

## 类氖锆的 X 射线激光增益及其 传输特性研究

何绍堂 何 安 淳于书泰 沈华忠

西南核物理与化学研究所, 成都, 610003

1990 年 5 月 21 日收到

在神光 ( $10^{11}\text{W}$ ) 装置上, 用  $1.06\mu\text{m}$  激光加热片状锆靶, 用袖珍式掠入射光栅谱仪测量了类氖锆离子的  $3\text{S}-3\text{P}$  激光跃迁线的增益系数和 X 射线激光的传输特性. 得到的结果为: 波长为  $19.638$ ,  $23.224$ ,  $23.627$ ,  $24.743$  和  $28.643\text{nm}$  的 5 条激光跃迁线的增益系数分别为  $3.06$ ,  $3.99$ ,  $3.72$ ,  $2.36$  和  $4.59\text{cm}^{-1}$ ; 当等离子体长度为  $18\text{mm}$  时, 相应的 X 射线激光的发散角约为  $12\text{mrad}$ , 发射 X 射线激光的等离子体厚度约为  $200\mu\text{m}$ , X 射线激光峰值强度方向偏离等离子体轴线约为  $5.7\text{mrad}$ .

PACC: 4255V; 4220; 3320R.

### 一、引 言

自从 1984 年 Lawrence Livermore national laboratory (缩写为 LLNL)<sup>[1]</sup> 证实了类氖的  $20.63$  和  $20.96\text{nm}$  的 X 射线激光增益以来, 很多实验室开始了用高功率激光器作泵浦源来进行 X 射线激光实验研究. 类氖锆的  $3\text{S}-3\text{P}$  的 X 射线激光增益首先被 Naval research laboratory 缩写为 NRL)<sup>[2]</sup> 证实. 他们使用的泵浦激光波长为  $1.06\mu\text{m}$ , 脉冲宽度 (FWHM) 为  $2\text{ns}$ , 能量为  $350-480\text{J}$ , 线聚焦长为  $18\text{mm}$ , 宽为  $200\mu\text{m}$ , 功率密度约为  $6 \times 10^{12}\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 并使用了  $3\text{mm}$  厚块状锆靶. 获得  $19.606(J=0-1)$  和  $23.224(J=2-1)$   $\text{nm}$  两条线的增益系数分别为  $3.1$  和  $4.1\text{cm}^{-1}$ .

我们在神光装置上, 用  $1.06\mu\text{m}$  激光加热  $1\text{mm}$  厚片状锆靶, 获得了类氖锆的  $3\text{S}-3\text{P}$  的五条激光跃迁线的增益系数, 并获得了 X 射线激光的传输特性数据, 把电子碰撞激光机制的 X 射线激光研究推进了一步.

电子碰撞激发类氖锆  $3\text{S}-3\text{P}$  激光跃迁能级图示于图 1 中. 在激光加热锆靶形成的等离子体中, 类氖 (Ne) 离子的基态  $1s^2 2s^2 2p^6$  到  $1s^2 2s^2 2p^5 3\text{P}$  激发态的碰撞激发概率约大于或等于基态到  $1s^2 2s^2 2p^5 3\text{S}$  态的碰撞激发概率.  $1s^2 2s^2 2p^5 3\text{P}$  态在  $J=0$  时的粒子数主要由基态的电子碰撞提供, 而在  $J=2$  时, 除了由电子碰撞激发提供以外, 还由上能态 ( $3\text{d}$  态) 与类 F 离子的双电子复合过程提供. 由于  $3\text{P}$  态与基态之间是禁戒跃迁, 而  $3\text{S}$  态与基态之间有强烈的偶极允许跃迁, 故  $3\text{S}$  态在  $J=1$  时寿命短, 粒子占据数小. 而  $3\text{P}$  态粒子占据数大. 从而导致  $3\text{P}$  与  $3\text{S}$  态之间出现粒子数反转, 有可能产生 X 射线激光跃

