

激光损伤光学表面的检测研讨

高志山 陈进榜

(南京理工大学电光学院,南京,210094)

摘要: 激光损伤光学表面的检测在激光武器和激光核聚变驱动器的研究过程中占有重要的地位,结合实验研讨了激光损伤光学表面的检测原理,即宏观检测与微观检测原理的优缺点。

关键词: 激光损伤 检测 光学表面

Enter into the measurement of laser-induced damage optical surface

Gao Zhishan , Chen Jinbang

(Institute of Electronic Engineering & Photoelectronic Technology ,
Naijing University of Science and Technology ,Nanjing ,210094)

Abstract: The measurement of laser-induced damage optical surface play an important role in development of laser weapon or the National Ignition Facility. In this paper , by combining with the experiment , we comment on the defects and advantages of two measurement method ,i. e. one on macro-measurement of the reflectivity of He-Ne laser , and other on micro-measurement of the topography for damage spot.

Key words : laser-induced damage measurement optical surface

引 言

由于激光具有准直性好,输出功率高且能量集中等优点,已在工、农业、军事等许多方面被普遍应用。如在军事方面,激光能阻止和杀伤敌方目标,摧毁敌方目标上光电传感器和制导系统;在激光核聚变研究方面,将成千上万件各类光学元件有序地组成 200 束左右激光束同时聚焦在 0.1~0.2mm 直径的焦斑内,完成一次能量净增益,驱动核聚变。在这些应用中,都希望光学表面的抗损伤阈值愈高愈好,如在激光核聚变中要求在 3ns 激光脉宽情况下,1.06 μ m 基频激光的抗损伤阈值为 15~20J/cm²,因此,要求检测激光对光学表面的损伤程度,以便决定系统中元件材料的选用、镀膜方法。

激光对光学表面的损伤面积跟激光束光斑大小及激光对表面的作用时间、脉冲数目有关,其数值一般在微米到毫米量级,损伤深度在微米量级,因此,激光损伤光学表面的检测原理主要分为两类:(1)宏观检测,即使用连续激光在作用点处反射光能的改变,来判断损伤阈值;(2)微观检测,即使用微观形貌检测原理得出经高功率激光作用前后表面微观形貌的变化。我们将主要研讨这两方面的检测原理。

1 激光损伤光学表面的宏观检测原理及实验研究

该原理用连续激光,如 He-Ne 激光为探测光束来检测表面是否出现损伤,把 He-Ne 激光斜射在脉冲激光的入射点,分别测出未受脉冲激光辐照前后的 He-Ne 激光的反射光能,当反射光能出现改变时,认为材料表面出现损伤。

Morgan A J^[1]等人运用该原理于 1989 年建立了一套用于检测激光损伤光学表面的大型完整实验装置,用于检测不同波长激光作用不同光学材料表面的损伤阈值;此后,该检测原理成为一个阶段时期的激光损伤光学表面的主要方法;美国 Seitel S C^[2]等人于 1992 年提出基于该原理的国际标准方法,认为不同光学材料表面的激光损伤阈值应是在单点单脉冲激光作用下的损伤阈值。

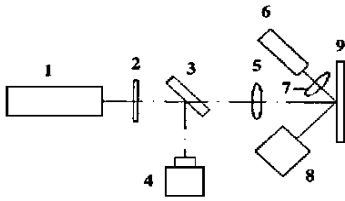


图1 检测激光损伤阈值的实验装置

5 聚焦到被测光学表面 9 上,该表面安装在 1 具可以进行二维调节的支架上,聚焦光斑面积由黑纸记录后在读数显微镜下读出。He-Ne 激光 6 作为探测光经透镜 7 聚焦后斜入射到 Nd YAG 激光的作用点,反射光强由照度计 8 监测。

1.2 损伤阈值的测试

一般可定义当作用点的 He-Ne 激光反射能量减小 10% 时,高功率激光能量为光学表面能量损伤阈值。首先用单脉冲不同能量密度的激光作用被测光学表面,作用点反射率随不同能量密度的变化如图 2 所示,从图中看出,被测光学表面的损伤阈值为 $4.4\text{J}/\text{cm}^2$ 左右。

