

激光加热微管靶在软 X 射线波段 观察很高的粒子数反转*

谭维翰 林尊琪 余文炎 顾 敏 陈文华

郑玉霞 王关志 崔季秀 程瑞华 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1987年6月5日收到

提 要

本文分析在软 X 射线区获得粒子数反转的几种实验后,提出激光加热微管靶方案. 并从实验上观察到 Mg 的 $1s3p$ 和 $1s4p$ 能级与 $1s5p$ 和 $1s5p$ 能级间很高的粒子数反转,对其中物理机制作了分析.

一、引 言

通过高阶离子等离子体多体复合,实现紫外与软 X 射线波段受激辐射的设想,很早就提出来了^[1]. 因复合几率与能级主量子数 n 的三次方成正比,这就导致高主量子数的能态优先被占据. 如果高主量子数能态的粒子通过碰撞或自发辐射向基态跃迁的几率低于低主量子数能态向基态跃迁的几率,则在高主量子数与低主量子数能态间实现粒子数反转是可能的. 近年关于软 X 射线波受激辐射的研究,利用三体复合相继实现 Al^{+11} , Mg^{+10} 离子类氦能级 $1s3p$ 与 $1s4p$ 间的粒子数反转^[2-4],采用的办法是高功率激光脉冲打 Al 或 Mg 的平面靶使之加温并达到完全离化,然后自由膨胀或在自由膨胀的同时加冷阱使电子温度迅速下降,以增加三体复合几率^[5]. 在自由膨胀的等离子体冕区,电子温度 $T_e \simeq 10-100\text{eV}$, 电子密度 $N_e \simeq 10^{18}-10^{20}\text{cm}^{-3}$, 三体复合占主导地位而辐射复合居其次. 离靶面约 $60-200\mu\text{m}$ 处观察到粒子数反转. 但反转粒子密度不高,相应的增益也低. 这主要是由于自由膨胀,等离子体密度下降,而类氦离子 N_1-N_2 ($1s3p-1s5p$ 能级的粒子密度)一般在 $10^{12}-10^{14}\text{cm}^{-3}$ ^[2,3], 增益 $0.2-1\text{cm}^{-1}$. 当激光功率密度高时粒子密度达 10^{15}cm^{-3} , 增益达 10cm^{-1} ^[4], 而且这些反转粒子还很难做到分布在同一轴向,起不到对自发辐射的长距离放大作用. 文献[6]用线聚焦激光 ($0.02 \times 1.12\text{cm}$) 照射在 Formvar 膜镀有 $750\text{\AA}$ Se 薄层上,得到谱线 $206, 209\text{\AA}$ 的放大,增益系数 $g = 5.5\text{cm}^{-1}$. 也还是加热 Se 薄层蒸发后自由膨胀的等离子体气体,当然是沿某一轴向分布,对自发辐射有放大作用. 为得到高的反转粒子密度,并令沿确定方位分布,我们从研究激光与等离子体细丝的相互作用过程中产生了将激光聚焦于微形管状靶的设想. 使用 X 射线晶体谱仪诊断 Mg 的高级离化谱,空间积分谱与空间分辨谱,诊断结果表明: 不仅在 $1s3p$ 与 $1s4p$ 间有

* 国家自然科学基金资助的课题.

很高的粒子数反转与推算的增益, 在 $1s3p$ 与 $1s5p$ 间也有很高的反转粒子密度与增益.

