



用单发电子束探测激光等离子体内电磁场演化实验研究

殷佳鹏 刘圣广

A single long electron bunch detect electromagnetic field evolution in laser plasma

Yin Jia-Peng Liu Sheng-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 012901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211374

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211374>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用单发电子束探测激光等离子体内 电磁场演化实验研究*

殷佳鹏 刘圣广†

(上海交通大学物理与天文学院, 激光等离子体教育部重点实验室, IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

(2021 年 7 月 25 日收到; 2021 年 9 月 17 日收到修改稿)

惯性约束核聚变研究最近取得可喜成果, 美国国家点火装置 NIF 装置实验上聚变增益达到了输入激光能量的三分之二. 但是, 这一成果与人们的预期还有较大差距, 需要更深入研究激光与等离子体相互作用初期的动力学过程. 我们发展了一种新方法, 用单发长脉冲电子束团为探针, 测量激光等离子体内电磁场在整个等离子体持续时间内的演化过程. 实验中, 高压静电电子源产生能量 0—100 keV 连续可调、脉宽 10 ns 的电子束团. 1 J, 532 nm, 脉宽约 4 ns 的激光脉冲聚焦到银靶上, 激发产生等离子体. 电子束团穿过激光等离子体, 被其中的电磁场调制后成像, 单发电子束团时间宽度会覆盖整个等离子体持续时间, 通过分析电子束团的调制强度, 推得等离子体内电磁场的变化. 实验上成功实现了单发电子束团对整个激光等离子体内电场的诊断测量, 获得了演化曲线, 推算出实验条件下电子束通过路径上平均电场的最大值约为 7.74×10^5 V/m.

关键词: 电子束团, 激光等离子体, 电磁场, 同步**PACS:** 29.27.Eg, 52.40.Mj, 52.70.-m, 52.70.Ds**DOI:** 10.7498/aps.71.20211374

1 引言

激光驱动惯性约束核聚变有望彻底解决人类社会持续发展的能源问题^[1–4]. 最近, 美国国家点火装置 NIF 取得可喜成果, 实验上聚变增益达到了输入激光能量的三分之二, 离真正意义上实现增益大于 1 的目标更进了一步. 但是, 这一成果与人们的预期还有较大差距, 人们对其中的重要物理过程还需要更深入的认识和理解. 一个重要问题是实验上尚缺乏足够的诊断手段, 特别是具有时间分辨的诊断手段. 对激光与等离子体相互作用初期的动力学过程、等离子体临界密度面附近的能流输运过程的研究亟待加强. 激光与等离子体相互作用过程中^[5–7], 等离子体内会产生很强的自生慢变电磁场^[8–11], 时间尺度在皮秒至纳秒量级. 同时, 这些电磁场又对等离子体的运动产生直接或间接的影

响, 对等离子体时空演化有着极为重要的作用. 所以, 研究自生电磁场的时空演化, 对准确理解界面附近的密度时空分布^[12]、激光与等离子体的耦合、辐照均匀性、等离子体能量输运等过程具有重要意义.

现有的等离子体探测方法有主动探测和被动探测两类^[13–16], 主要以光子为探针, 诊断等离子体的温度、密度、电离度等参数. 由于光子对等离子体中的电磁场不敏感, 所以无法得到对激光等离子体时空演化过程起关键作用的自生慢变电磁场信息. 美国和欧洲一些实验室已经开展了利用质子束对等离子体动力学过程成像的研究^[17–21]. 这些质子束有些是来自内爆聚变产生的单能质子, 有些是来自超短强激光与固体靶作用产生的宽能谱质子^[22]. 其中前者的发散角很大, 而且对驱动激光的要求很高, 后者的能散度很大, 因此都不适合于临界面等离子体的诊断. 利用超快电子成像、结合泵

* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: U1832185) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liushg@sjtu.edu.cn

浦探测技术研究等离子体内电磁场^[23,24], 取得了一些很好的结果. 但是通过调节时间延迟, 通过多次才能得到演化过程, 对于探测整个激光聚变过程中的不稳定性, 显然是不现实的.

