

## Application Note

## 数字微镜器件散热注意事项 ( 包括脉冲光源 )



## 摘要

DLP® 数字微镜器件 (DMD) 的许多应用都使用连续波 (CW) 照明。在 CW 照明条件下, DMD 的温升计算很简单, 每个 DMD 的数据表中提供了所需的公式。还有一些使用脉冲照明的应用。使用脉冲照明时, DMD 的温升计算更为复杂, 但要确保 DMD 微镜温度保持在可靠的工作范围内, 必须了解温升。DMD 微镜加热所需的时间可能长于光源的脉冲持续时间, 因此需要一个瞬态热模型 (而非稳态热模型) 来准确计算 DMD 镜面温升。本应用手册介绍了计算 DMD 镜面温升和 DMD 镜体温升与脉冲持续时间和光源脉冲速率之间的函数关系所需的公式。

## 内容

<b>1 DMD 微镜的加热</b> .....	2
1.1 镜面与镜体差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$ ).....	2
1.2 镜体与器件差值 ( $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$ ).....	2
1.3 器件与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$ ).....	3
<b>2 使用脉冲光源计算镜面温度</b> .....	3
2.1 镜面与镜体差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$ ).....	3
2.2 镜体与器件差值 ( $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$ ).....	4
2.3 器件与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$ ).....	8
2.4 计算镜面与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-CERAMIC}}$ ).....	8
<b>3 计算示例</b> .....	9
<b>4 总结</b> .....	15
<b>5 参考资料</b> .....	15
<b>6 修订历史记录</b> .....	16

## 插图清单

图 1-1. 简化的 DMD 热敏电阻网络.....	2
图 2-1. 微镜反射率与波长 (UV) 间的关系.....	5
图 2-2. 微镜反射率与波长 (可见光) 间的关系.....	6
图 2-3. 微镜反射率与波长 (近红外) 间的关系.....	6
图 2-4. 脉冲参数.....	7
图 3-1. 25kW/cm <sup>2</sup> 时的 DMD 镜面温升.....	9
图 3-2. DMD 镜体温升 25kW/cm <sup>2</sup> .....	10
图 3-3. 250MW/cm <sup>2</sup> 时的 DMD 镜面温升.....	12
图 3-4. 250MW/cm <sup>2</sup> 时的 DMD 镜体温升.....	14

## 表格清单

表 2-1. 镜体热时间常数与镜片间距间的关系.....	4
表 2-2. 微镜填充系数与镜片间距.....	5
表 2-3. 一组可能的镜体加热条件.....	7

## 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 DMD 微镜的加热

当将来自光学光源的光施加到 DMD 时，大部分光会入射到镜面并被反射。不过，该入射光的一小部分被镜片材料吸收，必须通过 DMD 镜片结构耗散到 DMD 器件中，然后从 DMD 硅片散发到 DMD 陶瓷封装的背面。DMD 上的另一小部分入射光以及任何溢出阵列并直接落在器件上的光一同落在 DMD 器件上的镜片之间的间隙内。这种光以热量的形式被器件吸收，并与器件上电路产生的热量以及通过镜面吸收的热量相结合，在 DMD 器件上产生总体温升。然后，这些热量通过 DMD 陶瓷封装散发。图 1-1 中的简单 1-D 电阻网络说明了描述 DMD 热吸收和冷却路径的模型。

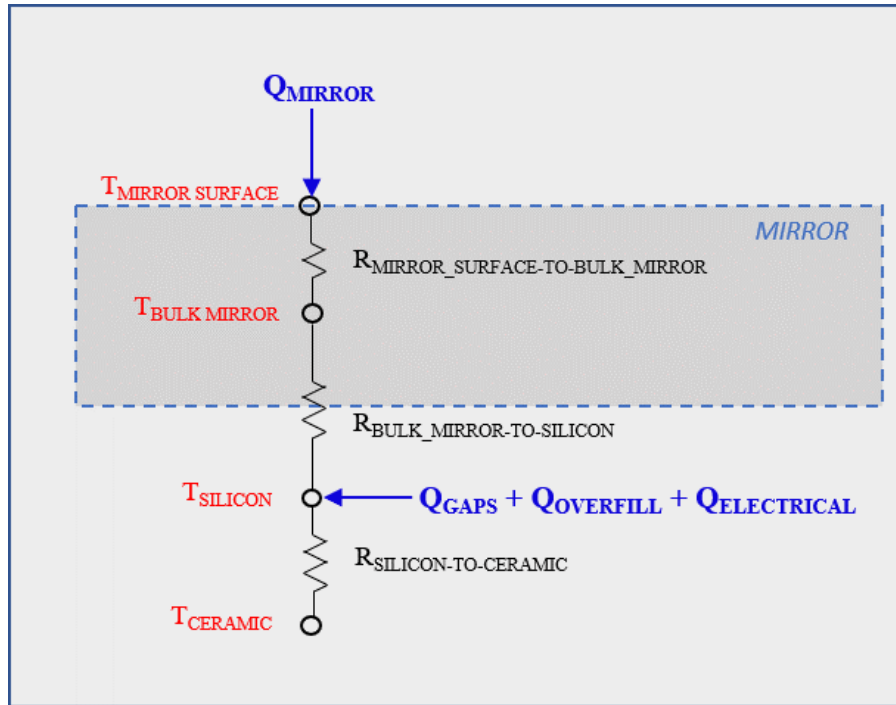


图 1-1. 简化的 DMD 热敏电阻网络

该电阻网络显示了三次温升，必须计算这些温升才能确定镜面温度。在使用连接的热电偶的系统中可以测量  $T_{\text{CERAMIC}}$ ，但  $T_{\text{SILICON}}$ 、 $T_{\text{BULK MIRROR}}$  和  $T_{\text{MIRROR SURFACE}}$  无法直接测量。因此，我们需要计算以下温度差值：

