

激光诱导薄膜等离子体点燃时间及其影响因素

汪桂霞, 苏俊宏, 徐均琪, 杨利红, 吴慎将

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 将波长为 1064 nm 的纳秒 Nd:YAG 脉冲激光聚焦在单层 Al 膜上, 诱导其产生等离子体闪光, 模拟计算了等离子体闪光的点燃时间(t_m), 分别得到了 t_m 与激光波长、入射激光能量、聚焦光斑半径、脉宽等激光作用参数的关系曲线, 研究分析了薄膜材料、薄膜表面杂质和缺陷对 t_m 大小的影响。结果表明, 激光聚焦光斑和脉宽越大, t_m 就越大; 激光波长和入射激光能量越大, t_m 越小; 薄膜材料电离能越小, t_m 越小; 薄膜表面存在杂质和缺陷时, t_m 变小。这些结果对关于激光维持燃烧波和爆轰波的产生机制的研究提供了一定的参考。

关键词 薄膜; 薄膜等离子体; 等离子体闪光; 点燃时间

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0431001

Ignition Time of Laser-Induced Film Plasma and Its Influence Factors

Wang Guixia, Su Junhong, Xu Junqi, Yang Lihong, Wu Shengjiang

School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract Laser plasma flash is induced when a nanosecond Nd:YAG pulsed laser with wavelength of 1064 nm is focused on monolayer aluminum film. The ignition time of laser-induced film plasma (t_m) is calculated with simulation method, and the relationship between t_m and the laser wavelength, incident laser energy, focusing spot radius and pulse width is obtained, respectively. The results show that t_m increases with laser focusing spot radius and pulse width increasing, and decreases with laser wavelength and incident laser energy increasing. In addition, the smaller the ionization energy of thin film materials, the smaller t_m . When impurities and defects exist in films, t_m becomes small. Such results provide a certain reference to the research on the generation mechanism of laser-sustained combustion and detonation wave.

Key words thin films; film plasma; plasma flash; ignition time

OCIS codes 310.6870; 300.6365; 350.5400

1 引 言

当强激光作用在薄膜表面时, 薄膜的吸收系数不再是常数。同时, 因脉冲作用时间很短, 来不及发生热传导, 辐照位置处温度迅速升高, 产生气化, 进而材料蒸气中的原子被激发或电离, 形成等离子体闪光, 引起膜层的损伤^[1-5]。因此, 等离子体闪光法常被用于判别激光薄膜是否损伤。然而, 强激光在传输过程中, 当光束能量密度超过空气击穿阈值时, 会发生光学击穿现象, 产生空气等离子体闪光, 对薄膜等离子体闪光造成干扰, 从而对激光薄膜是否损伤的判断产生影响。有文献^[6]报道, 用激光轰击靶材时, 靶材的等离子体闪光点燃时间与空气的等离子体闪光点燃时间有一定的差别。因此, 如果能分别得到激光诱导空气和薄膜的等离子体闪光点燃时间, 即可分辨出空气与薄膜的等离子体闪光, 从而避免利用等离子体闪光法判别激光薄膜损伤时造成的误判。

薄膜等离子体点燃时间 t_m 是指从激光入射薄膜表面开始到薄膜表面产生等离子体闪光的时间间隔, 它

收稿日期: 2016-10-10; **收到修改稿日期:** 2016-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(61378050)、科技部国际科技合作项目(2013DFR70620)

作者简介: 汪桂霞(1982—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光薄膜损伤方面的研究。

E-mail: xinwan820412@sina.com

导师简介: 苏俊宏(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事薄膜激光损伤及干涉测量方面的研究。E-mail: sujhong@126.com (通信联系人)

反映了激光在作用过程中,薄膜表面等离子体电子密度从零变为临界电子密度(雪崩电离现象发生时的电子密度)所需的时间。然而,等离子体的形成是个很复杂的过程,激光辐照薄膜产生初始电子后,由于逆韧致作用,激光被强烈吸收,在逆韧致吸收刚开始阶段,吸收系数取决于等离子体的电子密度。激光能量的吸收使得电子动能增加,引起电子温度升高,导致电离程度增加,直到等离子体的电子密度增大到使激光能量被等离子体反射,此时,等离子体变为不透明^[7],该时刻被认为是激光维持燃烧波(薄膜等离子体闪光)的点燃时刻^[8],由其可得到薄膜等离子体点燃时间 t_m 。由于等离子体前沿的扩张即为激光维持燃烧波的波前^[9],对薄膜等离子体点燃时间 t_m 进行研究,不仅能更好地揭示薄膜表面等离子体的产生和膨胀过程,而且能对激光维持燃烧波和爆轰波的点燃和扩张过程进行研究,从而为研究激光维持燃烧波和爆轰波的产生机制提供一种新的思路。

