

红宝石脉冲激光作用下水银镜片的透射光与反射光特性及其机理分析

曾传相 杨守智 周业为 杨光宁
(四川大学物理系)

提 要

研究了一般脉冲红宝石激光对水银镜片的作用。理论上预期,水银镜片的透射光及反射光特性,不仅取决于作用光强,而且还同水银镜片本身的内压密切相关,本文报导了所观察到的实验现象,并初步分析了其作用机理。

固态金属受到长脉冲或连续激光辐照时,光照区会因吸收强光而加热、熔化、电离、蒸发和溅射,使其受到永久性破坏,但是,只有在金属样品被强激光穿孔后,光才能有效地透过。由于水银兼有金属和液体的特性,故在强光作用下必然会呈现出与固态金属不一样的性质。过去曾报导水银镜在激光作用下的透射光问题^[1],从对其透射光机理的定性分析中,我们预期水银镜片的透射光及反射光特性会与水银的内压力有关,并在实验中得到证实。

一、实验装置及结果

实验装置如图1所示。其中一台装置是用作调节光路的是 He-Ne 激光器,用作光源的

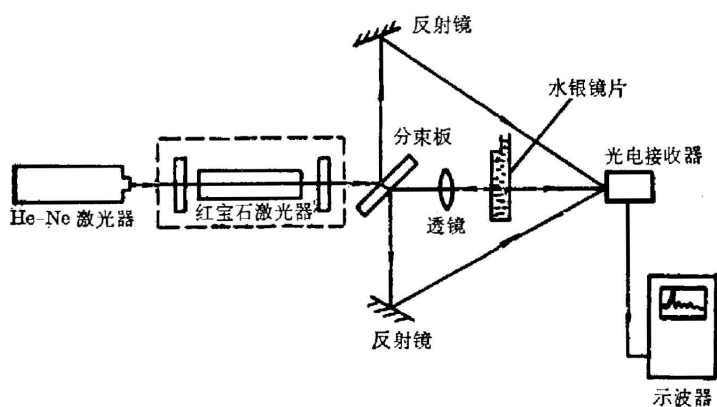


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

是一台普通脉冲红宝石激光器,其脉宽为 0.5~0.8 ms, 输出能量可达 5J, 该脉冲由许多小尖峰脉冲构成。分束板与两块转向反射镜相配合,使入射激光、反射激光以及透射激光的取样信号能进入同一个光电接收器,且可在示波器上观察各种光迭加在一起的波形,从而得以比较入射光、反射光和透射光的时间关系;为了增大作用光强,用焦距为 80 mm 的透镜将激光束聚焦于(两面均为 $\phi 20$ mm 的玻璃窗片,并充满水银的金属盒,水银厚度为 2 mm)水银镜片上。为了研究水银镜片透射光、反射光特性与水银内压力的关系,用软管使

收稿日期: 1983年5月4日; 收到修改稿日期: 1983年9月14日

水银镜片与一个能自由改变高度的、直径为 5 mm 的水银柱连通。在保持水银镜片位置固定不动的情况下,水银柱的竖直高度能从 110 cm 变到 196 cm。

实验中观察到如下现象:

(1) 只有在普通脉冲红宝石激光照射下,水银镜片才会有透光现象。用调 Q 巨脉冲红宝石激光照射时,只能在作用区的窗面上产生银白色雾状小斑,不会出现透光现象。

(2) 在水银镜片厚度及内压力一定时,存在着透光的阈值功率密度。对水银镜片厚度 $d=2\text{ mm}$, 水银柱高 1100 mm 及用 $f=80\text{ mm}$ 透镜聚焦激光的情况而言,使该水银镜片透光的最小脉冲能量 $\sim 0.12\text{ J}$ 。它相应的能量密度为 10^2 J/cm^2 量级,平均功率密度为 10^5 W/cm^2 量级。由于激光是由几十个脉宽为微秒级的小尖峰脉冲组成。故真正起作用的小尖峰功率密度比平均值高得多,约为 10^7 W/cm^2 量级以上。