### 1.1 镜面与镜体差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$ )

镜体到镜面温升表示微镜顶部（表面）温度高于镜体温度的温升。如果脉冲持续时间足够短并且在微镜上入射的光脉冲功率足够高，则可能会沿微镜的厚度方向产生高于镜体温度的明显温升。此计算的示例如节 2.1 所示。

### 1.2 镜体与器件差值 ( $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$ )

器件到镜体温升表示微镜中吸收的热负荷，必须通过微镜结构传导至器件表面。此计算的示例如节 2.2 所示。

### 1.3 器件与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$ )

陶瓷至器件温升的计算方式与标准半导体器件芯片温度的计算方式类似。DMD 陶瓷封装的热阻乘以器件上的总 DMD 功率，然后加至在  $T_{\text{CERAMIC}}$  处测量的温度。此计算的示例如 [节 2.3](#) 所示。

## 2 使用脉冲光源计算镜面温度

吸收的热量输入到 DMD 微镜顶部，导致微镜的顶部表面是最热的位置。镜面温度将随着施加脉冲照明而上升和下降，可以单独计算前面所述的三种温升，并将其加在一起，得到最终的镜面温度。

### 2.1 镜面与镜体差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$ )

必须先将吸收的热负荷从微镜顶部传递到微镜底部，然后才能将其从镜体传导至器件。沿微镜厚度方向的热传导通常非常高效，因为铝镜很薄且具有高导热性，但脉冲照明可能会导致镜面温度远高于镜体温度的情况。

由于这些短脉冲可以非常快速地加热镜面，而不会影响微镜的底部表面，因此可以将微镜视为半无限实体。[方程式 1](#) 中显示了具有恒定热通量的半无限实体的温度公式。

$$T(x, t) = T_i + 2q \frac{\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{qx}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (1)$$

其中：

$T(x, t)$  = 深度 =  $x$ 、时间 =  $t$  时的温度

$T_i$  = 初始微镜温度

$q$  = 镜面吸收的热通量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\alpha$  = 微镜热扩散率 =  $6.4667 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$

$k$  = 微镜热导率 =  $160 \text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$

$\operatorname{erfc}(x)$  = 互补误差函数

因为我们只关注镜面温度，

以上公式中的深度 ( $x$ ) = 0 可简化为 [方程式 2](#)。

$$T(t) = T_i + 2q \frac{\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \quad (2)$$

使用该公式可计算脉冲结束且处于最大值的镜面温度， $t$  = 脉冲持续时间。温升只是镜面吸收的热通量 ( $q$ ) 和脉冲持续时间 ( $t$ ) 的函数。对于铝镜，所有其他变量都是恒定的。因此，温升与  $qt^{1/2}$  成正比。随着脉冲持续时间在恒定平均功率密度下变小，峰值脉冲功率会增加，并导致镜面温度大幅上升。此外，镜面温升与镜片间距无关，因为镜片厚度可视为半无限实体，而像素面积不会影响该一维热流。

## 2.2 镜体与器件差值 ( $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$ )

吸收的热量必须从 DMD 微镜传递到底层器件。在 CW 应用和脉冲应用中都是如此。通常，在 CW 应用中，高于器件温度的镜体温升很小，但在脉冲式应用中，峰值光功率可能远高于平均功率。这会导致每次脉冲的镜体温度上升和下降。镜体温升由 [方程式 3](#) 定义。

$$T(t) = T_f + (T_i - T_f)e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (3)$$

其中：

$T(t)$  = 时间 =  $t$  时的微镜温度

$T_f$  =  $t = \infty$  (稳态) 时的最终微镜温度

$T_i$  =  $t = 0$  时的初始微镜温度

$\tau$  = 微镜的热时间常数 ( $R \times C$ ) [[表 2-1](#)]

$T_f = T_i + Q_{\text{MIRROR}} \times R_{\text{MIRROR-TO-SILICON}}$  [[表 2-1](#)]

$Q_{\text{MIRROR}} = Q_{\text{INCIDENT\_MIRROR}} \times [FF_{\text{MIRROR}} \times (1 - MR)]$

其中：

$Q_{\text{INCIDENT\_MIRROR}}$  = 每个镜片的总入射功率 [入射功率密度  $\times$  (镜片间距)<sup>2</sup>]

$FF_{\text{MIRROR}}$  = 微镜阵列填充系数 (导通状态计算最高温度) [[表 2-2](#)]

$MR$  = 微镜反射率 [[图 2-1](#)、[图 2-2](#)、[图 2-3](#)]

**表 2-1. 镜体热时间常数与镜片间距的关系**

像素 [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{MIRROR-TO-SILICON}}$ [ $^{\circ}\text{C/W}$ ]	$C_{\text{MIRROR}}$ [ $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ]	$\tau = R \times C$ [ $\mu\text{s}$ ]
5.4 (12 $^{\circ}$ )	$7.63 \times 10^5$	$1.14 \times 10^{-11}$	8.70
5.4 (17 $^{\circ}$ )	$9.54 \times 10^5$	$1.14 \times 10^{-11}$	10.88
7.56、7.60、7.637	$4.47 \times 10^5$	$2.57 \times 10^{-11}$	11.49
9.0	$4.53 \times 10^5$	$4.21 \times 10^{-11}$	19.07
10.8	$3.39 \times 10^5$	$9.52 \times 10^{-11}$	32.27
13.68	$2.52 \times 10^5$	$1.53 \times 10^{-10}$	38.56

微镜的热时间常数， $\tau$ ，定义为  $R_{\text{MIRROR}} \times C_{\text{MIRROR}}$

其中：

$R_{\text{MIRROR}}$  是从微镜到器件的热阻

$C_{\text{MIRROR}}$  是微镜的热电容

在 [表 2-1](#) 中， $R$  是使用像素超结构和微镜与器件间距离的有限元模型计算得出的。 $C$  计算为  $\rho V C_p$ ，其中：

$\rho$  = 铝镜的密度

$V$  = 铝镜的体积

$C_p$  = 铝镜的比热

因此， $\tau$  因每个镜片间距而异

表 2-2. 微镜填充系数与镜片间距

像素 [ $\mu\text{m}$ ]	$FF_{\text{MIRROR}}$		照明角度 [度]
	导通状态	关断状态	
5.4 (12°)	0.901	0.720	24
5.4 (17°)	0.911	0.765	34
7.56、7.60	0.931	0.724	24
7.637	0.936	0.728	24
9.0	0.967	0.600	29
10.8	0.931	0.726	24
13.68	0.950	0.728	24