二、微管靶的实验布置、结果与分析

如图 1 所示, 将激光聚焦于微形管状靶开口处, 在管口产生大量高温等离子体, 不仅向外而且向内喷射. 内喷时管壁起约束并冷却等离子体的作用, 使得等离子体一直维持在高密度并沿微管管轴方向分布, 温度也迅速降低. 这对实现管轴方向的受激辐射将是有利的. 实验在本所六路激光装置上进行. 采用六路中的一路, 能量 $4-10\text{J}$, 脉宽 $80-250\text{ps}$. 靶面功率密度 $0.6-5 \times 10^{14}\text{W/cm}^2$, 激光频带宽度 $0.2\text{\AA}$. 探测系统如图 1 所示, 在沿激光前进的 z 方向即靶的后向放置 TLAP 晶体谱仪 1, 在靶的侧向即 y 轴方向放置 TLAP 晶体谱仪 2, 在靶的上方即 x 轴方向放置针孔照相 3, 在反激光方向取出二次谐波在条纹相机 4 上做时空分辨扫描以监视微管靶管口堵口情况. 把口径 $\phi 40-80\mu\text{m}$, 长 $180\mu\text{m}$ 的 Mg 管状靶沿 z 轴安放. 入射 $1.06\mu\text{m}$ 波长激光经 $f/2$ 非球面打靶透镜会聚在靶口中心, 激光焦斑尺寸约 $\phi 70\mu\text{m}$.

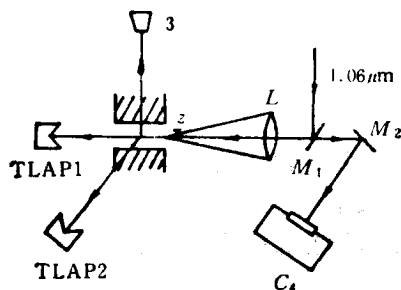


图 1 打微管靶的实验布置示意图

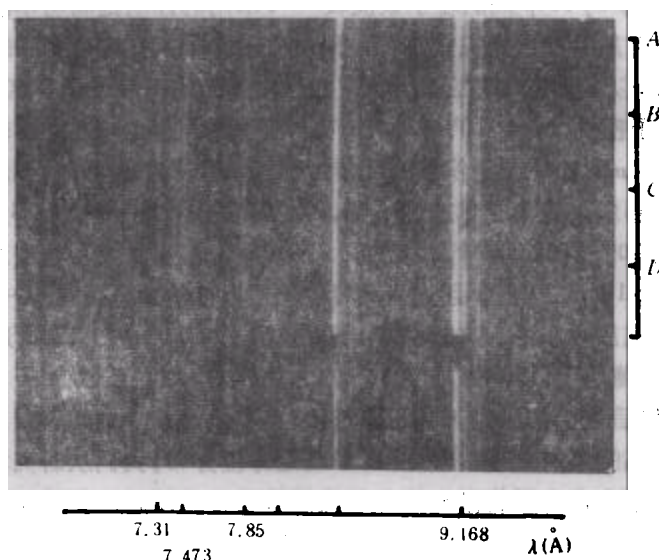
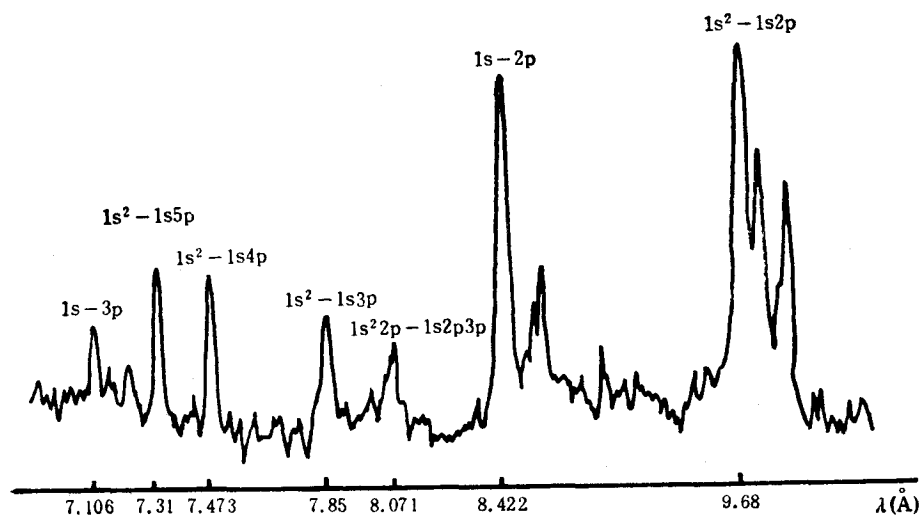
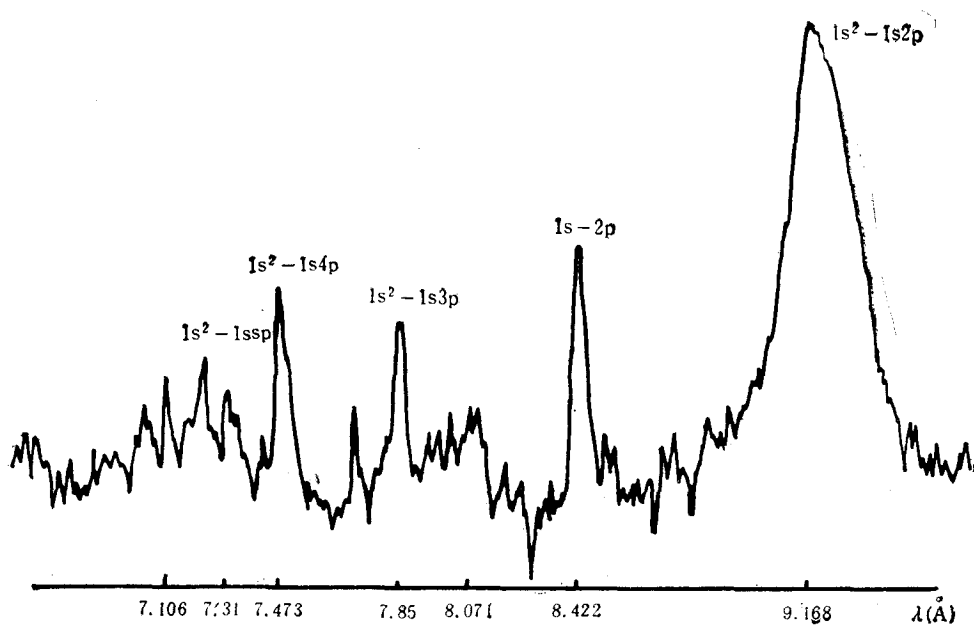


