第36卷 第3期 物 理 学 报 Vol. 36, No. 3
1987 年 3 月 ACTA PHYSICA SINICA Mar., 1987

# 强脉冲 $CO_2$ 激光对红外材料的破坏现象

王春奎 方慧英 傅裕寿 李淑英
(中国科学院力学研究所)
李惠宁 吴占林 刘淑英 梅 华
(北京电子工程总体设计部)

1986 年 4 月 21 日收到

**提 要**

实验表明强激光对红外材料的破坏分为两种类型：烧蚀和冲击破坏. 在空气中，光功率密度低于大气的光学击穿阈值时，以烧蚀为主. 超过击穿阈值时，冲击破坏是主要的. 在我们的实验条件下，用强激光辐照红外脆性材料的靶，靶极易产生微裂纹或粉碎性破坏，其破坏效果与激光的脉冲能量、功率密度、脉冲宽度，以及着靶面积有关. 为了直观，文中给出了不少辐照损伤的照片.

## 引 言

强脉冲激光辐照靶，当激光脉冲前沿部分的光功率密度高到使靶汽化时，蒸气从靶面喷出；同时，改变了靶前区大气对激光的透明度，跟着辐照来的激光脉冲的能量，更多地被大气吸收，并演变为光学击穿；击穿区对光几乎变为不透明，后续激光脉冲使击穿现象更进一步发展，击穿区迅速猛烈膨胀、扩大，在逆激光束方向构成一个圆柱形明亮的等离子区，形成激光维持爆震波；激光被炽烈的等离子体屏蔽，照不到靶上，直到激光脉冲功率密度降到不足以使击穿维持为止. 整个过程伴随着巨大的声响. 这都是在一个瞬间完成的. 时间虽短，过程却十分复杂，靶前区的各种波过程以及它们的传播速度的变化等，我们已作了报道[1-3]，波与靶的作用，又引起了一系列的力学效应[4-6]，炽烈的等离子体又有高温的影响等等，这一切最后都表现为对靶的破坏. 本文是脉冲激光在大气中，对红外材料引起的破坏现象的实验研究. 文献[5]的资料指出，从力学破坏的角度，达到同样的冲击破坏作用，在大气中几乎比在真空中所需的激光功率密度小一个数量级. 这是很有意义的.

强脉冲激光对靶的冲击破坏，是一个动态力学性质问题，不仅与激光功率密度 $I$ 有关，还与脉冲宽度 $\tau$，单脉冲能量 $W$，以及着靶面积 $S$ 有关系. 它们并不能简单地用 $I=\frac{W}{\tau S}$ 一个参数说明. 但如何用这些参数表征激光破坏机理问题，建立理想的理论模型，目前还有待于深入研究. 希望本文能为此提供一点有用的信息.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 小能量小光斑

我们用一台双放电 TEA 脉冲 $CO_2$ 激光器，对 KCl 以及 n 型锗进行了辐照实验，能量在 1 焦耳左右，多模输出，脉冲光波形如图 1 所示。

光学抛光的 KCl 片子厚 5 毫米直径 40 毫米，用直径 1—6 毫米的光斑辐照，功率密度在 $10^6$—$10^8$ 瓦/厘米$^2$间变化。当激光的功率密度达到 KCl 的破坏阈值及其以上时，在靶入射光的背面，发现很多纵横交叉规则的微裂条纹，如图 2。

