

KDP 晶体激光损伤的研究*

李仲伢 李成富 程 雷

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了散射颗粒、焦斑面积和非线性吸收等对 KDP 晶体激光损伤的影响。研究了 KDP 晶体的多脉冲损伤。

关键词 KDP 晶体, 激光损伤

KDP 晶体是高功率激光系统中重要的光学元件,在各种激光器件中使用最广泛的非线性晶体,尤其是在激光核聚变等高功率激光系统中用作频率转换的大尺寸倍频晶体,更显出它的优势。然而 KDP 晶体也有容易被激光破坏的弱点。研究 KDP 晶体的激光破坏与各种因素的关系及规律有很重要的意义。本文从散射颗粒、焦斑大小和非线性吸收等方面对 KDP 晶体激光损伤影响的研究以及对 KDP 晶体多脉冲激光损伤的研究中得到了一些有益的结果,为 KDP 晶体改进研制工艺和可靠的预测其在高功率激光系统中的使用寿命提供了依据。

1 实验条件

激光损伤实验装置与文献[1]基本相同。激光系统由 Nd:YAG 振荡器和两级 Nd:YAG 放大器组成,用 LiF:F²⁺ 晶体调 Q,小孔光阑选模,输出波长为 1.06 μm,脉宽为 10 ns,TEM₀₀ 模。入射光束由非球面透镜聚焦在样品内,焦斑面积用刀口扫描法精确测定。样品的损伤情况由一倾斜放置的高倍显微镜观察判定损伤与否。

KDP 晶体的损伤实验,采用 1-on-1 的方法进行,即在样品的一个位置上只照射一次激光,不管这点是否发生破坏,下一次另换一个位置继续实验,损伤阈值定义为最大的不破坏能量与最小的破坏能量二者的平均值。文中表内损伤阈值后面的数据并非表示实验误差,而是损伤阈值的扩展^[2],这个数据的大小与样品本身的质量好坏有关,是损伤过程统计性质的半定量测量的判据。多脉冲损伤采用 S-on-1 方式,在样品的一个位置上用相同的激光能量多次照射直至样品发生破坏。损伤几率是这样确定的,选择一个适当的激光能量,在样品中随机照射 10 个位置,根据损伤位置的多少算出该激光能量的损伤几率。

KDP 晶体的非线性吸收实验,用测量入射能量和透射能量的方法进行,在样品的一个位置上,激光能量由低到高多次照射,入射能量逐次增加,直至样品出现破坏。

* 国家高技术基金资助项目。

2 实验结果和分析

2.1 散射颗粒

在 KDP 晶体的组成原料中或在晶体的生长过程中往往含有或带进某些杂质,因此晶体中就会出现散射颗粒,散射颗粒对损伤阈值的影响是很明显的,实验结果如表 1 所示。样品 S_1 的散射颗粒比 S_2 和 S_3 少,其损伤阈值则明显高于这二块样品。可见 KDP 晶体中杂质含量的多少对损伤阈值的影响非常灵敏。用二种不同焦距的透镜测量样品 S_1 和 S_2 的损伤阈值,实验结果如表 2 所示,在小焦斑的情况下二者损伤阈值的差别较大, S_1 比 S_2 高 30% 左右,而在大焦斑的情况下, S_1 的损伤阈值只比 S_2 高 15%,即散射颗粒对损伤阈值的影响减少了一半。该实验结果表明改变光斑尺寸,将改变杂质缺陷落入激光辐照区域内的几率,从而改变了损伤阈值的大小,光斑小激光束打在杂质上的几率减少,晶体就不容易破坏,损伤阈值就高,反之,损伤几率大,晶体容易破坏,损伤阈值就低。因此当焦斑面积增大时, S_1 和 S_2 的损伤阈值都在下降,而二者损伤阈值的相差则相对减少。该结果说明杂质缺陷是引起 KDP 晶体激光破坏的主要原因。

