

超热电子角分布和能谱的实验研究^{*}

郑志远¹⁾ 李玉同¹⁾ 远晓辉¹⁾²⁾ 徐妙华¹⁾ 梁文锡¹⁾ 于全芝¹⁾ 张 翼¹⁾
王兆华¹⁾ 魏志义¹⁾ 张 杰^{1)†}

1) (中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2005 年 12 月 20 日收到, 2006 年 1 月 18 日收到修改稿)

对超短超强脉冲激光与固体薄膜靶相互作用产生的超热电子的空间分布和能谱特性进行了研究. 结果表明, 超热电子的角分布和能谱均表现出各向异性. 分析认为这主要与超热电子产生的机制有关. 能谱的各向异性解释了目前各研究小组在相同的激光功率密度下, 得到的超热电子温度却有很大差别的现象.

关键词: 飞秒激光, 等离子体, 能谱, 角分布, 各向异性

PACC: 5250J, 5225

1. 引 言

在超短超强脉冲激光与等离子体相互作用过程中, 超热电子可以通过各种不同的吸收或加速机制产生, 例如逆韧致吸收、真空加热、共振吸收、有质动力加速等^[1-4]. 对超热电子角分布和能谱的测量可以帮助我们理解这些不同的吸收和加速机制^[5,6]. 目前虽然对超短超强脉冲激光与靶作用中超热电子的角分布和能谱进行了很多研究, 但在相同的激光功率密度条件下, 不同研究小组报道的结果却很不一致^[7,8], 以至于得出的激光转化效率和超热电子的产生机制很不相同. 特别是在一些大型激光装置上进行的实验, 由于激光系统运行费用的昂贵以及靶室内空间的有限, 只能通过单发次、特定方向上产生的电子来估算激光的转化效率和推断该过程中的作用机制^[9,10]. 在估算转化效率时, 认为电子的角分布在各个方向上是相同的. 实际上, 由于电子发射具有一定的方向性, 不同方向上探测到的电子数目和电子能谱会有很大的差别. 如果忽略电子在发射方向和能谱分布上的这种各向异性, 必然会对激光转化效率的估算以及相互作用机制的推断造成一定的影响. 例如, Malka 等在通过电子数目估算入射

激光的转化效率时^[10], 只是记录了靶后法线方向产生的超热电子, 而忽略了靶前以及其他方向产生的电子; Okano 等^[7]在激光以 60° 辐照靶时, 仅仅通过测量激光反射方向的电子能谱就断定该过程中的作用机制主要是共振吸收机制, 而忽略了其他方向的电子对相互作用机制的影响. 针对上述问题, 本文对超热电子的角分布和能谱的各向异性进行了实验研究, 并就引起各向异性的原因进行了简单分析.

2. 实 验

本实验是在自建的 20 TW 钛宝石激光器(XL-II)上进行的. 激光输出的中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 30 fs, 最大输出能量为 640 mJ, 工作频率为 10 Hz. 实验中入射激光与探测器的几何布局如图 1. P 偏振的脉冲激光由 $f = 3.6$ (焦距与口径之比) 的离轴抛物反射镜聚焦到靶面上. 为了测量电子在激光入射面内的角分布, 在靶的周围垂直放置多块尺寸为 3.2 cm × 5 cm 的成像板直接记录超热电子. 每块成像板所能接收的角度为 36°, 成像板的高度中心位于激光入射面内, 成像板到激光焦点的距离为 5.5 cm. 实验前将成像板在强光下曝光 20 min, 以便消除残余信号对实验结果的影响^[11]. 为了滤掉

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10374115, 10374116, 60321003, 10334110), 国家高技术惯性约束聚变基金和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

高能离子,在成像板前放置了厚度为 $370\ \mu\text{m}$ 的铝膜作为滤片.为了进一步确定成像板上的信号主要来自超热电子而不是 X 射线,我们做了对比实验,比较了加入磁场与不加磁场时成像板上的信号强度.发现不加磁场时的信号强度比加磁场时高 2 个数量级,由此可以确定成像板上的信号主要来自超热电子.