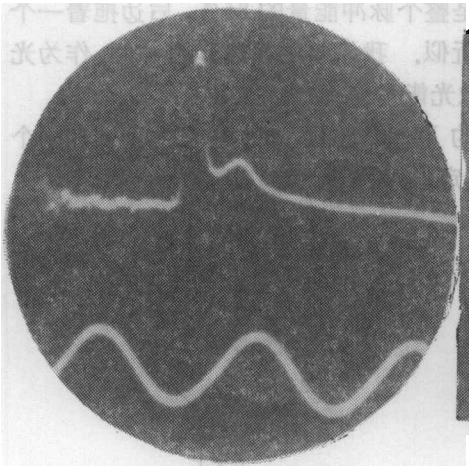

图 1　双放电脉冲 $CO_2$ 激光波形
正弦波是 500 千周时标信号

图 2　KCl 被辐照后的显微照片

在高功率密度情况下，靶片内部有击穿现象。这时，在靶片正对入射光斑背面，由显微观察发现有微区的粉碎及熔化现象。如图 3。

用 1 焦耳左右的能量，在 $10^6$—$10^8$ 瓦/厘米$^2$功率密度范围内，对抛光的 n 型锗辐照发

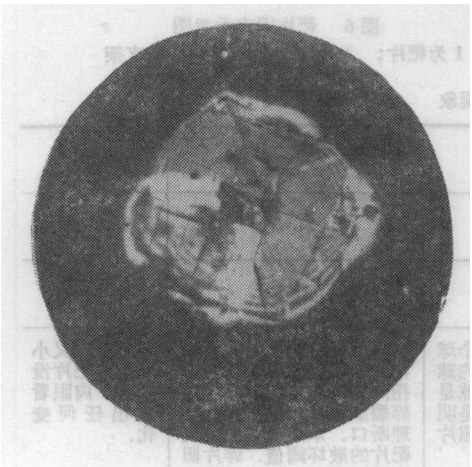

图 3　KCl 被高功率密度激光辐照后放大 25 倍的显微照片

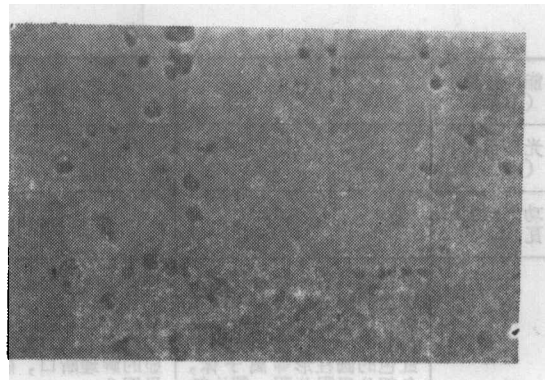

图 4　被 $4\times10^6$ 瓦/厘米$^2$功率密度的激光辐照后的 n 型锗片放大 25 倍的显微照片

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现，当达到或超过 n 型锗的破坏阈值时，靶片前总有强烈的光学击穿现象，在靶片的背光面出现与图 2 相似的微裂纹．当光的功率密度降到低于破坏阈值时，光学击穿现象或没有或很弱，这时在靶面上可以观察到很多亮"星星"．在显微镜下观察靶片入射光一面，发现有星星点点的熔化烧坑，而入射光斑的背面无任何变化．图 4 是 n 型锗靶片在 $4\times10^6$ 瓦/厘米$^2$功率密度下辐照结果显微照片．

## 大能量大光斑

用一台多模输出的电子束脉冲 $CO_2$ 激光器作光源，光脉冲波形如图 5．它的前沿很陡，波形的前部近似直线下降，这部分的能量大约是整个脉冲能量的 86%，后边拖着一个近 4 微秒的尾巴．波形的主体可用一直角三角形近似．我们取主体部分的半宽，作为光脉冲的宽度，约为 1.2 微秒．实验中，我们使用的激光能量约 40 焦耳．

靶片是经光学抛光的直径 16 毫米、厚 2 毫米的 $MgF_2$ 红外材料．将靶片安放在一个环形支架上，在光束入射面的边缘用白胶布略加固定，如图 6 所示．

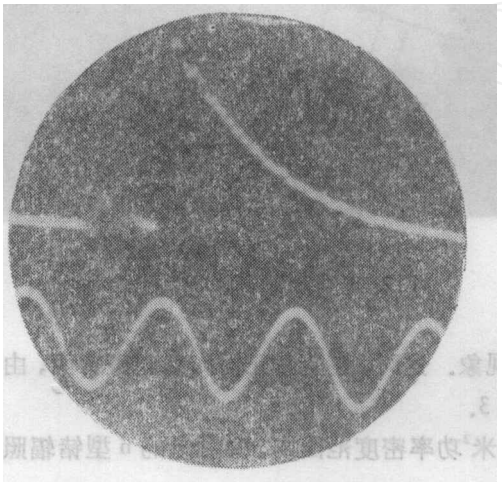

图 5 电子束 $CO_2$ 脉冲激光波形
正弦波是 500 千周时标信号

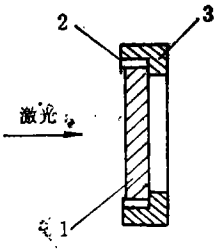


图 6 靶片固支示意图
1 为靶片； 2 为白胶布； 3 为环形支架

表 1 辐照条件及现象

| 能量（焦耳） | 33.4 | 36.8 | 36.8 | 38.3 |
|---|---|---|---|---|
| 光斑直径（厘米） | 0.74 | 1.51 | 2.32 | 2.62 |
| 功率密度（瓦/厘米$^2$） | $6.5\times10^7$ | $1.7\times10^7$ | $7.2\times10^6$ | $5.9\times10^6$ |
| 现象 | 靶前约有 3 厘米长的击穿区明显地分为前后两部分，近靶区是白亮的圆柱形等离子体，远靶区是橙红色的圆柱形等离子体，各部分界限分明．靶片粉碎是明显的解理断口．碎片照片见图 7． | 击穿区明显分为两个球形等离子体，近靶区的球是白亮的，远靶区的球是橙红色的．靶片粉碎是明显的解理断口，碎片照片见图 8． | 击穿现象明显减弱，击穿区呈一"山"字型，山峰指向光束入射方向．靶片碎裂成四块，是明显的解理断口．本条件参数构成靶片的破坏阈值．碎片照片见图 9． | 击穿区又小又弱，靶片没有碎．肉眼看不出任何变化． |

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我们用 $10^6$—$10^8$ 瓦/厘米$^2$的功率密度，以大于或近于靶片直径的光斑进行辐照实验，部分结果及现象见表 1.

