

Technical White Paper

使用采用 **DLP®DMD** 技术的激光



摘要

可以将 TI DMD 技术视为二维衍射光栅。本应用手册详细介绍了 DMD 衍射、如何实现闪耀效应并发现有用的方程。本文档探讨了 DMD 的二维衍射特性，详细说明了它们在光学应用中的优势和面临的挑战。

内容

1 简介.....2

2 了解衍射 - 直观的视图.....2

 2.1 单缝衍射.....2

 2.2 多缝衍射.....3

 2.3 反射衍射光栅.....3

 2.4 扩展到二维光栅.....4

 2.5 将 DLP®DMD 作为二维光栅.....5

 2.6 闪耀方程.....7

3 优势和考虑事项.....8

4 结语.....8

5 参考资料.....8

6 修订历史记录.....8

插图清单

图 2-1. 衍射级次的位置.....3

图 2-2. Sinc 包络中心的位置.....4

图 2-3. 闪耀效应 (第 2 级)4

图 2-4. 二维 Sinc 包络 (灰度)5

图 2-5. 三维半球级次视图.....5

图 2-6. 级次俯视图 (映射空间)5

图 2-7. DMD 的编号级次和包络中心视图.....6

图 2-8. 入射角、倾斜角和闪耀效应之间的关系.....6

商标

DLP® is a registered trademark of Texas Instruments Incorporated.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

DLP® 数字微镜器件 (DMD) 长期以来一直用于商业和消费类应用的视频投影系统。DMD 还是一款极具吸引力的空间光调制器 (SLM)，适用于可在可见光谱内外使用单色或相干光的应用。

DMD 具有一些独特的优势和考虑事项，必须在应用中了解这些方面，尤其是在将相干或半相干光源与 DMD 一起使用时。当与此类光源一起使用时，DMD 作为二维周期性排列微镜阵列的特性不容忽视，因此，可以了解甚至利用衍射效应。

本白皮书旨在帮助您直观地了解 DMD 的二维衍射属性以及由此带来的优势和挑战。

2 了解衍射 - 直观的视图

2.1 单缝衍射

考虑从单个狭缝衍射。假设狭缝的长度远大于狭缝的高度 a ，因此不考虑沿狭缝的高度。假设 D 到“屏幕”的距离比狭缝宽度大得多。如果入射光是单色平面波，那么特定角度下狭缝出射光将发生相长干涉，而在其他角度会发生相消干涉，屏幕上会出现明暗条纹。这在[单缝衍射](#)中进行了说明。

备注

如果狭缝平面的法线方向（垂直于屏幕）为 0 度，且以狭缝中心为原点，则屏幕的光强分布与 $\left(\frac{\sin(U \times \sin(\theta))}{U \times \sin(\theta)}\right)^2$ 成正比。这只是参数为 U 的“Sinc”函数 $(U \times \sin(\theta))$

现在，让我们将平面屏幕替换为以狭缝为中心的圆柱形屏幕，使到屏幕的距离为 R ，即半圆的半径。然后，对于与屏幕的每个角度，我们可以投影回狭缝所在的平面，这样我们现在就可以将每个角度映射到直线坐标 x 上，以便通过 $x = R \times \sin(\theta)$ 计算出与原点的距离¹。为简单起见， $R = 1$ ，使得 $x = \sin(\theta)$ 。通过这种角度空间映射， x 的范围为 $[-1$ 至 $1]$ ， θ 的范围为 $[-90^\circ$ 至 $90^\circ]$ 。超出该范围的所有值均为非物理值。

波段的强度分布与以下方程成正比

$$\text{Sinc}^2\left[\pi \frac{a}{\lambda} \sin(\theta)\right] \quad (1)$$

而所选映射变为

$$\text{Sinc}^2\left[\pi \frac{a}{\lambda} x\right] \quad (2)$$

2

为了确定进入每个对向角的光量，必须计算进入狭缝的所有光。剖面函数适用于任意 x ，

$$-\infty \leq x \leq \infty \quad (3)$$

但如前所述

$$-1 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

x 范围受限。

当对远场求积分时，

$$A \int_{-1}^1 \text{Sinc}^2\left[\pi \frac{a}{\lambda} (x - x_i)\right] dx = \Phi(\text{total flux at the slit}). \quad (5)$$

