

# 高功率密度激光辐射效应

郭振华 许德胜

(华中理工大学激光技术实验室)

**摘要:** 本文描述了在高功率密度激光辐射下, 光与物质之间的相互作用机理和实验装置, 讨论了强光束自陷现象和受激布里渊散射效应, 实验观察了某些材料的破裂与损坏现象, 初步分析了实际发生过程的原因, 给出了一些实验资料。这些对于防止激光器件、光学系统损坏以及大气传输等有一定参考价值。

## Effect of high-power laser radiation

Guo Zhenhua, Xu Desheng

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

**Abstract:** This paper discusses interaction between laser and transparent-material after the laser-beam irradiated on the model-target. Analyzed several damage-factors of the model-targets. The experimental-set and photos of model-targets are given.

### 一、引言

高功率密度激光辐照各种物质时产生的现象已被许多人观察到并进行了一些研究。我们可以把这些研究大致分为:

1. 强激光束与不透明物质的相互作用, 即物质表面层吸收光子而引起的各种效应。例如非相变加热; 激光熔化; 激光汽化; 以及冲击波的产生等等。

2. 脉冲强激光与固体物质相互作用产生物质粒子发射, 其中包括电子发射; 离子产生; 中性分子发射; 等离子体产生; 带电粒子发射等。

3. 强激光与气体物质相互作用使其击穿。人们已研究了击穿的开始与发展, 火花的辐射和亚毫秒激光脉冲引起的击穿; 在金属蒸汽和惰性气体中的击穿现象。

4. 强激光与透明物质的相互作用, 在一定阈值上, 会引起器件的损坏, 伴随着这些已观察到了光束自聚焦和受激布里渊散射等现象, 并对这种相互作用的机理进行了探索, 提出了激波(或冲击波)效应、多光子吸收效应、高温微区等离子体效应、压力波效应等等, 并

具体报导了红宝石、钕玻璃等激光棒被破坏的实例。

本文主要研究高功率密度CO<sub>2</sub>激光束与透明物质间的相互作用，第一批实验研究是针对各种玻璃样品，例如K<sub>9</sub>玻璃、氟化钙（CaF<sub>2</sub>）玻璃、硅酸盐玻璃等脆性材料，在连续波CO<sub>2</sub>激光束（或脉宽约为2~3s的长脉冲CO<sub>2</sub>激光束）作用下的碎裂、爆裂、热熔等等情况，

## 二、理 论

对应强激光与物质相互作用的各种不同情况，可以用不同的理论模型加以解释。当然提出的理论模型都是在一定的假设条件下才成立的，所以都各自具有一定的局限性。但它们毕竟给我们指出了—个定量讨论问题的方向。

1. 对于非相变加热过程，如果样品足够厚，则可看作在z方向半无限样品，那么在z=0表面附近可得热流的微分方程是：

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) - \frac{1}{k} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = - \frac{A(x, y, z, t)}{K} \quad (1)$$

式中，T是样品上不同位置(x, y, z)和不同时间t的温度；k是热扩散率，K是热传导率；A是不同位置、不同时间单位体积单位时间内的热量。

如果样品是圆对称的，则可看作z方向的一维问题来处理，在数学上要简化许多，并能得出某些可与实验对比结果，例如表面的温度变化可表示为：

$$T(0, t) = (2F_0/K)(Kt/\pi)^{1/2} \quad (2)$$

式中，F<sub>0</sub>是表面的吸收函数。

2. 强激光作用下的粒子发射，最重要的是多光子吸收导致的光电子发射，对于激光产生的双光子吸收光电流I可以得到下边的理论公式：

$$I = 5.60 \times 10^{21} \frac{e^5 h^{1/2}}{m^{5/2} c^{11/2}} N F^2 \lambda^{7/2} f(A, B) \quad (3)$$

式中，B = φ/E<sub>f</sub>；A = hc/λE<sub>f</sub>；f是由A、B的线性组合平方根构成的函数；φ是材料的功函数；E<sub>f</sub>是费米能级；N是自由电子密度；λ是光波长；F是光子密度；c是光速；m是电子质量；e是电子电荷；h是普朗克常量。

对于离子辐射，可用Richardson-Smith公式计算出正离子热发射电流I<sub>+</sub>为

$$I_+ = A_p T^2 e^{-\phi/kT}$$

式中，A<sub>p</sub>是常系数；φ<sub>p</sub>是正离子功函数；k是玻耳兹曼常数。

3. 强激光作用下的气体击穿是一个十分惊心动魄的有趣现象。人们从等离子体羽的观察中已有一些认识，但要定量研究这种现象并不容易。目前由高压惰性气体（例如Ar）进行观测得到的结论是：光击穿阈值在其他条件不变的情况下，与聚焦区域大小有密切关系，聚焦区域越小，击穿的阈值越大，呈反比关系变化，这充分地表明了聚焦区外的损耗作用。例如对于5.2 × 10<sup>4</sup>Torr的Ar气体，聚焦尺寸A由0.4mm变化到0.01mm时，击穿阈值由10<sup>9</sup>W/cm<sup>2</sup>升高到4 × 10<sup>10</sup>W/cm<sup>2</sup>而A的大小可规定为：

$$\frac{1}{A^2} = \left( \frac{4.8}{D} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \quad (4)$$