(3) 在输入激光功率密度及水银镜片位置保持固定时,改变水银柱竖直高度,就可改变激光作用点处水银片的内压力。实验表明,水银柱高(即内压力大)时,水银镜片所透过的光比水银柱低(即内压力小)时弱。在偏离透光阈值功率密度不大时,此现象较为明显。图 2 表示输入能量一定时(即以同样脉冲激光辐照),水银镜片在不同内压力下的透射光波形,从中可看出它们有明显不同。图 3 表示水银镜片透射光与作用光能及内压力的关系。

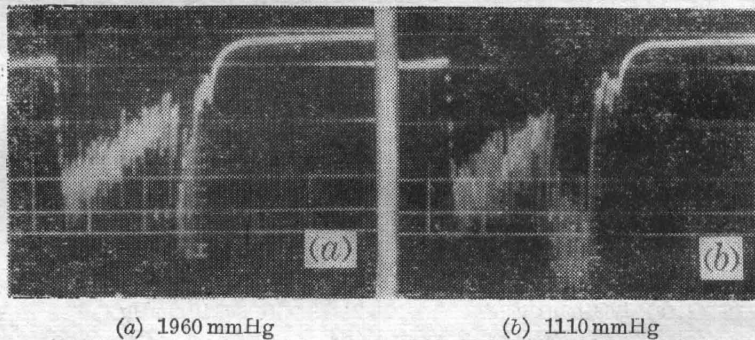


图 2 同样脉冲激光辐照下,不同内压力时水银镜片透射光波形(尾部高的那部分小尖峰)与输入波形(矮的小尖峰脉冲)的迭加
(脉冲激光能量: 1 J; 时标: 0.2 ms/div)

Fig. 2 Oscillograms of the superposition of the transmissive light (high spikes on the tail) and the input laser radiation (low spikes) for the mercury plate with different internal pressures irradiated by a pulsed laser beam
(pulsed laser energy: 1 J; time scale: 0.2 ms/div)

(4) 将输入的激光脉冲分束出一部分与透射光脉冲一起输入到同一光电探测器,就可观察到两种光迭加所产生的电信号。因两者的幅度有明显差别,故仍可区分出这两种脉冲。从图 2 可看出,透射光相应于激光脉冲的尾部,而激光脉冲的前部被吸收。

(5) 水银镜片的反射光系数也同激光能量及水银的内压力有关。图 4 表示不同内压力下水银镜片对激光脉冲的总反射率与激光脉冲能量的关系。从图 4 中可看出,在同样内压力下,水银镜片的反射率随作用光能的增加而减少。强光作用下的反射率比弱光($R\sim 80\%$)低得多。在同样的入射光强下,水银镜片内压力大时的反射率比内压力小时高。更应注意的是,内压力小时反射光脉冲波形是单调下降的,而内压力大时反射光脉冲尾部出现了反射增强的矮峰(如图 5 所示)。

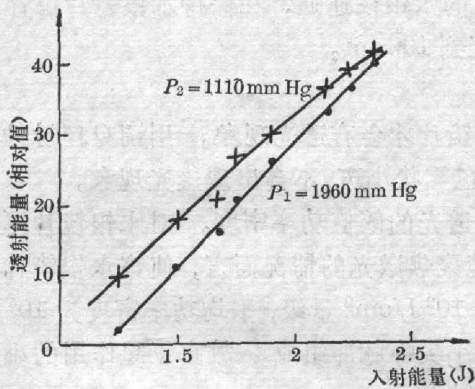


图3 不同内压力下水银镜片透射脉冲光能与入射脉冲激光能量的关系

Fig. 3 Dependence of the transmissive pulsed laser energy on the input energy for the mercury plate with different internal pressures

