

强激光与等离子体相互作用中沿靶表面发射的高能超热电子*

李玉同¹ 远晓辉^{1,2} 徐妙华¹ 郑志远¹ 盛政明¹ 陈民¹ 马燕云¹ 梁文锡¹
于全芝¹ 张翼¹ 刘峰¹ 王兆华¹ 魏志义¹ 赵卫² 张杰^{1,†}

(1 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(2 中国科学院瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

摘要 在强激光与等离子体相互作用研究中,文章作者从实验上首次观测到沿靶面方向发射的高能超热电子束.该电子束只有在等离子体电子密度标长较短的条件下才会出现.数值模拟表明,靶表面电磁场的约束作用是产生这束电子的主要原因.这一结果有助于加深对激光惯性约束聚变快点火实验中的锥靶物理过程的理解,并有潜在的应用前景.

关键词 激光等离子体相互作用,超短超强激光脉冲,超热电子

A fast electron beam along a target surface irradiated by intense laser pulses

LI Yu-Tong¹ YUAN Xiao-Hui^{1,2} XU Miao-Hua¹ ZHENG Zhi-Yuan¹ SHENG Zheng-Ming¹
CHEN Ming¹ MA Yan-Yun¹ LIANG Wen-Xi¹ YU Quan-Zhi¹ ZHANG Yi¹ LIU Feng¹
WANG Zhao-Hua¹ WEI Zhi-Yi¹ ZHAO Wei² ZHANG Jie^{1,†}

(1 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China.)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China.)

Abstract A fast electron beam emitted along a target surface irradiated by intense laser pulses has been observed. The beam is found to appear only when the plasma density scale length is small. Numerical simulations reveal that the electron beam is formed due to the confinement of the quasistatic electromagnetic fields in the surface. The results are of interest for potential applications of fast electron beams and a deeper understanding of the cone-target physics in fast ignition related experiments.

Keywords laser-plasma interactions, ultrashort and ultraintense laser pulses, hot electrons

在强激光与物质相互作用中,高能超热电子的产生和输运是一个基本物理过程^[1-6],它对快点火激光核聚变^[7]、高能离子^[8-11]、硬 X 射线^[12]和中子产生^[13]等应用是至关重要的.在快点火激光核聚变中,为了避免压缩靶丸周围大尺度等离子体对加热激光束的影响,在 2002 年,日本大阪大学的研究人员将一个中空的锥靶和待压缩靶丸耦合在一起,等靶丸充分压缩后,加热强激光从锥靶入射.实验发现采用锥靶后,中子产

额提高了 3 个数量级^[14,15].该项研究是本领域在过去几年中的最大进展之一,引起了强场物理学界的广泛关注.虽然该实验非常成功,但是在锥靶中发生的具体

* 国家自然科学基金(批准号:10374115,60321003,10335020,10425416,10334110和10390161),国家高技术研究发展计划,高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金资助项目
2006-05-29 收到

