

# 激光与介质薄膜作用过程的等离子体诊断

倪晓武 陆建 贺安之  
(华东工学院 应用物理系, 南京)

马孜 周九林  
(西南技术物理所, 成都)

## 提 要

本文对 YAG 激光诱导介质薄膜产生的等离子体采用 Mach-Zehnder 干涉仪及光延迟装置进行时间序列分辨多幅干涉记录, 并对序列干涉图进行电子密度及等离子体冲击波速度的计算。首次得到脉宽为 15 ns 的 1.06  $\mu\text{m}$  激光与介质薄膜作用在 150 ns 以内的有关结果。

关键词: 光学薄膜; 激光等离子体。

## 一、引 言

在高功率激光系统中, 光学薄膜作为一种元件通常是重要而又薄弱的环节。因此, 对强激光与介质薄膜相互作用的研究引起激光工作者的关注, 并进行了很多探讨和研究<sup>[1~5]</sup>。这些研究采用的方法大多是用已知能量的强激光直接与薄膜相互作用, 由膜层被破坏的最低能量密度与不被破坏的最高能量密度定义为薄膜的损伤阈值。虽有激光与光学薄膜作用过程的分析, 但也限于直观地叙述和唯象的分析<sup>[6]</sup>。对激光与薄膜相互作用并产生等离子体的过程, 以及等离子体的发展和等离子体冲击波与薄膜损伤之联系, 尚未见到深入研究的报道, 更没有确定的结论。

我们对调 Q-YAG 激光器输出的 1.06  $\mu\text{m}$  波长的脉冲激光诱导六种不同的介质薄膜产生的等离子体采用 Mach-Zehnder 干涉仪和光延迟装置进行时间序列分辨多幅记录, 从而得到具有干涉条纹的等离子体的形貌照片。继而对不同的膜料不同延时时间的干涉图进行电子密度以及等离子体冲击波速度的定量计算, 首次得到脉宽为 15 ns 的 1.06  $\mu\text{m}$  激光与此六种膜料作用后 150 ns 以内的有关结果。在此基础上, 对强激光与介质薄膜作用的机理进行了初步的探讨。

## 二、激光与薄膜相互作用机理初探

有关激光与薄膜相互作用并引起损伤的机理说法很多, 但都趋于膜料吸收光的热作用<sup>[5, 6]</sup>和激光的场作用<sup>[6]</sup>, 我们认为二者不可偏颇, 特别对脉冲宽度为数十毫微秒级的调 Q

激光尤其如此。为此,对激光与薄膜相互作用以致损伤的机理进行分析,并引入了必要的数学描述。

当作用于薄膜的激光功率密度大于  $10^9 \text{ W/cm}^2$  时,薄膜的吸收系数不再是常数;又因为作用时间很短,来不及发生热传导,因而被作用区迅速升温,产生初始汽化。此时的物质蒸汽虽有透明的,但温度较高,因而物质蒸汽中部分原子被激发或离化,产生初始自由电子和离子。注意到此阶段的激光能量并未达到击穿阈值,因而薄膜未被击穿,但预电离后的自由电子密度已高于通常平衡态中的自由电子密度 ( $10^3 \text{ cm}^{-3}$ ),达到  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  的量级。

预电离产生的自由电子在离子场中,对激光光能的逆韧致辐射吸收大大加强。若初始原子数密度为  $N_0$ ,平均离子电荷为  $z$ ,入射激光圆频率为  $\omega$ ,且当激光光子能量  $h\nu \gg kT$  时,宏观吸收系数在 c.g.s 制中为<sup>[7]</sup>:

$$K = 0.70 \frac{(Z+1)^2 Z N_0^2}{\omega^2 T^{3/2}} \quad (1)$$

式中  $T$  为绝对温标下的温度值。

微观上,自由电子吸收后续光子得到能量,对应的能量增益为:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{2} \frac{e^2 E^2}{m\omega^2} \nu_e \quad (2)$$

式中  $\nu_e$  是电子与原子的有效碰撞频率。与电子能量  $\varepsilon$  一旦达到或接近原子的离化能  $I$  时,就能发生原子的离化。于是电子数密度可以以雪崩的形式增加,因而形成膜料物质的高度离化状态—等离子体态。等离子体的形成标志着薄膜已被击穿,膜层存在不可逆变化。

