

摘要

本文档旨在总结在评估投影系统中数字微镜器件 (DMD) 效率时至关重要的光学特性。

内容

1 用途和范围.....	2
1.1 限制.....	2
1.2 本文档中使用的首字母缩写词.....	2
2 导通状态填充系数.....	2
3 窗口属性.....	3
4 微镜衍射效率.....	3
4.1 微镜平坦度.....	3
4.2 微镜衍射效率.....	3
4.3 照明和投影 f 数不匹配时的衍射效率.....	8
5 微镜反射率.....	9
6 估算整体 DMD 效率.....	9
7 参考文献.....	10
8 修订历史记录.....	10

插图清单

图 4-1. 模拟的 5.4 μ m 间距 DMD 远场辐射图像；虚线圆圈表示投影透镜孔径边缘的轮廓.....	5
图 4-2. 不同像素尺寸 (420nm - 680nm 波长) 下计算得出的平均明视衍射效率汇总.....	5
图 4-3. 13.68 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数).....	6
图 4-4. 10.8 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数).....	6
图 4-5. 9.0 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数).....	7
图 4-6. 7.56 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数).....	7
图 4-7. 5.4 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数).....	8
图 4-8. f 数匹配和不匹配时 7.56 μ m 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率.....	8
图 5-1. DMD 微镜典型反射率.....	9

表格清单

表 2-1. DMD 导通状态填充系数.....	3
表 6-1. 总明视平均效率计算 ⁽¹⁾	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 用途和范围

接下来的三个部分分别讨论填充系数、窗口光学属性和有源微镜阵列属性。本报告最后讨论了如何计算总体效率。

如节 6 中详细讨论，可以使用方程式 1 来估算总体光学效率。

$$Efficiency_{DMD} = transmission_{window} \times efficiency_{fillfactor} \times efficiency_{diffraction} \times reflectivity_{mirror} \times transmission_{window} \quad (1)$$

其中

- $transmission_{window}$ 是单通窗透射，包括两个防反射表面。由于光通过窗口两次，因此该项计算两次。
- $efficiency_{fillfactor}$ 是从照明方向查看的分数微镜覆盖范围（导通状态微镜）
- $efficiency_{diffraction}$ 是指微镜阵列衍射效率，其中可能包括非平坦微镜的影响
- $reflectivity_{mirror}$ 是指微镜反射率，包括微镜散射

总体 DMD 效率通常是填充系数、窗口透射、衍射效率和微镜反射率的乘积，后续章节将对此进行更详细的介绍。

1.1 限制

本文档不包括系统级效率损失，例如展度失配，可以使用基于实际光学设计的光线轨迹模型更好地评估此类损失。影响对比度的因素也很重要，但相互作用通常要复杂得多，需要光学系统严格的电磁散射理论，在这类报告中很难对所有这些因素进行总结。

1.2 本文档中使用的首字母缩写词

缩写	说明
DMD	数字微镜器件
AOI	入射角
WLP	晶圆级封装

2 导通状态填充系数

表 2-1 显示了基于 DMD 微镜间距的典型导通状态填充系数。

- 倾斜角 - 列出了微镜的标称倾斜角。每个 DMD 数据表都指定了实际倾斜角及其变化量。
- 填充系数 - 微镜阵列构成了具有给定镜片距离的离散微镜。填充系数的定义如下：假设微镜反射率为 100%，使用以 2 倍微镜倾斜角入射的光束进行照明时，导通状态微镜反射的光量百分比。有关实际微镜反射率，请参阅节 5。镜片距离、结构和倾斜角与填充系数值直接相关。几何光线轨迹仿真方法用于计算 DMD 阵列的填充系数。

表 2-1. DMD 导通状态填充系数

DMD 示例 ⁽¹⁾	微镜间距 (μm)	标称倾斜角 (度)	照明 f 数	典型导通状态填充系数 ^{(2) (3)}
DLP7000	13.68	12	2.4	92%
DLP650LE	10.8	12	2.4	92%
DLP780TE DLP800RE	9.0	14.5	2.0	97%
DLP3030-Q1 DLP5534-Q1 DLP4501 DLP9000	7.6 7.6 7.56 7.56	12	2.4	94%
DLP3010	5.4	17	1.7	93%