Table 1 Damage threshold of KDP crystals versus the scattering particulate number

Sample	Scattering particulate number/unit volume	Damage threshold (J/cm^2)
S_1	1	48.7 ± 5.7
S_2	4	41.0 ± 5.0
S_3	6	37.8 ± 2.6

Table 2 Damage thresholds of KDP crystals for different focal areas

Sample	Focused spot diameter (μm)	Damage threshold (J/cm^2)
S_1	76	48.7 ± 5.7
	314	23.7 ± 3.8
S_2	76	37.8 ± 2.6
	314	20.7 ± 5.3

Table 3 Damage threshold of a KDP crystal

Focal length (mm)	Focal area ($\times 10^{-6} cm^2$)	Damage threshold (J/cm^2)
60	13.9	50.7 ± 13.7
80	18.9	42.2 ± 19.0
180	45.3	38.8 ± 3.3
300	167.4	37.3 ± 2.3
500	774.4	34.3 ± 12.2

KDP 晶体中存在杂质缺陷的情况下,激光照射到样品上,杂质缺陷对激光的吸收要比基体的本征吸收大很多。杂质缺陷强烈地吸收激光能量,局部区域形成高温,当温度达到某种临界温度如材料的熔点时,杂质周围的基体熔化、气化,产生热应力、热冲击波和热爆炸等,以致晶体产生炸裂破坏,因此杂质破坏仍是 KDP 晶体产生激光破坏的重要机理之一。

2.2 焦斑效应

表 2 的实验结果已经表明 KDP 晶体的损伤阈值明显受焦斑的影响,损伤阈值随着焦斑的增大而下降。为了寻找它们之间的规律,作者又进行了如下实验,选择一组透镜,它们标称的焦距分别为 60 mm, 80 mm, 180 mm, 300 mm 和 500 mm,利用不同焦距的透镜分别在同一块

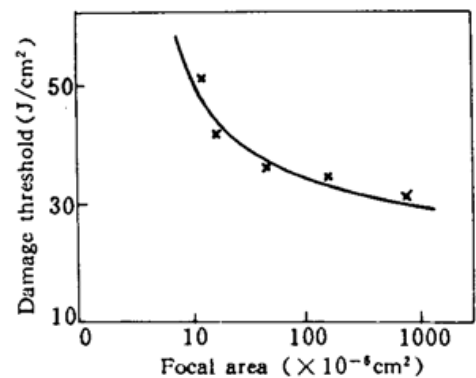


Fig. 1 Dependence of damage thresholds on focal areas

KDP 晶体上进行损伤实验,以保证光学质量的一致性,实验结果如表 3 和图 1 所示。由表 3 可以看出损伤阈值随着焦斑的增大而明显下降;从图 1 可以清楚地看到其变化规律,下降趋势由陡逐渐变缓。由此不难看出当焦斑面积大到一定值以后,曲线趋向于饱和,说明当焦斑面积大到某个数值时,激光照射在样品上任何地方,都有一定数量的杂质缺陷落在激光光斑照射的区域内,并且几乎有相等的破坏几率,使样品产生破坏,这时就不存在焦斑效应了。实验时往往受到激光器件功率水平的限制,激光损伤不可能采用很大的焦斑面积来进行实验,知道损伤阈值与焦斑面积之间的规律,通过选择适当的焦斑面积,便能获得满意的实验结果。

3.3 非线性吸收

用测量透射能量和入射能量关系的方法来研究非线性吸收。一束强度为 I_0 的高强度激光通过介质时,考虑非线性吸收,其强度变化为

$$dI/dz = -\alpha I - \beta I^2 \quad (1)$$

式中 α 和 β 分别为线性和非线性吸收系数, I 为透射强度,解方程(1)后稍加整理得

$$T^{-1} = I_0/I = -(\beta/\alpha)I_0 + (1 + \beta I_0/\alpha)\exp(\alpha d) \quad (2)$$

