

文章编号: 0253-2239(2004)04-503-4

对晶体光损伤阈值测量的一种新方法的研究

盛 芳¹ 陈 军¹ 夏宗仁² 洪 治¹

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)
(² 中电科技德清华莹电子有限公司, 浙江 德清 313216)

摘要: 提出一种测量晶体光损伤阈值的新方法,即确定激光横向功率密度的空间分布,利用晶体的激光损伤斑点半径,直接计算出晶体光损伤阈值,并给出入射激光为高斯光束时晶体损伤阈值与其损伤半径的关系。以提拉法生长的掺镁铌酸锂(MgO:LiNbO₃)晶体为研究对象,用该方法测量其损伤阈值,得到了定量结果且所得数据与文献已报道的规律相符。分析得出同样激光条件下,损伤半径越大的晶体其光损伤阈值越小的结论,指出该方法同样适用于其他晶体或非高斯光束条件下光损伤阈值的测量并对具体作法进行了讨论。该测量方法弥补了常用测量方法只能定性或半定量的不足,可用于晶体抗光损伤阈值的精确测量。

关键词: 非线性光学; 光损伤; 损伤阈值; 损伤半径; 掺镁铌酸锂

中图分类号: TN206 文献标识码: A

A Novel Method for Measuring the Laser Damage Threshold of Crystal

Sheng Fang¹ Chen Jun¹ Xia Zongren² Hong Zhi¹

(¹ State Key Lab of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(² CETC Deqing Huaying electronics Inc., Deqing, Zhejiang Province 313216)

(Received 13 January 2003; revised 4 April 2003)

Abstract: A novel method to measure the laser induced damage threshold (LIDT) of crystals is presented. The method involves confirming the cross-sectional power density distribution of incident laser and measuring crystals' radii of damage spots, then calculating the corresponding LIDT. For Gaussian laser beam, a relational expression between crystals' damage threshold and radius of damage spots has been reasoned out. Different from other measuring method, this new method can qualitatively and exactly measure crystals' laser induced damage threshold. Using the method, the laser induced damage thresholds of LiNbO₃ single crystals doped with different MgO concentration are measured under the same laser condition. The measuring results agree well with both former relevant reports and authors' theoretical analysis. The applicability of the new method is discussed. It is shown that the proposed method is fast, accurate and can be widely used to precisely test crystals' laser induced damage threshold.

Key words: nonlinear optics; optical damage; laser induced damage threshold (LIDT); radius of damage spot; magnesium-doped LiNbO₃

1 引 言

铌酸锂(LiNbO₃)晶体具有优良的压电、铁电、电光与非线性光学特性,在激光调制和光波导等技

术领域有很好的应用前景,但在较高功率密度条件下工作时易发生光损伤^[1],这一特点限制了其应用范围。自从发现高掺镁(摩尔分数约 5%)可以显著提高铌酸锂晶体的抗光损伤能力^[2],高掺镁铌酸锂的研究成为人们关注的一个热点。而在提高铌酸锂晶体光损伤阈值的研究过程中,其光损伤阈值(Laser induced damage threshold,简称 LIDT)的测

E-mail: perfume306@yeah.net

收稿日期:2003-01-13;收到修改稿日期:2003-04-04

量也就成为一个重要课题。

通常采用直接观察透射光斑变形^[3~5]的方法测量晶体的抗光损伤阈值。调节入射激光的输出功率,当观察到激光束透过晶体的光斑开始发生畸变时,入射激光的功率密度即为晶体的光损伤阈值。由于光斑的初始畸变极其微小,人眼很难快速、精确地判定晶体发生激光损伤的初始时刻,于是测量过程变得费时费力,测量也只能半定量。

本文提出了一种可以定量测量晶体光损伤阈值的新方法。该方法快速、精确,克服了常用测量方法半定量、误差大的缺陷,在进行多个晶体抗光损伤能力的比较测量时,更显示出其优越性。

2 理论分析

通常认为激光束属于高斯光束,因此其横向功率密度 $\rho(r)$ 与横截面半径 r 满足如下关系:

$$\rho(r) = \rho_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \quad (r \geq 0) \quad (1)$$

其中, ρ_0 为激光束横向截面中心处的功率密度, ω 为激光束的腰斑半径。

考虑到测量时晶体放在激光束经过透镜变换后的束腰处,所以,晶体损伤阈值 ρ_v 与其损伤半径 r_v 的关系应该满足

$$\rho_v(r_v) = \rho_0 \exp\left(-\frac{2r_v^2}{R^2}\right), \quad (r_v > 0) \quad (2)$$

式中, R 为变换后的激光腰斑半径,即激光束在晶体表面的辐照半径。

对(2)式两边同时求导,得到

$$d\rho_v = -\frac{4\rho_0 r_v}{R^2} \exp\left(-\frac{2r_v^2}{R^2}\right) dr_v.$$

