



中华人民共和国国家标准

GB/T 16601—1996
eqv ISO/DIS 11254-1.2

光学表面激光损伤阈值测试方法 第1部分:1对1测试

Test methods for laser
induced damage threshold of optical surfaces
Part 1:1 on 1 test

1996-11-07 发布

1997-04-01 实施

国家技术监督局 发布

前 言

本标准是根据国际标准草案 ISO/DIS 11254-1.2《光学表面激光损伤阈值测试方法 第1部分:1对1的测试》(1995版)而制定的,在技术内容上与国际标准等效。

光学元件经高能量(功率)的激光辐照后会发生损伤。通常,光学元件表面的损伤几率要大大地高于其内部,所以光学元件的损伤阈值是由其表面损伤阈值所决定的。本标准规定了一种测定光学表面激光损伤阈值的测试方法。由于该方法尽可能地与国际接轨,故其测试结果在国际上具有可比性,将有利于我国的国际贸易以及对外技术和经济的交流。

本标准适用于光学表面的两种状况:未镀膜和镀膜。研究表明,镀有光学薄膜的表面,其激光损伤阈值要低于未镀膜表面的2~4倍。因此,光学薄膜是光学元件抗激光损伤的最薄弱环节,提高光学薄膜的激光损伤阈值已是当前各国迫切需要解决的问题。本标准可以统一地、定量地测出其激光损伤阈值,不但为激光系统的设计提供了可靠的数据,而且为开展影响光学薄膜激光损伤阈值诸因素的研究,提高其损伤阈值创造了条件。

本标准从1997年4月1日起实施。

本标准的附录A是提示的附录。

本标准由中国兵器工业总公司提出。

本标准由中国兵器工业标准化研究所归口。

本标准起草单位:国营第五三〇八厂、中国兵器工业标准化研究所。

本标准主要起草人:朱耀南、麦绿波、刘庆明、黄允飞。

ISO 前言

本国际标准是由 ISO/TC 172/SC 9“光学与光学仪器——光电分委员会”编制而成。该文本为征求意见后的国际标准草案。在正式出版前,光学表面激光损伤阈值测试方法的第 2 部分:“S 对 1 测试”已有了初稿。本标准,即该测试方法的第 1 部分也因其上下文而作了修改,并作为国际标准草案第 2 版本出版。

中华人民共和国国家标准

光学表面激光损伤阈值测试方法

第1部分:1对1测试

GB/T 16601—1996
eqv ISO/DIS 11254-1.2

Test methods for laser
induced damage threshold of optical surfaces
Part 1:1 on 1 test

1 范围

本标准规定了光学表面激光损伤阈值1对1测试的方法。

本标准适用于所有光学表面(镀膜与未镀膜)激光损伤阈值1对1测试。

2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 6360—86 激光功率能量测试仪器规范

GB/T 15313—94 激光术语

3 定义、符号

本标准采用下列定义。

3.1 术语

除下述术语及定义外,本标准中所采用激光术语及定义均应符合 GB/T 15313 的规定。

3.1.1 损伤 damage

由激光辐照引起且能用本标准所规定方法发现的光学表面特征的永久性变化。具体应用时的损伤,由有关规范详细规定。

3.1.2 损伤阈值 damage threshold

可引起光学表面损伤几率为零的最大激光辐照能量密度或功率密度。

3.1.3 1对1测试 1 on 1 test

激光束对光学表面某一测试点只辐照一次的测试。

3.1.4 靶平面 target plane

激光束辐照在光学表面测试处的截平面。

3.1.5 有效面积 effective area

激光脉冲总能量与靶平面上最大能量密度之比,或激光脉冲功率与靶平面上最大功率密度之比。当入射角不等于零时,其有效面积按式(1)、式(2)计算:

$$A_{T,eff} = \frac{Q}{H_{max} \cos(\alpha)} \text{ (第1~6类)} \dots\dots\dots (1)$$

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{P}{E_{\text{max}} \cos(\alpha)} \quad (\text{第 7 类}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

