

# 激光加速电子束团的输出特性研究<sup>\*</sup>

华剑飞<sup>1,1)</sup> 霍裕昆<sup>2</sup> 曹娜<sup>2</sup> 林郁正<sup>1</sup>

1(清华大学工程物理系 北京 100084)

2(复旦大学现代物理研究所 上海 200433)

**摘要** 通过仔细研究俘获加速 CAS(capture and acceleration scenario)机制中电子束团的输出特性,发现其出射电子有3类不同的运动轨道即掠过(pass-by)、非弹性散射(IS)、CAS. 由于实际入射电子束团的线度远大于强激光脉冲的线度,因此只有位于入射电子束团中心区域的电子才可能被俘获加速. 对于目前所能获得的聚焦激光场强( $\sim 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>)和实际的电子束团( $\sim 10^8$  个电子)而言,最大的输出能量可达到450MeV以上,同时被加速电子的数目可达到 $10^4$ — $10^5$  个. 这表明CAS可望发展成为小型台式加速器的新加速原理.

**关键词** 俘获加速 激光加速 电子束团 输出特性

## 1 引言

20世纪80年代中期出现的CPA(chirped-pulse amplification)<sup>[1]</sup>技术使激光的峰值功率达到了 $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>以上<sup>[2]</sup>,随之涌现出了许多新的研究领域,如超短X射线和 $\gamma$ 射线脉冲、高能粒子束团、快速点火、强场下团簇光物理、强激光等离子物理研究等<sup>[3-5]</sup>.

在强激光的众多应用研究领域,激光加速的研究受到人们广泛的重视. 强激光场中的电场能够达到 $10^{12}$  V/m,远远高于常规加速器中的加速电场(约为 $10^6$ — $10^7$  V/m). 如果能够利用这种高强度电磁场直接加速带电粒子,就有可能发展成为一种新型的具有高加速梯度的小型高能激光加速器. 但是在这一研究方向上,存在着长期困扰学术界的一个问题,即“真空中传播的激光束和自由电子间究竟能否发生净能量交换”. 根据Lawson-Woodward定理<sup>[6,7]</sup>,真空中的自由电子是不可能从激光束中获得净能量的. 其根据是:他们认为在真空中传播的光束可以看作是由一系列平面波叠加而成,因此其相速度总是大于或至少等于真空光速 $c$ . 入射到光场

中的粒子在光场中必将发生滑相,从而交替地处在加速相和减速相中,而不能获得可观的净能量增益. 但是随着近年来理论工作和实验工作的进展,人们对这一问题逐渐有了不同的认识<sup>[8-11]</sup>.

在这一问题研究中,取得了重要进展<sup>[12]</sup>,发现由于真空中传播的聚焦激光束的衍射效应,使得激光束外缘存在着低相速度区,即光场相速度 $v_\phi$ 小于 $c$ 的区域,并基于这一特性提出了一种新的真空激光加速电子机制,即俘获加速机制(CAS). 其物理原理是由于上述低相速度区中还存在着较强的纵向电场分量,使得该低相速度区可以看作是一个“天然”的加速通道<sup>[13]</sup>. 类似于常规直线加速器加速管内的情况,在这个通道中运动的快电子与光场之间的滑相可能非常缓慢,因此能长时间保持在加速相位中,并被纵向电场加速到极高能量. CAS模型正是提供了一种将相对论电子注入到该加速通道的办法<sup>[14]</sup>.

本文在以往仅考虑单电子加速机制的基础上,研究电子束团在脉冲激光场中的动力学特性,探讨俘获加速机制的输出特性. 通常而言,一个实际电子束团的线度约为百微米量级,而一个经过压缩和

2003-05-22收稿,2003-07-02收修改稿

\* 国家自然科学基金(10076002)和国家重点基础研究基金(G1999075200)资助

1) E-mail: hjf00@mails.tsinghua.edu.cn

聚焦的激光脉冲的线度仅为  $10\mu\text{m}$  或更小 ( $\lambda \sim 1\mu\text{m}$ )，因此经过相互作用后的束团内电子可以分为 3 类：(1) 掠过 (pass-by)：电子在运动过程中没有遭遇到脉冲的强场区域，因此基本沿着原入射方向行进；(2) 非弹性散射 IS (Inelastic Scattering)：在强场条件下，由于电子和激光场之间存在着快速滑相，从而无法从激光场中获得大的能量增益；(3) CAS：电子在这种加速机制中可以获得足够大的能量增益。下面，将对这 3 类电子动力学轨道进行详细研究，重点分析 CAS 电子的输出特性，为今后实验上检验 CAS 加速机制和设计真空激光电子加速器参数提供理论支持。