备注

有关微镜填充系数的更多详细信息，请参阅 [DLPA083](#)。

备注

导通状态和关断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。

1. 12° 倾斜 =  $f/2.4$
2. 14.5° 倾斜 =  $f/2.0$
3. 17° 倾斜 =  $f/1.7$

Mirror Metal Reflectance - Unpolarized

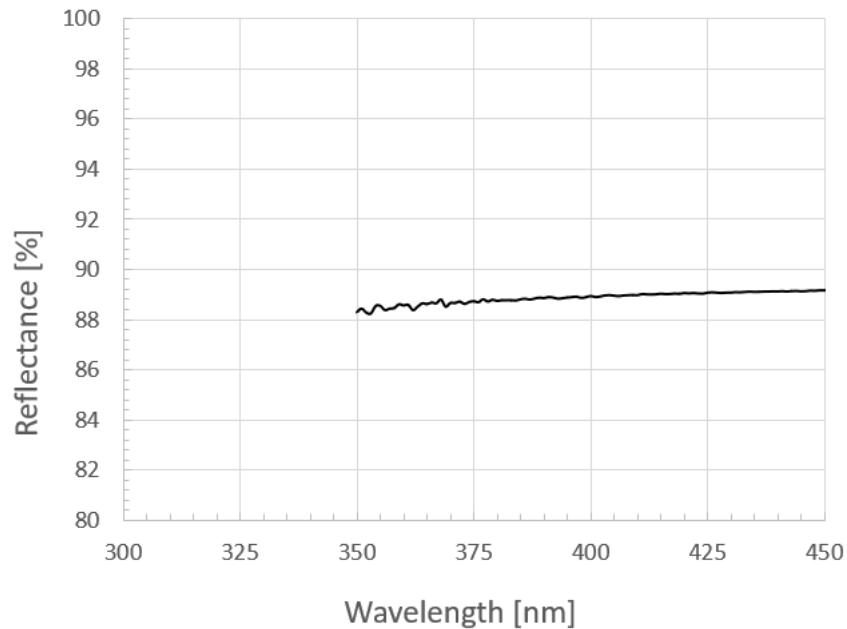


图 2-1. 微镜反射率与波长 (UV) 间的关系

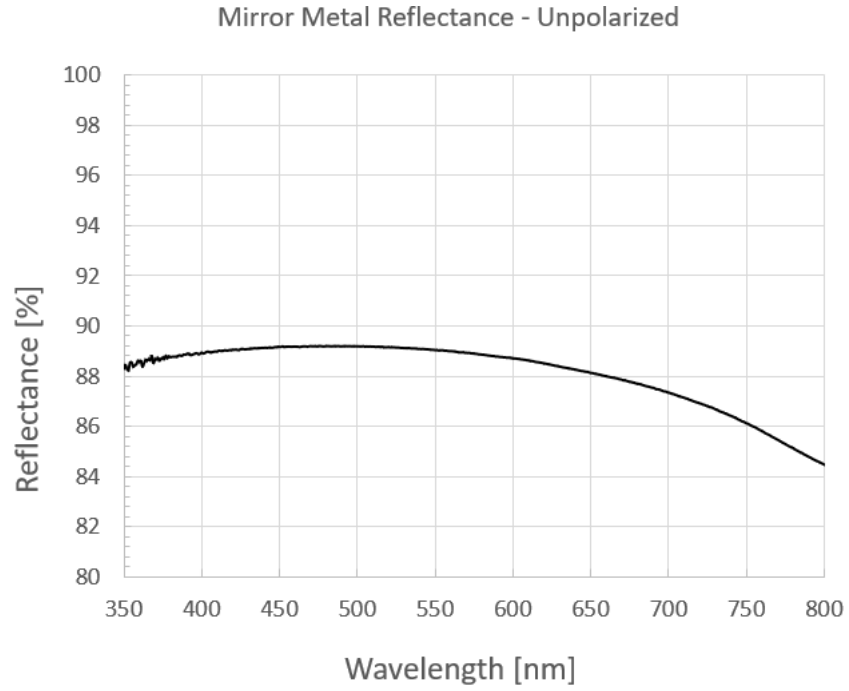


图 2-2. 微镜反射率与波长 ( 可见光 ) 间的关系

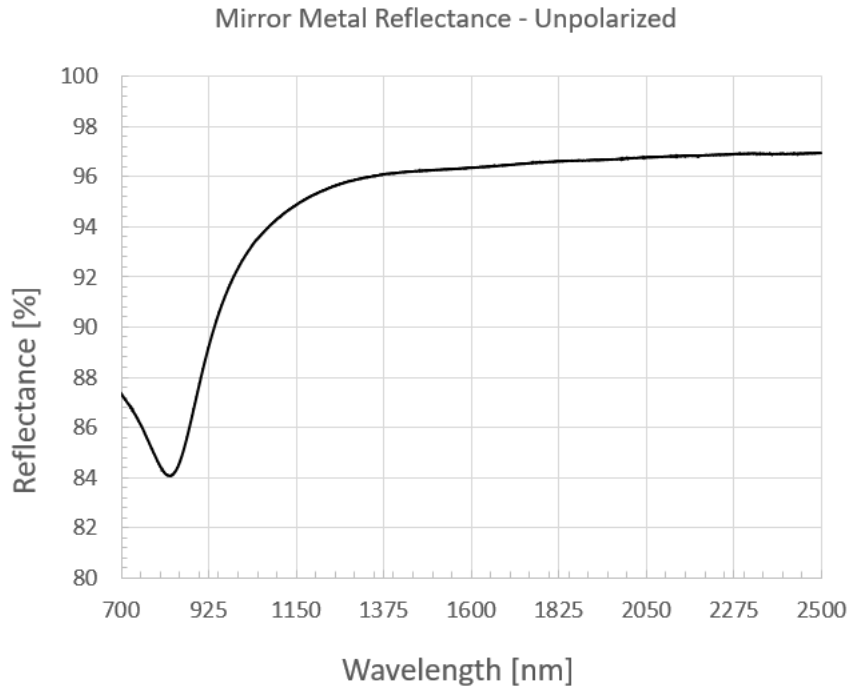
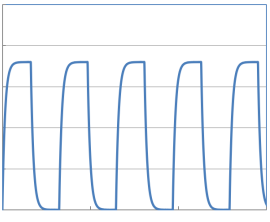
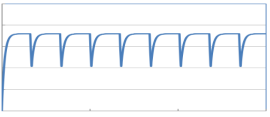
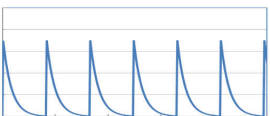
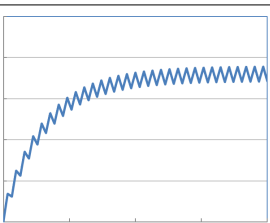


图 2-3. 微镜反射率与波长 ( 近红外 ) 间的关系

表 2-3. 一组可能的镜体加热条件

$t_{\text{pulse}}$	$t_{\text{off}}$	微镜加热条件	温度图与时间的关系
$> 5\tau$	$> 5\tau$	微镜在每次脉冲期间完全加热和冷却	
$> 5\tau$	$< 5\tau$	微镜在每次脉冲期间完全加热和部分冷却	
$< 5\tau$	$> 5\tau$	微镜在每次脉冲期间部分加热，然后完全冷却	
$< 5\tau$	$< 5\tau$	微镜在每次脉冲期间部分加热和部分冷却，直到在多次脉冲后最终达到稳定状态	

根据  $t_{\text{pulse}}$  和  $t_{\text{off}}$  相对于镜片热时间常数的持续时间，镜片产生的瞬态响应有多种可能。表 2-3 中显示了这些可能。

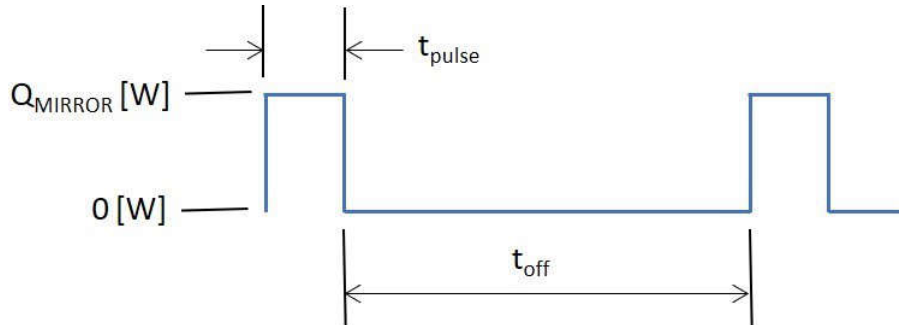


图 2-4. 脉冲参数

### 2.3 器件与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$ )

在 CW 系统中，这通常是唯一的考虑因素，温升定义为器件的总热负荷乘以从器件到封装背面陶瓷的封装热阻。

$$\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = Q_{\text{SILICON}} \times R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$$

其中：

$$Q_{\text{SILICON}} = Q_{\text{ELECTRICAL}} + Q_{\text{ILLUMINATION}}$$

