

# 高功率激光对光学介质薄膜 破坏机理的研究进展

倪晓武 陆建 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210014)

王平秋 马孜 周九林

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

**摘要:** 本文综述了高功率激光对光学介质薄膜破坏的几种机理, 着重阐述了激光等离子体及其扩展时产生的冲击波对光学介质薄膜的破坏作用。

**关键词:** 高功率激光 光学介质薄膜 破坏机理 激光等离子体 冲击波

## Study of damage mechanism of optical dielectric film by high power laser

*Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi*

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology)

*Wang Pingqiu, Ma Zi, Zhou Jiulin*

(South-West Institute of Technical Physics)

**Abstract:** In this paper, several damage mechanisms of optical dielectric films by high power laser are summarized. The damage action of laser plasma to films and the shock wave producing while the plasma is expanding are emphasized.

**Key words:** high-power laser optical dielectric film destructive mechanism laser plasma shock wave

### 一、引言

在高功率激光系统中, 光学薄膜作为光学元件一个组成部分, 通常是重要而又薄弱的环节, 其重要的方面是因为在激光器及其应用系统中光学薄膜无所不在, 并且起着不可缺少的作用, 如高反膜、减反射膜、分色膜等等; 其薄弱的方面是因为薄膜的激光损伤阈值要低于光学元件裸表面的 2~4 倍, 因而在激光器中薄膜被激光破坏的问题限制了激光器功率的进一步提高, 甚至有可能使整个方案失败, 特别对作为定向能战略、战术武器使用的高能量、高功率的激

光器件来说更是如此。同样在其它应用方面,如激光打孔、切割、划片、焊接、热处理或标刻等激光加工领域中,光学介质薄膜的抗激光损伤能力亦将直接影响整机性能。随着激光器输出能量的迅速增加,光学介质薄膜抗激光破坏的问题已越来越突出,因而高功率激光与光学介质薄膜破坏机理的研究,一直是激光工作者关注的热点问题。早在 1965 年,Turner 等人就开始了激光对光学介质薄膜破坏机理研究,我国也于 1967 年开始了相应的研究工作。直至目前,该研究方向仍然是激光对物质破坏机理研究领域中最活跃的课题之一。但是,激光对光学介质薄膜破坏机理的研究是一项非常复杂的课题,它涉及的激光技术、非线性光学、固体物理学、材料学、化学和薄膜光学等多门学科,加上使用的定义和术语各异、实验和使用条件各不相同,有些研究很难重复,因而大大妨碍了研究的进展。因此,美国国家标准局(NBS)等 5 个单位从 1969 年就开始举办了“激光在光学材料中产生损伤”的专题研讨会(常称为 Boulder 破坏讨论会),在该会议上发表的论文均列入 NBS 特殊出版物(Natl. Bur. Stand. Spec. Publ.),至今共开了 18 届。美国材料与试验协会(ASTM)亦于 1983 年组织了美国及欧洲 8 个国家实验室参加,对 Balzers 提供的 光学介质薄膜样品进行称为 Round-Robin 的破坏实验,其实验结果也总结成文集集中刊于 1984 年 11 月的 光学权威学术刊物 Applied Optics<sup>[1]</sup>中。在高能量、高功率激光器及其应用日益发展的今天,如何标定和评价高功率激光对光学介质薄膜的损伤问题已成为一项十分迫切而又重要的任务。为此,国际上于 1992 年制定了“光学表面激光损伤阈值测试方法”标准草案,我国也正在起草相应的国家标准。但是,作为高功率激光对光学介质薄膜的损伤机理的研究课题仍然存在,而且该课题的研究结果将对国际或国家标准的制定和完善仍然具有重要的意义。