为直观将 $MgF_2$ 靶片拍成照片，图 7 至图 9 分别是被功率密度为 $6.5\times10^7$ 瓦/厘米$^2$，$1.7\times10^7$ 瓦/厘米$^2$与 $7.2\times10^6$ 瓦/厘米$^2$的激光辐照后的碎片拍摄的照片. 从照片可见，$1.7\times10^7$ 瓦/厘米$^2$功率密度下破碎最严重. 该情况下，入射光斑与靶的直径相近.

激光辐照后没有碎的靶片，用肉眼直观观察不出有什么变化，用日产 IR 440 红外分光光度计测量 2—8 微米范围内的透过率，与辐照前的测量结果比较，其值仅降低了 1%.

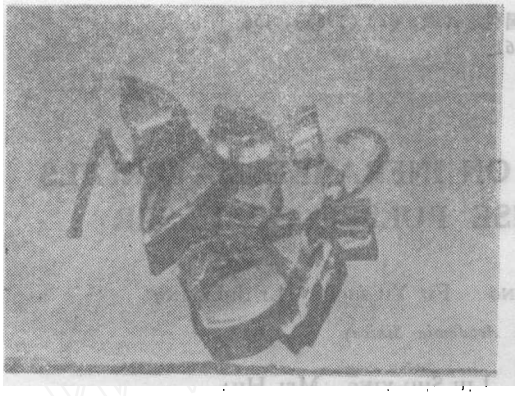

图 7　$MgF_2$ 被 $6.5\times10^7$ 瓦/厘米$^2$功率密度的激光辐照后被击碎的碎片照片

图 8　$MgF_2$ 被 $1.7\times10^7$ 瓦/厘米$^2$功率密度的激光辐照后被击碎的碎片照片

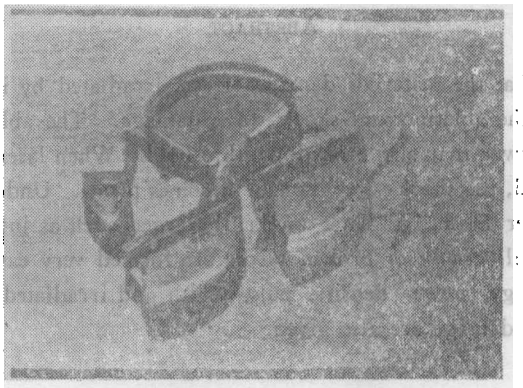

图 9　$MgF_2$ 被 $7.2\times10^6$ 瓦/厘米$^2$功率密度的激光辐照后被击碎的碎片照片

## 力 学 分 析

靶片前形成的激光维持爆震波，其波阵面传到靶面，对靶面形成一应力脉冲，此应力脉冲传入靶内，当它到达靶的对面时，发生波的反射，形成一个对靶端面的拉伸波，对靶端面相应有拉应力，这是产生冲击破坏的主要原因.

在大光斑大能量情况下，$MgF_2$ 靶片入射光的背面，正是受到这一拉应力的作用. 由

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

于靶的边缘被环形支架支固，拉应力分解为向支点方向的分力．$MgF_2$ 是脆性材料，它的抗拉强度很小．靶受到这分力的拉伸，产生微裂纹，并很快扩展，以致达到破碎．

在小光斑小能量情况下，由于靶片受到近似集中载荷，拉应力的强度尚不够大，弯矩小且持续时间也短，靶片仅在入射光的背面产生微裂纹．

## 参 考 文 献

[1] 傅裕寿、夏生杰、王春奎、吴宝根，物理学报，**29**(1980)，500.
[2] 夏生杰、王春奎、傅裕寿、吴宝根、方慧英、周光地，物理学报，**31**(1982)，397.
[3] 傅裕寿、王春奎，四川激光，**4**(1983)，174.
[4] 王春奎、傅裕寿、李惠宁，激光，**9**(1982)，48.
[5] 周大正、沙国河、杨德政、王振岐、白吉玲、张存浩，中国科学A辑，(2) (1985)，156.
[6] 傅裕寿、王春奎、范良藻，力学与实践，(2) (1980)，61.

# THE DAMAGE PHENOMENA ON INFRARED MATERIALS IRRADIATED BY INTENSE PULSED $CO_2$ LASER

WANG CHUN-KUI FANG HUI-YING FU YU-SHOU LI SHU-YING
*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*

LI HUI-NING WU ZHAN-LIN LIU SHU-YING MEI HUA
*(Beijing Designing Division for Electronic Engineering)*

ABSTRACT

Experiments show that the materials damage effects irradiated by intense $CO_2$ laser can be divided into two types: the ablation and shock wave damage. The ablation is dominant when laser power density is lower than air breakdown threshold. When laser power density is higher than berakdown threshold, the shock wave damage becomes prime. Under our experimental condition, when strong laser beam irradiates on brittle targets such as infrared window materials $MgF_2$, KCl, Ge, etc., small cracks or broken pieces are formed very easily. The damage effects are related to pulse energy, power density, pulse width and irradiated area on the target. The photographs of radiation damage are also given.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net