

超短超强激光与铜靶相互作用产生 $K\alpha$ 源的蒙特卡罗模拟*

赵宗清^{1)†} 丁永坤^{1)†} 谷渝秋¹⁾ 王向贤¹⁾ 洪伟¹⁾ 王剑¹⁾
郝轶聃¹⁾ 袁永腾¹⁾ 蒲以康²⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2006 年 12 月 14 日收到 2007 年 5 月 17 日收到修改稿)

超短超强激光打靶产生的超热电子, 与固体靶相互作用时会产生 $K\alpha$ 线辐射. 由经典定标律给出了法线方向超热电子的温度. 利用蒙特卡罗方法, 对超热电子在固体靶中的传输进行了研究, 模拟了不同靶厚度情况下 $K\alpha$ 产额和角分布及不同电子温度下 $K\alpha$ 光子的转化效率. 计算结果与实验符合较好. 结果表明, 在一定电子温度下, 随着靶厚度的增加 $K\alpha$ 光子产额会达到饱和, 并会使 $K\alpha$ 光子发射的各向异性变得更加严重; 存在最佳的电子温度, 使 $K\alpha$ 线转化效率最高.

关键词: 超短超强激光, 超热电子, 蒙特卡罗方法, $K\alpha$ 线

PACC: 5250J, 5225

1. 引言

超短超强激光打靶产生的 $K\alpha$ 线辐射具有单能 (10^3 — 10^4 eV) 发射区域小(微米量级)、时间短(飞秒量级)的优点, 在背光照相、医学成像、光刻、时间分辨 X 射线衍射、超热电子研究等领域具有重要的意义. 当超短超强激光打在固体靶上, 靶表面会迅速产生等离子体. 激光共振吸收、真空加热、有质动力 $J \times B$ 等物理机制会产生大量超热电子, 将其加速到 10^5 eV 量级的能量^[1-3]. 超热电子穿过等离子体后面的固体靶, 通过 K 壳层发射和韧致辐射发射 X 射线.

为了研究超短超强激光打靶产生 $K\alpha$ 光子的发射机制, 国际上开展了大量的理论和实验研究^[4-13]. 超短超强激光与靶物质作用产生 $K\alpha$ 线的物理过程一般分为两步: 一是超短超强激光打靶产生超热电子, 可以通过网格粒子模拟(PIC)或者解析方法得到超热电子的能谱和角分布; 二是超热电子在固体靶中的传输和 $K\alpha$ 线的产生, 这一过程可以利用蒙特

卡罗方法实现. 因此, 为了在实验中获得更强的 $K\alpha$ 源, 研究超热电子在固体靶中的传输规律并得到不同电子温度下 $K\alpha$ 线的转化效率及靶厚对 $K\alpha$ 线产生的影响是非常必要的.

本文首先利用超热电子的温度定标律, 给出超热电子的温度分布. 然后建立超热电子传输的理论模型, 利用蒙特卡罗方法, 对超热电子在铜固体靶中的传输进行模拟. 研究不同靶厚情况下 $K\alpha$ 发射的角分布和产额的变化, 与实验结果进行了比较, 并且计算了不同电子温度下 $K\alpha$ 的转化效率, 得到了使 $K\alpha$ 的转化效率最高的电子温度.

2. 理论模型

在超短脉冲强激光与物质相互作用时, 预脉冲或脉冲前沿首先将物质的前表面离化产生等离子体, 主脉冲激光或激光的后续部分与形成的等离子体作用, 通过各种不同的吸收机理将激光能量转化为具有较低能量并服从麦克斯韦分布的热电子群和具有较高能量并服从准麦克斯韦分布的超热电子

* 中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理国家重点实验室创新基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ding-yongkun@vip.sina.com

群. 研究发现, 激光与固体靶相互作用的超热电子呈各向异性分布. 针对 P 偏振斜入射激光, 沿靶前法线方向发射的超热电子主要是由共振吸收和真空加热机制产生. 我们在模拟中主要考虑沿法线方向向靶内发射的超热电子.

