

# Q 开关激光束在材料中产生冲击波的物理机理研究

周业为 曾传相 杨守智 谢健

(四川大学物理系)

**提要:** 以 Q 开关红宝石脉冲激光瞬态加热压电陶瓷表面上的银膜, 研究了激光在吸收材料中产生冲击波的物理机理。分析所产生的电信号表明, 激光产生冲击波的物理机理有两类: 一是热冲击, 它起源于弹性样品表层快速吸收激光脉冲能量所造成的热膨胀和巨大的应力梯度; 另一是机械冲击, 它起源于迅速蒸发与膨胀的高温蒸气对样品表面所施加的压力。

## Investigation on physical mechanism of shock waves in materials generated by Q-switched laser beam

Zhou Yewei, Zheng Chuanxiang, Yang Shouzhi, Xie Jian

(Department of Physics, Sichuan University)

**Abstract:** Using a Q-switched ruby laser pulse to cause a transient heating of silver film on the surface of a piezoelectric ceramic sheet, the investigation on the physical mechanism of laser generated shock wave in absorbing materials has been performed. It is shown from the analysis of the obtained electrical signals that there are two types of physical mechanisms for laser generated shock waves: one is the thermal shock, which is due to the thermal expansion and the giant stress gradient following the rapid absorption of laser pulse energy at the surface layer of an elastic specimen; the other is the mechanical shock, which is due to the rapidly vaporizing and expanding of the high temperature vapor which exerts a pressure on the target surface.

### 一、引言

高强度脉冲激光辐照吸收材料时, 会在其内部激起强的机械冲击波。近些年的研究表明, 高强度激光所产生的大冲击应力, 有

可能超过材料的虎克弹性限度, 引起材料位错的较大改变, 从而改变材料的力学性能。因此, 如何在材料内产生高强度冲击波并用其来改善材料力学性能, 已成为引人注目的研究课题<sup>[1~3]</sup>。

收稿日期: 1983年5月31日。

## 二、实验装置

图1是我们的实验装置示意图。叶绿素D调Q红宝石脉冲激光器输出的激光脉宽约30毫微秒,单脉冲功率~10兆瓦。用透镜聚焦激光于样品表面,通过改变焦距或透镜位置来调节作用光功率密度。聚焦光斑的最小面积约 $10^{-3}$ 厘米<sup>2</sup>,峰值功率密度可达 $10^{10}$ 瓦/厘米<sup>2</sup>量级。激光调Q时,一般产生单脉冲,但泵浦较强常为多脉冲。

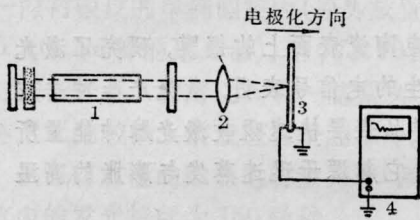


图1 实验装置示意图

1—叶绿素D调Q的脉冲红宝石激光器; 2—聚焦透镜( $f=30$ 毫米); 3—表面为银膜的压电陶瓷片; 4—示波器SBM 14

为了方便起见,我们用银膏烧结在压电陶瓷片表面上的、厚度约10微米的银膜作靶。脉冲激光辐照银膜所产生的冲击波传入压电陶瓷片内,就会由正压电效应而在样品的两表面电极间产生电压信号。因此,银膜既是激光辐照的靶,又是压电信号的检测电极。

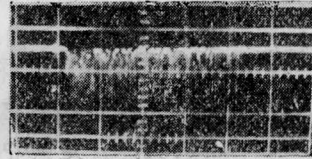
压电陶瓷片既是银膜的基垫,又是冲击波的检测元件。它是厚度为0.34毫米、直径为39毫米的薄圆片,其电极化方向平行于厚度方向,而电极面则与厚度方向垂直。实验时,由两根与表面电极相连的导线将样品悬于大气中,所产生的电信号由示波器SBM 14显示,其极性连结方式相应于样品受压缩力时显示正脉冲信号。

## 三、结果与分析

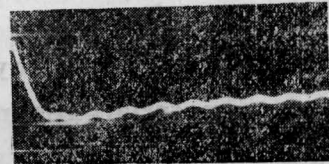
实验中所得到的结果,可归结为如下几

种情况:

(1) 用图2(a)所示的普通脉冲红宝石激光波形,在非聚焦情况下辐照靶时,只观察到图2(b)所示的负脉冲信号。它的前沿上升时间等于脉冲宽度,但其尾部持续时间可达10毫秒以上。通常情况下,电信号是光滑的,但在作用光较强时尾部会出现频率较低(~3千赫)的衰减振动。将这种激光聚焦作用于靶时,所观察到的电信号波形也与此相似,不过会造成样品表面破坏甚至被穿孔。



