

文章编号: 0258-702X(2002)01-0043-04

等离子体再辐射对紫外激光-靶耦合效率的影响

张建泉, 刘 峰, 强希文, 陈荣华

(西北核技术研究所 陕西 西安 710024)

提要 在对激光产生的等离子体做等温膨胀的假定下,应用解析方法研究了紫外强激光脉冲辐照金属靶材时,计及等离子体再辐射对激光-靶材耦合效应的影响。其结果与有关实验数据相一致,合理地解释了实验结果。

关键词 紫外强激光脉冲,激光等离子体,辐射耦合增强效应,辐射转换效率

中图分类号 O 53 文献标识码 A

Plasma Re-radiation Effects on Coupling Efficiency of UV Laser-targets

ZHANG Jian-quan, LIU Feng, QIANG Xi-wen, CHEN Rong-hua

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

Abstract In the hypothesis of plasma isothermal expanding, enhanced effect of radiation coupling induced by laser-generated plasma on aluminum target is studied analytically. The calculation results have demonstrated the significance of plasma re-radiation in interaction of powerful pulsed laser with metal target. These results agreed with experimental data well, and explained the experimental results theoretically.

Key words pulsed UV laser, laser-generated plasma, enhanced effect of radiation coupling, radiation conversion efficiency

1 引 言

研究强激光脉冲辐照靶材表面时产生高温、高压等离子体层的过程以及该等离子体层的辐射特性,对于了解激光-靶材作用机理以及激光聚变和激光武器效应,具有十分重要的意义。从而成为国内外激光技术和激光效应研究的热点之一。

紫外强激光脉冲产生的等离子体层,在吸收入射激光的同时,会发出相当强的波长从紫外到 X 光的再辐射,等离子体层具有“光子转换器”的作用。再辐射出的更短波长的次级辐射,与靶材表面有着更为有效的强耦合,因此,在激光效应研究中,等离子体再辐射是一个相当重要的问题^[1,2]。

在靶材稳态气化、等离子体等温膨胀和激光逆韧致吸收的单流体、双温度假定下,我们应用解析方法,推导了不考虑等离子体再辐射时,等离子体特征

参与与激光参数、靶材物质参数间的定标关系^[3]。本文推广了上述模型,在能量平衡方程中引入等离子体再辐射系数,它是激光参数、等离子体特征参数的函数。通过迭代计算,得到计及等离子体再辐射后的等离子体参数、辐射转换效率,及其对靶材烧蚀质量和烧蚀压力的影响。该物理模型给出的计算数据与国外相关文献的结果相一致。

2 物理模型

2.1 等离子体参数

在强激光脉冲的辐照下,假定靶材的气化是瞬时而稳态的过程,同时气化等离子体中电子和离子具有相同的膨胀飞散速度和不同的温度,等离子体对激光的吸收主要来自电子的逆韧致吸收。从而,我们在文献[3]中给出了激光等离子体温度、密度、

收稿日期 2000-09-08;收到修改稿日期 2000-12-18

作者简介 张建泉(1942.10—)男,陕西省泾阳县人。现任西北核技术研究所研究员。主要从事辐射物理和激光物理的理论研究。E-mail: zhou@nint.ac.cn

质量烧蚀速率、烧蚀压力和飞散速度。如果在这些方程的推导过程中,在能量平衡方程中用 $(1 - \alpha)I$ 取代激光强度 I ,则可得如下解析形式

$$T_e = 2.76 \times 10^4 \frac{M^{1/8} \tau^{1/4} Z^{3/4}}{(Z + f)^{5/8}} \sqrt{(1 - \alpha)\lambda} \quad [^\circ\text{K}] \quad (1)$$

$$\rho = 8.71 \times 10^{-13} \frac{M^{21/16} (1 - \alpha)^{1/4} I^4}{\lambda^{3/4} \tau^{3/8} Z^{9/8} (Z + f)^{9/6}} \quad [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (2)$$

$$m_v = 1.46 \times 10^{-6} \frac{M^{7/8} \tau^{3/4} \sqrt{(1 - \alpha)I}}{Z^{3/4} (Z + f)^{3/8} \lambda^{1/2}} \quad [\text{g}/\text{cm}^2] \quad (3)$$

$$P_a = 4.3 \frac{M^{7/16} (1 - \alpha)^{3/4} I^4}{\lambda^{1/4} \tau^{1/8} Z^{3/8} (Z + f)^{3/6}} \quad [\text{dyne}/\text{cm}^2] \quad (4)$$

$$V = 1.52 \times 10^6 \sqrt{(1 - \alpha)\lambda\tau} \frac{Z^{3/8} (Z + f)^{3/6}}{M^{7/16}} \quad [\text{cm}/\text{s}] \quad (5)$$