当激光功率密度接近相对论阈值时, 超热电子能量的变化主要体现在共振吸收和真空加热两种吸收机制之间的竞争上. 真空加热机制要求 $L \approx X_{\text{osc}}$ (X_{osc} 为电子抖动振幅, 通常情况下取 $X_{\text{osc}} \approx 0.2\lambda$), 共振吸收机制要求 $L \gg X_{\text{osc}}$. 根据文献 [8] 给出的超热电子温度定标律

$$T_h = 10(\lambda^2/10^{17}) \quad (1)$$

式中 λ^2 是激光的归一化强度, 单位为 $\text{W}/\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, α 在 $1/3$ — $1/2$ 之间, T_h 的单位为 keV.

通过温度定标律得到法线方向超热电子的能谱分布, 然后利用蒙特卡罗程序 MCNP^[14] 对超热电子在铜平面靶中的传输进行模拟. MCNP 是应用最多并得到广泛验证的经典蒙特卡罗模拟程序^[15,16]. 在模拟电子输运的时候, MCNP 使用连续慢化模型, 考虑了碰撞损失、辐射损失、韧致辐射和 K 壳层线谱发射等物理因素, 能够对超热电子产生的韧致辐射谱和 $K\alpha$ 线进行较为准确的模拟.

3. X 射线能谱模拟

利用单光子计数 CCD, 在 SILEX-I 激光装置上测量了铜的 $K\alpha$ 线, 典型结果如图 1 所示. 图 2 是我们模拟沿法线方向发射的 275 keV 电子与 $30 \mu\text{m}$ 铜靶作用产生的 X 射线能谱. 从图 1、图 2 可以看出, 两者符合很好. 这充分说明, 对超热电子在固体靶中传输产生 $K\alpha$ 线这一物理过程是可以利用蒙特卡罗方法进行模拟的.

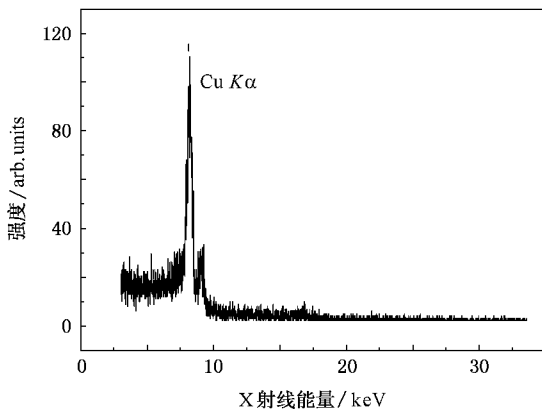


图 1 实验得到的 X 射线能谱

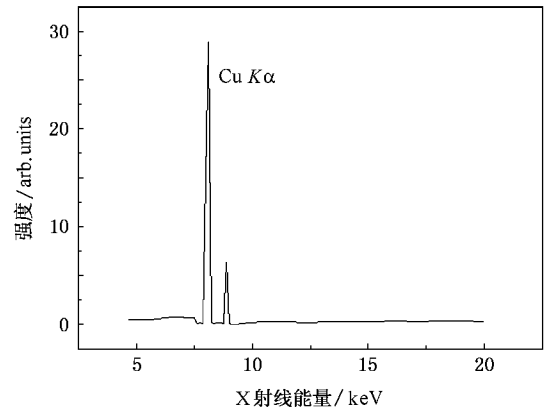


图 2 模拟的 X 射线能谱

4. 不同厚度铜靶产生的 $K\alpha$ 线产额的角分布

我们在 SILEX-I 激光器上, 研究了靶前方向的 $K\alpha$ 线在 3, 10 和 $30 \mu\text{m}$ 三种厚度的铜平面靶的产额变化, 实验结果见图 3. 我们发现在激光强度为 $3.3 \times 10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$ 时, 3, 10 和 $30 \mu\text{m}$ 铜薄膜靶产生的 $K\alpha$ 线随靶厚度增加呈上升趋势.