图 2



(a) 后向拍得的谱的描述



(b) 侧向拍得的谱的描述

图3 Mg 的类氢类氦谱线透过描述(实验编号 111)

图2是从晶体谱仪1拍得的后向X射线谱照片,实验编号为111,脉宽200ps,能量7.4J. 从该照片上可明显看到 Mg^{+11} , Mg^{+10} 的类氢类氦谱线. 图3(a)为图2即Mg的类氢类氦时间、空间积分谱黑密度描述. 图3(b)同样也是实验编号111,但从侧向晶体光谱仪2拍得的时间、空间分辨描述. 比较这些描述可发现,侧向与后向的类氢离子谱线

表1 实验编号 111, 171 的 I , N , ΔN , g 的结果(实验编号 171 的脉宽 80--100 ps, 能量 8.6 J)

实验编号	I_3 (erg/cm)	N_3 (cm ⁻³)	I_4/I_3	I_5/I_3	N_4/N_3	N_5/N_3	ΔN_{43} (cm ⁻³)	ΔN_{53} (cm ⁻³)	g_{43} (cm ⁻¹)	g_{53} (cm ⁻¹)
111 (后向)	7.17×10^{12}	9.5×10^{14}	2	2.2	3.6	7.7	2.3×10^{13}	5.6×10^{13}	17.2	5.4
111 (侧向)	1.4×10^{13}	1.8×10^{14}	1.16	0.7	2.1	2.4	1.3×10^{13}	1.1×10^{13}	9.7	1.1
171 (侧向)	2.2×10^{12}	2.9×10^{14}	2.6	2.1	4.5	7.2	9×10^{14}	1.5×10^{13}	6.7	1.4

轮廓的差异. 由透过率 T 求出黑密度 D , 并由文献[7]的定标曲线求出相应的爆光量 H . 又由文献[2]的方法由 H 求出谱线的发射强度 I 及谱线所对应的激发态能级的粒子数密度 N . 表 1 列出 I , N , 反转粒子数密度 ΔN 及推算允许跃迁子态可能产生最大增益系数 g 的计算结果. $1s3p$ 与 $1s4p$, $1s5p$ 间均存在粒子反转与增益.

