

几种红外光学晶体的激光损伤研究

周良智

(中国科学院上海光机所)

提要: 用被动锁模的 YAG:Nd 激光器研究了 KCl、NaCl 和 KBr 单晶中的微微秒脉冲辐照损伤,测定了本征击穿阈值和自聚焦参数。最后分析了自聚焦、包裹物和脉宽等非本征因素对损伤测量的影响。

Investigation of laser-induced damage in IR optical crystals

Zhou Liangzhi

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

Abstract: A passively mode-locked YAG: Nd laser is used to study the damage in KCl, NaCl and KBr single crystals by picosecond pulse irradiation. Intrinsic breakdown threshold and self-focusing parameters are measured experimentally. The influence of intrinsic factors, such as self-focusing, inclusion and pulse width on the damage measurement are analysed.

一、引言

碱卤化物中的激光致损伤已有不少研究。Yablonovitch 首先发现,各种碱卤化物在 10.6 微米下的均方根击穿电场大致等于 D. C 脉冲的击穿电场,并且随带隙的不同呈现出周期性的变化^[1]。后来 Fradin 和 Bass 又发现,阈值电场的这种周期性变化亦可适用于 1.06 微米和 0.69 微米下的损伤^[2]。这些实验结果似乎已证实了碱卤化物的损伤是晶格的一种本征性能。然而,后来在 10.6 微米下对极纯的 KCl 晶体的测量却发现,在 10.6 微米下观察到的阈值电场的周期性变化并不总是正确的^[3]。对于 1.06 微米和 0.69

微米下各种碱卤化合物击穿电场的测量表明,阈值与带隙能量无关。此外,测得的温度与击穿阈值和前击穿光电导的关系也提供了相反的证据,即激光致击穿是由于非本征过程而引起的。

这些相互矛盾的实验结果表明,光击穿的详细机理至今并不完全清楚。实验数据的差异还没有合理的定标准则能加以解释。而且,这些实验基本上都是在毫微秒或更长的脉冲持续期下取得的。而在微微秒脉冲作用下,自聚焦、包裹物等非本征因素的影响有一些不同的特点,而这方面的实验数据却是相当少的。

我们用 YAG:Nd 被动锁模激光器作为

收稿日期: 1982年4月7日。

辐照光源,入射功率远低于自聚焦临界功率;采用球面象差基本上可以忽略的短焦距透镜聚焦高斯光束,用显微镜观察了破坏格位。实验阈值强度的统计分布表明,具有最高阈值电场的格位是本征击穿,而具有较低阈值强度的格位是由非本征的杂质击穿所致。

二、实 验

本实验采用一台被动锁模的 YAG:Nd 激光器作为辐照光源。实验装置如图 1 所示。激光器腔内加一 F-P 标准具可使脉宽由 20 微微秒展宽为 100 微微秒。

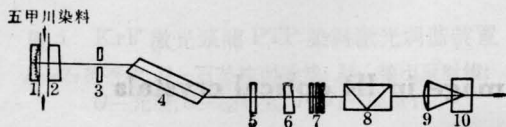


图 1 测量损伤的实验装置示意图

- 1—全反射镜; 2—染料盒; 3—光阑; 4—YAG 棒;
5—F-P 标准具; 6—输出镜; 7—衰减片; 8—可
变衰减器; 9—透镜; 10—晶体

从输出镜出射的光束为 1.064 微米的一个 TEM_{00} 模脉冲序列,其能量为 5 毫焦耳(主脉冲为 1 毫焦耳)。输出脉冲的脉宽(FWHM)为 20 微微秒(如图 2 所示)和 100 微微秒(加 F-P 标准具)。输出端光束直径为 2 毫米,输出脉冲的空间强度接近高斯分布,光束经衰减器衰减后用短焦距透镜聚焦于样品之内。所用的衰减器包括一组滤波片和一个可变衰减器,可变衰减器上刻有刻度,实验前用灵敏卡计校准。在我们的实验条件下,光束穿过可变衰减器(角度为零时)和透

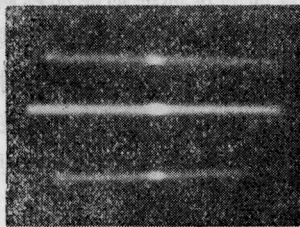


图 2 脉宽为 20 微微秒,白线全长
对应 300 微微秒

镜的透过率 $\beta \approx 0.86$ 。

被研究的材料是 KCl、NaCl 和 KBr 单晶,样品皆磨制成 $25 \times 25 \times 5$ 毫米的方块。为减小样品表面的残余吸收,要对样品进行严格的光学抛光。实验中样品系放在一个 $x-y$ 方向可调节的调整架上,以确保入射光线垂直于样品表面。为防止潮解,放上样品后应立即用红外灯烘烤。每种晶体选用两个样品。每个样品都测定 64 个数据点。