## 2 计算模型

脉冲激光和电子束团相互作用的模型如图 1。激光为沿  $x$  向极化、 $z$  向传播的 Hermite-Gaussian (0,0) 模光束，其横向电场分量

$$E_x(x, y, z, t) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right) \times \exp\left[i\left(kz - \omega t + \varphi(z) + \varphi_0 + \frac{k(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right)\right] \times f(ct - z), \quad (1)$$

式中  $E_0$  为腰斑中心的电场振幅， $w_0$  为束腰处的光斑半径， $k$  为激光波数， $\varphi_0$  为初始相位，

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{kw_0^2}\right)^2\right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{kw_0^2}{2z}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$\varphi(z) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{kw_0^2}{2z}\right), \quad (4)$$

$$f(ct - z) = \exp\left(-\frac{(t - z/c)^2}{\tau^2}\right), \quad (5)$$

$\tau$  为脉冲持续时间 (FWHM)。其他的电场和磁场分量可以分别通过  $E_z = (i/k)(\partial E_x/\partial x)$  和  $\mathbf{B} = -(i/\omega) \cdot \nabla \times \mathbf{E}$  计算得到。电子在脉冲激光场中的动力学研究可以通过求解洛伦兹运动方程得到。为了简单起见，本文中的时间单位和长度单位分别取为  $1/\omega$  和  $1/k$ ，而能量和动量单位则分别为  $mc^2$  和  $mc$ 。同时，假设激光脉冲和电子束团的中心同时到达坐标原点。

在研究电子束团和脉冲激光场作用过程中，由于束团内部电荷间相互作用力的存在使得在研究外加电磁场作用的情况下还应考虑空间电荷力的影响。但是对于相对论电子束团，由于  $n^* = n/\gamma$  (其中  $n$  为实验室坐标系中的电子密度， $n^*$  为束团坐标

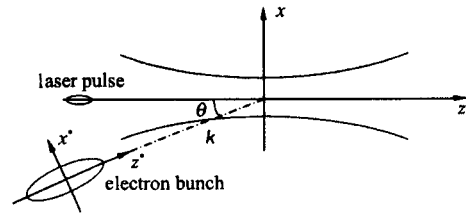
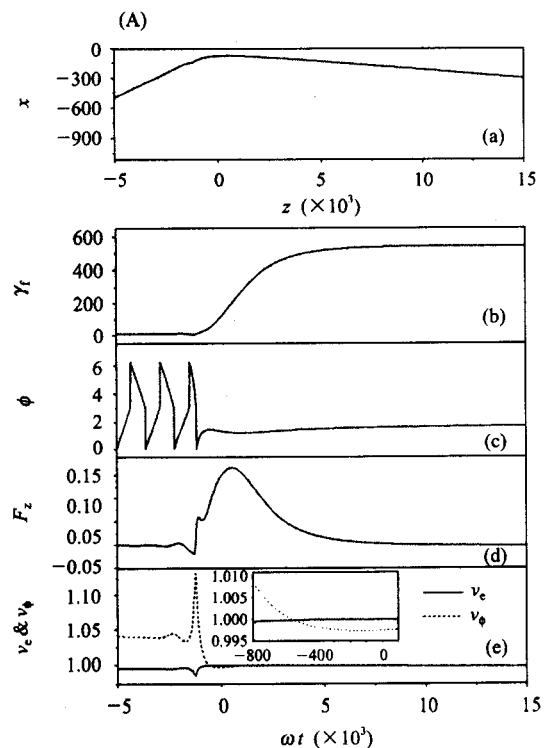


