

激光入射角对靶面方向超热电子发射的影响^{*}

远晓辉^{1,2)} 李玉同¹⁾ 徐妙华¹⁾ 郑志远¹⁾ 梁文锡¹⁾ 于全芝¹⁾
张翼¹⁾ 王兆华¹⁾ 令维军¹⁾ 魏志义¹⁾ 赵卫²⁾ 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) 中国科学院西安光机所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2006 年 3 月 5 日收到, 2006 年 3 月 29 日收到修改稿)

实验研究了超短超强激光脉冲与薄膜靶相互作用中产生的超热电子角分布随激光入射角的变化. 在靶面方向观测到一束方向性很好的高能超热电子. 该高能超热电子束的电子数目随着激光入射角的增大而增大. 对结果的分析表明, 表面准静态磁场是导致表面电子产生的主要原因.

关键词: 超热电子, 表面准静态磁场, 超强激光脉冲与等离子体相互作用

PACC: 5250, 5225P, 2320E

1. 引 言

超强激光脉冲与等离子体相互作用后将产生大量的高能超热电子^[1-4]. 对这些超热电子特性的研究和控制一直是强场物理研究的热点. 影响超热电子发射的因素很多, 比如激光的偏振态^[5]、激光聚焦功率密度^[6]和等离子体密度标尺长度^[7]等, 人们对这些问题已经进行了较多的研究. 最近的理论^[8]和实验^[9]表明, 激光入射角不仅对于能量的吸收^[10], 而且还对自生电场和磁场的产生有重要影响. 这些场将进一步影响超热电子的运输和发射方向^[11, 12]. 因此, 研究不同入射角下激光固体靶相互作用中产生的超热电子的角分布可以更深刻地理解超热电子的产生和传输的物理规律.

本文对 P 偏振飞秒激光在不同入射角下与薄膜铝靶相互作用中产生的超热电子的角分布进行了测量. 最主要的实验现象是, 在靶面方向出现了新的定向发射的超热电子束. 随着激光入射角度的增大, 沿靶面方向发射的超热电子数目逐渐增大. 同时, 靶后激光传输方向的超热电子数目逐渐减小, 超热电子也由多方向发射过渡为定向性很好的单方向发射. 对结果的分析表明, 沿靶面方向发射的定向超热电

子束是表面准静态磁场和鞘层电荷分离场共同作用的结果.

2. 实验布局

本实验是在中科院物理研究所光物理重点实验室的 20TW 钛宝石飞秒激光装置极光-II (Xtreme Light-II) 上进行的. 图 1 为激光入射角为 45° 时的实验布局. 激光的中心波长为 800nm, 脉宽 30fs, 最大可输出能量为 640mJ, 重复频率 10Hz. 实验中, P 偏振的飞秒激光经 $f/3.6$ 的离轴抛物面镜反射, 并聚焦到 30 μm 厚的薄膜铝靶上. 激光入射面位于水平面内. 一台位于水平面上方、与靶面法线方向夹角成 45° 的针孔相机用来记录打靶产生的 X 射线的焦斑, 针孔直径为 10 μm . 图 2 给出了入射角为 45° 时针孔相机拍摄的 X 射线焦斑的图像和强度分布, 半高全宽为 18 μm . 激光的对比度为 10⁵:1. 靶面上的激光聚焦功率密度控制在 (0.5—2) $\times 10^{18}$ W/cm². 实验中我们采用了单发打靶模式.

超热电子的空间分布是用多层成像板 (image plate, IP) 组成的角分布仪进行探测的. 在第一层 IP 之前和相邻两层 IP 之间插入一定厚度的铝薄膜作为滤片, 分别测量不同能量段的超热电子角分布,

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10374115, 60321003, 10335020, 10425416 和 10390161), 国家高技术惯性约束聚变主题, 高温高密度等离子体国家重点实验室资助的课题.