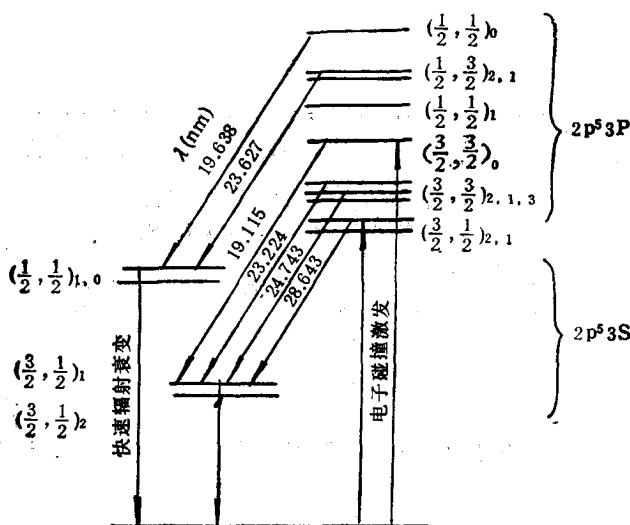


图1 类氪锗 3S—3P 能级图

迁。理论计算表明,类氪锗 (GeXXIII) 的 3S-3P 跃迁有 6 条可能的 X 射线激光跃迁。我们的实验和 NRL 的实验<sup>[3]</sup> 都只观察到 5 条线的 X 射线激光跃迁, 而  $J = 0-1$  的 19.115nm 线未观察到有明显的增益。

## 二、实验方法

实验装置见图 2。神光装置是一台高功率 ( $10^{12}$ W) 钨玻璃脉冲激光器, 激光波长为

1.06  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 1.2ns, 每发输出能量为 550—650J。用柱透镜组形成长为 20mm 宽为 180  $\mu\text{m}$  的线聚焦。1mm 厚的条形平面锗靶被用于类氪锗的 X 射线激光研究, 靶的长度在 7—18mm 范围内变化。一台 1m 曲率半径的袖珍式掠入射光栅谱仪安装在与入射激光光束相垂直的位置上, 用于诊断 X 射线激光的增益情况。光栅刻痕条数为 1200 条/mm, 测量波段范围为 2—32nm, 能谱分辨为 0.005nm, 用 Kodak SWR 低能 X 射线胶片进行记录。还有一些诊断等离子体

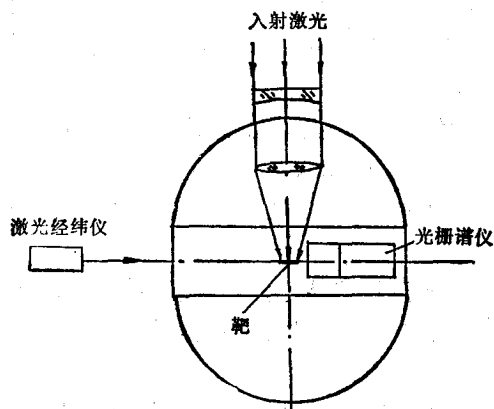


图2 实验装置

状态参数的装置未在图 2 中显示。

光栅谱仪的瞄准方法也在图 2 中作了介绍。先将激光经纬仪发出的 He-Ne 激光的光轴调到与线聚焦靶面相重合的位置上, 然后调节谱仪的位置, 观察其在谱仪的狭缝上的反射光。当入射光与反射光相重合时, 谱仪便瞄准了。这种瞄准方法简便可靠, 精度在 1mrad 之内。

实验中通过分析谱线的强度来调整泵浦激光功率密度,使之适合于产生类氪锗的 X 射线激光。结果表明,当入射到靶表面的泵浦激光功率密度为  $8-12 \times 10^{12} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,类氪锗的 3S-3P 跃迁的 5 条线有明显的增益。