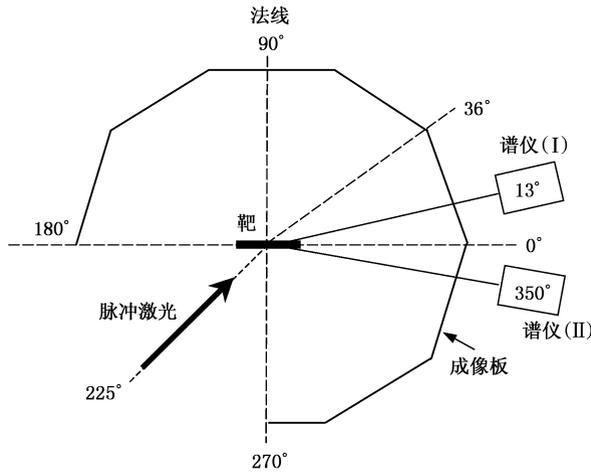


图 1 激光与探测器的几何布局示意图

电子的能谱测量使用的是自行研制的电子磁谱仪.磁谱仪的规格有两种:第一种(谱仪 I)的强度为 $0.1\ \text{T}$,可测量的最大电子能量为 $2.1\ \text{MeV}$;第二种

(谱仪 II)的强度为 $0.2\ \text{T}$,可测量的最大电子能量为 $5\ \text{MeV}$.谱仪(I)测量的是靶后向、距离靶面 13° 处电子的能谱,谱仪(II)测量的是靶前向、距离靶面 10° 处电子的能谱,整个布局在图 1 中已给出.在进行能谱测量时,谱仪的外层包有 $2\ \text{mm}$ 厚的铅皮,以便进一步消除 X 射线和 γ 射线对实验结果的影响.

实验中采用的靶是 $30\ \mu\text{m}$ 的薄膜铝靶,并采用单发打靶模式.激光的聚焦情况是通过针孔相机直接来监测的,针孔直径为 $10\ \mu\text{m}$,所测量的焦斑大小约为 $18\ \mu\text{m}$ (FWHM).实验中的激光能量为 $60\ \text{mJ}$,对应靶面上的激光功率密度约为 $3.5 \times 10^{17}\ \text{W}/\text{cm}^2$.

3. 结果分析与讨论

图 2 是激光以 45° 辐照靶时产生的超热电子的典型角分布,其中图 (a) 为直接用成像板获得的超热电子的分布图像,图 (b) 为相应极坐标系下超热电子的分布.可以看出,电子束的发射明显地具有一定的方向性.靶后发射的电子呈现较为规则的双峰结构,一束沿靶面方向,一束靠近靶背面法线方向,而靶前发射的电子主要集中在靶面的法线方向和激光入射方向的反射方向.对于这样的角分布,我们测量了不同方向上电子的能谱分布如图 3.图 (a) 为谱仪(I)所记录电子的能谱分布,图 (b)