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

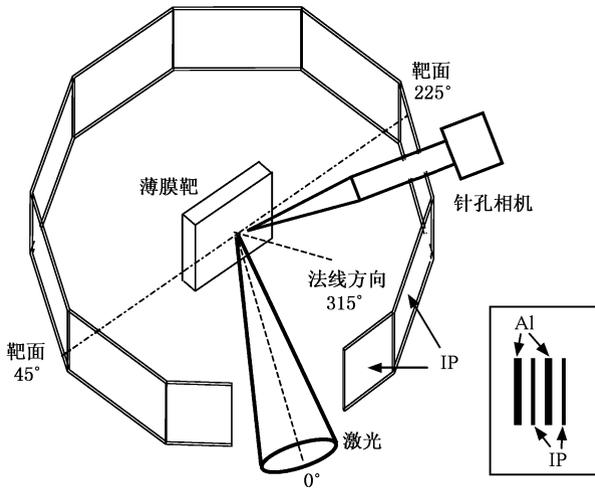


图 1 实验布局和 IP 结构

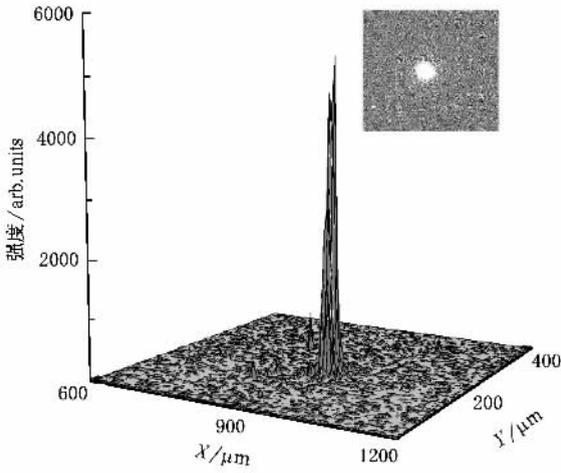


图 2 针孔相机测量的 X 射线焦斑

同时滤掉高能离子和可见光(见图 1 中的插图).角分布仪的高度中心位于激光入射面内,在入射面内的探测范围为 10° — 350° (另外约 20° 的范围用来入射激光),在垂直方向探测范围为水平面上下 $\pm 27^{\circ}$.为了确认测量到的信号来自超热电子,我们在 IP 板之前加入 0.15T 的偏转磁场,发现与不加磁场时相比,记录的信号强度降低了至少两个数量级,这说明测量到的信号确实主要来自相互作用中产生的超

热电子.一些实验发次中,在激光的反射方向加入大口径的能量卡计,用来测量激光的能量吸收情况.

3. 实验结果和讨论

图 3 是激光脉冲以 45° 角入射到薄膜铝靶上时产生的超热电子的典型空间分布 IP 图像.图中的颜色深浅代表了电子的数目多少,其中深色对应较多的数目.从图中可以看出,产生的超热电子主要集中在入射平面内,靶前的超热电子数目明显大于靶后.在靶面方向出现了强的超热电子发射峰,图中用“表面电子”标出.文献 [13] 在激光强度为 $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, 且存在预脉冲时,也发现了沿靶面方向发射的超热电子,但产生机理还不清楚.另外,超热电子的空间分布呈现多峰结构特征.在靶面的法线方向、激光的反射方向和后靶面方向均有超热电子的发射峰.

图 4 为入射角分别为 (a) 22.5° (b) 45° (c) 70° 和 (d) 79° 时,能量大于 350keV 的超热电子的角分布.为了方便在同一个图中对比靶前和靶后的超热电子角分布,我们对部分靶后或靶面方向的超热电子数目进行了适当放大(图 4 中虚线框标出的部分).图 4 表明,尽管产生的超热电子可能存在多个发射峰,但不管在何种入射角条件下,在靶面方向均存在着超热电子的发射峰.图 5 给出了其电子数目占总出射电子数目的百分比.可以看到,随着激光入射角度的增大,表面电子所占份额呈指数增大.当入射角为 22.5° 时,表面电子数目很小,仅占总电子数的 2% 左右,但当入射角增大到 79° 时,表面电子与总电子数目的比值大于 95%,即几乎所有超热电子都沿着靶面方向发射.激光入射角度大于 60° 时,表面电子的方向性很好,其发散角小于 20° .而且随着入射角度的增大,表面电子的发散角也相应减小.当入射角增大到 79° 时,其发散角仅为 8° .

