

芯飞睿技术参数十问 系列

激光损伤阈值

激光损伤阈值

一、什么是激光损伤阈值

激光诱导损伤阈值(LIDT)在ISO 21254中定义为,“光学器件推测的损伤概率为零的最高激光辐射量”。LIDT旨在指定激光器在损伤发生前能够承受的最大激光能量密度(脉冲激光器,通常以 J/cm² 为单位)或最大激光强度(连续波激光器,通常以 W/cm² 为单位)。

二、损伤阈值的表达方式

(1) 对于连续激光器来说,常采用平均功率密度来表示,其计算方法为:

$$\text{平均功率密度} = \frac{\text{平均功率 (W)}}{\text{被侧面处光斑大小 (cm}^2\text{)}} = \text{W/cm}^2$$

(2) 对于脉冲激光器来说,常采用能量密度和峰值功率密度来表示,其计算方法如下:

$$\text{能量密度} = \frac{\text{单脉冲能量 (J)}}{\text{被侧面处光斑大小 (cm}^2\text{)}} = \text{J/cm}^2$$

$$\text{峰值功率密度} = \frac{\text{单脉冲能量 (J)} \times \text{脉冲宽度 (s)}}{\text{被侧面处光斑大小 (cm}^2\text{)}} = \text{W/cm}^2$$

三、换算关系

(1) 不同波长条件下测量的损伤阈值不同,两者之间具有一定的线性关系,当波长减小时,损伤阈值也会相应的减小,经验公式为:

要求的损伤阈值=测量的损伤阈值 $\times\sqrt{(\text{要求的波长}/\text{测试的波长})}$

(2) 损伤阈值也会随着脉冲激光的重复频率改变而改变,重复频率增大时,损伤阈值会相应的减小。大概可以认为当重复频率提高一个数量级时,损伤阈值则会减小一半。注意这里仅需考虑重复频率的数量级关系。

例如,当重复频率为10Hz时,测量的损伤阈值为1J/cm²,那么可以推算出在10kHz重复频率条件下损伤阈值为1/2³=0.125 J/cm²(重复频率相差3个数量级)

(3) 脉冲宽度越长,光学元件能承受越多的能量,其关系公式近似为:

要求的损伤阈值=测量的损伤阈值 $\times\sqrt{(\text{要求的脉冲宽度}/\text{测试的脉冲宽度})}$

四、损伤阈值的评价方法

(1) 连续激光对光学元件的损伤,主要是由光吸收形成的热效应造成的,损伤阈值由最高可承受的激光功率密度表示。

(2) 对于一束高斯激光光束,通常在计算得到的激光功率密度上乘以2,代表高斯光束中心区域的较高功率密度。光学元件在脉冲激光下的损伤阈值,通常由最大可承受的脉冲能量密度来表示。

(3) 对于脉冲宽度在微秒和纳秒之间的脉冲激光,损伤阈值和脉冲的宽度的平方根成比例关系。

(4) 对于脉冲宽度在毫秒和连续激光之间的区域,因它处于脉冲激光和连续激光之间的交叠范围,应同时比较光学元件的连续和脉冲激光损伤阈值,使其满足两种情况。

(5) 在脉冲激光光束中,常有一些功率较高的热点。因此为了保证光学器件不被损坏,在计算得到的能量或功率密度和光学元件的损伤阈值之间,一般留有2或3倍的安全系数。高斯光束乘以2倍系数,代表光束中心的高功率密度。

五、影响损伤阈值的因素

(1) 波长效应

波长越短光子对应的能量就越接近材料的禁带宽度,发生非线性吸收的概率就会增大,导致光学薄膜发生损坏的诱导因素也会增加。所以光学薄膜的损伤阈值随波长的变短而呈现逐渐降低的趋势,损伤阈值与入射激光波长的经验公式为:

$$F_{th}(\lambda) = F_0 \lambda^m \quad (0 < m < 1)$$

(2) 脉宽效应

损伤阈值与脉冲宽度的经验公式为:

$$F_{th} = F_0 \tau^m$$

不同的制备工艺下制备出的薄膜特性不同。不同的薄膜材料具有不同的膜系结构因此驻波场分布、应力分布等特性也不同。所以,m的取值与薄膜材料、膜系结构、制备工艺等因素有关,取值介于0.3到0.5之间。

