

强激光在高 Z 等离子体中吸收的波长关系

刘慎业 郑志坚 唐道源 腾 浩
陈涵德 陈玉婷 苏春晓 张海英

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 利用“神光 I”输出的 ~ 500 J、 $1.05 \mu\text{m}$, ~ 200 J、 $0.53 \mu\text{m}$ 激光和“星光 II”输出的 ~ 70 J、 $0.351 \mu\text{m}$ 激光, 实验研究了激光与金圆盘靶作用产生的等离子体对激光的吸收, 获得了激光 10° 、 45° 入射 Au 盘靶吸收的波长关系。实验结果与一维平面等离子体吸收模型计算的结果基本相符。

关键词 激光等离子体, 吸收, 吸收模型, 圆盘靶。

1 引 言

激光吸收是激光聚变感兴趣的问题, 高的吸收是取得高增益内爆的一个重要条件。短波长激光不仅可以降低不稳定性如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)和双等离子体衰变(TPD)的增长率, 提高其阈值功率密度, 有效地抑制非线性过程中产生的散射, 减少预热靶丸的超热电子^[1, 2], 而且还可以使激光能进入等离子体高密度区, 增加逆韧致吸收份额, 改善吸收的品质^[1, 3]。短波长激光在激光聚变中具有优越性。目前, 美国的 Nova^[4], 日本的 Gekko-VII^[5] 和我国正在升级中的“神光”装置上的聚变实验均采用 $0.351 \mu\text{m}$ 激光。靶对激光的吸收是激光聚变实验中的重要参数, 研究吸收的规律可为腔靶激光辐照条件的选择, 优化靶的设计提供实验依据, 同时还可以校验计算机程序。

八十年代, 国外开始注意到短波长激光驱动内爆的优越性。美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL) 1979 年报道了利用 Argus($f/2.5$) 的一路研究了 50 J~ 500 J、 0.2 ns~ 1.0 ns、 $1.06 \mu\text{m}$ 激光与 Au 盘靶作用的结果。他们改变激光焦斑($150 \mu\text{m}$ ~ $400 \mu\text{m}$), 使激光强度在 7×10^{13} ~ 3×10^{15} W/cm² 间变化, 用热电偶等离子体卡计和盒式卡计测量等离子体的能量研究激光吸收。表 1 列出了他们的实验结果^[6]:

Table 1. Absorption of $1.06 \mu\text{m}$ lasers with gold disks at Argus

intensity/(W/cm ²)	3×10^{15} (450 J)	3×10^{14} (450 J)	3×10^{14} (45 J)
0° incidence	36%	50%	54%
45° incidence	33%	42%	

1983 年劳伦斯·利弗莫尔实验室报道了他们利用 Argus($f/2$) 的一路倍频后输出的 3 J

~ 200 J、0.6 ns~ 0.7 ns、0.53 μm 激光辐照 Au 盘靶的实验, 用盒式卡计测量吸收, 获得了如图 1 所示的吸收曲线^[7]。

1991 年劳仑斯·利弗莫尔实验室报道了他们利用 No-va 的一路三倍频后输出的 350 J~ 2400 J、0.351 μm 、1.0 ns 的方形脉冲激光辐照 Au 盘靶研究吸收的实验结果, 焦斑在 250 μm ~ 1200 μm 间变化, 改变入射角(0°~ 60°), 用 30 只 PIN 探测器测量散射激光的能量, 以研究吸收的强度关系和角度关系^[8]。

1994 年国内开始研究短波长激光与盘靶作用的吸收规律, 目的在于为“神光 II”上的 0.351 μm 激光黑腔靶实验提供激光第一打击参数的参考数据。尽管国外同行开展了这方面的研究工作, 但是他们的实验条件与国内条件有很大不同, 如他们研究吸收的角度关系时, 固定的强度一般为 $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 而国内往往更关心强度为 $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 激光吸收的角度关系; 由于长的脉冲导致长尺度的等离子体和高的吸收, 故激光脉冲宽度的差异对吸收的影响不可低估。特定入射角(如 45°)下吸收的波长关系目前未见国外报道, 45°是“神光 II”腔靶实验激光入射的角度, 有必要研究此角度(如 45°)下激光吸收的波长关系。另外国内与劳仑斯·利弗莫尔实验室在诊断方法上有较大不同, 前者采用直接测量方法, 后者采用间接测量方法。且国内布置的探测点(80 个)明显多于劳仑斯·利弗莫尔实验室(< 30), 劳仑斯·利弗莫尔实验室在文献[8]中认为 PIN 的测量精度为 50%, 而本工作所使用的热释电等离子体卡计精度可达到 5%, 吸收诊断精度上差别较大。作者认为, 针对国内特定的实验条件, 仔细研究激光吸收的规律仍有意义。

