

白宝石晶体的激光损伤

孙 阳 李成富 张 强 郭聚平

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要: 测量了 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.53\ \mu\text{m}$ 激光对温梯和提拉法生长的白宝石晶体的表面和体损伤阈值, 分析了各种因素对损伤的影响, 讨论了不同的损伤机理。

关键词: 激光损伤, 白宝石

Laser induced damage in sapphire crystals

Sun Yang, Li Chengfu, Zhang Qiang, Guo Juping

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

Abstract: In this paper, we have measured the surface and the bulk damage thresholds' in Czochralski-and Stockbeger-method-grown sapphire crystals under $1.06\ \mu\text{m}$ and $0.53\ \mu\text{m}$ laser irradiation. We also analyses the factor which affects the damage, and discuss the different damage mechanisms.

Key words: laser damage, sapphire

一、引 言

作为激光窗口和衬底材料, 白宝石晶体具有广泛的用途。同时掺 Cr, 掺 Ti 宝石也已被证明是优良的激光基质材料。在激光器件中, 元件的激光损伤是最令人头疼的问题之一。各元件的抗损伤能力无疑是一个重要的参数, 也是元件质量好坏的重要标志。因此研究白宝石晶体的激光损伤具有很现实的意义。同时也可以通过它加深对于晶体损伤机理的认识。我们进行了两种方法生长的白宝石晶体的损伤实验, 并分析了造成损伤的原因。实验结果表明白宝石的体内损伤主要是自聚焦作用引起的, 由此而生的局部热膨胀和电离所产生的应力场使晶体炸裂。表面损伤则是由于杂质吸收引起的等离子体发射而形成损伤斑点。在体内和表面都发生了熔化。激光波长、晶体的杂质水平、工艺过程等都可能对损伤产生影响^[1]。

二、实验和样品

用机械方法加工的提拉法(Czochralski)和温梯法(Stockbager)白宝石, 表面用金刚石研磨膏抛光。用两级放大调 Q Nd:YAG 激光器产生 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.53\ \mu\text{m}$ 基模激光, 脉冲宽度

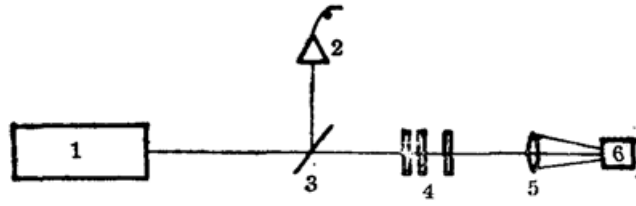


Fig. 1 Experimental set-up for laser damage

1—Nd:YAG laser; 2—energy meter; 3—beam splitter; 4—attenuator;
5—lens; 6—sample

为 10 ns。光束聚焦后对晶体样品打靶。用读数显微镜观察和判定激光作用后损伤的情况。实验装置如图 1 所示。实验后用 Normarski 显微镜仔细观察损伤斑点, 分析损伤形貌, 推断激光作用的物理过程。

本实验中均为激光自 O 面垂直入射样品。采用 1-on-1 的方法。即一个位置辐照一次, 不管该位置是否损伤都换一个位置继续实验。损伤阈值定义为损伤几率达 50% 时的相应能量密度。

三、结果与讨论

两种白宝石晶体的损伤几率测量结果如图 2, 由图中我们可以得出如下结果:

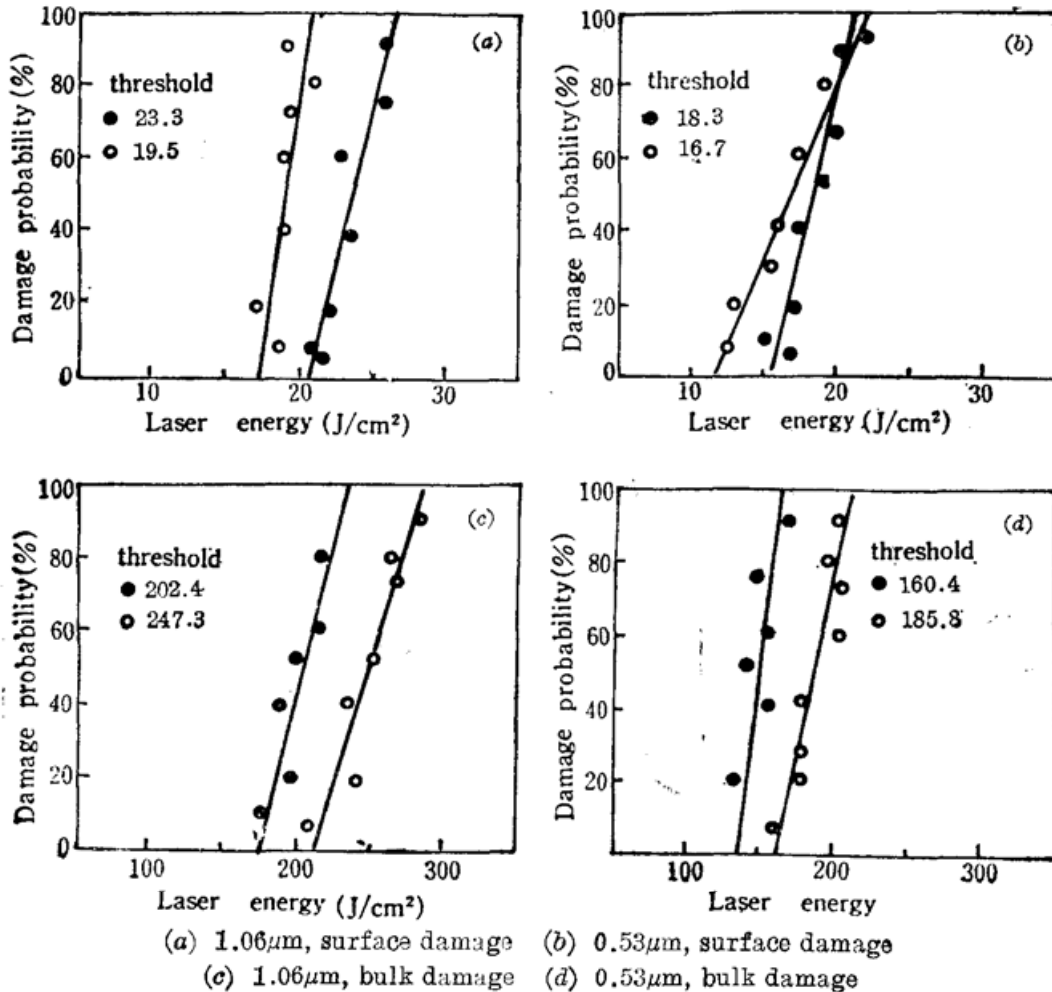


Fig. 2 Damage probability versus laser energy density

●—Ozoehralski ○—Stockbager

1. 损伤机理分析

由图 2 可见, 白宝石晶体的体损伤阈值比表面损伤阈值高出很多。结合损伤形貌(如图 3)可推测白宝石的体损伤主要是热应力破坏。一般地说, 热应力的产生可能来自两个方面。一是晶体中存在杂质以及局部不均匀等成为吸收中心。这些杂质颗粒接受激光能量后熔化, 体积迅速膨胀产生张应力。这种吸收中心以金属颗粒对损伤的影响最为显著。二是晶体本身局部吸热后来不及扩散引起的局部热畸变或局部电离后等离子体膨胀产生的应力。由于白宝石的热导率较大, 热传导速度快, 因而纯净的白宝石体破坏阈值可以很高(当然这里的“纯”只是相对而言。事实上完全“纯净”的晶体是不存在的)。在我们的样品中, 金属颗粒等杂质较少。从统计的观点来看, 造成白宝石体损伤的主要原因是晶体内的自聚焦效应形成局部过强的光电场引起雪崩击穿, 进一步的热膨胀和电离所产生的应力场使晶体炸裂。图 4 是体损伤斑点的侧向照片, 可明显地看出自聚焦的损伤轮廓。

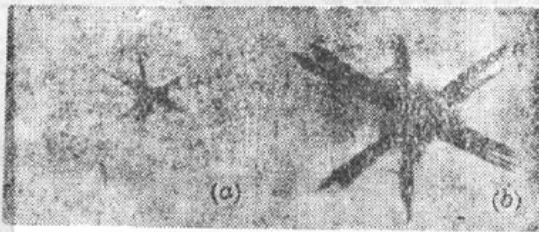


Fig. 3 Bulk damage morphology: front
(a) 0.53 μm , (b) 1.06 μm

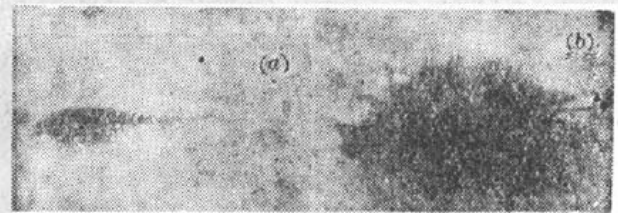


Fig. 4 Bulk damage morphology: side
(a) 0.53 μm , (b) 1.06 μm

1.06 μm 和 0.53 μm 的损伤形貌具有相似的结构。不同的是 1.06 μm 的损伤斑点一般比 0.53 μm 时大。这是因为 1.06 μm 激光光斑大, 而且损伤阈值高。因而所产生的热应力场也更强, 使得晶体的破裂范围也更大。

