

等离子体相互作用引起的 总辐射场分布变化*

冯贤平 徐至展 余 玮 陆海鹤 江志明

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 研究了等离子体 X 射线源辐照另一等离子体时所形成的激光等离子体 X 射线(LPX)的空间分布性质。结果显示整个等离子体二次 X 射线的发射性质和在相互作用中两束等离子体的空间几何位置对 LPX 总辐射场的影响。指出相互作用区域 X 射线发射增强现象和电子密度分布极不均匀及喷流状结构。

关键词 等离子体, X 射线辐射场分布

在进行 X 射线激光研究中,有多种方法可实现短波放大输出^[1]。其中之一就是利用等离子体强 X 射线作为泵浦源激励产生 X 激光。在理论上^[1,3]已进行这方面的分析和计算,并揭示出它的可行性。利用光源激励是一种比较常规的方法,在可见光激光中已被普遍采用。但在短波 X 射线激光研究中,具体实验结果还很少报道过^[4]。

本文尝试利用强激光等离子体 X 射线源辐射低温等离子体或固体结构靶。测量整体等离子体 X 射线辐射场空间分布结构和等离子体间空间几何位置对辐射场的影响,以揭示两种等离子体相互辐射作用和粒子碰撞作用的行为和机制。

实验是在中国科学院上海光机所六路钽玻璃激光装置上进行的,为提高靶面的激光辐照功率,将装置上的北路与南路光合并,组合光束的时间同步由条纹相机监视,同步精度优于 20 ps,组合光束的角向精度小于 0.1 mrad。组合后光束的总输出能量约为 8~16 J,脉宽为 200 ps,光束经口径为 60 mm,焦距为 120 mm 的非球面镜或经由非球面镜与柱面镜组成的组合镜在靶面上分别形成点或线聚焦。靶面功率约 $9 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ (点聚焦)和 $4.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ (线聚焦)。

实验采用铜、铝分段靶和平面靶,测量主要采用 X 光针孔相机和光探针两种探测器,整个实验是在真空为 1.33 pa 靶室内进行的。

利用强激光辐照固体靶,由于激光产生的电磁场已大于或超过原子内壳层电子束缚场,因此激光很易使固体靶形成高温等离子体并发射强烈的 X 射线。在文献[5~7]中我们对这种辐射的强度特性、光谱特性、时间特性进行过诊断和分析。进一步的工作是考查等离子体辐射与

* 本工作获国家自然科学基金等资助。

收稿日期:1993年9月1日,收到修改稿日期:1993年10月19日

靶的再相互作用。为此,我们在靶的制作中,设计在一块平面靶前方再安置一个小平面靶,二靶间距为 $180\ \mu\text{m}$,小靶厚为 $4\ \mu\text{m}$,激光越过小平面靶上方 $50\ \mu\text{m}$ 后直接点聚焦在大平面靶上,以研究等离子体 X 射线源对小平面固体靶的影响,图 1 的结构显示了两块靶等离子体都向外发射 X 射线。其中右侧帽状光斑是由小靶等离子体辐射产生,左侧球状光斑由大靶等离子体产生。按实验前的预测,小靶发射的 X 射线光斑外围应呈现抛物状结构。引起准球状结构的原因估计是两块靶间距太小,这样当激光在大平面靶产生热等离子体之后,除它的强 X 射线辐射小靶外,热等离子体向前快速喷射也相应地加热前方小靶中部,所以导致有图 1 的结构。为了验证上述解释,重复进行大间距双靶实验,结果显示不出图 1 的结构。如将激光焦点上移或使两靶间距增大,此时实验结果显示小平面靶 X 射线发射光斑较弱且光斑结构呈抛物状,这与前面解释是一致的。