- (1) DMD 示例列表并不全面，每个微镜间距类别中可能还有许多其他器件可用。
 (2) 导通状态填充系数值是近似值。有关特定于器件的值，请参阅 DMD 数据表。
 (3) 导通状态填充系数是使用与倾斜标称角相对应的原始 f 数照明计算得出的。
- 12° 倾斜 = $f/2.4$
 - 14.5° 倾斜 = $f/2.0$
 - 17° 倾斜 = $f/1.7$

3 窗口属性

DMD 窗口的两种主要类型与封装类型直接相关：

- A 型 DMD 封装使用 Corning 7056 玻璃 (通常约 3mm 厚)。
- 晶圆级封装 (WLP, 通常称为 Sxxx 封装) 使用 Corning Eagle XG 玻璃 (通常厚度为 1mm 或更薄)。

WLP 窗口和 A 型窗口均具有抗反射薄膜涂层，可减少反射并提高传输效率。根据应用的不同，使用可见光涂层、UV 涂层或 NIR 涂层。

下面的值描述了通过窗口随机极化的单通可见光 (420nm - 680nm)，并考虑了两种表面涂层。

- 平均透射率，在 0° - 30°AOI 的所有角度下 $T_{ave} \geq 99\%$ ，
- 平均透射率，在 30° - 45°AOI 的所有角度下 $T_{ave} \geq 97\%$

所有透射值均为窗口的总透射率 (通过两个表面和玻璃)。在表 6-1 计算中使用了 96% 的传输数字，表示通过窗口的双通，每个涂层表面的透射率约为 99%。有关特定于器件的值，请参阅 DMD 数据表。

更多有关窗口透射的信息，请参阅 [DLP® DMD 窗口波长透射注意事项](#)。

4 微镜衍射效率

4.1 微镜平坦度

构建微镜结构所需的半导体处理会使微镜偏离一个完全平坦的平面。但是，此处理经过设计和控制，可大大减少微镜的非平坦度或非平面度。以下所述的衍射建模可用于预测非平坦微镜导致的损耗。但是，下面的计算假设是平坦微镜。

4.2 微镜衍射效率

有源阵列区域包含一个大型矩形阵列的铝基镜片，这些微镜可倾斜至两个稳定角度中的一个。对于 13.68 μm、10.8 μm 和 7.6/7.56 μm 微镜像素尺寸，这通常是围绕对角线的 +12° 和 -12°。9.0 μm 微镜像素尺寸也围绕对角线倾斜，通常为 +14.5° 和 -14.5°。5.4 μm 微镜像素的不同之处在于，它们围绕正交方向倾斜大约 17°。

照明和投影 f 数通常匹配以获得效率和对比度的折衷。但是，即使在这些条件下，由于投影透镜孔径挡块处的衍射光被削波，光量也会有一些损失。由于微镜的尺寸相对于波长不大，因此微镜反射的光会扩散到更大的锥角，从而导致光量损失。

较长波长（红色）的衍射程度大于较短波长（蓝色），因此在波长较长时，衍射效率通常会降低。

为了更准确地对出现的复杂衍射模式建模，请利用倾斜微镜阵列的行为与经典的闪跃光学衍射光栅类似这一事实。从概念上来说，接近宽带源衍射的适当方法是将其视为波长和方向上变化的大量平面波的组合。所有这些平面波源可以不连贯的方式组合在一起，以评估最终衍射模式。

对于由单波长准直激光束照射的二维微镜阵列，远场显示为大致以 λ/pitch 角度间隔的一组明亮点（衍射级），其中 λ 是波长。可使用快速傅里叶变换算法 (FFT) 近似得出的标量衍射理论通常可用于此计算，且具有合理的高精度。明亮点阵列的振幅由单个微镜的远场模式调制，该模式通常接近 $\sin(x)/x$ 形状。使用 [方程式 2](#) 中描述的傅里叶变换，可以计算出远场辐射函数，该函数是方向余弦 α 和 β 的函数。

$$\begin{aligned}
 L'(\alpha, \beta - \beta_o) &= K \gamma_o \frac{\lambda^2}{A_s} \left| \mathbf{F} \left\{ U_o(\hat{x}, \hat{y}; 0) \exp(i2\pi\beta_o \hat{y}) \right\} \right|^2 && \text{for } \alpha^2 + \beta^2 \leq 1 \\
 L'(\alpha, \beta - \beta_o) &= 0 && \text{for } \alpha^2 + \beta^2 \geq 1
 \end{aligned} \tag{2}$$