3.1.6 有效光束半径 effective beam radius

有效面积除以 π 所得商的平方根。

3.1.7 有效脉冲持续时间 effective pulse duration

激光脉冲总能量与最大脉冲功率之比。

3.2 符号及其计量单位

本标准所使用的符号及其计量单位见表 1。

表 1 符号及其计量单位

符号	名称	计量单位
λ	波长	nm, μm
α	入射角	rad, [(°)度]
ρ	偏振度	—
w_T	靶平面上的光束半径	mm, cm
$w_{T,\text{eff}}$	靶平面上的有效光束半径	mm, cm
$A_{T,\text{eff}}$	靶平面上的有效面积	cm^2
τ_H	脉冲持续时间	ns, μs , s
τ_{eff}	有效脉冲持续时间	ns, μs , s
f_p	脉冲重复频率	Hz
Q	脉冲能量	J, mJ
P_{max}	最大脉冲功率	W
P	功率	W
H_{max}	最大能量密度	J/cm^2
E_{max}	最大功率密度	W/cm^2
H_{th}	阈值能量密度	J/cm^2
E_{th}	阈值功率密度	W/cm^2

4 抽样

测试样品可以是实际零件,也可以是试验片。在采用试验片作试样时,其材料和表面疵病等级均必须与实际零件相同,表面的光学薄膜也应与实际零件的光学薄膜同罩镀制。镀膜开罩的编号及日期要标识在试样上。

5 测试方法

5.1 测试原理

激光损伤阈值测试的基本原理框图见图 1。一台性能稳定、可靠的激光器,将其输出能量(或功率)用可变衰减器调整到所需的数值,然后辐照到位于聚焦系统焦点或焦点附近的试样光学表面上。

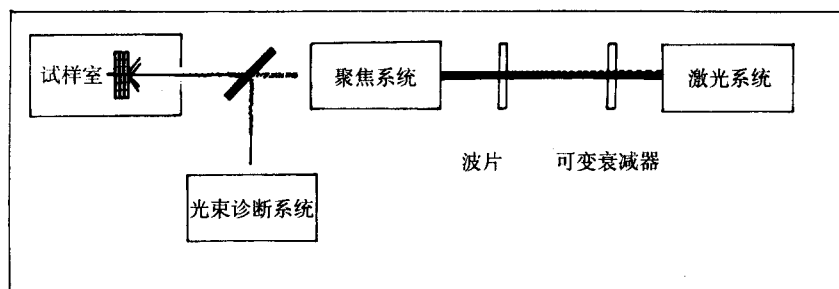


图 1 激光损伤阈值测试基本原理框图

聚焦系统的作用是使激光束在试样上能够产生损伤的能量密度或功率密度。试样放置在一个可调的样品架上,该装置可调节试样使激光束辐照时获得不同的测试点和入射角。光束的偏振度用合适的波片来调节。入射的激光束用分束器取样,并将其引到光束诊断系统,该系统可同时测定激光束的脉冲能量或连续总功率及其空间分布和时间分布。

在试样的被测光学表面上先用较低能量密度(或功率密度)的激光束对一定数目的测试点作 1 对 1 测试,可得到其损伤几率。再不断提高激光束的能量密度(或功率密度),重复上述测试。由这些数据即可确定损伤阈值。试样上测试点在激光辐照前、后都要用显微镜检测其表面。

该测试方法可应用七种类型的激光器来进行测试,这七类激光器的脉冲持续时间如表 2 所示,而其波长暂不作规定。

表 2 激光器类型

类别	名 称	脉冲持续时间
1	超短脉冲激光器	1~3 ps
2	短脉冲激光器	1~3 ns
3	较短脉冲激光器	10~30 ns
4	中长脉冲激光器	1~3 μ s
5	长脉冲激光器	200~1 000 μ s
6	特定脉冲激光器	脉冲持续时间是特定的
7	连续激光器	1 s

注

- 1 脉冲激光器(第 1~6 类)损伤阈值用能量密度表示,其计量单位为 J/cm^2 ;测试所用激光器的脉冲持续时间应记入测试报告中。
- 2 连续激光器(第 7 类)损伤阈值用功率密度表示,其计量单位为 W/cm^2 ;功率密度在计算时取辐照期间的平均功率。

5.2 测试装置

该测试装置可分为以下几个组成部分。

5.2.1 激光器

激光器应输出重复性好的激光脉冲,其空间分布为准高斯型或准平顶型;时间分布应能在测试中加以监控。对表列 6 个不同类别的激光器,其不确定度指标见表 3;而对第 6 类激光器,其脉冲与脉冲之间的峰值功率密度的不确定度应在 $\pm 20\%$ 以内。光束参数方面的其他不确定度指标也应加以确定,并记入不确定度分量分析中。