¹ 参见 Harvey-Shack 余弦空间

² 当 $\frac{a}{\lambda} = k$, ($k \neq 0$) 时，此函数为零，其中 k 是一个整数，因此最小值之间的间距为 $\Delta x = \frac{\lambda}{a}$ 。

所有光线都进入角度限定为 $\pm 90^\circ$ 的空间内。这种归一化可以确定给出每个角度光强的比例常数 A 。 $\pm 90^\circ$ 外所有角度的光强都必须为零，因此，全波段强度的积分计算结果为 A 。

2.2 多缝衍射

如果用户引入多个相同的狭缝，使得从狭缝中心到狭缝中心的距离为“ d ”，并且如果狭缝数量非常大，那么，由于狭缝之间的相位关系，光会被限制在非常窄的衍射级次上。这些级次位于： $\sin(\theta) = m \frac{\lambda}{d}$ ，其中 m 是一个整数³）。

改变光线的入射角时，级次中心会随入射角变化而偏移，表现为“滑动效应”。换言之，第 0 级会移动，并且也位于 $(\theta_r = -\theta_i)$ 。现在，级次位于： $\sin(\theta) = m \frac{\lambda}{d} - \sin(\theta_i)$ 或 $x = m \frac{\lambda}{d} - x_i$

所得到模式的显著特征在于，这些级次的相对强度包络只是单个狭缝的强度轮廓。请注意，这是一个包络。光仅出现在级次位置，但相对强度可通过 sinc^2 包络在相应级次位置的高度来获得。单击以下链接，可了解详情：[多缝衍射](#)

由于级次和包络随着入射角的变化一起移动，第 0 级和 sinc^2 包络的峰值会同步移动。这意味着第 0 级吸收的能量比任何其他级次更多。所吸收能量的多少取决于狭缝宽度“ A ”与间距“ d ”的比值。

同样，必须计算所有光，但现在由于离散级次，方程变为 $A \sum_m \text{Sinc}^2\left(\pi \frac{\lambda}{d} (m \frac{\lambda}{d} - x_i)\right) = \Phi$ （代表所有级次），使得 $-1 \leq (m \frac{\lambda}{d} - x_i) \leq 1$ 。

换句话说，只有位于实际空间 $[\pm 90^\circ]$ 中的那些级次才可以吸收光。

2.3 反射衍射光栅

考虑一个反射光栅，用镜面取代狭缝。入射光（平面波）现在与反射光位于同一侧。前面讨论的所有内容都适用于光栅，但现在我们额外引入了一个光控制度。与前述相同，级次位置由光栅间距、波长和入射角决定。第 0 级只遵循相对于光栅表面法线的镜面反射 $(\theta_r = -\theta_i)$ 。

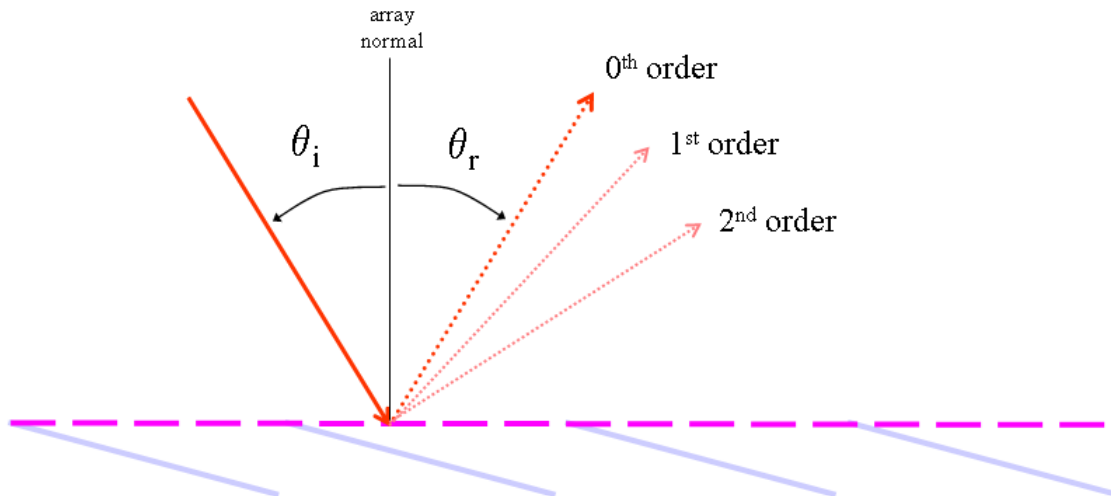


图 2-1. 衍射级次的位置

但是现在，沟槽面法线可设计为不与光栅法线共线。结果是， sinc^2 包络的中心现在与第 0 级解耦。现在，包络的中心指向各个沟槽面的镜面反射方向，而不是锁定到第 0 级。[即，相对于沟槽面法线， $(\phi_r = -\phi_i)$]

