

超短脉冲激光辐照固体靶产生超热电子研究

陶业争, 单玉生, 李业军, 汤秀章, 张海峰, 王乃彦

(中国原子能科学研究院 核技术与计算机应用研究所, 北京 102413)

摘要: 实验研究了超短脉冲激光辐照固体靶产生的超热电子温度, 所用方法是测量超热电子在固体中韧致辐射产生的硬 X 射线 (> 30 keV) 能量连续谱。中等强度 (10^{16} W/cm²)、无预脉冲、红外超短脉冲 (744 nm, 130 fs, 6 mJ)、P 极化激光 45° 照射 5 mm 铜靶, 产生了能量为 400 keV 的 X 射线信号, 利用 Maxwellian 分布拟合能谱得到的超热电子温度为 85 keV, 产生高能电子的主导吸收机制为真空加热。

关键词: 超短脉冲激光; 固体靶; 超热电子

中图分类号: O532.25; O536

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2002)06-0481-05

Study on Hot Electron Generation From Solid Target Irradiated by Ultrashort Laser

TAO Ye-zheng, SHAN Yu-sheng, LI Ye-jun,

TANG Xiuzhang, ZHANG Haifeng, WANG Nai-yan

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: The temperature of hot electron generated from the solid target irradiated by ultrashort pulse laser has been studied experimentally. The method is to measure the hard X-ray continuum generated by the high energy electron bremsstrahlung process in solid region. When moderate intensity, pre-pulse free, P-polarized light irradiates 5 mm Cu slab with 45°, the hard X-ray with energy up to 400 keV is detected. Fitting the experiment data by Maxwellian distribution, the temperature of hot electron is 85 keV, the main absorption mechanism for high energy electron generation is "vacuum heating".

Key words: ultrashort laser; solid target; hot electron

在最近十几年中, 台面式高强度超短脉冲 (< 1 ps) 激光的飞速发展开辟了一系列崭新的、具有重大应用前景的研究领域^[1], 其中一个最激动人心的应用领域就是惯性约束聚变 (ICF) 快点火 (FI) 研究^[2]。

ICF 传统点火方式被称为“中心点火”, 高

能量、强激光束均匀辐照装有氘氚燃料的球形靶丸, 强激光烧蚀靶外层物质产生巨大的反冲压力, 压缩靶丸使得在中心位置形成一个热斑。当热斑内的温度和密度达到点火要求的高温、高密度条件时, 聚变反应首先在中心热斑内开

收稿日期: 2002-01-07; 修回日期: 2002-04-07

基金项目: 国家“863”惯性约束聚变领域资助课题 (863-804-06-01, 863 青 2000-04)

作者简介: 陶业争 (1970—), 男, 山东临清人, 副研究员, 博士, 激光等离子体物理专业

始发生,然后由连锁反应点燃周围燃料区。“中心点火”一方面要求较高的激光能量(10倍增益要求的激光能量高达百万焦耳),同时还对压缩的均匀性提出了苛刻要求(不均匀性小于百分之几),成为目前ICF研究的关键课题之一^[3]。“快点火”概念的基本思想是把压缩和点火过程分开,首先和传统方式一样利用长脉冲激光束压缩D-T燃料到某一个中间状态,然后用高强度超短脉冲激光产生的超热电子加热已经受到压缩的靶丸到点火需要的温度而实现点火。快点火方式有效地降低了对激光束和靶均匀性的要求,同时还可降低对激光能量的要求,因此成为当今ICF研究的一个热点。与具有丰富实验和理论基础的传统的点火方式相比,“快点火”还处于初级阶段,需要大量的各种实验条件(例如,不同强度、波长的激光及各种类型靶等)下的实验和理论模拟来不断加以改进,其中一关键问题就是超短脉冲激光与固体密度靶相互作用中的超热电子产生。