表 3 激光器的有关不确定度指标

%

激光器类别	脉冲能量	脉冲持续时间	有效面积	功率密度
1	±10	±10	±10	±17
2	±5	±10	±10	±15
3	±5	±5	±6	±10
4	±5	±5	±6	±10
5	±5	±5	±6	±10
7	—	±5	±6	±20

5.2.2 可变衰减器和光学传输系统

激光的输出应外加一个可变衰减器,使其辐照能量衰减到所需要的数值。衰减器应不改变激光束的方向和质量。经过光学传输系统和衰减器后,激光束仍应符合 5.2.1 条中的有关规定。

5.2.3 聚焦系统

聚焦系统的最小通光孔径应为聚焦系统入口处光束半径的 6 倍,其最小 f 数为 50。靶平面应位于经聚焦后激光束的束腰处或其附近,在靶平面上的束斑半径应不小于 0.4 mm。对于第 4~7 类激光器,光束半径可根据功率密度的需要适当减小,但不得小于 0.1 mm,此时,光束的 f 数可小于 50。

对于准平顶型的激光束,试样被测表面应位于焦距大于 0.2 mm 的聚焦系统的象平面或其附近,以便在靶平面上得到合适的束斑。至于有效面积、能量密度或功率密度的大小则取决于被测表面的位置。上述有关激光束和聚焦系统的变动情况均应记入测试报告中。

也可采用不同于上述的聚焦系统,但该系统的有关参数应在测试报告中注明。

5.2.4 样品架

测试台应配备一个可调的样品架。对不同的样品尺寸,该样品架应具有足够的调节精度,以确保能较精确地控制样品上各测试点的位置。

5.2.5 损伤检测

在激光辐照前、后,各测试点均应用微分像衬显微镜检测其表面,其放大倍率不小于 150 倍。

5.2.6 光束诊断系统

光束诊断系统对总能量、时间分布、空间分布的测试应符合以下要求。

a) 总能量(功率)

光束诊断系统应配置一个标定好的能量计或功率计来测定辐照到靶平面上的激光脉冲总能量或功率。该系统应符合 GB 6360 的要求,其测量不确定度优于 ±5%。

b) 时间分布

光束诊断系统还应包括一个能分析激光束时间分布的合适仪器,以便测量其脉冲持续时间。对时间分布进行积分后,就能得到总的脉冲能量(Q),它与最大脉冲功率($P_{\max}$)的比值称为有效脉冲持续时间(τ_{eff}),见公式(3)、(4)。

$$Q = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{\text{eff}} = Q/P_{\max} \quad \dots\dots\dots (4)$$

对五种类型的脉冲激光器(第 1~5 类),其脉冲持续时间测量仪器的时间分辨率上限列于表 4 内;对第 6 类脉冲激光器,其时间分辨率上限应不超出该激光器有效脉冲持续时间的 10%;对第 7 类连续激光器,在测定其输出功率不确定度时,其时间分辨率应小于 10 ms。

表 4 脉冲持续时间测量仪器的时间分辨率上限

激光器类别	时间分辨率上限
1	100 fs
2	100 ps
3	1 ns
4	100 ns
5	10 μ s

c) 空间分布

在任何情况下,空间分布应在靶平面上或等效面上进行分析。该系统应配置一个二维空间的能量分布测试仪,其空间分辨率应优于光束直径公称值的3%。

光束最大能量密度或最大功率密度由如下方法来确定。

通过对二维空间能量分布的积分可以得到脉冲总能量(Q),它与最大能量密度($H_{\max}$)之比值(第1~6类);或得到功率(P)对最大功率密度($E_{\max}$)之比值(第7类),这个比值称为有效面积($A_{T,\text{eff}}$),见公式(5)、(6)、(7)、(8)。

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x,y) dx dy \text{ (第1~6类)} \dots\dots\dots (5)$$

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{Q}{H_{\max}} \text{ (第1~6类)} \dots\dots\dots (6)$$

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x,y) dx dy \text{ (第7类)} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{P}{E_{\max}} \text{ (第7类)} \dots\dots\dots (8)$$

最大能量密度($H_{\max}$)(第1~6类),由 $H_{\max} = Q/A_{T,\text{eff}}$ 给出;要换算最大功率密度($E_{\max}$)(第1~6类),由 $E_{\max} = H_{\max}/\tau_{\text{eff}}$ 给出;最大功率密度($E_{\max}$)(第7类),由 $E_{\max} = P_{\max}/A_{T,\text{eff}}$ 给出。