等离子体对后续激光能量强烈地吸收,使更多的光能集聚于膜层,因而自身温度急剧升高。局部可为高温过热状态。对应的温度达  $10^5 \text{ K}$  数量级。高温高密度的等离子体向外热辐射,因而发出很强的闪光,该闪光向外喷溅带走部分汽化的膜料物质。而等离子体本身的体积向外膨胀,膨胀波前就是等离子体冲击波波面。等离子体的温度,冲击波速度和激光功率密度由能量守恒定律相联系:

$$\rho_0 \varepsilon(T) \frac{dx}{dt} \propto q_0 \quad (3)$$

考虑到初始密度  $\rho_0$  很小,故冲击波传播速度可能很高,事实上,此速度达  $9 \text{ km/s}$ 。

从激光与薄膜相互作用并产生等离子体的作用过程分析可见:等离子体闪光向外喷溅带走汽化的膜料物质、等离子体冲击波对膜层的作用、以及透过等离子体区的剩余激光对薄膜的再次作用均可能导致薄膜的永久性损伤。其中等离子体闪光喷溅带走,汽化膜料是由膜层的前表面开始作用,因而引起膜层与空气的交界面的局部微损伤。等离子体冲击波对膜层之间和膜层与基底之间产生作用力,将导致薄膜层较大面积的崩溃。而剩余激光能量对膜层的压力在基底的反作用下加剧了冲击波的破坏作用;剩余的激光能量在基底的反射下又将部分返回等离子体区,对等离子体的延续和维持作贡献,因而也加重了等离子体对薄膜的破坏作用。我们认为上述三种由于激光与薄膜相互作用并产生等离子体,从而对薄膜的损伤模型,在使用调 Q 激光作为作用光时同时存在,只是对于同的样品,其中一种或二种作用方式占主要地位。

### 三、实验和结果

#### 1. 实验样品

我们镀制了六种光学厚度为  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0=1.06 \mu\text{m}$ ) 的单层介质薄膜。为不失一般性,膜料既有常用的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等,也有  $\text{Zr}$ 、 $\text{Dy}$ 、 $\text{Ti}$  氧化物。样品基底均为  $\text{K}_9$  玻璃,从而排除不同的基底对结果的影响。并以  $\lambda=1.06 \mu\text{m}$  激光作用于膜层刚产生等离子体的能量密度所定义的光学击穿阈值的递减进行排列,其特性参数见表 1。

Table 1 Experimental specimens and their character

Specimen Order	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
Film Material	$\text{SiO}_2$	$\text{ZrO}_2+\text{TiO}_2$	Ti Ta mixture	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Dy}_2\text{O}_3$	$\text{Yb}_2\text{O}_3$
Refractive Index	1.45	2.00	2.18	1.62	1.86	2.00
Breakdown Threshold ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	32.21	25.31	19.56	13.59	9.27	5.22

#### 2. 实验装置

采用脉冲宽度为 15 ns 的电光调 Q-YAG 振荡放大脉冲激光器作为探测光和作用光源。实验装置示意图见图 1。

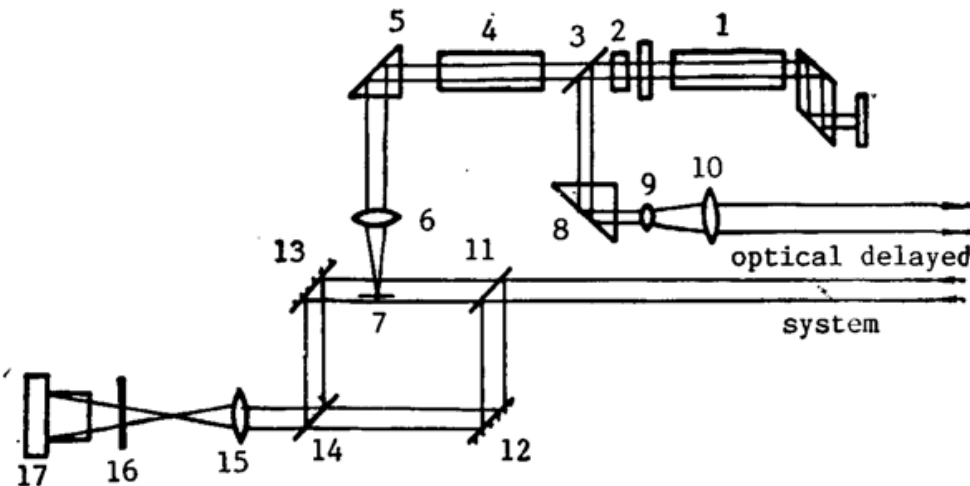


Fig. 1 Experimental Optical-path for Studying the laser-induced plasma on dielectric thin films.