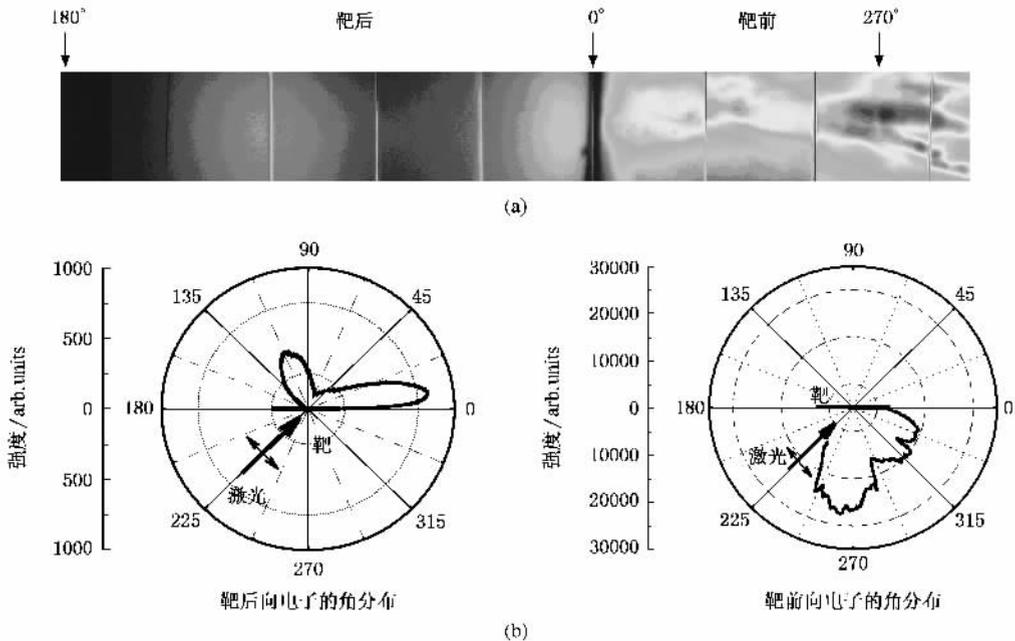


图 2 激光 45° 入射时超热电子的典型分布 (a) 用成像板直接测得的超热电子的角分布图像;(b) 相应极坐标系下超热电子的角分布

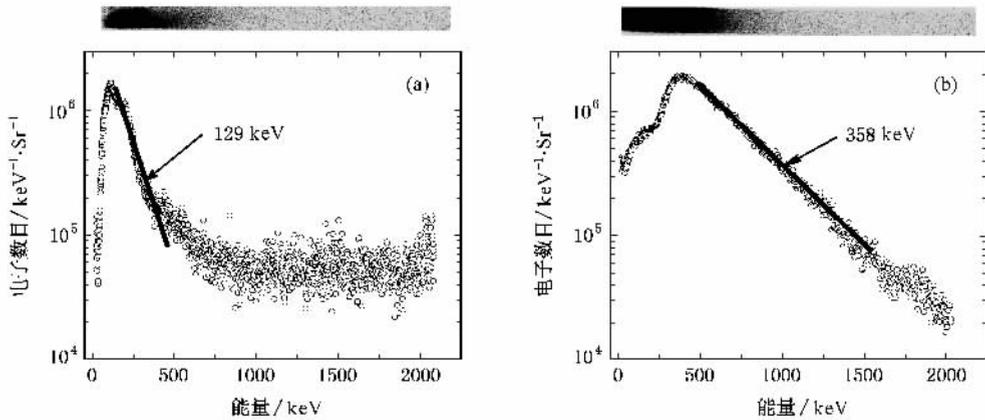


图3 超热电子的能谱分布 (a)谱仪(I)记录电子能谱分布 (b)谱仪(II)记录电子能谱分布. 图中的黑条为谱仪中成像板所记录的超热电子的能谱分布

为谱仪(II)所记录电子能谱分布,图中的黑条为谱仪中成像板所记录电子分布.从成像板的颜色变化大致可以断定电子主要分布在低能部分,而从处理后的能谱分布可以直接看出电子的能量分布.谱仪(I)记录到的电子主要分布在100 keV左右,最大能量约为600 keV,麦克斯韦分布拟合的电子温度约为129 keV,而谱仪(II)记录到的电子主要分布在400 keV左右,最大能量约为2 MeV,麦克斯韦分布拟合的电子温度约为358 keV.

从图2和3中明显地看出,超热电子的发射具有一定的方向性,而且不同方向上的电子能谱差别很大.我们认为超热电子在角分布和能谱上表现出来的这种各向异性,主要与超热电子的产生机制有关.例如由真空加热和共振吸收机制产生的超热电子,主要沿着密度梯度的方向发射^[3],而 $J \times B$ 加热和有质动力加速机制使超热电子主要沿着激光传输的方向发射^[12].对于图2中,沿靶面发射的电子是由靶面磁场引起的^[13],而靶面法线方向发射的超热电子认为是共振吸收产生的^[14].另一方面,靶后向产生的电子的能量小于靶前产生的电子的能量,这主要是由于靶前产生的电子在穿过靶到达靶背面时,受到靶内碰撞效应以及靶背面电荷分离场抑止的原因.同时电子束在靶内传输时受到自生磁场的准直作用,使得靶后向发射的电子呈现较为规则的圆形分布.由此可见,电子的产生机制不同,对应的角分布和能谱就不同.

电子能谱的这种各向异性可以很好地解释各研究小组在相同的入射激光功率密度下,得到的实验结果相差很大的现象.例如,在入射激光的功率密

度为 10^{17} W/cm²时,蔡达峰^[8]等报道的电子温度为530 keV,而Okano^[7]等报道的电子温度为130 keV,二者相差4倍之多.实验结果出现如此大的差别,原因是他们测量的是不同方向上的电子能谱.蔡达峰等测量的是靶前向45°方向上的电子能谱,而Okano等测量的是靶前向60°方向上的电子能谱.在这种情况下,即使电子的角分布完全相同,电子能谱也会因为探测器测量方向的不同而差别很大.

此外,我们发现电子的角分布和能谱也会因为激光入射角度的不同而不同.对于22°入射的激光,电子的发射主要在激光的反射方向;而当激光的入射角度为70°时,一束电子沿靶面方向发射,另一束电子位于激光反射方向和靶面法线方向之间.在这种情况下,即使保持探测器的探测方向不变,电子能谱也会因电子分布的不同而呈现出各向异性.

电子的能谱与相互作用过程中的能量吸收机制密切相关,所以在多数文献中,人们通过能谱中麦克斯韦分布拟合的电子温度来推断该过程中的主要作用机制.但通过以上分析,我们看出,电子的能谱与电子角分布、激光条件以及探测器的探测方向等多种因素有关,这就对正确判断相互作用过程中的作用机制带来了一定的困难.比如在推断相互作用机制时,很多研究小组将探测到的电子温度与 B_{eg} 等的经验公式 $T_h = \alpha(I\lambda^2/10^{17} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2})^{1/3-1/2}$ 相比较^[15,16],然后断定该过程是那一种机制起主导作用.但在相互作用过程中,各种吸收机制是相互交织在一起的,只能是在某个方向上或某个实验条件下,其中的一种机制在起主导作用.而整个过程中的相互作用机制不能仅仅通过测量一个方向上的电子能谱

来确定. 所以在断定整个过程中的电子产生机制时, 一定要结合具体的实验条件和激光参数.

