

3. 波前位相测试

光束传输中的“波前”通常指等相位面的几何位形，“波前畸变”则指的是该几何位形与高斯光束波前面型的差异。而波前位相畸变则指在传输横截面上的位相分布与理想高斯光束截面位相分布的差异；大多数时候这两个概念可以等效使用。

通常而言，波前位相偏离理想光束会导致发散角变大、聚焦性能变差、成像质量变差等。

如果准确地知道光在某个截面上的振幅和位相分布，那么光在之前、之后的传输特性均严格可知，所以在激光研究和应用中，对波前位相进行测量是一种完整地评估光束质量的方法；而常规的光斑分布测量、发散角测量、 M^2 测量则只能给出部分的信息。

测试方法	测试地点	获得信息	缺点
光斑分析仪	近场光强分布	只能得到近场强度分布	完全不知道光束的可聚焦性能
焦斑测量 (Strehl Ratio, 能量集中度等)	焦点处的光强分布	可大致知道可聚焦性能、与理想光束的偏离以及像差粗略评价	无法知道焦深、各阶像差系数等
M^2 测试	焦点前后的光束孔径	与理想光束的偏离	测试结果受振幅分布影响
波前位相测量	任意位置	完整获得激光的传播信息	无法知道各阶像差的影响
			低重频、不稳定激光无法测试
			成本较高，数学较复杂

波前位相测试可用如下场合：

- 高端激光研发制造： M^2 类测试仅能提示激光器的传输性能是“好”还是“不好”，而波前位相信息可反映激光束像差成份，从而探究激光器光束质量不佳的原因，为优化和调整指明方向；
- 波前位相矫正：通过测量波前位相，采用自适应光学等方法对畸变进行实时矫正，从而得到最佳的效果，如最小的可聚焦光斑、清晰的成像等；
- 光场控制与特殊波前：某些实验需要对激光器的波前位相进行人为的设定，如涡旋光、贝塞尔光束等；这些特殊位相分布可直接测量；
- 特殊激光器测试：如单发激光器 M^2 测试等；
- 成像系统和光学元件测试：通过光源经过镜头 / 元件后的波前，直接测量传递函数、像差、镜面面型等光学设计中的重要参数性能；
- 位相成像：如表面起伏测试、相衬显微等。

3.1 波前传感器 SID4

简介

波前传感器用于测量激光波前的位相。其测量方式是将激光截面光斑分割为若干个小区域（取样），每个小区域经过特定的位相元件，将位相信息转化成空间信息并由成像器件探测；成像器件探测到的图像经过反演即可获得激光传输截面上位相的分布。

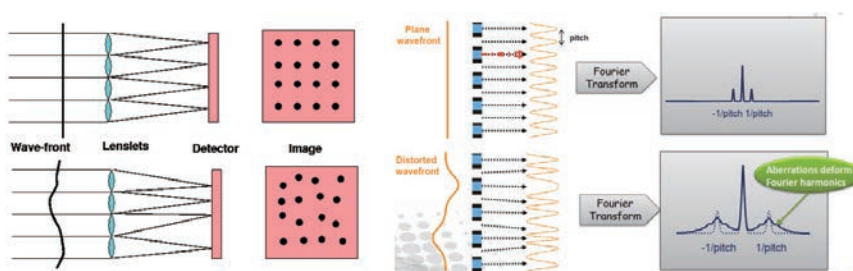
多年以来哈特曼光阑（Shack Hartmann Mask）被广泛用于波前传感，其取样元件是微透镜阵列。激光传输截面上，在波前倾斜的位置，波矢方向也会发生变化（波矢总是垂直于等相面），将导致激光经过微透镜后的焦点发生偏移，其偏移量正比于取样点位相的空间变化率。

这种波前传感方式的缺点主要是：

- 成像器件（CCD）需要最少 16 个像素才能计算焦点的重心，导致分辨率（对位相在空间的取样率）有限；
- 微透镜有色散，对不同波长的焦距不同，而位相检测要求严格地测量焦点位置，故一台传感器只适合很小的波长范围，且不适合宽带宽激光（如超宽脉冲激光）；
- 对于畸变较大 / 波前曲率较大的光束，焦斑可能跃出成像器件上的限定范围，导致无法测量；同理，也不适合倾斜波前（斜入射）测量。

法国 PHASICS 公司推出的四波剪切干涉波前传感器，采用二维位相光栅取代微透镜阵列，利用一阶干涉信号的傅里叶变换复原波前位相，将波前传感的性能提升到新的高度：