## 二、研究进展

从经典的概论出发,高功率激光与光学介质薄膜相互作用过程主要可归纳为膜料吸收激光能量的热效应和激光的场效应二种<sup>[2,3]</sup>。前者主要考虑到激光束是具有能量的粒子束,即光子能量为  $E=h\nu$ 。而且作用激光波长愈短,每个光子所具有的能量愈大。对给定的激光波长,当作用于介质薄膜的激光功率密度大于  $10^7\text{W}/\text{cm}^2$  时,激光对膜料加热并使其升温。当薄膜温度达到膜料的融溶或汽化阈值时,介质薄膜就开始破坏,从而使凝聚态膜料热融溶或汽化。在考虑激光是与半无限大的凝聚态薄膜相互作用和激光光束的横截面能量呈高斯分布时,介质薄膜吸收的激光能量转化为膜料中热分布可用高斯定理描述<sup>[4]</sup>

$$T(r) = T_m \exp(-kr) \quad (1)$$

式中,  $T_m$  为光斑中心最高温度,  $T(r)$  为距光斑中心距离为  $r$  的温度,  $k$  为光源的聚焦系数。如假设在整个激光脉冲作用时间内热功率是恒定的,则介质薄膜的表面在一定的时间  $\tau$  内有一个不动的恒定热源在起作用,该持续时间  $\tau$  可近似为作用激光的脉宽。而在激光的作用下,薄膜中沿激光光轴方向吸收的光能随距膜层表面的厚度呈指数下降,因而激光对薄膜的热破坏从膜层的表面开始逐步向其内部进行。

高功率激光与光学介质薄膜相互作用的场效应是因为激光具有良好的相干性,当激光通过薄膜时,不仅反射光束之间发生干涉,反射光与入射光相遇时也要发生干涉。这种反射光与入射光产生干涉的结果是在薄膜内部形成驻波场,该驻波场在  $K$  层介质薄膜中光场分布的矩阵表示为<sup>[5]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = \frac{t_j t_{j-1} \cdots t_2}{(1-r_{j-1}^2)(1-r_{j-2}^2)\cdots(1-r_1^2)} \begin{bmatrix} e^{-i\delta_{j-1}} & -r_j e^{i\delta_{j-1}} \\ -r_{j-1} e^{i\delta_{j-1}} & e^{i\delta_{j-1}} \end{bmatrix} \cdots$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ -r_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, k, k+1) \quad (2)$$

式中,  $r$ ,  $t$  和  $\delta$  为各层薄膜的反射系数、透射系数和位相差, 带有+上标的是与入射激光有关的参量, 带有一上标的是与反射激光有关的参量, 各参量的下标表示膜层的层次序数(从表面开始)。根据驻波理论可知, 驻波振幅处光强最大, 因而对薄膜的破坏也是从该处开始的。考虑到驻波场的振幅并不一定位于膜层的表面, 因而激光与光学介质薄膜相互作用的场效应将使膜层从非表面某处开始破坏<sup>[6]</sup>。

近年来, 亦有对激光与光学介质薄膜作用时产生等离子体进行研究的<sup>[7]</sup>, 这类研究从激光与物质相互作用时将产生等离子体的理论出发, 认为激光与介质薄膜相互作用的过程是: 当作用于介质薄膜的激光功率密度大于  $10^9 \text{W/cm}^2$  时, 膜料的吸收系数不再是常数, 又因作用时间很短, 热传导来不及发生, 因而被作用区迅速升温, 产生初始汽化。此时的物质蒸汽虽是透明的, 但温度较高, 因而物质蒸汽中的部分原子被激发或离化, 产生初始自由电子和离子, 这一过程称为预电离。预电离产生的自由电子由于逆韧致辐射作用吸收后续激光的单个光子(对输出紫外波段激光而言)或多个光子(对输出可见和红外波段激光而言)能量成为高能电子, 再去碰撞其它原子, 从而使其离化。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, 局部成为高温过热状态。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, 膨胀波波前就是等离子体冲击波波面。等离子体的温度  $\epsilon(T)$ 、冲击波速度  $dx/dt$  和作用激光功率密度  $q$  之间由能量守恒定律相联系<sup>[8]</sup>:

