

User's Guide

DMD 衍射效率计算器



摘要

DMD 衍射效率计算器能对系统中的衍射能量进行建模。该系统中已设定输入和输出光学参数，可获得 DMD 衍射模式和衍射效率。基础计算采用非同轴标量衍射理论，可模拟 DMD 的衍射效应。该计算器是利用用户友好型 MATLAB GUI 来实现的，用户可以在其中为特定的光学和波长设计输入 DMD 参数，从而生成定制化结果。GUI 简化了用户的衍射建模，用户只需提供 DMD 特定的光学和波长设计参数即可。了解和设计衍射效率，可提高系统性能。

备注

DMD 衍射效率计算器得出的模拟结果通常会高于实际测量数据。该脚本与测量数据具有良好的相关性，可用于理解衍射效率的变化趋势。该脚本采用了完美的 DMD 系统，而实际的 DMD 则会有尺寸误差和缺陷。用户应当在实际系统中测量衍射效率，而不能仅仅依赖该脚本来确定衍射效率。

内容

摘要	1
1 DMD 衍射效率计算器的功能	2
2 安装和设置	2
3 输入参数	3
3.1 像素模型 (DMD 微镜)	3
3.2 参数扫描	3
3.3 波长	3
3.4 照明入射角	4
3.5 倾斜角	4
3.6 f/f ₀ (照明和投影)	5
3.7 增强滑块	5
3.8 衍射能量图	6
3.9 阵列尺寸	7
3.10 输出文件名	7
3.11 平均衍射效率和明视衍射效率	8
3.12 切趾	8
3.13 运行仿真	8
4 坐标系	8
5 示例	11
5.1 高 F/数照明	12
5.2 不匹配的照明和投影 F/数	14
5.3 悬臂与扭转具有相同的像素帧宽	15
5.4 侧面菱形衍射模式	16
5.5 切趾	17
6 参考资料	18
7 修订历史记录	18

1 DMD 衍射效率计算器的功能

计算器背后用于计算 DMD 衍射模式和光学设计效率的 MATLAB 代码利用非同轴标量衍射理论，如 Dr. James Harvey 所演示[1]。这种方法近似于更严格的电磁 (EM) 方法，并且与测量结果非常吻合。对于接近镜片尺寸的较长波长，其精度会降低，可能需要更严格的方法[1]。在设计基于 DMD 的光学系统以正确处理散射效应时，使用该模型非常重要。

备注

当波长接近镜片尺寸阶数时，模型的精度会降低。

用户输入关键的 DMD 和光学参数，然后将这些参数转换为傅里叶变换空间中的方向余弦。该方法通过照明锥角迭代，并从每个离散采样位置发射平面波。DMD 的行为与 2D 闪烁衍射光栅类似。当平面波与 DMD 相互作用时，会在每次的波相互作用时生成一系列衍射阶数。然后获取傅里叶变换平方的幅度，并为每个入射波存储所产生的衍射模式。模型在波长和源范围内无条理地进行积分。衍射效率根据投影透镜孔径内的分数功率计算得出。输出与输入光功率的比率被视为衍射效率。

备注

有关 DLP DMD 衍射效率的更多信息，请参阅 [DLPA037](#)。

应用程序完成每次计算后，将显示各种输出。2D 和 3D 的衍射模式与衍射效率图一起显示。将创建一个 **excel** 文件，其中包含整个波长光谱范围内存储的衍射效率值。显示平均衍射效率并根据明视曲线进行加权，然后将输出记录为明视衍射效率。如果用户选中“Save Diffraction Pattern Data?”复选框，则可以将衍射模式能量分布保存到 **excel** 文件中。

2 安装和设置

该应用程序在 MATLAB 中构建，然后利用 MATLAB Runtime 转换为独立的可执行文件。无需 **MATLAB** 许可证。通过导航至 <https://www.mathworks.com/products/compiler/mathlab-runtime.html> 安装 MATLAB Runtime。点击该链接后，下载 R2024a (24.1) 版本的 MATLAB Runtime。下载该版本的 MATLAB Runtime 后，导航到已下载的文件夹中并选择 **setup.exe** 文件来安装 MATLAB Runtime。

完成此操作后，用户先选择“DMD Diffraction Efficiency Calculator vx.exe”文件，再打开并运行该应用程序。为了让应用程序能计算明视衍射效率，“photopic.txt”文件需要与衍射效率计算器位于同一目录中。此应用程序使用 **photopic.txt** 文件，计算明视衍射效率。

备注

用户只需要安装 MATLAB Runtime R2024a (24.1) 版本。任何其他版本的 MATLAB Runtime 都不能与 DMD 衍射效率计算器配合使用。

3 输入参数

用户可以根据给定的应用更改下面列出的输入变量。根据所选的给定 DMD，在 GUI 中填充标称值。像素模型输入是一个下拉菜单，而其他字段要求用户直接输入某一数值。

3.1 像素模型 (DMD 微镜)

此输入项是一个下拉菜单。用户可以从下拉列表中选择要分析的像素模型。可用的 DMD 如 [表 3-1](#) 所示。

备注

该应用程序不限制确切的 DMD 配置。即使目前无 DMD 支持该特定方向，在模型中仍能使用 Diamond 和 Manhattan 配置。为您的应用程序选择合适的方向时，请仔细考虑。

3.2 参数扫描

在衍射建模应用程序中，用户可以扫描波长、照明角度、倾斜角、照明和投影 $f/\#$ 数。在不进行参数扫描的情况下初始化应用程序，但可以通过选择参数扫描按钮将其打开。

用户可以输入扫描的起始值和终止值以及步长。例如，波长可以按 10nm 的步长在可见光谱上扫描，如下所示：

Wavelength (nm)	420	700	1
-----------------	-----	-----	---

图 3-1. 波长参数扫描

同样，可以扫描其他参数。为照明角和倾斜角参数选择开始和停止角度，并为 $f/\#$ (照明) 和 $f/\#$ (投影) 参数选择开始和停止 $f/\#$ 。

备注

如果任何参数的起始值和终止值相同，则该模型不会执行扫描，而是仅在该特定参数处运行计算。

阶跃参数是脚本采样率。步长可以是任意大小。参数阶跃越小，结果越精细，越准确、但执行时间也越长。

倾斜角扫描的另一个示例如下所示。在此示例中，利用衍射计算式，计算 11° 、 12° 和 13° 镜片倾斜度。

Tilt Angle°	11	13	1
-------------	----	----	---

图 3-2. 倾斜角参数扫描

3.3 波长

用户可以在波长输入项，输入可供用户建模的波长范围。计量单位为纳米。默认值为 420nm 至 700nm (可见光谱)。低于 1nm 的采样阶跃可能会导致执行时间较长。2nm 阶跃能为大多数应用提供准确且相对较快的计算速度，因而此阶跃甚好。

3.4 照明入射角

照明入射角 (AOI) 通常是指照明光锥的中心射线角，其是镜片倾斜角的两倍。但是，用一个光锥照亮 DMD，如图 3-3 所示。标准照明角度可在表 3-1 中查找。

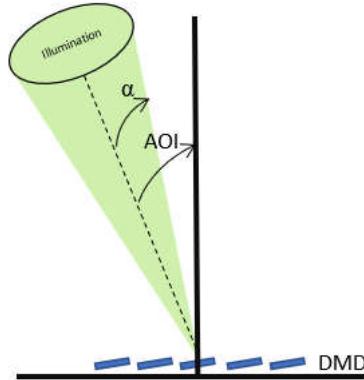


图 3-3. 入射到 DMD 上的照明锥角

备注

α 是照明半锥角，其等于 DMD 镜片的倾斜角。入射角 (AOI) 是镜片倾斜角的两倍，将其确定为从法向到 DMD 镜片阵列表面的角度。

3.5 倾斜角

在大多数应用中，倾斜角输入符合下表。用户可以灵活地测试镜片开启状态下的效率以及各种最大和最小倾斜度。表 3-1 展示了典型的 DMD 像素模型以及相关的像素帧宽、倾斜角和照明角度。