图 5 也给出了激光传输方向附近的超热电子数目占总电子数目的百分比随着激光入射角的变化.可以看到,随着激光入射角度的增大,靶后的超热电

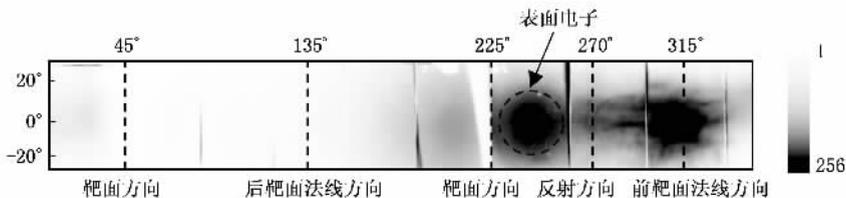


图 3 入射角为 45° 时相互作用产生的超热电子的典型空间分布图像(部分方位角在图中已经标出)

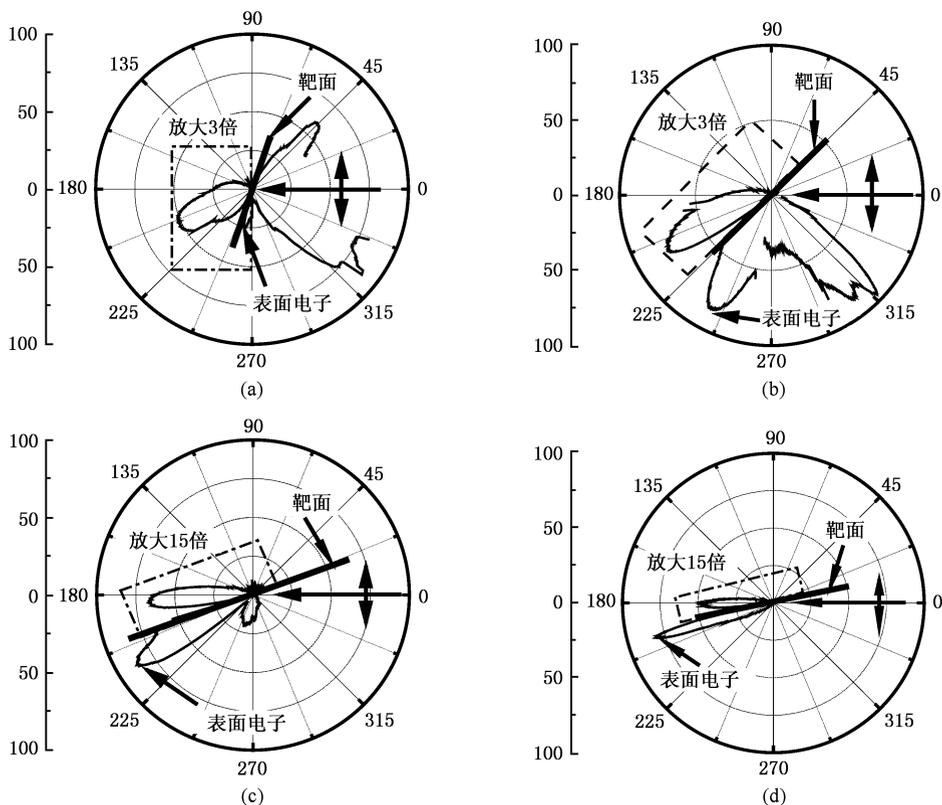


图4 不同入射角下,偏振面内超热电子的角分布 (a)22.5° (b)45° (c)70° (d)79°

子数目逐渐减小.当入射角大于 60°时,激光传输方向附近的超热电子数占总超热电子数的百分比小于 2.2%.也就是说,在大激光入射角条件下,几乎没有超热电子穿过铝靶.而且随着入射角的增大,超热电子的发射方向趋于单一化.

