

## 应用说明：LSR-4C 激光散斑衰减器

新特光电是 Optotune 在中国的授权合作伙伴，一站式提供其全系列可调光学元件（液态可调焦镜头、精密&快速光束控制反射振镜、光束位移器、激光散斑衰减器及控制器）的选型匹配、应用方案设计 & 系统集成与工程落地全生命周期的技术支持。通过可调光学技术，实现焦距动态调节、光束精准偏转与高质量成像优化，广泛应用于激光加工、机器视觉检测、3D成像及高端科研系统等场景。

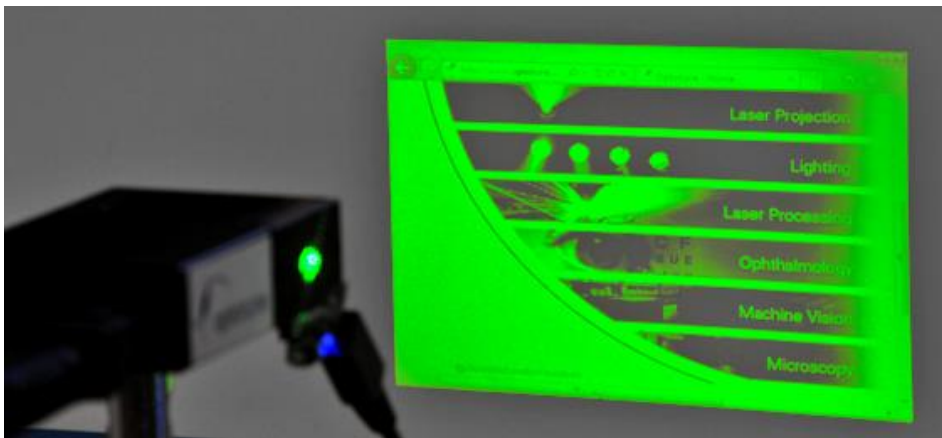
液态可调焦镜头：<https://www.sintecclaser.com/optical/liquid-lens.html>

精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

光束位移器：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-shifting-devices.html>

激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

我们还可提供不同通光孔径、调焦范围、光束偏转角度及涂层波长（UV-IR）的定制化可调光学解决方案，满足从科研到工业量产的多样化需求。获取最新方案及报价，请联系：  
手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016



## 1. 引言

激光相较于其他光源具有诸多优势。例如，低发散角使得高光功率的精确控制成为可能，使激光在投影系统中非常具有吸引力。与传统照明系统相比，激光投影系统不仅具有更宽的色谱范围，还拥有更长的使用寿命。另一项重要特性是高空间与时间相干性，这使得激光可实现紧密聚焦、远距离准直、精密计量以及各种类型的光谱测量。尽管这一特性在许多科研系统中得到广泛应用，但在使用探测器的应用中也带来了显著的缺陷——散斑。

散斑是当表面粗糙度的波峰与波谷的高度差与激光波长量级相当时，在表面产生的局部干涉现象。常见出现散斑的表面包括墙面或电影银幕。在散斑图案中，每个散射点可视为二次相干光源。散斑通过相机或人眼被探测到，表现为颗粒状的图案及强度的高频局部波动。示例见图 1。

激光投影是极需降低散斑对比度的典型应用，因为散斑会严重降低投影图像质量。另一类受益于散斑对比度降低的应用是精密计量，因为散斑会降低测量系统的分辨率。

本应用说明将进一步介绍散斑的概念，并讨论相关应用中的去散斑方法。文中将对使用 LSR-4C 激光散斑衰减器进行散斑降低的不同配置进行特性分析与比较，并提出进一步的配置建议。

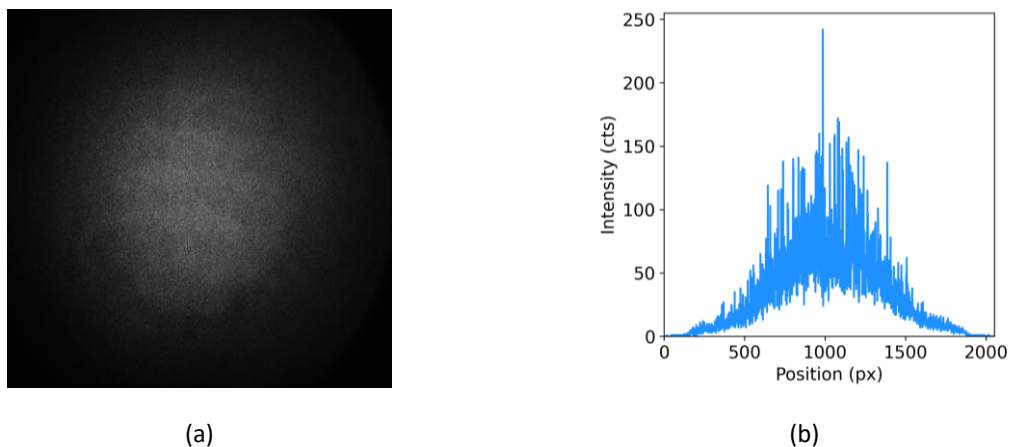


图 1: (a) 在 CCD 相机上拍摄的散斑图案。(b) 散斑图案的强度分布，通过 (a) 图像中的一条线切片得到。

## 2. 散斑图案的特性

### 2.1. 散斑对比度

当粗糙表面被相干光照射时，会形成散斑图案。散斑图案的具体特性取决于表面属性、入射光束和观察方向、照明光的时间及空间相干性，以及表面反向散射波的偏振状态和相位分布。

散斑对比度  $S$  定义为某一特定区域内强度的标准差  $\sigma$  与其平均值  $\mu$  的比值：

$$S = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

$$\mu = I_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2} \quad (3)$$

根据该定义，散斑对比度的取值范围为 0 到 1。散斑对比度为 1 表示强度变化与平均强度同量级，即散斑最为明显。散斑对比度为 0 表示强度标准差为零，即光斑均匀，无散斑。