我们提出并验证了一种新方法, 以单发电子束团为探针, 测量激光等离子体内电磁场在整个等离子体持续时间内的演化过程, 实验上成功实现了单发电子束团对整个激光等离子体内电场的诊断测量, 获得了演化曲线, 实验条件下电子束通过路径上平均电场的最大值约为 7.74×10^5 V/m.

2 实验原理和装置

实验装置如图 1 所示. 加速器产生的电子束团, 脉冲宽度约为 10 ns, 能量 0—100 keV 连续可调. 经过银靶正前方栅网或者小孔, 被整形为单条或者多条电子束, 单条电子束横向直径约 $40 \mu_0$, 从银靶表面掠过. 532 nm 激光, 脉冲宽度约为 4 ns, 宽度与驱动惯性约束核聚变研究的激光宽度相当, 经过传输和聚焦系统, 聚焦在银靶侧棱上, 产生等离子体. 调节电子束与激光打靶的时间, 保证电子束在等离子体持续时间从等离子体内穿过. 等离子体内存在电磁场, 其中的电场分量垂直于靶面向外^[19,25], 沿 y 方向, 如图 1(c) 所示. 电子束穿过时将受到电场的作用力, 使其发生偏转. 电场是变化的, 不同时刻穿过等离子体的电子受到不同的偏转作用, 获得不同的偏转角. 被等离子体内电场调制过的电子束团离开等离子体漂移, 穿过外加的偏转电场, 外加电场方向沿 x 方向, 而且确保随时间线性变化, 线性区时间与电子束脉冲时间宽

度相当, 约为 10 ns. 外加电场将电子束团沿 x 方向线性偏开, 束团的纵向 (z 方向) 分布将被转为沿 x 方向的横向分布, 在闪烁体晶片上成像. 注意图 1(b) 中, 闪烁体所在坐标系与前面坐标系相比, 转过了 90° . 分析电子束团在 y 方向的偏转数据, 可以推演得到等离子体内电场在整个持续时间窗口的演化过程. 从而实现单发电子束对整个等离子体持续时间内电场的测量.

3 实验测量方法

3.1 电子束

电子束由三极高压静电电子枪产生. 电子枪阴极和阳极之间加 0—100 kV 高压, 栅极用一个中心开有直径 0.3 mm 小孔的金属板代替栅网, 减小电子束斑的尺寸. 栅极上加栅压抑制电子发射, 同时加有和栅压极性相反的脉冲开关电压控制产生电子脉冲, 束流离开栅孔后再被静电加速管加速. 所以, 静电加速高压对束流强度影响不大, 主要影响电子枪出口处的束流横向截面和束流粒子纵向角度. 电子枪全长 0.967 m, 电子束离开电子枪, 利用螺线管磁铁, 将电子束在银靶位置聚焦. 图 2 是对电子束流的模拟结果, 静电加速管高压 100 kV, 电子初始发射面直径 0.3 mm, 在银靶位置聚焦.

图 3 是实验测量得到的电子束团参数. 左图是示波器采集到电子束团的纵向分布. 可以看到, 电子束的半高宽约 10 ns; 右图是电子束经过小孔后掠过银靶, 再漂移一段距离后在成像闪烁体上的束斑. $40 \mu\text{m}$ 的小孔, 决定了电子束在银靶位置束斑直径为 $40 \mu\text{m}$, 与成像位置的束斑大小有差别.

