

# 交叉传播相对论强激光脉冲在等离子体中相互作用及其对电子加热和加速的作用\*

盛政明<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 中国科学院光物理重点实验室 北京 100080)

P. Zhang N. Saleh S. Chen D. Umstadter

(*FOCUS Center, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, USA*)

**摘要** 文章介绍了相干交叉传播的相对论强激光在与等离子体相互作用中产生的能量交换、瞬态电子密度调制和激光加速电子. 这些被加速的电子先在交叉光场中被捕获, 随后又注入到等离子体波中, 获得进一步的加速. 这些现象最近在作者的实验研究和数值模拟中被观察到.

**关键词** 交叉传播相对论强激光 瞬态电子密度调制 电子加热和加速

## Interaction of interfering relativistic-intense laser pulses in plasma and its effect on electron heating and acceleration

SHENG Zheng-Ming<sup>†</sup>

(*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

P. Zhang N. Saleh S. Chen D. Umstadter

(*FOCUS Center, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, USA*)

**Abstract** The interaction of two interfering relativistic-intense laser pulses in plasma results in energy exchange between the two pulses, extremely fast and deep modulation of the electron density, electron heating and trapping in the interfering region, as well as the injection of heated electrons into excited plasma waves for further acceleration afterwards. These phenomena have recently been observed in both our experiment and numerical simulations.

**Key words** interfering relativistic-intense lasers, fast electron density modulation, electron heating and acceleration

相对论高强度激光脉冲在等离子体中的相互作用是目前非常令人感兴趣的课题, 因为它们与新型辐射源、惯性约束聚变、新型粒子加速器等应用密切相关<sup>[1]</sup>. 这些作用常常以交叉传播的形式出现, 在这种情况下出现一些独特的物理现象. 譬如当一个强激光脉冲与固体靶作用时, 入射光与反射光在低密度区产生相干, 由此改变等离子体的光学性质<sup>[2]</sup>, 或者激发等离子体波<sup>[3]</sup>, 或者加热和加速电子<sup>[4]</sup>. 其中引起的随机加速是强激光作用下一种非常普遍的电子加速机制<sup>[5,6]</sup>. 在惯性约束聚变中, 由交叉激光脉冲作用产生的电子加热和激光折射率改

变必须得到适当的控制, 使激光能量能有效地耦合到靶核心. 另一方面, 理论研究发现, 交叉激光脉冲作用可能被用于把电子注入到等离子体波加速器中. 采用全光学法把电子注入到等离子体波中, 并通过等离子体波加速获得能量单色性好的电子束, 这是过去几年人们提出的理论设想<sup>[4]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号:10105014)、国家高技术研究发展计划和国家重点基础研究发展计划资助项目

2003-12-17 收到初稿 2004-02-23 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zmsheng@aphy.iphf.ac.cn

### 相关专业术语简介

等离子体 :它是由带电离子和电子组成的呈准电荷中性的一种物质状态,被称为固体、液体、气体之外的物质第四态.宇宙中可见物质中的 99% 是等离子体.等离子体的一个重要特性是其中带电粒子的运动呈现集体行为.(参考:James Glanz. The pervasive plasma state. <http://w3fusion.ph.utexas.edu/aps/plasmaState/PPSPage3.html>)

等离子体波 :等离子体中发生电荷分离而产生的一种静电波.将高能电子束和超短强激光脉冲注入到等离子体都可以产生等离子体波.由此产生的等离子体波被留在电子束和激光脉冲的后面,在文献中它们分别又被称为等离子体尾波场和激光尾波场.这种等离子体波可以具有极大的振幅和接近真空中光速的相速度,因此在毫米空间尺度范围,可以加速电子至上百兆电子伏的能量.

我们开展了同频率和同偏振方向的交叉传播相对论强激光在等离子体中作用的实验研究和数值模拟<sup>[7-9]</sup>.观察到激光能量从强度大的激光脉冲向强度小的激光脉冲转移.其产生的机制不同于过去用长脉冲低强度的激光观察到的光脉冲间能量交换的情况.与单脉冲作用相比,观察到交叉光脉冲作用产生的高能电子束在数量上的增加和发散角的减小.这表明交叉激光脉冲有助于加热电子,并将其注入到等离子体波中作进一步加速.