### 三、实验结果

#### 1. 增益系数

图 3 是线状等离子体的长度为 18.1mm 和 10.0mm 时,掠入射光栅谱仪获取的谱线的微密度计扫描曲线。从图 3 中看出,类氪锗(GeXXIII)的 3S-3P 5 条激光跃迁线(19.638, 23.224, 23.627, 24.743 和 28.643nm)在等离子体的长度为 18.1mm 时有很高的强度,在 10.0mm 时,强度很弱。这明显地表明了激光跃迁的线强度随等离子体长度的非线性增长特性。采用公式  $I \approx [\exp(Gl) - 1]^{3/2} \cdot [Gl \cdot \exp(Gl)]^{-1/2}$ , 用最小二乘法进行数值拟合,得到图 4 的结果。式中  $I$  为线强度,  $G$  为增益系数,  $l$  为等离子体长度。在计算中,微密度计给出的密度值已经按我们校准的 Kodak SWR 胶片的响应曲线<sup>[4]</sup>转换成 X 射线强度。

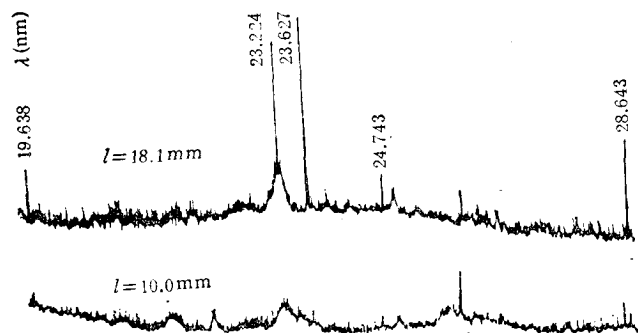


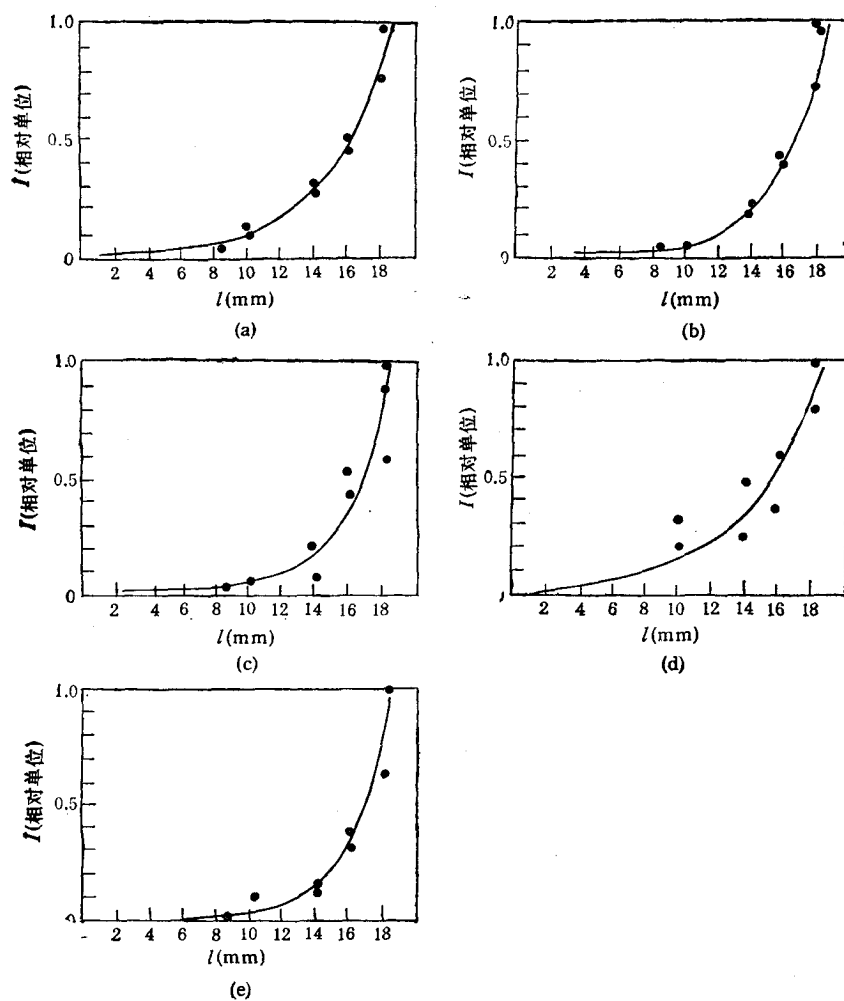
图 3 谱线的微密度计扫描曲线

得到的增益系数与 NRL<sup>[3]</sup>的结果基本一致。张覃鑫<sup>[3]</sup>计算了 GeXXIII 的 3S-3P 激光跃迁的增益系数,计算中不仅考虑了电子碰撞对 3P 能态的贡献,还考虑了它的上能态 3d 态和类 F 离子的双电子复合对 3P 态的粒子数的贡献。除了  $J = 0-1$  的跃迁以外,理论计算值与实验值符合得很好。为了比较,取电子温度为  $T_e = 8 \times 10^6 \text{K}$  和电子密度为  $N_e = 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  时计算的  $G$  值与实验值作比较,结果列在表 1 中。

在类氪离子的 X 射线激光研究中,  $J = 0-1$  的跃迁增益系数理论与实验结果有较大的偏差。理论预言,处于 3P 态的最高上能级  $J = 0$  态被优先占据,因此  $J = 0-1$  的激光跃迁具有最大的增益系数。但实验并非这样,而是  $J = 2-1$  的跃迁增益系数为最高。LLNL<sup>[6]</sup> 在研究类氪硒 (SeXXV) 的 X 射线激光实验中,得到类似的结果。这些实验结果将启发人们对粒子数反转的机制提出更合理的解释,对 3P 态粒子的贡献除了电子碰撞激发以外,三体复合,双电子复合和内壳层电离的贡献也可能起重要的作用。

#### 2. 激光跃迁的强度与功率密度的关系

在实验中研究了类氪锗的激光跃迁的强度与靶面泵浦功率密度的关系。图 5 给出



(a)  $\lambda = 19.638\text{nm}$ ;  $G = 3.06\text{cm}^{-1}$  (b)  $\lambda = 23.224\text{nm}$ ;  $G = 3.99\text{cm}^{-1}$  (c)  $\lambda = 23.627\text{nm}$ ;  $G = 3.72\text{cm}^{-1}$  (d)  $\lambda = 24.743\text{nm}$ ;  $G = 2.36\text{cm}^{-1}$  (e)  $\lambda = 28.643\text{nm}$ ;  $G = 4.59\text{cm}^{-1}$

