

文章编号: 1001-3806(2006)05-0532-04

## 光学薄膜激光损伤阈值测试方法的介绍和讨论

朱耀南

(江苏曙光光学电子仪器厂, 扬州 225009)

**摘要:** 目前国内外对光学薄膜激光损伤阈值的测试方法基本上可归纳为 3 类: 国际标准 ISO 11254、国军标 GJB 1487-1992 和各单位的企业标准。在简要介绍这些方法的基础上, 对各类测试方法的有关内容进行了讨论, 并提出尽快与国际标准接轨以及研制并生产这种测试仪器的的重要性和迫切性。

**关键词:** 薄膜; 激光器; 激光损伤阈值; 光学表面

**中图分类号:** O484.5 **文献标识码:** A

### Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating

ZHU Yao-nan

(Jiangsu Shuguang Optoelectronics Limited, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Recently the measurement methods for laser induced damage threshold (LDT) of optical coating basically can be divided three types: international standard ISO 11254, national military standard in China GJB 1487-1992 and respective standards in companies. These standards are simply introduced at beginning, then some items of them are discussed. It is suggested that the international standard should be adopted as soon as possible, and it is very important and urgent to set up the device for measuring LDT.

**Key words:** thin films; lasers; laser induced damage threshold; optical surface

## 引 言

随着高功率激光器及其应用范围的日益扩大, 光学薄膜的抗激光损伤性能的重要性日益突出, 以致激光损伤阈值几乎已成为光学薄膜不可缺少的性能指标。由于光学薄膜的激光损伤阈值是光学元件整体抗激光损伤性能中的瓶颈<sup>[1]</sup>, 因而这一问题的解决对高功率激光器的发展和应用有着十分重要的现实意义。但是, 只有定量地测出了薄膜的激光损伤阈值, 才有可能为进一步提高其激光损伤阈值开展相应的研究工作<sup>[2,3]</sup>, 因而对光学薄膜的激光损伤阈值的测试也就成了亟待解决的技术问题。

在国际标准 ISO 11254 中, 光学薄膜激光损伤阈值的测试方法是归纳在光学表面激光损伤阈值的测试方法中的, 而光学表面又分为镀膜面和未镀膜面 (裸表面) 两种情况。针对激光束与光学薄膜辐照次数的不同, 国际标准分成两个部分: ISO 11254-1<sup>[4]</sup> 和 ISO 11254-2<sup>[5]</sup>。前者称为“1 对 1 测试”, 也叫“单次辐照

测试”, 主要用于单次激光器; 后者称为“S 对 1 测试”, 也叫“多次辐照测试”, 是为重复频率激光器考虑的。用于光学工程领域的国际标准 ISO 10110<sup>[6]</sup>, 其中第 13 部分就是激光辐照损伤阈值 (Part 13: Laser irradiation damage threshold), 它具体的测试方法也采用了国际标准 ISO 11254。

我国的光学薄膜激光损伤阈值的测试方法大致可分为 3 种类型: (1) 各单位自定的“企标”; (2) 国军标《激光光学元件测试方法》(GJB 1487-1992)<sup>[7]</sup>; (3) 国家标准《光学表面激光损伤阈值的测试方法 第 1 部分: 1 对 1 测试》(GB/T16601-1996)<sup>[8]</sup>, 该标准等效于 ISO 11254, 因而在下面的讨论中将我国的国家标准和相应的国际标准一并进行。但由于在编制该标准时, ISO 11254 还处于“草案”<sup>[9]</sup>时期, 所以国家标准 GB/T16601-1996 的内容没有 2000 年颁布的“ISO 11254-1”那么完善。

## 1 3 种类型测试方法的简介

### 1.1 各单位的“企标”

各单位的“企标”情况不一, 介绍起来较为困难。这里仅把笔者所了解的情况概括一下。“企标”通常简单、实用。一般是用一台稳定的激光器 (其类型与

作者简介: 朱耀南 (1945-), 男, 研究员级高工, 现从事光学薄膜方面的设计和制造工作。

E-mail: yzzyn@yzvod.com

收稿日期: 2005-07-25; 收到修改稿日期: 2005-09-08

该企业的激光产品有关)经聚焦后辐照到被测试片表面;一般只针对一到几个测试点进行辐照,每个测试点辐照 100 或 200 个脉冲。激光器选定后,它的能量就确定了;测试片在光路中所处的位置就决定了激光束斑的大小,这样能量密度或功率密度也就确定了。损伤的判别则在  $6\times\sim 30\times$  的显微镜下观察而定。如不损伤,则认为该光学薄膜能承受这时的能量密度(功率密度),该数值也就理解为该光学薄膜的激光损伤阈值。