损伤测量系在暗室中进行。激光脉冲用短焦距($f=3$ 厘米或 $f=2$ 厘米)透镜聚焦于样品内约 2 毫米处,从侧面刚能观察到微弱的火花即断定为出现击穿。实验采用 N 对 1 测量法进行测量。即从某一较低的辐照能量密度开始,然后逐渐增大辐照量(每次递增 10%),直到刚能以 1/2 的几率出现击穿火花时为止。

损伤阈值电场是通过测量损伤能量而计算出来的。对于本实验所用的高斯光束,总能量 Q 由焦平面的能量密度 $\varepsilon(r)$ 给出

$$Q = \int_0^{\infty} \varepsilon(r) 2\pi r dr \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2Q}{\pi\omega_0^2} \quad (2)$$

式中 ε_0 是沿轴向的峰值能量密度。 ω_0 是沿轴向的最小光斑半径,

$$\omega_0 = \frac{f\lambda}{\pi a} \quad (3)$$

式中 f 为聚焦透镜的焦距, λ 为入射波长, a 为入射到透镜上的光斑半径。所以损伤时的功率密度(即沿轴线的峰值强度)为:

$$I_{\max} = \frac{2Q}{\pi\omega_0^2 t_p} \quad (4)$$

式中 Q 与入射到透镜上的总能量 Q_{in} 有关。在我们的实验中 $Q = \beta Q_{in} \approx 0.86 Q_{in}$ 。

经过计算可以得到 I_{\max} 所对应的均方根阈值电场 E_{rms} :

$$E_{rms} = 19.41 \left[\frac{I_{\max}}{n} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中 n 为样品的折射率; I_{\max} 用瓦/厘米²为单位, E_{rms} 用伏/厘米为单位。

表1 几种红外材料的本征损伤阈值

材 料	脉 宽 t_p (微微秒)	最小光斑 ω_0 (微米)	总 能 量 Q (微焦耳)	峰值强度 I_{max} (瓦/厘米 ²)	阈值电场 E_{rms} (兆伏/厘米)
NaCl	20	10.16	8.68	2.68×10^{11}	8.12
	100		17.34	1.07×10^{11}	5.13
KCl	20	10.16	6	1.85×10^{11}	6.86
	100		14.01	8.65×10^{10}	4.70
KBr	20	10.16	5.31	1.64×10^{11}	6.32
	100		9.91	6.12×10^{10}	3.86

我们所测量的 KCl、NaCl 和 KBr 晶体结果列于表 1。

三、讨 论

1. 自聚焦作用

虽然自聚焦不是透明介质中光与物质之间的一种损伤相互作用，但是自聚焦作用能引起光束缩小，从而使沿轴向的光强增加，并通过某种机理(如雪崩电离或多光子吸收)造成材料损伤。因此，在存在自聚焦作用时，得到的损伤阈值将不是材料的本征击穿阈值，而是自聚焦作用的一个测量值。因此，在损伤实验中必须消除自聚焦的影响。我们以远低于 P_{cr} 的功率入射便可使自聚焦的影响减到最小。

自聚焦临界功率可以写为：

$$P_{cr} = c\lambda^2 / 32\pi^2 n_2 \quad (6)$$

式中 c 为光速， n_2 为介质的非线性折射率。

在自聚焦作用不可忽略时，沿轴向的最大强度为：

$$I_d = (P/A)(1 - P/P_{cr})^{-1} \quad (7)$$

式中 P 为原来的入射功率， $A = \pi\omega_0^2$ ，上式可改写为：

$$P^{-1} = I_d^{-1} A^{-1} + P_{cr}^{-1} \quad (8)$$

我们用 $f_1 = 2$ 厘米， $f = 3$ 厘米的两个透镜测量了击穿功率 P_1 和 P_2 。然后，以 P^{-1} 为纵轴， A^{-1} 为横轴作图，将得到一条直线。该直线与 P^{-1} 轴的截距将给出自聚焦临界功

率的倒数 P_{cr}^{-1} ，由斜率可求得相应的击穿电场强度。并可通过(6)式给出 n_2 。

三种晶体在 20 微微秒下的 P_{cr} 和 n_2 列于表 2。

表2 三种红外晶体的自聚焦临界功率和非线性折射率

材 料 参 数	KCl	NaCl	KBr
n_2 (esu)	1.51×10^{-13}	1.25×10^{-13}	2.15×10^{-13}
P_{cr} (兆瓦)	0.71	0.86	0.50

