circ}{2}\right)}{2(f/\#)} - 1 \quad (2)$$

其中：

- θ_{input} 是输入照明捆绑包的角度范围。

总之，在高倍率缩小系统中使用时，非相干源有两个限制。建议输出的 f 值小于 $f/14.3$ 且缩小倍数不超过 13 倍。在实践中，照明束的角度直径为几度，因此会牺牲一些孔径裕度或选择较低的缩小倍数。如果光学设计包括用于将 DMD 与输出光学元件和光源角度独立对齐的选项，则可以使用更高的 $f/\#$ 和缩小倍数。

5.2 相干源 (激光)

当 DMD 以相干、准直、窄带光照亮时，反射结果为二维斑点图案，称为衍射阶数。根据像素间距、DMD 微镜倾斜角、照明波长和照明光的入射角，可以存在从完整火焰到完整抗火焰的一系列条件。

当一个衍射阶包含整体衍射模式中的大部分能量时，就会出现火焰条件。建模表明，这单个阶可以包含近四分之三的输出能量，剩余的季度分配到所有其他阶中。这是最好的情况。设计为在火焰条件下运行的光学系统可以使用更小的角孔径，但可能需要 DMD 对齐功能，并需要进行照明和投影光学路径角度调整，以校正不同 DMD 之间的标称倾斜角度变化差异。

当四个最亮的阶在衍射模式中包含等量的能量时，就会出现抗火焰条件。建模表明这四个相邻的阶都可以包含总输出能量的大约六分之一（总共约三分之二），其余的三分之一分布在剩余的每个阶中。

使用采用 DLP DMD 技术的激光器 (DLPA037) 中更详细地讨论了基本 DMD 衍射。

对于支持 UVA 的 DMD，各个微镜之间的最大指定倾斜变化为 $\pm 1^\circ$ 。在 UVA 区域，这种倾斜角差可使客户接收到 DMD，从而产生从抗火焰状态到火焰状态的各种情况。因此，系统输出光学元件必须有足够的孔径，至少在抗火焰条件下收集四个最亮的阶。例如，在 363nm 下，10.8 μm 间距器件需要直径至少为 2.7 的角孔径。通过将直径增加到 3.9 $^\circ$ ，采集四到五个阶，建议这样做。这个推荐直径由 $\sin^{-1}(2\lambda/d)$ 计算得出，其中 λ 是波长， d 是像素间距。

相干光源需要额外的设计考虑因素。反射输出会产生一组衍射阶数，而不是单个反射光束。这些阶数都与输入束具有相同的角度范围。因此，几乎没有角度范围的准直光束会产生准直衍射阶数。

输出孔径能够看到一定数量的此类衍射阶数。如果 λ 角度直径小于 $\sin^{-1}(\lambda/d)$ (其中 d 是 DMD 的像素间距)，则只能在输出孔径中捕获一个阶，如图 5-6 的面板中所示。

如果入射照明角度是固定的，则倾斜角的变化不会导致衍射阶数移动，但确实会导致能量分布在两个阶数之间发生变化。因此，如果捕获的阶接近火焰条件，则大部分可用的能量将在此阶中捕获 (图 5-6 中的面板 (a))。如果条件接近抗火焰点，则此小孔径仅捕获输出的一部分 (图 5-6 中的面板 (b))。