(3) 光斑效应

薄膜在制备以及存储过程中会引入缺陷。激光损伤测试过程中,光斑越大,光斑内出现缺陷的概率越大,薄膜越容易出现损伤。



相同的能量密度下，光斑越大，薄膜承受的总能量会越大，膜层内温度分布就会产生差异，使薄膜损伤阈值降低。在采用零几率拟合测量光学薄膜的损伤阈值大小时，当所用的光斑足够大，取样次数足够多或者缺陷密度足够高时，光斑效应在理论上是可以消失的。

(4) 累积效应

光学薄膜在实际使用时，往往在一段时间内需要经受多个脉冲激光的辐照。光学薄膜在多脉冲激光辐照下的损伤阈值，往往低于单脉冲激光辐照下的损伤阈值。当重复频率较低时，激光与薄膜相互作用产生的不可逆损伤的积累，会导致多脉冲损伤阈值低于单脉冲损伤阈值。当重复频率较高时，当薄膜与激光相互作用产生可逆破坏的恢复时间大于脉冲之间的间隔时间时，可逆破坏就会不断的累积，可能会发展成为不可逆的损伤，在后续脉冲作用下，薄膜会被破坏。

(5) 薄膜厚度

光学薄膜厚度的不同，会引起薄膜内电场强度分布的不同。通过修正膜层内的电场强度，得出不同薄膜损伤阈值随厚度的变化是不同的。虽然随着厚度的增加薄膜内的各种缺陷增加，但是 TiO_2 、 SiO_2 损伤阈值并没有随着厚度的增加而降低，而 ZrO_2 、 ZnS 损伤阈值却随厚度的增加而降低。

薄膜的不同膜厚效应，是由表面吸收与体吸收的不同造成的。当表面吸收占主要吸收因素时，薄膜的厚度效应不明显，当体吸收占主要吸收因素时，薄膜的抗激光损伤阈值大小随厚度的增加而降低。

(1) 介质本身性能，包括介质的成分、光学均匀性、光学吸收性、热学性质等。

(2) 辐照的激光性质，包括激光频率、激光脉宽、激光光束束斑等。

(3) 光学元件的加工工艺过程，如光学元件上留下的加工痕迹、镀膜方法、膜材料的纯度等甚至实验操作空间的清洁程度也会影响介质的损伤。

六、损伤阈值的测试方法

(1) 1-on-1

在薄膜抗激光损伤阈值的测试过程中，每个测试点只辐照一次，无论发生损坏与否，都移到下一个点继续进行损伤测试。

(2) S-on-1

不同于 1-on-1 的损伤测试，每个测试点在相同的能量密度下测量多个脉冲对薄膜损伤的影响，如果还未到 S 个脉冲，光学薄膜已经损坏，则停止辐照，移到下一个点继续进行损伤阈值的测试。

(3) R-on-1

在光学薄膜上的同一点，以一定的梯度增加辐照到光学薄膜上的激光能量，直到发生损伤为止。R-on-1 由于激光能量密度是逐渐增加的，在测试过程中低能量密度激光辐照对光学薄膜有激光预处理的作用，测量得到的光学薄膜损伤阈值是经过激光预处理后的损伤阈值。

(4) N-on-1

由于 R-on-1 在测量过程中，能量之间的间隔小，使测量过程时间过长，效率低，所以采用 N-on-1 的测量方法，增大激光能量之间的间隔，简化实验流程，进行损伤阈值的测试，如图所示：