实验中将波长为  $1.053\mu\text{m}$ 、脉宽为  $400\text{fs}$ 、功率为  $10\text{TW}$  的激光分成两束激光,其中一束光占 80% 的能量(称为注入光束),另一束光占 20% 的能量(称为抽运光束).经过聚焦后的两束光的强度分别为  $(3 \times 10^{17}) - (5 \times 10^{17})\text{W}/\text{cm}^2$  和  $(1.2 \times 10^{18}) - (2 \times 10^{18})\text{W}/\text{cm}^2$ .两束光偏振方向一致,但互相垂直地在超声速氦气流的边缘交迭.两光脉冲的时间同步控制在  $30\text{fs}$  左右.气体被完全光电离,产生的等离子体密度为  $4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ,相当于  $n_0/n_c = 0.04$ ,

### 相关专业术语简介

相对论强激光 :当激光场的电场振幅达到一定的值时,电子在其中的振荡速度非常接近真空中光速.此时狭义相对论效应对电子的运动有明显的作用.电子在激光场中作横向振荡的动能与电子静止能量  $mc^2$  相当时对应的激光强度称为相对论阈值强度.对波长为  $1\mu\text{m}$  的激光,这个阈值强度大约为  $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ .

粒子模拟方法 :粒子模拟方法是研究等离子体物理中的波-粒子作用,波-波作用,甚至粒子-粒子作用的一种重要方法.它用粒子云来描述粒子,大量的粒子云按照等离子体的密度分布在计算网格中.粒子云的运动由洛伦兹方程来描述,由粒子云的分布获得电荷和电流的分布,同时自洽地求解麦克斯韦方程组.

其中  $n_c$  为入射激光对应的临界密度.两束光的功率都高于  $1\text{TW}$ ,因此在上述密度下,它们都达到的所谓的相对论自聚焦阈值  $\sim 17(n_c/n_0)\text{GW}$ .在同样的激光条件下,以前的实验观察到激光自调制在等离子体中激发的尾波场.

图 1(a) 给出了在抽运光脉冲传播方向获得的能量超过  $170\text{keV}$  的电子的空间分布.它清楚地表明,在存在注入脉冲作用的情况下,产生了束流密度更大(电子束的电量增大 3 倍)、发散度更小的电子束.存在和不存在注入脉冲作用时,电子束的发散角分别为  $7^\circ$  和  $12^\circ$ .与此同时,高能电子束的温度增加了 70% 左右.

图 2 给出了抽运光脉冲传出等离子体后的光谱.在有注入光束作用的情况下,抽运光脉冲的信号在很宽的光谱范围都比没有注入光束情况有提高,表明存在注入光脉冲向抽运光脉冲的能量转移.

为了理解实验结果,我们用二维粒子模拟程序模拟实验条件下的交叉脉冲激光在等离子体中的作用.数值模拟中采用的尺度是  $160\lambda \times 100\lambda$ ,模拟网格的尺度为  $(1/10)\lambda \times (1/10)\lambda$ ,其中  $\lambda$  是激光在真空中的波长.密度为  $0.04n_c$  的均匀等离子体分布

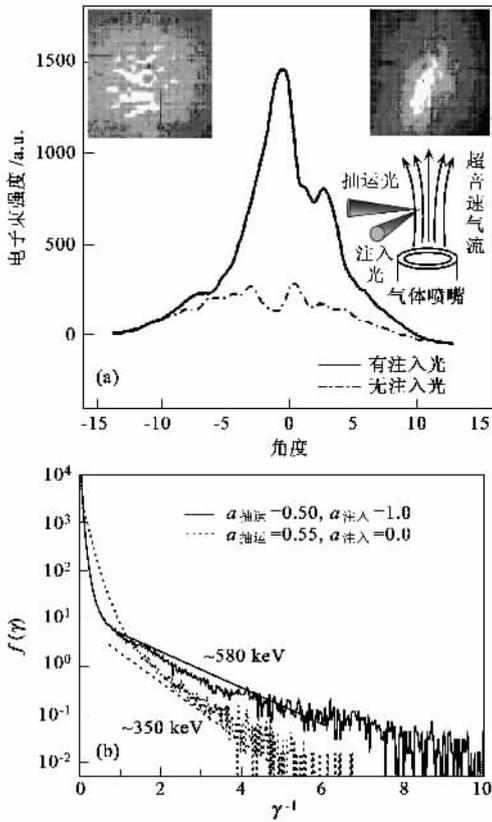


图1 (a)在抽运光脉冲传播方向上能量超过170keV的电子束的空间分布.左右两边插入的小图分别对应没有和有注入光束作用的结果 (b)二维粒子模拟给出的电子能量分布在没有和有注入光束作用下的结果