在这里，数量 $U_o(\hat{x}, \hat{y}; 0)$ 表示 EM 场（幅度和相位）离开 DMD 微镜阵列表面。计算出的辐射曲线， $L(\alpha, \beta - \beta_o)$ 然后，可以根据投影透镜孔径定义的接受角以数学方式截断。通过对入射角和波长范围内的辐射进行积分并跟踪孔径内相对于总功率的功率，您可以计算衍射效率。

产生的白光不相干源的远场辐射图具有交替颜色的辐射臂，如 [图 4-1](#) 所示。由于只有射束的中心部分由投影透镜收集，因此外部臂中的能量会丢失。计算出的衍射效率随镜片间距、微镜倾斜角和波长而变化。

由于远场衍射模式（或投影光瞳处的图像）取决于照明角度、镜片间距、微镜倾斜角度和波长，因此白光的远场衍射具有很大的颜色变化。决定衍射引起的颜色变化的主要因素是镜片间距和微镜倾斜角，照射角是次要因素。这种颜色变化会导致衍射效率近似以正弦波形式与波长成函数关系发生变化，如 [图 4-3](#) 至 [图 4-7](#) 所示。衍射效率的频谱图以波长显示周期性振荡，这些振荡的周期通常取决于微镜间距，微镜间距越小，周期越长。因此，衍射效率会与波长成函数关系发生显著变化。此外，整个 DMD 微镜阵列以及不同器件间的倾斜角变化会导致频谱峰值的波长发生变化。