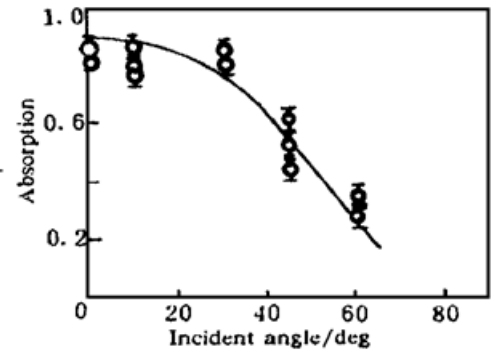


Fig. 1 The angular dependence of absorption^[7]

2 实 验

本工作 1.05 μm 、0.53 μm 激光盘靶实验在“神光 I”高功率激光装置上完成。0.351 μm 激光盘靶实验在“星光 II”上完成。表 2 是激光辐照 Au 盘靶的实验条件。

Table 2. Experimental condition of laser irradiation

wavelength	energy	f /number	angle of incidence	spot size	pulse width	intensity
1.05 μm	~ 200 J	1.7	10°, 45°	~ 200 μm	~ 0.8 ns	~ $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$
0.53 μm	~ 200 J	1.7	10°, 45°	~ 200 μm	~ 0.8 ns	~ $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$
0.351 μm	~ 70 J	3	10°, 45°	~ 150 μm	~ 0.8 ns	~ $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$

“神光 I”上使用的 Au 盘靶由粘贴在 Cu 环上的 C_8H_8 薄膜支撑, Cu 环固定在靶杆上, 如图 2 所示。“星光 II”上使用的 Au 盘靶由碳丝直接支撑在靶杆上, 如图 3 所示。两种圆盘直径分别为 700 μm 、600 μm , 厚为 15 μm , 表面光洁度优于 30 nm。激光辐照在 Au 圆盘上。

实验过程中, 在靶的周围布置分立等离子体卡计, 在各探测位置测量激光产生的等离子体角分布 $D_{pl}(\theta, \varphi)$, 拟合得角分布函数 $D_{pl}(\theta, \varphi)$, 角分布函数 D_{pl} 空间积分得总的等离子体能量 E_{pl} :

$$E_{pl} = \iint D_{pl}(\theta, \varphi) \sin \theta \, d\theta d\varphi \quad (1)$$

则靶的吸收系数为:

$$\eta_a = E_{pl}/E_L \tag{2}$$

E_L 为激光能量。

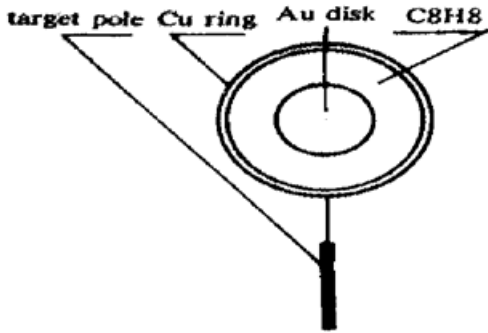


Fig. 2 Au disk target used at ‘Sheng Guang’

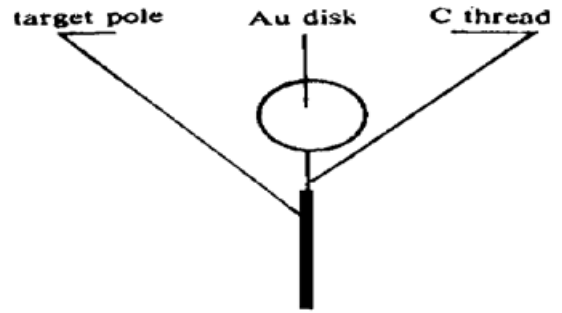


Fig. 3 Au disk target used at ‘Xing Guang’