备注

请查看具体的 DMD 数据表，了解有关倾斜角最小和最大范围的更多信息。

表 3-1. 具有相关倾斜角和照明角度的像素几何形状

像素类型	像素帧宽 (μm)	倾斜角 (典型值)	照明角度
RDP	4.5	14.5°	29°
TRP	5.4	17°	34°
SST (在 12° 处)	5.4	12°	24°
SST (在 14.5° 处)	5.4	14.5°	29°
VSP Manhattan	7.56	12°	24°
VSP Diamond	7.637	12°	24°
HEP	9.0	14.5°	29°
SPD Manhattan	10.8	12°	24°
FTP Manhattan	13.68	12°	24°

3.6 f/数 (照明和投影)

照明和投影的 $f/\#$ 通常是匹配的，但是将它们作为单独的输入可让用户灵活地应用不匹配的 $f/\#$ 。模型中所使用的 $f/\#$ 公式如下所示。

$$f \# = \frac{1}{2 \sin(\theta)} \quad (1)$$

其中 θ 是照明和投影锥的半角。典型 $f/\#$ 和圆锥半角表如表 3-2 所示。

表 3-2. 带有相应 $f/\#$ 的圆锥半角

圆锥半角	$f/\#$
11	2.62
12	2.4
13	2.22
14	2.06
15	1.93
16	1.81
17	1.7

3.7 增强滑块

衍射图像具有非常大的动态范围，很难在单个图像中显示。因此，可以增加已显示的图像视觉增强 (VE) 或增益，以便更好地查看衍射图像的低强度部分。增强滑块条可在 1-10 范围变动，从而使衍射模式能获取所选滑块值的乘数。默认增强为 1。

图 3-4 且图 3-5 是使用各种增强值的已建模 DMD 衍射模式的示例。增强功能用于帮助了解衍射模式的动态范围。

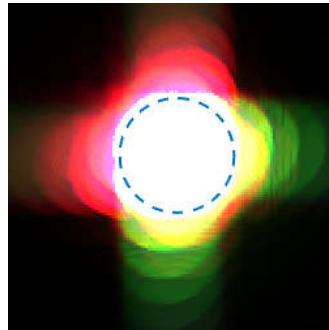


图 3-4. 增强乘数值为 1

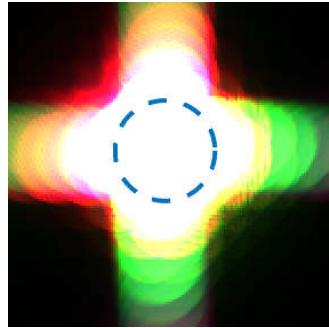


图 3-5. 增强乘数值为 5

3.8 衍射能量图

衍射能量图本质上是衍射模式，但以 3D 形式表示。很难在 2D 衍射模式中确定特定阶数的幅度。在可视化不会严重重叠的衍射阶数时，衍射能量图非常有用，并且在应用较小的波长范围时最直观。该图是交互式的，可为用户提供更直观的衍射模式仿真结果方法。图 3-6 与衍射模式图相比，不会产生太多信息，其中图 3-7 有助于显示阶数之间的强度变化，此类阶数在衍射模式图中更难可视化。

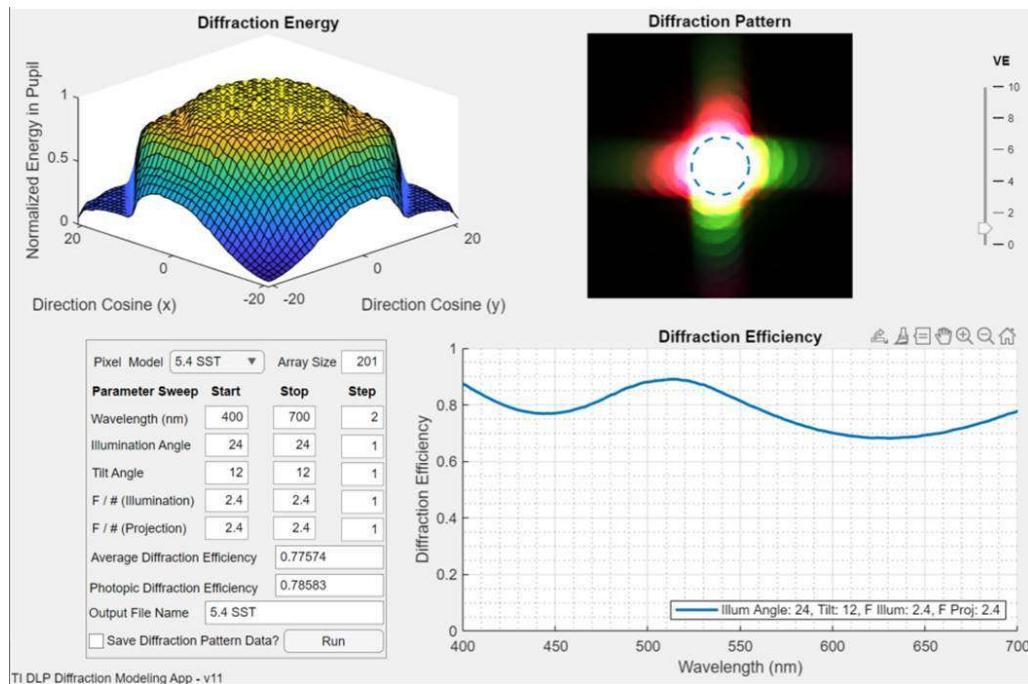


图 3-6. 具有宽波长范围的重叠衍射阶数

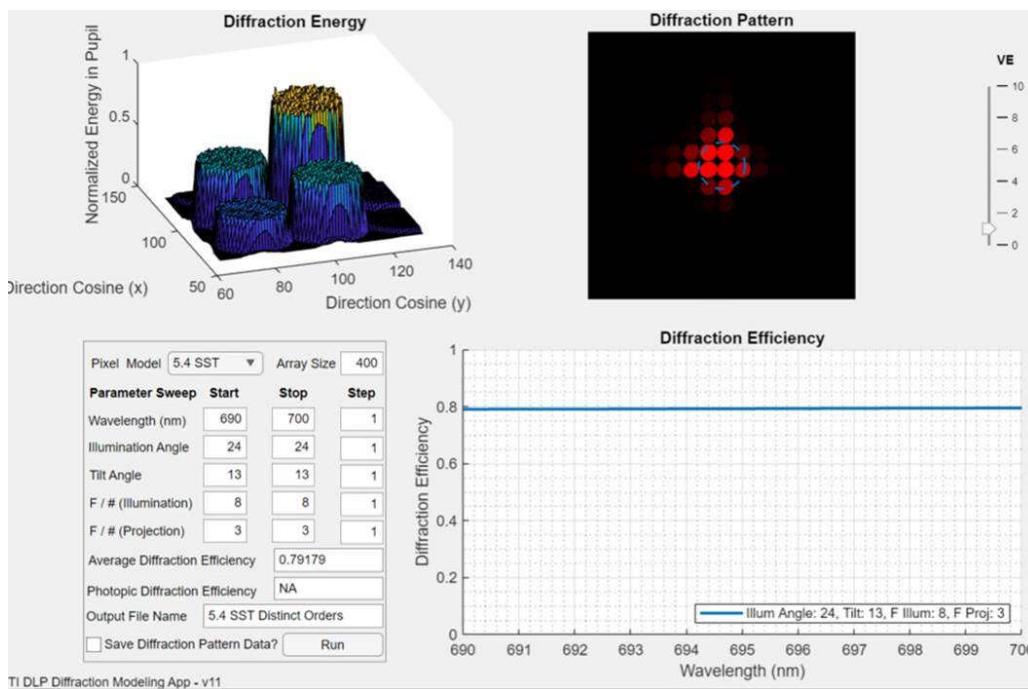


图 3-7. 具有窄波长范围的非重叠衍射阶数

3.9 阵列尺寸

在低 $f/\#s$ 的应用中， 200×200 电池求解阵列的标准分辨率可提供精确的模型。然而，若迁移到更高的 $f/\#$ 应用中，则需要更高的分辨率。从下表中可知精度随着分辨率的提高而提高，往往会在 1600×1600 阵列尺寸下显著缩小。