式中 $T = I/I_0$ 是样品的透过率, d 是样品的长度。

实验测得 KDP 晶体透射能量与入射能量关系的曲线如图 2 所示。在线性吸收的情况下,入射光强与透射光强的关系为一条直线,直线的斜率 $e^{-\alpha}$ 为透过率。从图中可以看出在入射能量较低的时候,晶体中的吸收基本是线性的,当入射激光能量增加时,透射曲线开始弯曲,说明晶体中已产生非线性吸收,这时晶体还未发生破坏。由于激光能量继续增加,随之非线性吸收增加,导致多光子电离,产生大量等离子体,等离子体迅速膨胀,在辐照点附近产生极强的应力场,使样品产生炸裂破坏。可见非线性吸收引发的雪崩电离是 KDP 晶体产生激光破坏的又一个重要机理。

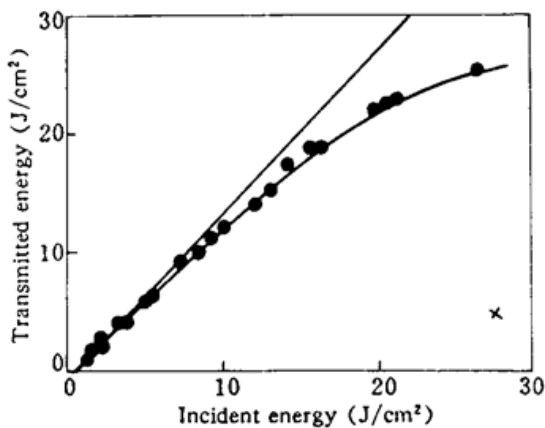


Fig. 2 Dependence of transmission on incident energy in KDP crystal. Symbol X indicates the appearance of crystal damage

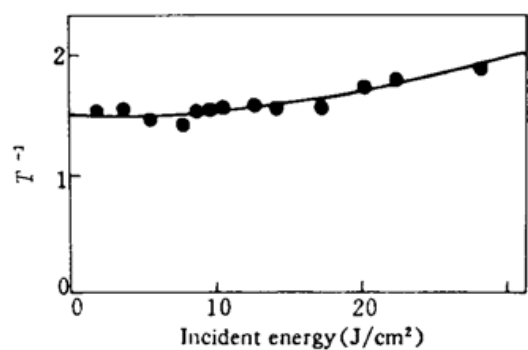


Fig. 3 Dependence of inverse transmission⁻¹ on incident energy

图 3 是入射能量与透过率 T 倒数的关系,从图上可以更清楚地看出样品中出现了非线性吸收。如果是线性吸收,则这条曲线是一条平行于 X 轴的直线而不是曲线。对同一块 KDP 样品还进行了 532nm 激光的非线性吸收的测量,曲线的趋势与 1.06 μm 激光测得的结果类似也存在明显的非线性吸收。不同的是在较低的输入激光能量情况下就出现了非线性吸收的现象。

2.4 多脉冲损伤

用 1 Hz 重复频率激光对 KDP 晶体进行多脉冲损伤实验,结果如图 4, 图 5 所示。图 4 是

产生激光破坏所需的脉冲数与激光强度之间的关系,随着激光强度的降低,使 KDP 晶体产生

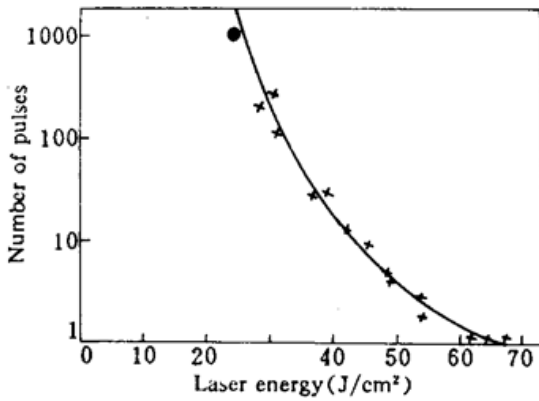


Fig. 4 Damage dependence on the number of laser pulses and laser energy
×: Damaged; •: Not damaged