† 通讯联系人. Email: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

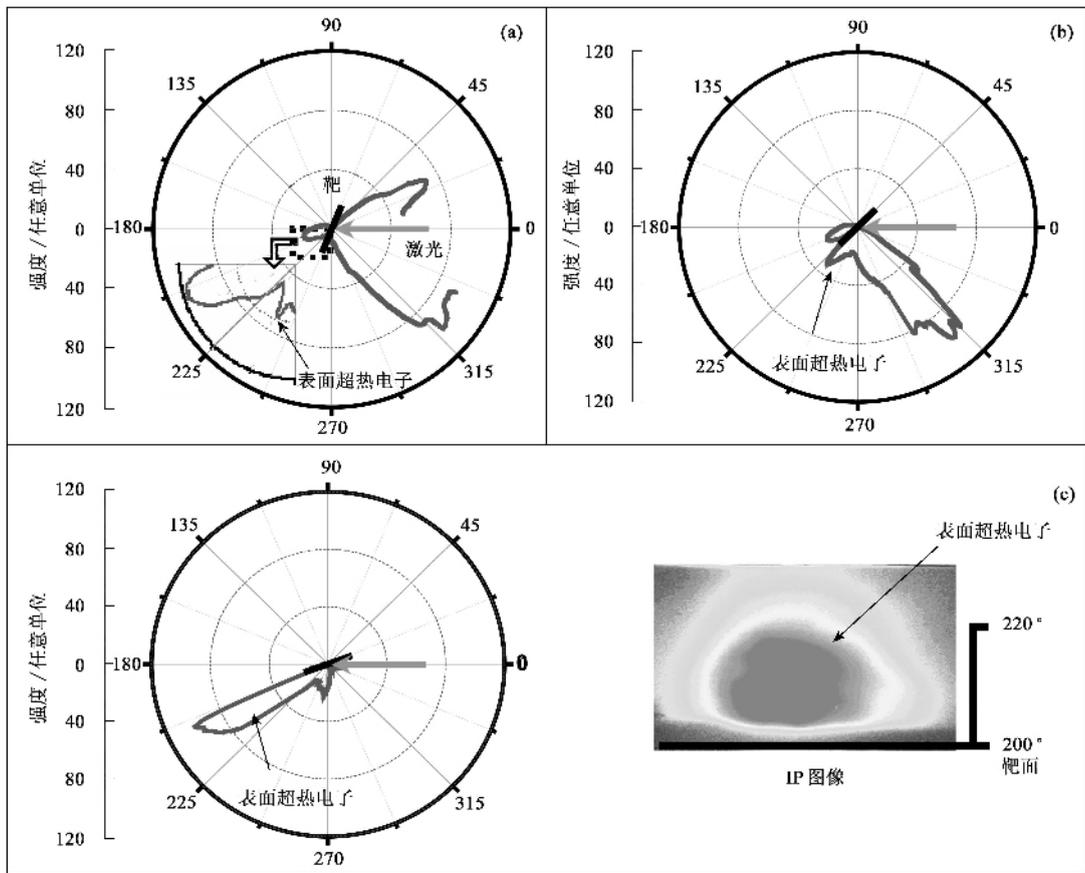


图1 能量 > 300 keV 的超热电子角分布, 激光入射角分别为 (a) 22.5° ; (b) 45° ; (c) 70° . (a) 中虚线部分采用了较大的刻度 (c) 中的右图是实测表面电子束图像

物理过程人们并不是很清楚. 数值模拟表明, 锥靶中可能会发生两个重要物理过程^[16], 一是加热激光脉冲外围的能量被锥靶引导到锥靶顶端, 从而使相互作用强度增大, 提高了激光到等离子体的耦合效率; 另一个可能的过程是在锥靶内壁产生的高能电子也被引导到锥尖, 其能量最终沉积到压缩靶丸中. 第一个过程已经得到实验的验证^[17,18]. 第二个过程尚缺乏直接的实验证据.

我们对这一物理过程进行了实验和理论研究. 发现当强激光的入射角较大时, 会沿着靶面方向产生一束方向性很好的高能超热电子束^[19]. 对该电子束的观测, 直接证实了锥靶的第二个物理过程. 此外我们还对该电子束产生的必要条件和束特性进行系统研究. 取得的结果不仅对于理解锥靶物理过程有重要意义, 而且还揭示了一种利用强激光产生稳定性高、发散角小、方向性好的高能电子束的简单方法, 所产生的高能电子对于超快(皮秒)电子衍射、超短 X 射线脉冲的产生、尾波加速中的电子注入等应用有重要意义.

实验是在中国科学院物理研究所的极光-II 飞秒激光装置上进行的. 该装置可以输出的最大能量为 0.6 J, 脉宽 30 fs, 工作波长 800 nm, 自发辐射增益 (ASE) $\sim 10^{-5}$. 激光脉冲由一个 $f/3.5$ 的离轴抛物反射镜聚焦到 30 μm 厚的铝薄膜靶上. 焦斑直径约为 ~ 10 μm (半高全宽). 实验中采用成像板 (IP) 阵列探测器对超热电子的角分布进行测量, 采用电子磁谱仪对电子能谱进行测量.

图 1 (a)–(c) 是激光入射面内的超热电子角分布, 激光强度 $(1-2) \times 10^{18}$ W/cm^2 . 其中 0° 对应激光入射方向. 一些超热电子沿着靶面法线或者激光反射方向发射, 这和以前的实验和理论结果一致^[20-22]. 最有趣的现象是, 沿着靶面方向出现了一束高能电子, 在图中用“SFE”(“表面超热电子”的英文缩写) 标出. 该电子束随着入射角的增大越来越明显. 在入射角为 70° 时, 表面电子的最大强度约为反射方向的 5 倍, 其准直性也很好, 发散角约为 15° (半高全宽). 图 2 (a) 给出了在靶面前 10° 测量得到的能谱, 电子能量分布峰值约为 290 keV, 最大

能量约为 2000 keV. 拟合得到的温度为 305 keV. 图 2 (b) 表示的是单位立体角时、能量大于 300 keV 的表面电子数目随激光强度的变化. 电子数目与光强近似成正比关系.