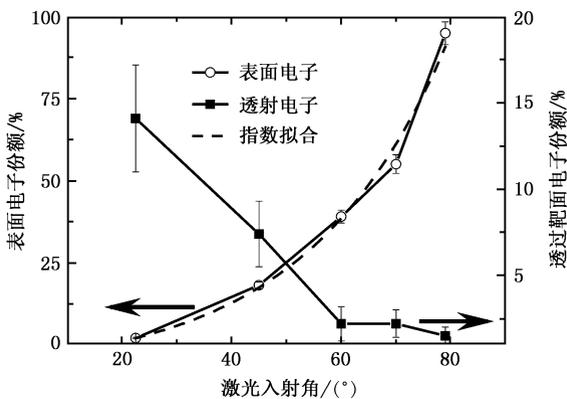


图5 表面电子数和传输方向电子数占总电子个数的比例

影响超热电子产生和加速机理的因素很多,其中一个关键的因素是电子在激光场中的归一化动量 $a_L = eE/m_e \omega_0 c = 8.5 \times 10^{-10} I^{1/2} \lambda_L$,其中 E 为激光电场幅度, m_e 为电子的静止质量, ω_0 为激光频率, I

为聚焦激光功率密度(单位为 W/cm^2), λ_L 为激光波长(单位为 μm).理论和实验表明,对于非相对论激光强度 ($a_L < 1$),超热电子可能的产生机理包括共振吸收^[14]、真空加热^[15]等;而对于相对论激光强度 ($a_L > 1$), $J \times B$ 加热^[16]等将成为主要加速机理.对于我们实验中的激光强度,由于介于二者之间,存在多种加速机理的相互竞争,超热电子的产生过程相当复杂,因此实验中出现了多个超热电子发射峰.同样的光强范围下,Cai等^[17]也实验观察到了超热电子的多峰发射结构.这里我们不对每群电子的产生机理都做进一步分析,仅讨论表面电子发射随激光入射角的变化.

在激光强度为 $10^{13} - 10^{14} W/cm^2$ 时,早期的二维 PIC 模拟^[18]指出,电子在表面磁场的作用下将沿着靶面传输离开焦斑区域,这里的自生磁场是由于等离子的密度梯度和温度梯度不一致所致.对于我们的短脉冲实验结果,可以用最近 Nakamura 等人^[10]提出的表面磁场理论进行解释.对于短脉冲强激光等离子体相互作用,Nakamura 认为:当一束强激光脉冲斜入射到具有陡的密度梯度的固体靶表面时,通过真空加热或 $J \times B$ 加热产生的超热电子向靶内等离

子体运输.前向传输的超热电子和冷等离子体回流构成环形电流,产生强的准静态磁场.当磁场足够强时,相当一部分电子会被这个磁场反射回到靶前的真空区域.而真空中存在的电荷分离场又将电子再次拉回到靶面.电子将沿着靶面一边振荡一边传输.这样,沿着靶表面会产生一个电流,该电流进一步增强了表面准静态磁场.正是这样一个正反馈作用维持着表面超热电子电流层和表面准静态磁场.所以,在靶面电荷分离场和表面准静态磁场的共同作用下,相当数量的超热电子最终沿着靶面方向发射.这和我们的实验观测是一致的.根据其理论,表面准静态磁场可以简单表示为