2. 包裹物的影响

由于原料中总会含有一些杂质以及生长气氛的污染和配料中引入了粉尘等原因，晶体中或多或少总有一些包裹物。如果包裹物中的杂质可以吸收激光，那么包裹物就会被激光束加热，造成包裹物的熔化并伤及周围的晶格。这时的损伤强度也不是材料的本征损伤强度，而是这种特定的包裹物的损伤强度(一般说来比本征强度低得多)。这些包裹物通常是金属粒子并具有较高的热导率和呈球形形状。造成包裹物损伤的激光强度为：

$$I_0 = \left(\frac{4C_0 D \Delta T_c}{3\epsilon_\lambda M} \right) \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1 - \exp(-Dt_p/R^2)} \right) \quad (9)$$

式中 R 是包裹物的半径； C_0 是比热； ϵ_λ 是光谱发射率； D 是基质的热扩散率； ΔT_c 是基质中产生损伤所需要的温升； M 是考虑包裹物衍射而引入的修正因子(对 $R \geq \lambda/20$ 的包裹

物, $M=1$)。

从方程(9)我们可以看到,对一定尺寸的包裹,在某一脉宽的光脉冲作用下,损伤程度有一最小值, R 与 t_p 满足如下关系:

$$R \approx 0.9(Dt_p)^{1/2} \quad (10)$$

这意味着短脉冲比长脉冲更容易损伤小的包裹物,因此,在毫微秒脉冲作用下不易出现损伤的小包裹物在微微秒脉冲作用下可能容易损伤。由于我们所用的晶体用 80 毫瓦的 He-Ne 激光观察除个别点以外基本上没有大的散射颗粒,所以,可以推断,亚微观尺寸的包裹物造成的损伤是主要的。

在目前的工艺条件下,要得到完全没有亚微观包裹物的晶体是困难的,从这个意义上讲,真正的本征实验还无法进行。但是,从统计的观点看,包裹物的分布是随机的,它们之间还有一定的间距。只有当光束直径与包裹物的平均间距差不多时,包裹物的损伤几

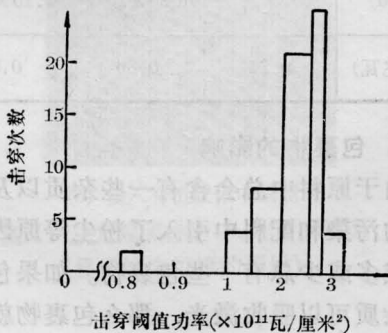


图4 NaCl 晶体中击穿阈值的分布图

率才是高的。从我们所测定的大量的数据点来看,大部分格位损伤阈值是接近的(见图4),只有个别点较低,甚至低一个量级。因此,我们认为这些高阈值的格位是本征损伤,那些特别低的损伤是亚微观包裹物产生的损伤。

3. 与脉宽的关系

从表1给出的结果看。损伤阈值随脉宽增大而减小。在100微微秒下,损伤阈值比20微微秒要低1~1.6倍。考虑到本实验所用器件能量起伏低于20%,这显然不是由于实验误差所致。

虽然目前在损伤阈值的定标方面还没有一致的结论^[4],但是损伤阈值随脉宽增大而减小已为很多实验所证实。我们的实验结果也证实了这一点。

长春光机所崔风柱同志为本实验提供了样品,本所陈绍和同志在实验工作中大力支持,钟永成先生,张守都同志给予很多帮助,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Eli Yablonovitch; *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**, 495.
- [2] D. W. Fradin et al.; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, 700.
- [3] Yoshiyuki Yasojima et al.; *Jap. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**, 815.
- [4] H. E. Bennett et al.; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, 2375.

(上接第294页)

参 考 文 献

- [1] A. Lempicki et al.; *Scient. Amer.*, 1967, No. 6, 81~90.
- [2] Н. Е. Алексеев и др.: *Неорг. матер.*, 1973, **9**, №2, 239~242.
- [3] H. Winston et al.; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, No. 1,

- 143.
- [4] F. W. Quelle, Jr.; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 4, 633.
- [5] 石春山,吕玉华;《激光》,1978, **5**, No. 5~6, 111.
- [6] E. P. Riedel et al.; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 7, 2720~2725
- [7] AD-710813.
- [8] С. С. Бапанов; *Структурная рефрактометрия*, Изд. МГУ, 1959.