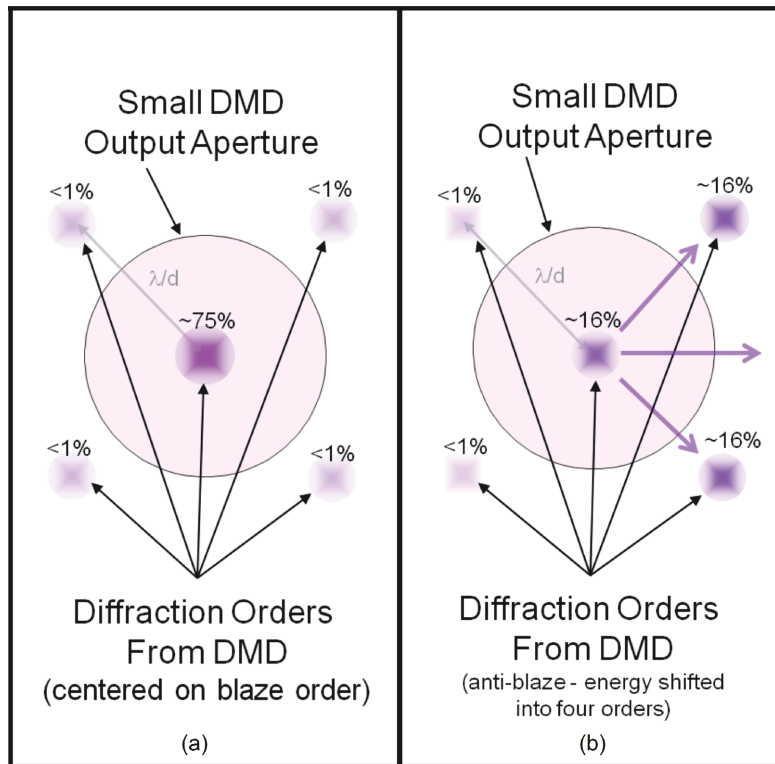


图 5-6. 具有相干照明的衍射阶数

为了在系统设计中提供容差，TI 建议扩展输出孔径以捕获四到五个阶，如图 5-7 中所示。如前面的示例所示，在 363nm 下具有准直光的 10.8μm 像素间距 DMD，大约 2.7° 的最小角直径捕获一个或四个阶，3.9° 捕获四个或五个阶。方程式 3 给出了建议的最小角直径：