(a) 普通脉冲红宝石激光振荡波形(脉冲能量: 2焦耳;时标:0.2毫秒/格)



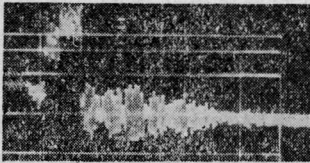
(b) 能量为2焦耳的普通脉冲红宝石激光在未聚焦情况下辐照样品所产生的电信号(时标:0.5毫秒/格;幅标:0.5伏/格)

图2

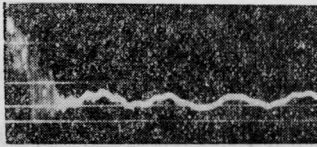
显然,这种负脉冲电信号是由样品吸收光,从而由热膨胀产生热应力压电效应及热释电效应所致。信号的前沿相应于激光使样品加热而引起热膨胀;信号的尾部相应于激光停止作用后热应力及热释电的衰减,因而同样品的力学性质、热学性质及表面电极电容有关。由于普通脉冲激光脉宽大(~0.8毫秒)而导致信号前沿上升较缓,而压电陶瓷散热性差导致信号尾部持续时间较长,衰减较慢。电信号尾部的振动是由激光在材料中激起的应力波所致,而热释电及缓慢变化的应力则造成基底负信号。由于脉冲作用时间长,温度梯度及温度变化速率小,故只激起样品的低频固有振动模式。

(2) 将样品表面银膜的一部分涂黑漆或

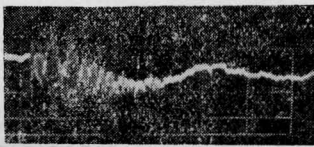
墨汁以增大表面对光的吸收,并将调Q脉冲激光聚焦( $f=30$ 毫米)作用于这区域,当调Q脉冲激光能量达 $\sim 0.5$ 焦耳时,观察到图3(a)所示的典型电信号。它的最前部为幅度较低、持续时间较短的负振荡信号,随后变为具有小尖峰结构、持续时间 $\sim 100$ 微秒及幅度较高的正信号;信号尾部持续时间较长,幅度较低,并由较规则的成组小尖峰构成。



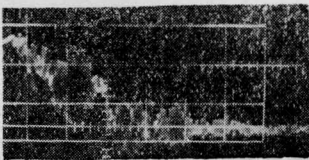
(a) 激光辐照银膜上黑色涂层位置(时标:0.1毫秒/格;幅标:0.5伏/格)



(b) 同样的激光辐照银膜(时标:0.2毫秒/格;幅标:0.5伏/格)



(c) 将(b)情况的时标扩展到0.1毫秒/格



(d) 将(b)情况的时标扩展到30毫秒/格

图3 调Q脉冲红宝石激光辐照样品所产生的电信号

这种电信号比较明显地反映了激光在样品中产生冲击波的物理机理。当样品表面涂黑位置受到巨脉冲激光辐照时,样品实际上受到两类不同的作用:一是激光瞬态加热表面上的黑色涂层,产生急速蒸发、膨胀的高温蒸气,后者对靶表面施加一个很大的反冲压力,在样品中形成应力及应力波,产生正振荡

信号。激光也使它先前产生的高温蒸气加热、离化,在样品表面附近形成急剧膨胀的高温等离子体,它既削弱激光对样品的作用,也对靶进一步施加压力;另一类是激光及高温等离子体热辐射对靶的加热作用。由于巨脉冲激光主要是产生和加热靶表面附近的等离子体,对样品加热作用较弱。从激光作用的末期起,所形成的高温等离子体将以其热辐射使靶进一步加热<sup>[1]</sup>。根据上述作用,考虑到调Q激光脉冲通常是双峰或三峰(它们幅度不同,间隔为 $30\sim 50$ 微秒,参看图3(b)前沿),就可对图3(a)所示波形作如下分析:

最先的那个脉冲子峰,主要使样品表面加热,由热膨胀应力波引起的负振荡信号占优势,从而信号的起始部分是负的。随之而来的第二、三个脉冲子峰,使光照处已被加热的黑色涂层急剧蒸发、离化,对样品产生强的反冲机械压力及较弱的热作用,从而由压缩冲击波产生的正振荡信号与热膨胀应力波产生的负振荡信号迭加,最终出现较为复杂的正振荡信号。由于此正信号涉及到反冲力形成的压缩振荡,故其持续时间( $\sim 100$ 微秒)比作用激光脉宽( $\sim 30$ 毫微秒)大得多,但比由热应力波形成的信号尾部要短得多。