式中,  $D$ 是等效柱形体聚焦区的直径;  $L$ 是等效柱形体聚焦区的长度。

4. 强激光与透明物质相互作用的理论模型主要有:

A. 光自陷 (或自聚焦)。为了产生自聚焦, 当光束截面半径为  $r$  时功率  $P$  必须满足:

$$P = (\pi D^2/4)(n_0 E^2 c/8\pi) = \pi r^2 n_0 c \left( \frac{E^2}{8\pi} \right) \quad (5)$$

如果透明物质的折射率  $n$  与聚焦区电场强度  $E$  的关系满足:

$$n = n_0 + n_2 E^2 \quad (6)$$

则考虑到衍射损耗  $(1.22 \frac{\lambda}{D})$  因子以后, 可得:

$$P \geq (1.22\lambda)^2 c/64n_2 \quad (7)$$

B. 对于受激布里渊散射, 其阈值照射  $F_c$  为

$$F_c = 8Bce^2 \alpha_i \alpha_j / \gamma^2 K_i K_j \quad (8)$$

式中,  $B$  是物质的容积;  $\epsilon$  是介电常数;  $\alpha_i, \alpha_j$  是对应波长的吸收系数;  $K_i, K_j$  是对应的波数;

$\gamma = \rho \cdot \frac{d\epsilon}{d\rho}$ ;  $\gamma$  是电致伸缩系数;  $\rho$  是介质密度。

### 三、实 验

实验的原理方框图如图 1 所示。其中激光器输出的光束质量至关重要, 最好能控制在  $TEM_{00}$  模或低阶模  $TEM_{01}$ 、 $TEM_{10}$  为佳。国际市场上的千瓦级  $CO_2$  激光器商品多工作在低阶模, 而万瓦级激光器则是多模工作, 要得到良好的光束质量比较困难。如果采取一些限模手段, 那么在改进光束质量的同时则可能以牺牲光功率输出为代价。图中的测量系统可以实时给出光束功率和模式分布的数据, 显示在荧光屏上 (图 2), 并可在计算机上打印出来。为了保持在一定范围内激光稳定输出, 图中控制系统可根据反馈信号自动调节放电激励电参数, 在必要时则需更新循环气体和调整热交换系统。在不关掉激光器的情况下, 气动开关可以把强激光束改变  $90^\circ$  方向射入铸铁吸热腔内, 由高速冷却水把废热带走。

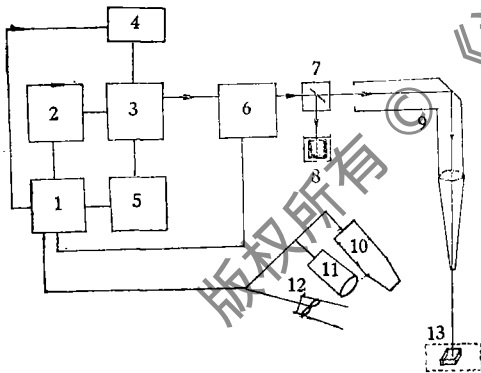


图1 实验原理方框图

- 1—控制系统 2—放电激励系统  
3—激光器腔体 4—(激光介质)供气系统  
5—热交换系统 6—测量系统  
7—气动开关 8—吸光散热体 9—导光系统  
10—摄影机 11—照明  
12—吹风 13—样品盒

导光系统能把低阶模光束聚成  $1.0\text{mm}$  左右的光斑, 因此在  $10\text{kW}$  器件上有可能达到  $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$  的功率密度。摄影装置则记录下样品物质与强激光相互作用时的瞬态变化过程以利于作进一步分析。样品安置可以考虑:

a. 标准情况 ( $P = 1P_0$ ,  $T = 300\text{K}$ ) 下的自由状态;

摄影装置则记录下样品物质与强激光相互作用时的瞬态变化过程以利于作进一步分析。样品安置可以考虑:

a. 标准情况 ( $P = 1P_0$ ,  $T = 300\text{K}$ ) 下的自由状态;