表 1 的结果表明后向反转粒子数密度及增益系数均要比侧向结果高出一倍或更多. 侧向是观察微管管口及管口外的等离子体 X 射线谱. 后向才能观察到微管内的 X 射线发射. 表 1 结果实际上也初步表明了管内与管外的 X 射线发射强度不一样. 反转粒子数密度及增益也不一样.

将表 1 结果与用同一功率水平激光打用 Cu 做冷阱的 Mg 靶^[2]相比, 其 $\Delta N = 2.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $g = 0.52 \text{cm}^{-1}$ (已修正), $I_4/I_3 = 1.22$, $N_4/N_3 = 2.2$. 故 $\Delta N, g$ 低约 20 倍, 而 $I_4/I_3, N_4/N_3$ 也比表 1 低了约一倍. 若将表 1 结果与打 Al 靶的结果^[4]相比, 其 $\Delta N \simeq 2-3 \times 10^{13}$, $g = 10 \text{cm}^{-1}$ 与表 1 结果是相近的.

三、有开口的微管靶的实验布置、结果和分析

为了判明反转粒子密度的空间分布, 将实验编号 111 的后向时间积分谱分段扫描, 得图 4. 容易看出只在接收空间的较小范围内有很高的粒子数反转, 其它部份则反转较小或没有反转. 无疑粒子数反转高即增益高部份的投影应在微管的横截面内, 但进一步探讨粒子数反转在微管轴向空间分布情况是重要的. 为此我们将微形管侧面开口以做轴向空间分辨诊断, 管的后端封住, 尺寸如图 5 所示. 微管内 X 射线发射由开口进入晶体谱仪 2. 图 6 为拍得的 Mg 的类氢类氦谱照片, 明显看出在管外 $I_3 > I_4$; 在管内 I_3 很快衰减到几乎不能辨认, 但 I_4, I_5 仍清晰可辨, 即 $I_3 < I_4, I_5$, 粒子数明显反转了, 具体数值见表 1 中实验编号 171 栏. 沿图 6 空间分辨即 Z 轴上不同位置 A, B, C, D, E, F, G 进行扫描便得图 7 的黑密度描述. 从强度比 $I_4/I_3, I_5/I_3$ 可判明粒子反转密度的峰值在管内离管口的 $120 \mu\text{m}$ 处. 由图 6 类氢、类氦共振线强度比 $I_{\text{HR}}/I_{\text{HeR}}$ 及文献[9]曲线, 易判明在由管口进入管内约 $60 \mu\text{m}$ 处, 电子温度急剧下降, 以致 I_{HR} 很弱埋没在背景中. 又由类氦的共振线与互组合线强度比 $I_{\text{HeR}}/I_{\text{HeI}}$ 及文献[8]的曲线易算出自管口进入管内后, 电子密度在 $N_e = 1.7 \times 10^{20} - 0.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 缓慢下降 (对应的空间位置为图 7 中 B—E).