³。整数“ m ”称为衍射级次，可以是负数，也可以是正数。给定“ m ”的级次称为“第 m 级”

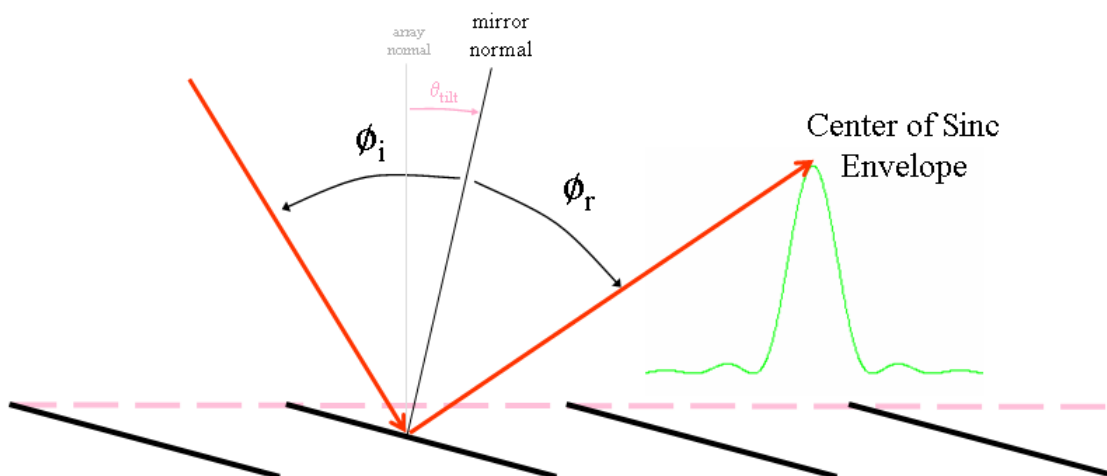


图 2-2. Sinc 包络中心的位置

当入射角和沟槽倾斜角匹配，使得 sinc^2 包络中心（峰值）与某一个级次对齐时，该级次称为“闪耀级次”。大部分能量都被引导到“闪耀”级次。⁴ 当包络中心位于两个级次之间时，能量会分散到多个级次。结果是，没有一个级次能吸收到大部分光。这种情况通常称为“非闪耀”。

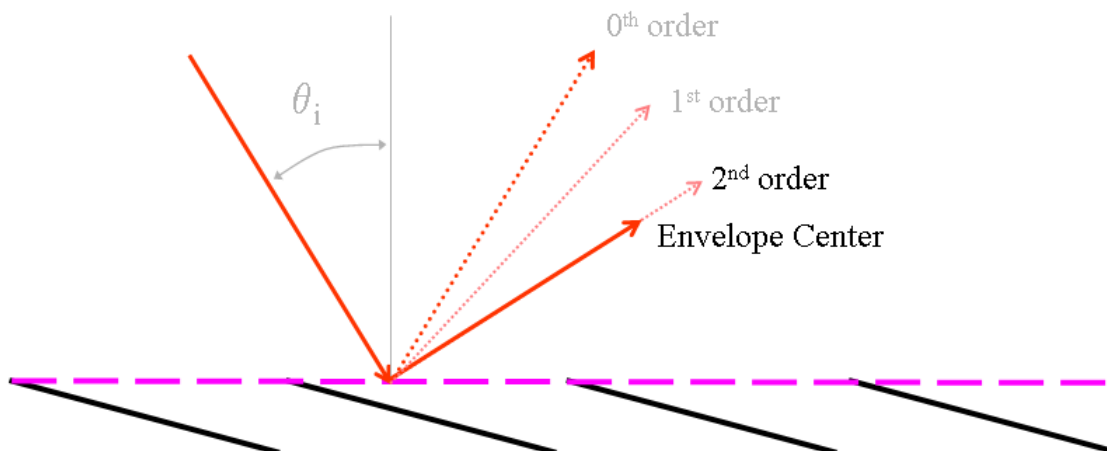


图 2-3. 闪耀效应（第 2 级）

第 0 级的位置仅取决于入射角，而所有其他级次则取决于入射角、光栅间距和波长。类似地，Sinc 包络峰值的位置仅取决于入射角和沟槽面的倾斜角，但该包络的零点位置则取决于狭缝的宽度和波长。结果是，当所有 $m \neq 0$ 时，一个波长仅在给定级次上闪耀。

