

文章编号: 0258-7025(2008)02-0273-03

光学元件激光损伤阈值的指数拟合法 以及测试误差分析

李大伟^{1,2} 赵元安¹ 贺洪波¹ 邵建达¹ 范正修¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 利用指数拟合法拟合损伤概率, 获取 1-on-1 激光损伤阈值; 分析了测试光斑面积以及单脉冲能量台阶取样点数对损伤概率的影响。采用理论推导得到了缺陷按完全简并模型分布时的损伤概率表示式, 做进一步的修改使之适用于非完全简并情况从而得到了指数拟合公式, 并通过实验比较了直线拟合与指数拟合的结果, 证明了指数拟合法的优越性; 计算模拟研究了测试光斑面积以及单脉冲能量台阶取样点数对测试误差的影响, 发现测试光斑面积越大、取样点数越多则测试结果越准确。

关键词 薄膜; 激光损伤阈值; 数值模拟; 指数拟合法

中图分类号 O 484 **文献标识码** A

Exponential Fitting of Laser Damage Threshold and Analysis of Testing Errors

Li Dawei^{1,2} Zhao Yuan'an¹ He Hongbo¹ Shao Jianda¹ Fan Zhengxiu¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The exponential fitting model of damage probability and 1-on-1 laser damage threshold of optical components was presented, and the effects of irradiated spot size and number of spots tested for one pulse energy density on damage probability were investigated. The damage probability was calculated, when the defects is distributed as complete degeneracy, and then further modification was done to fit the incomplete degeneracy situation. The damage probability to fit the damage data is called exponential fitting model and the experiment results in the paper showed that the exponential fitting could get more accurate damage threshold. The test errors induced by laser beam spot and the sites tested at one pulse energy density were studied through numerical simulation. It is shown that the larger beam area and more sites exposed at one pulse energy density, the more accuracy of damage possibility.

Key words thin films; laser induced damage threshold; numerical simulation; exponential fitting

1 引 言

光学薄膜损伤^[1~9]主要由薄膜内部的缺陷引起, 呈现一定的概率性^[10~13]。目前 ISO-11254 计算损伤阈值的方法是选取一定范围内的损伤概率进行直线拟合得到损伤阈值^[6]。该方法假设损伤概率随辐照脉冲能量密度呈线性变化, 而大量的理论计算以及实验数据表明损伤概率与脉冲能量密度之间的

线性关系并不成立。此外, 测试所用脉冲的光斑面积以及单能量台阶取样点数也会影响获取的损伤概率的准确性。本文通过计算模拟分析这些因素的影响, 并对拟合方法加以改进。

2 光斑面积和取样点数的影响

薄膜内缺陷的种类及其空间分布比较复杂, 利

收稿日期: 2007-05-30; 收到修改稿日期: 2007-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(60608020)资助项目。

作者简介: 李大伟(1978—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事光学薄膜激光损伤方面的研究。

E-mail: dawei_510@yahoo.com.cn

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学薄膜的制备及其检测技术方面的相关研究。

E-mail: jdshao@opfilm.com

用完全简并模型^[4],认为所有缺陷的损伤阈值均为 I_0 。测试光束的能量密度空间分布呈高斯型,表示为

$$I_R = I_0 \exp(-2R^2/\omega^2), \quad (1)$$

式中 I_0 表示脉冲的峰值能量密度, ω 为脉冲的高斯半径, R 表示偏离光斑中心的距离。

能量密度大于缺陷的损伤阈值的区域称为有效区域,相应的有效半径 R_i 可以表示为

$$I_i = I_0 \exp(-2R_i^2/\omega^2),$$

$$\text{即} \quad R_i^2 = \frac{\omega^2}{2} \ln \left[\frac{I_0}{I_i} \right]. \quad (2)$$

按照泊松(Poisson)统计规律,产生损伤的概率为

$$p = 1 - \exp(-d \times S), \quad (3)$$

式中 d 为缺陷密度,对于同一样品可以看作常数。 S 为光束有效面积,且有

$$S = \pi R_i^2, \quad (4)$$

由以上条件可以得到相应的损伤概率

$$p = 1 - (I_i/I_0)^{\pi d \omega^2 / 2} = 1 - (I_i/I_0)^{N_0/2}, \quad (5)$$

其中 $N_0 = \pi \omega^2 d$ 表示平均每个高斯光斑范围内的缺陷个数。(5)式表明缺陷呈完全简并模型分布时损伤概率与测试脉冲峰值能量密度之间的关系。

编程模拟损伤阈值测试,产生一组具有相同损伤阈值的缺陷随机分布于样品表面,计算各点的能量密度。如果缺陷所在点的能量密度大于其损伤阈值则认为产生损伤。由前面的推导,理想情况下得到的损伤概率应满足(5)式。