表 3-3. 不同 $f/\#s$ 上的阵列尺寸以及生成的效率值

分辨率阵列尺寸	衍射效率 WL (400-700nm)@ $f/2.4$	衍射效率 WL (400-700nm)@ $f/16$	衍射效率 WL (400-700nm)@ $f/32$
200×200	0.7755	0.2265	0.1049
400×400	0.7764	0.2121	0.0890
800×800	0.7768	0.2137	0.0914
1600×1600	0.7767	0.2155	0.0928
3200×3200	0.7769	0.2150	0.0923
6400×6400	0.7768	0.2150	0.0932

一旦阵列尺寸增加，精度和差异也会提高。阵列尺寸越大，建模时间就会越长，同时需要更高的仿真精度。可以进行测试，验证精度是否适用于给定的应用中。可以通过在阵列尺寸输入字段中输入所需的值来更改分辨率阵列尺寸。

3.10 输出文件名

在与 TI DLP 衍射建模应用程序相同的文件夹中生成包含衍射效率结果摘要的 Excel 文档。用户能在此字段中为输出的 Excel 文件名命名。该文件可用于其他图和分析中。

如果用户选中“Save Diffraction Pattern Data ?”框，则另一个 excel 文件与“Output File Name” + “Diffraction_Pattern”保存在一起。该数据对应于衍射模式的能量分布。该数据是用于生成衍射模式和衍射能量图的原始数据。

3.11 平均衍射效率和明视衍射效率

这些字段不是用户输入项。输出项给出已计算得出的平均衍射效率和平均明视衍射效率。通过在指定波长光谱上选取衍射效率值平均值，计算平均衍射效率。通过将衍射效率与相应波长上的归一化明视响应相乘，得到明视衍射效率。这是在整个波长光谱上求和完成的。然后将结果除以整个波长光谱上明视觉响应值的总和。

$$\text{Photopic Efficiency} = \frac{\sum \lambda_i S(\lambda_i) \text{Phot}(\lambda_i) \text{Diffraction Efficiency}(\lambda_i)}{\sum \lambda_i S(\lambda_i) \text{Phot}(\lambda_i)} \quad (2)$$

$S(\lambda_i)$ 是源光谱，而 $\text{Phot}(\lambda_i)$ 是明视曲线。然后在光谱上选取平均值，以显示应用程序中所示的值。



图 3-8. 衍射模式。蓝色虚线内的光由投影光学元件收集。蓝色虚线外的光线在衍射叶中丢失。衍射效率是收集的光除以总光所获得的值。

3.12 切趾

打开应用程序后，Pupil 下拉菜单将设置为 Uniform。这表明光瞳射线将具有均匀权重。这可以通过将 Pupil 下拉菜单更改为高斯来进行调整。这将初始化整个射线曲线上的加权高斯光瞳分布。高斯值可以根据给定的系统切趾进行调整。在切趾曲线图上会指示每项仿真中所使用的选中曲线。该图显示了仿真中选定曲线的射线均匀性光瞳横截面。曲线每侧的黑线表示所选的光瞳或 f/# 边界。由以下公式决定切趾功能：

$$\text{Apodization} = \exp\left(-\text{gaussian}_{\text{val}}\left(\frac{\text{radius}}{\text{coneangle}}\right)^2\right) \quad (3)$$

其中， $\text{gaussian}_{\text{val}}$ 是用户插入的值。该值决定了高斯曲线的陡度。数值较高，高斯曲线越陡。半径为所使用的 $f/#$ 半径。在余弦空间方向上， $\text{cone}_{\text{angle}}$ 为 $f/#$ 锥角。有关如何在 GUI 中使用切趾的更多详细信息，请参阅下面的[示例 5.5](#)。

3.13 运行仿真

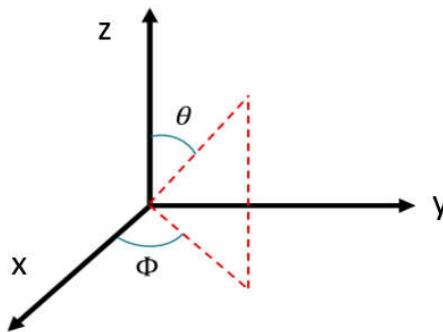
输入所有值后，点击运行按钮开始仿真。根据所选的参数，处理时间最多需要几分钟。

所生成的图是衍射模式的 3D 交互图，包括远场中的衍射模式、衍射能量以及随波长变化的衍射效率曲线。如果用户选中“Save Diffraction Pattern Data？”复选框，则会填充平均衍射效率框，并使用随波长值和衍射能量分布情况而变化的衍射效率创建 excel 文件。

4 坐标系

衍射模型基于球形坐标系，如[图 4-1](#) 所示。倾斜角和照明角度由坐标系中的 θ 和 Φ 角度确定。

Spherical Coordinate System



θ axis – tilt and illumination angle

ϕ axis – illumination direction

图 4-1. 球形坐标系由给定的镜面阵列平面的 θ 和 ϕ 角度确定

扭转设计的示例见图 4-2 和图 4-6 中的悬臂设计。显示了开启和关断状态衍射模式及其给定的 θ 和 ϕ 角度。显示了照明方向、光瞳图以及开启/关断射线，有助于阐明衍射建模时将使用的条件。TRP 像素是唯一的悬臂像素设计；所有其他像素模型都采用扭转设计。

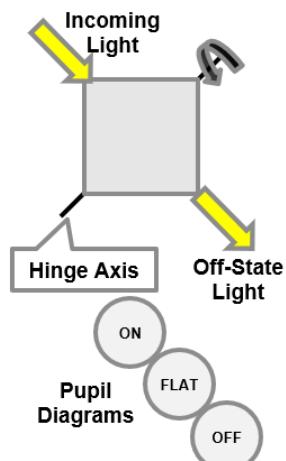


图 4-2. 具有角照明的扭转 12° 镜片倾斜设计，光瞳图显示了镜片的开启、平置和关断状态

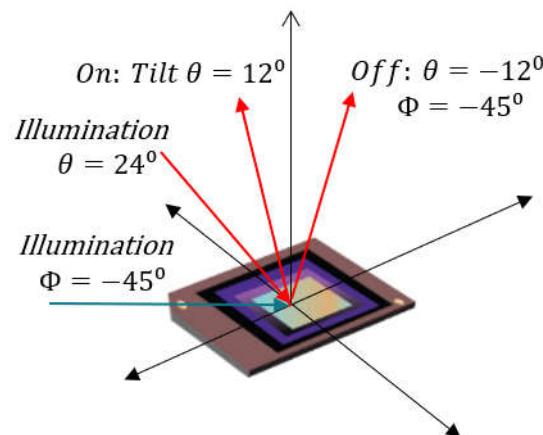


图 4-3. DMD 上的开启、关断状态照明、倾斜角及其相关射线

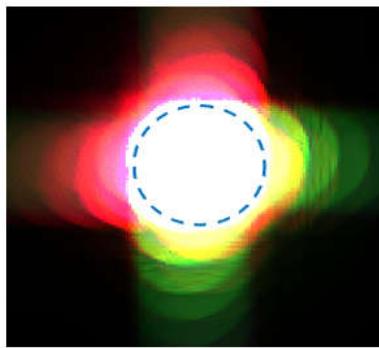


图 4-4. 在镜片角度为 ($\theta = 12^\circ, \Phi = -45^\circ$) 和照明角度为 ($\theta = 24^\circ, \Phi = -45^\circ$) 时，镜片开启状态的衍射模式模型

