

等离子体 X 射线激光介质均匀性测量*

冯贤平 韩申生 徐至展 余 玮 刘亚青 张正泉 范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 通过合理而有效地安排多种探测仪器, 观察到等离子体 X 射线激光介质的空间非均匀现象. 在保证入射激光经最佳组合透镜后焦线均匀性前提下, 由实验显示等离子体介质的空间不均匀性主要来自靶材质量和调焦精度. 此外, 入射激光脉宽的大小变化将会引起等离子体整个辐射空间和时间范围的明显变化.

关键词 X 射线激光, 介质参数, 光谱测量.

1 引 言

在进行激光核聚变和 X 射线激光研究中, 为解决激光和等离子体的不均匀性, 已采取了多种措施^[1]. 尽管如此, 由于各种人为和物理上的原因, 克服激光等离子体的非均匀性一直是个比较困难的问题^[2]. 此外在测量上也存在大量的问题, 因而目前的 X 射线激光研究, 一般还只是单纯地停留在增益测量或新激光谱线寻找工作上^[3], 但大量的文献总是不断地重复强调等离子体的均匀性对产生 X 射线激光的重要性^[3,4], 很少看到检测不均匀性报道, 更没有进行总体系统的均匀性测量方面研究^[1]. 本文就是在这种情况下, 恰当而合理地安排各种探测仪器, 以有效、高精度探测等离子体不均匀程度, 同时研究等离子体参数对 X 射线激光的影响.

2 实验条件

在柱型等离子体测量时考虑到谱仪的空间测量范围受限制问题, 设计一种新型的带针孔式的 X 光晶体谱仪, 以有效地解决柱等离子体谱与空间之间的矛盾. 这种测量结果是否有效是以整个柱介质均匀分布为前提的. 所以选用带狭缝的谱仪且使其安置在靶正面进行检测如图 1 所示. 这种安排初期出发点只是解决等离子体空间参数的测量问题, 但实际上它起到了检测整个等离子体介质均匀性问题.

实验是在中国科学院上海光机所“神光”装置上完成的^[3]. 其参数为激光波长 $1.06 \mu\text{m}$, 脉宽 $\sim 100 \text{ ps}$, 能量输出约 10 J , 利用条状柱面镜和非球面镜将激光会聚成宽为 $100 \mu\text{m}$ 、长为 12

* 本课题得到 863 高技术基金、国家自然科学基金和上海光机所所长基金资助.

收稿日期: 1993 年 6 月 15 日

mm 条状焦线, 相应的靶面功率密度是 $8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.

实验中除晶体谱仪外, 还选用掠入式光栅谱仪, 透镜光栅谱仪, X 射线条纹相机等辅助进行测量, 整个实验安排如图 1 所示.

3 实验结果和分析

在实验上由于采用了二种有效的晶体谱仪相结合和合理安排, 因此从根本上解决了柱等离子体空间均匀性测量问题. 在具体测量过程中, 考虑到谱仪还无法测量整个柱等离子体焦线(约 10 mm), 因此实际上仅采集柱等离子体的其中一端点部分(约 3 mm), 如图 1 所示. 从这次 X 射线激光实验中可发现多数都