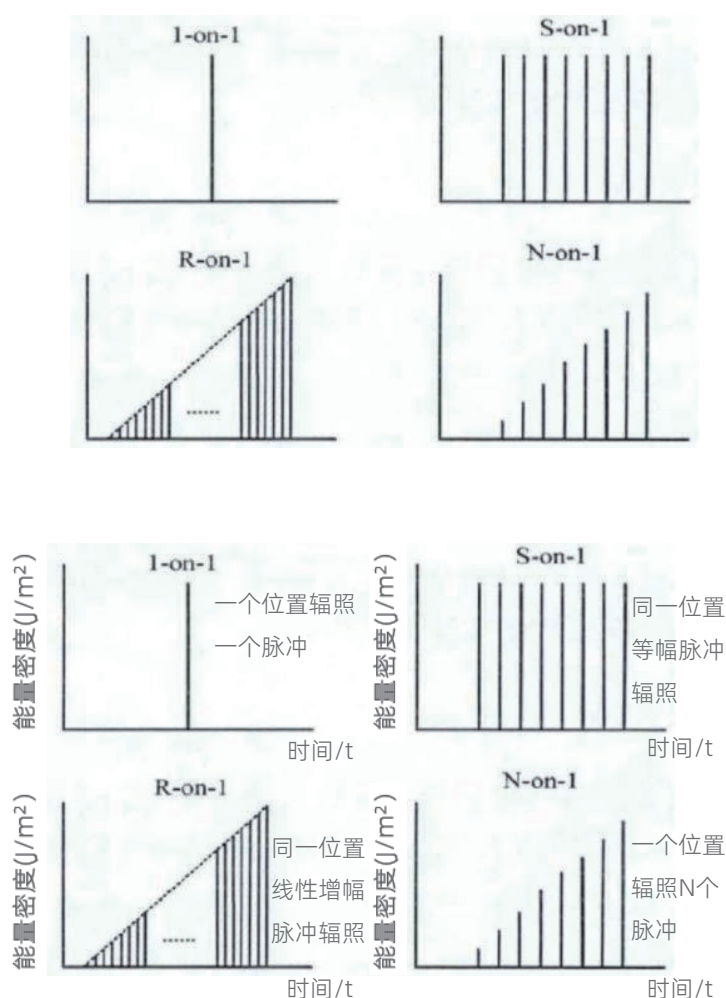


图1简化实验流程图

七、造成损伤的因素

脉冲持续时间对导致激光损伤的机制有很大的影响。飞秒到皮秒量级的脉冲持续时间可以激发从材料的价带到导带的电荷载子，进而导致非线性效应，包括多光子吸收、多光子电离、隧道电离和雪崩电离。通过载波-载波散射和载波-声子散射，将载子从导带驰豫到价带，皮秒到纳秒量级的脉冲持续时间就可能造成损伤。

损伤机制	描述
多光子吸收	能量低于材料带隙能量的两个或多个光子同时被吸收，使吸收不再与强度成线性正比的吸收过程。
多光子电离	吸收两个或两个以上光子，其联合能量导致材料中原子光电离的过程。
隧穿电离	超短激光脉冲产生的强电场使电子通过隧道穿过使其与原子结合的潜在屏障，使它们得以逃脱的过程。
雪崩电离	超短激光脉冲产生的强电场使电子加速并与其他原子碰撞的过程。这会使得它们电离并释放更多电子，并继续电离其他原子。
载子间散射	被电场加速的电子与其他电子发生碰撞，使它们散射并与更多电子发生碰撞的过程。
载子-声子散射	被电场加速的电子激发声子或材料晶格中的振动的过程。
介电击穿	由于施加的电压超过材料击穿电压而使电流流经绝缘体的过程。
热效应	由激光脉冲能量引起的材料扭曲和振动所导致的热扩散。