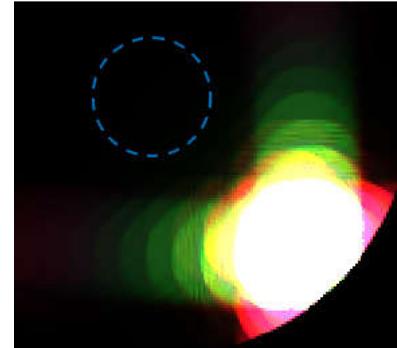


图 4-5. 在镜片角度为 ($\theta = -12^\circ, \Phi = -45^\circ$) 和照明角度为 ($\theta = 24^\circ, \Phi = -45^\circ$) 时，镜片关断状态的衍射模式模型

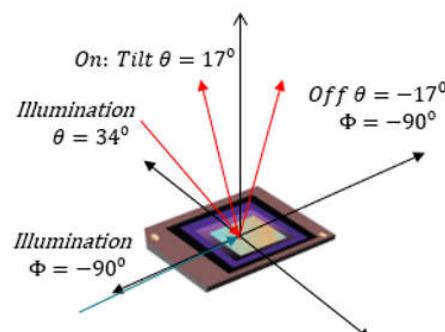
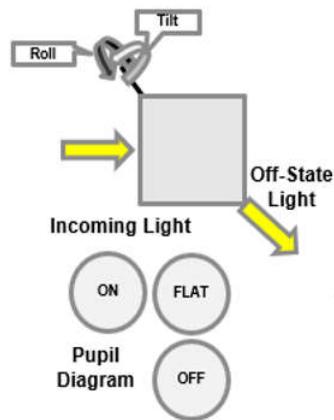


图 4-6. 具有侧面照明的悬臂 17° 镜片倾斜设计，光瞳图 显示了镜片的开启、平置和关断状态

图 4-7. DMD 上的开启、关断状态照明、倾斜角及其相

关射线

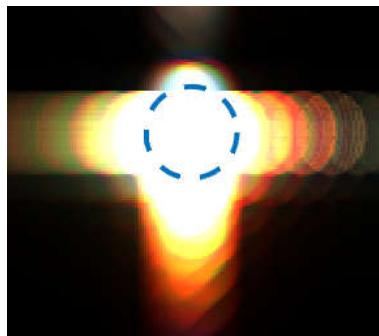


图 4-8. 在镜片角度为 ($\theta = 17^\circ, \Phi = 90^\circ$) 和照明角度为 ($\theta = 34^\circ, \Phi = 90^\circ$) 时，镜片开启状态的衍射模式模型。

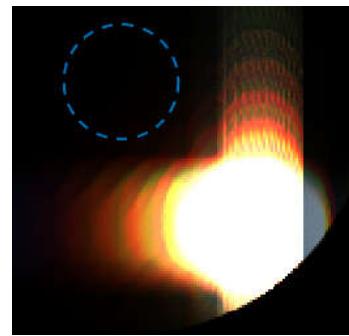


图 4-9. 在镜片角度为 ($\theta = -17^\circ, \Phi = -90^\circ$) 和照明角度为 ($\theta = 34^\circ, \Phi = 90^\circ$) 时，镜片关断状态的衍射模式模型。

5 示例

本节将提供 TI DLP 衍射建模应用功能的具体示例。每个示例显示衍射模式（左）和衍射效率曲线（右）以及输入参数（底部）。这些结果与用户交互界面密切相关，并能够直观地了解应用功能。

备注

衍射模式上的彩色虚线圆表示投影光瞳。

高 F/数照明演示了使用照明和投影 $f/\#$ s 对衍射进行建模时的情况，与传统 DMD $f/\#$ 相比， $f/\#$ s 相对较大。图 5-1、图 5-2 和图 5-3 说明了从 11° 到 13° 的倾斜角变化范围以及倾斜角如何影响高 $f/\#$ 的衍射效率。图 5-4 演示了如何扫描参数并将衍射效率曲线与不同的器件参数叠加。