图 4-2 显示了针对各种像素类型计算得出的标称衍射效率，与像素间距成函数关系。正如预期的那样，随着像素间距的缩小，衍射效率普遍降低。

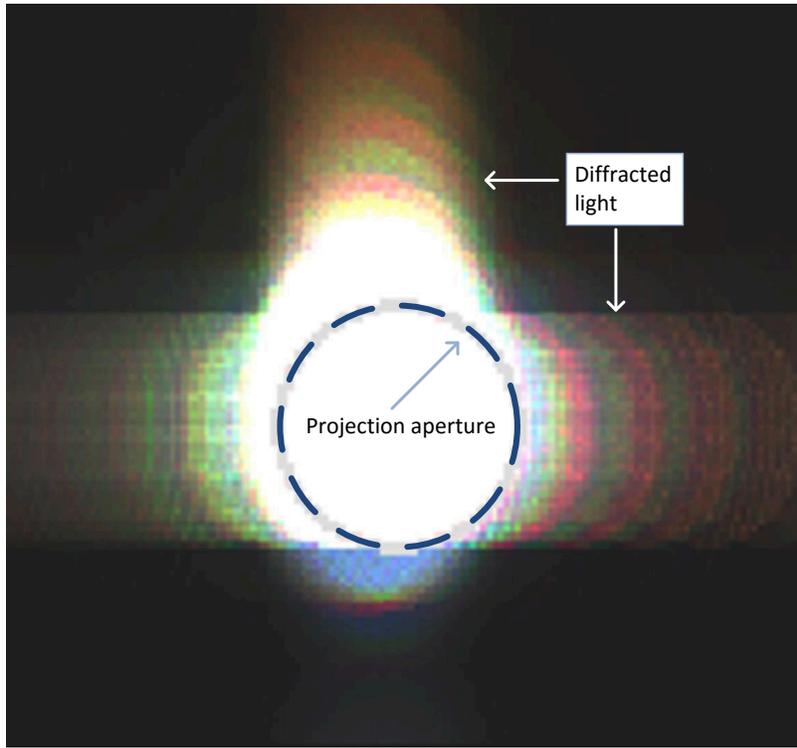


图 4-1. 模拟的 5.4μm 间距 DMD 远场辐射图像；虚线圆圈表示投影透镜孔径边缘的轮廓

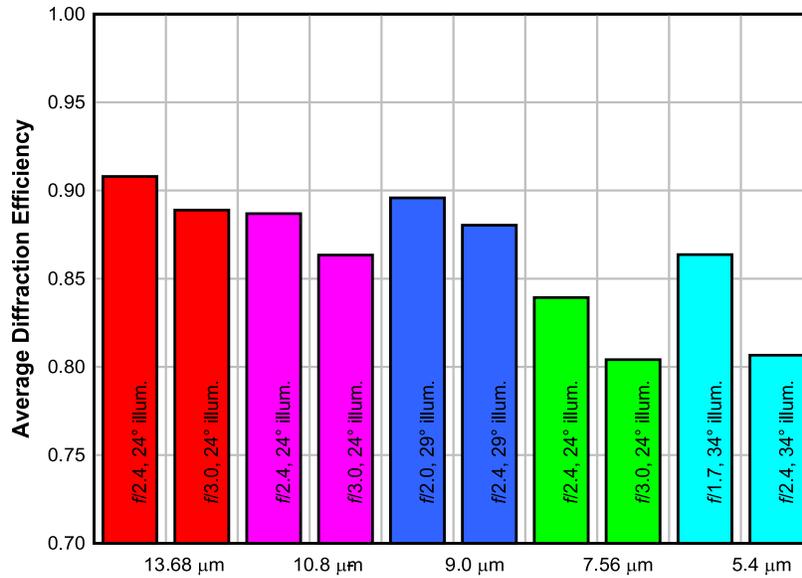


图 4-2. 不同像素尺寸 (420nm - 680nm 波长) 下计算得出的平均明视衍射效率汇总

图 4-3 至图 4-7 显示了照明和投影以及标称设计倾斜角之间匹配的不同 f 数的光谱衍射效率。

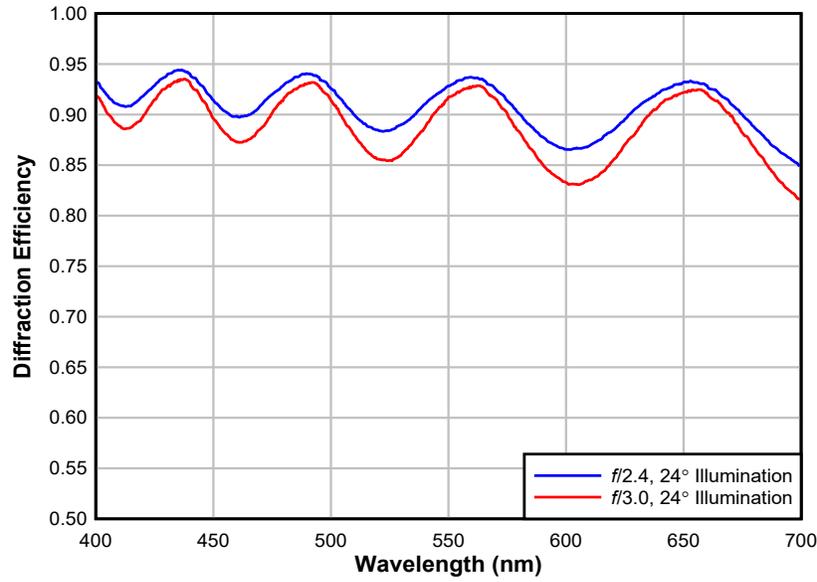


图 4-3. 13.68µm 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数)

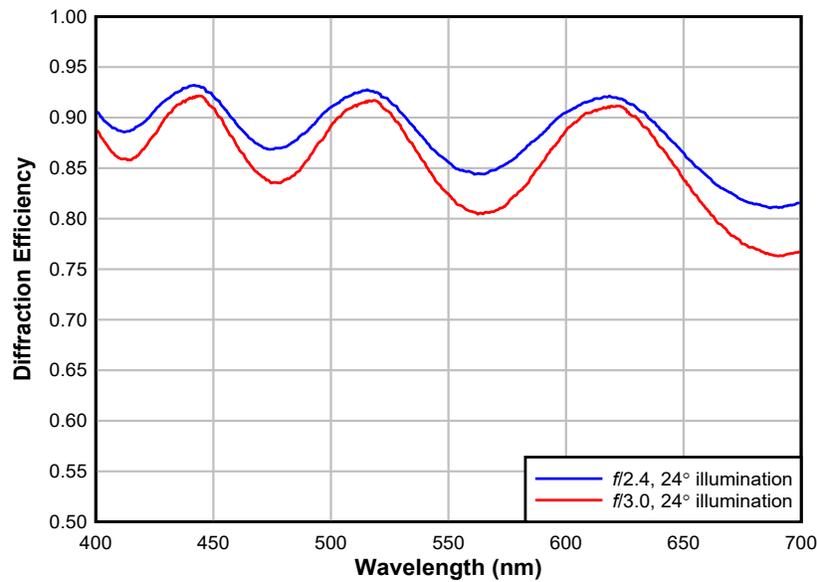


图 4-4. 10.8µm 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数)