$$Q_{\text{ILLUMINATION}} = (\alpha_{\text{DMD}} \times Q_{\text{INCIDENT}})$$

$$Q_{\text{ELECTRICAL}} = \text{DMD 上的总电功率 [来自 DMD 数据表]}$$

$$R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} \text{ [来自 DMD 数据表]}$$

$$Q_{\text{INCIDENT}} = \text{到 DMD 的总入射平均光功率}$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = \text{DMD 热吸收率}$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = (1 - \text{Overfill}) * \{ [FF_{\text{MIRROR}} * (1 - MR)] + (1 - FF_{\text{MIRROR}}) \} + (2 * \alpha_{\text{WINDOW}}) + \text{Overfill}$$

其中：

$$FF_{\text{MIRROR}} = \text{微镜阵列填充系数 ( 关断状态计算最高温度 ) [表 2-2]}$$

$$MR = \text{微镜反射率 [图 2-1、图 2-2、图 2-3]}$$

$$\alpha_{\text{WINDOW}} = \text{窗口单通吸收率}$$

$$\text{Overfill} = 1 - \frac{\text{Array Area}}{\text{Incident Area}}$$

$$\text{Incident Area} = \text{DMD 上的总照明区域}$$

由于器件的热时间常数为秒级，因此器件可以将脉冲热源视为连续热源，等于 DMD 光功率的平均吸收功率。

微镜阵列的填充系数 ( $FF_{\text{MIRROR}}$ ) 在导通状态下比关断状态下高 [表 2-2]。这是因为偏离光源 ( 关断状态 ) 的微镜会通过微镜间隙将器件的更多部分暴露于照明中。对于最坏情形下的热建模，只需使用关断状态填充系数。

### 2.4 计算镜面与陶瓷差值 ( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-CERAMIC}}$ )

我们已经演示了如何计算高于封装背面陶瓷的器件温升、高于器件温度的镜体温升以及高于镜体温度的镜面温升。总镜面温升等于这三项的总和：

$$T_{\text{MIRROR SURFACE}} - T_{\text{CERAMIC}} = \Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} + \Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}} + \Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}} \quad (4)$$