一种典型的评估方法是将图像划分为若干子区域，计算每个子区域的散斑对比度  $S$ ，然后将各子区域的散斑对比度取平均，得到整个图像的散斑对比度。

### 2.2. 散斑对比度的测量

根据检测方案的不同，可以成像客观散斑或主观散斑。如果在观察平面上直接放置探测器而不使用成像透镜，则成像是客观散斑，即在自由空间中形成的散斑。主观散斑是通过光学系统（例如使用透镜将激光照射的屏幕表面成像到 CCD 相机）观察到的散斑，其特性依赖于成像系统的参数。

### 2.3. 散斑对比度的降低

降低散斑对比度的方法基于生成并平均不相关的散斑图案。对  $N$  个不相关的散斑图案进行平均，可将散斑对比度降低一个因子  $1/\sqrt{N}$ 。因此，目标是尽可能生成更多的不相关散斑图案。这可以通过以下方法实现：动态改变激光波长、角谱或偏振状态，扫描相干光斑，使用动态漫射器。此外，在固定激光波长和偏振的情况下，提高表面质量也能降低散斑对比度。LSR-4C 激光散斑衰减器 (LSR) 基于动态漫射器方法，通过时间平均实现散斑图案的抑制。

将使用 LSR 的散斑对比度 ( $S_{LSR}$ ) 与未使用 LSR 的光学参考系统散斑对比度  $S$  比较时，定义降低效率  $R$  如下：

$$R[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S}{S_{LSR}} \right) \quad (4)$$

例如，将散斑对比度从 0.5 降低至 0.2，对应的降低效率为 4 dB。

## 2.4. 高效散斑抑制的关键参数

在使用移动漫射器的情况下，散斑抑制效果取决于多个参数：

- 漫射器的运动速度（机械驱动频率）
- 漫射器的运动幅度
- 漫射器结构
- 观察者或相机的曝光时间
- 光学系统布局（光束直径、LSR 位置及附加光学元件）

漫射器的运动速度和运动幅度越大，在成像系统的曝光时间内叠加的散斑图案就越多。这也意味着曝光时间越长，平均的散斑图案越多，散斑对比度越低。然而，这一规律只适用于一定的曝光时间范围，超过该时间后，散斑对比度随曝光时间的降低速率基本保持不变。对于 LSR 产品，建议的曝光时间至少对应漫射器完成一个完整运动周期。即使曝光时间较短，也仍能观察到去散斑效果。

在使用移动漫射器时，需要在运动速度、运动幅度、漫射器尺寸与重量以及器件功耗之间进行权衡。漫射器越重，功耗越高，同时器件的谐振频率越低。

漫射器的微结构尺寸越小，扩散角度越大。这意味着，在相同光斑尺寸下，微结构较小的漫射器会产生更大的光束发散角，从而实现更显著的散斑对比度降低，相比微结构较大的漫射器更有效。图 2 展示了几种不同漫射器微结构尺寸的示意。

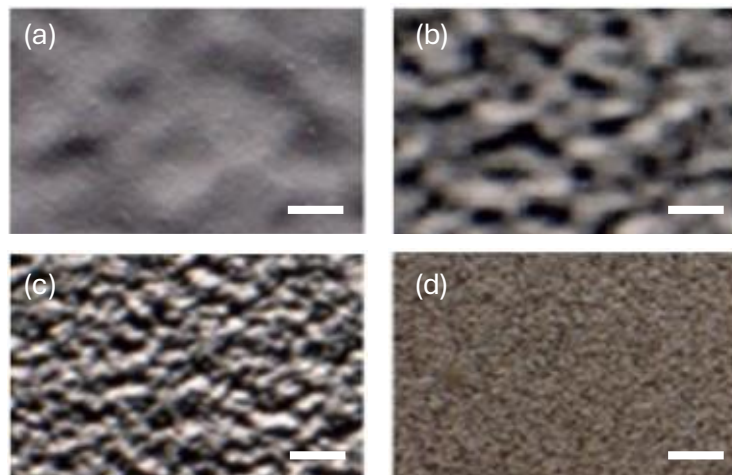


图 2：不同漫射器微结构示意图，平均粒径分别为：(a) 100  $\mu\text{m}$ ，(b) 50  $\mu\text{m}$ ，(c) 20  $\mu\text{m}$ ，(d) 3  $\mu\text{m}$ 。比例尺：100  $\mu\text{m}$ 。

### 3. LSR-4C

#### 3.1. 工作原理

LSR-4C 激光散斑衰减器 如图 1(a) 所示，其散斑衰减原理见图 3(b)。设备内的漫射器以高频运动 ( $120 \pm 10$  Hz) 和  $\pm 0.4$  mm 的振幅移动，使透射光束形成的多个散斑图案叠加。时间上对这些图案进行积分的检测系统会感知为均匀光分布。驱动方式为通过两个线圈脉冲电流作用：漫射器安装在弹簧上，由电磁阻力产生的力促使其运动。为确保至少完成 LSR-4C 的一个完整振动周期，建议的最小曝光时间为 8.3 ms。