八、损伤检测的方法

(1) 微分干涉差显微镜

诺玛斯基型微分干涉差 (DIC) 显微镜是按照 ISO 21254 标准进行激光损伤检测最常用的方法。DIC 显微镜采用干涉测量法提高透明样品的图像对比度，从而能观察到其他方法难以识别的缺陷。只需拍摄测试前和测试后的光学元件的图像，便可以通过人为判断或图像处理技术识别损伤。人为判断测试结果可能会由于操作者对损伤的主观意识不同存在差异，图像处理算法在检测损伤时则不会出现这样的问题。不过也可能是由于光晕、不均匀照明或不对齐造成误报。除了确认损伤的存在，DIC 显微镜还可以确定缺陷的尺寸。

(2) 散射光诊断

ISO 21254 中定义的另一种常见检测方法是散射光诊断。该方法利用目标点散射的光确定激光诱导损伤的存在和特征，在散射光诊断中，探测光束（通常是 HeNe 激光器）照亮目标位置，当光学元件有损伤时，大于背景噪声的散射信号差（如下图）。只能从损伤点检测到散射光因为探测光束本身会在到达探测器之前被阻挡。

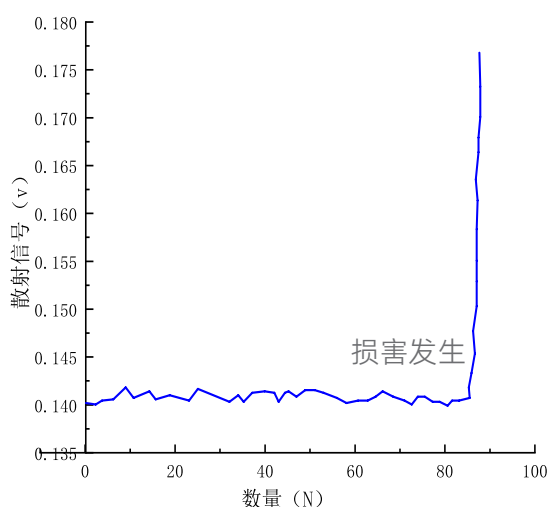


图2散射光诊断结果图

在用于散射光诊断的标准设置中，探测器的实角越大，测量灵敏度越高（如下图）。这种方法的一个缺点在于它严重依赖于背景噪声的数量，可以通过多次测量并对结果求平均值、增加探测器的增益或滤除背景噪声来克服。

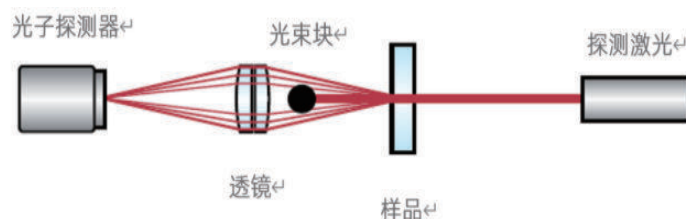


图3用于 LIDT 测试的典型散射光诊断装置示意图

(3) 等离子体闪光监测

等离子体闪光监测也是检测激光损伤的一种方法。激光诱导损伤会导致非共振光击穿在光学表面产生等离子体（称为等离子体闪光），这会使损伤点周围形成等离子体烧灼。这时候光学元件就已受损。由于等离子体烧灼的表面积相对均匀，因此它们很难通过显微镜或散射光诊断检测。不过，等离子体闪光本身可以在 LIDT 测试期间通过收集透镜将任何等离子体闪光的光聚焦到检测器上来进行检测（如下图）。要检测 LIDT，需要将测试激光器的散射光过滤掉，而且探测器的响应时间必须小于等离子体闪光的持续时间，等离子体闪光通常在 100ns 内达到最大值。