图 1 中 YAG 激光器振荡级 1 输出的  $1.06 \mu\text{m}$ 。激光经倍频晶体 2 后成为  $0.53 \mu\text{m}$  与  $1.06 \mu\text{m}$  混合激光束,该光束由  $0.53 \mu\text{m}$  激光高反且  $1.06 \mu\text{m}$  激光高透的平面镜 3 分束,其中的  $0.53 \mu\text{m}$  部分由透镜 9、10 组成的扩束系统扩展为平行光,该平行光经光延时后作为由元件 11, 12, 13, 14 组成的 M-Z 干涉仪的探测光。而由放大级 4 输出的  $1.06 \mu\text{m}$  激光经聚焦透镜 6,用以诱导介质薄膜样品 7 产生等离子体。

#### 3. 实验方法和结果

实验中考虑到膜层几何厚度仅为  $10^{-7} \text{m}$  量级,为确保激光是与膜层相互作用而不是与

基底作用,因此采用激光离焦与膜层作用,即使激光聚焦在膜层外的空间。此时又可能导致空气击穿的影响,因此控制激光在聚焦透镜焦点处的功率密度为  $2.48 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ , 低于调 Q 的  $1.06 \mu\text{m}$  激光的空气击穿阈值  $10^{11} \text{ W/cm}^2$  二个数量级。考虑到作用激光脉宽为  $15 \text{ ns}$ , 故聚焦焦点处激光能量密度为  $37.2 \text{ J/cm}^2$ , 仍高于所有样品的击穿阈值, 从而可保证激光是与膜层相互作用的。聚焦透镜焦距  $f = 15 \text{ mm}$  (对  $1.06 \mu\text{m}$  激光而言), 作用于薄膜的激光光斑直径约为  $25 \mu\text{m}$ , 激光器处于  $\text{TEM}_{00}$  态工作。

通过调节光延时装置, 可获得激光与薄膜作用后  $150 \text{ ns}$  以内的时间时序列分辨的等离子体干涉图。样品  $S_1$  和  $S_5$  的时间间隔为  $30 \text{ ns}$ , 放大 31 倍的序列干涉图如图 2、图 3 所示。

## 四、数据处理和实验结果的分析与讨论

### 1. 数据处理

图 2、图 3 中干涉条纹的漂移量反映了位相物体的折射率变化, 在等离子体干涉诊断中

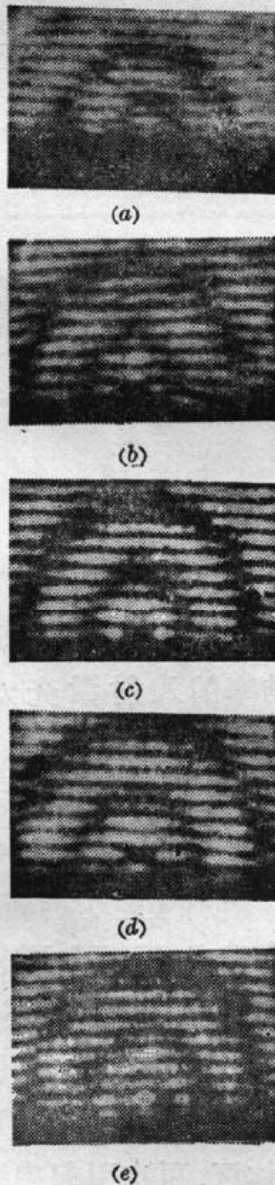


Fig. 2 Time-resolved M-Z interferograms of specimen  $S_1$

delaying time (a) 30 ns (b) 60ns (c) 90ns (d) 120ns (e) 150 ns

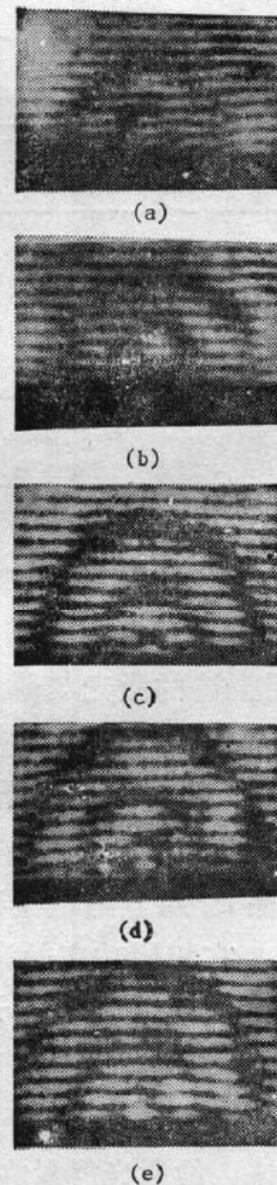


Fig. 3 Time-resolved M-Z interferograms of specimen  $S_5$

又主要反映了电子密度、原子密度。对冲击波前电子密度的计算方程为<sup>[7]</sup>:

$$n-1 = -4.403 \times 10^{-10} N_e \lambda^2 + (n_0 - 1) \frac{\rho_2}{\rho_0} \quad (4)$$