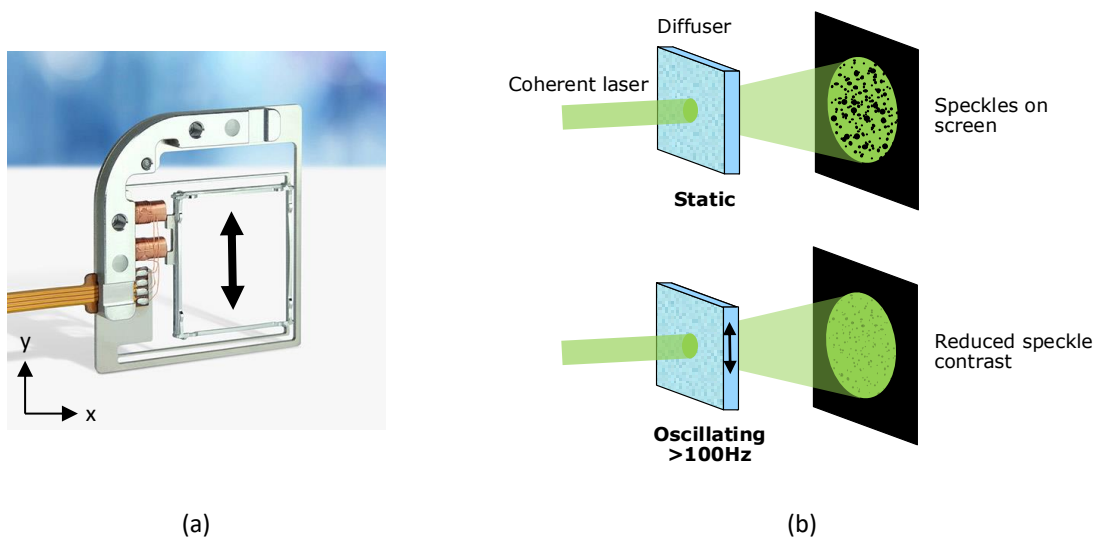


图 3: (a) LSR-4C, 箭头表示漫射器的振动方向。(b) 散斑对比度降低原理：通过移动漫射器，使多个散斑图案叠加，从而减小观察到的散斑噪声。

LSR-4C 提供标准产品版本，配备 VIS 涂层或未涂层的熔融石英漫射器，扩散角为  $8.5^\circ$ 。可定制版本则使用 未镀膜聚碳酸酯漫射器，并可提供多种扩散角。扩散角定义为漫射光强分布的半高全宽 (FWHM)，如图 4 所示。

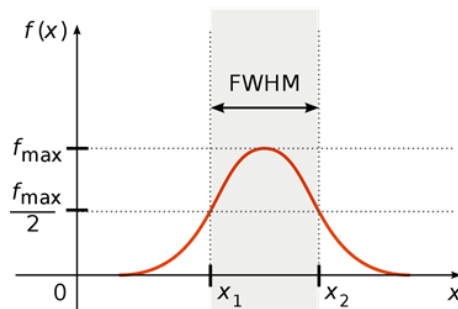


图 4: 给定最大强度  $f_{\max}$  的光强分布曲线，半高全宽 (FWHM) 扩散角的定义示意图。

### 3.2. 漫射器组合

LSR-4C 可作为单元使用以降低散斑，这是默认的 -L 配置。由于漫射器仅沿一个方向振动，两个 LSR-4C 单元可按 90° 相对角度串联使用，以在两个互相垂直的方向上抑制散斑，从而进一步降低散斑对比度，这称为 -LL 配置。在该配置下，用户可选择仅振动其中一个漫射器或同时振动两个漫射器。需要注意的是，对于光学系统中 LSR 光斑被成像到例如光纤的情况，应仅使用单个漫射器。

当组合两个漫射器时，总体扩散角由各自的扩散角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  计算得到：

$$\theta_{combined} = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2} \quad (5)$$

表 1 给出了不同漫射器组合的标准型号概览。更多详细信息，请参见 LSR-4C 产品数据手册。

Standard product	Configuration	Number of diffusers	Diffusion angle	AR coating
LSR-4C-L-18x18-9-T2-VIS	-L	Single diffuser	8.5°	VIS coated
	-LL	Double diffuser	12.0°	VIS coated
LSR-4C-L-18x18-9-T2-NOC	-L	Single diffuser	8.5°	Uncoated
	-LL	Double diffuser	12.0°	Uncoated

表 1: LSR-4C 标准配置一览。

## 4. 散斑衰减测量

### 4.1. 参考测试系统

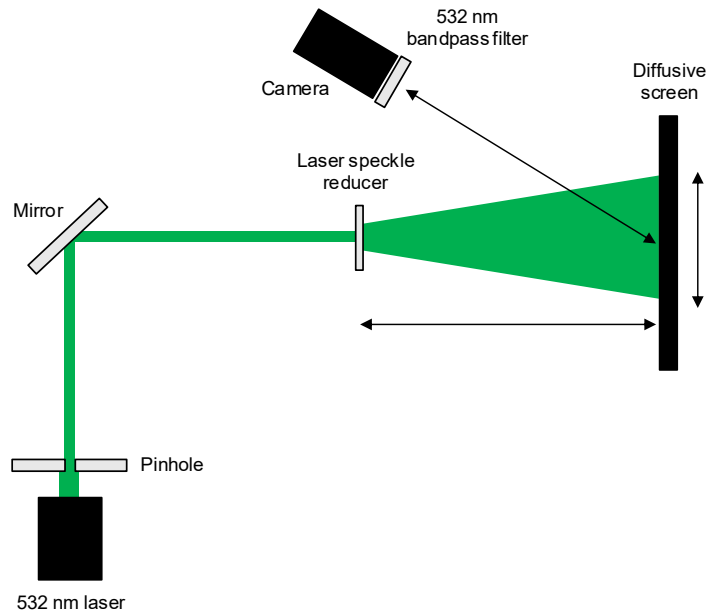


图 5: 用于测量散斑对比度的参考测试系统示意图。 $d_s$  表示最后一个漫射器与屏幕之间的距离,  $w$  表示屏幕上激光光斑的直径,  $d_c$  表示屏幕与相机之间的距离 (测量至安装在相机上的最外层组件)。

在本应用说明中, 将展示 LSR-4C 不同配置下的散斑衰减性能。测量散斑衰减的实验系统如图 5 所示。光源为准直的半导体激光二极管泵浦 DPSS 激光模块, 输出波长 532 nm, 功率 2.5 mW 的光束。使用针孔将光束直径设为 3 mm。最后一个漫射器与屏幕之间的距离  $d_s$  在不同测量配置中变化 (-L 配置为 8.5 cm, -LL 配置为 5 cm), 以在屏幕上获得直径  $w = 4$  的激光光斑。相机 (2/3 英寸, 500 万像素, 像素尺寸 3.45  $\mu\text{m}$ , 8 位) 配合  $f = 35$  mm,  $f/5.6$  镜头使用, 放置在距离屏幕  $d_c = 17$  cm 处, 记录激光光斑图像。激光入射相机前使用 532 nm 带通滤光片进行滤波。