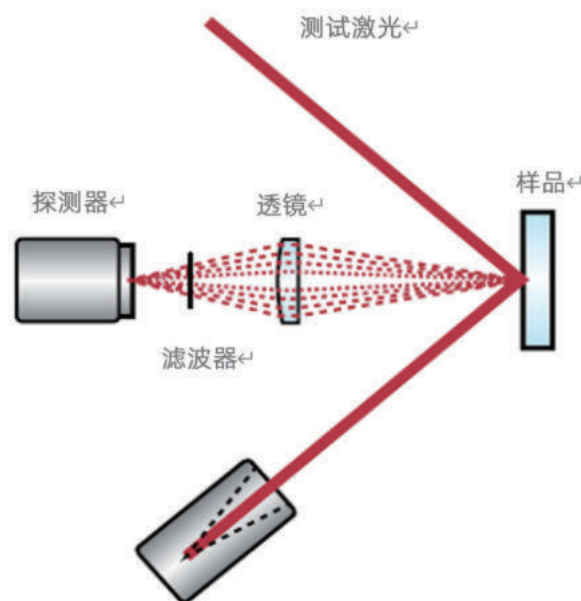


图4等离子体闪光监测装置示意图

(4) 形态学分析

激光损伤形态学分析包括生成激光诱导损伤点的高度图，描述损伤的大小和深度。这种方法比较繁琐和耗时，不过这种方法提供了有价值的信息来理解造成损伤的潜在机制。可以采用多种不同的技术来进行形态学分析，包括光学显微镜、原子力显微镜 (AFM)、扫描电子显微镜 (SEM)、台阶仪和白光干涉法 (WLI)。

台阶仪和 AFM 是精确测量浅损伤点（直径约为 200 μm 或更小、深度为 1 纳米量级）的理想选择。这两种技术都涉及到使用机械探头扫描样品，并根据探头的挠度生成高度图。AFM 系统能够达到纳米量级的分辨率，即比可见光的光学衍射极限小 1000 倍的分辨率。

相较于台阶仪和 AFM，SEM 能更有效地测量宽高比（宽深比）约为 1 的深层损伤点，包括多层镀膜沉积留下的坑。SEM 通过使用聚焦电子光束扫描样品表面来生成图像，这种电子光束的穿透深度比光子深得多。台阶仪和 AFM 不适合测量深层损伤点，因为陡坡使得接触探针难以到达缺陷底部并生成精确的测量结果。

为了测量穿透到大块材料或精确结构的极深损伤点，必须通过切割或蚀刻将大块材料暴露出来，以便使用前面提到的其中一种技术在不同深度进行横断面测量，这些横截面可以组合成一个完整的三维形态图。

九、损伤阈值的测试规范

(1) 强度和通量

损伤阈值可以通过评估不同强度或通量水平下激光造成的损伤来测量。

大多数激光束为高斯形状，ISO 21254 给出有效光束面积，光束轮廓内的最大强度为光功率 P 除以有效光束面积。对于高斯光束，轴上强度为 $2P/(\pi w^2)$ ，其中 w 是高斯光束半径。因此有效光束面积为 $\pi w^2/2$ ，而不是 πw^2 与顶帽梁相同，用光束直径 d 表示，它是 $\pi d^2/8$ 。

然而许多错误地假设强度为 $P/(\pi w^2)$ ，低于 2 倍值，这相当于假设光束面积为 πw^2 ，又通常没有指出。

如果指定脉冲能量的光学通量（单位面积的能量），也会出现同样的问题。对于高斯光束，应再次应用有效光束面积 $\pi w^2/2$ 。

对于光束的非垂直入射（与法线方向成 α 角），有效光束面积的几何增加系数为 $1/\cos \alpha$ 也必须考虑在内。

(2) 多模光束

关于多模光束的问题，强度分布的形状可能很不规则，表现热点情况，分布也可能随时间而变化。因此即使对于恒定的光功率，实际峰值强度也可能波动很难确定，当将光学元件暴露于此类光束时，需要额外的安全裕度以避免光学损坏。对于损伤阈值的测量，应使用单横模激光器发出高质量的光束。