4. 结 论

实验研究了超短超强的飞秒脉冲激光与固体薄膜靶相互作用时产生的超热电子的角分布和能谱. 实验结果表明, 电子的角分布和能谱均表现出各向

异性. 电子能谱的各向异性, 除了与电子的产生机制有关外, 还与电子的角分布、激光条件以及探测器的探测方向等因素有关. 电子能谱的这种各向异性可以解释目前在相同的激光功率密度下, 各个研究小组报道的结果差异很大的现象. 同时, 由于超热电子空间分布和能谱分布的各向异性, 在通过电子数目和电子温度推断激光的转化效率和判断作用过程中电子的产生机制时一定要慎重.

- [1] Brunel F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 52
- [2] Wilk S C, Krueer W L, Tabak M, Langdon A B 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1383
- [3] Santala M I K, Zepf M, Watts I, Beg F N, Clark E, Tatarakis M, Krushelnick, Dangor A E, McCanny T, Spencer I, Signal R P, Ledingham W D, Wilks S C, Machacek A C, Wark J S, Allott R, Ckarke R J, Norreys P A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1459
- [4] Sheng Z M, Mima K, Sentoku Y, Jovanovic M S, Taguchi T, Zhang J, Meyer-ter-Vehn J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 055004
- [5] Gu Y Q, Cai D F, Zheng Z J, Yang X D, Zhou W M, Jiao C H, Chen H, Wen T S, Chunyu S T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 186 (in Chinese) [谷渝秋、蔡达峰、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]
- [6] Chen L M, Zhang J, Liang T J, Li Y T, Wang L, Jiang W M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 592 (in Chinese) [陈黎明、张 杰、梁天骄、李玉同、王 龙、江文勉 2000 物理学报 **49** 592]
- [7] Okano Y, Hironaka Y, Nakamura K G, Kondo K, Oishi Y, Nayuki Takuya, Nemoto K 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2278
- [8] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Yang X D, Wei T S, Chunyu S T 2003 *High power and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) [蔡达峰、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]
- [9] Wharon K B, Hatchett S P, Wilks S C, Key M H, Moody J D, Yanovsky V, Offenberger A A, Hammel B A, Perry M D, Joshi C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 822
- [10] Malka G, Miquel J L 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 75
- [11] Tanaka K A, Yabuuchi T, Sato T, Kodama R, Kitagawa Y, Takahashi T, Ikeda T, Honda Y, Okuda S 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 013507
- [12] Yu W, Bychenkov V, Sentoku Y, Yu M Y, Sheng Z M, Mima K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 570
- [13] Nakamura T, Kato S, Nagatomo H, Mima Kunioki, 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 265002
- [14] Li Y T, Zhang J, Sheng Z M, Zheng J, Chen Z L, Kodama R, Matsuoka T, Tampo M, Tanaka K A, Tsutsumi T, Yabuuchi T 2004 *Phys. Rev. E* **69** 036405
- [15] 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
- [16] Zhidkov A, Sasaki A, Tajima T 2000 *Phys. Rev. E* **61** R2224

Measurements of angular distribution and energy spectrum of hot electrons^{*}

Zheng Zhi-Yuan¹⁾ Li Yu-Tong¹⁾ Yuan Xiao-Hui^{1,2)} Xu Miao-Hua¹⁾ Liang Wen-Xi¹⁾
Yu Quan-Zhi¹⁾ Zhang Yi¹⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾ Zhang Jie^{1)†}

¹ *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

² *State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*

(Received 20 December 2005; revised manuscript received 18 January 2006)

Abstract

The angular distribution and energy spectrum of hot electrons produced in the interaction of ultra-short ultra-intense laser pulses with solid foil targets are investigated. Results show that both the angular distribution and the energy spectrum reveal anisotropic behavior. This anisotropy is believed to be related to the electron generation mechanism. The existence of energy anisotropy explains why different experimental groups obtained quite different electron temperatures under the same laser intensity.

Keywords : femtosecond laser pulses , plasma , energy spectrum , angular distribution , anisotropy

PACC : 5250J , 5225

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10374115 , 10374116 , 60321003 , 10334110) , the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China and the National Key Laboratory of High Temperature and High Density Plasma.

[†] Corresponding author. E-mail : jzhang@aphy. iphy. ac. cn