目前,国内外学者已经对激光诱导气体或者固体产生等离子体闪光的现象及过程进行了大量的研究^[10-18],但关于激光诱导薄膜产生等离子体闪光的点燃时间研究却鲜有报道。本文对激光诱导薄膜等离子体点燃时间 t_m 进行分析计算,对激光参数、薄膜材料及其表面特征等因素对 t_m 大小的影响进行了研究及分析,研究结果对于分析激光维持燃烧波和爆轰波的产生机制具有重要意义,也为薄膜损伤等离子体闪光识别方法提供了技术判据。

2 激光诱导薄膜等离子体点燃时间的计算

根据激光和材料相互作用原理^[9],强激光照射到薄膜表面后,薄膜表面一薄层首先被激光加热至气化,该气化层继续吸收入射激光能量,温度继续上升,且由 saha 方程可知其电离度也不断增大,当电离度达到一定值时即形成了等离子体。薄膜表面少量的自由电子被称为初始自由电子,初始自由电子的数量对电离过程、击穿阈值、薄膜等离子体闪光点燃时间都有很大的影响。在薄膜表面气化层形成的过程中,初始自由电子通过逆韧致吸收过程吸收激光能量,电子密度增大,且电子不断地吸收激光能量,继续电离,达到一定程度后形成雪崩之势,即薄膜等离子体闪光点燃。

在薄膜表面气化层形成的过程中,初始自由电子通过逆韧致吸收过程吸收激光能量,其电子能量 E_e 的增加率为^[9]

$$\frac{dE_e}{dt} = \frac{e^2 E_m^2}{2m\omega^2} \nu_e, \quad (1)$$

式中 e 为电荷量, m 为电子质量, ω 为激光角频率, ν_e 为电子碰撞频率; E_m 为激光场场强,且 $E_m = 2P/(c\epsilon_0)$, 其中 P 、 c 、 ϵ_0 分别为激光功率密度、光速、介电常数。

若获得激光能量的电子碰撞原子或分子为一次电离过程,则有:

$$\frac{dE_e}{dt} = \nu_L E_L, \quad (2)$$

式中 ν_L 为原子或分子的电离速率, E_L 为材料蒸气原子或分子的电离能。再结合(1)式可得

$$\nu_L = \frac{e^2 E_m^2}{2m\omega^2} \nu_e \frac{1}{E_L}. \quad (3)$$

要使得电子不断吸收激光能量继续发生电离,则需满足:

$$t_c = \frac{1}{\nu_L}, \quad \text{且 } t_c < t_p, \quad (4)$$

式中 t_c 为持续电离的临界时间, t_p 为脉宽。结合(3)式,可得

$$\frac{2m\omega^2 E_L}{e^2 E_m^2 \nu_e} < t_p. \quad (5)$$

而电子密度的增长速率为

$$\frac{dN_e}{dt} = \nu_L N_e, \quad (6)$$

式中 N_e 为 t 时刻的电子密度。积分后取对数得

$$N_e = N_{e0} \exp(\nu_L t), \quad (7)$$

式中 N_{e0} 为初始电子密度。

此电离的过程为雪崩电离,即击穿。击穿时,材料蒸气中电子密度 N_e 必须达到击穿临界值的电子密度 N_{ec} 。设经过 t_m 电子密度达到 N_{ec} ,由(1)~(7)式得等离子体点燃时间 t_m 为

$$t_m = t_c \ln \frac{N_{ec}}{N_{e0}} = \frac{1}{\nu_L} \ln \frac{N_{ec}}{N_{e0}} = \frac{2m\omega^2 E_L}{e^2 E_m^2 \nu_e} \ln \frac{N_{ec}}{N_{e0}}. \quad (8)$$

以光学厚度为 $\lambda/4$ (λ 为波长) 的单层 Al 薄膜为例,当作用的强激光波长 $\lambda=1064$ nm,激光脉宽 $\tau_p=10$ ns,激光入射能量 $E=282$ mJ,激光聚焦光斑半径 $r=0.04$ cm 时, t_m 模拟计算结果如图 1 所示。从图中可以看出,薄膜等离子体闪光的点燃时间 t_m 约为 41.3 ns。此结果与文献[9]报道的 Al 靶等离子体点燃时间的数量级相近。