使用该检测原理装置还可以测量在同一激光能量下,不同脉冲频率的脉冲激光作用下的光学表面的损伤

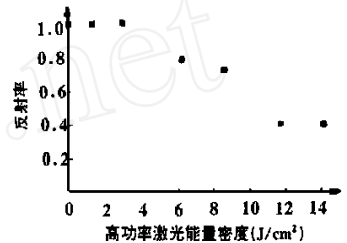


图2 He-Ne 激光反射率随单脉冲激光能量密度变化

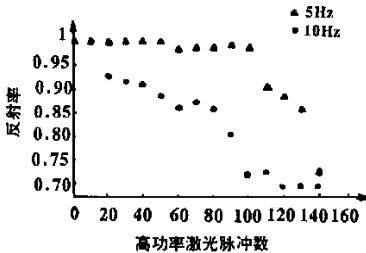


图3 用入射能量为 $1.43\text{J}/\text{cm}^2$ 的高功率激光探测激光反射率随脉冲数目变化

阈值,实验结果如图 3 所示。由图中看出,重复频率为 10Hz 的相同能量密度的激光作用 20 个脉冲后,表面反射下降为 90% 左右,即产生破坏;而 5Hz 的激光需作用到 110 个脉冲,才产生破坏。

2 激光损伤光学表面的微观检测原理

激光对光学镀膜表面的损伤首先应出现在膜层缺陷处,多数情况下,这种缺陷为球状。为了探测这些缺陷引起的激光对表面的损伤形状及研究激光损伤阈值与表面形状之间的关系,美国加利福尼亚大学的 Staggs M C^[3]等人使用原子力显微镜 (AFM),进行对激光损伤光学表面的微观检测;法国 Natoli J Y^[4]等人用显微镜和 CCD 对激光损伤光学表面进行实时观察,用 AFM 对激光损伤光学表面定量测量。

激光损伤光学表面的微观检测,是应用显微探测(如原子力显微探测、微分显微干涉、白光显微干涉)原理,测量高功率激光作用点处的损伤微观形貌变化,由此可以定量确定激光能量或脉冲个数达到什么程度时,开始损伤光学表面及其损伤程度。

对光学表面的微观检测原理,不仅可以应用在激光损伤后,还可以应用在激光损伤前。特别是在光学表面镀膜之前,如在激光核聚变驱动器中,一般要求光学件的表面粗糙度的 PV 值

在 1~3nm,RMS 值为 0.5nm 左右;KDP 晶体的表面粗糙度的 PV 值为 5~20nm,RMS 值为 1~4nm,如果该项技术指标未达到要求,不仅仅造成高功率激光散射,影响和降低了高功率激光光束质量,而且在不符合要求的粗糙表面上镀膜,将使膜层抗强激光破坏能力大大减弱,降低了膜层和材料的损伤阈值。

在激光损伤光学表面微观检测原理方面,为了获取大量程(即检测纳米到几十微米量级的表面微观形貌)的检测手段,使用的光源从单色连续激光、双波长到白光,相对应的出现了两种新的检测原理,即白光垂直扫描干涉(VSI)原理和白光傅里叶频域分析(FDA)原理。

2.1 微观检测的白光显微干涉原理装置

检测原理装置基于等光程显微干涉系统,其光学系统见图 4 所示。白光 1 经反射镜 2 折转,经立方分光镜 3 入射到显微物镜 4 上,由显微物镜产生会聚光,其中一部分光会聚到被测表面 7 上,另一部分光由分光镜 6 反射会聚到标准面 5 上。由标准面 5 和被测激光损伤表面 7 反射的光束合在一起形成干涉条纹,经物镜 4,立方分光棱镜 3 投射到 CCD8 的靶面上。

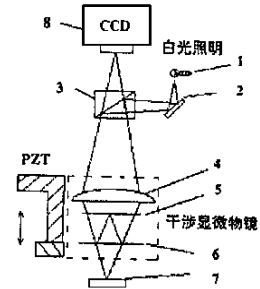


图 4 检测表面微观形貌的光学原理图

白光干涉图的光强函数为
$$I(x, y) = \int_{k_1}^{k_2} \{1 + M(k) \cos[2kh(x, y) + \phi(k)]\} dk \quad (1)$$

式中, (x, y) 为表面二维坐标, $h(x, y)$ 为被测表面微观高度; k_1, k_2 分别为白光光源谱带下限和上限; $M(k)$ 为光源光谱调制度; $k = 2\pi / \lambda$, $\phi(k)$ 为 PZT 引入的位相变化。