## 1.2 国军标 (GJB 1487-1992)

国军标 (GJB 1487-1992)规定的测试方法是:一台稳定单模的脉冲激光器(其脉冲宽度要求小于或等于 10ns)发出的激光先扩束(扩束后的束散角要求小于 3mrad),再经衰减器衰减后,聚焦到被测试片表面,每个测试点辐照 100 个脉冲,但辐照测试点的数量没有作具体规定。衰减器用来调节激光能量,聚焦的作用是缩小在测试片表面的束斑大小,由此提高其能量密度(功率密度)。损伤的判别,则通过  $30\times$  左右的相衬显微镜来观察、确定。

在该标准中,激光损伤阈值定义为:未引起损伤的最大辐照能量密度与引起损伤的最小辐照能量密度的算术平均值。

## 1.3 国标 (GB/T16601-1996) 和国际标准 (ISO 11254)

国标 (GB/T16601-1996)和国际标准 (ISO 11254)规定的测试方法是:一台稳定的重频激光器(具有准“高斯”型或准平顶型的空间分布)发出的激光束先扩束、再经衰减器衰减后,聚焦于被测试片表面。对“1 对 1 测试”方法而言,每个测试点辐照 1 个脉冲,但同一个能量密度(功率密度)最少要辐照 10 个测试点;对“S 对 1 测试”方法来说,每个测试点辐照 S 个脉冲(S 可取 10, 100, 1000 等),同一个能量密度(功率密度)最少辐照测试点的数量是由下式来确定的<sup>[2]</sup>:  $N_{ms} = 5 \times \text{int}[(1 + \lg N_p)]$ , 其中,  $N_{ms}$  为最少辐照测试点的数量,  $N_p$  为每个测试点辐照的脉冲数。

其中的衰减器和聚焦系统用来调节激光能量,激光器的输出能量变化区域必须要有足够宽的范围,以确保在测试中的能量密度(功率密度)能造成被测样品具有零损伤和 100% 损伤的几率。激光束在辐照前通过分束器取样,并将其引入光束诊断系统,该系统能同时测定激光束的能量及其空间分布和时间分布,这也意味着在测试过程中可对激光束的能量密度(功率密度)进行实时监控。另外,对“S 对 1 测试”而言,激光的损伤必须通过一个损伤探测系统来进行自动探测的,这是因为在对某一测试点进行 S 次(S 个脉冲)辐照时,一旦探测到损伤应立即中止对该测试点的辐照,

并记下这辐照次数 ( $N_{min}$ )。

对于损伤程度的判别,则是通过  $100\times\sim 150\times$  相衬显微镜 (Nomarski-type microscope) 观察被测样品在激光辐照前、后的状况来确定的,并要求在采用损伤探测系统探测时,损伤的确定必须与相衬显微镜观察的结果一致。

标准还对激光在辐照面上的束斑的大小作了规定:激光束斑的直径通常不小于  $\varnothing 0.8\text{mm}$ ,对于较长脉宽的激光由于功率密度的需要,其束斑的直径可减少到不小于  $\varnothing 0.2\text{mm}$ 。为了防止相互影响,测试点与测试点之间的距离应大于激光束斑的 3 倍。

由于激光损伤阈值与激光器的脉宽和重复频率有关,标准对脉宽和重复频率进行了分类,以便分别对待。对于激光损伤阈值的计量单位标准也作了规定:对脉冲激光,光学薄膜的激光损伤阈值通常用能量密度 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) 作为计量单位;对连续激光,光学薄膜的激光损伤阈值通常用线性功率密度 ( $\text{W}/\text{cm}$ ) 作为计量单位;并且有一个专门的附录来说明之。下面对此将作较详细的讨论。

标准认为,激光束的能量密度(功率密度)是与损伤几率呈线性的,其损伤阈值就根据这个线性关系在零损伤几率轴上得到。所以,可以认为激光损伤阈值是损伤几率为 0 的最大激光辐照能量密度(功率密度)。