5.1 高 F/数照明

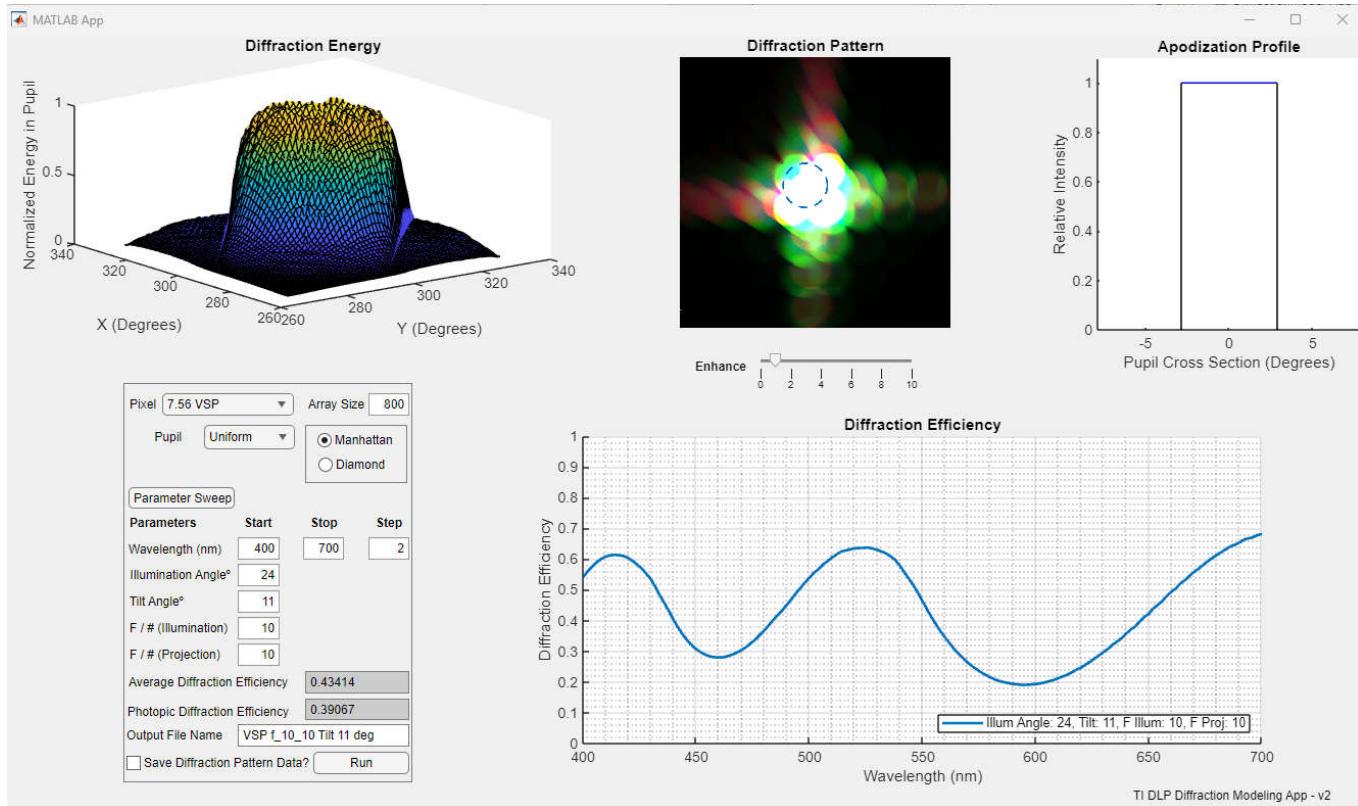


图 5-1. 在倾斜角为 11° 时，照明和投影 $f/\#$ 设置为 10

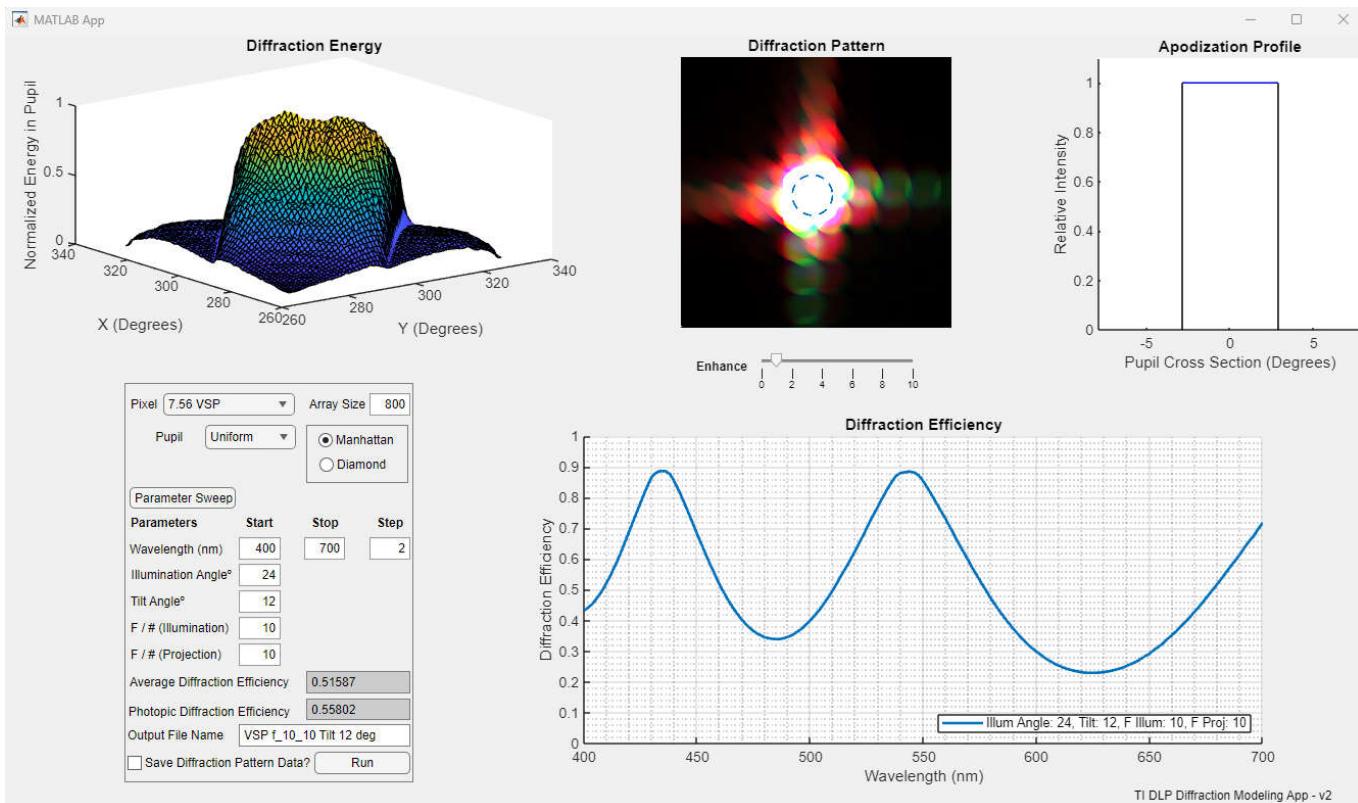


图 5-2. 在倾斜角为 12° 时，照明和投影 $f/\#$ 设置为 10

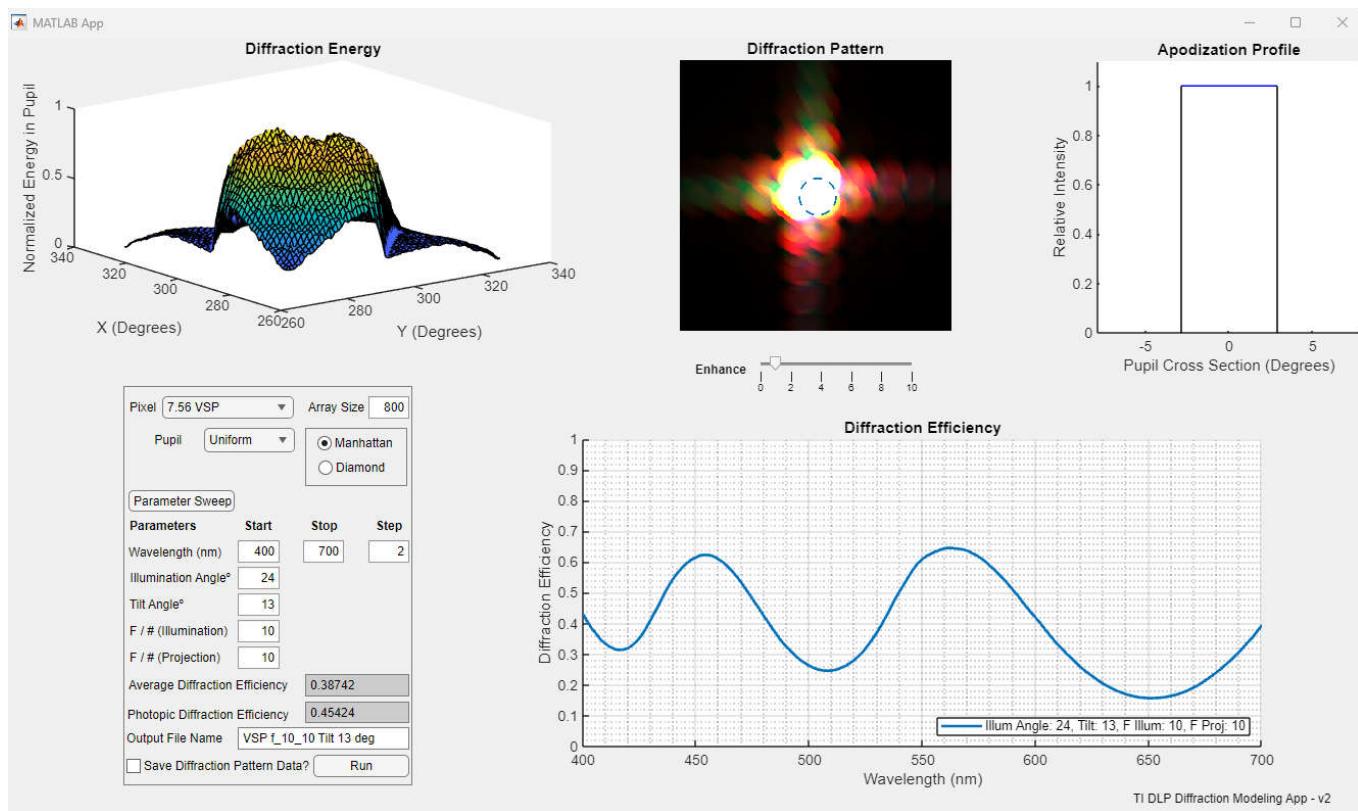


图 5-3. 在倾斜角为 13° 时，照明和投影 f/# 设置为 10