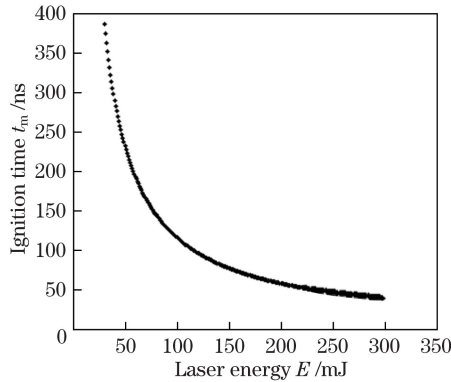


图 1 薄膜等离子体闪光的点燃时间仿真计算结果

Fig. 1 Simulation result of ignition time of film plasma flash

3 激光诱导薄膜等离子体点燃时间影响因素分析

3.1 激光作用参数

为了研究激光诱导薄膜等离子体点燃时间的影响因素,在其他条件不变的情况下,分别对激光波长、激光入射能量、激光聚焦光斑半径和激光脉宽变化时 t_m 的变化曲线进行了模拟,结果如图 2 所示。

由图 2(a)可知,在其他条件不变的情况下,入射激光波长越大,电子碰撞越剧烈,电离一个相同的原子需要的时间越短,因此达到电子雪崩的时间就越短。理论上,激光角频率 $\omega = 2\pi c/\lambda$,等离子体频率 $\omega_p = 56.4 \times N_{ec}^{1/2}$ [7],而电子碰撞频率 $\nu_e = \omega [(3\omega_p^2 - 4\omega^2)/(\omega_p^2 - 4\omega^2)]^{1/2}$ [19],故入射激光波长越大, ω 越小, ν_e 越大,由(8)式可得 t_m 越小。

由图 2(b)可以看出,在其他条件不变的情况下,从微观角度分析,入射激光能量越大,薄膜吸收的激光能量也越大,薄膜表面材料越易达到沸点,发生气化,且材料蒸气越早发生电离,也就越早产生高温高密度的等离子体,这种等离子体吸收激光剩余能量,并迅速膨胀,形成等离子体闪光;从宏观角度分析,入射激光能量越大,薄膜吸收能量后电离一个相同的原子需要的时间就越短,因此 t_m 越小。

由图 2(c)可以看出,在其他条件不变的情况下,激光聚焦光斑越小,聚焦区内单位面积的能量就越大,对于同样的薄膜,到达薄膜表面的激光功率密度就越大,这也就意味着薄膜表面激光功率密度会更快达到其等离子体点燃阈值,因此 t_m 越小。