由于激光辐照时间很短( $10^{-8}$ 秒级),所产生的温度梯度及温度变化速率极大,故会在压电陶瓷片中激起较多的频率较高的振荡模式。在此情况中,调Q脉冲激光真正用于使样品本身加热的较少,故信号尾部幅度较低。

(3) 将同样的调Q脉冲激光辐照该样品表面净银膜位置时,则出现图3(b)所示情况。它完全是负振荡信号,因而不是压缩力而是膨胀力所致。脉冲信号的前沿由多脉冲激光造成的几组不同幅度的振荡构成,每组均上升很陡。信号尾部是由一些频率较高的振荡迭加在基本的低频信号上构成,其幅度比图3(a)中的尾部大几倍。

负信号的前沿陡自然是由激光加热时间极短所决定,而信号尾部则同激光产生的极大热应力梯度与变化速率密切相关。鉴于我们所用的调 Q 脉冲激光在吸收材料中所产生的温度梯度可达  $10^6$  度/厘米,温度变化速率可达  $10^{10}$  度/秒<sup>[4]</sup>,这种极强的瞬态冲击,必将在靶中激起较多的振动模式,它们通常是线性迭加在一起。由于用在使靶表面蒸发的激光能量较少,用于瞬态加热靶的光能较多,故所产生的负电信号比图 3(a)尾部幅度较大。在此情况中无正信号出现,表明光压和蒸气的反冲压的作用甚微。

(4) 更值得注意的是,将图 3(b)前面的高频振荡部分通过扩大时标而展开,就可得到图 3(c)、(d)那样的电信号波形。按照文献[5],在分界面为真空或气体的自由表面上可传播表面波,其中最常遇到的是瑞利表面波。这种波与体内波不同,它既非纵波又非横波,而是二者的迭加。由于产生瑞利波的质点振动轨迹是个椭圆,这将导致压电陶瓷片的厚度随时间按椭圆规律变化,从而产生电信号振幅的桃核形分布。银膜对光的吸收主要限

于很薄的表层,并随深度增加而指数式下降,由此造成的巨大热应力梯度会激起表面波。

#### 四、结 论

综上所述, Q 开关脉冲激光在弹性光吸收材料中产生冲击波的物理机理有两类:其一,激光瞬态加热材料时,在靶表层造成巨大的温度梯度及温度变化速率,由热膨胀应力引起冲击波;其二,激光辐照材料时,会产生瞬态的机械冲击压力。激光对靶表面的光压,激光产生的表层高速蒸发物的反冲压,激光使表面附近的等离子体加热膨胀而对表面产生的压力,均会构成这种机械冲击应力。

#### 参 考 文 献

- [1] J. F. Ready; "Effects of high-power laser radiation", Academic Press (1977).
- [2] A. H. Clauer, B. P. Fairand; "Applications of Laser in Materials Processing", Ed. by E. A. Metzbowser, p. 291 (1979).
- [3] W. F. Bates; *ibid*, p. 317 (1979).
- [4] J. F. Ready; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, 462.
- [5] 山东大学压电物理教研室; 《压电陶瓷及其应用》, 山东人民出版社 (1974).

(上接第 368 页)

面镜的不平度造成两光束间的光程差,会造成误差。本实验采用了国内生产的高精度平面镜,其平面度为  $\frac{\lambda}{20} \sim \frac{\lambda}{30}$ 。

4. 激光器本身频率的不稳定性对精度的影响

造成激光器频率变化的外部因素主要有温度影响、振动影响和大气的影晌,内部因素有管内所充气体的成分比例、放电电流以及由于原子自发辐射所造成的无规则噪声。

在不加任何稳频措施的情况下, He-Ne 激光器频率稳定度  $S = \frac{\Delta\nu_D}{\nu} = \frac{1.5 \times 10^9}{4.7 \times 10^{14}} = 3 \times 10^{-6}$

因为  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{\nu}$ , 所以  $\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{\Delta\nu}{\nu}$   
 $= \lambda \cdot 3 \times 10^{-6} = 1.898 \times 10^{-6}$  微米。

以 25 线光栅为例,

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{P}, \quad \cos \theta \, d\theta = \frac{1}{P} \, d\lambda, \quad d\theta = \frac{d\lambda}{P \cos \theta}$$

$$\text{取 } \Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{P \cos \theta} = 4.75 \times 10^{-8} \text{ 度}$$

$\Delta\theta$  很小, 所以不加稳频的普通氦-氖激光器在本实验中不影响测量结果, 这也是本实验的一个重要优点。

工作中得到清华大学周炳琨副教授、廖延彪副教授的指导和帮助。李瑞宁同志参加了部分工作。在此致以谢意。