3 实验结果

图4、图5是72只分立双通道等离子体卡计测量的0.351 μm激光10°、45°入射Au盘靶产生的等离子体能量角分布。图中θ是探测方向与靶法线间的夹角。

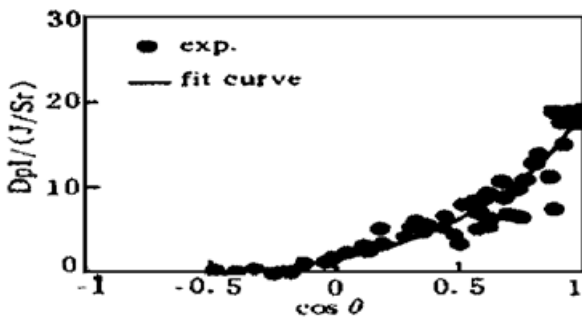


Fig. 4 Distribution of 0.351 μm laser-produced plasma at 10° angle of incidence

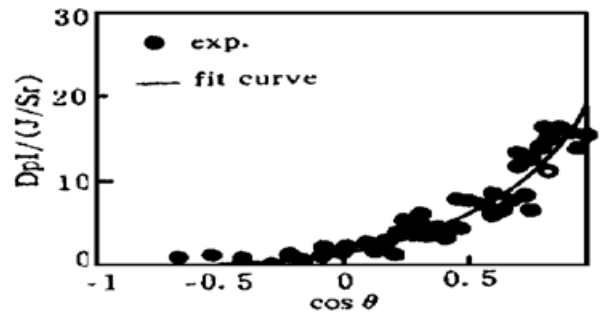


Fig. 5 Distribution of 0.351 μm laser-produced plasma at 45° angle of incidence

图4、图5中的实验点实际上包含了不同的φ角，但这些实验点位于同一cos θ和D_{pl}(θ)构成的坐标系中仍能用一条曲线拟合，说明等离子体的角分布关于靶的法线旋转对称。当激光45°入射时，实验点相对拟合曲线有点离散。这可能是45°入射时镜向散射强，由于误差传递的作用，两道差分得出的等离子体能量误差大造成的。图6、图7分别是三种波长激光10°、

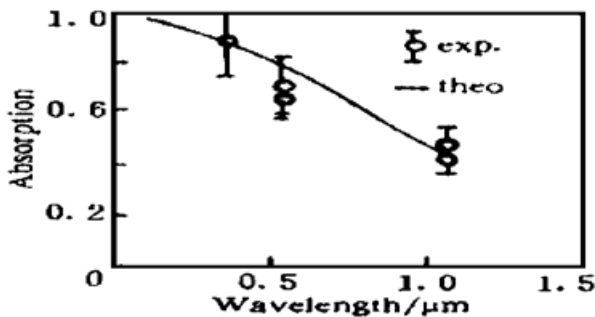


Fig. 6 Wavelength dependence of absorption at 10° angle of incidence

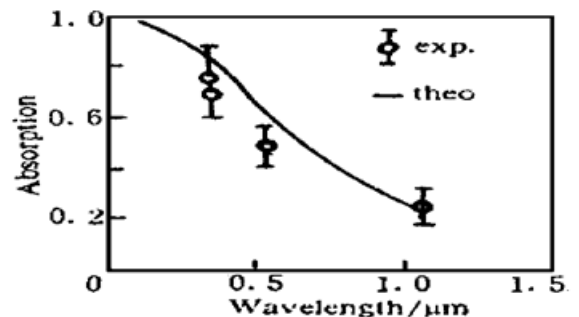


Fig. 7 Wavelength dependence of absorption at 45° angle of incidence

45°入射 Au 盘靶吸收的波长关系。

实验结果表明, 无论激光是 10°还是 45°入射 Au 盘靶, 吸收与波长有强烈的依赖关系。图中的曲线是一维平面等离子体吸收模型计算的结果。

4 结果的分析与讨论

为了解释实验结果, 提出下列简单的计算模型:

- 1) 激光脉冲为方形脉冲;
- 2) 电子、离子同温, 晕区电离度由电晕模型描述, 晕区电子温度随时间慢变;
- 3) 晕区等离子体为空间等温一维平面等离子体, 晕区等离子体密度为指数分布:

$$\rho = \rho_s \exp [(x - x_s)/L] \quad (3)$$

$L = \alpha C_s t$ 为密度梯度标长, $\alpha = 0.2$ 为修正值。 $C_s = [(Z + 1) T_e / m_j]^{0.5}$ 为等温声速。 x_s 、 ρ_s 为声速面位置和密度, 声速点 $\rho_s = \rho_c \cos^2 \theta$ 为激光回转点, θ 为入射角。