其中 α 为考虑等离子体再辐射后对耦合效应的修正因子,它与等离子体温度、密度等特征参量有关,需要进行迭代计算;上面各式中的相关参量及其单位与文献[3]相同。

2.2 等离子体的辐射与自吸收

短脉冲强激光在固体表面产生的等离子体,通常处于高温(几十到几百电子伏特)、高压(GPa ~ TPa)状态,近似为一光学厚的等离子体薄层。等离子体的辐射发射和吸收满足基尔霍夫定律,即

$$j_\nu = K_\nu' B_{\nu p} \quad (6)$$

其中 j_ν 为单位时间、单位体积在频率 ν 附近单位频率区间沿辐射方向的单位立体角内的辐射能; $K_\nu' = K_\nu [1 - \exp(-h\nu/KT)]$,为考虑受激辐射后的辐射吸收系数; $B_{\nu p}$ 为 Planck 黑体辐射强度

$$B_{\nu p} = \frac{2h\nu^3}{c^2 [\exp(h\nu/KT) - 1]} \quad (7)$$

假定等离子体层厚度为 d ,那么,沿 Ω 方向单位立体角内的辐射强度为

$$B_i(\Omega) = \int_0^{d/\cos\theta} j_\nu(s) \exp\left[-\int_0^s K_\nu'(s') \lambda ds'\right] ds \quad (8)$$

如果辐射层足够薄,可近似认为吸收系数为一常数,那么,在与表面法线方向夹角为 θ 的方向上,单位立体角内的辐射强度为

$$B_i(\theta) = \int_0^{d/\cos\theta} B_{\nu p} K_\nu' \exp(-K_\nu' \lambda s) ds = B_{\nu p} [1 - \exp(-K_\nu' d/\cos\theta)], \quad (0 \leq \theta \leq \pi/2) \quad (9)$$

对立体角积分,给出等离子体层一侧沿法线 n 方向

的辐射能流为

$$F_{\nu p}(n) = \pi B_{\nu p} [1 - 2E_3(K_\nu' d)] \quad (10)$$

这里, E_3 为指数函数积分,即

$$E_3(K_\nu' d) = \int_0^1 y \exp(-K_\nu' d/y) dy \quad (11)$$

(10)式给出的辐射能流是频率相关的,通常需要对频率分群,从而给出辐射能流的群分布。辐射能流入射到靶材表面,会发生反射。 $\Delta\nu_i$ 频率区间的平均反射系数为

$$R_{\Delta\nu} = \frac{\int_{\Delta\nu_i} R_\nu B_{\nu p} d\nu}{\int_{\Delta\nu_i} B_{\nu p} d\nu} \quad (12)$$

如果更仔细地把等离子体层分为具有不同温度的 M 层,各层具有不同的辐射吸收系数,此时(10)式改写为较复杂的形式

$$F_{\nu p} = \pi B_{\nu p} \left([1 - 2E_3(K_\nu'^{(1)} d^{(1)})] + 2\pi \sum_{i=2}^M B_{\nu p}^{(i)} [E_3(\sum_{j=1}^{i-1} K_\nu'^{(j)} d^{(j)}) - E_3(\sum_{j=1}^i K_\nu'^{(j)} d^{(j)})] \right) \quad (13)$$

由于短脉冲激光产生的等离子体层很薄,因此,可以把等离子体简化处理为一光学厚度均匀的薄层。同时,由于再辐射以紫外以至 X 射线为主,则靶面反射系数 R 可以忽略不计。这样,进入靶内的辐射能流来自入射激光本身和等离子体的再辐射,即

$$F = I + F_p \quad (14)$$

其中 $I = I_0 \exp(-\int_0^d K' dx)$, $F_p = \int_0^\infty F_{\nu p} d\nu$ (15)