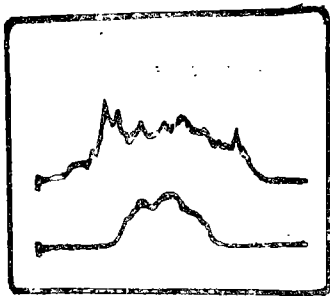


图2 高功率激光束断面  
光强分布

- b. 自由状态下置于真空盒中；
- c. 预先加温至设计温度；
- d. 施加应力于样品上，使其处于特殊状态。

值得特别注意的是，测量系统测得的功率大小是激光束刚从激光器出来时的数值，而真正会聚到样品上去的激光功率必须打个折扣。因为在激光束通过反射镜、透镜时的吸收损耗和衍射损耗有时会相当可观，特别是镀金反射片或半导体透镜的镀层受到污染时，问题更为严重。因此，在正式试验以前必须检查导光系统的光学质量和准直情况，及时清洁镜面（或更换镜片）以及消除偏离造成的误差。表1给出了一组典型的测量数据， $W_1$ 是激光器出光功率， $W_2$ 是会聚到样品上的功率， $n$ 为系统的传输系数。

表1 导光系统的传输性能

$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n$	结 论
387	320	0.83	反射镜损伤
990	780	0.79	透镜污染
1035	980	0.95	正 常

对应于 $\phi 30$ 的靶片，光功率变化分为：1.0kW、2.5kW、5.0kW、7.5kW、10kW多档，分别聚焦成 $\phi 15$ 、 $\phi 3\sim 5$ 和 $\phi 2$ 的光斑，以期得到光功率密度 $\rho = 10^3 \text{W/cm}^2$ ， $10^4 \text{W/cm}^2$ ， $10^5 \text{W/cm}^2$ 和 $10^8 \text{W/cm}^2$ 。

#### 四、讨 论

强激光破坏机理至今虽有不少研究，但是由于各种具体条件和环境的差异，尚有许多问题并未搞得很清楚。现在我们分五个方面进行一些初步的探讨（全部样品靶标都暴露于室温下一个大气压的环境中）。

A（图3）：当强激光一射向靶面，样品立即炸碎，且碎片飞向十多厘米的远方，就象被铁锤打碎的一样，我们认为有点类似机械应力的作用，很可能就是在受激布里渊散射过程中，产生出了许多激波声子，迅速达到了一定的强度之后，在声波（弹性机械波）振动作用下，样品立即炸碎成小块状飞向各方。

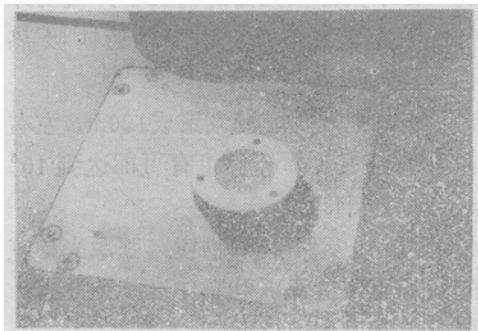


图3 声波（或声子）炸裂样品

B（图4）：当强激光射向靶面之后，样品在延迟一小段时间后，碎裂，在光斑作用区裂纹密度高于周围密度。这可能是一种热碎裂现象，由于样品材料中的微小缺陷，首先成为吸热的中心点，导致热胀冷缩的严重不平衡，很高的温度梯度值就可能使脆性物质破裂，而形成的热等离子体微区也将产生热冲击波，使样品破裂。

C（图5）：当强激光照射到靶面上时，仅在样品被光斑辐照的区域二次发射出明亮的散射光，

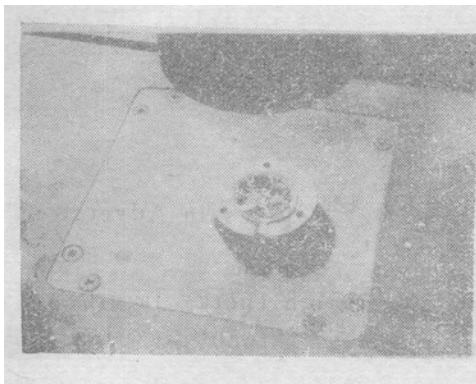


图4 热效应和等离子体激波碎裂样品

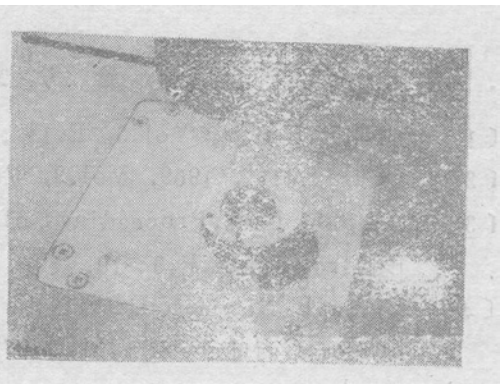


图5 热熔化

且样品被高温熔化。这表明此种材料具有很强的吸收作用，且迅速发生相变，由固相转化成液相。而光斑以外的区域并不破裂。

D (图6):当强激光照射到靶面上时，样品碎裂，且光斑作用区被烧熔击穿，这可能是激光照射下电子崩坍，强电场加速自由电子，产生出离子和更多的自由电子；致使局部过热产生相变而熔化成小孔，同时产生的热冲击和机械波亦使样品碎裂。