4) 激光吸收以逆韧致吸收为主, 伴随有受激布里渊散射。受激布里渊散射主要发生在等离子体密度稀薄区, 它占入射激光份额由拟合公式描述^[7]:

$$\eta_{\text{SBS}} = [0.15 + 0.1 \lg(I_{14})] \lambda_{\mu\text{m}}$$

$\lambda_{\mu\text{m}}$ 是以 μm 为单位的光波长, I_{14} 是以 10^{14} W/cm^2 为单位的激光强度。

自由电子在激光电场中受迫振动, 获得相干能量, 电子与离子碰撞, 将相干能量变为热能, 从而加热等离子体的方式叫逆韧致吸收。逆韧致吸收系数为^[11]:

$$K_{\text{ib}} = 2.91 \frac{Z \ln \Lambda (n_e/n_c)^2}{\lambda_{\mu\text{m}}^2 T_{\text{keV}}^{3/2} (1 - n_e/n_c)^{1/2}}, \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (4)$$

逆韧致吸收系数沿光路积分得时间相关的吸收系数 $\eta_{a(t)}$ 。考虑受激布里渊散射份额, $\eta_{a(t)}$ 对时间平均, 得时间平均的吸收系数 η_a :

$$\eta_a = (1 - \eta_{\text{SBS}}) \frac{1}{\tau_L} \int_0^{\tau_L} \eta_{a(t)} dt = (1 - \eta_{\text{SBS}}) \left\{ 1 + \frac{1}{B} [\exp(-B) - 1] \right\} \quad (5)$$

式中 $B = 1.522 \ln \Lambda Z C_s \tau_L \cos^3 \theta / \lambda_{\mu\text{m}}^2 T_{\text{keV}}^{3/2}$; $\ln \Lambda = \ln(840 \lambda_{\mu\text{m}} T_{\text{keV}})$ 是库仑对数。 Z 是电离度, T_{keV} 是以 keV 为单位的电子温度。考虑能量守恒, 有:

$$\eta_a I_L = \eta_x \eta_s I_L + 4 \rho_s C_s^3 + \rho_s C_s \epsilon_I \quad (6)$$

式中 ϵ_I 为单位质量等离子体的电离能, I_L 为激光强度, η_x 为 X 光转换效率。联立(5)、(6)式并数值求解, 可自洽地求出给定激光入射条件(I_L , θ , λ_L) 下的电离度、电子温度和吸收系数。根据上述模型编制了吸收计算程序 Absorption 来计算吸收^[12], 图 6、图 7 中的曲线就是程序 Absorption 计算的结果。可见以逆韧致吸收为主的模型计算较好地再现了实验的结果。可以肯定这三种波长激光在等离子体中以逆韧致吸收为主。便于比对, 图 8 中给出了美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的实验结果^[7]。图中实验点是他们的实验结果, 曲线是 Absorption 程序计算的结果, 两者基本符合, 说明程序计算是可靠的。

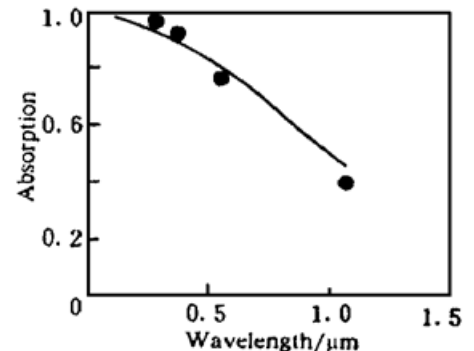


Fig. 8 Wavelength dependence of absorption at normal incidence^[7]

由于模型过于简单,理论计算与实验仍有差别,特别是激光 45° 入射时,实验测得的吸收偏离理论结束较远。这可能是二维效应造成的。因此,吸收的精确计算,需考虑二维问题。(7)式是美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的 Lasnex 程序模拟的电子温度定标规律^[8]:

$$T_{\text{keV}} = 2.3 I_{14}^{0.45} \lambda_{\mu\text{m}}^{0.85} \quad (7)$$

电磁波在等离子体中的色散关系为:

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + K^2 c^2 \quad (8)$$

式中 ω 、 ω_{pe} 为激光频率和等离子体频率, K 为波数, c 为光速。由(8)式可知,激光到达的最高密度为:

$$n_s = n_e \cos^2 \theta = \frac{\omega_i^2 \epsilon_0 m_e}{e^2} \cos^2 \theta \propto \frac{1}{\lambda^2} \cos^2 \theta \quad (9)$$