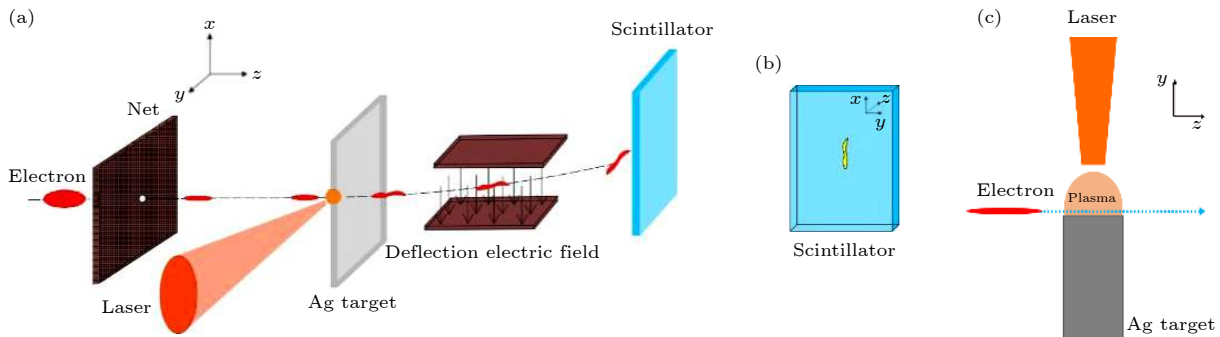


图 1 实验原理和装置示意图 (a) 装置总体布局; (b) 被等离子体内电磁场调制后的电子束在闪烁体上成像示意图; (c) 靶附近的局部放大图

Fig. 1. The experimental principle: (a) The set-up of the whole system; (b) imaging principle of the electron beam on the scintillator after being modulated in the plasma; (c) the enlarged setup nearby the target.

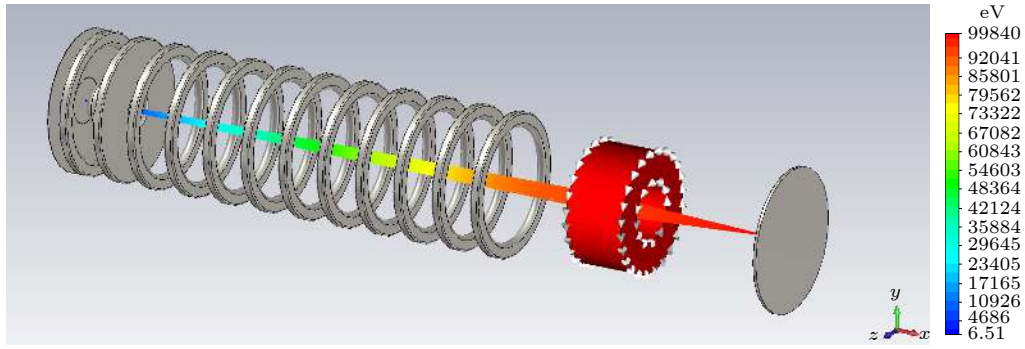


图2 电子枪束流模拟, 能量 100 keV 的电子束在靶位置聚焦

Fig. 2. Simulation result on electron source, beam with 100 keV energy focused on the target.

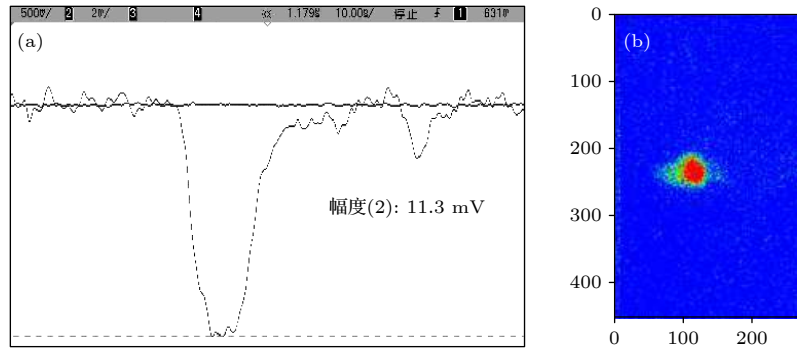


图3 实验测量到的电子束分布 (a) 电子束团的纵向分布; (b) 电子束团在成像板上得到的束斑

Fig. 3. Electron bunch from Gun: (a) The longitudinal distribution of electron bunch; (b) the beam profile at imaging plate.