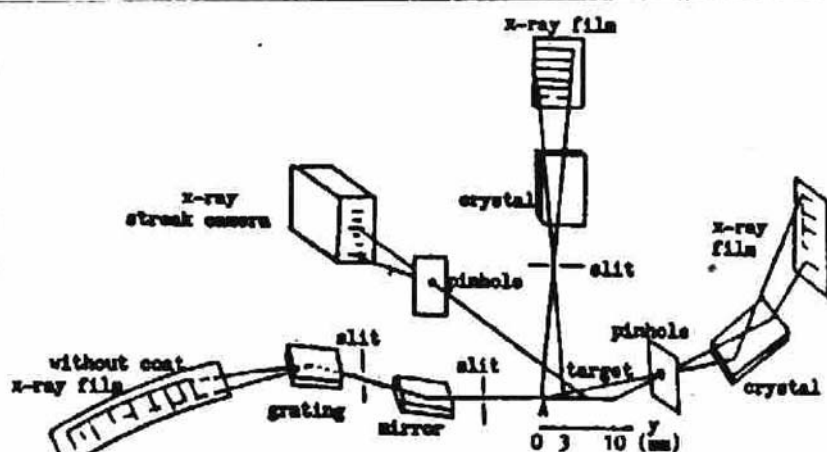


Fig. 1 The schematic setup of the experiment

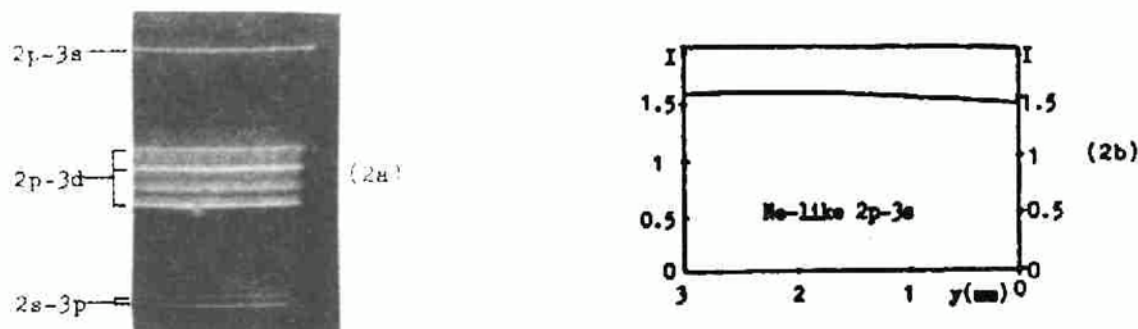


Fig. 2 Ne-like Ge ions LPX emission spectral intensity and densitometer trace of 2p-3s line

能获得较为满意的柱等离子体均匀分布结果. 图 2 给出本次实验的典型结果. 图中光谱已被辨认, 主要是由类氪锗离子第三能级的线辐射, 每条谱线空间分布都较为均匀. 实际上这结果反映沿柱向空间方向上每一点的各电离态离子分布都是极为均匀的. 这在 X 射线激光研究中是极为重要的. 在这种条件下也确实观察到了 X 射线波段区域的粒子数反转和 X 射线激光增益现象. 但是由于部分靶面质量问题, 调焦技术及误差等原因, 依然还有空间非均匀现象存在. 如图 3 所示, 即在空间上越接近端点, 它的强度越来越弱. 二端点的二个强度差接

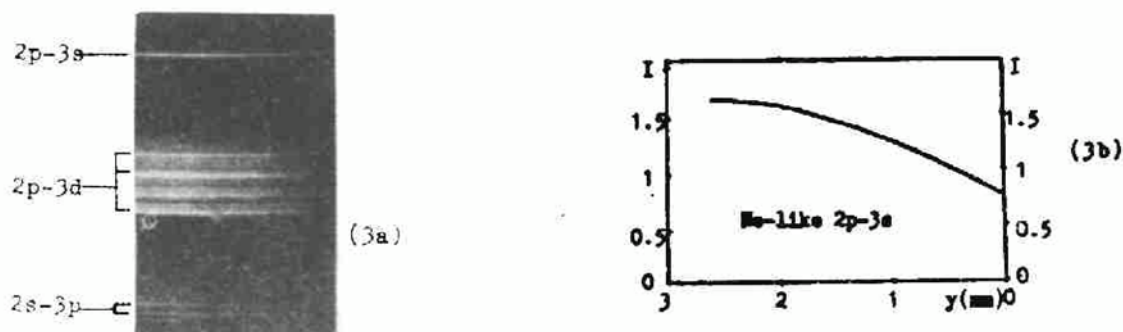


Fig. 3 Ge-LPX spectral intensity produced by no-best focus laser irradiation and densitometer trace of 2p-3s line

