



Benjamin Lee

摘要

直接成像光刻、3D 打印和其他系统通常使用针对可见光光谱深蓝色区域进行优化的光反应材料。本应用报告探讨了使用设计用于在低至 400nm 下运行的 TI DLP® 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 简介.....2

2 散热注意事项.....3

3 占空比注意事项.....3

4 一致性注意事项.....3

5 光学注意事项.....4

6 高倍率缩小系统注意事项.....5

 6.1 非相干源（灯和 LED）.....6

 6.2 相干源（激光）.....8

7 总结.....11

8 参考资料.....11

9 修订历史记录.....11

插图清单

图 1-1. 电磁波谱的可见光谱部分.....2

图 6-1. 典型投影系统光学元件.....5

图 6-2. 投影透镜入射光瞳处的光分布.....6

图 6-3. 小输出孔径.....7

图 6-4. 倾斜变化时的反射照明移动.....7

图 6-5. DMD 输出孔径直径与缩小倍数间的关系.....8

图 6-6. 具有相干照明的衍射阶数.....9

图 6-7. 扩展的输出孔径捕获五个阶.....10

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 简介

超紫色 [UV] 和可见光波长之间的分界线通常被认为是 400nm。波长和光子能量之间的关系由 $E = (hc/\lambda)$ 给出，其中 h 是普朗克常数、 c 是光速、 λ 是光的波长。

该方程表明，光子能量仅取决于波长的倒数，因为分子中的两个数字都是常数。波长越小，每个光子携带的能量就越高。因此，深蓝色光的波长更接近 400nm 这一界限，其每个光子所携带的能量比可见光谱中其他区域的光更多。