图4 线强度  $I$  随等离子体长度  $l$  的变化

表1 类氦锗  $3S-3P$  跃迁的增益系数

| 跃 迁                                                 | 波 长<br>(nm) | 计算值 $G$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | 实验值 $G(\text{cm}^{-1})$ |      |
|-----------------------------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------|------|
|                                                     |             |                                 | NRL                     | 本工作  |
| $(2p_{1/2}^5 3p_{1/2})_0 - (2p_{1/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 19.638      | 8.72                            | 3.1                     | 3.06 |
| $(2p_{3/2}^5 3p_{1/2})_1 - (2p_{3/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 23.224      | 4.53                            | 4.1                     | 3.99 |
| $(2p_{1/2}^5 3p_{3/2})_2 - (2p_{1/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 23.627      | 4.71                            | 4.1                     | 3.72 |
| $(2p_{3/2}^5 3p_{3/2})_1 - (2p_{3/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 24.743      | 2.31                            | 2.7                     | 2.36 |
| $(2p_{3/2}^5 3p_{1/2})_2 - (2p_{3/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 28.643      | 4.53                            | 4.1                     | 4.59 |
| $(2p_{3/2}^5 3p_{3/2})_0 - (2p_{3/2}^5 3s_{1/2})_1$ | 19.115      | 0.97                            |                         |      |