图 1 电子束团和脉冲激光作用示意图

系中的电子密度， $\gamma$  为 Lorentz 因子)，空间电荷效应迅速减小，因此与强激光场的作用相比，空间电荷力的影响效应可以忽略不计。本文中用上标 \* 表示在束团坐标系中的物理量，而没有带 \* 的符号则是表示在实验室坐标系中的物理量。

## 3 IS 和 CAS 的动力学轨道

为了比较 CAS 电子和 IS 电子的不同特点，图 2 给出了  $a_0 = eE_0/m_e\omega c = 20$  条件下这两类电子的动力学特性。其中重要的区别在于各自的相位变化  $A(c)$  和  $B(c)$ ：在 CAS 现象中，电子感受到的相位在电子进入激光场后变化比较缓慢，电子能长时间处在加速相位从而从激光场中获得巨大的能量增益；而在 IS 中，电子感受到的相位变化比较剧烈，电子不停地在加速相位和减速相位之间切换，不仅没有从激光场中获得能量，反而失去了部分自身的能量。另外从图 2 的 A(e) 和 B(e) 中还可以发现，CAS 电子



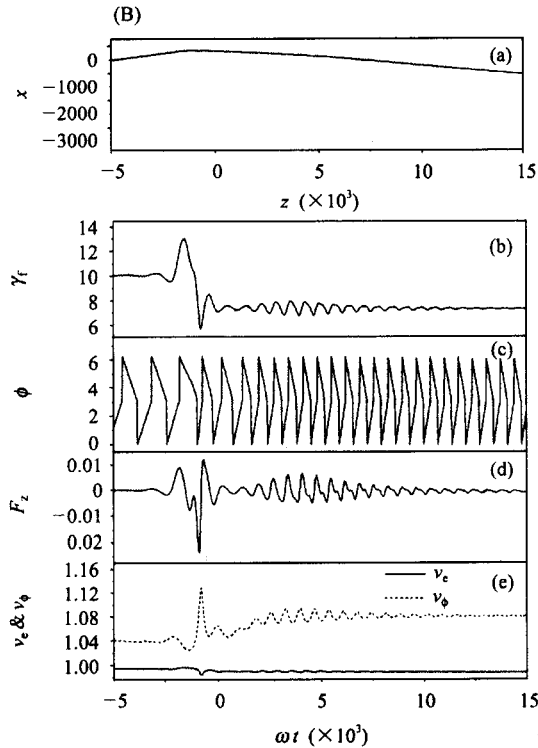


图 2 激光场强  $a_0 = 20$  时, CAS 电子(A)和 IS 电子(B)在脉冲激光场中的动力学特征

图中力的单位是  $3.22 \times 10^6$  MV/m, 其他参数见表 1. (a) 电子的空间轨道 ( $x$  向运动); (b) 输出能量  $\gamma_t$ ; (c) 感受到的相位  $\phi$ ; (d) 电子感受到的纵向力  $F_z$ ; (e) 电子感受到的相速度  $v_\phi$  和电子运动速度  $v_e$ .

和激光场作用时, 所感受到的相速度不仅低于光速  $c$ , 甚至还小于电子速度, 这恰恰是 CAS 电子运动在低相速度区的一个反映.

正是由于 CAS 轨道的特性使得电子能获得大的能量增益, 因此下面将对这种俘获加速电子束团的输出特性作进一步研究.

#### 4 电子束团和脉冲激光的作用区

由于目前技术的限制, 单个电子束团的尺寸往往比单个激光脉冲的尺寸大一个量级以上, 因此必然会使得入射电子束团的大部分电子不能感受到激光脉冲的强场而掠过. 变换到电子束团坐标系上将有利于研究束团内部能被有效加速的电子作用区, 进而研究该作用区中的电子在强脉冲激光场下的动力学过程.