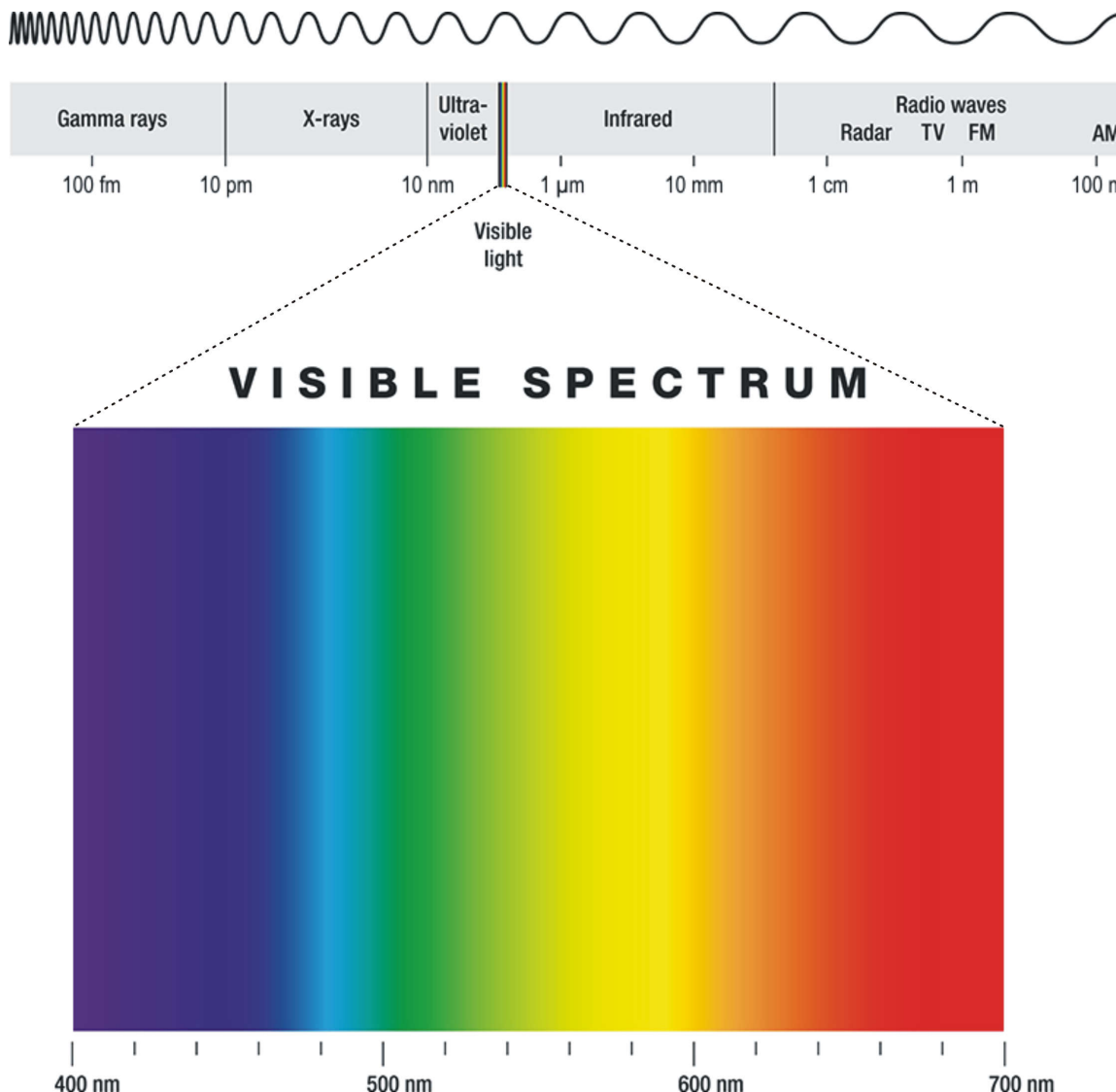


图 1-1. 电磁波谱的可见光谱部分

备注

能量从左侧较高处向右侧较低处逐渐递减。

得益于更高光子能量的应用实例包括直接成像光刻技术和某些类型的 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。通常，光刻胶和树脂材料对较高光子能量具有更强的反应能力，因此可以提高固化速率。

在 DMD 额定工作频率低至 400nm 的数字微镜器件 [DMD] 中实现了出色的设计技术。示例包括 DLP7000BFLP、DLP9500BFLN、DLP6500BFLQ、DLP9000BFLS 和 DLP9000XBFLS。特别是 405nm 的光可以与这种类型的

DMD 一起使用。此波长的发光二极管 [LED] 和激光二极管现在能够以合理的价格购得，因此在使用 405nm 优化材料的系统中很有吸引力。

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铝微镜进行反射，因此与使用有机分子进行调制控制的其他空间光调制器 [SLM] 技术相比，这些器件对更短波长（能量更高的光子）的耐受性要高得多，因为此类分子在暴露于这些较短波长的光下时往往会退化。Ref 1,2

然而，对于光刻和 3D 打印系统而言，较短波长的更高能量光子是理想选择，因此在与 DMD 结合使用时，需要更加关注设计注意事项，本应用手册探讨了重要的设计注意事项。

2 散热注意事项

尽管 A 型 DMD 器件能够在较短的波长下工作，但这些器件并非完全不受影响。在光谱的深蓝色部分（低至 400nm）内工作时，DMD 阵列温度成为一个重要因素。

应将 DMD 阵列的温度保持在 30°C 以下，其中 20°C 至 25°C 为理想范围。这一温度要求可通过被动冷却方式实现，甚至也可采用热电制冷器 (TEC) 等主动冷却方式来达成。对于 A 型 DMD，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 10°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 DMD 在与能量更高的光子配合使用时发挥出色性能。

TI 提供了卓越的应用手册 [数字微镜器件散热注意事项 \(包括脉冲光源\) 应用手册](#)，详细介绍了 DMD 的一般散热注意事项。

3 占空比注意事项

所有应用都受益于在接近 50% 开态/关态占空比的情况下运行 DMD，但这一注意事项在波长较短和温度较高的情况下变得更加重要。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的时间被视为可以忽略不计，在确定占空比时会将其忽略。

DMD 的占空比表示为开态百分比/关态百分比。例如，75% 处于开态、25% 处于关态的像素表示为 75/25。请注意，两个数字的总和始终为 100。

在 50/50 或近 50/50 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。

第一种情况是不知道也未跟踪像素历史记录。只要 DMD 未主动点亮⁽¹⁾，以 50/50 运行 DMD 会将平均值驱动回 50/50。在静态期间以 50/50 运行的时间越长，总体平均值就越接近 50/50。

备注

在制造表面无需使用 DMD 图案或未使用 DMD 图案时，需关闭照明（或切断光源）。**请勿将 DMD 用作主要照明快门，而是在光源处设置快门，如机械快门。**

第二种情况是在跟踪各个像素的历史记录时。在这种情况下，当不主动用于图形化时，像素可以在相同的时间段内以反向占空比运行，之后以 50/50 运行。例如，如果一个像素在运行期间以 62/38 的速度驱动四个小时，那么在静态期间以 38/62 的速度驱动四个小时的平均值为 50/50⁽²⁾。

备注

50/50 平均值是过度简化的值，因为在操作期间照明会加热像素，而操作期间照明关闭会冷却像素。对于高通量系统，需要进行实验以确定应将反向占空比延长多久，或应对反向占空比施加多大权重，才能使残余倾斜恢复至平坦状态。