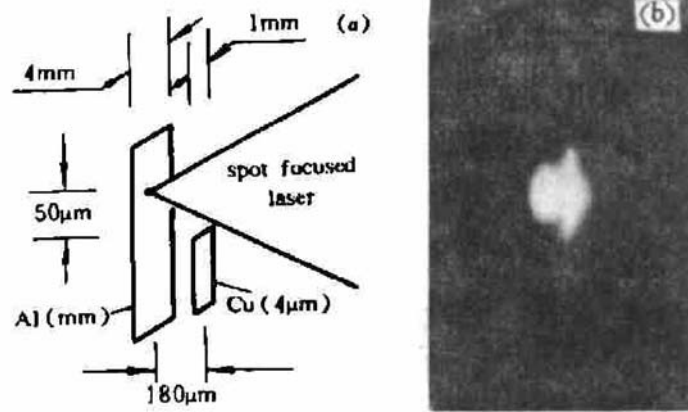


Fig. 1

(a) Method of laser focus and structure of target;

(b) Al, Cu-LPX intensities distribution. Corresponding to Fig. 1 (a) condition



Fig. 2 LPX intensity distribution of laser irradiation Al-planar, Cu-sphere from target. The laser is similar to Fig. 1

在上述实验中,一般靶之间间距太远,小靶等离子体 X 射线辐射较弱。而靶之间间距太近,小靶又很容易受入射激光边缘的影响,从而影响我们实验的最终目的。为了进一步验证和解释上面的实验结果,我们用 $\phi 200\ \mu\text{m}$ 的微球靶代替小平面靶,在进行实验中,不断变化微球靶的高度以观察激光在越过微球直接辐照大平面靶时,它的边缘光以及大靶等离子体对微球的影响。图 2 是一张比较典型的 LPX 发射光斑图。此时微球的位置或者说高度恰好处在临界位置。图 2 显示小球上半部 X 光斑主要是由入射激光边缘辐照

所致,而下半部 X 光斑由主激光在大靶上产生的等离子体 X 射线辐射所致。如保持其他条件不变而专门去掉大平面靶,结果显示不出上述结果。同样当我们升高小球位置时,整个小球受入射激光辐照,获球状 X 光斑。当降低小球位置,小球只受大靶等离子体 X 射线辐射,也可获类似的光斑,不过此时的 X 光斑强度较弱,所有这些结果都与上述的解释一致。由此可见,利用等离子体强 X 射线作为泵浦辐照另一介质并使它发射 X 射线是完全可能的。

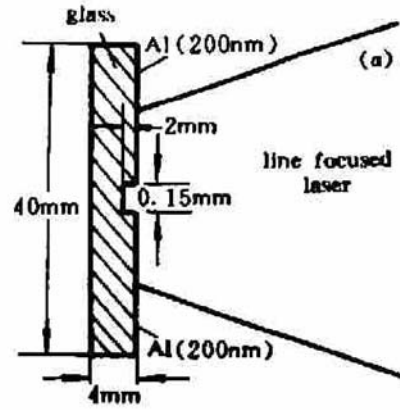


Fig. 3

(a) Method of laser focus and structure of target;

(b) LPX intensity distribution of line focused laser irradiation Al-Al segmented planar target

在进一步实验中,发现利用两束等离子体相互作用也可以产生 X 射线发射增强现象。图 3 是用线聚焦激光辐照二段铝平面靶,从 X 光针孔相机上得到的等离子体 X 辐射的光场分布,从中可见,在靶的交界间隙区域,有明显的 X 射线光场存在,横向尺寸为 $100 \mu\text{m}$,纵向尺寸约为 $200 \sim 250 \mu\text{m}$ 。图 4 是探针系统同时得到的阴影图。光探针方向垂直于打靶激光焦线,当延迟时间 $\Delta t = 1.7 \text{ ns}$ (探针光脉冲与打靶激光脉冲峰值之间的延迟)时,在两个热等离子体交界处有较大的等离子体喷流状结构。可以得出在两段靶之间间隙处强辐射和大喷流状结构主要是由于入射激光照射到深槽靶内引起的。在等离子体与等离子体交界处,由于靶结构的不完全对称性和加热的不均匀性,等离子体存在很大的温度和密度梯度,导致等离子体出现大的热流。因热流的出现,激发起等离子体不稳定性^[6],从而导致高温电子与离子,等离子体与等离子体间的强相互作用,最终形成上述这种大尺度等离子体喷射状和强 X 射线发射。