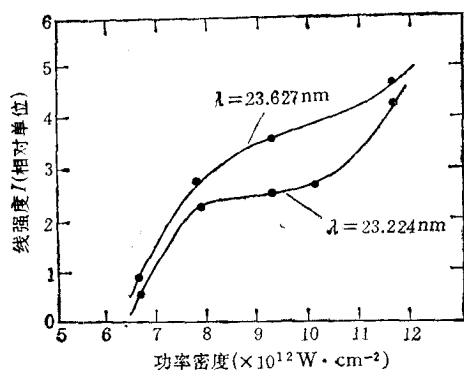


图5 线强度 I 随功率密度的变化

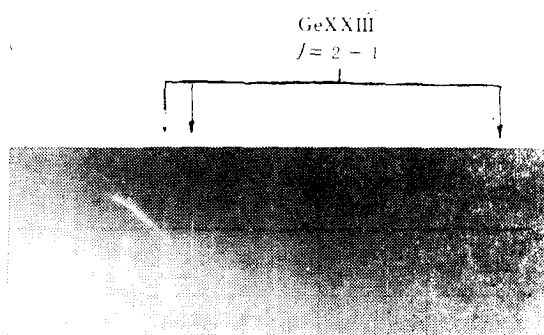


图6 Ge 的 XUV 谱

23.224 和 23.627 nm 两条激光跃迁线的强度随靶面功率密度的变化曲线。靶面功率密度低于  $7 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 由于不能产生一定数量的类氦离子, 不能出现 X 射线激光。当功率密度升高时, 类氦离子的丰度会增加, 激光跃迁的线强度会增强。泵功率密度升到某种更高水平时, 会出现过电离情况, 类氦离子丰度会下降, 激光跃迁线强度又会降低。由于神光装置功率水平的限制, 没有找出最佳靶面功率密度。

### 3. X 射线激光的传输特性

分析锗的紫外 X 射线谱, 发现类氦锗的 3S-3P 激光跃迁线与其他的自发辐射线相比, 具有短而窄的特征, 并且每一条激光跃迁线在非色散方向有非均匀的强度分布。这是 X 射线激光在线状等离子体中传输特性的反映。图 6 是实验获得的锗的 XUV 谱的照片, 照片中标明的激光跃迁线比其他的线要短, 而且强度分布是非均匀的。沿激光跃迁线的非色散方向用微密度计分段进行扫描, 获得图 7 的线强度分布。谱线强度峰值位置偏离

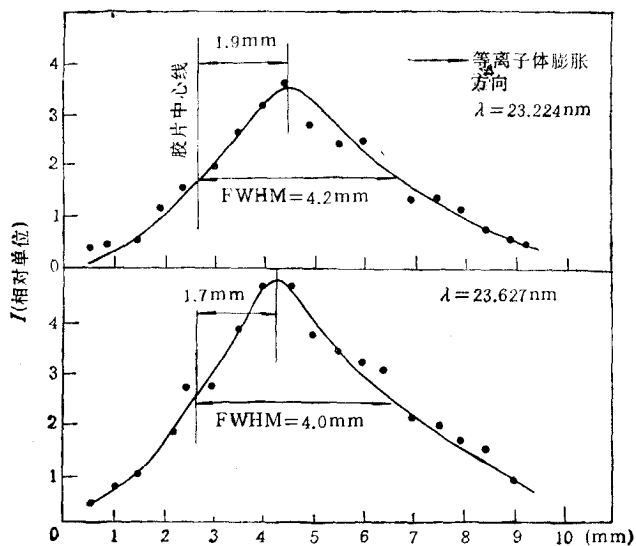


图7 谱线强度的空间分布

了胶片中心线,也就是偏离了线状等离子体的轴线。这种偏离是X射线激光在线状等离子体的传输过程中受到等离子体的密度梯度的折射引起的。

由图7的线强度空间分布,可以求出激光线束的发散角,并可以粗略地估计X射线激光在等离子体传输过程中,此束光脱离等离子体柱时所经过的发射区厚度。由峰值位置偏离等离子体轴线的距离可以求出折射后偏离轴线的角度。所得数据列在表2中。表2中打靶号为44的结果与另两发有些不一致,可能是重复性偏差造成,将进一步研究。