4 一致性注意事项

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，可以存在火焰或抗火焰条件。

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。

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所有其他阶中。

白皮书《使用采用 DLP® DMD 技术》的激光器中更详细地讨论了基本 DMD 衍射。

各个微镜之间的最大指定倾斜变化为 $\pm 1^\circ$ 。在接近 400nm 时，这种倾斜角差可使客户接收到 DMD，从而产生从抗火焰到火焰的任何条件。因此，系统输出光学元件需要有足够的孔径，至少在抗火焰条件下收集四个最亮的阶。例如，在 405nm 下，7.56 μ m 间距器件需要直径至少为 4.4° 的角孔径。通过将直径增加到 6.2° ，采集四到五个阶，建议这样做。

在系统设计中进一步建议采用照明调节机制，使其能够相对于标称入射角进行 $\pm 2^\circ$ 的调节。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。 $\pm 2^\circ$ 的调节范围可使 405nm 附近波长的最亮级次移入输出孔径内

5 光学注意事项

在放大倍数为一比一或更大的系统中，设计 f 数值小至 $f/2.4$ 的照明和输出光学元件是实用且可取的，因为对输出光瞳进行轻微填充可在光学系统中提供倾斜变化容差。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，即使存在倾斜角变化也可以。

DLP 光学系统的一般注意事项在工具 DLP® 光学设计指南 中讨论。本应用手册的以下各节介绍高倍率缩小系统的注意事项。

6 高倍率缩小系统注意事项

使用 DLP 技术的消费者投影系统通常使用照明设计，如图 6-1 所示。

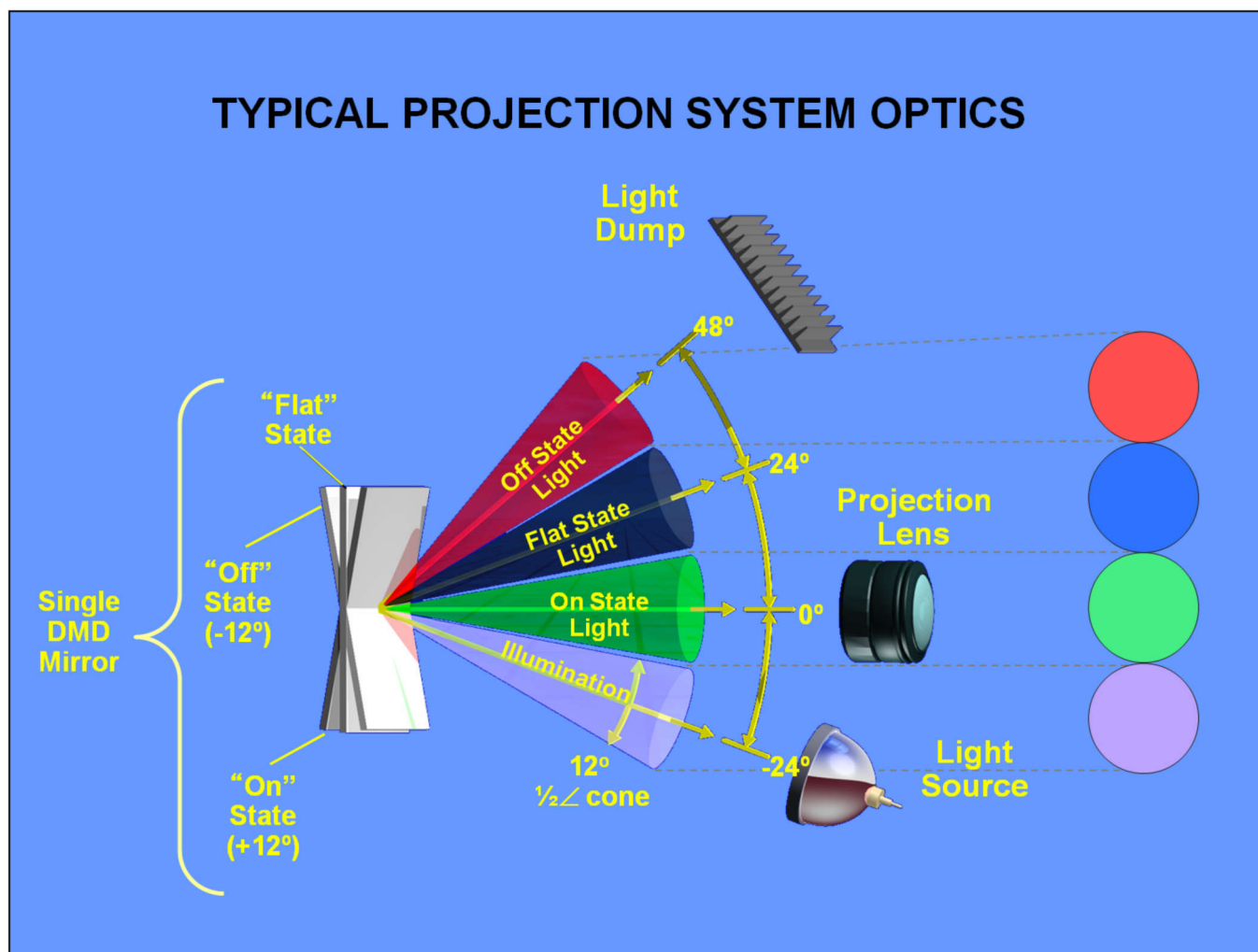


图 6-1. 典型投影系统光学元件

但是，某些光刻和 3D 打印系统可以使用 DMD 阵列图像缩小来处理非常小（低至 $1\mu\text{m}$ ）的特征。图 6-2 显示了相对于传统投影光学系统，此类系统的输出孔径较小。

Typical Projection System vs Small Aperture System

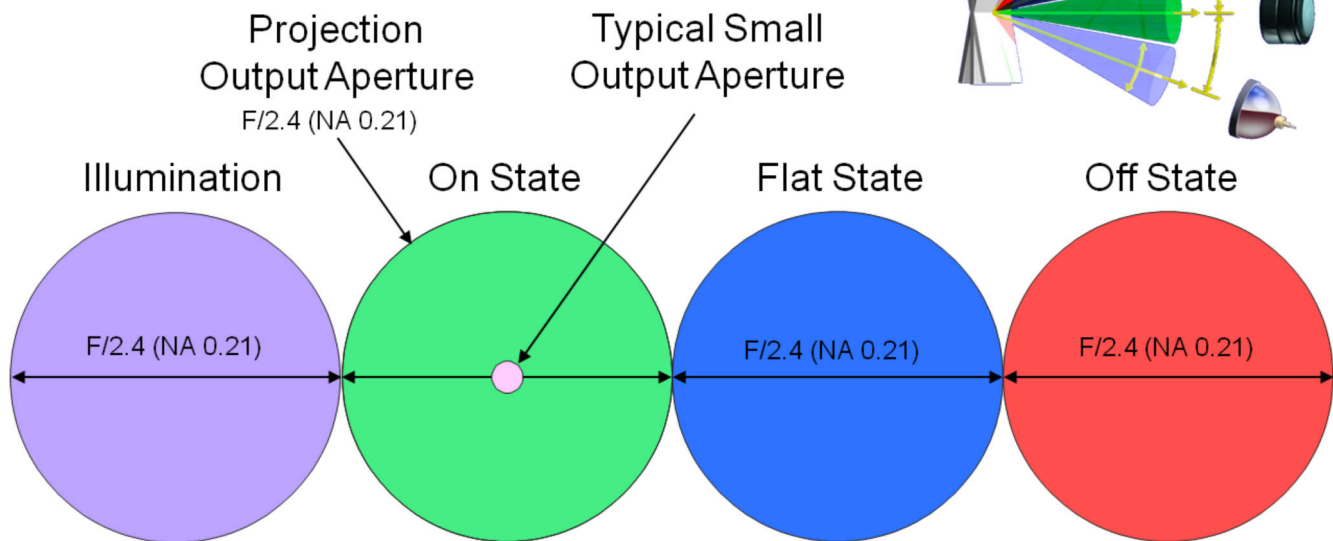


图 6-2. 投影透镜入射光瞳处的光分布

对于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。

6.1 非相干源 (灯和 LED)

对于宽带光源和 LED 光源，当照明光束 (光锥) 的尺寸与 DMD 输出光束相匹配时，微镜倾斜变化可能会导致一些光从侧面溢出或不完全填充输出孔径，如图 6-3 所示。这会导致输出亮度出现意外损失。

备注

请注意，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，该滤波器能几乎完全阻断 400nm 以下的所有波长 (请参阅各个 DMD 的数据表中的规格)。某些 LED 没有低于 400nm 的显著光谱内容，因此无需使用滤波器。