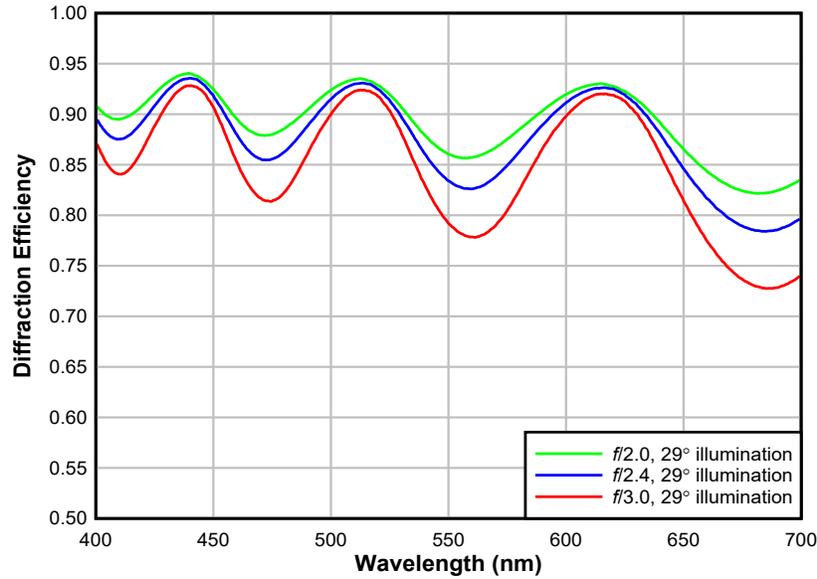


图 4-5. 9.0µm 间距 DMD 显微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数)

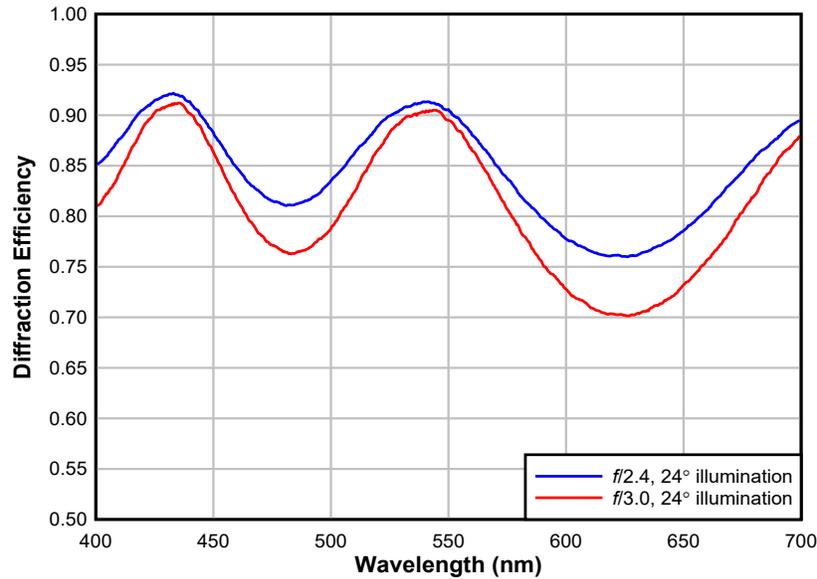


图 4-6. 7.56µm 间距 DMD 显微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数)