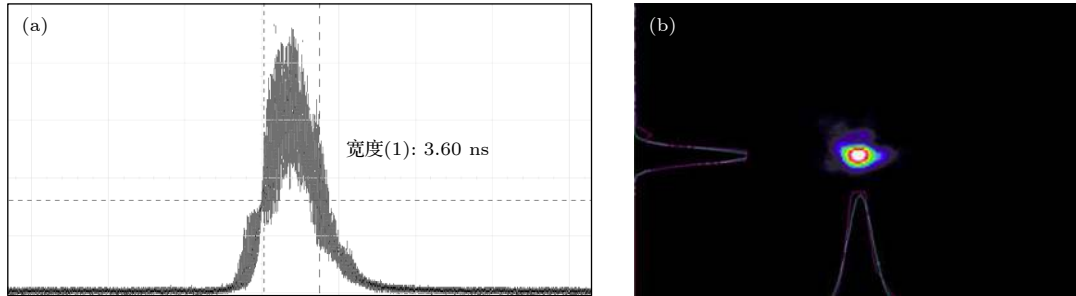


图4 激光的时间和空间分布 (a) 激光的时间分布; (b) 激光在银靶处束腰光斑

Fig. 4. The time and space distribution of laser pulse: (a) The time distribution; (b) the laser waist at the target.

3.2 激光与聚焦

驱动激光中心波长为 532 nm、单脉冲最大能量为 1 J, 可以运行在单次触发模式. 因为银靶和电子束都在真空中, 激光脉冲要通过传输和聚焦系统, 通过石英窗口聚焦到真空内的靶上. 为了防止打靶实验中, 等离子体物质溅射到石英窗口上造成窗口污染. 最后一片聚焦镜焦距较大, 石英窗口远离打靶点. 图 4 是实验测量得到的激光时间和空间分布, 可以看到激光脉冲的半高宽为 3.6 ns, 激光在银靶处聚焦成腰, 束腰直径为 100 μm , 激光功率密度约为 $3.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.

3.3 电子束团线性偏转

如前面所述, 被等离子体内电磁场调制后的电子束, 漂移后如果直接成像的话, 束团的首尾部分会叠在一起, 无法分辨. 需要施加电场将电子束横向偏转, 而且电子束团中不同位置获得不同的横向偏转, 漂移后成像, 才能够将电子束的纵向位置转化为横向坐标. 考虑到电子束能量和漂移长度, 如果将 10 ns 电子束团在成像板成像, 横向被偏转拉开到 20 mm 长, 需要电压源能够提供 4.5 kV/10 ns 线性变化的电压. 图 5 是带上两条金属极板负载后, 实验测得的高压脉冲信号. 平顶宽度 5 μs , 平

顶处电压为 6.32 kV, 两条竖虚线间是脉冲电压信号的线性上升沿. 可以看到, 上升沿有一段 10 ns、对应 5.44 kV 线性区, 能够达到偏转的要求. 实验中, 需要精确调节电子束通过偏转极板的时间, 使其恰好在这段上升沿时段内通过.

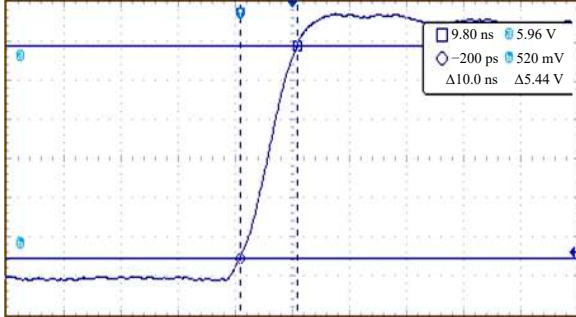


图 5 带上负载测得的两偏转极板间的高压脉冲信号. 平顶宽度 5 μ s, 最高电压 6.32 kV, 脉冲电压信号有一段线性上升沿 5.44 kV/10 ns

Fig. 5. The HV signal between the two deflecting plates with load, HV pulse with 5 μ s flattop and 6.32 kV maximum, a linear rise edge at the slope of 5.44 kV/10 ns.