式中 e 为电子电量。

可见,短波长激光产生的等离子体电子温度低,且激光能进入更高的密度区,电子离子的碰撞频率高,逆韧致吸收高,因此,短波长激光有利于吸收。

结 论 实验表明,1.05 μm 、0.53 μm 、0.351 μm 激光 10° 、 45° 入射 Au 盘靶产生的等离子体对激光的吸收以逆韧致吸收为主,激光波长短,吸收高。 10° 入射,1.05 μm 、0.53 μm 、0.351 μm 三种波长激光与 Au 盘靶作用中激光吸收分别是45%、78%、90%,但 45° 入射时,这三种波长激光的吸收有较大幅度下降,分别是25%、47%和75%。这意味着0.351 μm 激光 45° 入射,仍有~25%激光被散射。因此,今后在“神光II”装置上进行黑腔实验仍应充分考虑0.351 μm 激光 45° 打击腔壁产生的强烈散射激光对内爆靶丸的破坏作用,应及早研究散射激光的传播,空间分布情况,寻找屏蔽散射激光的措施,避免激光直接打击内爆靶丸。

作者衷心感谢“神光”和“星光”两台激光装置运行组人员的辛勤劳动和支持。

参 考 文 献

- [1] E. M. Campbell, The physics of megajoule, large-scale, and ultrafast short-scale laser plasma. *Phys. Fluids*, 1992, **B4**(11) : 3781~ 3799
- [2] R. P. Drake, Laser-plasma-interaction experiments using multikilojoule lasers. *Laser and Particle Beams*, 1988, **6**(2) : 235~ 243
- [3] W. L. Kruer, Intense laser plasma interactions: from Janus to Nova. *Phys. Fluids*, 1991, **B3**(8) : 2356~ 2366
- [4] E. M. Campbell, J. T. Hunt, E. S. Bliss *et al.*, Nova experimental facility. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(8) : 2101~ 2106
- [5] M. Yamanaka, C. S. Nakai, T. Yabe *et al.*, Laser implosion of high-asped-ratio targets produces thermonuclear neutron yields exceeding 10^{12} by use of shock multiplexing. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(15) : 1575~ 1578
- [6] M. D. Rosen, D. W. Phillion, V. C. Rupert *et al.*, The interaction of 1.06 μm laser radiation with high Z disk targets. *Phys. Fluids*, 1979, **22**(10) : 2020~ 2031
- [7] W. C. Mead, E. M. Campbell, K. G. Estabrook *et al.*, Laser irradiation of disk targets at 0.53 μm wavelength. *Phys. Fluids*, 1983, **26**(8) : 2316~ 2331
- [8] R. P. Drake, R. L. Kauffman, B. F. Lasinski *et al.*, The angular dependence of the absorption of 0.35 μm laser light by high-Z, laser-produced plasmas. *Phys. Fluids*, 1991, **B3**(12) : 3477~ 3484

- [9] D. R. Bach, D. E. Casperson, D. W. Forslund *et al.*, Intensity-dependent absorption in 10.6 μm laser-illuminated spheres. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(26) : 2082~ 2085
- [10] 刘慎业, 陈涵德, 丁耀南等, 强激光产生的等离子体能量诊断探测器. 核电子学与探测技术, 1995, **15**(6) : 348~ 351
- [11] 常铁强等, 激光等离子体相互作用与激光聚变, 湖南科学技术出版社, 1991 : 23~ 29
- [12] 刘慎业, 傅立斌, 张海英等, 用 1.05, 0.53 μm 激光辐照 Au 盘靶的吸收规律与数值模拟. 物理学报, 1996, **45**(2) : 222~ 231

The Wavelength Dependence of Absorption of Laser Light in High- Z Laser-Produced Plasma

Liu Shenye Zheng Zhijian Tang Daoyuan Ten Hao
Chen Hande Chen Yuting Su Chunxiao Zhang Haiying
(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 30 June 1996; revised 17 March 1997)

Abstract The wavelength dependence of absorption of laser has been studied experimentally in the “Sheng Guang” and “Xing Guang” laser facility with the gold disks at a some chosen angle of incidence. The experiments show that inverse bremsstrahlung absorption is the main absorption mechanism and the the absorption increases when laser wavelength decreases. Although the absorption of 0.351 μm laser at 10° angle of incidence is higher than that of the others, the absorption of 0.351 μm laser at 45° angle of incidence is only 75% and scattered light is up to 25%.

Key words laser-produced plasma, absorption, simulation model, gold disk.