

激光透过汞层的机理分析

张贵芬 方洪烈

(中国科学院上海光机所)

我们曾发表了部分有关汞透射激光的实验研究成果^[1]。这里再发表一些新的实验结果,同时对上述实验结果作一简单分析。

1. 新的实验结果

实验装置和条件均同参考文献[1]。输出的激光脉冲为宽度大约为 1.5 ms 的多尖峰结构,波长为 1.06 μm 。

透光阈值特性 对一定厚度的汞层,只有入射光功率和能量达到一定值时才能透光。透光阈值随汞厚度增加而增加。对于脉宽为 1.5 ms 的激光来说,1 mm 厚的汞层,阈值约为 18 J; 3 mm 厚的汞层约为 22 J。对于调 Q 脉冲来说则完全观察不到透射,而且很容易破坏液槽。

透光延迟效应 透过汞层的激光并不是随入射光束照射而瞬时发生的,而是相对入射激光脉冲有一时间延迟,这表明穿透一定厚度的汞层需要一定的时间。延迟时间与入射功率成反比,与汞层厚度成正比。透射光脉冲的宽度随入射功率的增加而变宽。透过脉冲同样为无规则尖峰结构。对于 28 J 的入射脉冲,1 mm 汞层的延迟时间约为 0.31 ms; 3 mm 汞层的延迟时间约为 0.9 ms。对于 3 mm 汞层,入射 22 J 时,延迟约 1 ms; 28 J 时约 0.9 ms; 35 J 时约 0.8 ms。实验中测量了透过的能量。对 1 mm 厚的汞层,输入 18 J 时透射约为 2.4 J,占 13%。对 3 mm 厚的汞层,输入 28 J 时透射约为 7.2 J,占 20%。这两个数据表明,随着入射能量的增加,透射所占的比例增大。

2. 机理分析

为解释上述结果包括参考文献[1]的全部实验结果,我们设想了一个透射过程。激光脉冲作用在液态汞的表面上,脉冲前沿被汞吸收。汞吸收激光后温度急剧上升直至汽化。汽化汞膨胀形成汞汽泡。由于汽化汞的密度很低(计算表明大约为 $9\sim 6\times 10^{-3}\text{g/cm}^3$),对激光的吸收与液态汞相比是很小的。于是汽态汞与液态汞的界面成为新的吸收面,继续吸收激光能量,进一步汽化。汽化汞不断膨胀,使整个汞层穿通,便可透射激光。这就是透光的物理过程。参见图 1。

下面对此作一定量的分析和计算。

激光加热金属到汽化所需要的时间 t_0 是^[2]

$$t_0 \doteq (\pi/4)(K\rho C/F^2)(T_v - T_0)^2, \quad (1)$$

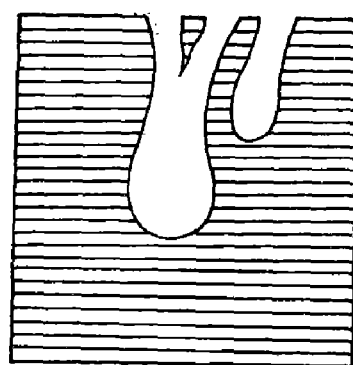


图 1 对汞镜表面的
高速摄影结果

(此图系根据拍摄速度为 62500
幅/秒的高速照片制得)

式中的 K , ρ , C 分别为材料的热导率、密度和比热, F 为入射激光功率密度, T_v 为汽化温度(一般为金属的沸点), T_0 为初始温度。公式(1)是对固态金属求得的。由于在金属汽化时,金属表面所受的是大气压力,对于盛于液槽内的液态金属来说,如果液槽上部是敞开的,金属在侧壁处汽化时,它所受到的压力仍然是大气压力,因此其汽化过程不会有大的差别。对于汞来说,有如下结果: $t_v \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{s}$, $F \sim 10^4 \text{W/cm}^2$, $t_v \sim 1.3 \times 10^{-6} \text{s}$, $F \sim 10^5 \text{W/cm}^2$ 。对于我们的实验条件来说, $F \approx 10^4 \text{W/cm}^2$, 大约 0.1ms 就可汽化。

严格说来这一问题,应该采用描写真实气体的范德瓦耳方程。但是当压力不是太大时,理想气体方程可以近似地适用。因此汽化汞的膨胀过程可以由如下气态方程^[3]近似描写:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT_0 \quad (2)$$