3.4 电子束与激光脉冲的时空重合

电子束穿过等离子体, 才能够被调制. 这就要求电子束与激光脉冲必须实现空间和时间上的双重重合. 实验上安装了一套在线望远镜系统, 可以实时观测到银靶及靶上标记点. 将电子束在银靶前面适当调大束斑, 部分电子被靶挡住, 在后面成像板观测电子束像, 可以确定激光和电子束的相对位置, 结合靶室的三维调节, 可以实现二者的精准空间重合. 时间重合, 除确保激光与电子束二者的重合外, 还必须包括脉冲高压上升沿与二者的重合. 实验上利用一台高精度的数字信号发生器 DG645, 精确调节各个通道间的时间延迟, 实现三者间优于 ns 的时间同步.

4 结果及讨论

首先调节电子束与偏转电压的时间同步, 观测高压偏转电场对电子束的偏转作用如图 6 所示. 上面的电子束斑是没有偏转电压作用条件下, 在成像板上的像; 下面是线性高压将电子束团横向拉开形成的像, 电子束被偏转后经过 800 mm 距离的漂移, 在成像板上被拉开为 19 mm 的直线. 这一横向长度, 直接对应电子束脉宽 10 ns. 两种情况下, 都是将电子束在靶位置良好聚焦, 而电子束在靶后漂移 800 mm 后成像, 束斑会一定程度变大.

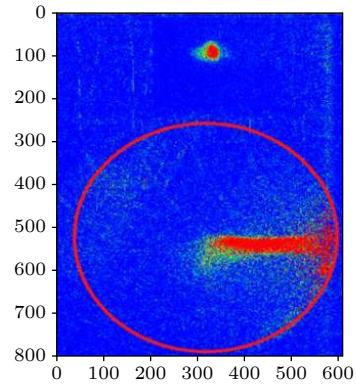


图 6 没有激光时的电子束斑. 上面的束斑, 偏转极板间没有电压; 下面的束斑, 偏转极板间有电压

Fig. 6. Beam profile without laser pulse. The above one is beam profile without deflecting HV; The below one is beam profile with deflecting HV.

调节电子束与激光的空间重合, 调节激光、电子束和偏转高压三者时间同步, 测量 10 ns 电子束被等离子体内电场调制曲线, 如图 7 所示. 实验中, 电子束的能量为 85 keV, 银靶与成像板的距离为 800 mm. 假设电子开始被调制的起点就是等离子体产生的初始时刻, 那么, 电子在初时刻后 $\Delta T = 2.6$ ns 时, 被等离子体内的电场在成像板上偏开最大, 被偏转量 $\Delta L = 3.64$ mm.

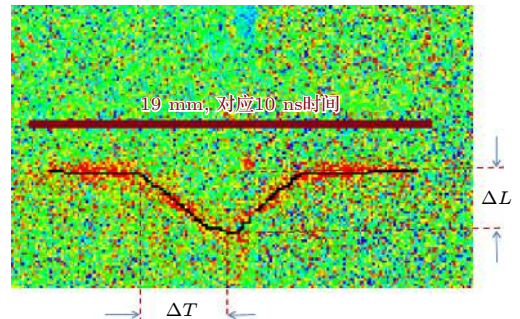


图 7 10 ns 电子束被等离子体内电场调制后分布

Fig. 7. Distribution of the electron bunch with 10 ns length modulated by the electric field of the laser plasma.