ZOOM in to Small Output Aperture

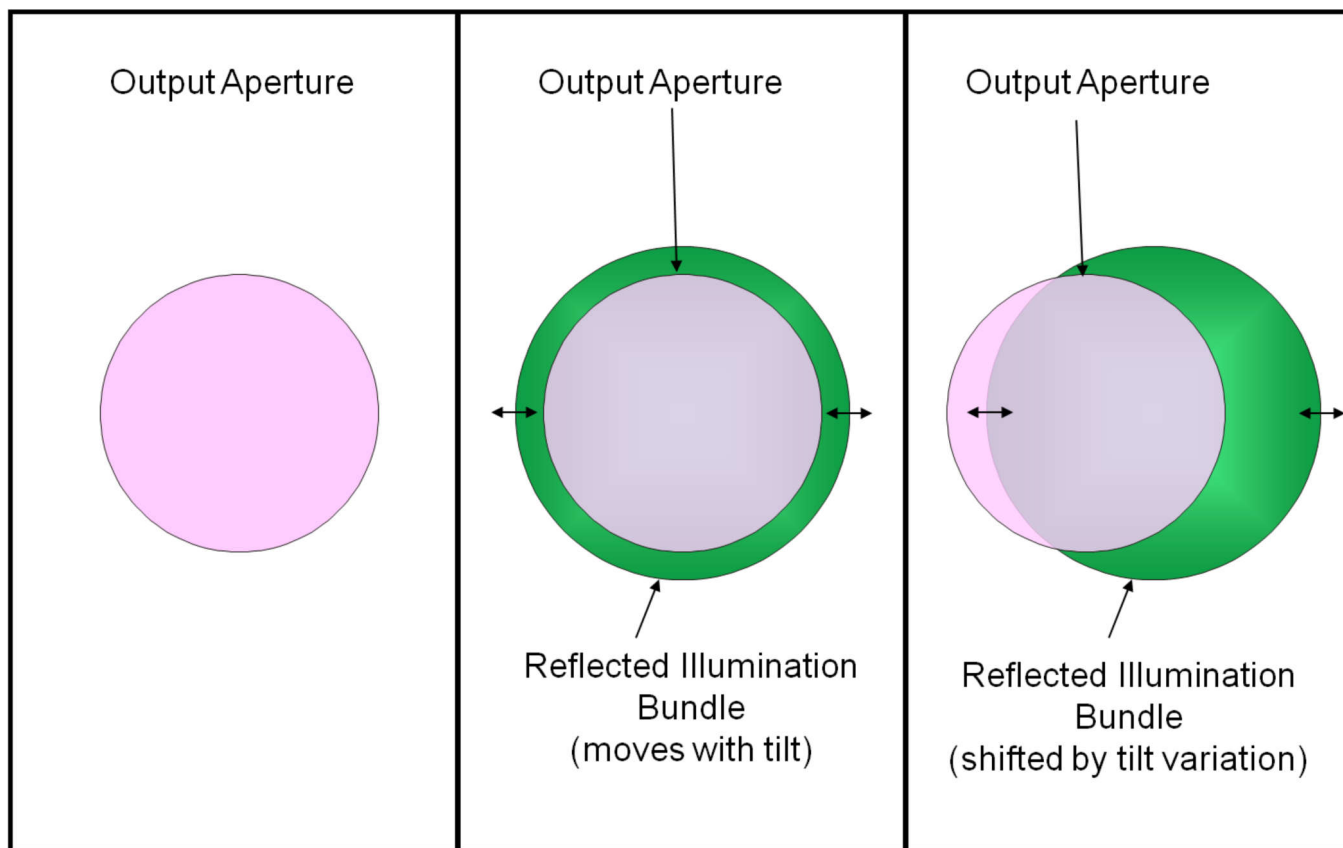


图 6-3. 小输出孔径

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 6-4 中所示：

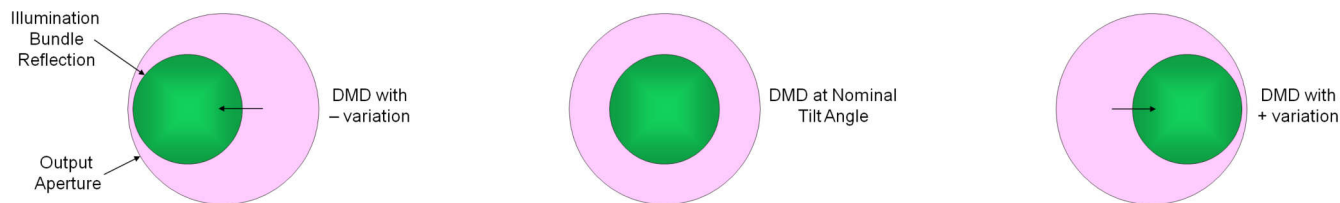


图 6-4. 倾斜变化时的反射照明移动

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角运动的 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 $+2^\circ$)。

因此，为了提供 4° 容差，输出端的最大 f 数值（最小孔径）存在有效限制。即使照明的角度范围数值孔径 (NA) 非常小，孔径具有 $f/14.3$ 等效值，即角直径为 4° 的圆锥。

对于可在此容差范围内达到的缩小倍数，存在实际限值。 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 倍的缩小倍数是最大缩小倍数。图 6-5 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。