$$B \propto \eta(1 - \xi), \quad (1)$$

其中, η 为激光的能量吸收系数, ξ 为超热电子穿过靶面的透过率.在激光反射方向进行的能量吸收实验表明:激光入射角为 45° 时, $\eta \sim 66\%$; 而激光入射角为 70° 时, $\eta \sim 46\%$. 该结果与相关报道基本一致^[19]. 由图 5 可以看到,与入射角为 22.5° 时相比,激光入射角为 79° 时,表面磁场的强度增大了一个数量级.因此,在大激光入射角时,更多的向等离子体内运输的超热电子被表面磁场反射回到靶前的真空区域,在鞘层电荷分离场的共同作用下,被约束从而沿着靶面方向发射.实验结果很好地验证了 Nakamura 等的理论.同时,这也解释了文献[9]中,锥角为 60° 时,在锥壁的法线方向能测量到超热电子发射峰,而锥角为 30° 时却没有该方向的峰结构.

下面我们对 Nakamura 的理论做进一步的推广.在考虑了表面准静态磁场的影响后,根据 Sheng 提出的^[20]超热电子发射方向规律,可以得到一个更普适的超热电子角分布公式^[21]

$$\sin\theta' = \frac{\gamma - 1 - \delta\Phi}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} \sin\theta, \quad (2)$$

其中, θ 为激光方向与靶面法线方向之间的夹角, θ' 为超热电子发射方向与靶面法线方向之间的夹角, γ 为超热电子的相对论因子,

$$\delta\Phi = \delta\phi - \delta A_{0y} / \sin(\theta),$$

$\delta\phi$ 为空间电荷分离造成的静电势的变化, δA_{0y} 为其静矢势的变化,与表面磁场 B_z 的产生相关.图 6 给出了入射角为 45° 、不同 $\delta\Phi$ 值时的超热电子发射方

向.可以看到,当 $\delta\Phi < 0$ 时,超热电子的低能部分沿着靶面方向发射.详细讨论见文献[21].

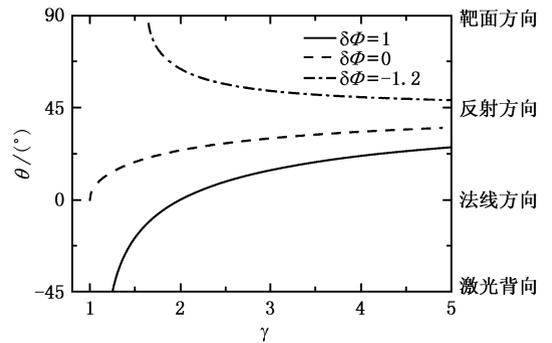


图 6 不同 $\delta\Phi$ 条件下,超热电子发射角与其能量的关系

Sentoku 等^[22]对超热电子在锥靶中的电流进行了理论分析,发现在表面磁场的作用下,超热电子也沿靶面向锥尖部位流动,形成电子的聚焦效应.我们的实验结果表明,锥靶的确可以引导电子沿着锥壁到达锥尖.因此,合理选择锥角,不仅可以提高聚焦激光强度,而且可以将与锥壁相互作用产生的所有超热电子汇聚到锥尖处,大大提高了超热电子的电流强度,这对于实际应用具有重要意义.

4. 结 论

本文研究了超短超强激光脉冲与薄膜靶相互作用中产生的超热电子的角分布随激光入射角的变化.在沿靶面方向观察到定向发射的高能超热电子束.沿该方向发射的超热电子数目随着激光入射角度的增大而增大,同时,靶后沿激光传输方向的超热电子数目减小,超热电子的角分布也由多峰结构过渡为单峰结构.本文从实验上验证了表面磁场对超热电子定向发射的影响,其次证明了尖锥靶确实可以引导电子.通过合理选择锥角,可以将产生的所有电子引导到锥尖,从而实现对超热电子定向发射的控制.

在本文的完成过程中,曾多次与盛政明研究员和陈民同学、马燕云博士、郑君同学进行有益的讨论,他们提出了很好的建议,在此表示感谢.