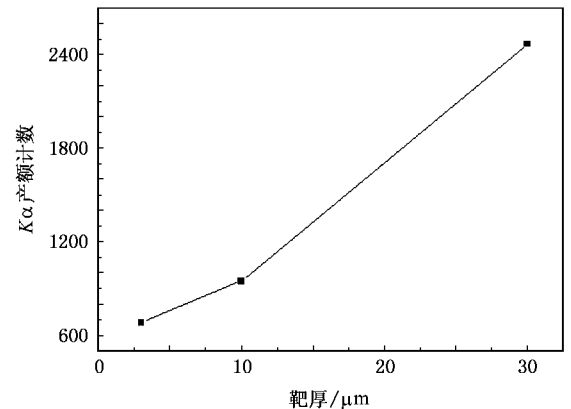


图 3 实验中测定的 $K\alpha$ 产额与靶厚的关系

实验中的激光强度 $I = 3.3 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. 根据以上给出的定标律公式 (1), α 在 $1/3$ — $1/2$ 之间, 得到超热电子温度 $T_h = 275$ — 460 keV .

由于实验条件的限制, 实验中只研究了 $K\alpha$ 产额随三种靶厚的变化关系, 并且不能测量 $K\alpha$ 的角分布情况. 为了得到更丰富的物理信息, 我们模拟了温度为 275 keV 的超热电子沿法线与厚度为 3, 10, 30, 50, 80 和 $100 \mu\text{m}$ 的铜靶相互作用, 得到了 $K\alpha$ 线转化效率 (一个电子在全空间中产生的 $K\alpha$ 线) 随靶厚度变化的情况, 并且给出了 $K\alpha$ 线效率随角度的变

化情况.

从图 4 可以看出,当电子打在 $3\ \mu\text{m}$ 厚的铜靶时,产生的 $K\alpha$ 线是服从各向同性分布的,且靶前 (180° 方向)和靶后 (0° 方向)产生的 $K\alpha$ 线强度相等.而当靶的厚度增加时, $K\alpha$ 线的发射表现为各向异性分布.在靶后 ($0^\circ\text{--}90^\circ$), 0° 方向的 $K\alpha$ 线发射最强,偏离法线的角度越大, $K\alpha$ 线发射越弱,到 90° 时 $K\alpha$ 线发射强度为零;在靶前 ($90^\circ\text{--}180^\circ$), $K\alpha$ 线发射随着角度增加而增加, 180° 方向的 $K\alpha$ 线发射最强.

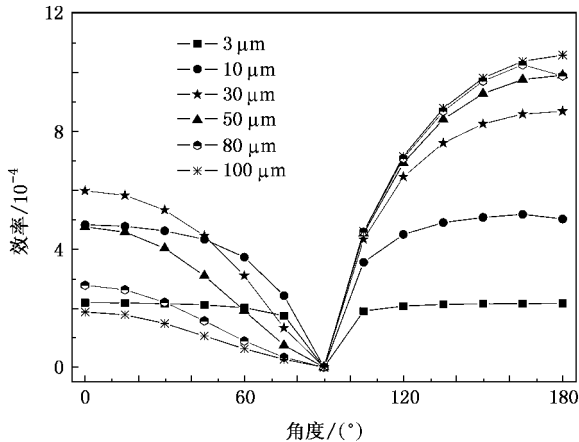


图 4 模拟的 $K\alpha$ 线空间分布随靶厚的变化关系

由图 5 可见,随着靶厚的增加, 0° 方向的 $K\alpha$ 线发射经历一个先增加后降低的过程,而 180° 方向的 $K\alpha$ 线发射则单调递增直至饱和.