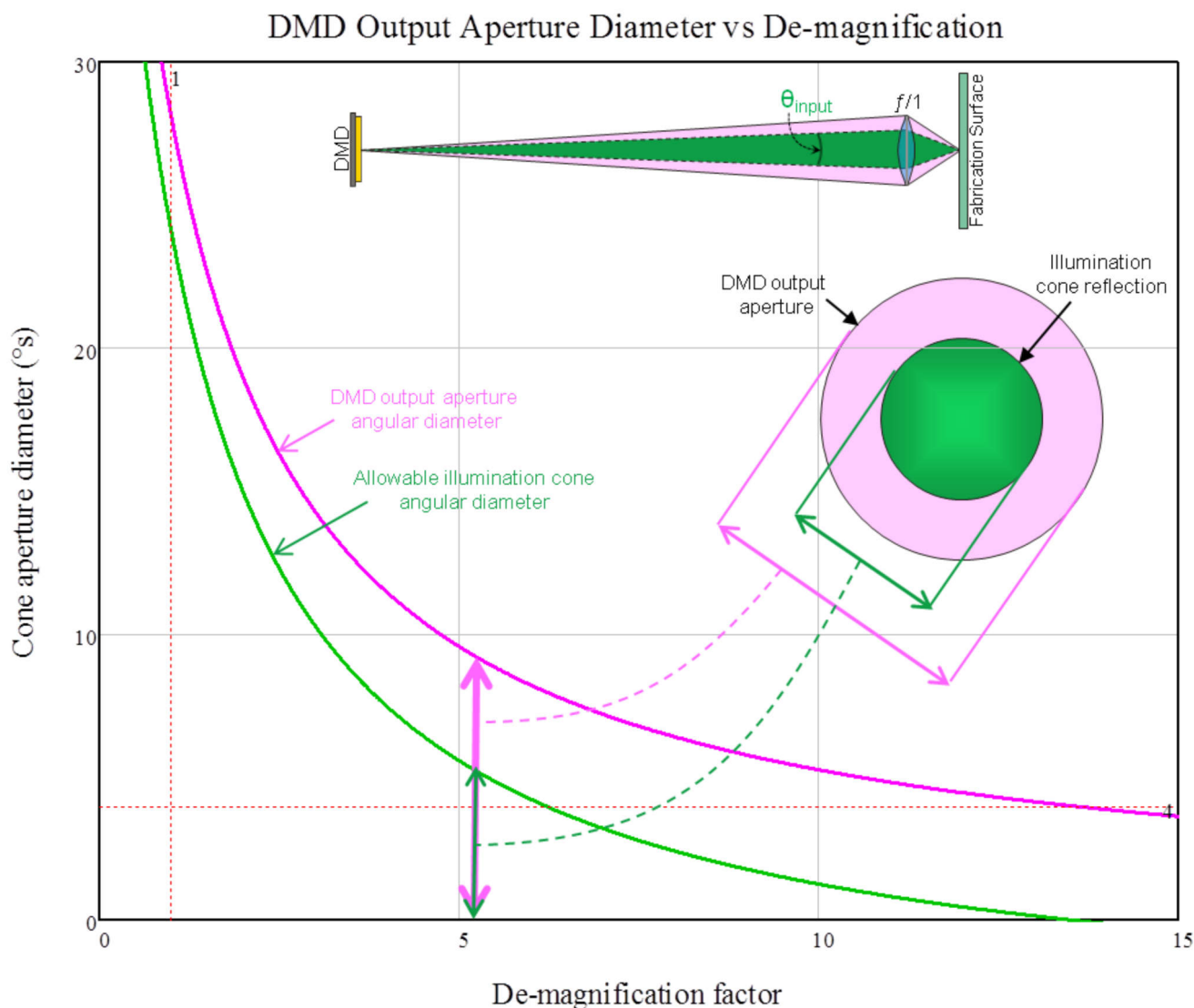


图 6-5. DMD 输出孔径直径与缩小倍数间的关系

对于给定 f 数值，可实现的最大缩小倍数近似值通过以下公式得出：

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

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 数值小于 $f/14.3$ 且缩小倍数不超过 13 倍。实际上，照明束角直径需要保持在几度，允许恢复一些孔径裕度或选择较小的缩小倍数。

6.2 相干源 (激光)

相干源会带来另一个挑战。如前所述，输出仅限于衍射阶数，而不是单一的同质光束。这些阶数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 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一阶中捕获，但如果该条件接近抗火焰点，则此小孔径仅捕获输出的一部分。图 6-6 说明了这一点。