于是,

$$\frac{d\rho_v}{dr_v} = -\frac{4\rho_0 r_v}{R^2} \exp\left(-\frac{2r_v^2}{R^2}\right),$$

因为

$$0 < \exp\left(-\frac{2r_v^2}{R^2}\right) < 1, \quad \frac{4\rho_0 r_v}{R^2} > 0,$$

所以

$$\frac{d\rho_v}{dr_v} < 0, \quad (r_v > 0)$$

$\rho_v(r_v)$ 是 r_v 的单调减函数。

由 $\rho_v(r_v)$ 的增减性可知,若 ρ_0 和 R 不变,两损伤半径 $r_{v1} < r_{v2}$, 则其相应的损伤阈值 $\rho_{v1} > \rho_{v2}$, 如图 1 所示。也就是说,在相同的激光条件下,晶体的损伤越大,其光损伤阈值越小,反之亦然。

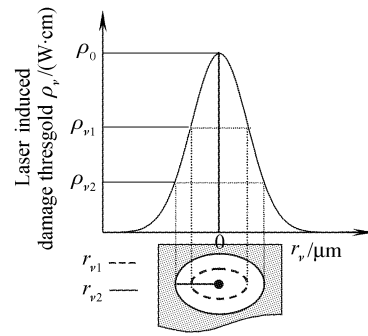


Fig. 1 LIDT ρ_v vs. radius of damage spot r_v

若对光束横向功率密度进行积分,可得横向功率(记为 P)

$$\int_0^{\infty} \rho_v(r) \cdot 2\pi r_v dr_v = P, \quad (3)$$

将(2)式代入,解得

$$\rho_0 = 2P/(\pi R^2),$$

因此晶体损伤阈值与损伤半径的关系式为

$$\rho_v(r_v) = \frac{2P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r_v^2}{R^2}\right). \quad (r_v > 0) \quad (4)$$

可见,只要知道激光辐照半径 R 和输出功率 P , 就可以确定激光束的横向功率密度分布,再测得晶体损伤半径 r_v 并将其代入(4)式,就可以计算出晶体的光损伤阈值。

3 实 验

3.1 原料制备

Nb_2O_5 和 Li_2CO_3 的纯度为 99.995%, MgO 的纯度为 99.99%。铌酸锂采用固液同成分配比, $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Nb}_2\text{O}_5=48.6/51.4$ [摩尔比]。在同成分配比中,分别掺入浓度(摩尔分数)为 0.4%、5%、6% 的 MgO , 生长四种不同的 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体。掺铕铌酸锂配方由下面的分子式决定:



其中 $x=0\sim 0.09$, 掺杂量=100×摩尔分数。

3.2 晶体生长

用提拉法(Czochralski)在中频感应加热的铂坩埚($\phi 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$)中生长晶体。拉晶炉控温精度 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$, 长期温漂 $< 0.5\text{ }^\circ\text{C}$, 机械爬跳量 $< 2\text{ }\mu\text{m}$ 。

为了保证 MgO 在晶体中均匀分布,减少晶体的缺陷,本实验采用较低的生长速度 1.5 mm/h , 控制晶体的旋转速度为 1.5 r/min , 生长的晶体尺寸为 $\phi 30\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。生长完成后在 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 极化退火 10 个小时,极化电流密度 5 mA/cm^2 。

3.3 光损伤阈值测试

我们用 3.1 中制备的四个掺杂浓度不同的 MgO:LiNbO₃ 晶体作为样品。利用相同功率的激光,辐照相同的时间,分别对各样品表面造成损伤,根据其表面损斑半径来计算该样品的光损伤阈值。

辐照所用的光源为电光调 Q Nd:YAG 激光器倍频后的脉冲光。其输出激光为波长 532 nm、脉宽 15 ns,单脉冲输出能量 10 mJ,工作模式为 TEM₀₀。入射光束通过光阑,经非球面透镜(焦距 $f=10$ cm)聚焦后辐照晶片表面。晶片放在聚焦后的激光束腰处。光路如图 2 所示。