$$\rho \epsilon(T) dx/dt \propto q \quad (3)$$

考虑到初始密度  $\rho$  很小, 因而冲击波传播速度将很高。事实上, 该速度达到  $9 \text{km/s}$ 。

从激光与介质薄膜相互作用的过程分析可见: 等离子体闪光向外喷溅带走汽化的膜料物质、等离子体温度对膜层的热作用和等离子体冲击波对膜层的机械作用都将引起薄膜的永久损伤。注意到上述作用过程中产生的激光等离子体闪光的谱线是一种复合光谱, 因而具有作用激光波段以外的其它光谱线。而在作用过程中没有产生激光等离子体闪光时, 作用点只会有与作用激光波段相近的光谱线被探测到。因而对作用点产生的光谱线进行诊断, 如发现与作用激光波段相差甚远的光谱线被探测到, 就可以认为被作用处已产生激光等离子体闪光, 因此引出了利用激光与光学介质薄膜相互作用时是否产生等离子体作为判断薄膜损伤阈值的定义<sup>[9]</sup>, 并可据此定义对激光对薄膜的破坏过程进行实时诊断。等离子体冲击波对膜层的机械作用是基于该冲击波速度  $v$  很高, 达到  $10^4 \text{m/s}$  数量级。而根据空气动力学理论可以得到空气中等离子体冲击波的压强与速度的关系为<sup>[10]</sup>:

$$P/P_0 = [1 + (K - 1)v/2C_0]^{2K} \quad (4)$$

式中,  $P$  为等离子体冲击波的压强,  $P_0$  为空气的压强,  $C_0$  为空气中的声速,  $K$  为比热比。当激光等离子体冲击波在空气中传播时, 有  $K=1.4$ ,  $C_0=320 \text{m/s}$ ,  $P_0=1.01 \times 10^5 \text{N/m}^2$ , 则(4)式可改写为:

$$P/P_0 = (1 + 0.000625v)^7 \quad (5)$$

由(5)式可以计算出等离子体冲击波对单位面积介质薄膜的作用力。当激光等离子体冲击波的起初速度达到  $10^4 \text{m/s}$  的数量级时, 对应的作用于单位面积薄膜的作用力达  $10^7 \text{N/m}^2$ , 这与中

等附着性的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{ZrO}$  搭配的多层膜系附着力 ( $10^7\text{N/m}^2$ ) 的数量级相同,也是一般膜系附着力 ( $10^7\text{N/m}^2$ ) 的数量级相同,也是一般膜系附着力变化范围 ( $10^5\text{N/m}^2 \sim 10^9\text{N/m}^2$ ) 的中值区。因而可见:等离子体冲击波对介质薄膜的机械力是激光对大部分薄膜破坏过程中不可忽略的因素。对附着性较差的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{ZnS}$  搭配的多层膜系(附着力为  $2 \times 10^6\text{N/m}^2$ ) 进行对比实验的结果更证实了等离子体冲击波对该种膜系的机械作用是激光破坏的重要因素<sup>[10]</sup>。考虑到激光对薄膜破坏过程中还存在热效应、场效应和等离子体闪光向外喷溅带走汽化膜料等破坏效应,可以断言:等离子体冲击波对多层介质薄膜的机械作用结合薄膜中存在的应力,能加强激光的其它效应对膜系的破坏效果,从而导致薄膜较大面积的崩溃。

### 三、今后的研究方向

由于激光技术的发展,激光作为定向能战术武器,特别是作为战术激光武器实施对敌方观测仪器致盲已成为可能的今天,高功率激光对光学介质薄膜的破坏机理研究的重要性更为突出。因而关于本课题的研究,在今后一段时间内仍然是比较活跃的热点问题。纵观已经解决、正在研究和急待解决的实际问题来看,今后研究课题有:

(1) 研究高功率激光对光学介质薄膜的热作用、场作用、等离子体作用或其它作用对破坏过程的贡献。而连续激光对光学介质薄膜的破坏过程中,激光的热作用占其中的主导效应已为多数人所接受,但在高功率激光作为破坏光源时情况将有所不同,这里的激光场的效应和等离子体带来的效应都不可忽略,详细情况有待研究。