其中, K' 为计及等离子体再辐射时的平均吸收系数。最后,相应的耦合效率可以表示为

$$\gamma = \frac{\int_0^t F dt}{\int_0^t I_0 dt} \quad (16)$$

3 计算结果与讨论

按照上述物理模型,假定等离子体为一均匀的光学厚层,其辐射能谱为黑体谱,计算了准直脉冲紫外激光辐照铝靶时,气化等离子体形成和耦合系数随激光参数的变化情况。图1给出等离子体厚度一定时,铝等离子体发射的辐射能流随等离子体温度、密度的变化情况。可以看出,随着等离子体温度的升高和密度的增加,辐射能流越来越大,但总低于黑

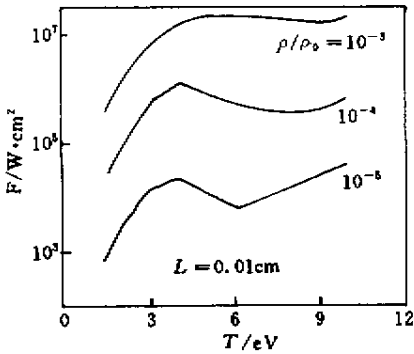


图1 等离子体密度、温度与辐射能流

Fig.1 Density, temperature and radiation energy flux of plasma

体辐射。曲线上的凹处是辐射吸收系数改变的结

果。可以想象,随着温度的升高,再辐射光子能量增大,其穿透能力也越强,因此,对靶的烧蚀越加明显。

表1给出激光强度分别为 10^{12} W/cm² 和 10^{13} W/cm², 波长分别为 0.248 μ m 和 0.35 μ m, 计及再辐射效应时, 等离子体的温度、密度、烧蚀压力及辐射能流的大小。表中数据表明, 随着激光强度的增加, 等离子体温度升高, 但密度变化不是太大, 然而烧蚀压力和辐射能流明显增加。

图2给出入射激光强度为 10^{13} W/cm², 波长为 0.35 μ m 时, 铝等离子体的辐射转换效率随激光脉冲持续时间 τ 的变化关系。并与文献[4]实验结果进行了比较。当激光脉冲持续时间 τ 分别为 1.5 ns 和 3 ns 时, 我们计算得出的辐射转换效率相应为 27.5% 和 32.9%, 文献[4]给出的实验结果分别为 27.1% 和 30.7%。二者比较一致。

表1 等离子体参数、辐射能流与激光参数的关系

Table 1 Relationship of plasma parameters and radiation energy flux with laser parameters