式中  $N_e$  为电子数密度,  $\lambda$  为激光波长,  $\rho_2/\rho_0$  是冲击波压缩比, 其值由空气动力学理论给出。

## 2. 实验结果分析与讨论

(1) 激光诱导介质薄膜产生的等离子体形貌随介质的不同而异。比较图 2、3 两种样品的序列干涉图可见: 等离子体冲击波形状、发展、过程、干涉条纹的漂移量均不同。

(2) 等离子体膨胀产生的冲击波速度在初始时为声速的几十倍, 当作用时间趋于 150 ns 时, 冲击波波速趋于声速。以样品  $S_6$  对应的序列干涉图(图 3) 计算的垂直膜层方向冲击波波速的数据可以证实

时间间隔 (ns)	30	60	90	120	150
冲击波波速 (km/s)	9.20	4.15	2.35	1.05	0.40

(3) 样品的光学击穿阈值与等离子体冲击波波速有关, 并且随样品的光学击穿阈值的降低而增大。以延时 90 ns 的六种样品对应的垂直膜层的冲击波速度值可见:

样 品	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
冲击波速度 (km/s)	1.85	2.11	2.22	2.26	2.35	2.65

(4) 由(4)式计算六种样品延时 90 ns, 距膜层作用中心为 0.5 mm 点的电子密度结果如下:

样 品	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
电子密度 ( $\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )	7.6	10.1	13.3	10.5	11.4	12.8

由此可见, 膜料光学击穿阈值一般随激光等离子体区电子密度的增加而降低。此结论与结论(3)可用上述的激光与薄膜相互作用机理解释。相同功率的入射激光对阈值较低的膜料较易引起击穿, 对应的等离子体场较早建立, 吸收的后续激光能量更多, 因而等离子体场区温度、密度更高。等离子体扩散时闪光喷溅带走的高度电离态的物质中电子密度相应就高, 冲击波速度亦更大。

注意到样品  $S_3$  对应的电子密度有突变, 这可能对样品  $S_3$  膜料中原子的离化能低于其它样品的原因。在相同功率的激光作用下  $S_3$  膜料的离化物质更多, 因而电子密较大。实验中也发现样品  $S_3$  产生的等离子体闪光较强。由此可见等离子体电子密度还与样品元素的离化能有关。

(5) 由图 2、图 3 可见, 在等离子体冲击波线内存在干涉条纹的突变。我们认为这是由于透过等离子体区的激光能量在基底的后表面反射回等离子体区, 再次引起串级电离, 从而又形成一层等离子体冲击波, 此时因激光能量锐减, 且只有部分反射, 因而条纹漂移不大, 但对薄滤仍存在损伤作用。由此可见, 对激光器所用的镀膜元件, 其背面镀制增透膜层将会提

高膜层的抗激光损伤能力。

激光诱导介质薄膜产生等离子体的研究工作尚开展不久,就是现有的实验结果亦有待于进一步分析。可以看到,这种研究方法不失为一种研究激光与薄膜相互作用的有效手段。这种方法得到的实验结果携带的信息量大,有的结果是其它研究方法得不到的。

### 参 考 文 献

- [1] T. A. Wiggins *et al.*; *NBS, Spec.*, 1986, 162~169.
- [2] H. E. Bennett, A. H. Guenther; *Appl. Opt.*, 1986, 25, No. 2 (Jan), 158~164.
- [3] A. H. Guenther; *NBS, Spec.*, 1981, 3~5.
- [4] A. D. Boardman, P. Egan, *IEEE J. Q. E.*, 1986, QE-22, No. 2 (Feb), 319~324.
- [5] 施正荣, 范正修等;《中国激光》, 1988, 15, No. 1 (Jan), 22~25.
- [6] 私人通信。
- [7] J. F. Ready; 《*Effects of High-Power Laser Radiation*》, (Academic Press, New York), 1971, ch. 2.

## Study of laser-induced plasma on dielectric thin-films

NI XIAOWU, LU JIUN AND HE ANZHI

(*East China Institute of Technology, Nanjing*)

MA ZHI AND ZHOU JINLIN

(*South-West Technical Physics Institute, Chengdu*)

(Received 14 May 1989; revised 13 October 1989)

### Abstract

By using a Mach-Zehnder interferometer and an optical delaying system, we made a time-resolved multi-frame interference recording for the plasma on dielectric thin films produced by YAG laser. We have calculated the electron density and plasma shock speed from the series of interferograms, and firstly acquired relevant results about 15 ns pulse width (FWHM) of 1.06  $\mu\text{m}$  laser interacting with dielectric thin films within 150 ns.

**Key words:** optical thin films; laser produced plasma; interference diagnostics.