$$\sin^{-1}(2 \lambda / d) + \theta_{\text{input}} \quad (3)$$

其中：

- θ_{input} 是输入照明捆绑包的角度范围。

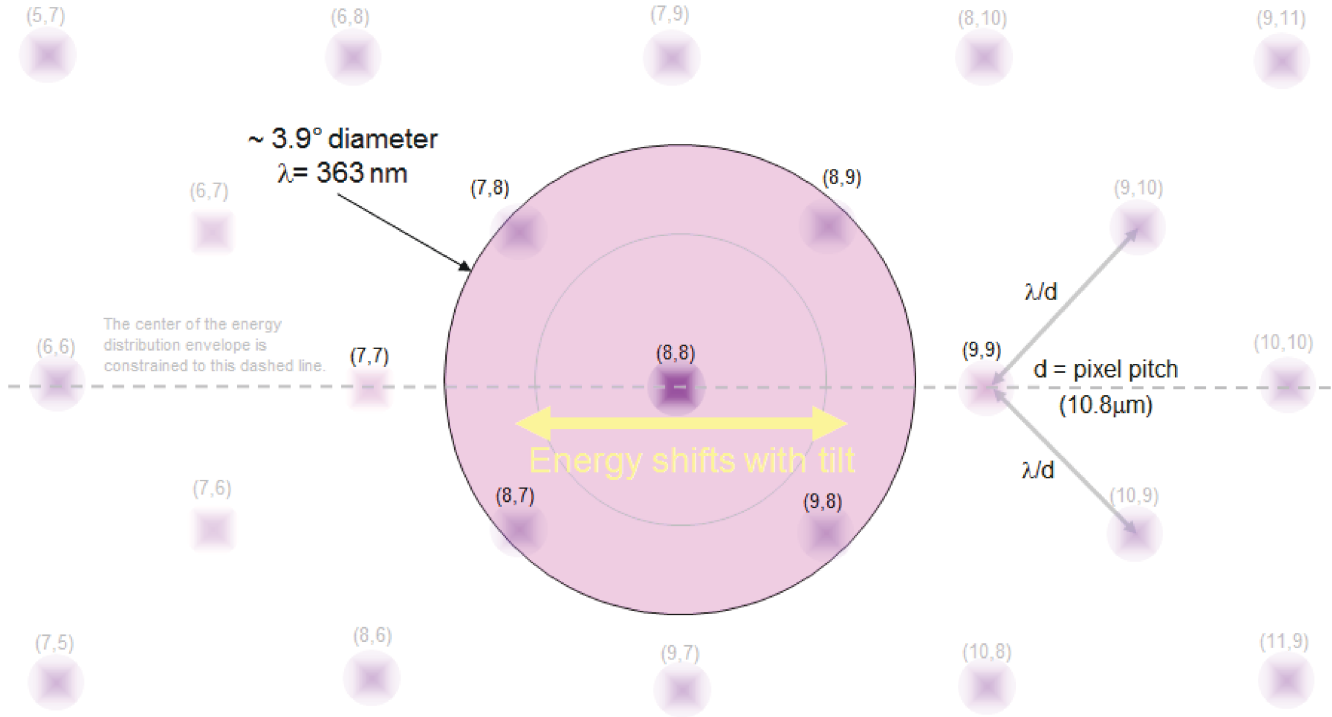


图 5-7. 扩展的输出孔径捕获五个阶

尽管阶不会随倾斜角度的变化而移动，但会随照明角度的变化而移动。如果照明移动了 θ 角度，则输出端的阶数大约移动 $-\theta$ 。因此，TI 建议包含一种将输入照明角度调整 $\pm 2^\circ$ 的机制，从而能够在输出孔径中捕获具有最高强度的四到五个阶。

建立照明角度和投影角度后，由于 DMD 倾斜角的差异，投影 DMD 阶数不得移动。但是、每个阶的功率可能会因 DMD 倾斜角而变化。图 5-8、图 5-9 和图 5-10 展示了特定波长 365 nm 的 7.56μm 间距 DMD 倾斜角 11、12 和 13 度所影响的主要阶的功率和位置。投影孔径的中心显示为 + 符号，投影中心由紫色菱形定义。阶为紫色圆，其中每个圆的面积表示该特定阶中的相对功率量。在确定照明和投影角度并将其固定到位后，请注意随着倾斜角度变化 (11-12-13°)，投影孔径内的阶不会发生变化，但功率会从某些阶移动到其它阶。这说明了采用适当的投影孔径尺寸以更大限度地收集输出功率的重要性，同时考虑 DMD 倾斜角以及照明和投影对齐方式。

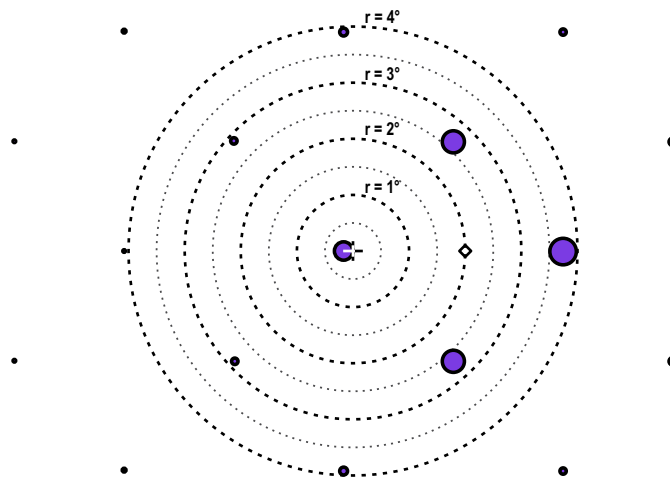


图 5-8. 阶功率图， 11° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ， $7.56\mu\text{m}$ 像素间距