## 2 讨论

### 2.1 损伤的判别

在这 3 类测试方法中“损伤”均是通过显微镜观察来判别的,但它们所使用的显微镜种类不一样,并且放大倍率也不同。显然,这会判别上带来差别,最终反映到测试结果上。所以不同的测试方法必然得到不同的“测试结果”;在报道“测试结果”时,必须注明其测试方法。

在国际标准 (ISO 11254) 的“S 对 1 测试”方法中要求采用自动探测系统来判别损伤,它的工作原理是根据光学薄膜(光学表面)因表面损伤而产生散射光来判别的。而且可以基本上做到与显微镜观察、判别的结果相一致。但也需要指出:采用显微镜观察来判别,会带有测试者的主观因素。

我国研究成果表明:薄膜经激光辐照发生损伤之前,首先要出现“等离子体(即为自由电子和离子的混合物)”,该等离子体的温度可达到  $10^3\text{K}$  数量级,同时还伴随有“等离子体闪光”,通过探测该等离子体的闪光就可以间接地对薄膜的“损伤”进行探测。这就是“等离子体判别”方法。实践证明:这也是一种行之有效可用于自动探测系统中的判别方法,而且还克服了

“散射光判别”要求基底光洁度高的缺点。

总之,损伤的判别对损伤阈值的测试有着直接的影响,尽管采用显微镜判别会带有测试者的主观性,但它毕竟直观、有效。问题是由于显微镜的种类不同和放大倍率不同会带来判别上的差别。尤其是在国际标准(ISO 11254)中提到的放大倍率在 $100\times\sim 150\times$ 的“Nomarski-type”相衬显微镜,其价格昂贵,因而难以在国内推广使用,这使我国在这方面与国际接轨带来了一定的困难。

## 2.2 激光束斑面积的确定

“激光束斑面积”更确切地说是“激光束在靶平面上的有效面积”。对“企标”来说,它通常是在测试片的位置上,用“敏感相纸”来测得的,然后用读数显微镜测量其直径,之后计算其面积。而在国际标准(ISO 11254)中,则是通过光束诊断系统来确定的:具体做法是将光束诊断系统置于测试点等效面上(靶平面上)的激光束进行测试,根据其束斑的空间分布计算出其面积,束斑的面积具体公式如下<sup>[1]</sup>:  $A_{\text{eff}} = Q / (H_{\text{max}} \times \cos\alpha)$ ,其中, $Q$ 为脉冲能量; $H_{\text{max}}$ 为最大能量密度; $\alpha$ 为光束的入射角。并且对“平顶型”或“准高斯型”不同的光束有不同的计算。

在国军标 GJB1487-1992中,虽然没有明确规定如何来确定束斑面积,但该标准也要求测试仪上具有激光能量的接收及分析系统,所以可以认为激光束斑面积也是通过光束分析系统来确定的。

激光束斑面积与激光束的能量密度(功率密度)有着直接的关系。也就是说直接影响着激光损伤阈值的数据。“企标”用“敏感相纸”来测定,显然较为粗糙,其数据往往偏大,造成测出的“损伤阈值”偏小;而在国际标准 ISO 11254中,“激光束斑面积”是通过测试点等效面上光束的空间分布推导出来的。当前国际上广泛认可:以激光强度峰值的 $1/e^2$ 对应的曲线内面积作为激光束的有效面积。这一“定义”是与国际标准中“激光束斑面积的确定相符合的。而且在国际标准中,还要求在测试过程中对光束的空间分布加以监控。所以可以认为,国际标准对“激光束斑面积的确定”是较为准确的,具有先进性。

## 2.3 损伤阈值的确定

根据上面的介绍,这3种测试方法对损伤阈值的确定是各不相同的。“企标”的损伤阈值应理解为:不损伤(零损伤)的能量密度(功率密度);国军标 GJB 1487-1992把损伤阈值定义为:未引起损伤的最大辐照能量密度与引起损伤的最小辐照能量密度的算术平均值(这一“定义”是与1984年国际上所规定的光学介质薄膜激光损伤阈值的定义相吻合的);在国际标准 ISO 11254中的把“损伤阈值”定义为:损伤几率

为0的最大激光辐照能量密度(功率密度)。这样,3种方法测出的数据肯定会有差别。所以谈“激光损伤阈值”一定要说明所采用的“测试方法”,尤其对光学元件的“验收技术条件”,当标注了“激光损伤阈值”,也一定要注明其“测试方法”或“验收标准”。