超热电子是指等离子体中区别于热电子(等离子体温度 T_e)而具有大动能的高能电子群。针对超热电子产生问题人们已经进行了大量的实验和理论研究,超热电子可由几种可能的反常吸收机制产生,例如,共振吸收、“真空”加热、有质动力加热和反常表面效应^[4]等。不同的吸收机制给出不同的超热电子温度定标率。例如,共振吸收给出的定标率为 $T_h = 6 \times 10^{-5} (I^2)^{1/3}$,“真空”加热给出的定标率为 $T_h = (I^2)^{1/3 \sim 1/2}$,其中: T_h 、 I 和 λ 分别为超热电子温度、入射激光强度和波长,单位分别为keV、 W/cm^2 和 μm 。由于超短脉冲激光与固体靶相互作用过程与具体的实验条件(脉冲宽度、对比度、偏振、波长、靶材料以及靶表面结构等)密切相关,所以,迄今为止仍存在许多不一致的地方。例如,在中等激光强度($10^{16} W/cm^2$)下,在相近的实验条件下已有的实验结果差别非常大。Bastiani^[5]和中国科学院物理研究所^[6]在 $4 \times 10^{16} W/cm^2$ 和 $5 \times 10^{15} W/cm^2$ 强度下得到的超热电子温度分别为19 keV和18 keV;而在中国科学院物理研究所的另一实验中,利用和文献[6]相同的激光器得到的超热电子温度却高达42 keV^[7]。理论分析表明,在相近的实验条件下,不同的吸收机制可导致不同的结果。

超热电子在固体靶中韧致辐射产生的硬X射线连续谱反映了超热电子的能谱,因此,通过测量硬X射线连续谱可推出超热电子温度和产额等参数^[8]。本工作通过测量硬X射线连续谱,研究无预脉冲、中等强度红外飞秒激光照射固体靶产生的超热电子性质。

1 实验安排

实验所用激光器是中国原子能科学研究所的超短脉冲掺钛蓝宝石(Ti:Sapphire)激光器,该激光器由一台Ti:Sapphire激光振荡器(Tsunami)、一级Ti:Sapphire再生放大器和一级Ti:Sapphire双通功率放大器组成,能够输出脉冲能量6 mJ、脉冲宽度120 fs、波长744 nm、重复频率10 Hz、束直径10 mm、线偏振、偏振方向在水平平面内的激光脉冲,该装置是高强度紫外超短脉冲激光装置(248 nm/440 fs/50 mJ/10 Hz/ $10^{17} W \cdot cm^{-2}$)的前端,由自相关仪测量的激光脉冲时间波形示于图1a。激光束由一个 $f/7.5$ 的聚焦透镜聚焦到靶表面上,焦斑由一个与聚焦透镜相同的物镜成像到CCD上。测量得到的焦斑强度的空间分布示于图1b,焦斑半宽度为 $10 \mu m$,则对应靶上强度为 $10^{16} W/cm^2$,激光能量稳定性好于10%。放大器的光路、展宽、压缩等系统的安排合理,所以,放大器本身的ASE保持非常低的水平。在条件(光路和聚焦)和实际实验相同、无Tsunami注入的情况下,在真空中的靶表面不能形成等离子体。Tsunami激光器在长时间范围内(> 2 ps)的对比度为 10^6 ,在短时间范围内(1 ps)的对比度为 10^4 ,再生放大器和双通放大器均工作在小信号增益状态,不会影响对比度,因此,激光器最后的对比度为 10^6 (> 2 ps)和 10^4 (1 ps)^[9]。聚焦透镜、靶和靶传动平台均放置在真空靶室中,靶室真空度好于 10^{-3} Pa,靶可在垂直平面内连续转动,使得每次入射均为新鲜的表面;靶平移精度 $10 \mu m$,用来调焦。靶选用厚度为5 mm的铜板,表面经抛光处理。

有关实验安排的详情参见参考文献[10]。能量在5~10 keV之间的X射线强度用一台加置 $30 \mu m$ Al膜的PIN X射线探测器配合示波器来测量,用来优化激光聚焦情况。PIN放置在真空靶室内,可与靶成不同的角度,从而能