在束团坐标系下, 激光脉冲和电子束团相互作用的角度  $\theta^*$  为

$$\begin{cases} \cos\theta^* = \frac{\cos\theta - \beta}{1 - \beta \cdot \cos\theta} \\ \sin\theta^* = \frac{\sin\theta}{\gamma(1 - \beta \cdot \cos\theta)} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\theta$  为激光脉冲和电子束团中心轴线在实验室坐标系下的夹角, 而  $\theta^*$  则是转换到束团坐标系上的夹角(图 3).  $\beta$  为电子以真空光速为单位的运动速度,  $\gamma$  为 Lorentz 因子. 确定激光脉冲和电子束团相互作用的角度之后, 在实际考虑激光脉冲中心强场区域时还应该考虑激光束腰半径、入射角度以及激光强度的影响. 模拟计算中采用的初始参数见表 1,

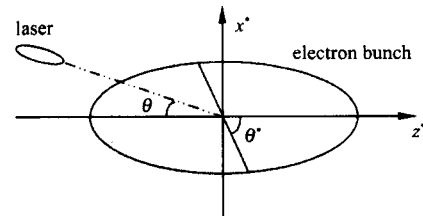


图 3 束团坐标系下激光脉冲和电子束团的作用角

表 1 模拟计算中采用的激光脉冲和电子束团的参数

激光脉冲		电子束团	
腰斑半径 $w_0$	9.5 $\mu\text{m}$ (60)	横向尺寸	100 $\mu\text{m}$ (628)
脉宽 $\tau$	160 fs (300)	束团长度	3 ps (5652)
激光波长 $\lambda$	1 $\mu\text{m}$ (6.28)	发射度	$\epsilon_{n,x(y)} = 1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
强度 $a_0 = eE_0/m_e\omega c$	10—30	束团电荷数目	$10^6$ — $10^7$
		能量	5.16 MeV (10.1)

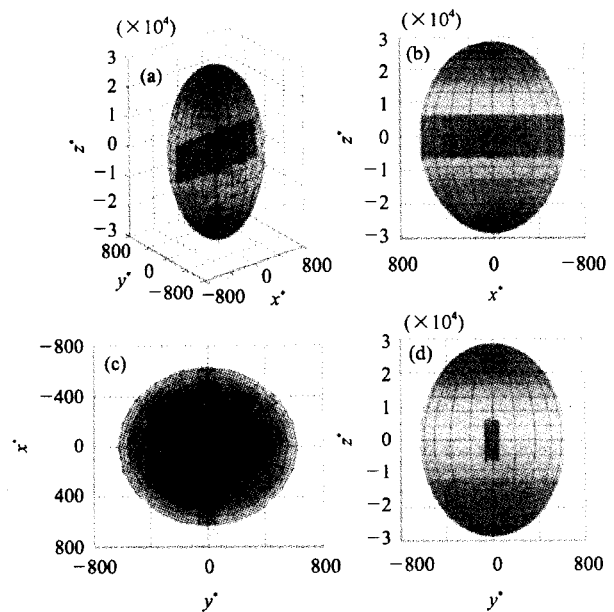


图 4 束团作用区的分布

(a) 三维视图; (b), (c), (d) 为 3 个不同视图. 此时入射角  $\theta = 5.7^\circ$ , 其他参数见表 1. 图中不同的方向采用了不同的坐标刻度.

其中括号中的为相应的归一化参数. 图 4 表示了电子束团中作用区的分布.

## 5 电子束团的输出特性

### 5.1 加速电子的空间分布特性

电子束团在和脉冲激光作用过程中,对于  $x^* z^*$  平面而言,远离激光场一侧的电子和靠近激光场一侧的电子相比,受到激光场的排斥力比较小,从而更易发生俘获加速效应获得高能量增益;而从激光场横向作用力对输出的加速束团的影响来看,由于激光场自身的对称性使得输出的 CAS 束团仍能保持对称(见图 5).

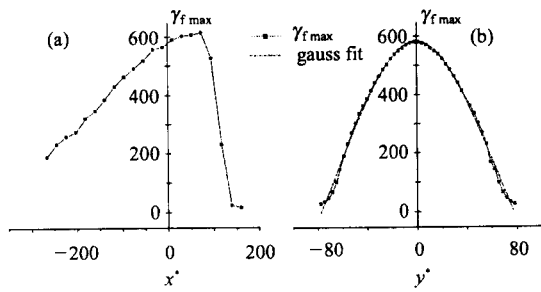


图 5 束团内电子的最大输出能量  $\gamma_{f \max}$   
(a)  $y^* = 0$  平面上束团作用区内,  $\gamma_{f \max}$  和  $x^*$  的关系; (b)  $x^* = 0$  平面上束团作用区内,  $\gamma_{f \max}$  和  $y^*$  的关系. 其参数同表 1.

