

高对比度飞秒激光与固体薄膜相互作用 硬 X 射线源的研究

陈黎明[†] 林晓宣 徐妙华 李玉同 张杰

(中国科学院物理研究所 光物理实验室 北京 100190)

摘要 文章作者使用 60 fs 倍频高对比度激光脉冲聚焦到 Cu 膜上,发现与基频激光脉冲相比,从激光到 $K\alpha$ X 射线的能量转化效率(η_k)明显增强. η_k 对激光脉冲非线性啁啾上升沿呈现出很强的依赖性,它在激光为 100fs 负啁啾脉冲时达到最大值.实验表明对超热电子有效的加热导致了 η_k 的增强.这说明由于能够驱动真空加热机制来增强超热电子的产生,高对比度激光已成为优化 η_k 的有效工具.这些结果发表在 Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 045004 上.

关键词 激光—等离子体相互作用, $K\alpha$ X 射线, 转化效率, 高对比度激光脉冲

Hard X-ray source based on a high-Contrast femtosecond laser interacting with a solid foil

CHEN Li-Ming[†] LIN Xiao-Xuan XU Miao-Hua LI Yu-Tong ZHANG Jie

(Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract An increase has been observed in the conversion efficiency (η_k) from laser energy to $K\alpha$ X-ray energy produced by 60 fs frequency-doubled high-contrast laser pulses focused on a Cu foil, compared to the case with fundamental laser pulses. The value of η_k shows a strong dependence on the nonlinearly modified rising edge of the laser pulse. It reaches a maximum for a 100 fs negatively modified pulse. The efficient heating of the hot electrons leads to the enhancement of η_k . This demonstrates that high-contrast lasers are an effective tool for optimizing η_k , through increasing the quantity of hot electrons by vacuum heating. These results have been published in Phys. Rev. Lett., 2008, 100:045004.

Keywords laser-plasma interaction, $K\alpha$ X-ray, conversion efficiency, high-contrast laser pulse

超强飞秒(fs)激光^[1]的发展开启了新的激光—等离子体相互作用领域.超热电子通过共振吸收^[2]或真空加热^[3]等激光吸收机制产生,随后穿入固体靶并通过 K 壳层电离和韧致辐射^[4]等过程产生硬 X 射线.这种超强超短硬 X 射线源在医学成像^[5]等许多方面具有潜在的应用价值.

控制和优化上述硬 X 射线发射的关键在于调控激光的能量吸收和超热电子的产生.一些研究小组已经进行了使用亚皮秒激光系统的 X 射线产生的研究^[6-13].他们使用气体或玻璃激光器产生了几

百飞秒的激光脉冲^[6,7].由于有质动力使等离子体密度梯度变陡^[14],因此,达到了激发共振吸收的优化状态^[6].在这一区域,共振吸收是主要的加热机制.最近研究发现,使用脉宽小于 100fs 的激光脉冲时,需要新的 X 射线发射过程来解释所观察到的现象. Eder 等人观察到当靶离开最佳聚焦位置时, $K\alpha$ 发射能达到最大值^[8].这一现象可以定性解释为高

2009-10-25 收到

[†] 通讯联系人. Email: lmchen@aphy.iphys.ac.cn

温的超热电子产生的光子在靶内被重新吸收所致。基于使共振吸收达到最优化的密度标长, Reich 等人^[9]得到了使 X 射线产额最优化的激光强度的定标关系, 并且预计当激光强度较高时硬 X 射线产额会随光强减少。以上的结果表明, 对于脉宽为几十飞秒的激光脉冲, 低对比度激光脉冲会导致预等离子体的形成和共振吸收机制的激发, 会限制硬 X 射线发射随光强的增加而增加。

在发表的文章中, 我们阐述这种对硬 X 射线发射增强的限制可以通过使用高对比度相对论 fs 激光脉冲来加以克服。其中, “真空加热”是超热电子的主要产生机制。我们通过产生正啁啾或负啁啾的激光脉冲来控制和优化 X 射线发射的产额。当使用 100fs 的负啁啾脉冲入射时, Cu 的 η_k 达到最大值 4×10^{-4} 。