上述结果清楚表明高功率激光加热微管靶, 等离子体升温、离化主要发生在管口附

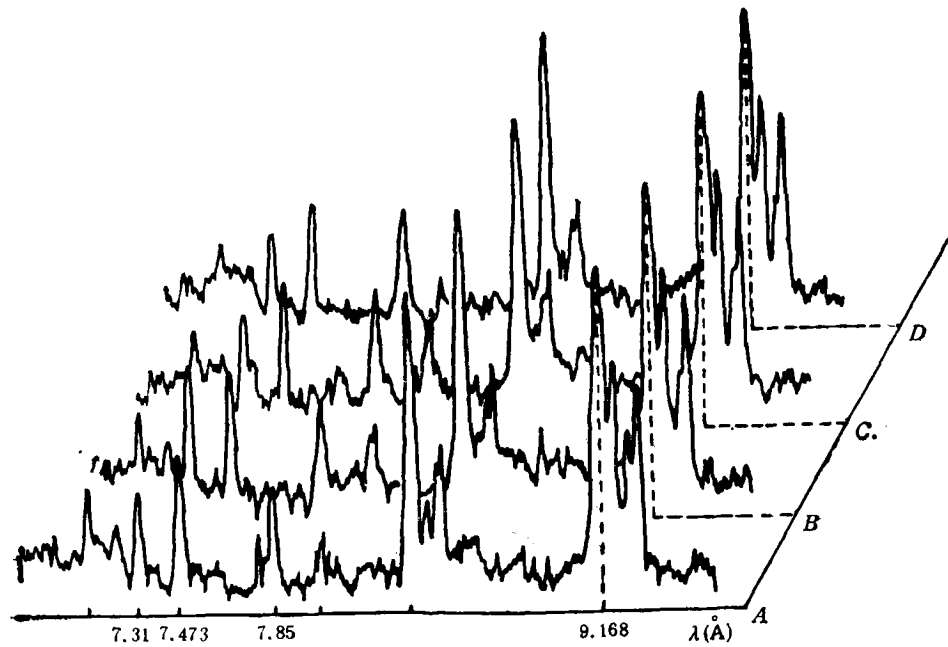


图4 实验编号 111 的后向时间积分谱在不同的空间分辨位置 A, B, C, D 的描述

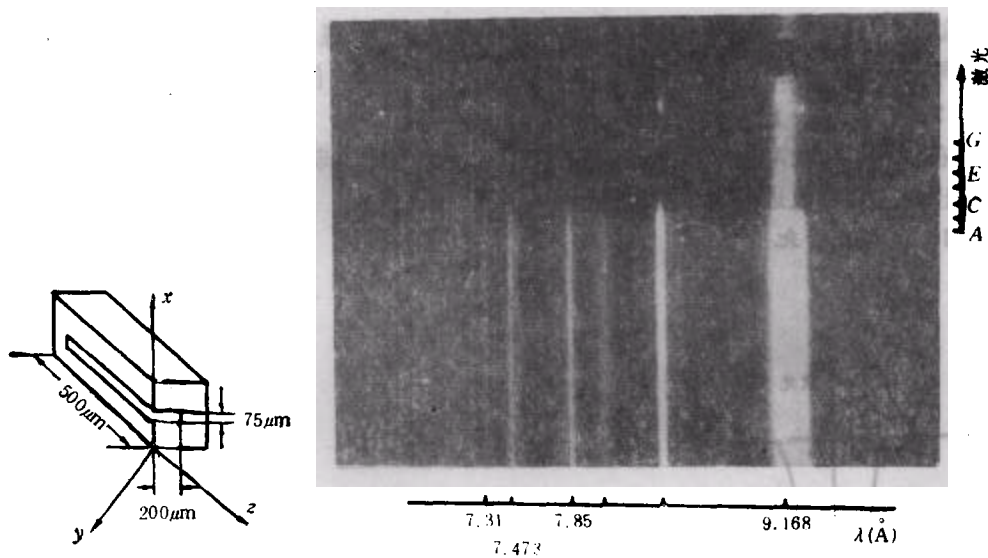


图5 侧向开口的微管靶的结构

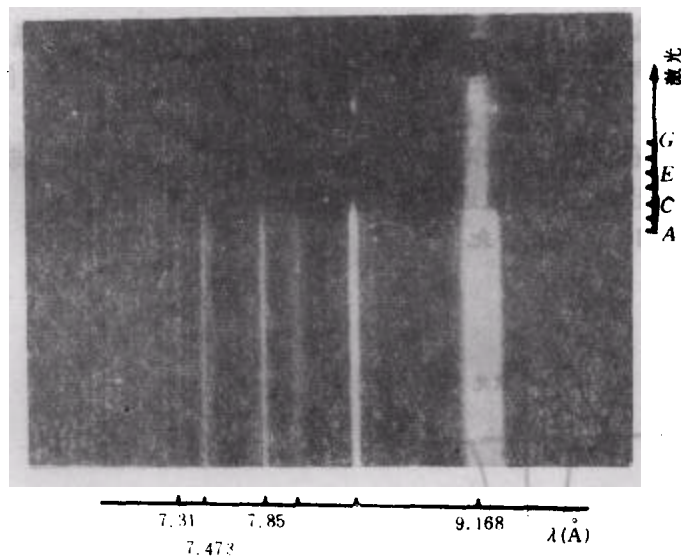


图6 侧向拍得的 Mg 的类氢类氦谱照片(实验编号 171)

近,高温等离子体向管内射流或喷射过程中急剧降温,但密度并不下降很多,前面已提,温度下降,有利于三体复合。高反转粒子密度与沿着管轴的定向分布,有利于自发辐射的行波放大。本文仅从粒子数反转计算了增益系数,其值是高的。

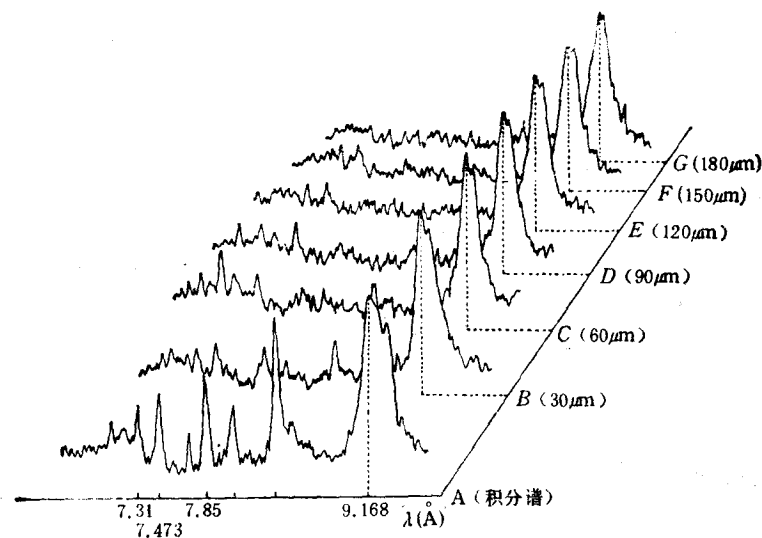


图7 沿着图6的A, B, C, D, E, F, G不同空间分辨位置透过率描述

四、讨论与进一步设想

微管靶口径选择尤为重要。我们最初选的管径约 $\phi 30\mu\text{m}$ ，由于堵口效应严重，不能有效形成对管内的射流。后向晶体谱仪1根本接收不到信号。后改为 $\phi 80\mu\text{m}$ ，由于激光大部份已从微管透过，效果亦不佳。选择 $\phi 50\text{—}60\mu\text{m}$ ，即在堵口临界状况时，效果较好。这时大部份激光能已消耗在管口附近等离子体的升温，并形成对内的射流，这就是实验编号111的结果。实验编号171，开口稍宽达 $75\mu\text{m}$ ，但管深达 $500\mu\text{m}$ ，加热脉冲宽度为 $80\text{—}100\text{ps}$ 。激光能仍在管口附近消耗。