ZOOM in to Small Output Aperture

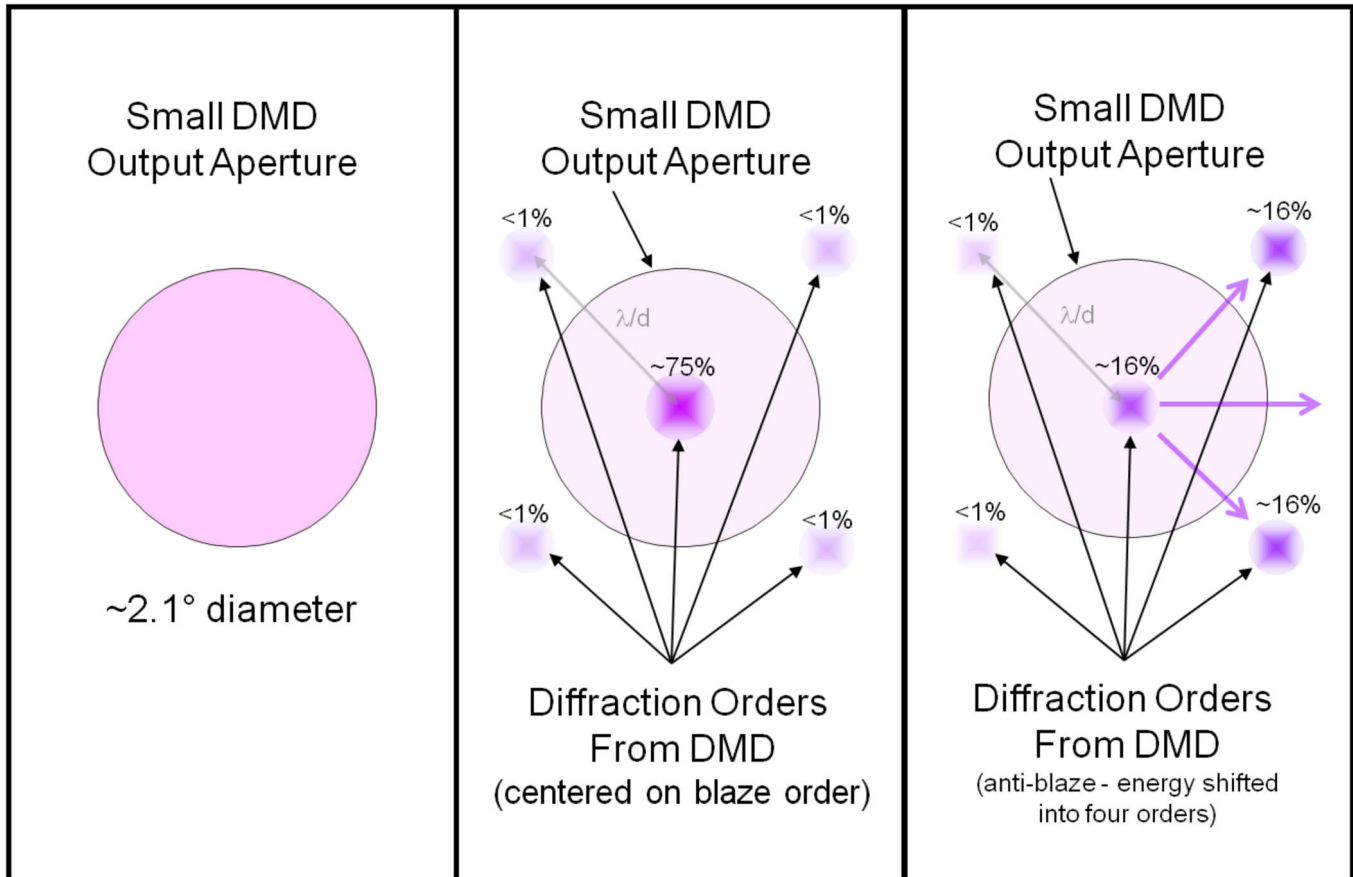


图 6-6. 具有相干照明的衍射阶数

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 6-7 中所示。如之前给出的示例所示，在 405nm 下具有准直光的 7.56μm 像素间距 DMD，大约 4.4° 的最小角直径捕获一个或四个阶，6.2° 捕获四个或五个阶。建议的最小角直径由以下公式给出：

$$2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} \right) + \theta_{\text{input}}$$