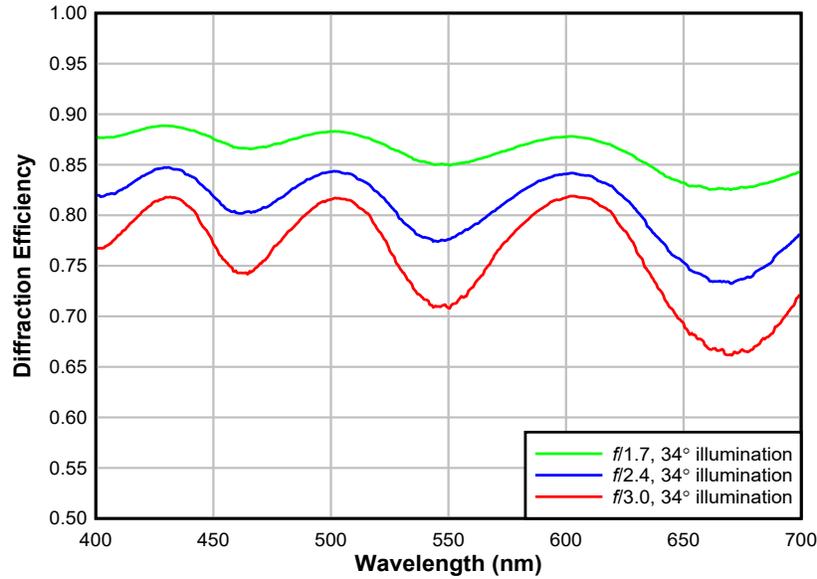


图 4-7. 5.4μm 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率 (匹配的照明和投影 f 数)

4.3 照明和投影 f 数不匹配时的衍射效率

不匹配的 f 数法可用于提高衍射效率性能。通过使用较慢的照明 f 数 (f 数更大) 和较快的投影 f 数 (f 数更小), 衍射效率会提高, 因为反射照明光束发出的更多衍射光被收集到投影透镜孔径中。一个示例案例是具有 $7.56 \mu\text{m}$ 间距 DMD、 $f/3$ 照明和 $f/2.4$ 投影光学元件的系统, 如图 4-8 所示。在 $f/2.4$ 照明和 $f/2.4$ 投影匹配的情形中, 平均衍射效率为 83.9%, 而在 $f/3$ 照明和 $f/2.4$ 投影不匹配的情形中, 平均衍射效率为 90.5%。该方法适用于 DMD 器件。改进的裕度在很大程度上取决于所选的 f 数和所使用的 DMD 微镜尺寸。

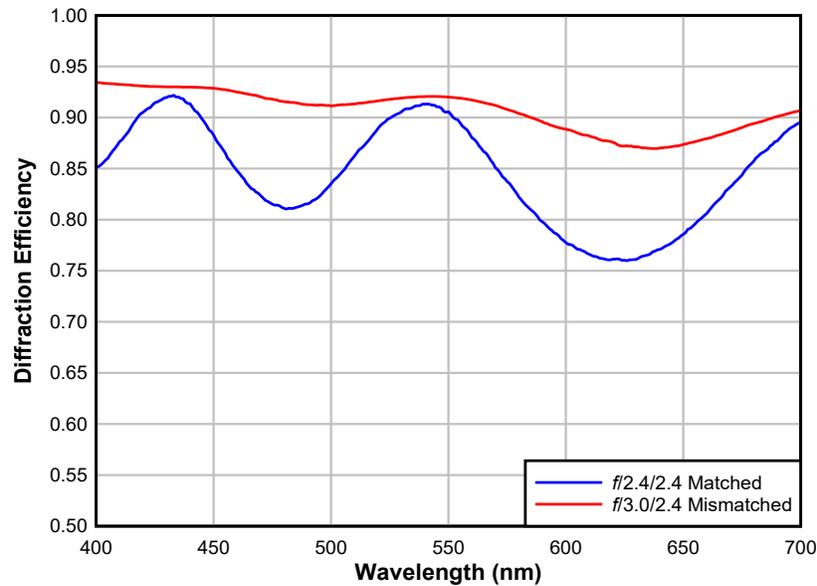


图 4-8. f 数匹配和不匹配时 $7.56 \mu\text{m}$ 间距 DMD 微镜计算出的衍射效率

较大照明 f 数 (照明系统展度较小) 不会显著降低投影仪光照输出的直接激光系统可从不匹配的 f 数技术中受益。在照明和投影 f 数匹配的较慢 f 数系统中, 与 f 数匹配的较快系统相比, 给定衍射效率曲线的局部最小值更低。通过使用不匹配的 f 数技术, 可以大大提高这种衍射效率, 从而使衍射效率远高于 f 数匹配的系统所能提供的效率。以这种方式实现的 f 数不匹配会使衍射效率曲线中的峰值到谷值差异变平或减小。