近 44.6%. 根据 X 射线发射强度与离子丰度基本关系 $I_{\text{线}} \sim N^{[5]}$, 可以推出图 3 二端点对应的柱等离子体空间点上粒子数密度差基本也在 44.6% 左右. 这个结果显然对 X 射线激光高增益是有害的. 引起这一现象的原因既不是光束质量问题, 也不是靶质量不好, 原因主要出在

调焦技术上——在竖直面上的激光焦线没有与靶面真正重合，而这一现象在以前的实验中基本是都被忽视。事实上也很少有人利用有效的仪器进行这方面的检测工作。上述不均匀结果是针对带状靶而言。类似的现象也发生在激光辐照线靶情况，此时对调靶技术要求更高。因为无论是在水平面上还是在竖直面上激光焦线都必须与线靶重合。假设在某一面入射激光功率密度是 $8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ，靶线长 10 mm，激光焦线与线靶由于调焦原因而成夹角 10^{-3} rad ，再假设激光强度与激光等离子体 X 射线(LPX)强度是线性关系，激光焦线宽 $100 \mu\text{m}$ ，则不难得出二个端点的激光等离子体 X 射线强度相差 10%。这个量级在本系统中是比较容易检测出来的。它说明在上述系统至少可以检测 10^{-3} rad 偏差。针对图 3 结果，利用上述类似方法也可以估计出激光焦线与靶偏离为 $5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。

在进行 X 射线实验中，如靶含杂质且不均匀分布时，不可避免地在微观上反映各电离态粒子的分布非均匀性和宏观上呈示激光等离子体 X 射线发射空间非均匀分布如图 4 所示。各谱线强度在空间上分布呈无规起伏状。由于在实验前对靶材的纯度都是经过绝对严格的选择，因此引起上述非均匀现象的原因之一可能是靶表面在加工处理时，部分表面被杂质所污染，所以在今后实验前后的任何一道工序都将需要极为重视。

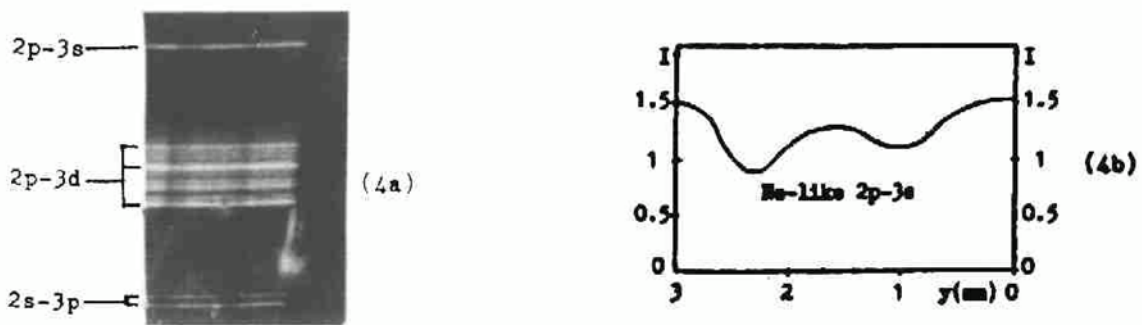


Fig. 4 Ge with impurity LPX emission spectral intensity and the densitometer trace of 2p-Bae

除了上述人为原因而引起的非均匀现象外，等离子体本身内部的各种效应也将是引起柱等离子体不均匀的原因之一。这方面无论理论还是实验都已作了大量工作。如由于光束质量、功率密度分布不均会引起自聚焦和细丝等^[6]。即使在相同的激光功率密度条件下，如它们的脉宽不同，同样会引起等离子体参数的极大不同。在实验中，曾使激光输出功率保持在 10^{13} W/cm^2 量级后，输出脉宽 100 ps 和 1000 ps 及相应的激光能量，实验结果显示它们激光等离子体 X 射线发射光谱范围基本类似，但强度要相差 2~5 倍，空间范围的激光等离子体 X 射线强度分布差异也很大，此外它们的发射脉宽也差一个量级左右。