请注意，只有第 0 级和包络峰值会随着入射角的变化而以几何形状移动。所有其他级次在映射空间中与第 0 级等距。这意味着当我们更改入射角时，如果沟槽倾斜角不是 0，则非零级次会相对于 Sinc 包络峰值进行移动。因此，在“非闪耀”布局中，可更改入射角，尽可能使其中一个级次与 Sinc 包络峰值对齐，即会实现“闪耀”效应。

2.4 扩展到二维光栅

了解一维光栅衍射后，我们可以进一步了解二维。我们只考虑具有正交双槽系统的光栅。我们使用新的维度，使用 a_x 和 a_y 代表镜面尺寸（微镜），使用 d_x 和 d_y 代表光栅间距。

⁴ 当实现闪耀效应，使得入射光和目标级次共线时，该效应称为“Littrow”闪耀。在该情况下，允许将同一光学元件用于目标级次的输入和输出。

现在，级次不再是线，而是，由于级次在两个维度上被限制到特定方向，因此级次将成为映射空间上的点。这些级次位于 $\left[m\frac{\lambda}{d_x}, n\frac{\lambda}{d_y}\right]$ ，其中 (0,0) 级次位于镜面光栅反射处，而 $\text{Sinc}^2\left[\pi\frac{a_x}{\lambda}(x - x_i)\right]\text{Sinc}^2\left[\pi\frac{a_y}{\lambda}(y - y_i)\right]$ 包络以镜面反射为中心。可以在以下位置找到显示二维（无倾斜）模式的链接：[二维光栅](#)

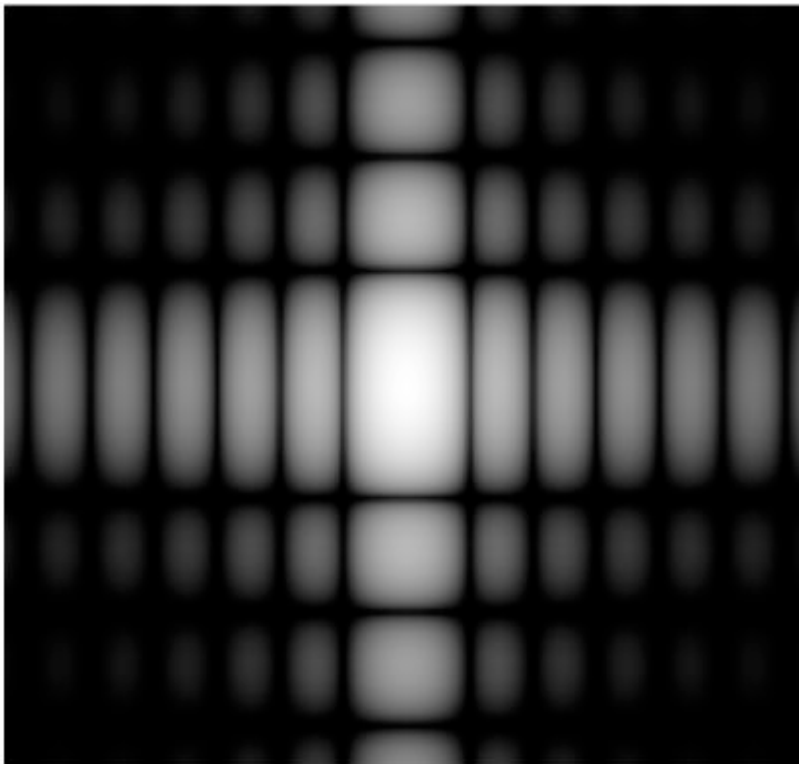


图 2-4. 二维 Sinc 包络（灰度）

与前述相同，必须计算射入阵列的所有光。一些光在填充因子中丢失，但剩余的光必须进入真实空间。与一维案例一样，我们可以通过重整化来确定一组给定几何形状、波长和入射角，进入每个级次的光。