- 高空间分辨率，可达 852×720 （哈特曼光阑通常 $< 100 \times 100$ ）；
- 高动态范围可达 $500\mu\text{m}$ ，可直接测量球面波，可在光束任意角度、任意位置测量；
- 无色散，响应波长范围只取决于相机，可测量宽光源、空间啁啾光源；
- 对近场强度分布不敏感；
- 单次测量可同时获得位相和振幅分布；通过严格的数学，单次测量可获得 M^2 、像差系数、发散角、焦斑及焦深等完全信息；
- 可达 10nm （ $\lambda/63 @ 632.8\text{nm}$ ）位相精度， 1nm 位相分辨率。



波前测试原理；左：哈特曼光阑；右：四波剪切干涉

PHASICS 公司提供 SID4 系列波前传感器，覆盖紫外 ~ 中远红外波段，主要应用包括：

- 激光：激光光束质量测量、自适应光学、激光系统准直、气体与等离子体密度测量；
- 光学计量：镜头与镜头组检测、光学系统准直、表面面型分析、广角视场镜头检测、滤光片及偏振片表征、特种波长光学元件表征、超表面及超透镜测量、外场 / 真空等环境波前计量；
- 定量相位成像：细胞学、组织学；
- 微纳材料检测：表面拓扑及断层扫描、光波导结构及折射率分析、激光损伤阈值测量、纳米结构与光热

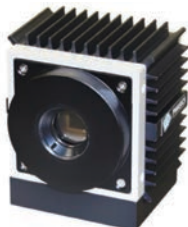
1) 可见光波段波前传感器



SID4 系列适用 400nm ~ 1100nm 波长的波前位相测试。

型号	口径 mm	分辨率	取样像素 μm	波段范围 nm	位相精度 nm	位相分辨率 nm	其他
SID4	3.6 × 4.8	160 × 120	29.6	400-1100	10	2	
SID4-HR	8.9 × 11.9	300 × 400	29.6	400-1100	15	2	
SID4-UHR	15 × 15	512 × 512	29.3	400-1100	15	2	
SID4-sC8	16.6 × 14	852 × 720	19.5	400-1100	10	1	
SID4-V	4.75 × 3.55	160 × 120	29.6	400-1100	10	2	真空适配

2) 紫外波段波前传感器



型号	口径 mm	分辨率	取样像素 μm	波段范围 nm	位相精度 nm	位相分辨率 nm
SID4 UV	7.4 × 7.4	250 × 250	29.6	250-400	10	2
SID4 UV-HR	13.8 × 10.88	355 × 280	38.88	190-400	10	1

3) 短波红外波段波前传感器



型号	口径 mm	分辨率	取样像素 μm	波段范围 μm	位相精度 nm	位相分辨率 nm
SID4-SWIR-HR	9.6 × 7.68	160 × 128	60	0.9~1.7	15	2
SID4-SWIR	9.6 × 7.68	80 × 64	120	0.9~1.7	15	2
SID4-eSWIR	9.6 × 7.68	80 × 64	120	1.0 ~ 2.35	40	6
SID4-NIR	4.73 × 3.55	160 × 120	29.6	1.5~1.6	15	11

4) 中远红外波段波前传感器

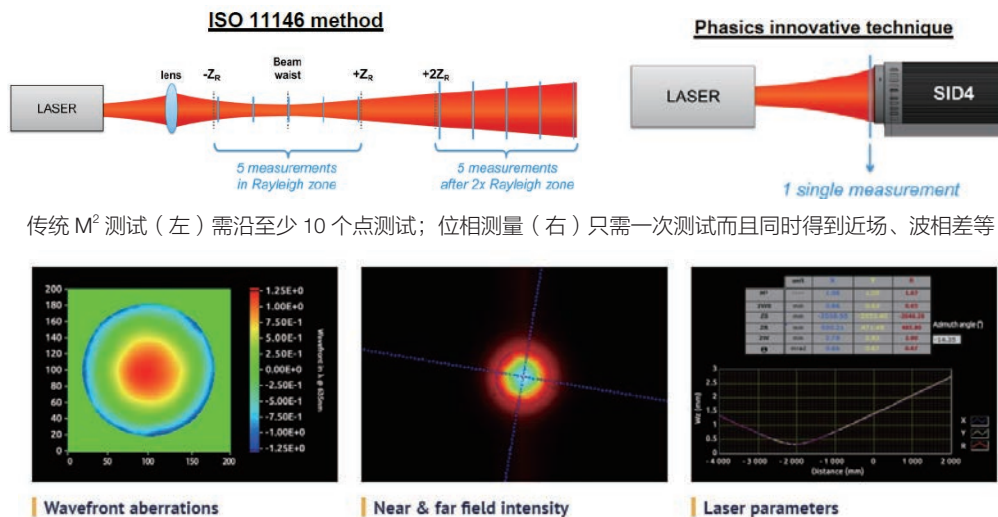


型号	口径 mm	分辨率	取样像素 μm	波段范围 μm	位相精度 nm	位相分辨率 nm
SID4-DWIR	10.88 × 8.16	160 × 120	68	3.0 ~ 5.0 8.0~14	75	25
SID4-LWIR	16 × 12	160 × 120	100	8.0~14	75	25