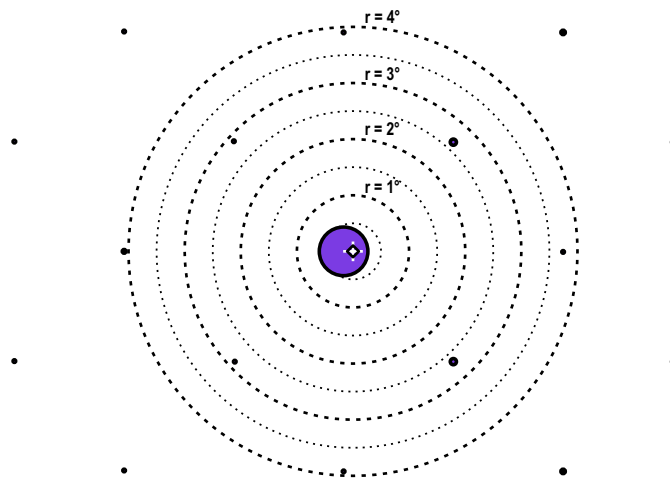


图 5-9. 阶功率图， 12° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ， $7.56\mu\text{m}$ 像素间距

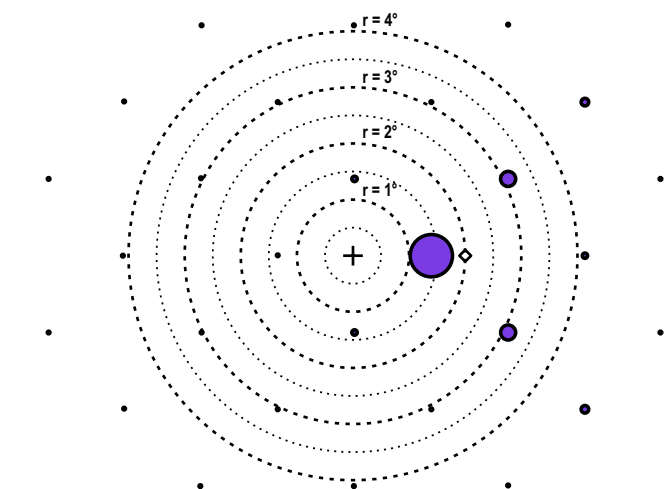


图 5-10. 阶功率图， 13° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ， $7.56\mu\text{m}$ 像素间距

图 5-11、图 5-12 和图 5-13 展示了 10.8 μm 像素 DMD 倾斜角 11、12 和 13 度所影响的主要阶的功率和位置。

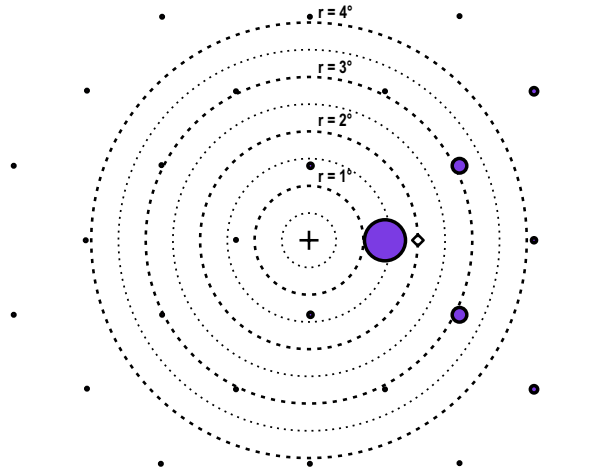


图 5-11. 阶功率图，11° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ，10.8 μm 像素间距

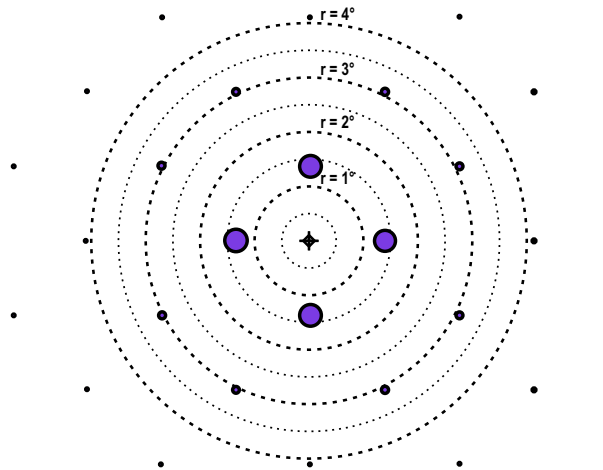


图 5-12. 阶功率图，12° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ，10.8 μm 像素间距