E (图7)：当强激光照射到靶面上时，样品很快碎裂，但并未飞出，因此它可能是一种介乎A组与B组之间的情况。在激波声子破坏样品的同时，材料的吸收使声波能量不可能达到极大，吸热产生的效应叠加在同一样品上，因此样品温升较高。

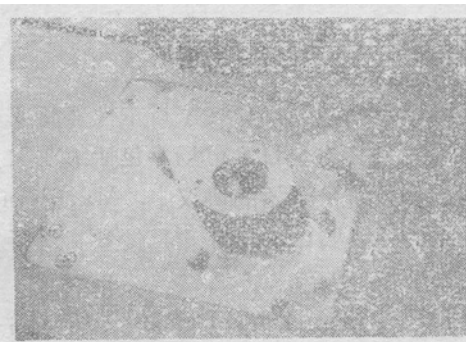


图6 电子崩坍局部过热破坏样品



图7 声子、等离子体激波与热效应共同破坏样品

由以上的分析，我们可以得出初步的结论。利用现有的设备，加上高速摄影分析动态过程，我们就可以仔细研究感兴趣的样品材料，在各种不同激光波长和激光功率密度作用下的破坏阈值。

由于破坏阈 $DT$ 和激光脉冲长度 $t_p$ 有一定关系，一般对于脉宽小于 $1\text{ns}$ 的激光脉冲有 $DT \propto \sqrt{t_p}$ 。例如通过压缩手段得到的准分子紫外激光脉冲，当 $t_p > 1\text{ns}$ 时，例如 $\text{ms}$ 量级甚至连续波激光时，则破坏阈和脉宽间的依赖关系变得不甚紧密。我们的实验都是属于这一类型，所以 $DT$ 与 $t_p$ 间的关系为

$$DT \propto t_p^n, \quad n \ll 1/2 \quad (9)$$

如果能设法将连续强光束改造成脉冲光（例如 $\text{ns}$ 量级或 $\mu\text{s}$ 量级），则破坏阈值将会下降许多。在真正的实际应用中，要有效地击碎靶标，若能采用 $\text{ns}$ 量级的强光脉冲，将会十分有利。

## 参 考 文 献

- [1] A.P.L., 1964, Vol.5, P.137.  
[2] JETP Lett., 1969, Vol.9, P.61.  
[3] Michael Bass, Proceedings of the SPIE 121, Optics in Adverse Environments, P.6~10.  
[4] Brian E Newman, DOE-NBS workshop on high energy laser optics, Gaithersburg, MD. 1979, Aug. 2~3.

\* \* \*

作者简介: 郭振华, 男, 1937年出生。副教授, 激光技术重点实验室副主任。1980~1982年在美国Rice大学量子学研究所合作研究准分子激光。从事激光物理和强激光特性研究及教学工作。

许德胜, 男, 1963年出生。助教。从事强激光大气传输与破坏机理研究。

收稿日期: 1989年5月17日。

· 简 讯 ·

### 相干公司和光谱物理公司更换日本的销售代理商

相干公司宣布它的激光产品分部(LPD)同Marubun公司签约使这家日本代理商成为所有LPD产品在日本的唯一代理人。现在, Marubun公司将在全日本市场〔包括工业和原设备制造厂(OEM)市场〕代理LPD。在早些时候, 由4月份开始的协议中, Marubun公司仅是科仪市场的代销商, 而由另一家公司(Rikei公司)在日本的工业和原设备制造厂市场销售LPD产品。目前的变动消除了市场上双重代理引起的混乱。

同时, Rikei公司宣布终止了与相干公司LPD的协议。从1988年11月1日起, Rikei公司负责日本的所有商业市场, 而光谱物理K.K.公司则继续负责政府和教育机构市场。

译自L.F./E.-O., 1988, Nov., P.12.

卢中尧 译 封鸿渊 校

## 更 正

光学薄膜的各向异性折射率(本刊1989年Vol.13, No.3, P.35)的作者张伟来信, 该文中公式(12)(见该期第38页)应更正如下:

$$N^4 - (n_2^2 \sin^2 \psi + n_1^2 \cos^2 \psi) N^2 - (n_2^2 - n_1^2) \sin^2 \theta_0 \\ \cdot \sin 2\psi \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta_0} - (n_2^2 - n_1^2) \sin^2 \theta_0 \cos 2\psi = 0$$

因作者抄稿时的疏忽, 造成以上失误, 审校编加也未查出, 特此更正, 请读者原谅。

本刊编辑部