(3) 时间形状

在大多数情况下，激光脉冲的时间形状也是平滑的，而不是矩形。例如具有高斯时间形状的脉冲，其脉冲能量 E_p ，最大持续时间为 τ_p ，峰值功率为 $0.92E_p/\tau_p$ ，对于 sech^2 形脉冲，预因子将为 0.88 而不是 0.92。在激光损伤的情况下，应使用有效脉冲持续时间，其定义应确保所述预因子为 1。

如果调 Q 激光器运行在多个纵向谐振模式上，其输出可以表现出叠加在平均脉冲形状上功率的强烈调制，当忽略这些调制时，实际峰值功率可能比预期高出约 2 倍。因此应使用单纵模（以及横模）激光器测量损伤阈值。

(4) 脉冲宽度

对于由激光脉冲引起的损伤，随着脉冲持续时间的增加，以脉冲能量密度表示的损伤阈值通常会变得更高。通常损伤阈值注量与脉冲持续时间的平方根成正比，（强度的损伤阈值与脉冲持续时间的平方根反比成正比）通常无法测量不同脉冲持续时间的损伤阈值，但是至少应明确规定损伤测量中使用的脉冲持续时间。

(5) 激光波长

由于激光波长对损伤现象有重要影响，因此需要对其进行规定，我们不能推断出在其他波长范围内的损伤阈值，通常情况下，较短波长的损伤阈值会降低，但对于这种依赖性没有通用规则，对于不同的损伤机制，这种依赖性可能会非常不同。

(6) 散装或表面损坏

了解某些损伤阈值是否适用于散装材料或表面很重要，在测量中分离这些值通常很容易，可以在材料内产生紧密焦点，从而使光束在表面上更宽，从而仅在材料内发生损坏。此外还可以比较涂层材料和未涂层材料。

(7) 累积效应

应该知道某个损伤阈值是适用于单个脉冲还是适用于一个点上的多个脉冲。在后一种情况下，需要知道脉冲数和脉冲重复率或脉冲间隔。



（8）环境条件

环境条件也可影响损伤阈值，如空气温度和湿度，在潮湿条件下，某些激光反射镜可能含有大量水，这可能会影响损坏阈值。

（9）制造技术

由于光学损伤可能与光学制造条件的微观故障有关，因此制造技术或所用材料的某些变化可能会导致损伤阈值显著改变。

十、提高损伤阈值的方法

（1）激光预处理

以低于薄膜损伤阈值的激光辐照光学薄膜可提升损伤阈值。

（2）加镀保护膜层

在薄膜表面加镀一层3/2整倍数的低折射率SiO₂薄膜可有效提高薄膜的抗损伤能力，这是由于保护膜层改善了薄膜的表面形态，减少了由于表面缺陷引起的损伤，同时SiO₂本身具有低吸收和高抗激光能力，使损伤不易发生，并且它的存在使得膜层内的杂质在相同能量激光的辐照下更难于冲出膜层表面形成损伤。

（3）缓冲层

缓冲层是加在基底和要镀的膜层之间，作用类似过渡层，可改善薄膜的抗激光损伤性能。

（4）驻波场，温度场设计

改进薄膜内的驻波场，可降低薄膜损耗，提高薄膜损伤阈值。

通过二维温度场计算，优化薄膜各项参数，使薄膜层内的温度场相对于各膜层的温度对抗能力达到一种合理的分布，降低温度场的峰值，从而提高薄膜损伤阈值。

（5）离子后处理

采用特定的能量离子轰击材料，从而使表面性质得到改善，只是由于材料展现的多种物理化学性质很大程度取决于表面层的性质。

参考文献

- [1]百度百科
- [2]<https://www.newport.com.cn/n/laser-damage-threshold>
- [3]<https://www.semrock.com/laser-damage-threshold.aspx>
- [4]<https://www.edmundoptics.cn/knowledge-center/application-notes/lasers/laser-damage-threshold-testing>
- [5]https://www.rp-photonics.com/laser_induced_damage.html
- [6]朱耀南. 光学薄膜激光损伤阈值测试方法的介绍和讨论[J]. 激光技术, 2006, 30(5):4.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