在已有实验及对物理机制研究的基础上，为了有效实现升温，完全离化，射流降温，我们提出如下几种改进微管靶的设想。

1) 流线微管靶

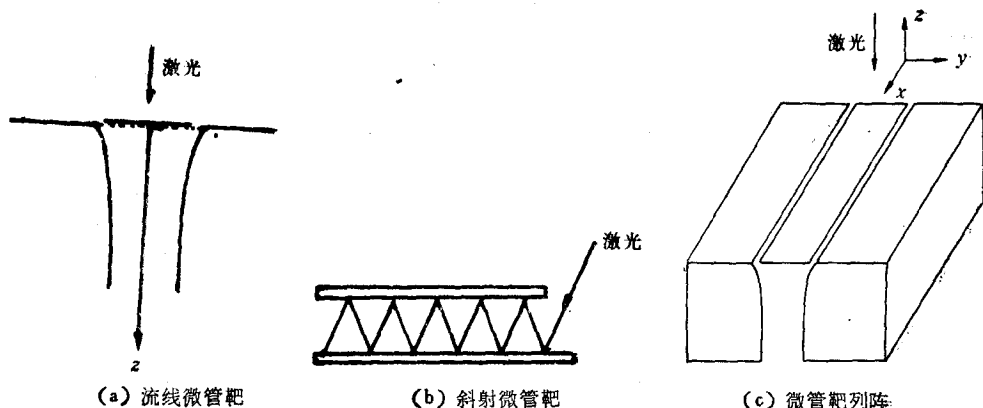


图8

如图 8(a) 所示, 在管口用一层 Formvar 膜覆盖, 上涂 $300-700 \text{ \AA}$ 金属原子^[6]. 管壁 AB, CD 做成射流型, 激光能耗尽在 F 层金属原子的完全离化, 并通过光压向管内射流, 在微管轴 x 方向获得增益.

2) 斜射微管靶

激光以倾斜方向加热微管, 激光可在管口及其壁内多次反射将能量耗尽, 等离子体也在管内运动被降温, 如图 8(b).

3) 微管靶列阵

将微管排列在一条直线上, 用线聚焦激光加热 F 长条上金属原子层. 得出列阵 x 方向上的增益, 如图 8(c).

4) 宽频带微管靶

用宽带激光加热 F 长条上的金属原子, 由于照明均匀, 有利于发展成规则的射流.

作者向参加本工作的毕无忌、林康春、何兴法等同志和六路实验室全体工作人员一并致谢. 作者感谢顾援、毛楚生、张正泉、范昌忠等同志对工作的协助和进行的有益讨论.

参 考 文 献

- [1] Л. И. Гудзенко, Л. А. Шелепин, ЖЭТФ, **45** (1963), 1445
- [2] 卢仁祥、毛楚生, 中国科学 A 辑, (6)(1984), 573.
- [3] V. A. Bhagavatula, IEEE, QE-16 (1980), 603.
- [4] V. A. Bhagavatula and B. Yaakobi, Opt. Comm., **24**(1978), 331.
- [5] V. A. Boiko et al., IEEE, QE-20(1984), 206.
- [6] D. L. Matthews, et al., Phys. Rev. Lett., **54**(1985), 110.
- [7] 范品忠、毛楚生, 光学学报, **4**(1984), 956.
- [8] A. V. Vinogradov, I. Yu. Skobelev and E. A. Yukov, Sov. J. Quant. Electron., **5**(1975), 630.
- [9] 卢仁祥, 核聚变与等离子体物理, **3**(1983), 188.

HIGH SOFT X-RAY POPULATION INVERSION OBSERVED IN A LASER-IRRADIATED MICRO-TUBE

TAN WEI-HAN LIN ZUN-QI YU WEN-YAN GU MIN CHEN WEN-HUA ZHENG YU-XIA

WANG GUAN-ZHI CUI JI-XIU CHENG RUI-HUA DENG XI-MING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

After analyzing different experiments of population inversion in the X-ray region, we proposed a new method of a micro-tube heated by a laser beam, and observed the high population inversion between $1s3p$ and $1s4p$ levels and $1s3p$ and $1s5p$ levels. The physical mechanism was discussed in some detail.