表2 X射线激光在线状等离子体中的传输特性

| 打靶号 | 等离子体长度 (mm) | 跃 迁       | 波 长 (nm) | FWHM (mm) | 离轴距离 (mm) | 发散角 (mrad) | 发射区厚度 ( $\mu\text{m}$ ) | 离轴角度 (mrad) |
|-----|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-------------------------|-------------|
| 34  | 18.1        | $J = 2-1$ | 23.224   | 4.2       | 1.9       | 12.7       | 229                     | 5.8         |
| 34  | 18.1        | $J = 2-1$ | 23.627   | 4.0       | 1.7       | 12.0       | 217                     | 5.2         |
| 44  | 18.1        | $J = 2-1$ | 28.643   | 3.2       | 1.7       | 9.0        | 163                     | 4.8         |
| 40  | 14.0        | $J = 2-1$ | 23.224   | 4.2       | 1.8       | 12.7       | 179                     | 5.5         |
| 40  | 14.0        | $J = 2-1$ | 23.627   | 4.0       | 1.8       | 12.0       | 169                     | 5.8         |

#### 四、讨 论

软X射线激光的主要问题之一是介质的陡峭电子密度梯度会引起放大的X射线折射。一般认为,激光与烧蚀型厚靶作用形成的等离子体密度梯度大,而用爆炸型薄膜靶形成的等离子体有较均匀的密度分布。等离子体密度梯度过于陡峭,会使放大的自发辐射(ASE)折射出线状等离子体柱。NRL<sup>[2]</sup>和本工作的结果证明,在所使用的线聚焦等离子体长度范围内,烧蚀型厚靶形成的等离子体的横向电子密度定标长度是足够的。

London<sup>[7]</sup>从理论上分析了爆炸型薄膜等离子体的X射线激光的光束特性,但没有详细的实验数据。我们获得了烧蚀型靶的X射线激光传输特性的实验数据,详细的理论分析正在进行之中,结果将另文报道。

本工作是我所与上海高功率激光联合实验室进行的“类氪锆的X射线激光研究”实验工作的一部分。在工作中,得到了陈能宽教授和于敏教授的指导。陶祖聪研究员组织了本工作的实施。林尊琪副研究员进行了现场指导。

本工作于1989年7月完成。

- [1] M.D. Sosen *et al.*, *Phys. Rev.*, **54** (1985), 106.
- [2] T.N. Lee, E.A. McLean and R.C. Elton, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 1185.
- [3] T. N. Lee, E. A. McLean and R. C. Elton, Recent XRL gain Measurements in Ne-like Ge and Cu Ions, AIP Conf. Proc. (USA), no. 168(1988), p. 125-34.
- [4] 何绍堂、沈华忠、何安,用 Henke 光源标定 Kodak SWR 底片的响应,“强激光与粒子束”待发表。
- [5] 张覃鑫,类氪锆及类氪铜的X射线激光增益系数,X射线激光专题学术交流会资料,上海,9月,(1989).
- [6] D.L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 110; M. Luis-Jacquet *et al.*, *Bull. Phys. Soc. Am.*, **32** (1987), 1939.
- [7] R.A. London, *Phys. Fluid*, **31** (1988), 184.

## X-RAY LASER GAIN MEASUREMENTS AND BEAM OPTICS DIAGNOSTICS IN Ne-LIKE Ge

HE SHAO-TANG   HE AN   CHUNYU SHUTAI   SHEN HUA-ZHONG

*Southwest Institute of Nuclear and Chemistry, Chengdu, 610003*

(Received 21 May 1990)

### ABSTRACT

The X-ray laser investigations in Ne-Like Ge were carried out using Shengguang ( $10^{12}$ W) laser facility. An 1 m packaged grazing incidence grating spectrograph was positioned to view the plasma axially. The gain coefficients and the beam patterns were obtained from lasing line spectra. The measured gain coefficients of 19.638, 23.224, 23.627, 24.743 and 28.643 nm lasing lines were 3.06, 3.99, 3.72, 2.36 and  $4.59 \text{ cm}^{-1}$  respectively, the divergence angles of X-ray laser beams were about 12 mrad, the angles of X-ray laser beams from the axis of the line focus plasma were about 5.7 mrad.

**PACC:** 4255V; 4220; 3320R