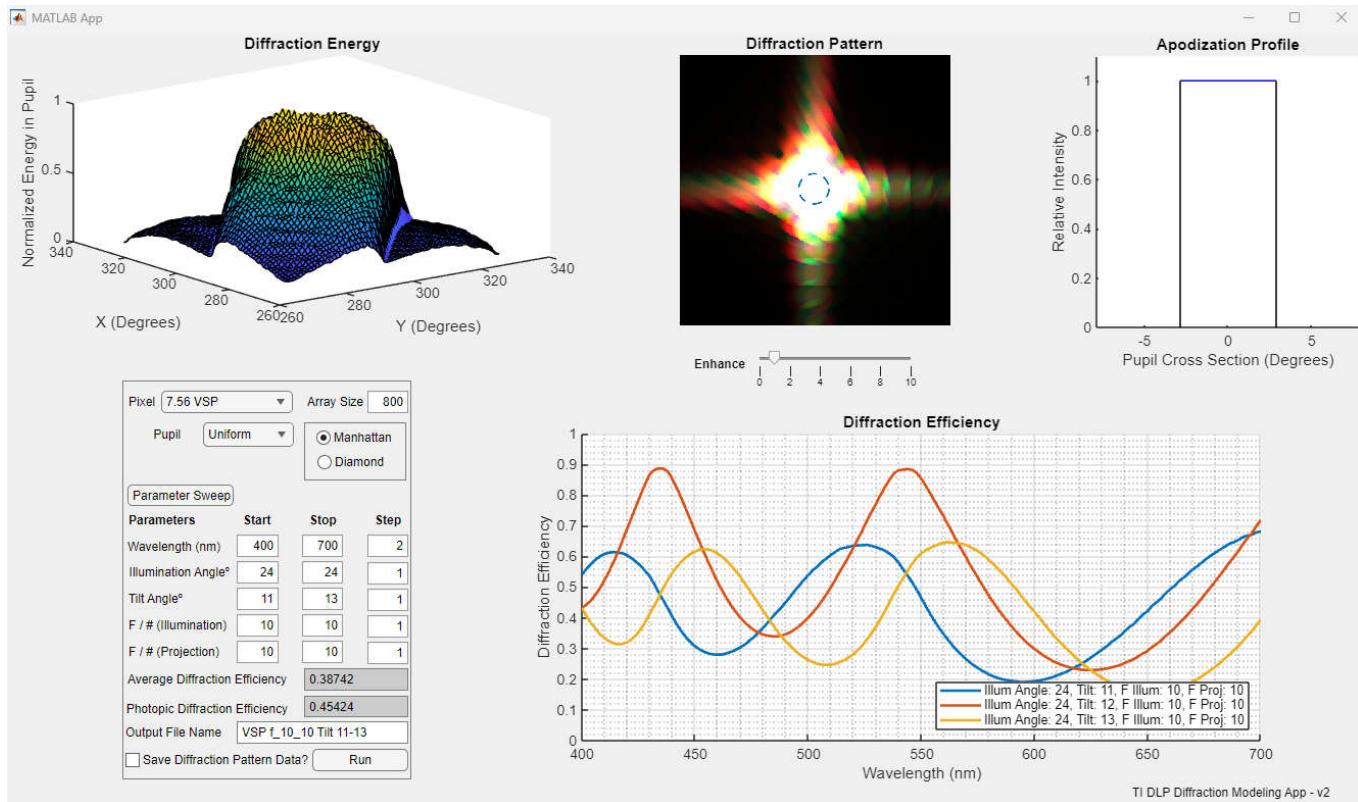


图 5-4. 倾斜角扫描介于 11-13° 之间时，照明和投影 f/# 设置为 10

5.2 不匹配的照明和投影 F/数

不匹配的照明和投影 F/数演示了不匹配的 $f/\#$'s 的使用情况。图 5-5 使用了照明 $f/\#$ 为 2.4 且投影 $f/\#$ 为 2.4 的匹配条件，而图 5-6 使用了不匹配的 $f/\#$'s，因此，照明为 $f/3$ ，而投影为 $f/2.4$ 。由于较大的投影孔径能够收集更多光，因此能提高合成的衍射效率。