测试的配置如下:

- 无 LSR: 激光光路中未使用散斑衰减器。为了获得与使用漫射器时相似的光斑尺寸, 采用  $f = -50$  mm 的透镜对激光输出进行扩束。
- LSR-4C-L: 单个漫射器。分别测量 LSR-4C 关闭 (静态漫射器) 和开启 (动态漫射器) 的情况。开启时, 漫射器沿  $y$  轴振动, 该轴垂直于光学平台。
- LSR-4C-LL: 两个漫射器串联。分别测量两个漫射器静止、两个漫射器振动 (一个沿  $x$  轴, 一个沿  $y$  轴) 以及混合配置 (光束先通过一个沿  $x$  轴振动的漫射器, 再通过一个静态漫射器)。

有关不同测量配置的详细信息, 请参见表 2。

配置	无LSR	LSR-4C-L		LSR-4C-LL		
	无LSR	关	开	关	混合配置	开
漫射器类型	-	熔融石英, 高斯型				
漫射器数量	0	1		2		
漫射器运动	-	静态	动态	静态	静态/动态	动态
振动方向	-	-	y 轴	-	x 轴	x 和 y 轴
振动频率	-	-	120 Hz	-	120 Hz	120 Hz
漫射器位移	-	-	~0.8 mm 峰值-峰值	-	~0.8 mm 峰值-峰值	~0.8 mm 峰值-峰值

表 2: 本研究中比较的 LSR-4C 配置。

## 4.2. 测量程序与数据分析

利用图 5 所示的实验装置, 对表 2 中描述的每种配置进行测量。对于每种配置, 曝光时间在 0.2 ms 至 20 ms 之间, 每个曝光时间采集三帧图像。

对每帧图像的分析方法如下:

1. 对图像在 x 和 y 方向的强度总和拟合二维高斯分布。
2. 将图像划分为  $7 \times 7$  像素的小区域 (“窗口”)。
3. 对每个窗口  $j$ , 计算强度的标准偏差  $\sigma_j$  和平均值  $\mu_j$ 。
4. 忽略平均强度低于给定阈值的窗口, 即  $\mu_j < 0.15 A$ , 其中  $A$  为二维高斯拟合的峰值强度。
5. 根据  $\sigma_j$  和  $\mu_j$  计算每个窗口的散斑对比度  $S_j$ 。
6. 将整帧图像的散斑对比度  $S$  定义为所有  $S_j$  的平均值。

随后, 对于每个曝光时间, 通过计算同一曝光时间下所有采集帧的平均值来评估散斑对比度。分析中仅包含信噪比足够、拟合结果可接受且相机未饱和的数据。

于每种测量配置, 将散斑对比度  $S$  与曝光时间  $T_{exp}$  的关系拟合如下公式:

$$S(T_{exp}) = a + bT_{exp}^{-0.5} \quad (6)$$

其中,  $a$  和  $b$  为拟合常数。

## 4.3. 结果

图 6 显示了每种测量配置在曝光时间  $T_{exp} = 10\text{ms}$  下的帧图像。对应的散斑强度分布图通过对每帧的竖直切片强度求和得到, 如图 7 所示。请注意, 高斯拟合仅用于设定阈值, 并不用于散斑对比度的计算。