假设激光激发等离子体空间尺度为 $l = 1$ mm 的均匀分布, 其中垂直靶面向外的电场强度为 E , 电子经过等离子体受到的库仑力为 $E \cdot e$, e 是电子电量. 电子经过等离子体后获得的横向速度为 $E \cdot e \cdot l / mv$, 其中, v 是电子运动的纵向速度. 离开等离子体时电子获得的偏转角为 $\theta = E \cdot e \cdot l / mv^2$, 以此偏角漂移距离 L , 电子横向偏开的距离

$$\Delta L = \frac{E \cdot e \cdot l \cdot L}{mv^2} = \frac{E \cdot e \cdot l \cdot L}{2E_k}, \quad (1)$$

其中 E_k 就是电子的动能. 根据 (1) 式和实验测得的偏开距离, 可以推算出电场强度. 偏移距离最大处 $\Delta L = 3.64$ mm, 对应的电子束通过路径上平均电场的最大值为 7.74×10^5 V/m. 以此类推, 可以推算出等离子体持续时间内任意时刻电子束穿过路径上平均的电场强度. 电场最大值定标后, 实验测得的曲线图 7, 就是等离子体内电场的时间演化曲线, 纵轴是时间 0—10 ns, 横轴是对应的电场强度.

5 结论与展望

本文用单发长脉冲电子束团为探针、发展了一种新方法去测量激光等离子体内电磁场在整个等离子体持续时间内的演化过程. 实验中, 高压静电电子源产生能量 0—100 keV 连续可调、脉宽 10 ns 的电子束团. 1 J, 532 nm 和脉宽约 4 ns 的激光脉冲被聚焦到银靶上, 激发等离子体. 电子束团穿过激光等离子体, 被等离子体内的电磁场调制, 经偏转后成像. 单发电子束团时间宽度会覆盖整个等离子体持续时间. 通过分析电子束团的调制强度, 推得等离子体内电磁场的变化. 实验上成功实现了单发电子束团对整个激光等离子体内电场的诊断测量, 获得了演化曲线, 得到了实验条件下激光等离子体内最大电场强度约 7.74×10^5 V/m.

验证实验的成功, 表明这种测量方法可行、有效. 我们正在建造一台 100 MeV 的电子直线加速器, 将用这种电子探针技术测量惯性约束聚变研究中高密度等离子体内电磁场的演化, 为认识、理解高密度等离子体内动力学过程提供重要实验依据.