实验是在中国科学院物理研究所 XL-II 激光系统上进行的。经过压缩器之后, 这个激光装置能够输出能量大于 300mJ, 脉宽 60fs 的激光脉冲。预脉冲位于主脉冲之前 8ns, 主脉冲与预脉冲强度之比高于 1×10^5 。皮秒级本底的激光对比度由一个三阶 fs 自相关仪测量得到, 为 1×10^4 。实验中使用了一个第一类 KDP 倍频晶体(1 mm 厚)来得到 400nm 倍频脉冲。这样就提高了激光对比度, 主脉冲与皮秒本底强度比大于 10^8 , 在纳秒的尺度上对比度大于 10^{10} 。

通过调节压缩光栅将使得脉冲宽度增加, 然而未补偿的线性或 B-积分相位会降低脉冲的对比度。通过改变光栅对之间的相对位置, 我们可以在固定激光能量的情况下将脉宽从 60fs 增加至 2ps。增加(减少)相对距离会引起对脉冲相位非线性的不完全补偿, 从而导致负(正)啁啾, 以及一个较缓慢(陡峭)的上升时间沿^[13], 如图 1 所示。对于一个取样脉冲, 开始于相对强度约 10^{-5} , 此时等离子体开始膨胀, 直至主脉冲峰值到达之前的强度约 10^{-1} , 对于 100fs 负啁啾脉冲, 100fs 正啁啾脉冲, 以及 60fs 脉冲, 上升时间分别为 400, 200 和 200fs。这说明, 100fs 正啁啾脉冲具有几乎与 60fs 脉冲相同的上升沿, 而负啁啾脉冲的上升沿具有两倍的膨胀周期和积分能量。计算表明: 对于 100fs 负啁啾, 100fs 正啁啾, 和 60fs 脉冲, L/λ 分别为 0.1, 0.05 和 0.05, 如图 2(b)中的插图所示。

图 2(a)所示为从 Cu 薄膜靶测量得到的能谱: 400nm 时的 $K\alpha$ 产额是 800nm 时的两倍, Cu η_k 在 2π 立体角中达到约 1×10^{-4} , X 射线谱的连续部分不是一个麦克斯韦分布, 而是有一个明显的能量截