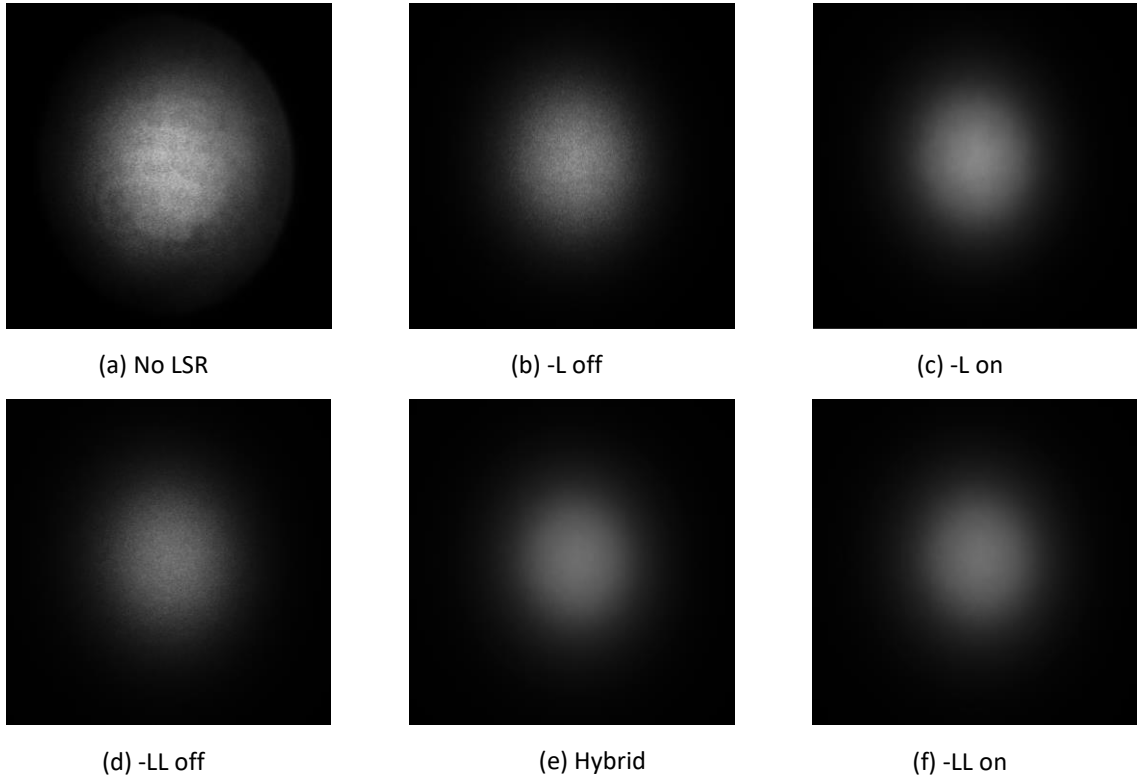


图 6: 曝光时间 $T_{exp} = 10\text{ ms}$ 下的激光斑点。

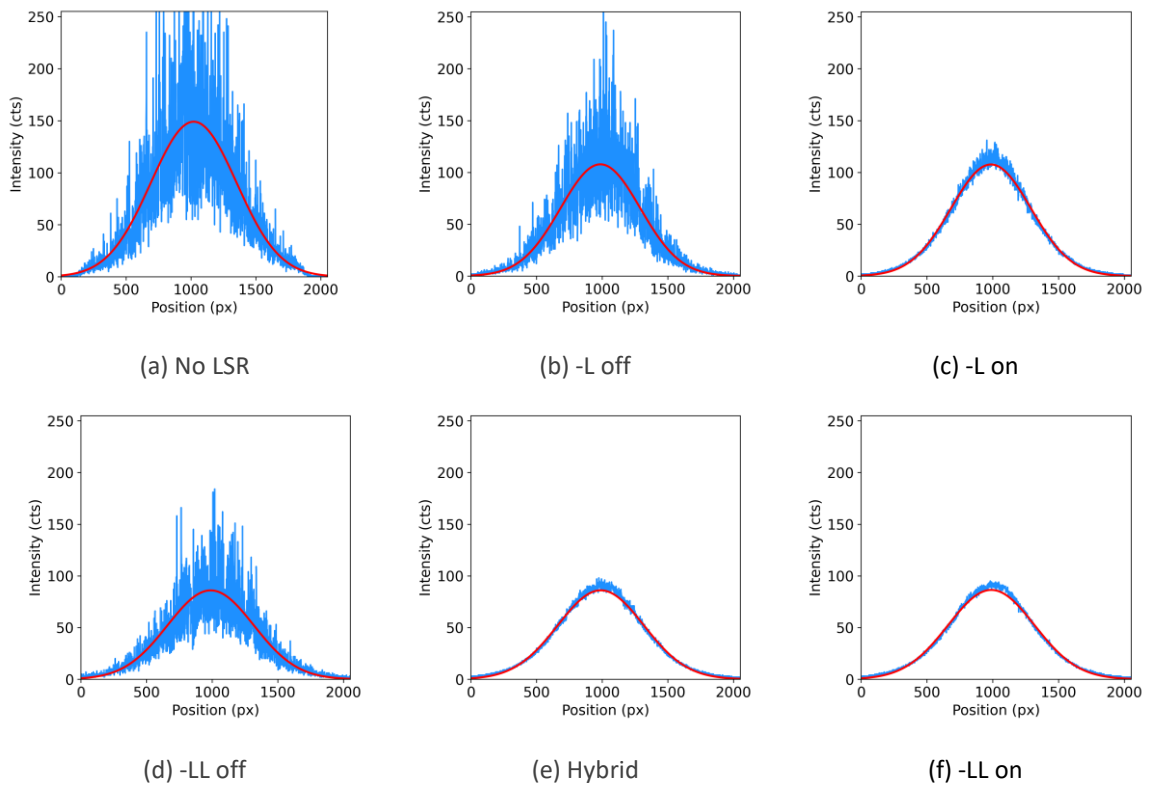


图 7: 曝光时间 $T_{exp} = 10\text{ ms}$ 下的散斑强度分布。红色实线表示高斯拟合曲线。

与未使用任何激光散斑衰减器的情况相比，即便仅使用一个或两个静态扩散片（分别为情况 (b) 和 (d)），可观察到感知散斑对比度和强度变化略有降低。一旦一个或两个扩散片开始振荡（情况 (c)、(e) 和 (f)），散斑对比度和强度变化明显降低。此外，还可以注意到，当使用两个扩散片而非一个时（例如比较情况 (c) 与 (f)），输出强度略有下降。

提取的散斑对比度以及散斑降低效果的数值列于表 3 中。

配置	No LSR	LSR-4C-L		LSR-4C-LL		
	无 LSR	Off	On	Off	混合	On
散斑对比度 Texp = 10 ms	0.3478*	0.3329	0.0547	0.3197	0.0416	0.0333
散斑降低S	-	4.3%	84.3%	8.1%	88.0%	90.4%
抑制效率R	-	0.2 dB	8.0 dB	0.4 dB	9.2 dB	10.2 dB

表 3: 不同测量配置下的散斑对比度。散斑降低 S 和抑制效率 R 均以无 LSR 的参考测量为基准计算。\* 表示拟合或外推值。

最佳的散斑衰减效果出现在使用两片动态扩散器的 LSR-4C-LL 配置中，这符合“两片扩散器比单片更有效降低散斑对比度”的预期。在曝光时间Texp = 10 ms下，LSR-4C-LL 打开时的配置，相比未使用任何扩散器，散斑对比度降低了 90.4%。相比之下，单片扩散器振荡的 LSR-4C-L 配置，在相同条件下散斑对比度降低 84.3%。

图 8 显示了 LSR-4C-L 的散斑对比度随曝光时间的变化曲线。曲线拟合遵循公式 (6)，并包含 95% (2σ) 置信区间。一旦设备启动，对于曝光时间Texp = 10 ms，散斑对比度相比设备关闭状态降低了 83.5%。