参考文献

- [1] Lindl J D, Hammel B A, Logan B G, Meyerhofer D D, Payne S A, Sethian J D 2003 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **45** A217
- [2] Edwards C B, Danson C N 2015 *High Power Laser Sci. Eng.* **3** e4
- [3] Zohuri B 2017 *Inertial Confinement Fusion Driven Thermonuclear Energy* (Albuquerque: Springer International Publishing) pp133–192
- [4] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, Goncharov V N, Harding D R, Knauer J P, McCrory R L, McKenty P W, Meyerhofer D D, Myatt J F 2015 *Phys. Plasmas* **22** 139
- [5] Wang T Z, Lei H Y, Sun F Z, Wang D, Liao G Q, Li Y T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 085205 (in Chinese) [王天泽, 雷弘毅, 孙方正, 王丹, 廖国前, 李玉同 2021 物理学报 **70** 085205]
- [6] 刘家合, 鲁佳哲, 雷俊杰, 高勋, 林景全 2020 物理学报 **69** 057401
- [7] Liu L B, Deng H X, Zu X T, Yuan X D, Zheng W G 2020 *Chin. Phys. B* **29** 507
- [8] Du B, Cai H B, Zhang W S, Chen J, Zou S Y, Zhu S P 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 185205 (in Chinese) [杜报, 蔡洪波, 张文师, 陈京, 邹士阳, 朱少平 2019 物理学报 **68** 185205]
- [9] Eliezer S 2010 **45** 181
- [10] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Rosenberg M J, Knauer J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102**(20)
- [11] Li C K, Zylstra A B, Frenje J A, Séguin F H, Sinenian N, Petrasso R D, Amendt P A, Bionta R, Friedrich S, Collins G W 2013 *New J. Phys.* **15** 025040
- [12] Chen Y, Zhang W, Bao J, Lin Z, Dong C, Cao J 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 095201
- [13] Cao Z R, Zhang H Y, Dong J J, Yuan Z, Miao W Y, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045212 (in Chinese) [曹柱荣, 张海鹰, 董建军, 袁铮, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 045212]
- [14] Glenzer S H, Lee H J, Davis P, Doppner T, Falcone R W, Fortmann C, Hammel B A, Kritcher A L, Landen O L, Lee R W, Munro D H, Redmer R 2010 *High Energy Density Phys.* **6** 1
- [15] Fahad M, Ali S, Iqbal Y 2019 *Plasma Sci. Technol.* **21** 2058
- [16] Azechi H, Shiraga H, Miyanaga N, Nishimura H 1997 *Fusion Eng. Des.* **34–35** 37
- [17] Borghesi M 2002 *Phys. Plasma* **9** 2214
- [18] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Rygg J R, Petrasso R D, Town R P J, Amendt P A, Hatchett S P, Landen O L, Mackinnon A J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 135003
- [19] Kugland N L, Ryutov D D, Plechaty C, Ross J S, Park H S 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 101301
- [20] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Petrasso R D, Amendt P A, Town R P J, Landen O L, Rygg J R, Betti R, Knauer J P, Meyerhofer D D, Soures J M, Back C A, Kilkenny J D, Nikroo A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 205001
- [21] Patel P K, Mackinnon A J, Key M H, Cowan T E, Stephens R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 125004
- [22] Ma W J, Liu Z P, Wang P J, Zhao J R, Yan X Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084102 (in Chinese) [马文君, 刘志鹏, 王鹏业, 赵家瑞, 颜学庆 2021 物理学报 **70** 084102]
- [23] Zhu P, Zhang Z, Chen L, Zheng J, Li R, Wang W, Li J, Wang X, Cao J, Qian D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 155
- [24] Chen L, Li R, Chen J, Zhu P, Liu F, Cao J, Sheng Z, Zhang J 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **112** 47
- [25] Du B, Cai H B, Zhang W S, Wang X F, Zhu S P 2021 *Matter Radiat. Extrem.* **6** 035903

A single long electron bunch detect electromagnetic field evolution in laser plasma^{*}

Yin Jia-Peng Liu Sheng-Guang[†]

(Key Laboratory for Laser Plasmas (Ministry of Education), Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA),

School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(Received 25 July 2021; revised manuscript received 17 September 2021)

Abstract

Laser fusion research needs much more high-time-resolved diagnostic technologies to study the dynamic process in laser plasma. We develop a special method and setup a device to measure the electromagnetic field in the plasma by using a single electron bunch. The measurement covers the whole-time window of the plasma process driven by a 3.6 ns laser pulse. An electron source can generate a single electron bunch with 0–100 keV energy and 10ns bunch length. A laser pulse with 1 J energy and 532 nm wavelength irradiates on the edge of a silver target, the target nearby the irradiated spot is ionized into plasma. At the beginning of plasma generation, the head of the electron beam begins to pass through the plasma. Electromagnetic field in plasma pushes the electrons transversely. A high voltage pulse at a good time is used to deflect the electrons linearly in the transverse direction to avoid overlapping of the different electrons on the scintillator downstream. By analyzing the deflection distances of the different electrons in this single bunch, we successfully achieve an average electronic field along the trajectory in the plasma in the whole plasma process. The maximum value of this electronic field is 7.74×10^5 V/m.

Keywords: electron beam, laser Plasma, electromagnetic field, synchronization

PACS: 29.27.Eg, 52.40.Mj, 52.70.–m, 52.70.Ds

DOI: 10.7498/aps.71.20211374

^{*} Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1832185).

[†] Corresponding author. E-mail: liushg@sjtu.edu.cn