由图 2(d)可以看出,在其他条件不变的情况下,激光脉宽越小,入射的激光功率越大,到达相同薄膜表面的激光功率密度就越大, t_m 也就越小。

综上,在其他条件不变的情况下,激光聚焦光斑和脉宽越大,薄膜等离子体的点燃时间越长,激光波长和入射能量越大,薄膜等离子体的点燃时间就越短。

3.2 薄膜材料

在激光辐照到材料表面时,薄膜等离子体点燃阈值与材料蒸气分子或原子的电离能 E_L 成正比[9],且从

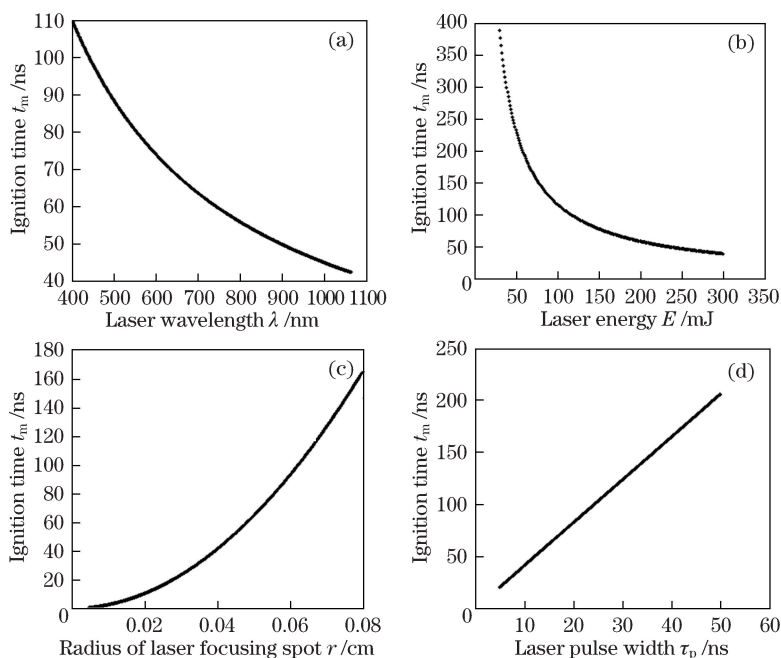


图 2 薄膜等离子体闪光的点燃时间与不同参数之间的关系。(a)入射激光波长；(b)激光入射能量；(c)激光聚焦光斑半径；(d)激光脉宽

Fig. 2 Relationship between ignition time of film plasma flash and different parameters. (a) Incident laser wavelength; (b) incident laser energy; (c) radius of laser focusing spot; (d) laser pulse width

(8)式中也可以看出,在其他条件不变的情况下,材料蒸气分子或原子的电离能 E_L 与薄膜等离子体点燃时间 t_m 成正比。因此,薄膜材料对点燃时间的影响主要取决于其蒸气分子或原子的电离能 E_L 。电离能 E_L 越小,其等离子体点燃阈值越低,则等离子体越容易被点燃。相对于 Ag 的电离能(7.57624 eV),Al 的电离能更小,为 5.98577 eV。Al 膜和 Ag 膜等离子体闪光的点燃时间 t_m 仿真对比结果如图 3 所示。从图中可以看出,在其他条件不变的情况下,Al 膜的等离子体点燃时间 t_m 较小,可见 Al 膜更容易产生等离子体闪光。

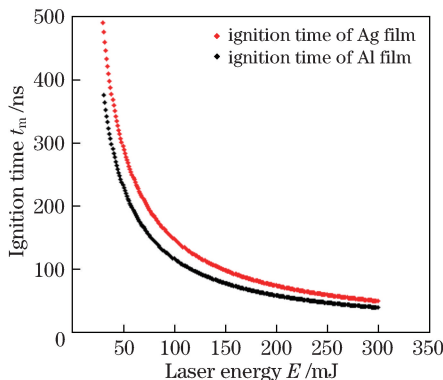


图 3 Al 膜和 Ag 膜等离子体闪光的点燃时间的仿真对比结果

Fig. 3 Comparison of simulation results of ignition time of plasma flash between aluminum and silver films

3.3 薄膜表面杂质和缺陷

如果薄膜表面有杂质或者缺陷,激光作用时薄膜表面材料的升温、气化、串级电离过程都会受到很大影响,进而对串级电离过程的雪崩时间(即薄膜等离子体点燃时间 t_m)产生很大的影响。由(1)式可知, v_L 与 m 、 v_e 和 E_L 有关。由(8)式可知,等离子体点燃时间 t_m 与 v_L 成反比。因此,薄膜表面杂质对等离子体产生过程有两个影响,一是有可能加大薄膜面上的初始电子密度 N_{e0} 。图 4 为初始电子密度 N_{e0} 与 t_m 的关系图,从图中可以看出,在逆韧致吸收的初始阶段,初始电子密度 N_{e0} 对 t_m 的影响很大。这是因为在逆韧致吸收开始阶段,吸收系数取决于等离子体的电子密度,若 N_{e0} 增大,电离程度增加,等离子体的电子密度就增大,

其越易达到雪崩电离时的临界电子密度,即 t_m 越小。二是有可能降低 $1/v_L$ (因为存在电离能低于薄膜材料的杂质, v_L 变大,从而 t_c 变小),如图 3 所示, E_L 减小,则 t_m 变小。综上,这两种作用均使得串级电离的雪崩时间(t_m)减小。

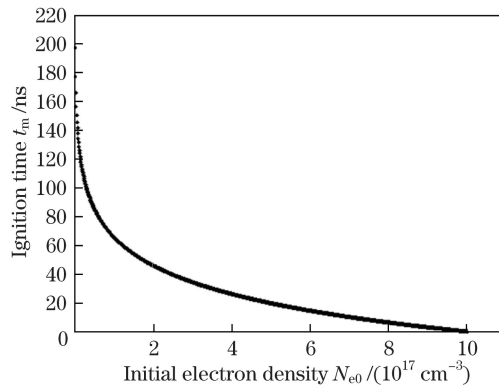


图 4 初始电子密度与等离子体闪光的点燃时间之间的关系

Fig. 4 Relationship between initial electron density and ignition time of plasma flash

4 结 论

以光学厚度为 $\lambda/4$ 的单层 Al 薄膜为例,假设作用的强激光波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$,脉宽 $\tau_p = 10 \text{ ns}$,能量 $E = 282 \text{ mJ}$,聚焦光斑半径 $r = 0.04 \text{ cm}$,计算得到薄膜等离子体闪光的点燃时间 t_m 约为 41.3 ns 。