定义偏离度 σ 来表征实验结果与理想情况之间的差距,表示为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i (X_i - x_i)^2}{n}, \quad (6)$$

式中 X_i 表示使用某一能量台阶获得的损伤概率, x_i 表示相应能量密度下(5)式计算得到的损伤概率, i 表示能量台阶数, A_i 表示权重因子。

理论上测试光斑面积越大结果越准确,但实际测试中受限于激光器输出能量以及样品能够提供的测试面积,测试光斑面积不可能无限大。测试光斑面积的影响受缺陷密度的调制:如果保持单个光斑内的缺陷数目 N_0 一定,则测量得到的损伤概率偏离度相同。图1所示为两次模拟得到的损伤概率,计算得到偏离度 σ 均为0.21,但光斑直径分别为200 μm 和400 μm ,相应的缺陷密度为4000 cm^{-2} 和1000 cm^{-2} ,单能量台阶取样数为30。其他条件一定,则需要根据样品条件调整测试光斑才能保证损伤概率的准确度。

进一步模拟不同的 N_0 以及不同的单能量台阶取样点数 N_s 下的偏离度 σ ,结果如图2所示。该图表

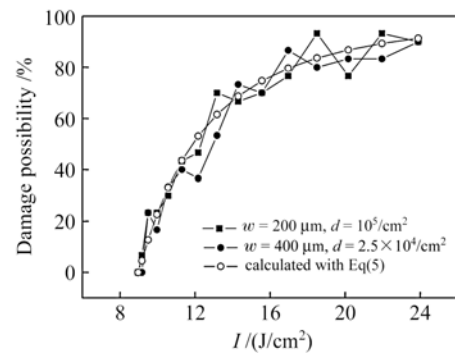


图1 不同测试光斑半径的损伤概率

Fig. 1 Damage probability obtained with different spot size

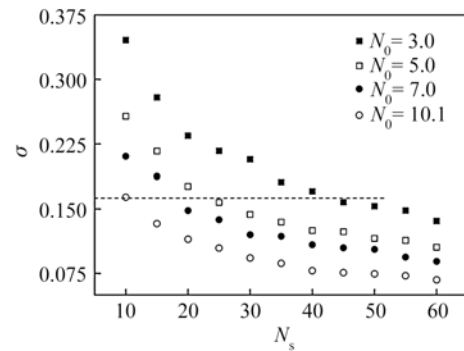


图2 测试光斑面积内的平均缺陷个数 N_0 不同时损伤概率偏离度 σ 与单能量台阶取样点数 N_s 的关系

Fig. 2 Damage probability deviation σ versus number N_s of spots exposed to one pulse energy with different defects averaged per spot size N_0

明, N_0 一定的情况下偏离度随取样点数 N_s 的增加而减小,说明测得损伤概率越准确。 N_0 不同时得到的曲线变化趋势相似,但在 N_s 相同的条件下 N_0 越大偏离度越小。这体现了测试光斑面积的作用,同时也表明 N_s 应根据测试光斑面积以及测试样品的缺陷密度加以调整才能保证测试损伤概率的准确度。如图2中虚线所示, $N_0 = 10.1$, $N_s = 10$ 时测试得到的损伤概率偏离度与 $N_0 = 5$, $N_s = 25$ 以及 $N_0 = 3$, $N_s = 40$ 得到的结果相近。

图2中的曲线表明了偏离度的变化趋势。总体而言,随着 N_s 的增大而减小,但在超过40以后变化趋缓。因此在样品缺陷分布以及激光脉冲光斑一定的条件下,考虑到实验效率以及能量耗费等因素本文认为单能量台阶取样数取为40是最佳选择。

3 指数拟合法

尽管完全简并模型在某些情况下与实际损伤概率分布符合较好^[2],但它只是一种理想、简化模型,实际缺陷的尺寸、掩埋深度以及吸收系数、热膨胀系

数等特性都会影响其损伤阈值,因此(5)式适用范围有限。为了扩大其适用范围,在(5)式中引入普适参数 a ,表示为

$$p = 1 - [(I_t - a)/(I_0 - a)]^{N_0/2}, \quad (7)$$

式中参数 a 表征了实际缺陷分布偏离完全简并模型的程度。为了区别于直线拟合法,该方法称为指数拟合法。

图 3 所示为对一光学薄膜样品进行测试得到损伤概率并分别以指数拟合法以及直线法进行拟合得到的曲线。其中测试装置搭建以及测试流程均参照 ISO11254-1^[6]。Nd:YAG 激光器输出 1064 nm 波长激光,脉宽为 12 ns。光斑能量密度的空间分布呈高斯型,长短轴分别为 420 μm 和 520 μm ,单能量台阶取样点数为 20。