整个测试装置应能具有表5列出的各种试验参数。

表 5 试验参数

名 称	符 号	计量单位
波长	λ	nm、 μ m
入射角	α	rad、[(°)度]
偏振度	ρ	—
脉冲重复频率	f_p	Hz
靶平面上的光束半径	w_T	mm、cm
靶平面上的有效光束半径	$w_{T,\text{eff}}$	mm、cm
脉冲持续时间	τ_H	ns、 μ s、s
有效脉冲持续时间	τ_{eff}	ns、 μ s、s
每个能量密度辐照测试点的最小数目	—	—

5.3 测试前的准备

5.3.1 试样的准备

试样的贮存、清洁和准备工作按生产厂家有关标准进行。在生产厂家未作专门规定时,则按如下步骤进行。

试样在试验前应放置在相对湿度小于50%的环境中24 h,拿取样品时只能接触其非光学表面。测

试前用 5.2.5 条所规定的显微镜对被测表面的质量和疵病进行检查。若发现污染,则必须加以清洁,其清洁工艺应记入测试报告;若污染点不能除去则应采用照相或其他方法加以记录。

5.3.2 测试参数

测试所用的激光波长、入射角和偏振度等测试参数在测试前应进行检查,确保与生产厂家正常使用
的技术条件一致。如果上述参数有一定范围时,那么这三个参数可取该范围内的任意值进行组合测试。

5.3.3 测试环境

测试环境的温度为 16~32℃,相对湿度小于 50%,空气应经过净化。

5.4 测试程序

将试样上一定数目的测试点逐个暴露在激光束中,并以不同的能量密度或功率密度对其进行辐照,每个能量(或功率)密度至少辐照 10 个测试点。所采用激光器的脉冲能量或光束功率必须具有足够宽的范围,以便得到零损伤几率的辐照点和 100% 损伤几率的辐照点。从这些数据中可以确定损伤阈值。

测试点应按一定的规律排列并能重复再现,测试点的排列应与试样上确定的参照点有关联。只有在试样测试结束后,而未从样品架上取下来之前,可以允许在试样的已知区域内划出标记作为参照点。通常采用一个或多个大损伤点作为参照点。

5.5 评定

损伤阈值是通过损伤几率来确定的。根据测试中不同脉冲能量(或功率)所对应的损伤几率,可以作出损伤几率对能量(或功率)的统计曲线图,如图 2 所示。由损伤几率线性外推到零损伤几率轴上,就可以得到损伤阈值。该阈值可按 5.2.6 条换算为能量密度或功率密度。

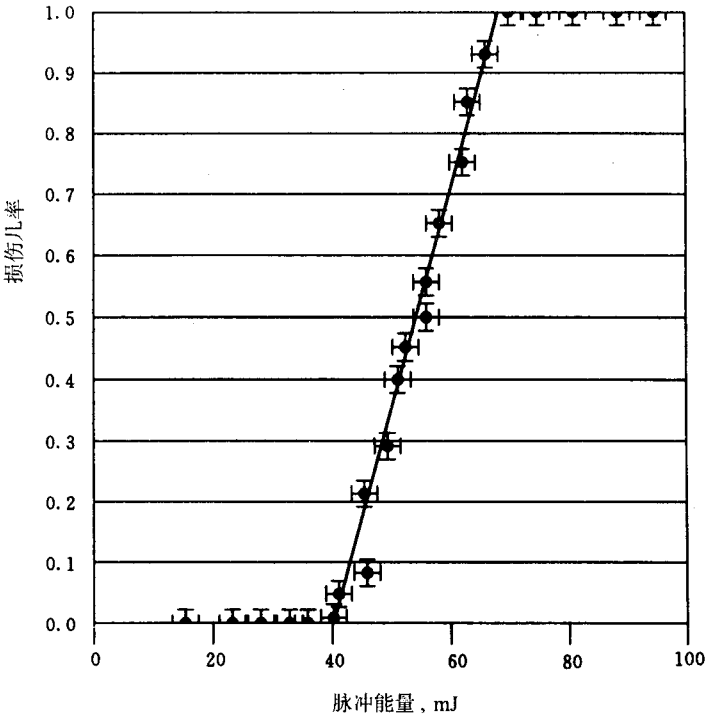


图 2 损伤阈值确定图

5.6 测试不确定度

总的测试不确定度是由不确定度分量累积所致。总能量或功率、空间分布和时间分布均存在着不确定度。表 6 是用第 3 类激光器进行测试时,对不确定度分量评定的一个例子,此例也适用于其他类型的激光器。