- [1] Malka G ,Aleonard M M ,Chemin J F *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 66402
- [2] Peng X Y ,Zhang J , Jin Z *et al* 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026414
Li Y T , Zhang J , Sheng Z M *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 1650021
- [3] Krushelnick K , Clark E L , Najmudin Z *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 737
- [4] Tabak M , Hammer J , Glinsky M E *et al* 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [5] Chen L M , Zhang J , Li Y T *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **87** 225001
- [6] Zhang Jun , Zhang J , Sheng Z M *et al* 2004 *Phys. Rev. E* **69** 046408
Li Y T , Zhang J , Sheng Z M *et al* 2004 *Phys. Rev. E* **69** 036405
- [7] Santala M I K , Clark E , Watts I *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1459
- [8] Davies J R , Bell A R ,Tatarakis 1999 *Phys. Rev. E* **59** 6032
Mason R J , Dodd E S ,Albright 2005 *Phys. Rev. E* **72** 015401(R)
- [9] Chen Z L , Kodama R , Nakatsutsumi M *et al* 2005 *Phys. Rev. E* **71** 36403
- [10] Nakamura T , Kato S , Nagatomo H *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 265002
- [11] Eidmann K , Rix R , Schlegel T *et al* 2001 *Europhys. Lett.* **55** 334
- [12] Zheng Z Y , Li Y T , Yuan X H *et al* 2005 *Acta. Phys. Sin.* **55** 1894(in Chinese) ,accepted[郑志远、李玉同、远晓辉等 2005 物理学报 **55** 1894]
- [13] Bastiani S , Rousse A , Geindre J P *et al* 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7179
- [14] Wilks S C ,Kruer 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE33** 1954
- [15] Brunel F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 52
- [16] Kruer W L ,Estabrook *et al* 1985 *Phys. Fluids.* **28** 430
- [17] Cai D F , Gu Y Q , Zheng Z J *et al* 2003 *Phys. Plasmas* **10** 3265
- [18] Forslund D W ,Brackbill J U 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 1614
Kieffer J C , Pepin H , Matte J P *et al* 1983 *Phys. Rev. Lett.* **50** 1054
- [19] Eidmann K , Meyer-ter-Vehn J , Schlegel T *et al* 2000 *Phys. Rev. E* **62** 1202
- [20] Sheng Z M , Sentoku Y , Mima K *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 5340
- [21] Chen M , Sheng Z M and Zhang J *et al* 2006 *Phys. Plasmas* **13** 014504
- [22] Sentoku Y , Mima K , Ruhl H *et al* 2004 *Phys. Plasmas* **11** 3083

Influence of laser incidence angle on hot electrons generated in the interaction of ultrashort intense laser pulses with foil target^{*}

Yuan Xiao-Hui^{1,2)} Li Yu-Tong¹⁾ Xu Miao-Hua¹⁾ Zheng Zhi-Yuan¹⁾ Liang Wen-Xi¹⁾ Yu Quan-Zhi¹⁾
Zhang Yi¹⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Ling Wei-Jun¹⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾ Zhao Wei²⁾ Zhang Jie^{1)†}

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

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

(Received 5 March 2006 ; revised manuscript received 29 March 2006)

Abstract

The effect of laser incidence angle on the angular distribution of hot electrons generated in the interaction of an ultrashort intense laser pulse with the foil target are investigated. A new emission peaked in the target surface direction is observed for the first time. With the increase of the incidence angle, the ratio of the number of surface electrons to the total electron number increases, while the number of transmitted electron through the target decreases. It is believed that the surface hot electrons are caused by the confinement of the quasi-static surface magnetic field and electric field.

Keywords : surface electrons, quasi-static surface magnetic field, interaction of an ultrashort intense laser pulse with plasma

PACC : 5250, 5225P, 2320E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10374115, 60321003, 10335020, 10425416 and 10390161), the National High-Tech ICF program, and National Key Laboratory of High Temperature and High Density Plasma.

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