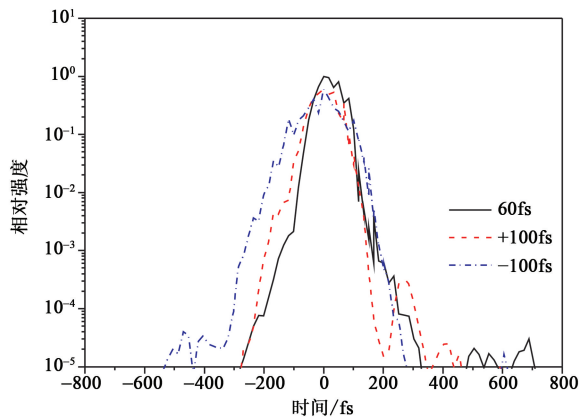


图 1 高对比度 400nm 激光脉冲在脉宽为 60fs (实线), 正啁啾 100fs (虚线) 和负啁啾 100fs (点虚线) 情况下的时间分布

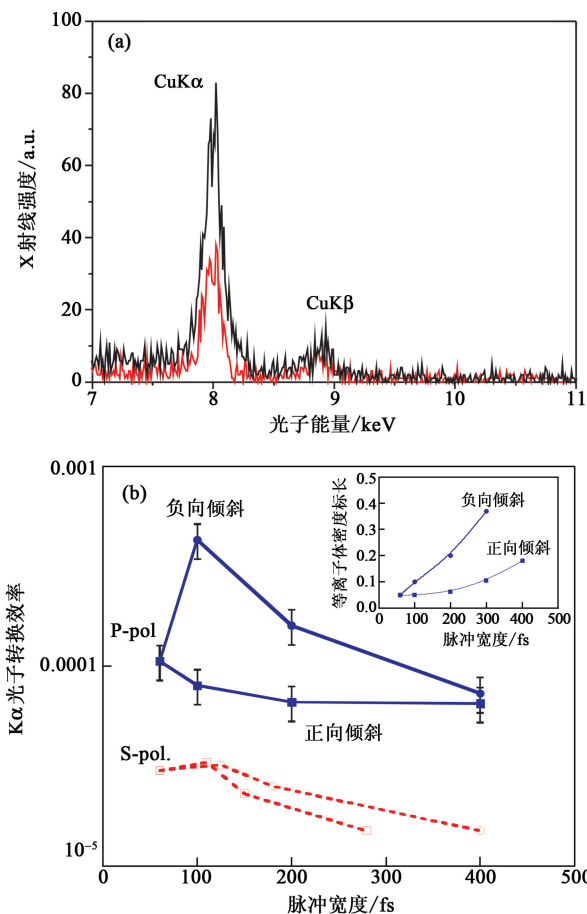


图 2 (a) 在激光强度为 $1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 时由 800nm (灰线) 和 400nm (黑线) 激光脉冲与 Cu 相互作用产生的硬 X 射线谱; (b) Cu 的 $K\alpha$ 转换效率在负啁啾(实圆)和正啁啾(实方块)情况下与脉冲宽度的关系。插图显示在主脉冲到来前的等离子体密度标长(L/λ)

断($E \sim 20 \text{ keV}$)。为了优化 Cu η_k , 我们引入了一个具有非线性调制的略长的脉冲宽度。当激光脉冲为 100fs 负啁啾时, Cu η_k 达到最大值 4×10^{-4} , 几乎比正啁啾的情况大 5 倍。