表 6 激光损伤阈值不确定度分量评定表

类 别	分 量 名 称	不 确 定 度
由随机影响引起的不确定度分量	脉冲与脉冲之间的能量不确定度	$\pm 3\%$
	脉冲与脉冲之间的空间分布不确定度	$\pm 5\%$
	脉冲与脉冲之间的时间分布不确定度	$\pm 5\%$
由系统影响引起的不确定度分量	能量计校正的不确定度	$\pm 3\%$
	能量计与能量监测器的一致性	$\pm 2\%$
	总能量密度的测量重复性	$\pm 5.8\%$
	总能量密度的测量不确定度	$\pm 6.8\%$
	总功率密度的测量重复性	$\pm 7.7\%$
	总功率密度的测量不确定度	$\pm 8.5\%$

5.7 测试报告

为确保测试过程有可靠的记录,对每个试样均应编上统一的测试号,且在整个测试过程中试样始终保持这一测试号。所有关于测试台的配置、激光器的校准、试样的清洁、显微检查、辐照参数、原始数据以及处理后测试结果等说明均应带有测试号。这些资料由测试单位作为原始资料保存。

测试报告一般应包括下列内容:

- a) 测试单位的情况
 - 1) 测试单位的名称与地址;
 - 2) 测试日期;
 - 3) 操作者姓名。
- b) 测试样品的有关资料
 - 1) 试样的类型(实际零件或试验片);
 - 2) 试样的生产厂家;
 - 3) 生产厂家给出的关于试样贮存、清洁和预处理的技术条件;
 - 4) 生产厂家给出的关于正常使用时的技术条件(波长、脉冲持续时间、偏振度、用途);
 - 5) 试样的标识号、生产日期。
- c) 有关测试(测试技术条件)资料
 - 1) 使用的测试装置,包括聚焦系统和有效的 f 数;
 - 2) 按表 5 记录的试验参数;
 - 3) 激光束的空间分布图和时间分布图;
 - 4) 不确定度分量分析;
 - 5) 试样的测试安排;
 - 6) 损伤的测试方法;
 - 7) 试样的贮存、清洁和预处理方法;
 - 8) 测试环境。
- d) 测试结果的资料
 - 1) 典型损伤测试点的显微照片,其脉冲能量或功率必须选择在损伤几率为 20%~80% 范围内;
 - 2) 损伤阈值确定图(如图 2);
 - 3) 测试结果得出的 H_{th} 和 E_{th} 。

测试报告举例见附录 A(提示的附录)。

附录 A

(提示的附录)

激光损伤阈值测试报告

1对1测试

A1 测试单位的情况

A1.1 测试单位:××××光学计量检测中心。

A1.2 操作者和日期:××× ×××/950826。

A2 试样

A2.1 试样类型:实际零件,在 K9 玻璃上镀波长为 1 064 nm 高反射膜。

A2.2 试样生产厂家:××××光学仪器厂。

A2.3 对贮存和清洁的要求:无特殊要求。

A2.4 技术条件:激光反射镜, $R > 99.5\%$, $\lambda = 1\,064\text{ nm}$, 入射角为 0, 正常使用(R 为反射比);

A2.5 试样标识号及光学薄膜镀制日期:HR-950826—××/950815。

A3 测试条件

由电光调 Q 的振荡级和光隔离放大级组成的 Nd:YAG 激光器,横、纵模,聚焦系统为一双凸透镜,其有效 f 数为 300。

A4 激光参数

a) 波长	1 064 nm
b) 入射角	0 弧度
c) 偏振态	线偏振
d) 脉冲重复频率	5 Hz
e) 靶平面上的有效光束半径	0.53 mm
f) 脉冲持续时间	12 ns(第 3 类)
g) 有效脉冲持续时间	12.7 ns