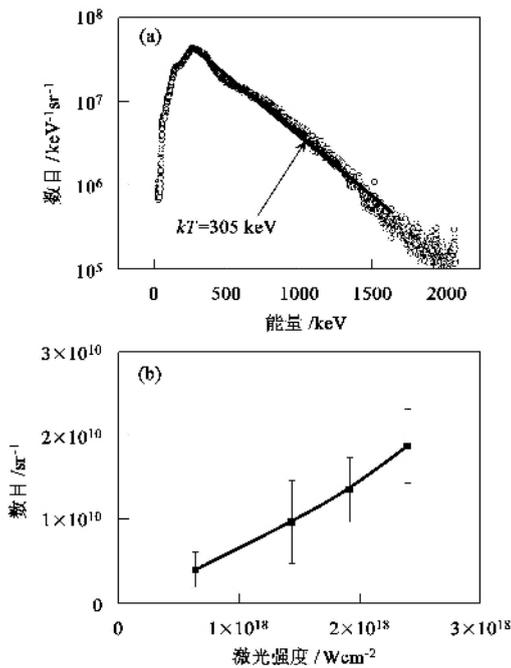


图 2 (a) 入射角 70° 时的表面电子能谱 (b) 表面电子数目随光强的变化

表 1 给出了表面电子和靶后透射电子相对于所有发射电子总数的份额(分别用 f_{se} 和 f_{te} 表示). 随着入射角的增大, 表面电子的份额越来越大, 而透射电子份额越来越小. 对于 70° 入射角, 约有 60% 的电子沿靶面发射, 而几乎没有电子透射到靶后.

表 1 表面电子和透射电子占总电子数的份额

入射角	f_{se}	f_{te}
22.5°	< 6%	20—28%
45°	17—28%	8—16%
60°	40—45%	< 6%
70°	50—65%	< 5%

为了理解表面电子的物理过程, 我们采用二维相对论程序进行了粒子模拟. 模拟条件和实验条件类似. 图 3 (a) 给出了理论模拟的几何构型和典型的电子轨迹. 大量的电子以振荡形式沿着靶面运动. 这一现象起因于表面自生磁场和电场的约束作用. 在早期, 当 $J \times B$ 加热或者真空加热机制产生的超热电子向靶内加速时, 超热电子流会在靶面诱生准静态磁场. 同时, 由于部分电子被激光电场拉到真空中, 所以在靶前也会诱

生静电场. 图 3 (b) 和 (c) 是准静态磁场 B_z 和静电场 E_z 的分布. B_z 是正的, 由纸面向外指向读者. E_z 的方向与靶面垂直. 数值已经按照入射激光场振幅归一化. 部分相互作用中产生的超热电子被 B_z 反射到真空中, 但是空间位置稍微在靶面外边一些. 负 E_z 又把电子推回到靶中. 经过多次的推拉过程, 超热电子沿着靶面方向以振荡形式运动, 最后离开焦斑, 形成沿靶面发射的电子束.

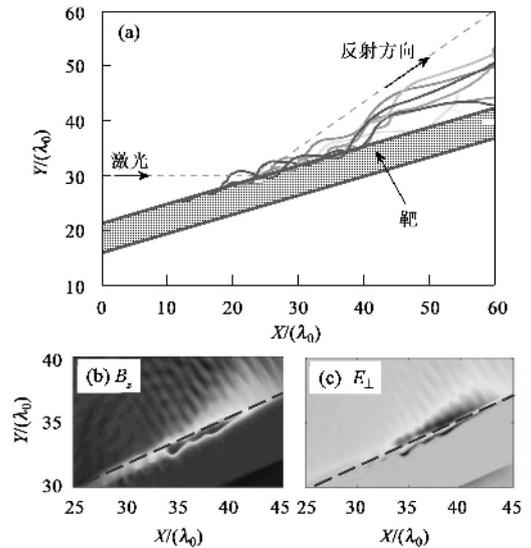


图 3 (a) 二维粒子模拟几何构型以及沿靶面发射的典型超热电子轨迹; (b) 和 (c) 是表面准静态磁场 B_z 和电场 E_z 的分布. 虚线标出了初始靶面位置

这里的电子振荡与发生在激光自聚焦通道中、在自生磁场和电场共同作用下的回旋电子加速过程^[23, 24]非常类似. 在激光自聚焦通道中, 当电子的回旋运动频率和激光频率发生共振时, 电子可以直接从激光场中吸收能量, 得到加速. 在对靶面电子的模拟中, 我们也发现了类似的电子加速过程^[25].

为了找出产生表面电子的必要条件, 我们在实验中也对 s 偏振和圆偏振激光、以及不同靶材料 (CH 和 Al) 的电子发射进行了观测. 结果与图 1 类似, 在入射角较大时, 都出现了表面电子. 但是, 当我们引入一个预脉冲, 使等离子体密度标长增大到一定程度后, 表面电子消失了. 实验中预脉冲的脉宽为 200 ps, 它的主脉冲之前 0.5 ns 到达靶面. 主脉冲强度保持不变. 图 4 (a) 是入射角为 60° 时有无预脉冲情况的对比, 预脉冲能量为 36 mJ. 可见引入预脉冲后, 电子发射峰从靶面附近移到了激光发射方向. 靶面附近的电子信号非常弱. 图 4 (b) 是不同预脉冲能量的对比, 激光入射角为 45°. 当预脉冲能量较小时

(4 mJ) 表面电子基本不受影响,但是随着预脉冲能量的增大,表面电子逐渐移到了发射方向. 在我们的粒子模拟中,也发现了类似的变化规律. 理论和实验都表明,当等离子体尺度较大时,会破坏表面电场的结构,导致表面电子的消失.