### 5.2 加速电子出射角分布特性

除了相位变化比较缓慢以外,俘获加速的另一个主要特征是 CAS 电子会被俘获在激光束周围,其输出角度很小,其物理原因在于 CAS 的加速通道存在于中心强场区的激光束附近,俘获加速的电子在离开加速通道后虽然还会受到减速场力的作用,但是此时 CAS 电子已经获得很大的能量增益,轴向速度很大,因此其出射方向和光轴夹角较小. 如果采用相对论 Hamilton-Jacobi 理论对于一个同样沿  $x$  向极化  $z$  向传播的平面波分析可以发现,电子出射角度  $\theta_f$  ( $\theta_f = \tan^{-1}(\sqrt{P_{zf}^2 + P_{yf}^2}/P_{zf})$ ) 和出射能量  $\gamma_f$  的关系<sup>[15]</sup>可表示为

$$\theta_f = \arctan \left[ \frac{\sqrt{P_{\perp i}^2 + 2(\gamma_i - P_{zi})(\gamma_f - \gamma_i)}}{P_{zi} + \gamma_f - \gamma_0} \right], \quad (7)$$

其中  $P_{zi}$  和  $P_{\perp i}$  分别为入射电子的纵向和横向归一化动量,该式的结果和我们的模拟结果在定性上基本一致,但是由于采用的 Gauss 光场与平面场有一定区别,因此在数值上两者还存在着一定的差别.

### 5.3 不同条件下的加速效率

通过对不同激光条件的模拟计算(结果见表 2),发现在激光强度  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  条件下, CAS 电子的能量已经可以达到几百个 MeV 的量级,同时其加速

表 2 电子束团的输出特性<sup>1)</sup>

$a_0$	$\bar{\alpha}$	$N_{\text{CAS}}$	$N_{\text{total}}$	$\gamma_{f \max}$	$\delta_{\text{acc}}$	$\bar{\theta}_f$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}}$ (mm·mrad)	$\epsilon_{n,y,\text{rms}}$ (mm·mrad)
$a_0 = 10$	-2	327	$6.27 \times 10^6$	234.50	$5.2 \times 10^{-5}$	$1.96^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 6.14$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 578.6$
	$\epsilon_{n,x(\gamma)} = 0$	3224	$4.63 \times 10^6$	609.3	$7.0 \times 10^{-4}$	$1.73^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 79.47$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 90.69$
	2	5916	$6.27 \times 10^6$	608.1	$9.43 \times 10^{-4}$	$1.74^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 77.26$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 83.93$
$a_0 = 20$	-2	6583	$6.27 \times 10^6$	613.6	$1.05 \times 10^{-3}$	$1.74^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 77.60$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 83.62$
	-2							
	$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{rms}} = 1\%$	6575	$6.27 \times 10^6$	610.6	$1.04 \times 10^{-3}$	$1.74^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 77.22$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 81.79$
$a_0 = 30$	$\epsilon_{n,x(\gamma)} = 0$	6034	$4.63 \times 10^6$	947.8	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.68^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 115.47$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 118.88$
	-2	6541	$4.63 \times 10^6$	952.9	$1.41 \times 10^{-3}$	$1.71^\circ$	$\epsilon_{n,x,\text{rms}} = 121.48$	$\epsilon_{n,y,\text{rms}} = 122.76$

1) 激光和束团参数见表 1,  $\bar{\alpha}$  为表示电子束团发射度椭球分布的一个参数.  $N_{\text{total}}$  表示模拟计算中入射束团的电子数目,  $N_{\text{CAS}}$  为出射能量大于 92 MeV ( $\gamma_f > 180$ ) 的电子数目,  $\gamma_{f \max}$  为最大输出能量,  $\delta_{\text{acc}}$  为加速效率,  $\bar{\theta}_f$  为加速电子的平均输出角,  $\epsilon_{n,x,\text{rms}}$  和  $\epsilon_{n,y,\text{rms}}$  为归一化的 RMS 发射度.

效率也可以达到  $10^{-4} - 10^{-3}$ , 而且 CAS 电子束团的发射度也在可以接受的范围.