不匹配的 f 数技术会对衍射效率的某种系统对比度进行折衷。系统对比度介于投影和照明路径中较低的匹配 f 数和较高的匹配 f 数之间。例如, 对于照明为 $f/3$ 且投影为 $f/2.4$ 的 f 数不匹配的系统, 对比度高于 $f/2.4$ 匹配的投影系统, 但低于基于同一 DMD 构建的 $f/3$ 匹配的投影系统。

5 微镜反射率

有源阵列区域由大型矩形阵列的铝制微镜组成。这些微镜在可见光范围 (420nm 至 680nm) 内的标称反射率为 89%。

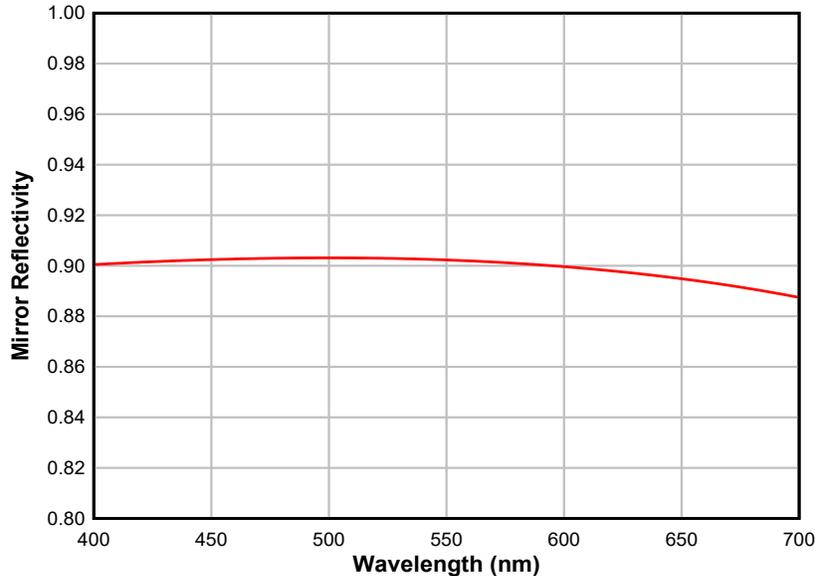


图 5-1. DMD 微镜典型反射率

6 估算整体 DMD 效率

整体光学效率可使用 [方程式 3](#) 进行估算。

$$Efficiency_{DMD} = transmission_{window} \times efficiency_{fillfactor} \times efficiency_{diffraction} \times reflectivity_{mirror} \times transmission_{window} \quad (3)$$

其中

- $efficiency_{fillfactor}$ 是从照明方向查看的分数微镜覆盖范围 (导通状态微镜)
- $transmission_{window}$ 是单通窗透射, 包括两个防反射表面。由于光通过窗口两次, 因此该项计算两次。
- $efficiency_{diffraction}$ 是指微镜阵列衍射效率, 其中可能包括非平坦微镜的影响
- $reflectivity_{mirror}$ 是指微镜反射率, 包括微镜散射

表 6-1 中显示的明视数假设源具有波长为 420nm 至 680nm 的平坦功率频谱。通过将光谱衍射效率与实际源光谱相乘，可以获得给定光源的更准确结果。

表 6-1. 总明视平均效率计算⁽¹⁾

DMD 间距 (μm)	倾斜角 (度)	f 数	差分效率	导通状态填充	窗透射 (双通)	镜面反射	总效率
13.68	12	2.4	89%	92%	96%	89%	70%
10.8	12	2.4	87%	92%	96%	89%	68%
9.0	14.5	2.0	89%	97%	96%	89%	72%
7.6/7.56	12	2.4	84%	94%	96%	89%	67%
5.4	17	1.7	86%	93%	96%	89%	68%
5.4	17	2.4	80%	93%	96%	89%	64%

(1) 此表中的值为近似值。相关具体值，请参阅器件特定 DMD 数据表。

7 参考文献

- “Linear systems formulation of non-paraxial scalar diffraction theory”，James E. Harvey，Proc. SPIE 第 8122 卷

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 (June 2019) to Revision B (April 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	2
• 更新了 表 2-1	2
• 更新了 节 3	3
• 更新了 节 4.1	3
• 在 节 4.2 中添加了 9.0 μm 像素并更新了其中的图.....	3
• 添加了 节 4.3	8
• 添加了 图 5-1	9
• 更新了 表 6-1	9

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司