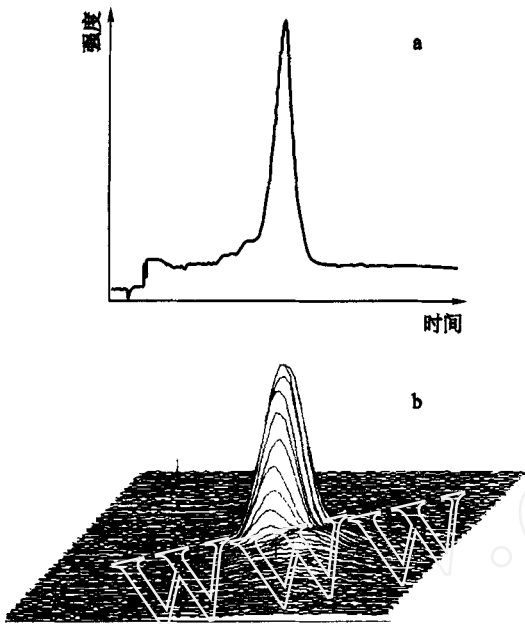


图1 激光脉冲自相关仪波形(a)和焦斑空间强度分布(b)

Fig. 1 Auto-correlator waveform of laser pulse (a) and spatial intensity distribution of focal spot (b)
a ——FWHM = 120 fs; b ——FWHM = 10 μm

够估计 X 射线的角分布。能量高于 30 keV 的 X 射线能量连续谱由 HPGe 探测器配合多道分析器的 X 射线谱仪测量。为了实现单光子入射,避免光子在探测器中的叠加,减小探测器对源的立体角到 6×10^{-5} ,谱仪用²⁴¹Am和⁶⁰Co 标准源进行标定。

2 结果和讨论

图 2 是在 $I = 10^{16}$ W/cm²、P 极化、入射角度为 45°、5 mm Cu 板靶等实验条件下得到的能量大于 30 keV 的 X 射线能量连续谱。靶室窗口、滤波片、探测器窗口(0.2 mm)和探测器的探测效率等对能谱的衰减已经被校正。能谱积累了 6 000 炮,整个能谱范围(30 ~ 1 200 keV)内的计数为 990,则每炮计数几率为 0.165,光子叠加的几率小于 3%。在实际测量中,能量在 500 keV 以上无计数,在这种实验条件下,光子叠加可忽略。能谱是一明显的连续谱,大部分计数集中在低能部分。这种特性与以往激光等离子体相互作用实验测量结果相似,与关于激光等离子体产生的超热电子在固

体靶的韧致辐射理论也相符合。由图 2 可确认,已经产生了能量为 400 keV 的光子。图 2 中的数据可由具有两个特征温度的 Maxwellian 分布($\exp(-E/T_h)$)拟合,特征温度分别为 45 和 85 keV,得到的超热电子温度为 85 keV。

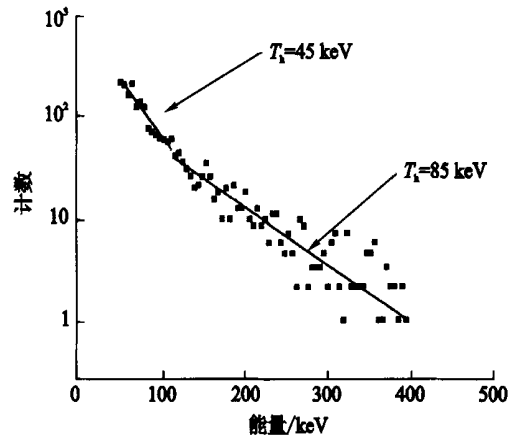


图2 超短脉冲激光辐照固体靶产生的硬 X 射线能谱

Fig. 2 Hard X-ray continuum from solid target irradiated by ultrashort laser
实线为用温度分别为 45 keV 和 85 keV 的 Maxwellian 拟合直线