只要求出汽化质量就可以求出膨胀所占的体积。从膨胀体积扩展的速度可以确定透光的延迟时间。按能量守恒定律,汽化出 Δm 的汞所需要的能量为

$$\Delta m [C(T_v - T_0) + \xi] = SF\alpha\Delta t, \quad (3)$$

式中 ξ 为汞的汽化热, S 为照射面积, α 为汞的吸收系数, Δt 为加热时间。由式(2), (3), Δm 的汽化汞所占据的体积 ΔV 为

$$\Delta V = \beta\Delta m = \frac{\alpha\beta SF}{C(T_v - T_0)\xi} \Delta t. \quad (4)$$

其中 $\beta = RT/\mu P$ 为常数。不难求得厚度为 l 时穿透汞层所需要的时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{2[C(T_v - T_0) + \xi] l}{\alpha\beta F}. \quad (5)$$

于是从激光入射起到透光开始止的总的延迟时间 τ 等于

$$\tau = t_v + t_1 = \frac{\pi K\rho C(T_v - T_0)^2}{4F^2} + \frac{2[C(T_v - T_0) + \xi] l}{\alpha\beta F} = A/F^2 + B/F. \quad (6)$$

其中, A 与 B 是引入的两个参量:

$$\left. \begin{aligned} A &= \pi K\rho C(T_v - T_0)^2/4, \\ B &= 2l[C(T_v - T_0) + \xi]/\alpha\beta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

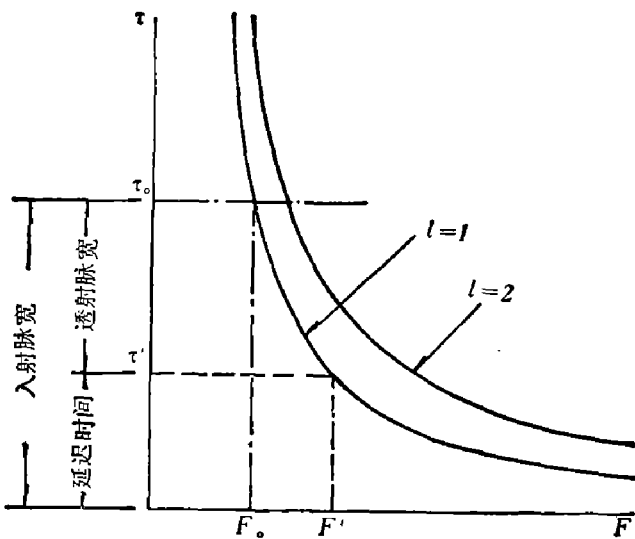


图2 延迟时间与入射功率的关系

式(6)可用图2表示。它可以用来解释“阈值特性”、“延迟效应”、和“脉宽特性”。图2中 τ_0 是入射激光脉冲的宽度。由它确定功率密度 F_0 , 当入射功率密度 $F' < F_0$ 时, 延迟时间 $\tau' > \tau_0$ 因此不能发生透射。这就是阈值特性的成因。从图上还可看出, 对于不同的汞层厚度, 具有不同的阈值。透射脉冲的宽度 $\Delta\tau$ 为

$$\Delta\tau = \tau_0 - \tau'. \quad (8)$$

上式表明, 当入射功率密度 F' 加大时, 延迟时间 τ' 减小, 透射脉宽 $\Delta\tau$ 加大。当入射功率密度比较大时, 式(6)中的第一

项可以忽略, 延迟时间 τ' 与汞层厚度 l 成正比, 与入射功率密度成反比。实验结果与此

一致。

当入射能量为 18J、脉宽为 1.5ms 的脉冲时,对 1mm 厚的汞层,计算得到的延迟时间为 1.4ms; 实验值约为 1ms。计算值和实验值之间的差别可能是由于汽化汞膨胀过程中的很大的随机性造成的。另外,用一个平均功率来代替多尖峰结构的激光脉冲也可能引进一定的误差。

参 考 文 献

- [1] 张贵芬、方洪烈,激光, 7(1980), 9, 54.
- [2] Ready J. F., *Effects of High-Power Laser*, New York: Academic, 1971, 101.
- [3] С. Д. 福里斯 А. В. 季莫列娃, 普通物理学(第一卷), 人民教育出版社, 1954, 236, 167.

(本文 1984 年 5 月 29 日收到,修改稿 1984 年 8 月 14 日收到)