### 3 计算示例

下面是详细的计算示例，演示了如何使用三种温升来计算镜面温度：

1. 镜面与镜体差值
2. 镜体与器件差值
3. 器件与陶瓷差值

在第一个示例计算中， $t_{\text{off}}$  大于  $5\tau$ ，因此，镜体在每次脉冲后完全冷却，只需分析一次脉冲。

#### 示例 1

脉冲激光用 1064nm 的波长光照亮 DLP650LNIR DMD，并填充有源阵列而不会出现溢出。

脉冲持续时间 ( $t_{\text{pulse}}$ ) = 1  $\mu\text{s}$

$t_{\text{off}} = 999 \mu\text{s}$  (光源的脉冲重复率为 1kHz)

脉冲期间的峰值入射功率为 25kW/cm<sup>2</sup>

计算镜面高于 DMD 陶瓷温度的温升：

1. 镜面与镜体差值： $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$

$$T(t) = 2q * \frac{\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} + T_i$$

$T(t)$  = 时间 =  $t$  时的温度

$T_i$  = 初始微镜温度

$q$  = 镜面吸收的热通量 [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = 微镜热扩散率 = 6.4667 x 10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>/s

$k$  = 微镜热导率 = 160W/m-°C

$q = 25\text{kW/cm}^2 \times (1 - 0.94) = 1.50\text{kW/cm}^2$

$t_{\text{pulse}} = 1 \mu\text{s}$

$T(1 \mu\text{s}) = 2 \times 1.50\text{kW/cm}^2 \times \left\{ \left[ \frac{(6.4667\text{e-}5\text{m}^2/\text{s} \times 1.0\text{e-}6\text{s})}{\pi} \right]^{1/2} / 160\text{W/m-}^\circ\text{C} \right\} + 0 = 0.85^\circ\text{C}$

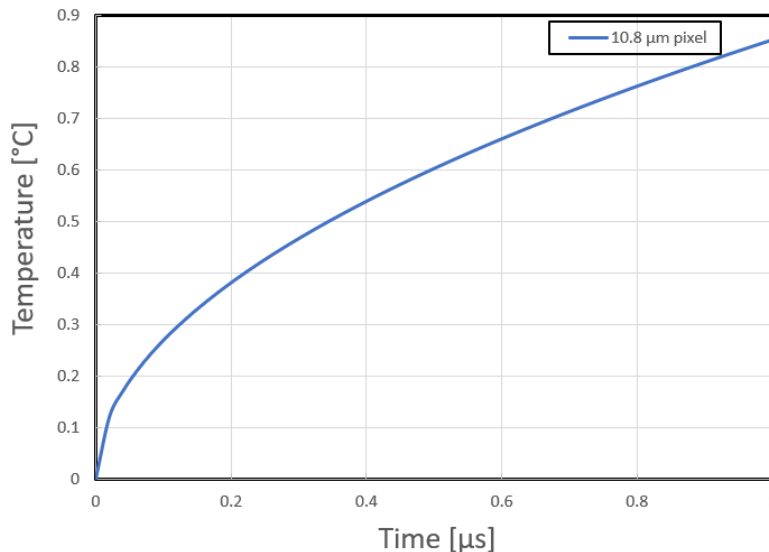


图 3-1. 25kW/cm<sup>2</sup> 时的 DMD 镜面温升

2. 镜体与器件差值： $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$

$$T(t) = T_f + (T_i - T_f)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_f = T_i + Q_{MIRROR} \times R_{MIRROR-TO-SILICON}$$

$$Q_{MIRROR} = Q_{INCIDENT\_MIRROR} \times [FF_{MIRROR} \times (1 - MR)]$$

$$Q_{INCIDENT\_MIRROR} = 25\text{kW/cm}^2 \times (10.8 \mu\text{m})^2 = 0.02916\text{W}$$

$$FF_{MIRROR} = 0.931 \text{ (导通状态)}$$

$$MR_{1064\text{nm}} = 0.94 \text{ 时}$$

$$Q_{MIRROR} = 0.02916\text{W} \times [0.931 \times (1 - 0.94)] = 1.629\text{mW}$$

$$R_{SILICON-TO-CERAMIC} = 3.39 \times 10^5\text{C/W}$$

$$T_f = 0 + 1.629\text{mW} \times (3.39 \times 10^5\text{C/W}) = 552.23\text{C}$$

$$\tau = 32.27 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{off}} = 999 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{pulse}} = 1 \mu\text{s}$$

$$5\tau = 5 \times 32.27 \mu\text{s} = 161.35 \mu\text{s}$$

由于  $t_{\text{off}} = 999 \mu\text{s} (> 5\tau)$  镜体会完全冷却到初始温度  $T_i$ ，分析一次脉冲周期就足够了。

$$T(1 \mu\text{s}) = 552.23\text{C} + (0 - 552.23\text{C})e^{-(1 \mu\text{s}/32.27 \mu\text{s})} = 16.85\text{C}$$

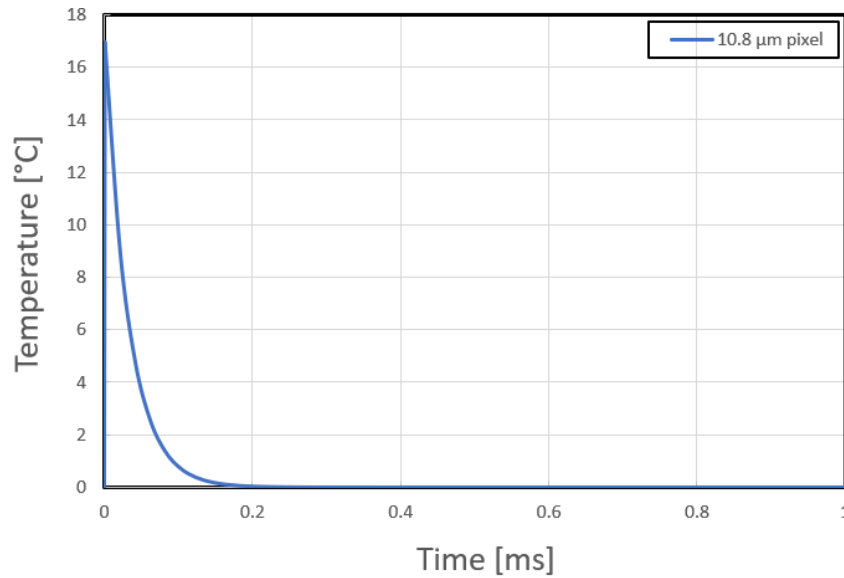


图 3-2. DMD 镜体温升 25kW/cm<sup>2</sup>

### 3. 器件与陶瓷差值： $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$

根据 DLP650LNIR 数据表：

$$\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = Q_{\text{SILICON}} \times R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$$