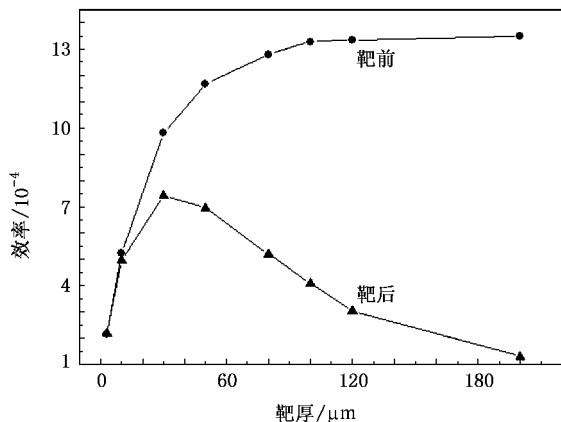


图 5 靶前和靶后 $K\alpha$ 效率与靶厚的关系

对上述现象可作如下解释:当超热电子打靶时,在靶内会形成很小的 $K\alpha$ 光源(约几十微米). $K\alpha$ 光源是各向同性发射的,如图 6 所示.但当 $K\alpha$ 线向外传输到达不同位置的探测器时,由于靶物质的作用,会有一定程度的衰减,衰减强度为 $e^{-\mu d}$,其中 d 为

$K\alpha$ 线在靶物质内的传输距离.所以,当角度越大时, $K\alpha$ 线传输的距离越长,由此产生了各向异性的分布.

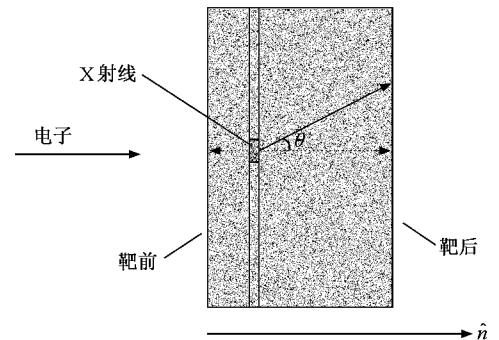


图 6 超热电子与固体靶作用产生的 $K\alpha$ 发射示意图

在法线方向上随着靶厚的增加,电子与靶物质的作用更加充分,被激发的 $K\alpha$ 线逐渐增加,因此靶前、靶后 $K\alpha$ 产额初始时均呈上升趋势.随着靶厚的进一步增加,因电子在特定材料中的射程是一定的,电子的作用将在有限深度处达到饱和.这时,一方面较深处向靶前传输的 $K\alpha$ 辐射会被更多的吸收,由此使得靶前产额逐渐呈现饱和;另一方面,靶厚的增加将使得向靶后传输的 $K\alpha$ 辐射受到越来越强烈的吸收,由此使得靶后产额逐渐下降.从总体上看,靶前产额将随靶厚增加单调递增直至饱和,而靶后产额则呈现一个随靶厚的增加先上升再下降的关系.这一结论与 Salzmann 等^[7]的一维解析模型得到的结果符合得较好.

我们还模拟了 $460\ \text{keV}$ 的超热电子与不同厚度固体靶的相互作用,得到的结论与 $275\ \text{keV}$ 的情况基本相同,只是靶前 $K\alpha$ 线的饱和厚度有所增加.