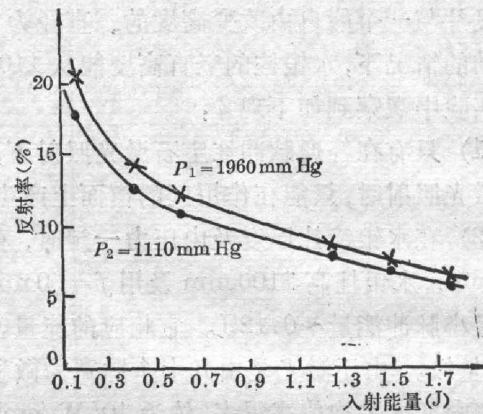
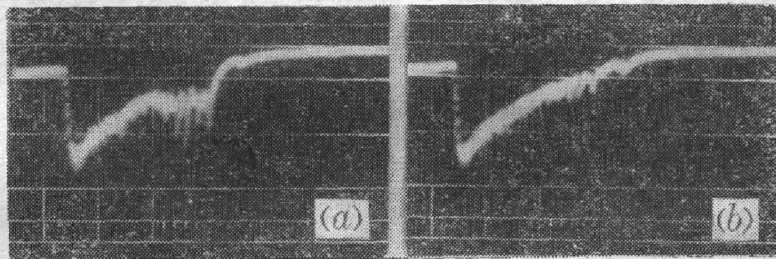


图4 不同内压力下水银镜片对激光脉冲的反射率与入射脉冲激光能量的关系

Fig. 4 Dependence of the laser pulse reflectivity on the input pulsed laser energy for the mercury plate with different internal pressures



(a) 1960 mmHg

(b) 1110 mmHg

图5 同样脉冲激光辐照下,不同内压力时水银镜片的反射光波形
(输入脉冲激光能量: 1.25 J; 时标: 0.2 ms/div)

Fig. 5 Signal oscillograms of the laser beam reflected on the surface of the mercury plate with different internal pressures
(input pulsed laser energy: 1.25 J; time scale: 0.2 ms/div)

二、机理分析

对于前述实验现象,我们用下述模型分析其机理: 固态金属板受到强光辐照时,在作用点处熔液快速蒸发的反冲力和热膨胀应力,会使熔液向外溅射,造成不能复原的小坑或小孔。然而,本实验中所用的是具有流动性的、处于密闭容器中的水银,在强光辐照下所产生的蒸气不能向外喷射,水银蒸气的膨胀力和反冲力,必然把作用点周围的水银推开(如图6所示)。只要激光入射处有足够的水银被气化,就可在水银镜片中冲开一个充满水银蒸气的透光小孔。不过,此小孔是不稳定的,在水银柱的内压力、水银蒸气冷凝作用及孔壁表面张力的影响下,水银的收缩作用使该孔倾向于复原。只有在水银蒸气的压力与水银的收缩力平衡时,该孔才能维持。

水银受聚焦激光作用区域为一个圆锥台,由于水银镜片薄而近似为圆柱体,使该区域水银完全气化所需激光能量 E_L 为^[2]

$$E_L \cong 4.18 S d \rho [C_p (T_2 - T_1) + L],$$

式中, S 为聚焦光斑面积 $\sim 10^{-3} \text{cm}^2$, d 为水银镜片厚度 $= 0.2 \text{cm}$, ρ 为水银比重 $= 13.6 \text{g/cm}^3$, C_p 为水银比热 $= 0.033 \text{cal/g} \cdot \text{deg}$, T_2 为水银沸点 $= 357^\circ\text{C}$, T_1 为室温 $= 20^\circ\text{C}$, L 为水银气化热 $= 69 \text{cal/g}$ 。

由此算出 $E_L \sim 0.9 \text{J}$, 而实际测得的透光阈值能量小于 0.2J 。这表明并非整个圆柱体的水银都气化, 只有约占圆柱体 $1/4 \sim 1/5$ 的、处于入射面附近的那部分水银被气化, 由其所产生的蒸气向圆柱体侧面和底部扩张而形成充满水银蒸气的小孔。

从上述模型, 就可对实验现象作如下解释:

(1) 在水银镜片的厚度及内压力一定时, 对一定脉宽的激光而言, 光照区的水银只有吸收一定激光能量后, 才能形成足以挤压出透光孔的蒸气, 因而存在水银透光的阈值功率密度, 此阈值无疑将随水银镜片厚度增大及内压力增高而变大。

(2) 从图 2 可看出, 激光脉冲的前部被水银所吸收, 产生挤压出透光孔的蒸气。水银柱高(即内压力大)时, 形成和维持小孔所需蒸气压高, 因而被吸收的激光能量多, 所透过的激光强度低而宽度窄。反之亦然。当入射脉冲激光强度偏离透光阈值较大时, 由于产生透射光所吸收的能量在整个脉冲能量中所占比例较小, 所形成的水银蒸气压也较大, 从而导致水银柱的压缩趋势相对减弱, 出现不同内压力下所透过脉冲能量差别减小的现象。水银镜片厚度和内压力一定时, 形成和维持透光孔的能量是一定的, 故入射光能增加所透射光能也随之增加。

(3) 在可见光区域水银对弱光的反射率约为 80% , 但在激光作用下由于水银气化及有光透射, 必然造成水银反射率的重大降低。对厚度一定的水银镜片而言, 在同样脉冲激光作用下, 内压力大时孔的收缩作用大, 形成透光孔的时间短, 导致水银镜片所反射激光能量较多, 而内压力小时情况正相反。也正是内压力大时透光孔的强收缩作用, 导致反射光脉冲尾部有小的凸峰出现。在水银镜片厚度及内压力一定时, 随着入射激光脉冲能量增大, 透光的时间增长, 从而光的反射率降低。

应指出的是, 调 Q 巨脉冲激光难以使水银镜片透光的机理, 类似于这种光辐照固态金属时的情况。也就是说, 这种光在表面附近产生的高温、高密度等离子体, 屏蔽了激光对水银的作用, 从而难以产生透光孔。

三、结 束 语

理论上预期, 强光作用下水银镜片的透光、反光性质与固态金属有着较大的不同, 前者与其内压力密切相关。我们的实验工作证实了这点。正是水银蒸气所挤压出的透光孔在内压力及冷凝作用下倾向于复原, 导致水银镜片的透光、反光性质同其内压力密切相关。

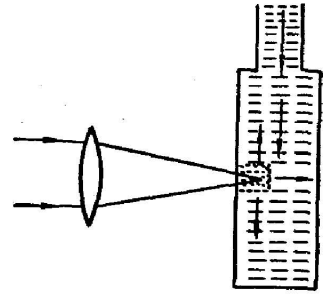


图 6 水银镜片透光原理图
Fig. 6 Schematic representation of the physical mechanism for the light transmitting through a mercury plate

原则上, 固态金属熔化后, 在强光辐照下也会呈现出类似于水银镜片的性质。本文所介绍的水银镜片透光、反光性质与内压力有关的现象, 有可能用于检测水银镜片所受的压力。

参加本工作的还有庾有康和谢健同志。

参 考 文 献

- [1] 张贵芬, 方洪烈; 《激光》, 1980, 7, No. 9 (Sep), 54.
[2] F. W. Sears *et al.*; 《大学物理学》第二册, (人民教育出版社, 1979), 22.

The characteristics of light transmission and reflection of a mercury plate under the action of a ruby laser beam and the analysis of its mechanism

ZHENG CHUANSIAN YANG SHOUZHI ZHOU YEWEI AND YANG GUANGNING

(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu*)

(Received 4 May 1983; revised 14 Septemeher 1983)

Abstract

The action of a normal pulsed ruby laser beam on a mercury plate has been investigated. It was predicted from qualitative consideration that its characteristics of light transmission and reflection depend not only on the light energy density but also on the internal pressure of the mercury plate. The front part of the acting laser pulse was absorbed and the transmission light corresponded to the pulse-tail. The phenomenon observed in our experiments is helpful to interpret the mechanism of light transmission through a mercury plate.

This paper reports experimental phenomenon observed in our work and makes an analysis to them.