表面的情况比较复杂。由于在表面抛光过程中引入了许多缺陷、微裂纹, 以及包含在其中的抛光磨料, 再则表面因暴露在空气中又极易吸附空气中的杂质、水蒸气等而造成污染, 这些都引起表面阈值的下降。我们在实验中注意到表面损伤总是伴随着等离子体闪光的出现, 这表明在激光辐照点产生了电子雪崩击穿。而杂质和缺陷吸收起了主要作用。图 5 是白宝石的表面损伤斑点照片。其中有明显的熔化和喷溅的痕迹。表面损伤阈值大大低于体损伤阈值, 是由于杂质吸收使得晶体表面在大大低于本征损伤阈值的能量下就已造成破坏。Bloembergen 曾指出块体材料的表面损伤阈值可比体阈值降低 2~100 倍^[2], 我们的实验结果证实了这一点。

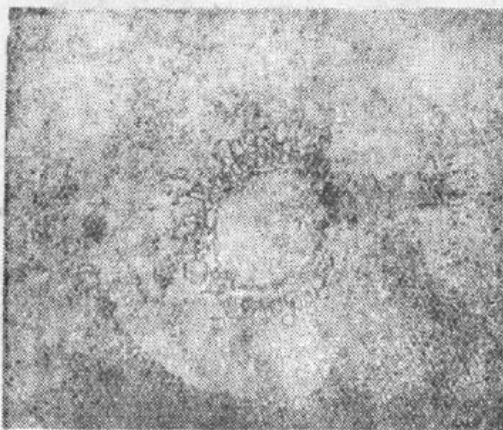


Fig. 5 Typical damage morphology
on sapphire surface

所以, 如果用化学或物理方法对晶体表面再抛光, 除去表面的机械损伤层后, 其损伤阈值就可能提高。我们的另一项工作给出用上述方法可使掺 Ti 宝石表面损伤阈值提高 3 倍左右^[3]。又从热力学的观点来看, 晶体被激光照射后, 热量自辐照中心向各个方向传播。而白宝石的热导率较大, 表面的热辐射与热传导相比可以忽略, 所以当激光聚焦于表面时, 热量可认为只向半无限空间传播, 故其热扩散速度应比体内慢约一倍。从而表面损伤与体损伤阈值也应由此

有一倍的差异。再考虑到晶体对激光的路径吸收及表面吸附污染的影响等因素,可见体损伤阈值比表面损伤阈值高 6~10 倍是完全可能的。这个推测也和我们的实验结果相符合。

2. 波长效应

由图 2 中还可看到白宝石晶体在 $0.53\ \mu\text{m}$ 时的损伤阈值比在 $1.06\ \mu\text{m}$ 时低,表明白宝石损伤中存在明显的波长效应。我们测量得到 $0.53\ \mu\text{m}$ 时晶体的吸收比 $1.06\ \mu\text{m}$ 时稍大,而非线性系数可能在短波长时有更多的增加。

3. 生长工艺对损伤的影响

对于不同方法生长的晶体。由图 2 中可见体损伤阈值是温梯法比提拉法高,而表面阈值则有相反的结果。如前所述,由于表面的情况复杂,我们认为体损伤的情况应更准确地反映了晶体质量的好坏,所以就我们所用的样品来看是温梯法的质量应比提拉法稍好。图 6 是两种样品的缺陷蚀坑照片,可见温梯法样品的位错密度比提拉法小得多,故而可以推测晶体中的缺陷可能在损伤过程中起了作用,也表明温梯法生长的白宝石质量确是稍好一点。但若对这两种生长方法的优劣作出评判还需要更多的数据,只凭一两块样品的结果尚不足以这样的结论。

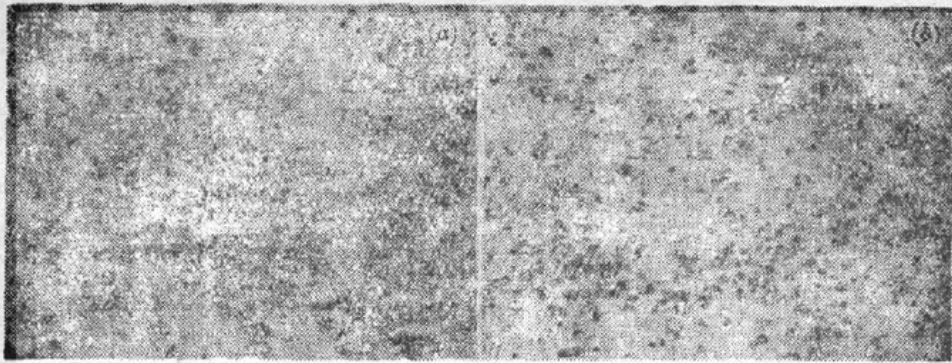


Fig. 6 Photograph of defect etch-pit in sapphire crystal
(a) Stockbager, $D=6\times 10^4/\text{cm}^2$; (b) Czochralski, $D=3.5\times 10^5/\text{cm}^2$

参 考 文 献

- 1 S. O. Seitel, L. G. Deshazer, Laser Induced Damage in Optical Materials, 18th ASTM Symposium
- 2 N. Bloembergen, *Appl. Opt.*, **12**, 661(1973)
- 3 张 强, 邓佩珍, 孙 旻, 中国激光, 待发表