本工作是在中国科学院上海光机所“神光”装置上完成，在实验中曾得到该装置的工作人员大力帮助；此外陆培祥博士、王晓芳博士也帮助做了大量工作，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 陈万年, 王树森, 陈斌等, 用于 X 射线激光实验研究的列阵柱面透镜线聚焦系统. 光学学报, 1991, 11 (3): 829~833
- [2] J. C. Kieffer, M. Chaker, M. Pepin *et al.*, Effects of irradiation non-uniformity on X-ray laser Physics. *Opt. Commun.*, 1991, 84(3): 208: 213
- [3] D. M. O'Neil, C. L. S. Lewis, D. Neely *et al.*, Characterisation of soft X-ray amplification observed in Ne-like

Ge. Opt. Commun., 1990, 75(5): 406~412

- [4] Z. Z. Xu, Z. Q. Zhan, P. Z. Fan *et al.*, Soft-X-ray amplification by Li-like Al^{10+} and Si^{11+} ions in recombining plasmas. *Appl. Phys.*, 1990, B50(3): 147~151
- [5] 冯贤平, X 射线激光研究初步结果. *物理学进展*, 1988, 8(2): 311~327
- [6] J. C. Kieffer, M. Chaker, M. Pepin, Large-scale structures in line-focused plasma. *Phys. Fluids.*, 1991, B3(2): 463~467

Measurement of Inhomogeneity of Plasma X-Ray Laser Medium

X. P. Feng C. S. Hen Z. Z. Xu W. Yu Y. Q. Liu
Z. Q. Zhang P. Z. Fan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academic Sinica, Shanghai 201800)

(Received 15 June 1993)

Abstract The spatial inhomogeneity of plasma soft-X-ray laser medium was observed with several diagnostic tools at reasonable and effective arrangement. The best streak lens was used to produce homogeneity laser line focused. The experimental results show that the plasma medium space-inhomogeneity is mainly resulted from the quality of the target material and the process of focusing. In addition, The plasma X-ray emission intensities both in spatial range and time range were different notably at different pulse lengths of the laser beam.

Key words X-ray laser, medium parameter, spectral diagnosis.

第二届全国光孤子通信专题学术讨论会在广州举行

由中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会主办, 华南师范大学量子电学研究所承办的“第二届全国光孤子通信专题学术讨论会”于 1993 年 12 月 22 日~24 日在广州华南师范大学举行. 来自清华大学、东南大学、北京邮电学院、华南师范大学、上海科技大学、中科院上海光机所、中山大学等 12 个单位的 26 名代表参加了会议. 本次会议旨在交流我国第一届光孤子通信专题学术讨论会后, 国内在光孤子通信领域研究工作的成果与经验, 分析了国际上光孤子通信发展的现状, 促进我国光孤子研究事业的发展.

会议共收到学术论文 31 篇. 论文议题涉及到: 光学孤子传输的基本理论, 光孤子源, 光放大器, 光开关, 以及光纤孤子通信系统设计等. 与会代表进行了两天热烈而又活跃的学术交流和讨论. 清华大学高以智教授介绍了她领导的研究小组利用自己研制的光孤子源、掺铒光纤放大器和国产的色散位移光纤进行光孤子传输的初步定性实验结果. 代表们对此结果感到欣慰, 因为这一研究结果表明我国即实现光孤子传输实验零的突破; 同时, 上海科大和上海光机所合作, 也有作类似的实验的意向. 总之各研究小组再接再厉, 希望能进一步取得定量的结果. 大家一致认为, 此次讨论会小型精悍, 提交的论文内容丰富且有深度, 议题文泛又新颖, 代表了我国光孤子通信研究的学术水平, 这样的交流有利于促进我国光纤孤子通信研究事业的进展, 应该经常举行.

会议决定第三届全国光孤子通信专题学术讨论会将在一九九五年举行, 初步商定由重庆大学物理系承办, 会议的具体地点和时间需进一步商讨.

(黎 风)