2.2 垂直扫描干涉(VSI)原理

澳大利亚悉尼大学的 Hariharan P^[5]等人 1994 年使用了这一原理,该原理又称峰值对比度法,即将被测样品沿光轴方向(即 z 轴方向)作垂直扫描,同时寻找探测器各像素上白光干涉图的峰值对比度,记录下峰值对比度对应的扫描位置坐标,即相应于表面上对应点的高度。具体描述如下:当对被测面沿光轴作扫描时,探测器某一像素上的光强变化可表示为

$$I = I_0 [1 + V \cos(2kz)] \quad (2)$$

式中, z 是跟扫描位置坐标有关的光程差; I_0 为直流分量, V 是调制度。

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (3)$$

在垂直扫描一系列值 z 时, I 的变化如图 5 所示。当 $z = 0$ 时,该像素上的光强达到极大值 I_{\max} , z 值(扫描位置)稍一变化,像素上的光强迅速下降。由于干涉显微镜中参考臂光程始终不变,因此,光程差 $2z$ 的变化完全由被测表面沿光轴方向扫描移动引起;光强最大值,就是像素上条纹对比度最大位置,此时,显微镜视场中相应表面点的高度满足了等光程条件。寻找整个扫描行程中峰值对比度对应的位置,原理有好

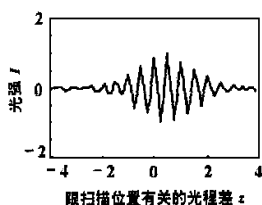


图 5 探测器某一像素上光强 I 随跟反扫描位置有关的 z 变化曲线

几种方法,但本质上都一样,即经过相当大的计算量以后,有用的只是峰值对比度(或峰值光强)这一点的的数据。因此,数据利用率低。

2.3 频域分析(FDA)原理

美国 De Groot P^[6]等人于 1994 年提出了频域分析测试原理,它是通过在频域上恢复各种

波长的位相信息,来获取表面高度分布,因此,仍然是一种位相测量原理。

对白光源,包含了一系列波数 k ; 对不同的 k , 由表面上同一微观高度在干涉图上引起的位相 $\phi(x, y; k)$ 值不一样; 如果能确定出表面某一点(坐标为 (x, y) , 具有某一微观高度 $h(x, y)$) 上一组对应的 $\phi(x, y; k)$,
$$\phi(x, y; k) = \phi_0 + 2kh(x, y) \quad (4)$$

则经过直线拟合(对无色差的理想光学系统), 表面微观高度 $h(x, y)$ 就是直线斜率的一半,

$$h(x, y) = 0.5d \phi(x, y; k) / dk \quad (5)$$

用微位移精密定位扫描系统对被测表面进行垂直扫描, 记录下某一像素(对应被测表面某一点 (x, y) , 下文将 $\phi(x, y; k)$ 简写为 $\phi(k)$) 上随扫描位置变化的一系列光强值 $\{I(z)\}$ 。频域分析主要表现在对这组光强值进行傅里叶变换, 即

$$P(k) = \int I(z) \exp(-ikz) dz = |P(k)| \exp[-i\phi(k)] \quad (6)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$; $\phi(k)$ 即表面某一点上(同一微观高度), 因不同的 k 引起的不同相移,

$$\phi(k) = \tan^{-1} \{ \text{Im}[P(k)] / \text{Re}[P(k)] \} \quad (7)$$

刚好得到一系列 $\{\phi(k)\}$ 。其中, $\text{Im}(\cdot)$ 为求虚部, $\text{Re}(\cdot)$ 为求实部, 由此可得到某一点表面微观高度, 视场内其它点高度, 依此类推。

2.4 激光损伤光学表面三维微观几何形状的检测

对图 1 中的激光损伤表面用表面微观形貌测试仪 New View200 测量, 表面损伤的三维图如图 6 所示。图中损伤直径为 $\varnothing 20\mu\text{m}$, 损伤深度为 300nm。

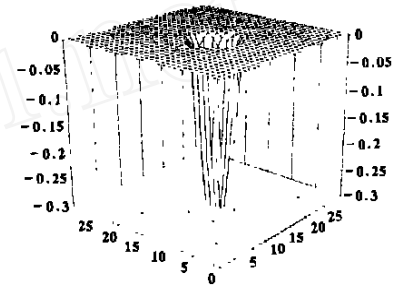


图 6 激光损伤光学表面的三维微观形貌

3 结 论

激光损伤光学表面的检测在近几年得到迅速发展, 宏观检测原理和微观检测原理是目前主要的检测原理, 我们对此做如下比较:

宏观检测原理 其优点是: 由于高功率激光和监测激光互不相干, 可对高功率激光损伤光学表面作实时监测。缺点是: (1) 判断光学表面受激光损伤的依据是作用点处反射光能量发生变化, 因此要求监测激光的功率稳定性较高; (2) 无法知道激光对光学表面损伤的实际三维形状及激光在表面上损伤扩展过程, 不利于损伤作用机理的准确研究。

微观检测原理 其优点是: 能够准确得到光学表面受激光损伤的程度、损伤点处实际微观形貌三维形状; 在光学表面镀膜前检测裸表面的表面微观形貌, 结合镀膜后受高功率激光损伤的损伤检测, 可以研究损伤阈值与表面微观形貌的关系, 弥补了宏观检测的不足; 通过努力, 可以在显微镜下亲眼看到何时开始损伤。其次, FDA 与 VSI 相比, 前者属位相测量方法, 具有数据利用率高、精度高、能消除干涉仪光学系统色差等优点, 后者除数据利用率低外, 还具有下述缺点: (1) 由于对比度易受随机噪声影响, 所以随机误差有时较大; (2) 对比度跟白光光源的谱强度分布有关, 因此, 对白光光源的谱强度稳定性要求较高。

参 考 文 献

- 1 Morgan A J, Rainer F, De Marco F P *et al.* SPIE, 1989; 1438: 47 ~ 56
- 2 Seitel S C, Gieson A, Becker J. SPIE, 1992; 1848: 2 ~ 9
- 3 Staggs M C, Kozlowski M R, Siekhaus W J *et al.* SPIE, 1992; 1848: 234 ~ 241

肛肠疾病激光手术应用体会

陈传真

(华西医科大学附一院激光科,成都,610041)

摘要: 报道了不同的激光手术,治疗效果通常满意,并对激光手术后并发症及治疗作了讨论。

关键词: 激光 肛门 直肠

Clinical analysis of laser treatment for anus and rectum diseases

Chen Chuanzhen

(The First Affiliated Hospital of West China University of Medical Sciences, Chengdu, 610041)

Abstract: This paper reports the different laser operation methods. The treatment results are generally satisfactory. The complication after laser therapy and prognosis were discussed.

Key words: laser anus rectum

引 言

从 1987 ~ 1997 年,我科先后用激光治疗肛肠疾病 1000 例,综观整个治疗过程,激光手术与其它方法比较,如外科手术、中医注射疗法、中药外敷、肛门用药、电子治疗仪等,激光治疗有其明显优点,但如处理不当,少数病人仍可引起一定不良反应,严重影响患者工作和学习。下面我们就有关问题作一些讨论。

1 临床病例及常见术后反应

病例资料。我院从 1987 年 7 月至 1997 年 4 月共用激光治疗肛肠疾病 1000 例,痔 500 例,其中内痔(° °)400 例,外痔 70 例,混合痔 30 例;瘻管 50 例;肛裂 60 例;直肠息肉 32 例;直肠脱垂 58 例;尖锐湿疣 200 例;肛周湿疹 35 例;直肠癌 8 例;增生乳头 10 例;其它共 47 例。其中,男 550 例,女 450 例,男 女 = 1.1 0.9。年龄从 10 个月至 87 岁,35 ~ 65 岁有 540 例,占 54%,全部病人均用激光手术完成。

4 Natoli J Y, Pommies P, Albrand G *et al.* SPIE, 1997; 3244: 76 ~ 85

5 Hariharan P. Journal of Modern Optics, 1994; 41(11): 2197 ~ 2201

6 De Groot P, Deck L. Journal of Modern Optics, 1995; 42(2): 389 ~ 401

* * *

作者简介:高志山,男,1966 年 10 月出生。讲师,在读博士。主要从事光电智能测试新原理、仪器研制工作,尤其侧重于光干涉计量测试的研究工作。

陈进榜,男,1936 年 11 月出生。教授,博士生导师。现从事光学计量测试的研究工作。

收稿日期:1999-06-01 收到修改稿日期:1999-07-06