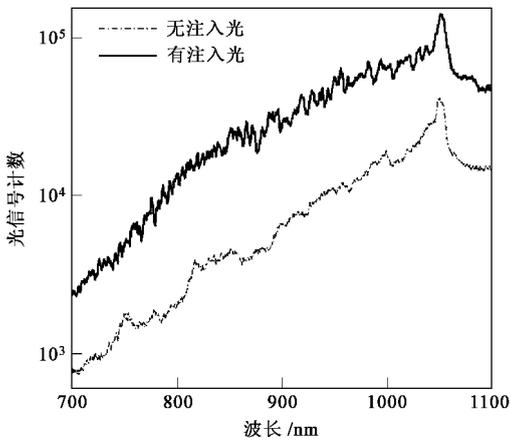


图2 抽运光脉冲传出等离子体后的光谱在有和没有注入光束作用下的对比

在模拟盒的部分空间,其中每个网格各包含9个电子和离子.抽运光脉冲沿 $x$ 方向传播,注入光脉冲沿 $y$ 方向传播.两个入射光脉冲的偏振方向均沿着 $z$ 方向.在本文介绍的数值模拟结果中,离子固定不动.数值模拟表明,在激光交叉作用的区域,电子被

捕获在由激光相干形成的强度分布对应的有质动力势阱中.在有质动力的作用下产生电子密度光栅,其最高密度可达到初始密度的10倍以上.图3(a)给出了抽运光和注入光脉冲振幅分别在 $a_{\text{抽运}} = 0.25$ 和 $a_{\text{注入}} = 1.0$ 下形成的电子密度光栅,其对应的最高电子密度超过初始电子密度的10倍.如果提高抽运光脉冲振幅至 $a_{\text{抽运}} = 0.5$ ,电子密度光栅对应的电子密度峰值并没有进一步增加.在考虑离子运动的数值模拟中,电子密度光栅产生的静电场进一步推动离子,由此产生离子密度光栅<sup>[9]</sup>.形成的密度光栅可以实现光脉冲之间的能量交换.图3(b)给出了在一定参数下抽运光脉冲和注入光脉冲在相互作用前后能量的变化,从中可以看到抽运光脉冲能量几乎被放大一倍.如果提高抽运光脉冲能量,使其强度与注入光脉冲强度相当,则脉冲之间的能量交换逐渐消失.关于脉冲间能量交换的物理机制还没有得到完全解释.显然在等离子体密度光栅形成过程中产生了与光强有关的折射率,并且发生能量交换的两个光脉冲对应不同的折射率复数<sup>[2]</sup>.

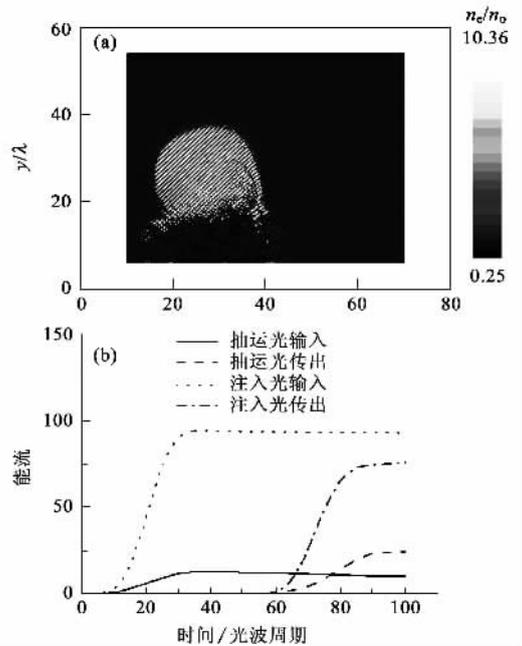


图3 (a)二维粒子模拟给出的两激光脉冲在交叉区域产生的电子密度光栅 (b)两激光脉冲作用过程产生的能量交换.这里两光脉冲振幅分别为 $a_{\text{抽运}} = 0.25$ 和 $a_{\text{注入}} = 1.0$ ,激光脉宽为30个激光振荡周期,均匀等离子体密度初始值为 $n_0 = 0.04 n_c$

上述有质动力势阱对应的势能为 $E = 0.511[(1 + I_{18}\lambda^2/2.74)^{1/2} - 1] \text{ MeV}$ ,这里光强以 $10^{18} \text{ W/cm}^2$ 为单位,光波长 $\lambda$ 的单位是 $\mu\text{m}$ .对入射光强为