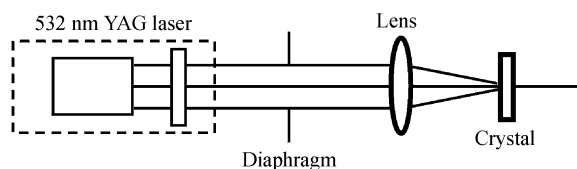


Fig. 2 Schematic of laser damage experimental setup

损伤实验完成后,对晶片表面的损伤斑点透射成像,装置如图 3 所示。

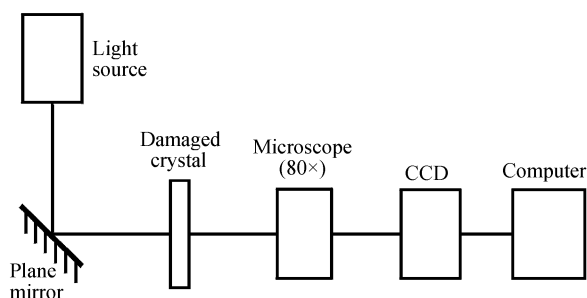


Fig. 3 Schematic of damage spot imaging setup

用 80 倍显微镜对晶体表面的损伤斑点放大、成像,用 CCD 将所成图像转换成数据流传送到计算机,进行图像处理,得到损斑像的半径信息,从而算出损斑半径。

4 结果与讨论

4.1 入射激光束横向功率密度分布的确定

根据实验条件(见 3.3 节)可算出入射激光的平均功率 $P=10$ mJ/15 ns= 0.667×10^6 W。又知聚焦前的激光腰斑半径 $\omega=0.85$ mm。根据高斯光束聚焦前后其腰斑的关系式 $\omega'=\lambda f/\pi\omega$ ^[6],代入数据算出聚焦后激光腰斑半径 $\omega'=19.9$ μ m,因此激光在晶片表面的辐照半径 $R=\omega'=19.9$ μ m。

将 P, R 值代入(4)式,得到本实验条件下晶体

损伤阈值与损斑半径的关系式

$$\rho_v(r_v) = 1.07 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{r_v^2}{198.0 \times 10^{-12}}\right) \text{ (W/cm}^2\text{)}. \quad (5)$$

4.2 损斑半径测量及损斑大小的分析

四种样品的损斑像如图 4 所示,均放大了 80 倍。损斑基本呈圆形,轮廓有轻微的无规则炸裂破坏。损斑的半径及破坏程度随着掺镁浓度的增加而减小。其中,图 4(a)和图 4(b)损斑半径较大,破坏程度较严重,图 4(c)和图 4(d)损斑半径较小,破坏程度较轻。各样品损斑像半径和计算出的损斑半径列于表 1。

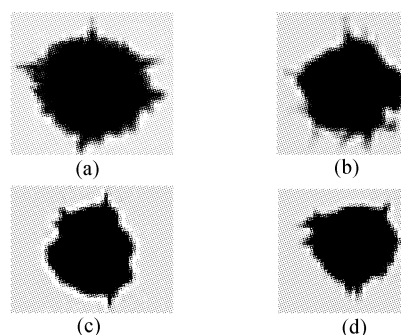


Fig. 4 Images of damage spots for MgO:LiNbO₃ crystals (80 \times). (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]

Table 1 Radii of damage spots and their images for MgO:LiNbO₃ crystals

No.	MgO mol fraction	Radii of images /mm	Radii of damage spots / μ m
1 [#]	0	4.98	62.3
2 [#]	4%	4.86	60.8
3 [#]	5%	4.30	53.8
4 [#]	6%	4.18	52.3

4.3 损伤阈值计算及其测量误差分析

按(5)式计算出各样品的损伤阈值,列于表 2。将其中两相邻样品的损伤阈值作一比较,不难发现差别最大的是 3[#] 和 2[#] 这一组。3[#] 比 2[#] 的损伤阈值高了 2 个数量级,说明掺镁浓度(摩尔分数)在 4%~5% 之间某特定值时, MgO:LiNbO₃ 晶体的光损伤阈值会大幅提高,这与文献[7]报道的规律相符。从图 4 和表 1、表 2 还可以看出,在同样的激光条件下,随着掺镁浓度的提高, MgO:LiNbO₃ 晶体的损斑变小,抗光损伤阈值增大,这一特点也与文献[7,8]报道相符。

Table 2 The laser induced damage threshold and its relative error for MgO:LiNbO₃ crystals

No.	MgO mol fraction	Laser induced damage threshold at 532 nm 15 ns / (W/cm ²)	Relative error $\Delta\rho_v/\rho_v$
1 [#]	0	3.29×10^2	15.7%
2 [#]	4%	8.35×10^2	15.4%
3 [#]	5%	4.80×10^4	13.6%
4 [#]	6%	1.07×10^5	13.2%

误差分析如下:我们认为测量系统确定后,放大倍率 M 和照射晶面的激光半径 R 即为常量,误差 $\Delta\rho_v$ 主要来源于损伤像半径 r'_v 的误差 $\Delta r'_v$ 。因为 $r_v = r'_v/M$, $\Delta r_v = \Delta r'_v/M$, 所以,损伤阈值的误差和相对误差分别为

$$\begin{cases} \Delta\rho_v = \left| \frac{\partial\rho_v}{\partial r_v} \Delta r_v \right| = \rho_v * \frac{4r_v}{R^2} * \frac{\Delta r'_v}{M}, \\ \frac{\Delta\rho_v}{\rho_v} = \frac{4}{M} * \frac{r_v \Delta r'_v}{R^2}, \end{cases} \quad (6)$$