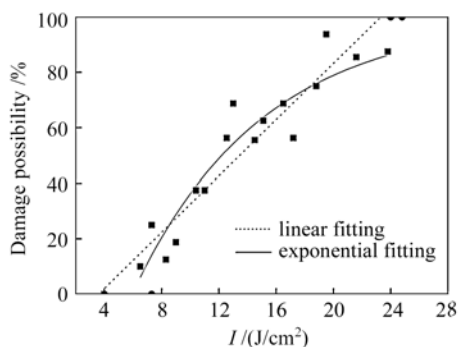


图 3 直线拟合与指数拟合的结果比较

Fig. 3 Comparison between damage onsets yielded by linear and exponential fitting

比较两种拟合方法,指数拟合得到的曲线与实验数据符合更好。损伤阈值方面,直线拟合法得到的结果为 3.40 J/cm^2 ,指数拟合法稍高,为 6.05 J/cm^2 。为验证该结果,以平均能量密度为 6.05 J/cm^2 的脉冲在样品表面选取 1 $\text{cm} \times 1 \text{cm}$ 的区域进行小光斑扫描^[14],未发现损伤。这表明相比于直线拟合法,指数拟合得出的损伤阈值更接近于实际值,减小了测试中由拟合方法带来的实验误差。

4 结 论

测试光斑面积以及单能量台阶脉冲的测试点数会影响测试损伤概率的准确性。这其中测试光斑受激光器输出的限制,因此应保证一定的测试点数,特别是测试光斑较小时应适当调整以获得准确的损伤概率。结果表明,测试光斑面积的影响可以归结为单个光斑范围内的平均缺陷个数,因此在测试中光斑大小的设定应考虑样品本身特性的影响。

由于薄膜中缺陷分布的复杂性,损伤概率与测

试脉冲能量密度之间的关系不明确,因此直线拟合法在某些情况下误差较大。指数拟合法基于完全简并模型建立,并引入了经验参数 a 。它表征实际缺陷分布与完全简并模型之间的偏差,并扩大了指数拟合法的适用范围。

综上所述,测试光斑面积以及测试点数会影响测试得到的损伤概率的准确性。测试光斑面积越大,同一能量台阶的脉冲测试的点数越多,得到的损伤概率越准确。在缺陷分布以及脉冲光斑一定的条件下,单能量台阶取样点数为 40 时效果比较理想。基于完全简并模型提出的指数拟合法普适性较好,可准确拟合出损伤概率曲线,求得损伤阈值。

参 考 文 献

- 1 T. H. Maiman. Simulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, **187**(4736):493~494
- 2 Alexander J. Glass, Arthur H. Guenther. Laser induced damage of optical elements—a status report[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(4):637~649
- 3 Hu Haiyang, Fan Ruiying, Tang Zhaosheng *et al.*. Study of the technology of small spot scanning for laser conditioning of optical coatings at 532 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(8):763~767
胡海洋,范瑞瑛,汤兆胜等. 532 nm 激光小光斑扫描预处理光学薄膜的研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(8):763~767
- 4 Cui Yun, Zhao Yuan'an, Jin Yunxia *et al.*. Laser damage characteristic of third harmonic separator at 1064 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1129~1134
崔云,赵元安,晋云霞等. 三倍频分光膜在 1064 nm 的破斑特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1129~1134
- 5 S. R. Foltyn. Spotsize effects in laser damage testing [C]. *Spec. Publ.*, 1982, **669**:368~379
- 6 Optics and optical instrument-lasers and laser related equipment-test method for laser induced damage. ISO/OIS 11254-1,2
- 7 S. C. Seitel, J. O. Porteus. Toward improved accuracy in limited-scale pulsed laser damage testing vis the onset method [C]. *Spec. Publ.*, 1983, **688**:502~512
- 8 J. O. Porteus, Steven C. Seitel. Absolute onset of optical surface damage using distributed defect ensembles[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21):3796~3805
- 9 Robert M. O'Connell. Onset threshold analysis of defect-driven surface and bulk laser damage[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21):4143~4153
- 10 J. Dijon, T. Poiroux, C. Desrumaux *et al.*. Nano absorbing centers: a key point in the laser damage of thin films [C]. *SPIE*, 1997, **2966**:315~325
- 11 H. Krol, L. Gallais, C. Grèzes-Besset *et al.*. Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**:184~189
- 12 L. Gallais, J. Y. Natoli, C. Amra. Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25):1465~1474
- 13 Ling Bo, Liu Shijie, Yuan Lei *et al.*. Influence of metal contamination in vacuum chamber on properties of optical thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):988~991
凌波,刘世杰,袁磊等. 真空室内金属杂质污染对光学薄膜性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):988~991
- 14 Lynn M. Sheenhan, Mark R. Kozlowski, Frank Rainer *et al.*. Large area conditioning of optics for high-power laser systems [C]. *SPIE*, 1994, **2114**:559~568