A5 时间、空间分布

激光器的时间、空间分布见图 A1、A2 所示。

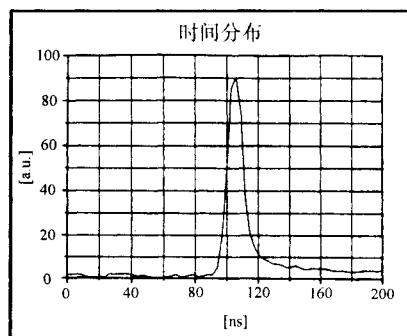


图 A1 时间分布图

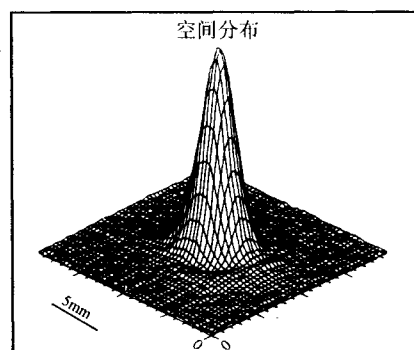


图 A2 空间分布图

A6 不确定度分量分析

A6.1 由随机影响引起的不确定度分量

脉冲与脉冲之间的能量不确定度 $\pm 3\%$

脉冲与脉冲之间的空间分布不确定度 $\pm 5\%$

脉冲与脉冲之间的时间分布不确定度 $\pm 5\%$

A6.2 由系统影响引起的不确定度分量

能量计校正的不确定度 $\pm 3\%$

能量计与能量监测器的不一致性 $\pm 2\%$

总能量密度的测量重复性 $\pm 5.8\%$

总能量密度的测量不确定度 $\pm 6.8\%$

A7 试样的测试安排

- 每个试样上测试点的数目 25;
- 测试点的排列 5×5 矩阵排列;
- 测试点之间的最小距离 3 mm;
- 试样数目 5;
- 损伤测试 联机扫描测试, 联机图像处理;
- 试样的贮存 生产厂家提供的样品盒, 外部环境为通常的室内环境;
- 测试环境 经过滤的清洁空气;
- 清洁工艺 用干燥氮气去尘埃。

A8 测试结果

测试结果见图 A3、A4、A5 所示。

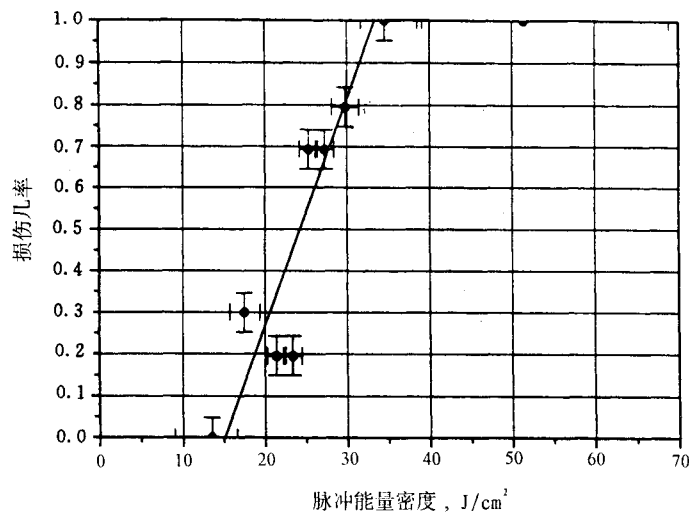


图 A3 损伤阈值确定图

损伤阈值 15.1 J/cm^2



图 A4 能量密度为 19 J/cm^2 的显微图

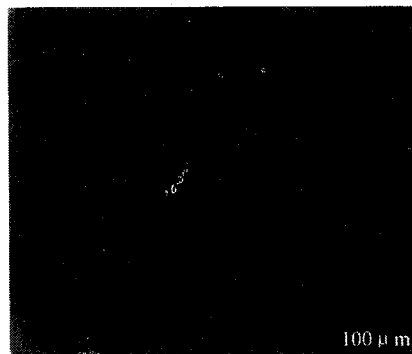


图 A5 能量密度为 30 J/cm^2 显微图

注：损伤发生在光学薄膜中，吸收是引起损伤的主要原因。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
光学表面激光损伤阈值测试方法
第1部分：1对1测试

GB/T 16601—1996

*

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码：100045

电 话：68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 20千字

1997年5月第一版 1997年5月第一次印刷

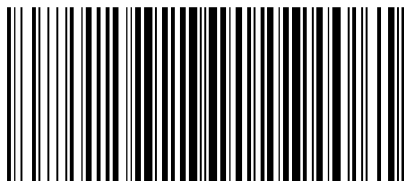
印数 1—600

*

书号：155066·1-13618 定价 12.00元

*

标 目 307—29



GB/T 16601—1996