模拟表明, 对于密度梯度陡峭的情况, 真空加

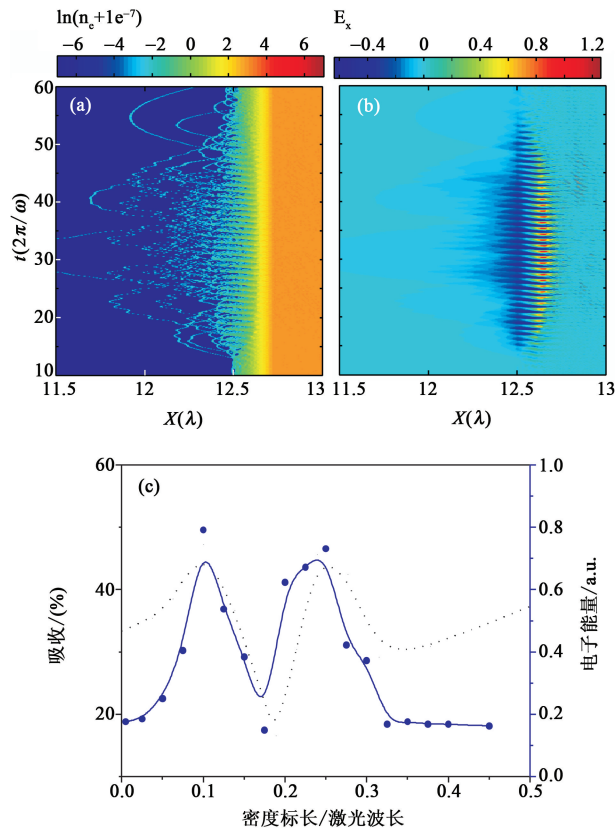


图3 相互作用中电子密度(a)和纵向电场 E_x (b)的时间演化过程;(c)吸收率(点线)和超热电子能量(实线)随密度标长的变化关系

热相对于共振吸收占优势^[3,15],在我们的实验条件下,光强为 $1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$, $L = 0.05\lambda$. 这与激发真空加热所需要的条件相符;电子振荡幅度 $X_{\text{osc}} \geq L$. 因此,我们的实验中,真空加热被激发起来而且可能是主要的吸收机制. 图 3(b)所示为靶表面的周期变化的极化电场,其在激光的每半个周期中进行“推一拉”过程^[3,15]. 在每个周期中,一群电子被拉到真空中然后又返回靶表面,如图 3(a)中所示的随时间变化的电子密度,证明真空加热确实被激发起来了. 图 3(c)所示为 $\Delta t = 30$ 时能量吸收对等离子体密度梯度的依赖关系. 在 $L/\lambda = 0.1$ 和 0.25 处有两个吸收峰. 根据优化的密度标长,第二个峰对应于共振吸收^[2]. 第一个峰 ($L/\lambda = 0.1$) 则是真空加热的结果^[15]. 曲线表明真空加热的激发严格依赖于 L , 这是真空加热能增强发射以及导致 X 射线依赖于脉冲形状的重要特性. 当密度标长稍有一点膨胀时,光场能将更多的电子拉到真空,从而导致更强的吸收^[15,16],只要 L 不明显超过 X_{osc} . 在我们的实验中,如果我们调整脉冲为 100fs 负啁啾脉冲时,将符合使真空加热最优化的等离子体密度梯度 ($L/\lambda = 0.1$),因为稍大的脉冲前沿将使等离子体微

小膨胀从而导致 η_k 最大化. 反之,一个具有相同脉宽的正啁啾脉冲的前沿较短且包括在前沿中的积分能量较小(40%),如图 1 所示. 此时,真空加热不能像负啁啾时那样被有效地激发起来. 另外,对时间积分的超热电子能量呈现出类似的对 L/λ 的依赖关系. 如文中图 3(c)所示, $L/\lambda = 0.1$ 时积分的电子能量比 $L/\lambda = 0.05$ 时大 3 倍,这也定性地解释了 X 射线发射对不同激光脉冲上升沿的依赖. 我们需要提及的是在低对比度 800nm 激光入射情形下,没有观察到硬 X 射线对激光脉冲形状的依赖.

综上所述,在光强为 $1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 时,高对比度 400nm 激光产生的 Cu η_k 达 4×10^{-4} ,这是由于呈现出“尖峰”结构能谱的有效的超热电子造成的. 通过控制脉冲宽度和调节脉冲上升沿能够成功地调整控制硬 X 射线发射. 这意味着我们发现了一个在飞秒—等离子体领域有效增强超热电子和 X 射线产生的新方法:共振吸收在 fs 激光-稠密等离子体相互作用中已经不再有效^[12],而高对比度激光将通过真空加热机制更有效地激发超热电子而产生硬 X 射线.

参考文献

- [1] Strickland D, Mourou G. *Opt. Commun.*, 1985, 56: 219
- [2] Krueer W L. *The Physics of Laser Plasma Interactions*. New York: Addison-Wesley, 1988; Ginzburg V L. *The Propagation of Electromagnetic Wave in Plasmas*. New York: Pergamon Press, 1970; Bulanov S V *et al.* *Phys. Rep.*, 1990, 186: 1
- [3] Brunel F. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 52
- [4] Chen H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1993 70: 3431
- [5] Krol A *et al.* *Med. Phys.*, 1997, 24: 725
- [6] Attwood D T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 40: 184
- [7] Soom B *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1993, 74: 5372; Bastiani S *et al.* *Phys. Rev. E.*, 1997, 56: 7179; Jiang Z *et al.* *Phys. Plasmas.*, 1995, 2: 1702; Andersson E *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2001, 90: 3048; Schnurer M *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1996, 80: 5604
- [8] Teubner U *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70: 794
- [9] Eder D C *et al.* *Appl. Phys. B*, 2000, 70: 211
- [10] Reich C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84: 4846; Salzmann D *et al.* *Phys. Rev. E*, 2002, 65: 036402
- [11] Zhidkov A *et al.* *Phys. Rev. E*, 2000, 62: 7232
- [12] Schnurer M *et al.* *Phys. Rev. E*, 2000, 61: 4394
- [13] Chen L M *et al.* *Phys. Plasmas.*, 2004, 11: 4439
- [14] Leemans W P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89: 174802; Andiel U *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80: 198; Guo T *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, 72: 41
- [15] Gibbon P, Bell A R. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68: 1535
- [16] Grimes M K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82: 4010