## 6 结论

本文从电子束团和脉冲激光相互作用出发,具

体研究了俘获加速电子束团的输出特性. 通过对入射电子束团中作用区的深入研究,发现了输出电子有 3 类不同轨道,其中 CAS 加速电子的出射角比较小,远远小于非弹性散射电子的出射角. 另外电子束团在靠近激光场一侧受到激光场的排斥挤压,加速的效果不及束团中远离激光场一侧的那部分电

子. 同时对于受普遍关注的加速效率的研究还发现, 对于  $10^8$  量级电子数目的实际电子束团, 其 CAS

加速的电子数可以达到  $10^4-10^5$ , 进一步完善了俘获加速机制的理论研究.

### 参考文献 (References)

- 1 Strickland D, Mourou G. Opt. Commun., 1985, **56**(3):219; Mourou G, Umstadter D. Phys. Fluids, 1992, **B4**:2315
- 2 Heller A. Science & Technology Review, 2000, 15
- 3 ZHANG Jie. Physics, 1997, **26**:643; WANG Qing-Yue. Journal of Quantum Electronics, 1994, **11**(4):211(in Chinese)  
(张杰. 物理, 1997, **26**:643; 王清月. 量子电子学, 1994, **11**(4):211)
- 4 Mourou G A. CR ACAD SCI IV-PHYS, 2001, **2**(10):1407
- 5 Patrick Mora. Plasma Phys. Control. Fusion, 2001, **43**:A31
- 6 Woodward P M J. IEE, 1947, **93**:1554; Lawson J D. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, **26**:4217; Palmer R B. Part. Accel., 1980, **11**:81
- 7 Esarey E, Sprangle P, Krall J. Phys. Rev., 1995, **E52**:5443; Sprangle P, Esarey E, Krall J. Phys. Plasmas, 1996, **3**:2183
- 8 Bucksbaum P H, Bashkansky M, McIraith T J. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**:349
- 9 Monot P, Auguste T, Lompre L A et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **70**:1232
- 10 Moore C I, Knauer J P, Meyerhofer D D. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:2439
- 11 Malka G, Lefebvre E, Miquel J L. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:3314; Phys. Rev. Lett., 1998, **80**:1352
- 12 WANG J X, HUO Y K et al. Phys. Rev., 1998, **E58**:6575; ZHU L J, HUO Y K et al. Phys. Lett., 1998, **A248**:319
- 13 PANG J, HUO Y K, YUAN X Q et al. Phys. Rev., 2002, **E66**:066501
- 14 KONG Q, HUO Y K et al. Appl. Phys., 2002, **B74**(6):517
- 15 Salamin Y I, Faisal F H M. Phys. Rev., 1997, **A55**:3678; Hartemann F V, Fochs S N et al. Phys. Rev. 1995, **E51**:4833; Hartemann F V, Meter J R V et al. Phys. Rev., 1998, **E58**:5001

## Output Characteristics of Electron Bunch Accelerated by Laser Pulse \*

HUA Jian-Fei<sup>1,1)</sup> HUO Yu-Kun<sup>2</sup> CAO Na<sup>2</sup> LIN Yu-Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Accelerator Laboratory, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>2</sup>(Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** This paper addresses the output characteristics of real electron bunches accelerated with ultra-intense laser pulse in vacuum by the capture and acceleration scenario (CAS) scheme. It shows that there exist three kinds of electrons' trajectories after the interaction between electron bunch and laser pulse, namely pass-by, inelastic scattering and CAS. Normally, as the size of an electron bunch is much larger than that of a tightly focused and compressed laser pulse, only those electrons located in the central region of the incident bunch can be accelerated to high energy. For a high intensity laser ( $\sim 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>) and an electron bunch ( $\sim 10^8$  electrons), the maximum electron energy gain from the laser field can be more than 450MeV, and the number of CAS electrons can reach to  $10^4-10^5$ . These results demonstrate that CAS is promising to become a novel mechanism of vacuum laser accelerators.

**Key words** capture and acceleration scenario, laser acceleration, electron bunch, output properties

Received 12 May 2003, Revised 2 July 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(10076002) and National Key Basic Research Special Foundation(G1999075200)

1) E-mail: hjf00@mails.tsinghua.edu.cn