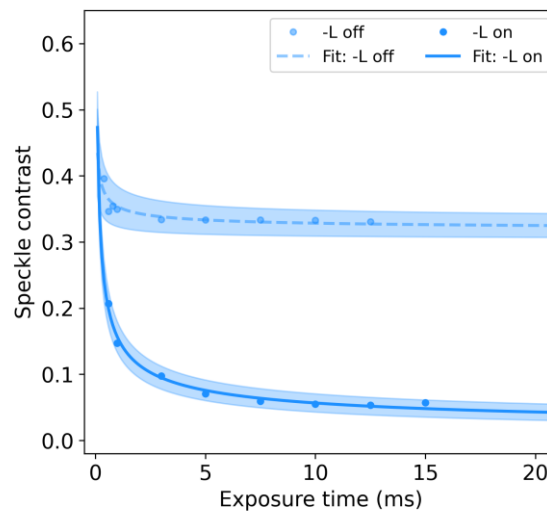


图 8: LSR-4C-L 的散斑对比度随曝光时间的变化。实线表示按照公式 (6) 拟合的结果，阴影区域对应 95% 置信区间。

图 9: LSR-4C-LL 的散斑对比度随曝光时间的变化。实线表示按照公式 (6) 拟合的结果, 阴影区域对应 95%(2 $\sigma$ ) 置信区间。在曝光时间 $T_{exp} = 10$  ms时, 设备开启后, 散斑对比度相比设备关闭状态降低了 89.5%。

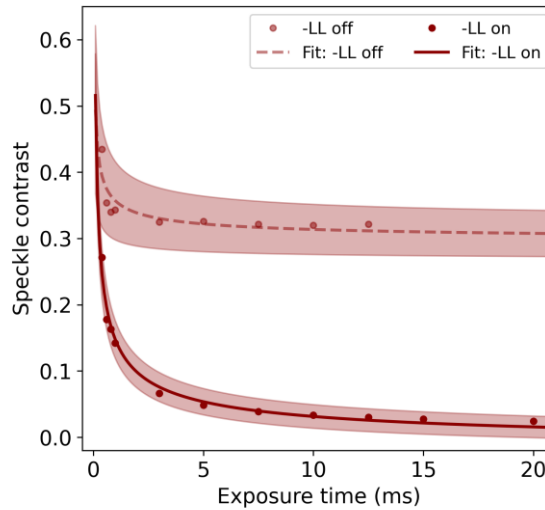


图 9: LSR-4C-LL 的散斑对比度随曝光时间变化的曲线。实线表示依据公式 (6) 的拟合结果, 阴影区域表示 95% 置信区间。

图 10 显示了所有测量配置下, 散斑对比度随曝光时间的变化趋势。对于曝光时间超过 3 ms 的情况, 动态配置下的 LSR-4C-LL 提供了最佳的散斑衰减效果, 其次是混合配置 (一个振荡、一个静止扩散器)。请注意, 在不同光学系统布局中得到的具体散斑对比度可能会与本研究结果有所差异。

当曝光时间超过 8-10 ms 时, 散斑对比度出现稳定趋势, 这与预期一致: 曝光时间达到 8.3 ms (LSR-4C 完整振荡周期) 时可获得最佳去散斑效果。这表明在器件的一个振荡周期内生成了足够数量的不同散斑图案, 从而实现有效的散斑平均化。

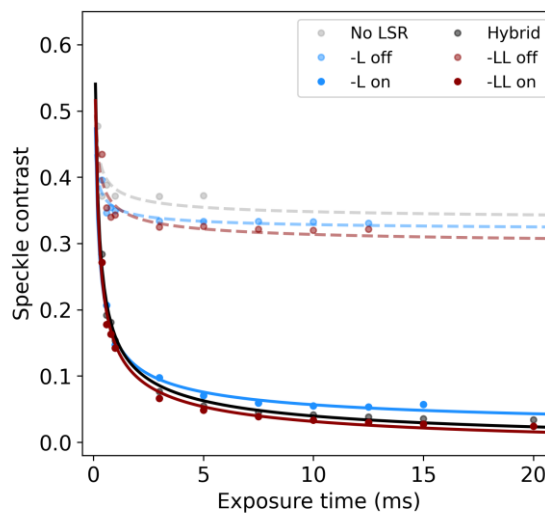


图 10: 所有测量配置下散斑对比度随曝光时间的变化。实线表示根据公式 (6) 拟合的曲线。

对于曝光时间低于 $T_{exp} = 3 \text{ ms}$ 的情况，动态配置之间以及静态配置之间的差异都很小。然而，即使在如此短的曝光时间下，当使用一个或两个动态扩散器时，相比于使用一个或两个静态扩散器，散斑对比度仍会明显降低。这意味着，即使曝光时间不足以让 LSR-4C 完成一个完整的振荡周期，一旦扩散器开始振动，仍可获得一定程度的去散斑效果。不过，为了实现最佳去散斑效果，建议将 LSR-4C 与曝光时间大于  $8.3 \text{ ms}$  配合使用。对于更短的曝光时间，去散斑性能会降低，并且每帧间散斑对比度的变化幅度较大。

在本研究中，为了保证各测量配置的可比性，扩散器前屏幕上的光斑尺寸保持一致。这使得来自相机传感器的数据可在相似的光强值下进行比较，仅因使用两个扩散器而产生的透射略低而存在差异。为了公平比较不同配置，这是非常重要的，因为相机传感器的信噪比会随信号强度变化：当光强接近噪声底时，信噪比较低，而当光强接近传感器饱和时，信噪比较高。部分问题可以通过使用更高位深的相机来缓解，从而增加从噪声底到饱和的光强动态范围。

#### 4.4. 结论

为了实现最佳的散斑去除效果，建议将 LSR-4C-LL 配置为动态模式，其中两个串联放置的扩散器沿互相垂直的方向振荡。对于曝光时间 $T_{exp} = 10 \text{ ms}$ ，该配置可将散斑对比度相比于未使用扩散器降低 90.4%。此推荐适用于光不需耦合回光纤且空间允许的场景（-LL 配置的设备占地略大，并且扩散角约比 -L 配置大 1.4 倍）。

即使未使用扩散器，单个振荡扩散器的 LSR-4C-L 配置也能显著改善散斑对比度。在无法使用 LSR-4C-LL 的应用中，这是一种极佳的替代方案。开启 LSR-4C-L 后，对于 $T_{exp} = 10 \text{ ms}$ ，可将散斑对比度相比于未使用扩散器降低 84.3%。