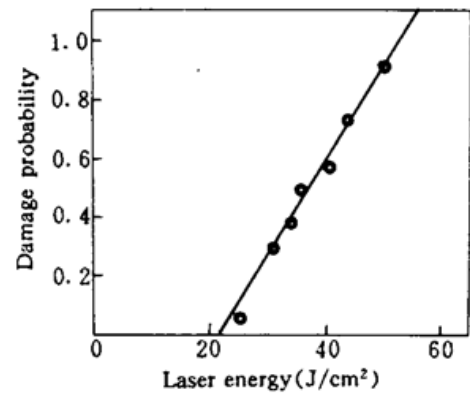


Fig. 5 Dependence of damage probability on laser energy

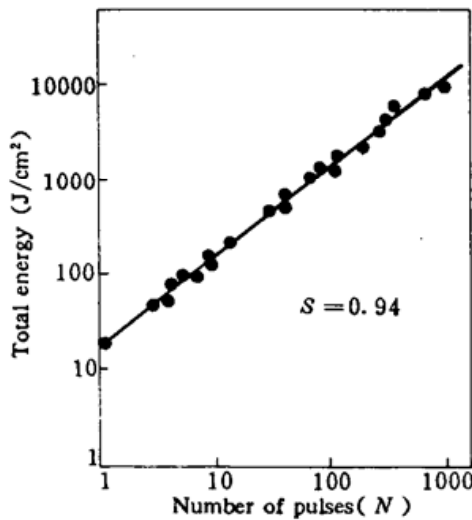


Fig. 6 Total energy versus the number of pulses

破坏所需的脉冲数成指数增加。说明 KDP 晶体在运行过程中,激光强度如能控制在单次损伤阈值的 50%左右的情况下,其使用寿命可以成百上千次地增加。图 5 是损伤几率与激光强度的关系,随着激光强度的增加损伤几率呈直线增加。

将图 4 KDP 晶体多脉冲损伤的实验数据利用积累方程^[3],可得到图 6 所示的积累曲线。

$$F_N = F_1 N^{S-1} \quad (3)$$

式中 F_1 是单脉冲损伤阈值, F_N 是 N 个激光脉冲的损伤阈值, S 是从实验数据中获得的材料特性参数。图 6 的纵坐标表示总能量,即脉冲数乘损伤能量。在 Log-Log 坐标中积累曲线为一条具有斜率为 S 的直线, $S = 1$ 表示无积累效应的情况。通常的多脉冲损伤实验给出了一个 S 小于 1 的斜率, S 值大小与材料性质有关,并作为积累效应的量度。本实验测得 KDP 晶体的 S 值为 0.94。

为 S 的直线, $S = 1$ 表示无积累效应的情况。通常的多脉冲损伤实验给出了一个 S 小于 1 的斜率, S 值大小与材料性质有关,并作为积累效应的量度。本实验测得 KDP 晶体的 S 值为 0.94。

参 考 文 献

- 1 李仲伾, 李成富, 郭聚平. 多脉冲激光对光学薄膜的损伤. 光学学报, 1991, 11(3): 264
- 2 T. W. Walker, A. H. Guenther, P. E. Nielsen. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings part 1; experimental. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(10): 2041
- 3 Y. Jee, M. F. Becker, R. M. Walsler. Laser-induced damage on single crystal metal surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, B5(3): 648

Investigation of Laser Damage of KDP Crystals

Li Zhongya Li Chengfu Cheng Lei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract Effects of scattering particulate and focal area as well as nonlinear absorption on damage thresholds of KDP crystals are reported. Multiple pulse laser-induced damage to KDP crystals is investigated.

Key words KDP crystal, damage threshold