2.5 将 DLP®DMD 作为二维光栅

DMD 采用方形微镜，因此 $a_x = a_y$, $d_x = d_y$ ，在这里，我们只引用"a"和"d"。此外，该微镜会围绕轴倾斜 ($\pm \theta_{\text{tilt}}$)，该轴在像素上沿对角线运行 a。结果是包络可以集中的唯一级次是 $m = n$ 级次。

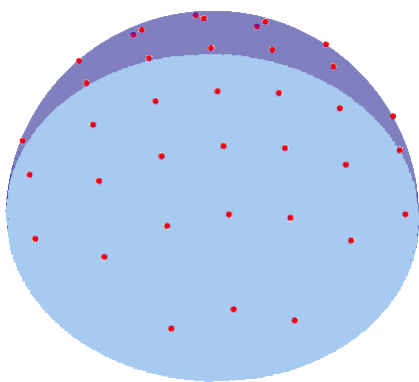


图 2-5. 三维半球级次视图

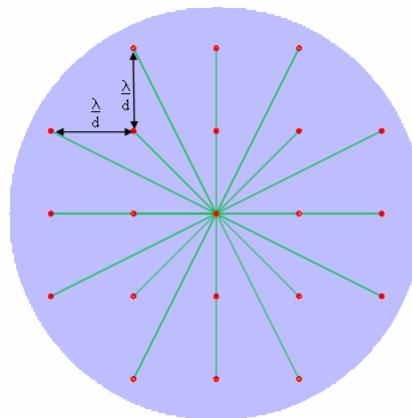


图 2-6. 级次俯视图（映射空间）

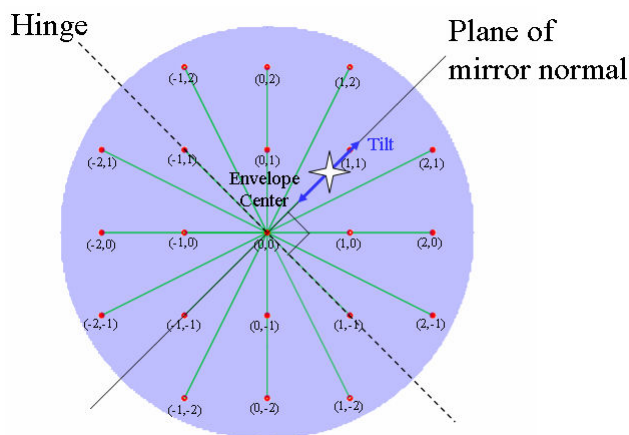


图 2-7. DMD 的编号级次和包络中心视图

对于大多数应用而言，目标是排列几何形状，以便针对目标波长，确保包络中心与一个级次对齐。对于 DMD，镜间距和倾斜角是固定的。但是，可尝试移动入射角，以便针对给定 (n,n) 级次实现闪耀效应。在下图中， (n,n) 级次称为第 n 级。下图展示了入射角、倾斜角和闪耀之间的关系。

请注意，沿着这一行 $x = y$ ，这样，包络函数就会导致 sinc^4 衰减。这意味着，当 DMD 从“通带”切换到“阻带”时，先前处于闪耀状态的级次强度会表现出优异的消光特性。