为了验证确实产生了能量达数百 keV 的 X 射线,记录了在探测器前面加置不同的滤波片(2 mm Al, 5 mm Cu, 10 mm Fe)时谱仪在整个能区的计数。按照 $I_0/I_{\text{截至}} = 1/e$ 的定义,10 mm Fe 对应的截止能量为 200 keV。透过 10 mm Fe 的光子中虽包括能量低于 200 keV 的部分,但按照衰减曲线可以肯定,透过光子中的大部分为能量高于 200 keV 的光子。从测量到的 X 射线能谱可观察到能谱计数随能量增加呈指数衰减,因此,估计透过光子中最大能量应超过 400 keV,这与能谱测量相符合。

在目前的实验条件下,可能的机制包括共振吸收、真空加热等。当 P 极化光斜入射到等离子体中时,在等离子体梯度方向总存在一个电场分量,在梯度方向造成电荷分布波动,这种波动可被等离子体波共振加强,从而激光能量转换为等离子体波能量,这个过程称为共振吸收。共振吸收给出的超热电子温度定标率,在本实验条件下为 $T_h = 11.7$ keV,明显低于实验值,因此,共振吸收不能解释实验结果。

等离子体标度长度 L/λ (L 为等离子体密度梯度长度, 是入射激光波长) 对激光在固体靶的吸收、超热电子的产生有重要影响。共振吸收要求等离子体密度标长 L/λ 不能过大, 也不能过小。如果 L/λ 过大, 反射面到临界面的距离相应过大, 渗透到临界面附近的场强过低, 共振吸收降低; 相反, 如果 L/λ 过小, 没有足够距离形成共振, 共振吸收也将受到抑制。在主激光脉冲到达固体靶之前, 利用预脉冲在靶表面形成一个欠密度预等离子体, 可有效增强激光吸收和 X 射线产额。Bastiani 等发现预脉冲的提前时间存在一个使吸收最强、超热电子产额最大的最佳值, 最佳延迟时间对应的等离子体长度与由共振吸收最佳角度计算值一致, 从而证明共振吸收是主导的吸收机制。在 $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 强度下, 引入一个比主激光脉冲提前 6 ps 的 1% 的预脉冲, 可将超热电子温度由 19 keV 提高到 182 keV^[5]。

在本实验条件下, 由前面提到的激光器的对比度得到脚脉冲的强度分别为 10^{10} W/cm^2 ($> 2 \text{ ps}$) 和 10^{12} W/cm^2 (1 ps), 前者低于在固体表面形成等离子体阈值, 可不予考虑, 因此, L/λ 仅由主激光脉冲和提前 1 ps 的脚脉冲决定。T. Engers 等^[11]的反射光频移测量实验和流体力学的数值模拟^[12]均说明, 在 10^{12} 和 10^{16} W/cm^2 条件下, 超短脉冲激光辐照金属靶形成的等离子体温度 $k_B T_e$ 分别约为 1 和 200 eV。自由膨胀等离子体速度 $c_s = \sqrt{\frac{Zk_B T_e}{m_i}}$ (Z 为平均离子电荷态, m_i 为离子质量。取 $Z = 8$), 可算得膨胀速度 c_s 分别为 3.5×10^5 和 $5 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 则由脚脉冲和主激光脉冲引起的等离子体密度长度分别为 $L = c_s t = 3.5$ 和 6 nm。可见, 标长主要是主激光脉冲的贡献, 有 $L/\lambda = 0.008$ 。

PIC 数值模拟已经证明^[13], 在 $10^{14} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 范围内, 当 $L/\lambda < 0.1$ 时, 真空吸收将超过共振吸收起主导作用。当激光斜入射到极陡边界的过密等离子体上时, 激光吸收可由电子在等离子体和真空中往返运动解释。在激光场前半周期, 等离子体中的电子被激光场拉进真空中, 在后半周期, 电子被送回等