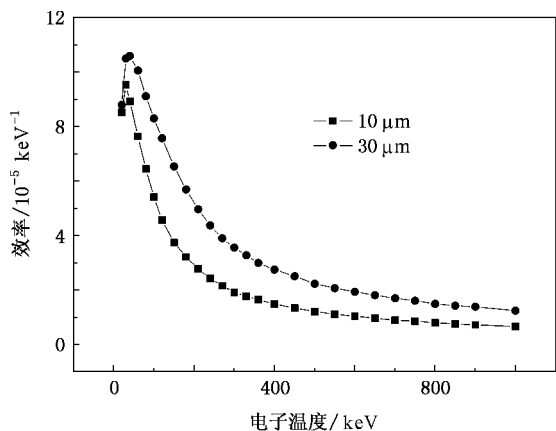
5. 不同电子温度对靶前 $K\alpha$ 线发射的影响

考虑 10 和 $30\ \mu\text{m}$ 的铜靶在不同的电子温度下靶前 $K\alpha$ 线的发射情况.图 7 表示不同电子温度下电子产生 $K\alpha$ 光子的效率.从图 7 可以看出,在电子能量为 $K\alpha$ 辐射能量的 $4\text{--}6$ 倍 ($50\ \text{keV}$ 左右)时,电子转化为 $K\alpha$ 光子的效率 ϵ 最高.

超热电子的产额可以表示为

$$n_h = \eta_h E_L / T_h, \quad (2)$$

式中 η_h 为激光能量转化为超热电子能量的效率, E_L 为激光能量, T_h 为超热电子温度.而 $K\alpha$ 光子

图 7 不同电子温度下的 $K\alpha$ 转化效率

产额

$$n_{K\alpha} = n_h T_h \epsilon, \quad (3)$$

式中 ϵ 表示超热电子转化为 $K\alpha$ 光子的效率, 单位为 keV^{-1} . 由(2)(3)式联立可得

$$n_{K\alpha} = n_h T_h \epsilon = \eta_h E_L \epsilon. \quad (4)$$

由(4)式可知, 如果飞秒激光转化为超热电子的能量一定, 那么 ϵ 越高得到的 $K\alpha$ 光子产额就越高. 为了得到更高的 $K\alpha$ 产额, 我们希望超热电子温度

为 $K\alpha$ 辐射能量的 4—6 倍. 因此, 在飞秒激光与铜固体靶作用时, 并非转化的超热电子温度越高越好, 而应将其控制在最佳值附近. 我们建议在利用超短超强激光打靶时, 在激光能量和焦斑面积一定的情况下, 可以适当增加脉冲宽度, 使功率密度有一定的降低. 在这种情况下, 根据定标律, 可以得到温度为 10^4 eV 量级的超热电子, 使 $K\alpha$ 转化效率提高, 从而增加 $K\alpha$ 产额.

6. 结 论

在激光强度 $I = 3.3 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 情况下, 利用经典温度定标律, 对法线方向超热电子在铜平面靶中的传输进行了蒙特卡罗模拟. 计算了不同靶厚的铜平面靶的 $K\alpha$ 产额的角分布及不同电子温度下 $K\alpha$ 的转化效率. (1) 由于靶物质自吸收的原因, $K\alpha$ 产额呈各向异性分布, 且靶越厚, 各向异性越严重. (2) 在一定的电子温度下, 靶前方向的 $K\alpha$ 产额随靶厚增加而增大, 最终会达到饱和; 而靶后方向的 $K\alpha$ 产额随靶厚增加则先上升再下降. (3) 当超热电子温度为 $K\alpha$ 辐射能量的 4—6 倍时, $K\alpha$ 线的转化效率最高.

- [1] Gu Y Q, Cai D F, Zheng Z J, Yang X D, Zhou W M, Jiao C Y, Chen H, Wen T S, Chunyu S T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 186 (in Chinese) [谷渝秋、蔡达锋、郑志坚、杨向东、周维民、焦春晔、陈豪、温天舒、淳于书泰 2005 物理学报 **54** 186]
- [2] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Yang X D, Wen T S, Chunyu S T 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) [蔡达锋、谷渝秋、郑志坚、杨向东、温天舒、淳于书泰 2003 强激光与粒子束 **15** 575]
- [3] Chen Z L, Zhang J, Chen L M, Teng H, Dong Q L, Zhao L Z, Wei Z Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1672 (in Chinese) [陈正林、张杰、陈黎明、滕浩、董全力、赵理曾、魏志义 2003 物理学报 **52** 1672]
- [4] Reich C, Gibbon P, Uschmann I, Förster E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4846
- [5] Davies J R, Bell A R, Haines M G 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7193
- [6] Eder D C, Pretzler G, Fill E, Eidmann K, Saemann A 2000 *Appl. Phys. B* **70** 211
- [7] Salzmann D, Reich C, Uschmann I, Förster E, Gibbon P 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036402
- [8] Rajeev P P, Taneja P, Ayyub P, Sandhu A S, Kumar G E 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 115002
- [9] Andreev A A, Limpouch J, Iskakov A B, Nakano H 2002 *Phys. Rev. E* **65** 026403