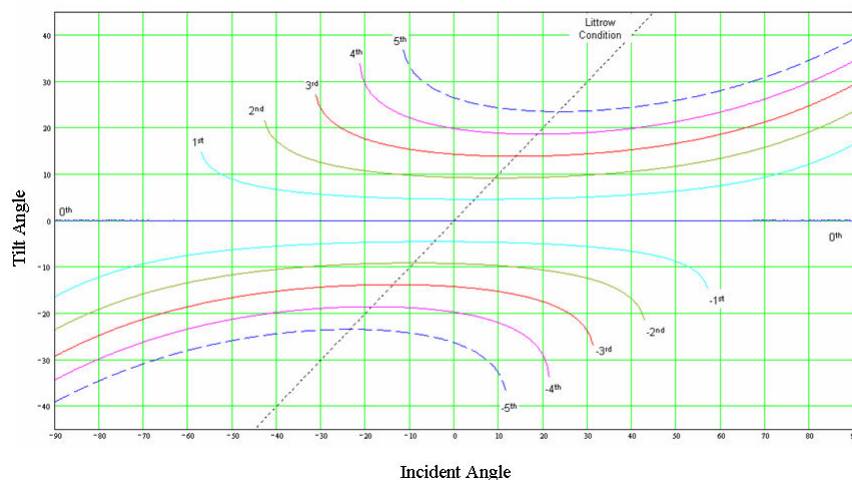


图 2-8. 入射角、倾斜角和闪耀效应之间的关系

备注

(n,n) 级次在此图中简称为第 n 级。

请注意特殊闪耀效应（由虚线对角线表示），其中入射角和倾斜角相同。这称为 Littrow 效应，当对入射和出射光使用相同的光学元件时，这是有利的。

2.6 闪耀方程

倾斜角

可使用以下方程来创建闪耀图表：

$$\theta_{\text{tilt}}(n, \lambda, d, \theta_i) = \frac{1}{2} \left(\text{asin} \left(n \frac{\lambda}{d} \sqrt{2} - \sin(\theta_i) \right) + \theta_i \right) \quad (6)$$

其中 n 是 (n,n) 级次的整数阶数， λ 是波长， d 是像素间距， θ_i 是相对于 DMD 阵列法线的入射角。

闪耀图表可于确定入射角的范围，以便在给定倾斜角范围内产生第 n 级闪耀。并非所有参数组合都可能出现闪耀效应。如果方程的实解不存在，则给定参数不可能出现闪耀。

抗闪耀

还可以使用 $n + \frac{1}{2}$ 抗闪耀曲线的值来进行绘制。当包络峰值落在四个相邻级次的中间时，会发生抗闪耀，使得四个级次均匀共享能量。这四个级次合起来的能量比一个闪耀级次的能量少得多。

入射角

DMD 具有规定的倾斜角加或减指定范围，可使用以下方程计算出出现闪耀效应时的入射角 (θ_i)：

$$\theta_i(n, \lambda, d, \theta_{\text{tilt}}) = \theta_{\text{tilt}} - \text{acos} \left(n \frac{\lambda}{d \sqrt{2}} \times \frac{1}{\sin(\theta_{\text{tilt}})} \right) \quad (7)$$

其中 n 是 (n,n) 级次的整数阶数， λ 是波长， d 是像素间距， θ_{tilt} 是 DMD 像素的指定倾斜角。如果方程的实解不存在，则给定参数不会出现闪耀效应。

Littrow 闪耀

当入射光和反射光穿过相同的路径时，这称为 Littrow 效应。当这种情况还与闪耀同时发生时，会发生 Littrow 闪耀。因此，入射角和倾斜角重合，我们将其标记为 θ_{Littrow} 。对 Littrow 闪耀使用此方程：

$$\theta_{\text{Littrow}}(n, \lambda, d) = \text{asin} \left(\frac{1}{2} \left(n \frac{\lambda}{d} \sqrt{2} \right) \right) \quad (8)$$

其中 n 是 (n,n) 级次的整数阶数， λ 是波长、 d 是像素间距。

3 优势和考虑事项

与相干光一起使用 DMD 时会导致衍射，因此必须考虑这些影响，但衍射在许多应用中也具有一些优势。其中一些优势包括：

- 在大波长 (IR) 下：
 - 闪耀效应对倾斜角的生产变化相当不敏感。
 - *通带* 和 *阻带* 闪耀级次在二维 Sinc 包络的对角上分离，从而提供从 *通带* 到 *阻带* 的出色消光比。
 - 由于光被分离成离散级次，因此很容易制造仅收集目标级次的光学元件。
- 在小波长 (UV) 下：
 - 通常可以通过更改入射角 (小于 ± 2 度) 来完成调优
- 如果输入射束已准直，则各个级次也会准直 (即这些级次保留输入射束的特性)。

在将 DMD 与由衍射性质导致的相干光一起使用时，还需考虑一些特殊事项：

- 对于给定波长和像素间距，衍射级次的方向分布仅由入射角决定 (翻转微镜不会移动它们)。
- 衍射级次的强度包络由微镜的形状 (DMD 的平方) 决定，因此不能任意消除单个级次，而不影响所有其他级次。

4 结语

DLP®DMD 是一款极具吸引力的空间光调制器，适用于相干光应用。我们器件的反射性质支持使用该器件吸收的少量光，来调制大量光能。

要了解有关 DLP DMD 技术的更多信息，请单击下一节中的链接。

5 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)，[使用低至 400nm 的 TI DLP® 技术的系统设计注意事项](#)应用手册
- 德州仪器 (TI)，[DLP® 光学设计指南](#)

6 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 * (June 2013) to Revision A (August 2025)	Page
• 增加了 闪耀方程 一节.....	7
• 更新了了解详情链接.....	8

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