$$R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = 0.5^{\circ}\text{C/W}$$

$$Q_{\text{ELECTRICAL}} = 1.8\text{W}$$

$$Q_{\text{SILICON}} = Q_{\text{ELECTRICAL}} + Q_{\text{ILLUMINATION}}$$

$$FF_{\text{MIRROR}} = 0.726 \text{ (关断状态)}$$

$$MR_{1064\text{nm}} = 0.94 \text{ 吋}$$

$$\alpha_{\text{Window } 1064\text{nm}} = 0.007 \text{ 吋 (每次导通)}$$

$$\text{Overfill} = 0$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = (1 - \text{Overfill}) * \{ [FF_{\text{MIRROR}} * (1 - MR)] + (1 - FF_{\text{MIRROR}}) \} + (2 * \alpha_{\text{WINDOW}}) + \text{Overfill}$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = (1 - 0) * \{ [0.726 * (1 - 0.94)] + [1 - 0.726] \} + (2 * 0.007) + 0$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = 0.33 \text{ (关断状态)}$$

$Q_{\text{INCIDENT}}$  = 到 DMD 的总入射平均光功率

$$\text{有源阵列面积} = (1280 \times 10.8 \mu\text{m}) \times (800 \times 10.8 \mu\text{m}) = 1.1944\text{cm}^2$$

$$t_{\text{pulse}} = 1 \mu\text{s}, t_{\text{off}} = 999 \mu\text{s}$$

$$\text{因此脉冲占空比} = 1 \mu\text{s} / (1 \mu\text{s} + 999 \mu\text{s}) \times 100\% = 0.1\%$$

$$\text{平均光功率密度} = (25\text{kW/cm}^2) \times 0.1\% = 25\text{W/cm}^2$$

$$\text{平均光功率} = 25\text{W/cm}^2 \times 1.1944\text{cm}^2 = 29.86\text{W}$$

$$\text{平均吸收光功率} = 29.86\text{W} \times 0.33 = 9.85\text{W}$$

$$\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = (1.8\text{W} + 9.85\text{W}) \times 0.5^{\circ}\text{C/W} = 5.8^{\circ}\text{C}$$

**镜面与陶瓷差值：( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-CERAMIC}}$ )**

$$T_{\text{MIRROR SURFACE}} - T_{\text{CERAMIC}} = \Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} + \Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}} + \Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$$

$$T_{\text{MIRROR\_SURFACE}} - T_{\text{CERAMIC}} = 5.8^{\circ}\text{C} + 16.85^{\circ}\text{C} + 0.85^{\circ}\text{C} = 23.5^{\circ}\text{C}$$

在第二个示例计算中，由于  $t_{\text{pulse}}$  和  $t_{\text{off}}$  均  $< 5\tau$ ，因此需要对多次脉冲进行分析，直至温度上升趋稳。

## 示例 2

脉冲激光用 1064nm 的波长照亮 DLP650LNIR DMD，并填充有源阵列而不会出现溢出。

脉冲持续时间 ( $t_{\text{pulse}}$ ) = 10ps

$t_{\text{off}} = 99.99999 \mu\text{s}$  (光源的脉冲重复率为 10 kHz)

脉冲期间的峰值入射功率为 250MW/cm<sup>2</sup>

计算镜面高于 DMD 陶瓷温度的温升：

### 1. 镜面与镜体差值： $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$

$$T(t) = 2q * \frac{\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} + T_i$$

$T(t)$  = 时间 =  $t$  时的温度

$T_i$  = 初始微镜温度

$q$  = 镜面吸收的热通量 [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = 微镜热扩散率 =  $6.4667 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$

$k$  = 微镜热导率 = 160W/m-°C

$q = 250 \text{ MW}/\text{cm}^2 \times (1 - 0.94) = 15 \text{ MW}/\text{cm}^2$

$t_{\text{pulse}} = 10\text{ps}$

$T(10\text{ps}) = 2 \times 15\text{MW}/\text{cm}^2 \times \left\{ \left[ \frac{(6.4667\text{e-}5\text{m}^2/\text{s} \times 1.0\text{e-}11\text{s})}{\pi} \right]^{1/2} / 160\text{W}/\text{m-}^\circ\text{C} \right\} + 0 = 26.9^\circ\text{C}$