模拟仿真了等离子体闪光点燃时间与入射激光波长、激光入射能量、激光脉宽、激光聚焦光斑半径等参数的关系。研究表明,在其他条件不变的情况下,激光聚焦光斑半径和脉宽越大, t_m 就越大;激光波长和入射激光能量越大, t_m 就越小;薄膜材料电离能越小, t_m 就越小;薄膜表面存在杂质和缺陷, t_m 变小。这些研究结果对激光维持燃烧波和爆轰波的产生机制有着重要意义,也为薄膜损伤等离子体闪光识别方法提供了一定参考。

参 考 文 献

- [1] Su J H, Xu J Q, Yang C, *et al.* Influence of deposition temperature on optical and laser-induced damage properties of LaTiO₃ films[J]. Surface Review and Letters, 2015, 22(6): 1550070.
- [2] Su Junhong, Lü Ning, Ge Jinman. Characteristics of plasma shock waves in laser-induced film damage[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1203003.
苏俊宏, 吕 宁, 葛锦蔓. 激光薄膜损伤中等离子体冲击波特征研究[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1203003.
- [3] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi, *et al.* Study of laser-induced plasma on dielectric thin-films[J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(4): 322-327.
倪晓武, 陆 建, 贺安之, 等. 激光与介质薄膜作用过程的等离子体诊断[J]. 光学学报, 1990, 10(4): 322-327.
- [4] Manenkov A A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: Today's state of understanding and problems[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 010901.
- [5] Bude J, Miller P, Baxamusa S, *et al.* High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5838-5851.
- [6] Chen Lang, Lu Jianying, Wu Junying, *et al.* Laser supported detonation wave[M]. BeiJing: National Defence Industry Press, 2011: 27.
陈 朗, 鲁建英, 伍俊英, 等. 激光支持爆轰波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 27.
- [7] Carroll P K, Kennedy E T. Laser-produced plasmas[J]. Contemporary Physics, 1981, 22(1): 61-96.
- [8] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, *et al.* Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 94.
孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 94.
- [9] Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of interaction between laser and materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 10.

- 陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 10.
- [10] Young M, Hercher M, Wu C Y. Some characteristics of laser-induced air sparks[J]. Journal of Applied Physics, 1966, 37(13): 4938-4940.
- [11] Liu Yufeng, Ding Yanjun, Peng Zhimin, *et al.* Spectroscopic study on the time evolution behaviors of the laser-induced breakdown air plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(20): 205205.
刘玉峰, 丁艳军, 彭志敏, 等. 激光诱导击穿空气等离子体时间分辨特性的光谱研究[J]. 物理学报, 2014, 63(20): 205205.
- [12] Pirri A N, Schlier R, Northam D. Momentum transfer and plasma formation above a surface with a high power CO₂ laser[J]. Applied Physics Letters, 2003, 21(3): 79-81.
- [13] Mori K, Komurasaki K, Arakawa Y. Influence of the focusing f number on the heating regime transition in laser absorption waves[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(10): 5663-5667.
- [14] Sturmer E, von Allmen M. Influence of laser-supported detonation waves on metal drilling with pulsed CO₂ laser[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(11): 5648-5654.
- [15] Mori K, Komurasaki K, Arakawa Y. Laser produced plasma in high-speed flows[C]. SPIE, 2001, 4183: 424360.
- [16] Kim J U, Lee H J, Kim C, *et al.* Characteristics of laser-produced plasmas in a gas filled chamber and in a gas jet by using a long pulse laser[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 5497-5503.
- [17] Zhou Jun, Feng Weili, Liu Yong, *et al.* Laser-induced plasma by high speed photography[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 1027-1031.
周 军, 冯伟利, 刘 勇, 等. 激光等离子体闪光高速摄影法实验研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 1027-1031.
- [18] Kawahara N, Beduneau J L, Nakayamal T, *et al.* Spatially, temporally, and spectrally resolved measurement of laser-induced plasma in air[J]. Applied Physics B, 2007, 86(4): 605-614.
- [19] Yuan Zhongcai, Shi Jiaming. Impacts of collision frequency on ability of plasma to absorb the electromagnetic wave[J]. Journal of Microwaves, 2005, 21(z1): 49-52.
袁忠才, 时家明. 碰撞频率对等离子体吸波特性的影响[J]. 微波学报, 2005, 21(z1): 49-52.