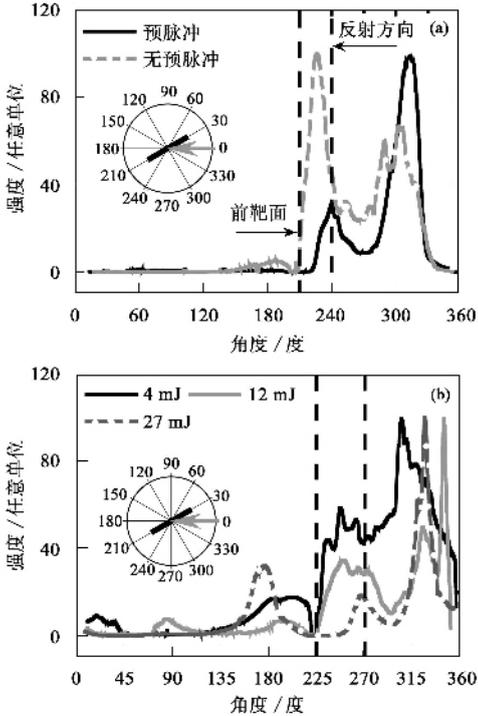


图4 (a)入射角 60° 时,有无预脉冲的电子角分布比较 (b)入射角 45° 时,不同能量的预脉冲对电子角分布的影响

总之,我们的实验和理论模拟都发现了沿靶表面发射的超热电子束. 该电子束具有好的方向性、准

直度、重复性,通过进一步优化,可以用作基于超短脉冲激光的超快电子源,进行诸如超快电子衍射、加速器注入等方面的应用研究. 同时,这一结果也验证了快点火实验中的锥靶对于超热电子的导引作用.

参考文献

- [1] Key M H *et al.* Phys. Plasmas ,1998 ,5 :1966
- [2] Davis J R *et al.* Phys. Rev. E ,1997 ,56 :7193
- [3] Bell A R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :035003
- [4] Borghesi M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :#309
- [5] Gremillet L *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :5015
- [6] Honda M *et al.* Phys. Plasmas ,2000 ,7 :1302
- [7] Tabak M *et al.* Phys. Plasmas ,1994 ,1 :1621
- [8] Wilks S *et al.* Phys. Plasmas ,2001 ,8 :542
- [9] Hatchett S *et al.* Phys. Plasmas ,2000 ,7 :2076
- [10] Allen M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2004 ,93 :265004
- [11] Fuchs J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,94 :045004 and references therein
- [12] Schwoerer H *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,86 :2317
- [13] Ledingham K W D *et al.* Science ,2003 ,300 :1107
- [14] Kodama R *et al.* Nature ,2001 ,412 :798
- [15] Kodama R *et al.* Nature ,2002 ,418 :933
- [16] Sentoku Y *et al.* Phys. Plasmas ,2004 ,11 :3083
- [17] Chen Z L *et al.* Phys. Rev. E ,2005 ,71 :036403
- [18] Kodama R *et al.* Nature ,2004 ,423 :1005
- [19] Li Y T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2006 ,96 :165003
- [20] Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :5340
- [21] Li Y T *et al.* Phys. Rev. E ,2001 ,64 :046407
- [22] Bastiani S *et al.* Phys. Rev. E ,1997 ,56 :7179
- [23] Pukhov A *et al.* Phys. Plasmas ,1999 ,6 :2847
- [24] Gahn C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :#772
- [25] Chen M *et al.* Opt. Express ,2006 ,14 :3093

· 信息服务 ·

欢迎订阅《现代物理知识》

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学科的一份中、高级科普性期刊. 其前身是创刊于1976年的《高能物理》科普杂志. 该刊以生动活泼的语言介绍现代物理知识、传递科技前沿动态,以深入浅出的形式做到科学性和趣味性并重. 适合广大的科学工作者、教育工作者、科学管理干部、研究生、大、中学生以及物理学爱好者阅读.

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目. 2007年《现代物理知识》每期定价8元,全年6期48元,欢迎新老读者订阅.

1. 邮局订阅:

邮发代号 2-824

2. 汇款到编辑部(免邮资)

汇款地址 北京918信箱《现代物理知识》编辑部收

邮编 100049