离子体中, 电子运动速度等于在场中的抖动速度 $v = v_{\text{osc}} = \frac{eE}{m_e}$, 称为真空吸收。在本实验条件下, $X_{\text{osc}} = \frac{v_{\text{osc}}}{c} = \frac{eE}{m_e c} = 0.025 > L/\lambda = 0.008$, 共振吸收已不是主要的吸收机制, 真空吸收成为超热电子产生的主导机制。根据电容器模型和对真空吸收进行的 PIC 模拟给出的超热电子温度定标率, 真空吸收加热的电子温度比共振吸收定标率给出值要高得多, 实验得到的超热电子温度是合理的。但是, 详细解释实验结果还应结合具体的实验条件进行 2D 的 PIC 数值模拟, 这是下一步的工作内容。

3 结论

本工作通过测量超热电子在固体靶中韧致辐射产生的硬 X 射线连续谱, 研究了超短脉冲激光辐照固体靶产生的超热电子性质。当中等强度 (10^{16} W/cm^2)、无预脉冲超短脉冲激光辐照 Cu 靶时, 探测到了能量为 400 keV 的 X 射线信号, 能谱可用具有两个特征温度 T_h 的 Maxwellian 分布拟合, 得到超热电子温度为 85 keV, 产生高能电子的主导吸收机制为真空吸收。实验结果与目前已有的实验和理论存在明显的不同, 需要细致的理论解释和数值模拟。本工作对于理解超热电子产生机制是有意义的。

在本工作中, 石宗仁教授提供 HPGe 谱仪, 王孝君研究员提供 PIN 探测器并进行过多次有益的讨论, 徐鹄和邢雨同志给予了帮助, 在此一并表示感谢。同时感谢激光器运行人员在实验工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Perry MD, Mourou G. Terawatt to Petawatt Subpicosecond Lasers[J]. Science, 1994, 264: 917 ~ 924.
- [2] Tabak M, Hammer J, Glinsky, et al. Ignition and High Gain With Ultrapowerful Lasers[J]. Phys Plasmas, 1994, 1(5): 1626 ~ 1634.
- [3] Bodner SE, Colombant, Denis G, et al. Direct drive Laser Fusion: Status and Prospects[J]. Phys Plasmas, 1998, 5(5): 1901 ~ 1918.
- [4] Gibbon P, Foster E. Short-pulse Laser-plasma In-

- teraction Plasma[J]. Phys Control Fusion, 1996, 38:7 769~7 793.
- [5] Bastiani S, Rousse A, Geindre J P, et al. Experiment Study of the Interaction of Subpicosecond Laser Pulses With Solid Targets of Varying Initial Scale Lengths[J]. Phys Rev E, 1997, 56(6):7 179~7 185.
- [6] Zhang P, He J T, Chen D B, et al. Effects of a Pre-pulse on γ -ray Radiation Produced by a Femtosecond Laser With Only 5 mJ Energy[J]. Phys Rev E, 1998, 57(4):R3 746~3 748.
- [7] Chen L M, Zhang J, Dong Q L, et al. Hot Electron Generation via Vacuum Heating Process in Femtosecond Laser-solid Interaction[J]. Phys Plasmas, 2001, 8(6):1~5.
- [8] McCall G H. Calculation of X-ray Bremsstrahlung and Characteristic Line Emission Produced by a Maxwellian Electron Distribution[J]. J Phys D: Appl Phys, 1982, 15:823~831.
- [9] 陶业争. 高强度超短脉冲激光与固体等离子体相互作用研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院, 2001.
- [10] 陶业争,单玉生,王乃彦,等. 单光子入射方法测量超快硬 X 射线能谱[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(1):1~4.
- [11] Engers T, Fendel W, Schuler H, et al. Second harmonic Generation in Plasmas Produced by Femtosecond Laser Pulses[J]. Phys Rev A, 1991, 43(8):4 564~4 567.
- [12] Eidmann K, Meyer-ter-Vehn J, Schlegel T. Hydrodynamic Simulation of Subpicosecond Laser Interaction With Solid-density Matter[J]. Phys Rev E, 2000, 62(1):1 202~1 214.
- [13] Gibbon P, Bell A R. Collisionless Absorption in Sharp-edged Plasmas[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(10):1 535~1 538.