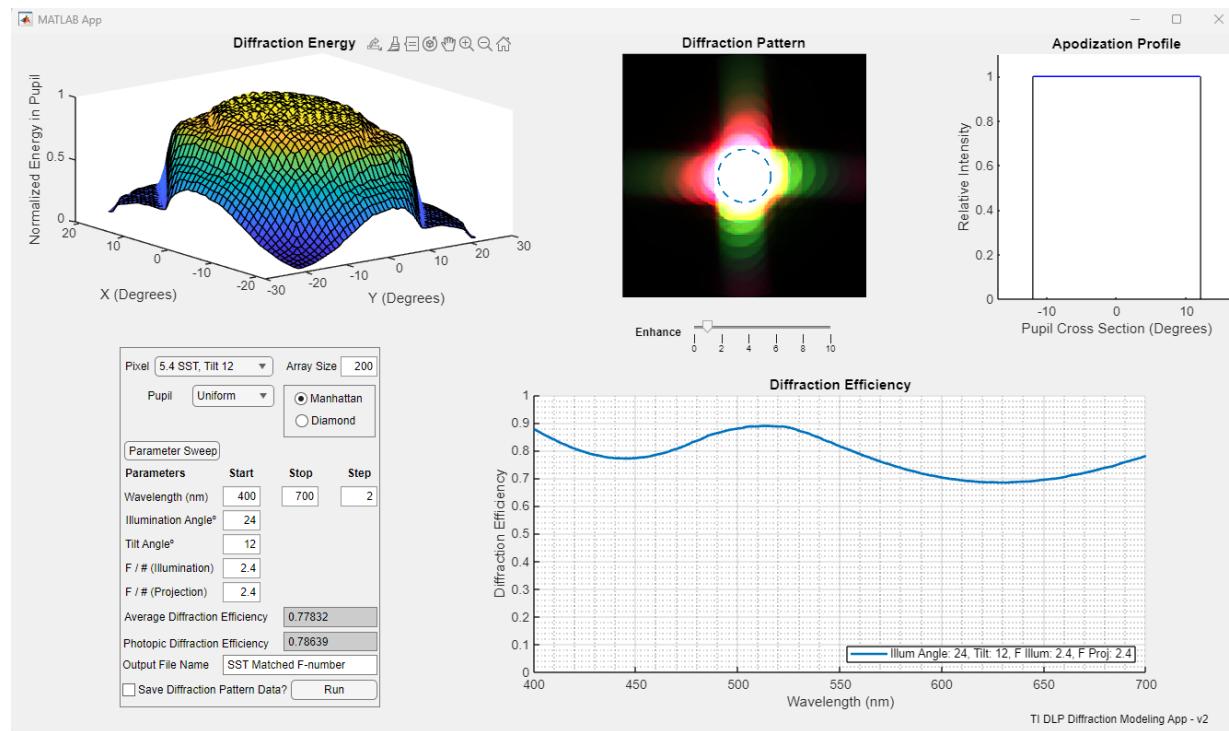


图 5-5. $f/\#$ 为 2.4 时的匹配照明和投影

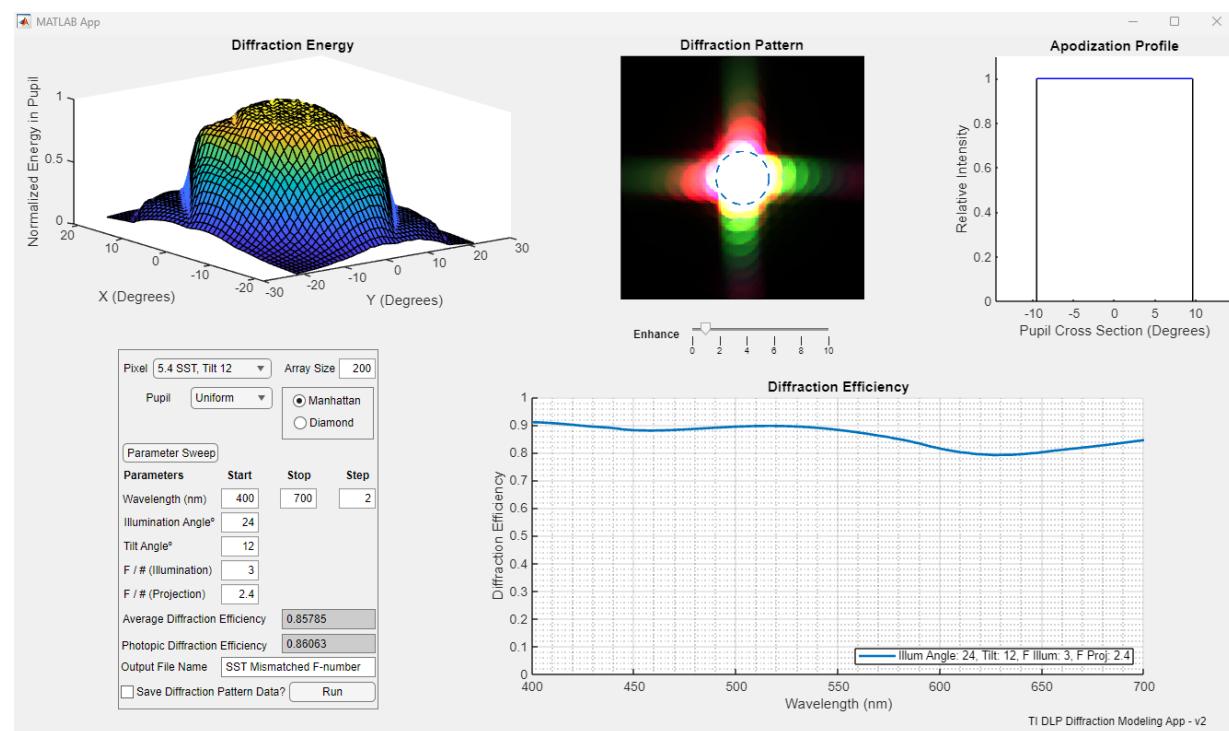


图 5-6. 照明为 3 而投影 $f/\#$ 为 2.4 时的不匹配条件

5.3 悬臂与扭转具有相同的像素帧宽

悬臂与扭转具有相同的像素帧宽将 5.4 镜面帧宽 TRP 悬臂设计与 5.4 镜面帧宽 SST 扭转设计进行了比较。尽管像素帧宽相同，但由于悬臂和扭转倾斜机制之间固有的光学差异以及从镜面侧面照明与从镜面角照明时的帧宽差异，衍射效率也有所不同。在生成帧宽时，5.4 SST 照明来自镜面角 $\sqrt{2} \times 5.4$ 而生成帧宽 5.4 时，5.4 TRP 照明来自镜边缘。