(2) 研究高功率激光对光学介质薄膜的破坏时等离子体及其冲击波结合薄膜固热作用而产生的热应力、热冲击力、热声子力和其它作用力对破坏过程的影响。上述几种热作用力虽然都由热作用所产生,但结合激光等离子体及其冲击波的破坏作用将起到各自单独存在时带来的影响要大得多,详细情况也有待研究。

(3) 研究高功率激光对光学介质薄膜破坏时等离子体及其冲击波与薄膜的特性(如吸收系数、反射率等)之间的定量关系;薄膜的破坏阈值与等离子体及其冲击波参数间的定量关系。

(4) 研究不同特性(如重复频率、波长和脉宽)的高功率激光对光学介质薄膜破坏的效果,寻找一种能以较小的能量(或功率)达到最佳破坏作用的激光光源,为战术激光武器的研制提供指导意见。

(5) 在研究高功率激光对光学介质薄膜破坏机理的基础上,研究薄膜的镀制工艺,即寻找高阈值膜料或新膜系等,以提高成品薄膜的抗激光损伤阈值,为进一步研制高功率激光器提供合格的薄膜。

#### 参 考 文 献

- 1 Stewart A F, Guenther A H. *Appl Opt*, 1984;23(21):3774
- 2 Guenther A H. *NBS Spec*, 1986:162
- 3 Bennett H E, Guenther A H. *Appl Opt*, 1986;25(2):158
- 4 Ni X, Lu J, He A *et al.* *Opt Commun*, 1989;74(3~4):185
- 5 倪晓武,陆建,贺安之 *et al.* *华东工学院学报*, 1992;(4):7
- 6 Ni X, Lu J, He A *et al.* *Opt Commun*, 1992;90(4~6):270
- 7 倪晓武,陆建,贺安之 *et al.* *光学学报*, 1990;10(4):322
- 8 倪晓武,陆建,贺安之 *et al.* *强激光与粒子束*, 1992;4(4):509

# 光电离检测的 Cs 原子共振滤波

汪盛烈 孙献平 陈暖球 赵明信 曾锡之

(中国科学院武汉物理研究所, 波谱与原子分子物理开放研究实验室, 武汉, 430071)

**摘要:** 本文报导一种新型的、使用光电离检测的 Cs 原子共振滤波方案。理论算得, 原子系统固有的响应时间为 10ns, 线宽 62MHz, 量子效率 86.6%。初步实验测得, 响应时间(包括系统因素) 130ns, 量子效率大于 10.1%, 最小可探测光强 3nJ。实验系统正在进一步改善, 可以期望获得更好的实验值。

**关键词:** 光电离 原子共振滤波

## Cs atomic resonance filter detected by photoionization

Wang Shenglie, Sun Xianping, Chen Aiqiu, Zhao Mingxin, Zeng Xizhi

(The National Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica)

**Abstract:** This paper introduces a new type Cs atomic resonance filter (ARF) detected by photoionization. The theoretical analysis gives the inherent time response of 10 ns, the linewidth of 62 MHz and quantum efficiency of 86.6%. In current experimental apparatus, the preliminary measurements give ARF's time response of 130 ns, quantum efficiency greater than 10.1% and critical signal laser energy of 3 nJ. A better results will be obtained while the experimental apparatus improved.

**Key words:** photoionization atomic resonance filter

### 一、引言

在激光探潜和水下通讯的研究中, 原子共振滤波器具有大视场( $2\pi\text{Sr}$ )、超窄带( $Q=10^5\sim$

9 He A, Ni X, Lu J *et al.* Opt Commun, 1992;91(1~2), 62

10 倪晓武, 陆建, 贺安之 *et al.* 全国光学薄膜会议论文集, 全国光学薄膜会议, 无锡, 1993

作者简介, 倪晓武, 男, 1955年10月出生。硕士, 教授。现主要从事激光与材料相互作用以及激光原子应用研究。

陆建, 男, 1965年9月出生。硕士, 副教授。现主要从事激光与材料相互作用研究。