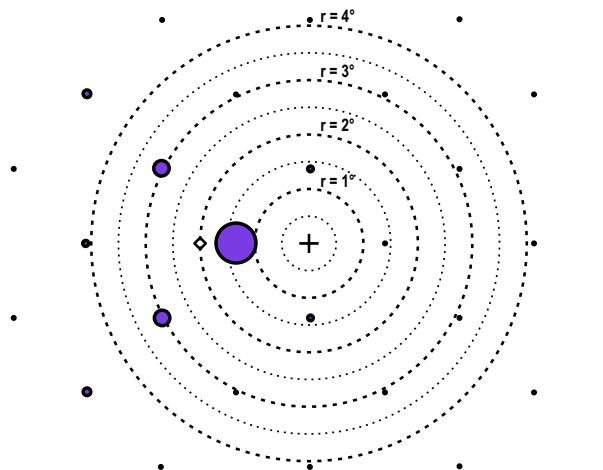


图 5-13. 阶功率图，13° 倾斜角， $\lambda = 365\text{nm}$ ，10.8 μm 像素间距

与非相干情况一样，输出孔径的角度直径设置了可实现的缩小倍数水平的实际限制。例如，在 363nm 波长下，使用准直光的 10.8μm 像素间距 DMD 的最大缩小倍数约为 13.9 倍。如果入射光束具有角度范围，则必须先将直径添加到输出孔径，然后才能确定可实现的缩小倍数。

一般而言，可实现的最大缩小倍数可以通过聚焦光学元件相对于制造表面的 f 数来确定，然后设置到 DMD 的距离，使孔径直径为建议的最小值（请参见方程式 3）。方程式 4 给出了可达到的最大缩小倍数的估计值。

$$\frac{\cot\left(\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d}\right) + \frac{\theta_{\text{input}}}{2}\right)}{2(f/\#)} - 1 \quad (4)$$

其中：

- θ_{input} 是输入照明捆绑包的角度范围。

总之，相干源具有与非相干源相同的两个限制。但是，最小孔径由衍射阶数的角度间距而不是单独的倾斜公差决定，这反过来又限制了最大实际缩小倍数。

6 结语

将采用 DLP 技术的 UV 增强型 DMD 集成到使用 UVA 频谱范围内光源的应用中时，遵守本文概述的建议可以更大限度地提高其性能。

如需了解详情，请参阅以下链接：

- 德州仪器 (TI), [DLP 技术入门](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [使用采用 DLP DMD 技术的激光器](#) 技术白皮书
- 德州仪器 (TI), [TI DLP® 系统设计：光学模块规格](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI), [DLP 应用](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [DLP 应用手册和白皮书](#) 网页

7 参考资料

1. Lin, Pao-Tai, Shin-Tson Wu, Chin-Yen Chang, and Chain-Shu Hsu. Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 411, pp. 243=[1285] - 253=[1295], 2004, *UV Stability of High Birefringence Liquid Crystals*
2. Wen, Chien-Hui, Sebastian Gauza, and Shin-Tson Wu. LIQUID CRYSTALS, VOL. 31, NO. 11, NOVEMBER 2004, 1479 - 1485, *Ultraviolet stability of liquid crystals containing cyano and isothiocyanato terminal groups*

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (January 2020) to Revision B (November 2024)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了指向 <i>TI DLP</i> [®] 系统设计：光学模块规格 应用手册的超链接.....	4
• 添加了指向 <i>TI DLP</i> [®] 系统设计：光学模块规格 应用手册的超链接.....	14

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司