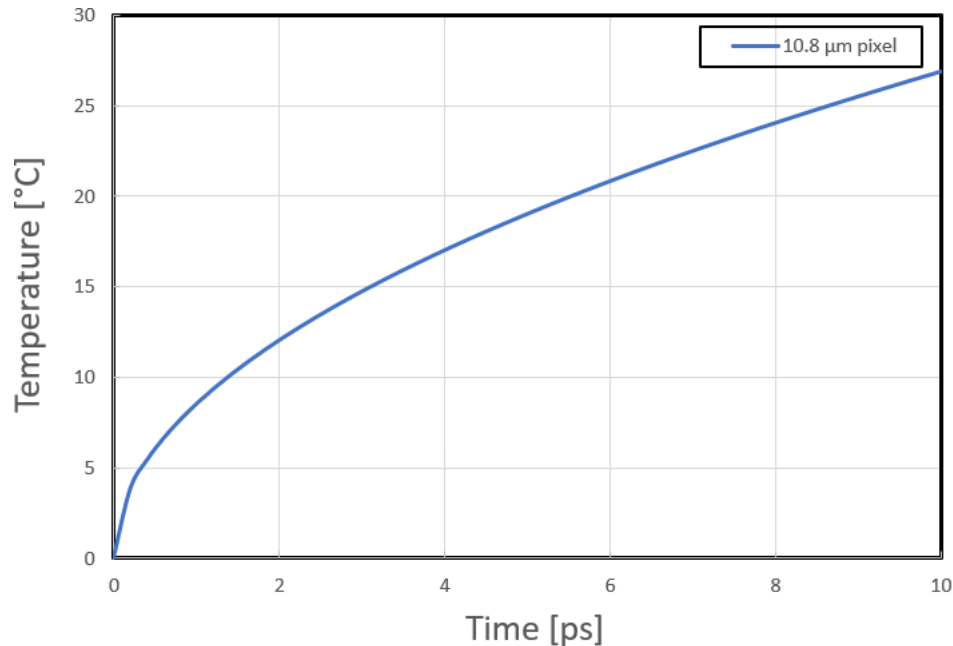


图 3-3. 250MW/cm<sup>2</sup> 时的 DMD 镜面温升

2. 镜体与器件差值： $\Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}}$

$$T(t) = T_f + (T_i - T_f)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_f = T_i + Q_{\text{MIRROR}} \times R_{\text{MIRROR-TO-SILICON}}$$

$$Q_{\text{MIRROR}} = Q_{\text{INCIDENT\_MIRROR}} \times [FF_{\text{MIRROR}} \times (1 - MR)]$$

$$Q_{\text{INCIDENT\_MIRROR}} = 250\text{MW/cm}^2 \times (10.8 \mu\text{m})^2 = 291.6\text{W}$$

$$FF_{\text{MIRROR}} = 0.931 \text{ (导通状态)}$$

$$MR_{1064\text{nm}} = 0.94 \text{ 时}$$

$$Q_{\text{MIRROR}} = 291.6\text{W} \times [0.931 \times (1 - 0.94)] = 16.289\text{W}$$

$$R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = 3.39 \times 10^5\text{C/W}$$

$$T_f = 0 + 16.289\text{W} \times (3.39 \times 10^5\text{C/W}) = 5.522 \times 10^6\text{C}$$

$$\tau = 32.27 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{off}} = 99.99999 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{pulse}} = 10\text{ps}$$

$$5\tau = 5 \times 32.27 \mu\text{s} = 161.35 \mu\text{s}$$

镜体在脉冲之间仅部分加热和部分冷却，因此我们需要迭代并分析一系列脉冲，直到微镜温度不再变化为止。

**第 1 次  $t_{\text{pulse}}$  加热：**

$$T(10\text{ps}) = 5.522 \times 10^6\text{C} + (0 - 5.522 \times 10^6\text{C})e^{-(10\text{ps}/32.27 \mu\text{s})} = 1.710\text{C}$$

**第 1 次  $t_{\text{off}}$  冷却：**

$$T(99.99999 \mu\text{s}) = 0\text{C} + (1.720 - 0\text{C})e^{-(99.99999 \mu\text{s}/32.27 \mu\text{s})} = 0.077\text{C}$$

**第 2 次  $t_{\text{pulse}}$  加热：**

$$T(10\text{ps}) = 5.522 \times 10^6\text{C} + (0.077\text{C} - 5.522 \times 10^6\text{C})e^{-(10\text{ps}/32.27 \mu\text{s})} = 1.787\text{C}$$

**第 2 次  $t_{\text{off}}$  冷却：**

$$T(99.99999 \mu\text{s}) = 0\text{C} + (1.787 - 0\text{C})e^{-(99.99999 \mu\text{s}/32.27 \mu\text{s})} = 0.081\text{C}$$

**第 3 次  $t_{\text{pulse}}$  加热：**

$$T(10\text{ps}) = 5.522 \times 10^6\text{C} + (0.081\text{C} - 5.522 \times 10^6\text{C})e^{-(10\text{ps}/32.27 \mu\text{s})} = 1.791\text{C}$$

**第 3 次  $t_{\text{off}}$  冷却：**

$$T(99.99999 \mu\text{s}) = 0\text{C} + (1.791 - 0\text{C})e^{-(99.99999 \mu\text{s}/32.27 \mu\text{s})} = 0.081\text{C}$$

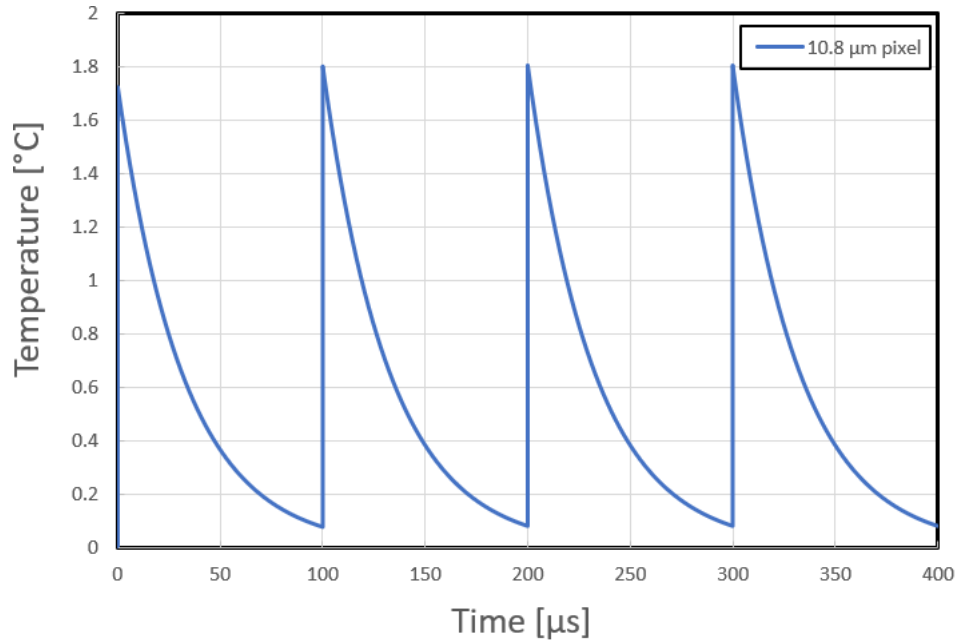
**第 4 次  $t_{\text{pulse}}$  加热：**

$$T(10\text{ps}) = 5.522 \times 10^6\text{C} + (0.081\text{C} - 5.522 \times 10^6\text{C})e^{-(10\text{ps}/32.27 \mu\text{s})} = 1.791\text{C}$$