3.2 SID4 用于激光测量

激光光束质量评估

SID4 几乎可在激光传输路径中的任意位置、以任意角度、测量各种激光（包括球面传输的激光，如光纤出光、聚焦透镜后的激光）的波前位相和振幅，并得到完整的传输特性。所有这些测试都只需要一次曝光。适用于紫外 ~ 中远红外激光。

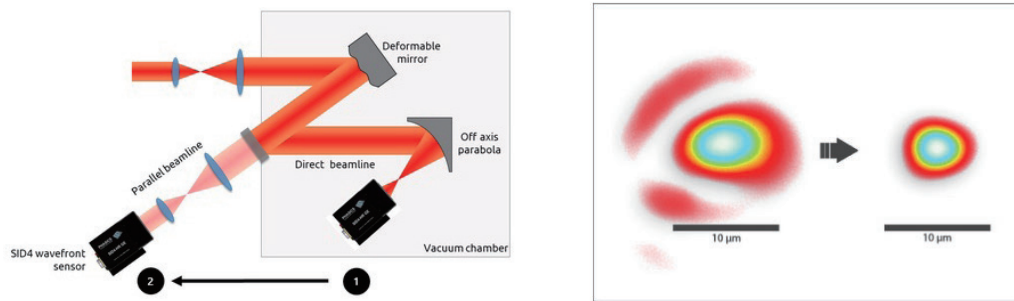


传统 M^2 测试（左）需沿至少 10 个点测试；位相测量（右）只需一次测试而且同时得到近场、波相差等

激光测试：波前（左）、近场光斑、传输与 M^2

自适应光学

受益于四波剪切方法可以测量发散光束的特征，强激光自适应光学系统中，SID4 可以直接放置于聚焦元件之后，使得像差测量包含聚焦元件的面型波差。其中 SID4-V 可以置于真空靶室内。

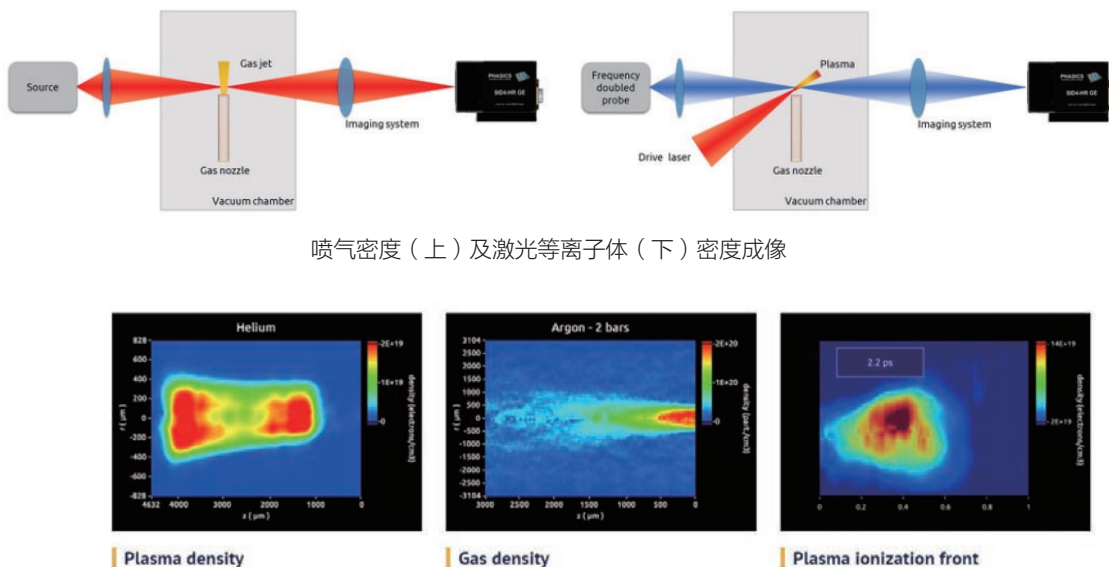


传统（位置 1）与 SID（位置 2）自适应光学焦点优化取样点示意

传统方式（左）与 SID4（右）自适应光学所获得的光斑效果

气体与等离子体密度检测

SID4 系列具备高精度检测相位变化的能力，即使稀薄的气体或等离子体引入的相位变化也可灵敏地检测到。这个特性可以用来测量喷嘴的喷气密度或激光等离子体、放电等离子体的密度分布。



喷气密度（上）及激光等离子体（下）密度成像

等离子体密度（左）、气体密度（中）、等离子体电离前沿（右）成像