建议 LSR-4C 在曝光时间超过  $8.3 \text{ ms}$  时使用。不过，即便曝光时间较短，只要扩散器振荡，仍能观察到一定程度的散斑降低效果。

## 5. 激光系统中 LSR-4C 的集成

### 5.1. 高效散斑降低的一般建议

为了实现高效的激光散斑降低，我们通常建议：

- 将 LSR 垂直于光学轴放置
- 使用准直光束照射 LSR

图 11 展示了包含 LSR 的最简实验布局。光束截面越大，穿过漫射器的结构区域越多，去散斑效果越好，因为更多的散斑图案会被叠加。

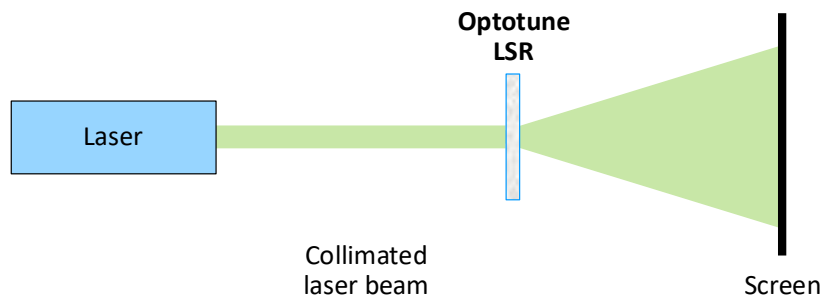


图 11: LSR 在激光系统中的放置位置。

在此配置中，LSR 使准直光束发散，发散角度对应于其漫射角。如果入射光不是准直光，则出射光的角度可按下式计算

$$\theta_{exit} = \sqrt{\theta_{incident}^2 + \theta_{diffuser}^2} \quad (7)$$

漫射器可视为由无数点光源组成，每个点光源的数值孔径 (NA) 对应漫射角。为了补偿光束发散，可以在 LSR 下游放置一枚准直透镜，其位置与透镜的焦距相匹配。透镜直径应大于或等于发散光束的直径。该布局如图 12 所示。需要注意，这并非真正的准直，因为发散光束包含了由于随机散射产生的多种不同漫射角。

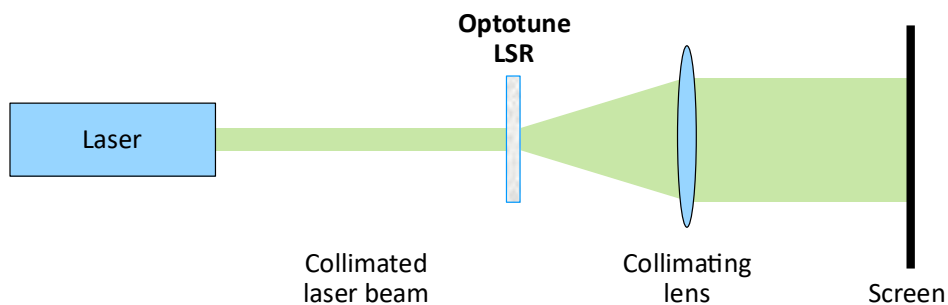


图 12: LSR 与准直透镜结合使用，用于减小光束发散角。

## 5.2. 焦平面中的 LSR 与光束均匀化器

如果需要高准直光束，LSR 的另一种使用方式是将其放置在激光的焦点处（或接近焦点）。经过 LSR 后的扩散角会表现为一个小的点光源，从而光束可以再次得到良好准直。为了均匀化准直光束，即获得平坦的强度分布，可能需要使用光束均匀化器，例如微透镜阵列（MLA），见图 13。MLA 的第二个优点是抑制屏幕上可能由扩散器结构引起的任何结构痕迹。结果是得到无散斑、准直且均匀的光束。对于该配置，建议使用大扩散角且结构尺寸远小于光斑尺寸的扩散器，以保证足够的散斑图案平均（例如， $20^\circ$  扩散角、约  $3\ \mu\text{m}$  结构尺寸的扩散器对应  $100\ \mu\text{m}$  光斑尺寸）。请注意，在这种情况下，不允许使用静态扩散器。

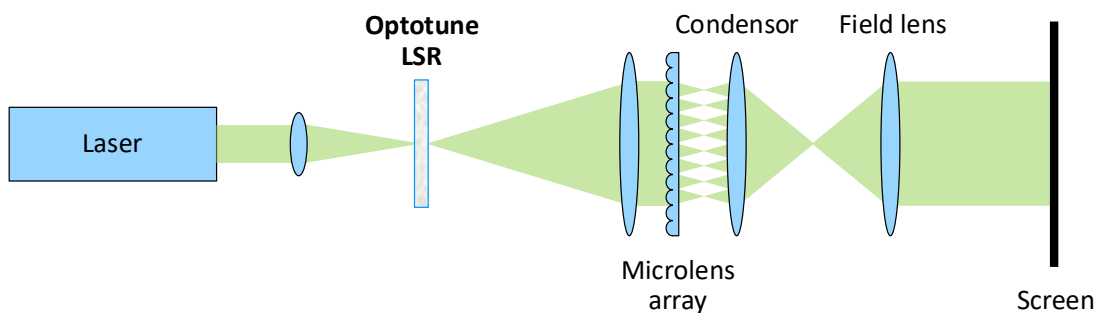


图13: 将 LSR 放置在激光焦点处，并在其后使用光束均匀化器的光学布局示意图。

## 5.3. 焦平面中使用 LSR + 多模光纤

与上述示例类似，可以使用光纤代替均光器。为了实现高耦合效率，使用如图 14 所示的透镜系统将光束耦合入光纤是最佳选择。为保证效率，照射在扩散器上的光斑尺寸不应大于光纤的核心直径。需要注意的是，在此情况下不允许使用静态扩散器。