I /W·cm ⁻²	τ /ns	$\lambda = 0.248 \mu\text{m}$				$\lambda = 0.35 \mu\text{m}$			
		$T_e / \times 10^6 \text{ K}$	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	P_a / Pa	$F / \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$T_e / \times 10^6 \text{ K}$	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	P_a / Pa	$F / \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
10^{12}	0.25	0.97	1.3×10^{-2}	9.5×10^{10}	1.1×10^{11}	1.18	9.6×10^{-3}	8.9×10^{10}	7.0×10^{10}
	0.50	1.14	9.5×10^{-3}	8.5×10^{10}	1.3×10^{11}	1.39	7.2×10^{-3}	8.0×10^{10}	1.4×10^{11}
	0.75	1.25	7.9×10^{-3}	7.9×10^{10}	1.8×10^{11}	1.51	6.0×10^{-3}	7.3×10^{10}	1.9×10^{11}
	1.00	1.29	6.9×10^{-3}	7.1×10^{10}	2.1×10^{11}	1.54	5.2×10^{-3}	6.5×10^{10}	2.0×10^{11}
	1.25	1.33	6.3×10^{-3}	6.7×10^{10}	2.4×10^{11}	1.65	4.7×10^{-3}	6.3×10^{10}	2.5×10^{11}
	1.50	1.37	5.8×10^{-3}	6.4×10^{10}	2.6×10^{11}	1.69	4.4×10^{-3}	6.0×10^{10}	2.7×10^{11}
	1.75	1.44	5.4×10^{-3}	6.3×10^{10}	3.0×10^{11}	1.74	4.1×10^{-3}	5.8×10^{10}	3.0×10^{11}
	2.00	1.46	5.0×10^{-3}	5.9×10^{10}	3.2×10^{11}	1.77	3.8×10^{-3}	5.6×10^{10}	3.1×10^{11}
10^{13}	0.25	3.09	1.8×10^{-2}	5.0×10^{11}	1.4×10^{12}	3.67	1.4×10^{-2}	4.5×10^{11}	1.0×10^{12}
	0.50	3.60	1.3×10^{-2}	4.3×10^{11}	1.9×10^{12}	4.33	1.0×10^{-2}	4.0×10^{11}	1.4×10^{12}
	0.75	3.76	1.1×10^{-2}	3.8×10^{11}	2.2×10^{12}	4.72	8.6×10^{-3}	3.7×10^{11}	1.5×10^{12}
	1.00	4.07	1.0×10^{-2}	3.6×10^{11}	2.6×10^{12}	5.03	7.6×10^{-3}	3.5×10^{11}	1.8×10^{12}
	1.25	4.09	8.9×10^{-3}	3.3×10^{11}	2.7×10^{12}	5.07	6.8×10^{-3}	3.2×10^{11}	2.0×10^{12}
	1.50	4.20	8.2×10^{-3}	3.2×10^{11}	2.8×10^{12}	5.35	6.5×10^{-3}	3.1×10^{11}	2.1×10^{12}
	1.75	4.42	7.7×10^{-3}	3.1×10^{11}	2.9×10^{12}	5.54	6.2×10^{-3}	3.0×10^{11}	2.2×10^{12}
	2.00	4.52	7.3×10^{-3}	3.0×10^{11}	3.0×10^{12}	5.64	5.6×10^{-3}	2.9×10^{11}	2.3×10^{12}

图3给出激光强度 3.16×10^{12} W/cm², 波长 0.248 μ m 时, 靶面烧蚀质量随激光持续时间的变化关系。由图可以看出, 当辐射系数 $\alpha = \alpha$ (图中虚线) 时, 我们的计算结果与文献[5]一致; 当辐射系数 $\alpha > 0$ (图中实线) 时, 我们计算的烧蚀质量比文献[5]值略为偏大, 这可能是由于对黑体辐射谱的假定造成的, 这里近似地忽略了靶面对各种波长辐射的反射。

图4给出不计等离子体再辐射时, 波长为 0.248

μ m 脉冲持续时间 1 ns 的激光辐照, 铝靶表面烧蚀速率随激光强度的变化的计算结果与文献[5]的比较。

图5给出再辐射计及与否时, 因等离子体膨胀飞散而施于靶面的烧蚀压力随激光脉冲持续时间的变化关系。图中实线和虚线分别代表是否考虑等离子体再辐射的计算结果。显然, 再辐射导致烧蚀压力有所降低, 这与文献[5]的结论相一致。

值得指出的是, R. Popif^[6]对强度 $(2.5 \sim 8) \times$

10^{12} W/cm^2 ,波长 $0.248 \mu\text{m}$,脉冲持续时间 1.8 ns 的激光辐照铝靶时 ,测量了光子能量大于 100 eV 的光的转换效率约为 21% ,且在该强度范围 ,转换效率随激光强度的增加而略有增大。R. Marchand^[5]对强度 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$,波长 $0.248 \mu\text{m}$,脉冲持续时间 1.8 ns 的激光辐照铝靶 ,得到随激光强度的增加 ,

辐射转换效率从 33% 逐渐下降到 20% ,他分析其原因是 :一方面在数值模拟中忽略了侧向能量输运 ,另一方面实验测量中未包含等离子体辐射的全部光谱区域。D. Duston^[4]指出 ,辐射转换效率随波长增加而下降。我们的计算结果与 R. Popil 和 D. Duston 的结论是一致的。