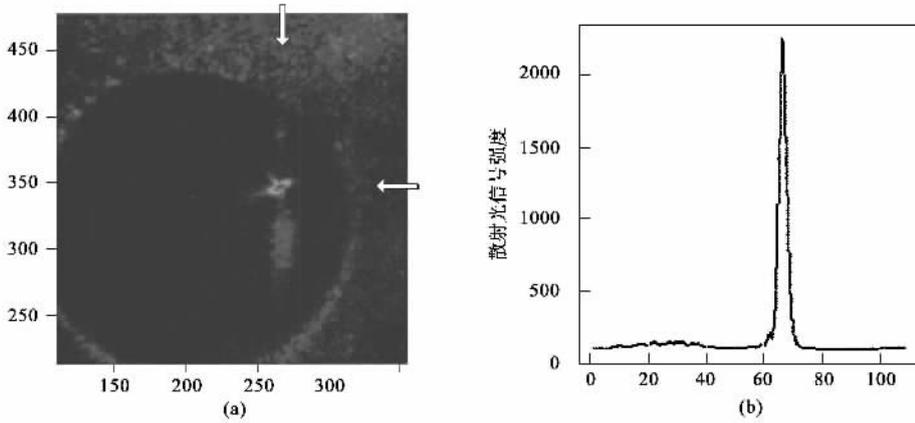


图4 (a)从交叉激光脉冲所在平面的垂直方向得到汤姆孙散射成像,其中抽运光从右向左传播,注入光脉冲从上到下传播(横坐标和纵坐标均以 $10\mu\text{m}$ 为单位)(b)汤姆孙散射光沿着注入脉冲通道的强度分布(横坐标以 $10\mu\text{m}$ 为单位)

$4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ ,有质动力势阱深度可达到 $300\text{keV}$ .这就是说,交叉激光脉冲形成的有质动力势阱可以捕获非常高温的等离子体.但在高强度激光作用下,数值模拟发现电子密度光栅是不稳定的.随着时间的发展,电子可以通过随机加热和加速的机制<sup>[5,6]</sup>被加速至其有效温度高于有质动力势阱的深度,其中能量超过有质动力势阱的深度的高能电子就不能被捕获在其中.这些高能电子一旦传出交叉作用区,可以注入到等离子体波中,获得进一步的加速.在数值模拟中,我们观察到通过交叉脉冲作用,获得加速的电子被注入到抽运光脉冲产生的自调制激光尾波场中,并获得进一步加速的现象.图1(b)给出了在接近实验给出的激光光强和脉宽参数下获得的电子能量分布.可以看到,电子束的温度在有注入脉冲的情况下比没有注入脉冲的情况提高了65%,与实验观察一致,虽然数值模拟观察到的电子束的绝对温度比实验值高一些.

我们还通过汤姆孙散射测量,间接观察到交叉作用区产生的高密度电子.图4给出了实验得到的汤姆孙散射成像,发现在激光脉冲交叉作用区的散

射光的平均强度比周围的非交叉作用区高出10倍以上,并且它是相干的.由此推断电子密度的峰值可达非交叉作用区密度的10倍左右.

致谢 感谢张杰院士对本工作的支持和鼓励.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Umstadter D. *Phys. Plasmas*, 2001, 8 : 1774 ; *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 2003, 36 : R151
- [ 2 ] Shvets G, Fisch N J, Pukhov A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81 : 4879
- [ 3 ] Shvets G, Fisch N J, Pukhov A. *Phys. Plasmas*, 2002, 9 : 2383
- [ 4 ] Umstadter D, Kim J K, Dodd E. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76 : 2073 ; Esarey E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79 : 2682 ; Moore C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82 : 1688
- [ 5 ] Sheng Z M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88 : 55004
- [ 6 ] Sheng Z M, Mima K, Zhang J *et al.* *Phys. Rev. E* 2004, 69 : 016407
- [ 7 ] Zhang P, Saleh N, Chen S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91 : 225001 ; 相关图片新闻 : <http://www.aip.org/mgr/png/2003/209.htm>
- [ 8 ] Zhang P, Saleh N, Chen S *et al.* *Phys. Plasmas*, 2003, 10 : 2093
- [ 9 ] Sheng Z M, Zhang J, Umstadter D. *Appl. Phys. B*, 2003, 77 : 673

#### · 读者和编者 ·

#### 2004 年第 7 期《物理》内容预告

##### 研究快讯

颗粒物质从稀疏流到密集流转变的普适规律(厚美琪等);  
模板技术制备一维纳米纤维及其阵列(杨正龙等).

##### 评述

面向产业需求的21世纪微电子技术的发展(下)(王阳元等);  
分子磁体中的量子隧穿及宏观量子效应(梁九卿).

##### 前沿进展

左手性材料研究进展(马中团等);

玻璃转变研究进展(闻平等);

光纤水听器的原理与应用(张仁和等);

可调谐半导体激光器研究及进展(徐庆扬等).

##### 物理学和高新技术

电场对含水物料中水分子作用的研究进展(丁昌江等);

硬盘驱动器巨磁电阻(GMR)磁头:从微米到纳米(蒋致诚).

##### 物理教育

中外物理教育研究与发展的初步比较(刘承宜等).