图 5-7 和图 5-8 使用 2.4 处已匹配的 F/数字，直接比较 TRP 和 SST 像素。

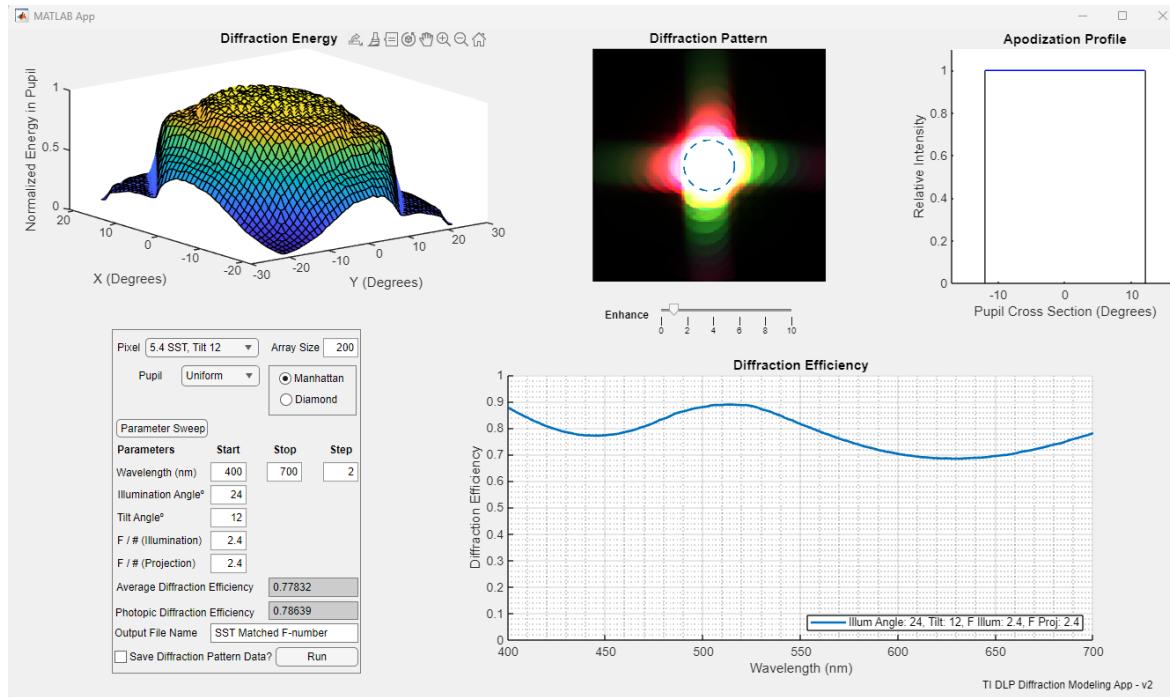


图 5-7. 具有 5.4 帧宽像素的 SST 扭转设计

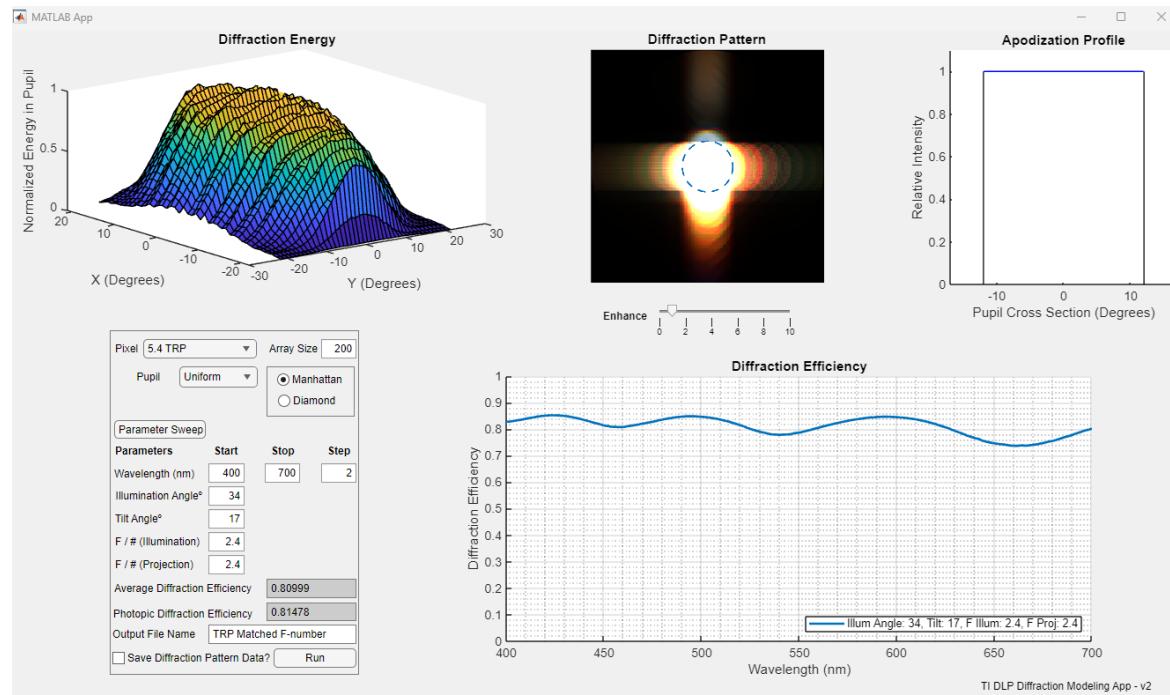


图 5-8. 具有 5.4 帧宽像素的 TRP 悬臂设计

5.4 侧面菱形衍射模式

图 5-9 演示了使用 4.5 RDP 像素的侧面菱形衍射模式

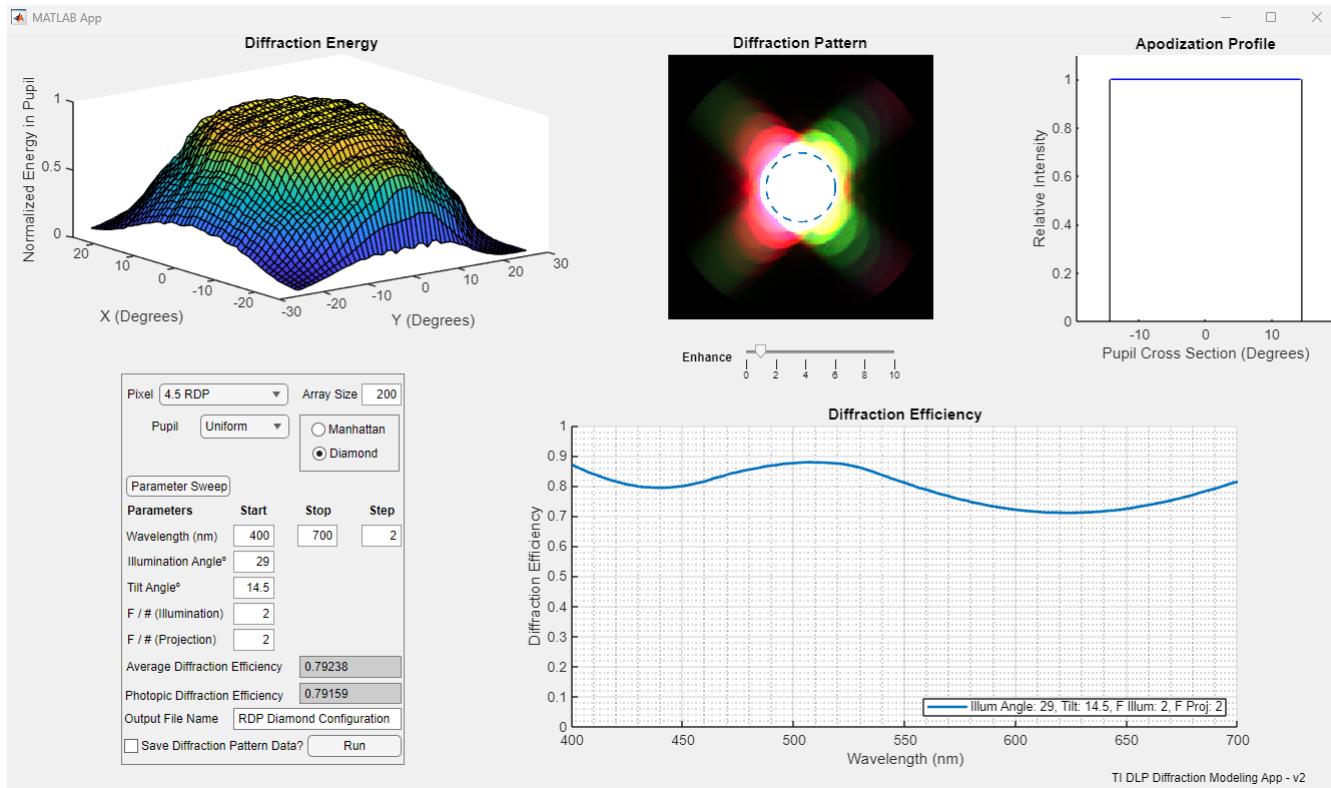


图 5-9. 4.5um 帧宽像素。启用侧面菱形配置以更准确地对衍射模式进行建模。X 模式 (非十字模式) 的旁瓣

5.5 切趾

图 5-10 演示如何使用光瞳切趾。从光瞳下拉菜单中选择“高斯”。输入“高斯因数”。在本例中，1 是高斯因数的输入项。切趾曲线图已更新，能显示整个光瞳横截面的相对强度

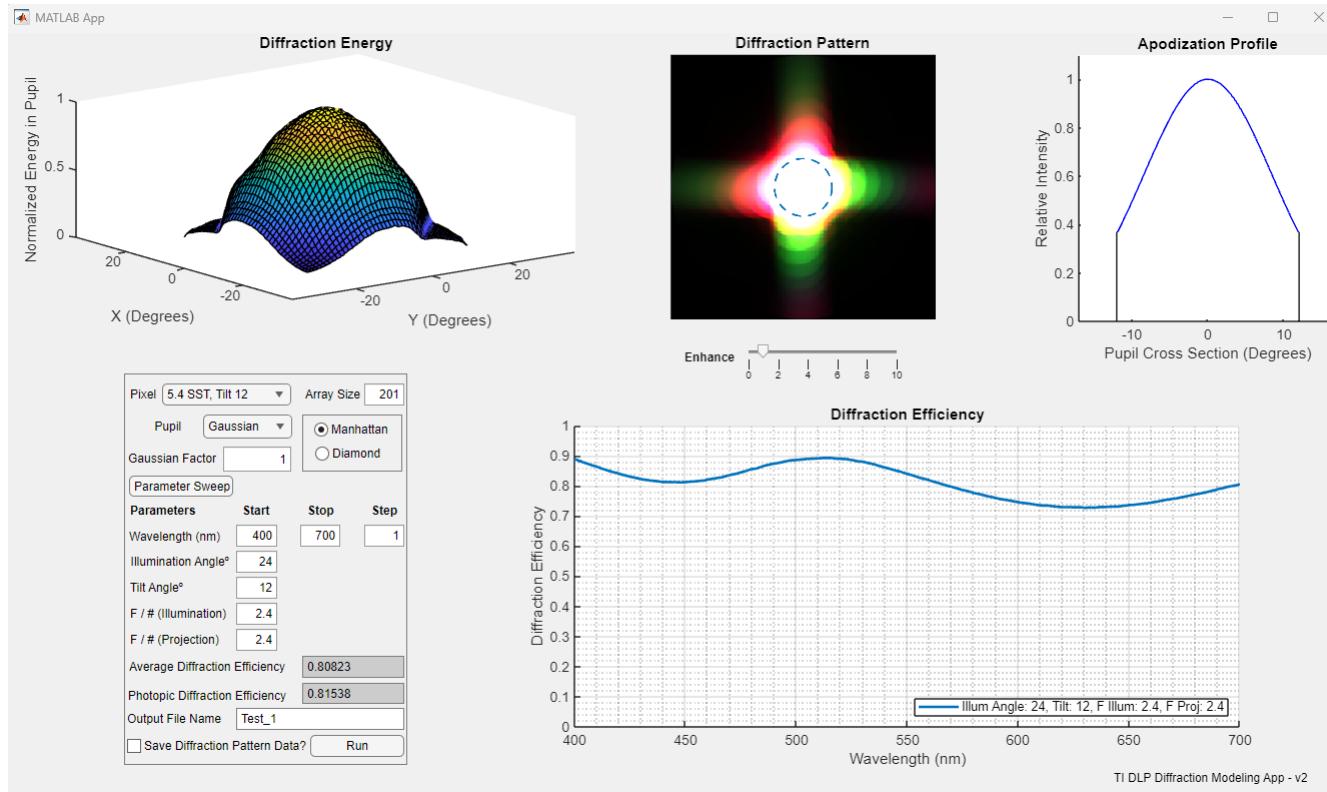


图 5-10. 使用高斯因数的光瞳切趾。高斯因数较高，切趾曲线越陡

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 参考资料

1. J. E. Harvey, [非近轴标量衍射理论的线性系统表述](#), 出版物。
2. 德州仪器 (TI), [可见波长的 DMD 光学效率](#) 应用手册。
3. 德州仪器 (TI), [使用激光和 DLP DMD 技术](#), 技术手册。

7 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 * (May 2024) to Revision A (September 2025)	Page
• GUI 所需的 MATLAB Runtime 版本已在 安装和设置 中更新。	2
• 在 节 3.1 中添加了有关 Diamond 和 Manhattan 建模配置的注释。	3
• 在 节 3.2 中添加了有关参数扫描按钮的信息。	3
• 已更新的 表 3-1 现如今包含 RDP 像素。	4
• 更新了 节 3.7 中增强滑块的标题.....	5
• 添加了 图 3-8 以演示采集光瞳与衍射模式下的衍射波瓣之间的关系。	8
• 增加了有关切趾的新部分； 节 3.12	8
• 更新了 节 5.1 中的图，对切趾进行了说明。	11
• 更新了 节 5.2 中的图，对切趾进行了说明。	14
• 更新了 节 5.3 中的图，对切趾进行了说明。	15
• 添加了有关侧面菱形衍射模式的新示例； 节 5.4	16
• 增加了有关切趾的新示例； 节 5.5	17

Changes from Revision A (September 2025) to Revision B (January 2026)	Page
• 向摘要添加了免责声明注释。	2

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月