Fig. 4 Shadowgram of plasma produced by laser irradiated Al-Al segmented target

致谢 本文曾得到六路实验组同志的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 冯贤平,徐至展. 物理, 1989, 18: 708
- 2 D. C. Matthews et al., UCRL-89542, Livermore CA USA, 1989
- 3 P. L. Hagelstein, UCRL-89183, Livermore CA USA, 1989
- 4 彭翰生. 强激光与粒子束, 1990, 2: 148
- 5 Feng Xianping, Xu Zhizhan et al., J. Fiz. Mat., 1989, 10: 49
- 6 冯贤平,徐至展等. 物理学报, 1988, 37: 1183
- 7 徐至展,冯贤平等. 光学学报, 1991, 11(7): 848
- 8 Xu Zhizhan et al., Phys. Rev. A, 1989, 39: 808

The Variation of Radiation Distribution Caused by Plasmas Interactions

Feng Xianping Xu Zhizhan Yu Wei Lu Haihe Jiang Ziming

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract This paper investigates the characteristics of the spatial distribution of laser plasma X-ray (LPX) formed by irradiating a plasma with X-ray emitted from another plasma. The results show the influence of plasma emissions and the spatial geometry of the two interacting plasmas on the total PLX radiation fields. In addition, the paper also indicates the X-ray enhancement, the extremely nonuniform distribution of the electron density, and the plasma jet structure in the interaction region.

Key words plasma, PLX radiation fields

可自启动的自锁模掺钛蓝宝石激光器

我们在采用掺钛蓝宝石作增益介质的克尔透镜锁模激光器的基础上,最近成功地获得了稳定的自锁模脉冲序列。结果具有两个突出的特点:(1)锁模的建立表现为自启动过程。迄今所报道的实验结果基本上都是非自启动的,锁模的建立需借助于敲击反射镜、实验平台或移动腔镜来实现,这对非专业人员是很不方便的。我们在实验中发现,当调节激光器接近最大输出功率时,再轻轻微调两平面反射镜,即可容易地使激光器由连续运行转入锁模状态。一旦由于人为因素或外界干扰使锁模中止后,只要遮挡一下泵浦光或腔内钛宝石激光器 1~2 s 后,激光将又自动地从连续恢复为自锁模运行,类似于自启动过程;(2)泵浦激光可以是高阶横模。目前的实验都特别强调泵浦激光必须是 TEM₀₀ 模。

我们的实验系统为典型的非对称“Z”形四镜折迭腔结构,腔内未采用任何光阑,两聚焦镜的曲面半径均为 10 cm,激光腔的一端是透过率为 4% 的平面输出镜,另一端为平面全反镜,其中长臂为 104 cm,短臂为 53 cm。激光介质用上海光机所生长的晶体,泵浦源是南京电子管厂生产的 A-240 型 Ar⁺ 激光器,实现锁模所需的泵浦激光阈值为 7 W,在 9 W 的泵浦情况下,钛宝石激光的锁模脉冲平均功率为 500 mW,当插入一对石英棱镜后,获得了稳定的锁模脉冲序列。

进一步降低锁模阈值,采用合理的色散棱镜压缩脉宽及对上述两现象的详细理论解释正在进行之中。

参加本工作的还有李伟良、杨杰及中国科学院西安光机所的方学信同志。

(中山大学超快速激光与光谱学国家重点实验室,广州 510275)

魏志义 黄旭光 张诗友 李振先 周建英

1994 年 2 月 12 日收稿)