测量所用 CCD 像元间隔为 10 μm , 故取 $\Delta r'_v = 20 \mu\text{m}$, 根据(6)式算出各样品损伤阈值的相对误差(见表 2), 可以看到, 它们都在 16% 以下。与无法定量测量的传统方法相比, 新方法测量结果的定量误差是比较令人满意的。这个误差还可以通过 R 、 M 的变动而进一步减小。

4.4 误差影响因素分析

各因素中, 激光参量起了决定作用, 其中对测量精度影响最大的是辐照半径 R 。增大 R , 将导致晶体损伤半径 r_v 的增大从而使其相对误差 $\Delta r_v/r_v$ 减小; 又 $(\Delta\rho_v/\rho_v) \propto 1/R^2$, 增大 R 更可以使损伤阈值的相对误差减小。因为 $(\Delta\rho_v/\rho_v) \propto 1/M$, 所以显微镜放大倍数 M 也是损伤阈值相对误差的一个影响因素。

为了减小晶体激光损伤阈值测量的误差, 应采用峰值功率足够高的脉冲激光, 并在满足损伤阈值测量的要求下, 尽可能增大辐照面积, 提高显微镜放大倍数, 避免使用有尖峰效应的激光源。在改善上述条件后, 测量误差可降低到 10% 以内。

4.5 新方法的适用范围

本文选用 MgO:LiNbO₃ 晶体作为实验对象, 是因为其损伤阈值测量倍受关注, 有较多的测量结果见诸于文献报道, 可与我们的测量结果进行对照。但是本文提出的损伤阈值测量方法也适用于其他晶体。该测量方法假设入射激光为高斯光束, 符合一般的近似规律。当具体的测量条件或要求使得入射

激光不能用高斯光束来近似时, 仍可沿用该方法的思想。通过 CCD 测量出入射激光功率密度的空间分布, 即确定 $\rho_v(r_v)$, 再测量晶体的激光损伤半径, 代入测定的 $\rho_v(r_v)$ 中, 计算出晶体的损伤阈值。

结论 本文以 MgO:LiNbO₃ 晶体为研究对象, 提出了定量测量晶体光损伤阈值的新方法, 即先确定入射激光横向功率密度分布, 从而确定晶体损伤阈值与损伤半径的关系 $\rho_v \sim r_v$, 然后获取晶体的激光损伤, 测量其半径并代入上述关系式, 算出晶体的光损伤阈值。采用此法测量了掺镁浓度不同的 MgO:LiNbO₃ 晶体的光损伤阈值, 从测量结果分析出的其损伤阈值随掺镁浓度变化的规律, 均与已报道的完全一致, 证实了该方法的可行性和理论分析的正确性。

该方法与直接观察晶体透射光斑变形的的方法相比, 减小了人眼观察对测量过程及结果的影响, 测量省时并可以给出定量的结果。在只需要进行光损伤阈值的相对比较时, 该方法更显出快速精确的优越性。

参 考 文 献

- Zhao Wei, Wang Kuiru, Yu Guoxian. Optical damage of lithium niobate channel waveguide. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1994, **21**(12):940~944 (in Chinese)
- Bryan D A, Gerson R, Tomaschke H E. Increased optical damage resistance in lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(9):847~849
- Jin Chan, Li Minghua, Liu Jinsong *et al.*. Study of the photorefractive resistance mechanism of magnesium-doped LiNbO₃ crystals. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1994, **23**(6):530~534 (in Chinese)
- Li Minghua, Sun Shangwen, Xu Yuheng *et al.*. Frequency doubling properties of Zn:LiNbO₃ crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(4):430~433 (in Chinese)
- Meng Xianlin, Shao Zongshu, Sun Youxuan *et al.*. Optical properties of Nd:Mg:LiNbO₃ single crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(5):416~421 (in Chinese)
- Chen Yuqing, Wang Jinghuan. *Laser Principle* (激光原理). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 208 (in Chinese)
- Zhong G G, Jian J, Wu Z K. Measurement of optically induced refractive index damage of lithium niobate doped with different concentration of MgO. Proc. 11th Int. Quantum Electronics Conf., June 1980, OCA, Washington D. C. IEEE Cat. No. 80CH1561-0: 631
- Han Aizhen, Gao Yuankai, Su Shangwen. Study on the growth of the high-doped magnesium LiNbO₃ crystal and the properties of the laser devices. *J. Synthetic Crystals* (人工晶体学报), 1995, **24**(2):160~165 (in Chinese)