为使我国在光学表面激光损伤阈值测试方法方面能与国际接轨,建议采用国际标准 ISO 11254以及我国的国家标准 GB/T16601。因为国际标准化组织(ISO)在上世纪90年代初期就开始该标准的制定工作,经过了近10年的讨论才确定下来,它不但对测试过程,而且对测试装置(包括激光器的类型)和测试报告等均作了详细而明确的规定,其目的是希望按该标准测出的数据有意义,且具有可比性,便于国际间的交流和合作。遗憾的是能符合该标准的测试装置(仪器)还未商品化,国内、外均还处于研制阶段,南京理工大学和作者所在单位也正在研制这一测试装置。

## 2.4 损伤阈值的计量单位

损伤阈值的计量单位只有在国际标准 ISO 11254中作了明确的规定。对光学薄膜来说,具体分两种情况:一是脉冲激光且其脉宽较短(相对于热扩散时间)的情况下,应采用能量密度( $\text{J}/\text{cm}^2$ )作为计量单位;而脉宽较长(相对于热扩散时间)的情况下,由于热量的累积效应,脉冲的峰值功率则是影响损伤阈值的关键参数,则应采用功率密度( $\text{W}/\text{cm}^2$ )作为计量单位。二是长脉冲或连续激光的情况,这时光学薄膜的损伤完全是激光的热损伤占主导地位,采用的计量单位是线性功率密度( $\text{W}/\text{cm}$ ),鉴于激光束斑通常应认为是圆形的,可把“线性功率密度”理解为“径向功率密度”。

我国在损伤阈值计量单位的使用中,至今还比较混乱。如光学薄膜承受1ns至30ns短脉冲激光(国际标准中的第1组和第2组)的损伤阈值时,应该采用“能量密度”作为计量单位,但却往往使用了“功率密度”作为计量单位。其理由是激光的能量是在很短时间内辐照光学薄膜,在计量其损伤阈值时要考虑“时间”的因素。其实,按不同的短脉冲宽度来选取损伤阈值的计量单位,已经考虑了“时间”的因素;而且“功率密度”则是每秒内的“能量密度”,对于如此短的脉冲激光来说,相反是个平均值。故在这种情况下采用“功率密度”作为计量单位是适得其反。

激光损伤阈值是光学薄膜所具有的一种性能,在相同的波长下,1ns和30ns脉冲宽度的激光对光学薄膜的损伤机理是基本一样的,其损伤阈值也应比较接近;但进一步地分析:不同的脉冲宽度的激光对光学薄膜的作用还是有所不同,也就是说同样的光学薄膜在1ns和30ns激光辐照时的损伤阈值是不一样的。在国际上已有如下的经验公式,能使在这个范围内的不同

脉冲宽度的激光损伤阈值相互换算:  $LDT(Y) = LDT(X) \times \sqrt{Y/X}$ , 其中,  $X, Y$  分别为激光的不同脉冲宽度 (单位是 ns);  $LDT(Y)$  为  $Y$  ns 下的激光损伤阈值 (单位是  $J/cm^2$ );  $LDT(X)$  为  $X$  ns 下的激光损伤阈值 (单位是  $J/cm^2$ )。

若假定某一光学薄膜在 10 ns 脉冲宽度激光辐照下测出的损伤阈值为  $4 J/cm^2$ , 那么在 20 ns 脉冲宽度激光来辐照时的损伤阈值应该约为  $5.66 J/cm^2$ 。国内外通常还把这一类短脉冲激光的损伤阈值归化到脉冲宽度为 1 ns 情况下的损伤阈值, 以便互相比。

由此可见: 采用合适的“计量单位”也是一件十分重要的事情, 应尽快地实施国际标准 (国家标准)。这不仅是可与国际接轨的问题, 而且加深对“激光损伤阈值”含义的理解。在国际标准 ISO 11254-1 附录 C 和 ISO 11254-2 附录 D 中均叙述了如何来正确理解和采用损伤阈值的“计量单位”, 并举例说明了不正确采用“计量单位” (应采用线性功率密度  $[W/cm]$ , 却采用了功率密度  $[W/cm^2]$ ) 的错误后果<sup>[4,5]</sup>。