其中， θ_{input} 是输入照明捆绑包的角度范围。

Increase Output Aperture to capture 4 to 5 orders

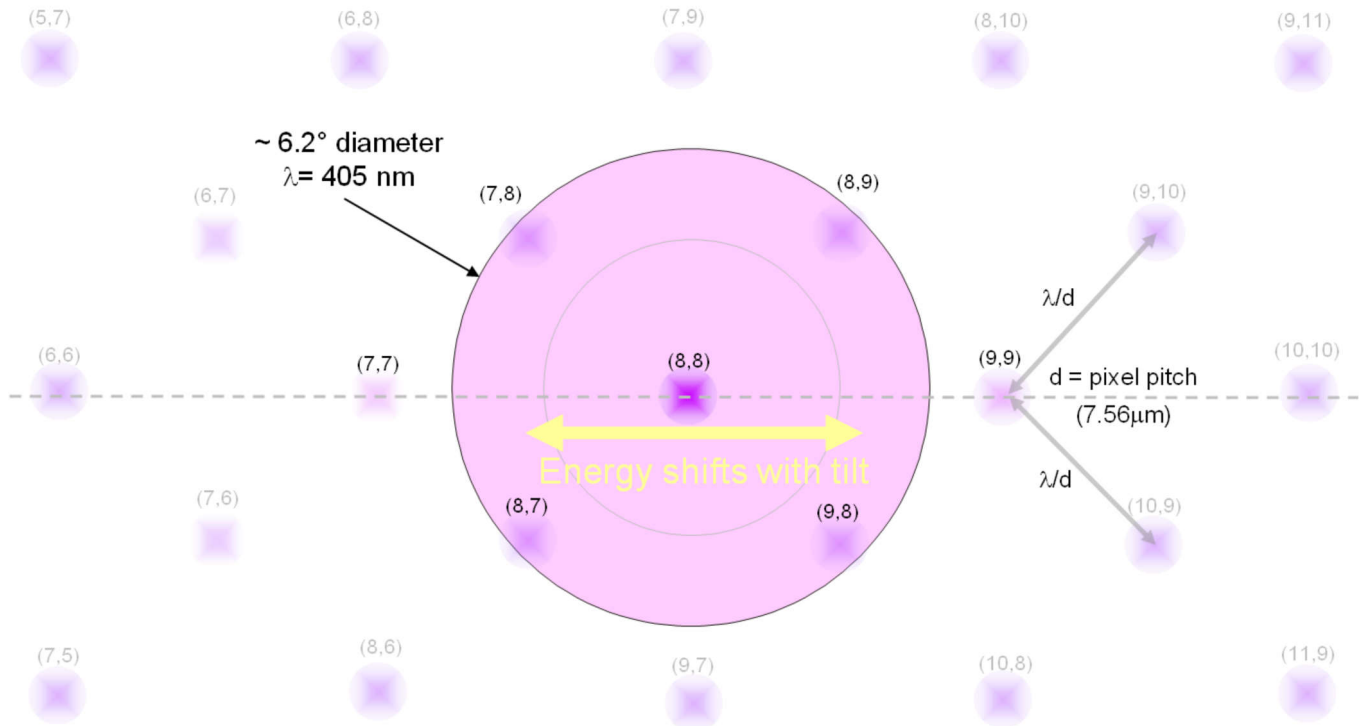


图 6-7. 扩展的输出孔径捕获五个阶

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。

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 405 nm 波长下，使用准直光的 $7.68 \mu\text{m}$ 像素间距 DMD 的最大缩小倍数约为 8.3 倍。如果入射光束具有角度范围，则需要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： $2 \cdot \sin^{-1}(\lambda/d) + \theta_{\text{input}}$ 。以下公式给出了可实现的最大缩小倍数的估算值：

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

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。

7 总结

用户可根据概述的注意事项率先将 DLP 技术集成到使用低至 400nm 光源的应用中。DLP 技术正在帮助推动直接成像光刻、3D 打印和其他需要更高能量光子新兴终端设备的发展。让卓越的 DLP 先进光控制推进应用进入未来。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI), [DLP 技术入门](#)
- 德州仪器 (TI), [数字微镜器件散热注意事项 \(包括脉冲光源\)](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI), [使用采用 DLP® DMD 技术的激光器](#) 技术手册
- 德州仪器 (TI), [DLP® 光学设计指南](#)
- Mol. Cryst.Liq. Cryst., Vol. 411, pp. 243=[1285] – 253=[1295], 2004, “UV STABILITY OF HIGH BIREFRINGENCE LIQUID CRYSTALS” – Lin, Wu, Chang and Hsu.
- LIQUID CRYSTALS, VOL. 31, NO. 11, NOVEMBER 2004, 1479 – 1485, “Ultraviolet stability of liquid crystals containing cyano and isothiocyanato terminal groups” – Wen, Gauza, & Wu.

9 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 * (November 2014) to Revision A (August 2025)	Page
• 更新了摘要.....	1
• 向 A 类 DMD 示例列表中添加了 DLP7000FLP、DLP9500FLN 和 DLP9000XFLS DMD.....	2
• 明确了讨论适用于 A 型 DMD。.....	3
• 添加了有关空闲占空比运行的注释，该运行是为了将残留倾斜恢复到接近平坦状态。.....	3
• 更新了光学设计指南的链接.....	4
• 澄清了讨论适用于 A 型 DMD。.....	6

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司