**第 4 次  $t_{\text{off}}$  冷却：**

$$T(99.99999 \mu\text{s}) = 0\text{C} + (1.791 - 0\text{C})e^{-(99.99999 \mu\text{s}/32.27 \mu\text{s})} = 0.081\text{C}$$

请注意，从第 3 次脉冲到第 4 次脉冲，温度没有发生变化。当每次脉冲迭代后的温度停止变化时，它已达到稳定状态。高于器件温度的镜体温升为 1.8°C。

图 3-4. 250MW/cm<sup>2</sup> 时的 DMD 镜体温升3. 高于陶瓷的 DMD 器件温升： $\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$ 

根据 DLP650LNIR 数据表：

$$\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = Q_{\text{SILICON}} \times R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}}$$

$$R_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = 0.5^{\circ}\text{C/W}$$

$$Q_{\text{ELECTRICAL}} = 1.8\text{W}$$

$$Q_{\text{SILICON}} = Q_{\text{ELECTRICAL}} + Q_{\text{ILLUMINATION}}$$

$$FF_{\text{MIRROR}} = 0.726 \text{ (关断状态)}$$

$$MR_{1064\text{nm}} = 0.94 \text{ 时}$$

$$\alpha_{\text{Window } 1064\text{nm}} = 0.007 \text{ 时 (每次导通)}$$

$$\text{Overfill} = 0$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = (1 - \text{Overfill}) * \{ [FF_{\text{MIRROR}} * (1 - MR)] + (1 - FF_{\text{MIRROR}}) \} + (2 * \alpha_{\text{WINDOW}}) + \text{Overfill}$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = (1 - 0) * \{ [0.726 * (1 - 0.94)] + [1 - 0.726] \} + (2 * 0.007) + 0$$

$$\alpha_{\text{DMD}} = 0.33 \text{ (关断状态)}$$

$Q_{\text{INCIDENT}}$  = 到 DMD 的总入射平均光功率

$$\text{有源阵列面积} = (1280 \times 10.8 \mu\text{m}) \times (800 \times 10.8 \mu\text{m}) = 1.1944\text{cm}^2$$

$$t_{\text{pulse}} = 10\text{ps}, t_{\text{off}} = 99.99999 \mu\text{s}$$

$$\text{因此, 脉冲占空比} = 10\text{ps} / (10\text{ps} + 99.99999 \mu\text{s}) \times 100\% = 0.00001\%$$

$$\text{平均光功率密度} = (250\text{MW/cm}^2) \times 0.00001\% = 25\text{W/cm}^2$$

$$\text{平均光功率} = 25\text{W/cm}^2 \times 1.1944\text{cm}^2 = 29.86\text{W}$$

$$\text{平均吸收光功率} = 29.86\text{W} \times 0.33 = 9.85\text{W}$$

$$\Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} = (1.8\text{W} + 9.85\text{W}) \times 0.5^{\circ}\text{C/W} = 5.8^{\circ}\text{C}$$

### 镜面与陶瓷差值：( $\Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-CERAMIC}}$ )

$$T_{\text{MIRROR\_SURFACE}} - T_{\text{CERAMIC}} = \Delta T_{\text{SILICON-TO-CERAMIC}} + \Delta T_{\text{BULK\_MIRROR-TO-SILICON}} + \Delta T_{\text{MIRROR\_SURFACE-TO-BULK\_MIRROR}}$$

$$T_{\text{MIRROR\_SURFACE}} - T_{\text{CERAMIC}} = 5.8\text{ }^{\circ}\text{C} + 1.8\text{ }^{\circ}\text{C} + 26.9\text{ }^{\circ}\text{C} = 34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

在第二个示例中，高于镜体温度的镜面温升比高于器件的镜体温升大得多。这在非常短的高强度脉冲中很常见。请注意，示例 1 和 2 的平均功率相同 (29.86W)，因此在两个示例中，高于陶瓷温度的器件温升相等。

## 4 总结

本应用手册展示了一种在使用脉冲光源照明时计算 DMD 微镜温升的方法。这些表格和公式可在各种运行条件下计算此温升，从而确定 DMD 的安全光功率运行条件。脉冲持续时间和微镜的热时间常数间的关系对于确定镜体的温度至关重要，而镜面温升高于镜体只是入射功率密度和脉冲持续时间的函数。

## 5 参考资料

1. [Fundamentals of Heat and Mass Transfer](#), 3<sup>rd</sup> Edition, 259-263 (1990), Incropera, Frank P., DeWitt, David P.
2. 德州仪器 (TI), [可见波长的 DMD 光学效率](#) 应用手册。

## 6 修订历史记录

---

**Changes from Revision A (January 2024) to Revision B (April 2024)** **Page**

- 更新了整个出版物中几个位置的 DMD 吸收率公式，以便更准确地计算 DMD 吸收率..... 8
- 

---

**Changes from Revision \* (September 2012) to Revision A (January 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
  - 更改了原来的 *DMD 激光功率处理* 出版物，新增了 *数字微镜器件散热注意事项 (包括脉冲光源)* 出版物..... 1
-



## 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