## 2.5 国家标准 (GB/T16601-1996) 实施中的问题

国家标准《光学表面激光损伤阈值的测试方法 第 1 部分: 1 对 1 测试》(GB/T16601-1996) 在实施中所遇到的问题也是国际标准 ISO 11254 在我国实施中所遇到的问题, 根据笔者的了解大概有以下几个方面。

2.5.1 测试装置 (仪器) 在上面已经提到, 目前能符合该标准的测试装置 (仪器) 还未商品化, 国内外均还处于研制阶段。这是个关键问题, 以致该标准实施、普及起来较为困难。就像作者所在单位虽然正在与南京理工大学一起研制该测试装置, 但在生产中还只能采用一个简易装置, 按“企标”来验收光学薄膜。所以当务之急是促成这种测试装置 (仪器) 能尽快地研制成功, 并正式投入生产。

2.5.2 习惯的影响 各单位有各自的习惯的影响, 例如作者所在单位是生产激光产品较早以及产值较高的单位, 在上世纪 80 年代初引进国外先进产品时, 就开始重视光学薄膜的激光损伤阈值这一技术指标, 当时国外图纸中所标出的是: 光学薄膜在承受波长为 1064 nm、脉宽为 10 ns ~ 20 ns、功率密度不小于  $300 MW/cm^2$  的激光辐照  $10^5$  次后, 应无损伤。从其技术指标来看就是难以实现的, 因为要辐照  $10^5$  次, 所要花的时间也就可想而知, 再说这么多次的辐照, 激光器元件的寿命也要受到影响。后来经咨询, 提供了一种可行的方法: 把激光辐照次数减少到 100 次 ~ 200 次, 但必须提高辐照的功率密度。这一方法就一直留传了

下来。当然作为一个“企标”还是可以的, 但有不少概念和观点与国际标准不一致, 应该尽快地统一到“国际标准”上来。

2.5.3 “1 对 1 测试”的局限性 国际标准 ISO 11254 有两个部分: 即“1 对 1 测试”和“S 对 1 测试”, 然而国家标准仅有第 1 部分: “1 对 1 测试”, 而且当时在制定时由于国际标准 ISO 11254 还处于“草案”时期, 故还有不少不完善的地方。对重频激光来说必须考虑激光辐照的累积效应, 也就是应采用“S 对 1 测试”。在“S 对 1 测试”中, 可以对 S 规定不同的数据: 1, 10, 100, 1000 等来进行测试, 从而绘制出各个不同 S 值的损伤几率与脉冲能量的曲线 (简称损伤几率曲线), 由此可得到不同 S 值 (每个测试点辐照不同次数) 的激光损伤阈值。这些数值是递减的, 这可进一步理解激光对光学薄膜损伤的累积效应。当  $S = 1$  时, 这是个特殊情况, 即为“1 对 1 测试”。

由此可见, 我国的当务之急应是完善国家标准的第 1 部分: “1 对 1 测试”方法, 并着手编制第 2 部分: “S 对 1 测试”方法, 但更为迫切的是把符合标准的测试装置 (仪器) 的研制出来并正式投产。否则“S 对 1 测试”与“1 对 1 测试”一样难以实施。

该文得到过南京理工大学理学院倪晓武教授的指导, 在此由衷地表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 582 (in Chinese).
- [2] ZHANG D P. Effect of treatment by oxygen plasma on properties of  $ZnO_2$  thin film [J]. Optical Technique, 2005, 31 (2): 224 ~ 226 (in Chinese).
- [3] ZHANG D W. The application of ion beam cleaning on the laser film [J]. Optical Technique, 2005, 31 (2): 238 ~ 240 (in Chinese).
- [4] ISO 11254-1-2000, Laser and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surface-part 1: 1-on-1 test [S].
- [5] ISO 11254-2-2001, Laser and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surface-part 2: S-on-1 test [S].
- [6] ISO 10110-13-1997, Optical and optical instruments-preparation of drawings for optical elements and system-part 13: laser irradiation damage threshold [S].
- [7] GJB 1487-1992, Test methods for laser optical elements-method No. 14: laser induced damage threshold [S] (in Chinese).
- [8] GB/T 16601-1996, Test methods for laser induced damage threshold of optical surfaces part 1: 1 on 1 test [S] (in Chinese).
- [9] ISO/DIS 11254-1. 2-1995, Optical and optical instruments-Lasers and laser related equipment-test methods for laser induced damage threshold of optical surface-part 1: 1 to 1 test [S].