- [10] Stephens R B, Snavely R A, Aglitskiy Y, Amiranoff F, Anderson C, Batani D, Baton S D, Cowan T, Freeman R R, Hall T, Hatchett S P, Hill J M, Key M H, King J A, Koch J A, Koenig M, Mackinnon A J, Lancaster K L, Martinolli E, Norreys P, Perelli-Cippo E, Le-Gloaghec M R, Rousseaux C, Santos J J, Scianitti F 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066414
- [11] Beg F N, Bell A R, Dangor A E, Danson C N, Fews A P, Glinsky M E, Hammel B A, Lee P, Norreys P A, Tatarakis M 1997 *Phys. Plasmas* **4** 447
- [12] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Zhou W M, Jiao C Y, Chen H, Wen T S, Chunyu S T 2006 *Chin. Phys. Lett.* **15** 2363
- [13] Zheng L, Wang C, Li S H, Liu B C, Ni G Q, Li R X, Xu Z Z 2006 *Chin. Phys. Lett.* **15** 697
- [14] Briesmeister J F 2000 *MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code* (Oak Ridge: Radiation Safety Information Computational Center)
- [15] Xu M H, Liang T J, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2357 (in Chinese) [徐妙华、梁天骄、张杰 2006 物理学报 **55** 2357]
- [16] Zhao Z Q, Ding Y K, Liu D J, Tang C H, Wen S H, Pu Y K 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1203 (in Chinese) [赵宗清、丁永坤、刘东剑、唐昶环、温树槐、蒲以康 2006 强激光与粒子束 **18** 1203]

Monte Carlo simulation of $K\alpha$ source produced by ultrashort and ultrahigh laser interaction with Cu target^{*}

Zhao Zong-Qing^{1,2)} Ding Yong-Kun^{1)†} Gu Yu-Qiu¹⁾ Wang Xiang-Xian¹⁾ Hong Wei¹⁾ Wang Jian¹⁾
Hao Yi-Dan¹⁾ Yuan Yong-Teng¹⁾ Pu Yi-Kang²⁾

¹ *Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

² *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

(Received 14 December 2006 ; revised manuscript received 17 May 2007)

Abstract

When the superthermal electrons produced by ultrashort and ultrahigh laser interaction with solid target transport in the target, the $K\alpha$ X-rays will irradiate from the target. According to classical scaling law, superthermal electrons' temperature in the normal direction can be got. Using Monte Carlo method, the transportation of electrons in the solid target is researched. We simulate the $K\alpha$ yield and spatial distribution for different target thickness, also simulate the $K\alpha$ conversion efficiency versus temperature. Simulation result accords with experimental results. We conclude that, at a given temperature, the $K\alpha$ yield will reach saturation and the spatial distribution will become more nonisotropic when the target thickness increases. There exists an optimal temperature for $K\alpha$ X-rays conversion efficiency.

Keywords : ultrashort and ultrahigh laser, superthermal electron, Monte Carlo method, $K\alpha$ line

PACC : 5250J, 5225

^{*} Project supported by the Creative Foundation of State Key Laboratory for High-Temperature and High-Density Plasma Physics, Laser Fusion Center, China Academy of Engineering Physics.

[†] Corresponding author. E-mail: dding-yongkun@vip.sina.com