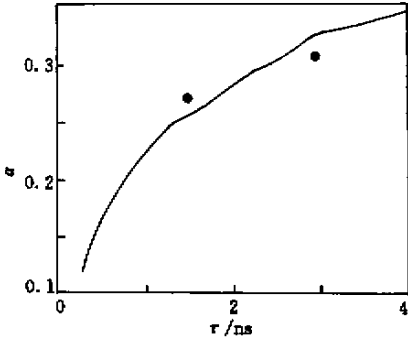


图 2 辐射转换效率与激光脉宽的关系

Fig.2 Radiation conversion efficiency vs laser pulse duration

$$I = 10^{13} \text{ W/cm}^2, \lambda = 0.35 \mu\text{m}$$

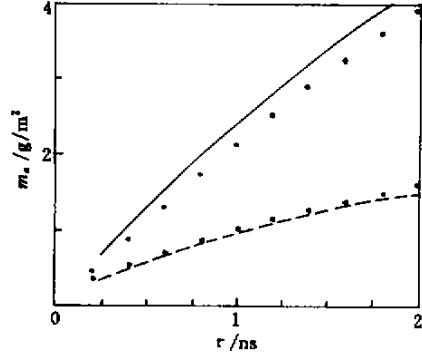


图 3 烧蚀质量与激光脉宽的关系

Fig.3 Ablated mass vs laser pulse duration

$$I = 3.16 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2, \lambda = 0.248 \mu\text{m}$$

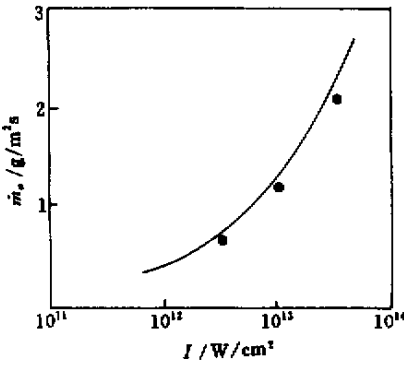


图 4 烧蚀速率与激光强度的关系

Fig.4 Ablation rate vs laser intensity

$$\lambda = 0.248 \mu\text{m}, \tau = 1 \text{ ns}$$

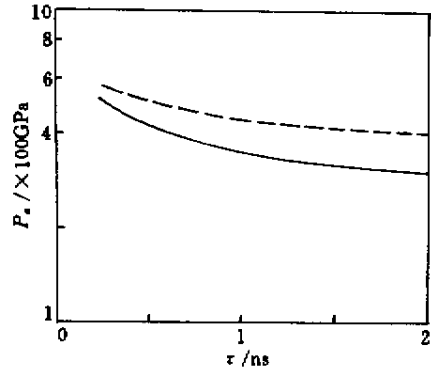


图 5 烧蚀压力与激光脉宽的关系

Fig.5 Ablation pressure vs laser pulse duration

$$I = 10^{13} \text{ W/cm}^2, \lambda = 0.248 \mu\text{m}$$

参 考 文 献

- 1 V. H. Shui. Effect of vapor plasma on the coupling of laser radiation with aluminum [J]. *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer* ,1978 , **20** :627 ~ 636
- 2 Dong Yanbing , Wang Fuheng. An approximate method for 1-D radiative transfer problem [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束) , 1992 , **4** (3) :424 ~ 430 (in Chinese)
- 3 Zhang Jianquan. Analytic research of laser-generated plasma parameters [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 1995 , **B4**

(4) 323 ~ 328 (in English)

- 4 D. Duston , R. W. Clark , J. Davis. Effects of radiation on spectra , gradients , and preheat in laser-produced plasmas [J]. *Phys. Rev. A* , 1985 , **31** (5) 3220 ~ 3230
- 5 R. Marchand , R. Fedosejevs , C. E. Capjack. Simulation of laser-plasma interactions with atomic and radiation effects [J]. *Laser and Particle Beams* , 1988 , **6** (part 2) :183 ~ 197
- 6 R. Popil , P. D. Gupta , R. Fedosejevs *et al.* . Measurement of KrF-laser-plasma x-ray radiation from targets with various atomic numbers [J]. *Phys. Rev. A* , 1987 , **35** (9) 3874 ~ 3882