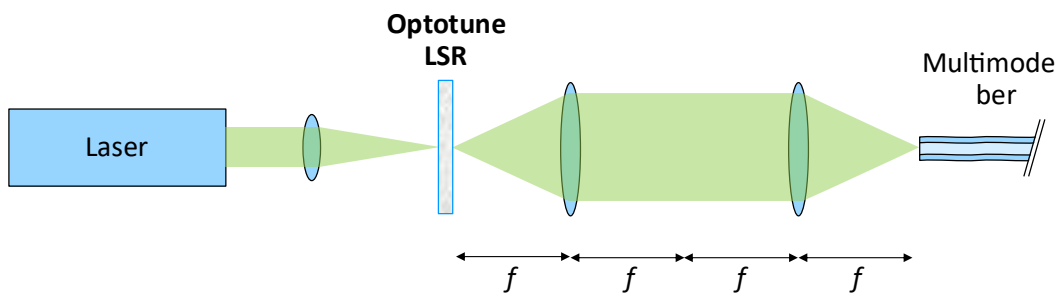


图 14: 带有激光散斑衰减器 (LSR) 的光纤耦合光学布局。

## 5.4. LSR 放置于焦平面 + 光纤光源，通过多模光纤输出

如果光源本身为光纤，上述方案可以通过额外的透镜系统扩展。在这种情况下，首先使用第一个  $4f$  透镜系统将光纤端面成像到 LSR 上，然后再通过第二个  $4f$  透镜系统将 LSR 上的光斑成像到第二根光纤上，如图 15 所示。为保证良好的耦合效率，LSR 上的光斑尺寸应与第一根光纤的光芯直径匹配，并且不应大于第二根光纤的光芯直径。请注意，在这种方案中，不允许使用静态漫射器。

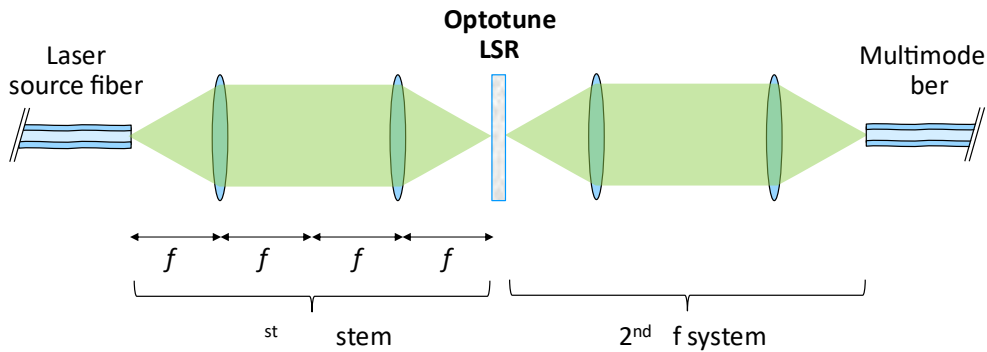


图 15: 光纤耦合方案的光学布局示意图。

### 5.5. LSR 用于 DLP/LCOS 微型显示器系统

图 16 和图 17 展示了两种将 LSR 集成到基于数字光处理 (DLP) 显示器或硅基液晶 (LCOS) 微显示器的投影系统中的示例方案。在图 16 中, LSR 放置在光束均匀化器之前, 使得入射到 DLP/LCOS 的光束均匀、准直且无散斑。在图 17 中, LSR 放置在 DLP/LCOS 之后, 使得投影光学系统接收到无散斑的光束。由于 LSR 的平面外位移非常小, 投影图像保持清晰聚焦。

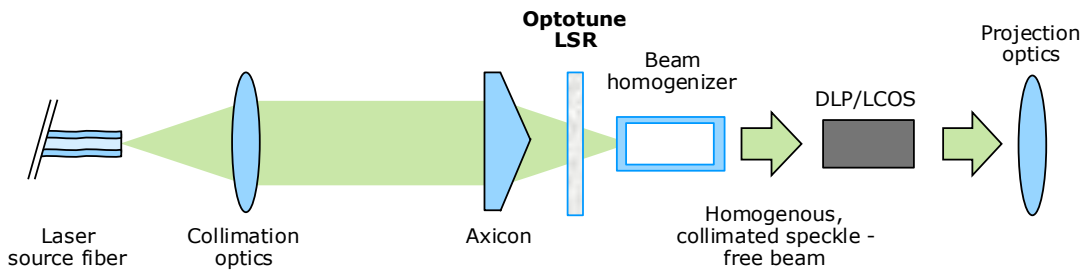


图 16: LSR 放置在会聚棱镜透镜与光束均匀化器之间, 将无散斑光照射到 DLP/LCOS 显示器上。

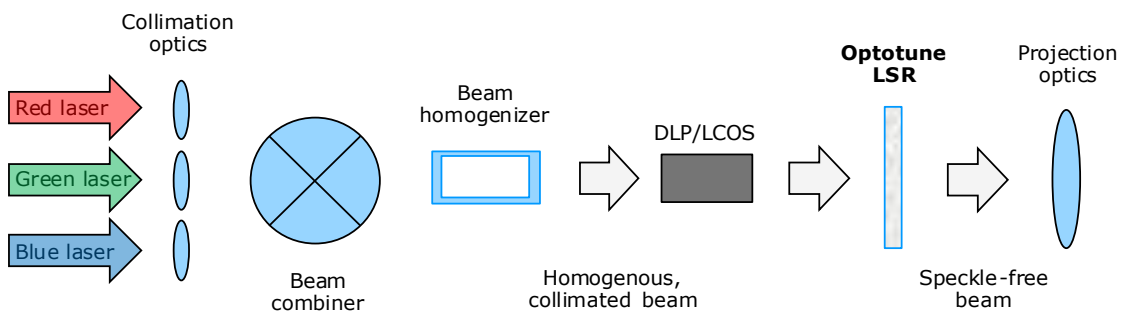


图 17: LSR 放置在微型显示器之后的投影光学像面上, 用于向投影光学系统提供无散斑光束。