

互组合线共振光激发 NaXI 离子的粒子数反转研究

张正泉 卢仁祥 殷光裕

(中国科学院上海光机所)

提要: 利用高功率钹玻璃激光辐照表面涂铝的氯化钠复合平面靶形成高度电离的等离子体, 观察到了由类氦 AlXII 离子互组合线共振光激发泵浦产生的类氢 NaXI 离子相应于软 X 射线波段($\lambda_{54}=33.4\text{ nm}$)的粒子数反转。 $g_4N_5/g_5N_4=7.5$ 。

Soft X-ray population inversion of Na XI levels by inter-combination line resonant photoexcitation

Zhang Zhengquan, Lu Renxiang, Yin Guangyu

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

Abstract: In plasmas produced by high power glass laser irradiation of NaCl flat targets coated with aluminium, $g_4N_5/g_5N_4=7.5$. Population inversion of the $n=5-4$ transition of hydrogen-like NaXI ions corresponding to $\lambda_{54}=33.4\text{ nm}$ in the soft X-ray region has been achieved using intercombination line of helium-like AlXII ions as pumping source.

引言

为了产生 X 射线波段的激光, 正在探索各种有效的途径^[1,2]。共振光激发是有希望的重要泵浦机制之一。共振光激发的概念首先由 Vinogradov 等人提出, 他们建议利用接近共振的谱线对来进行有选择性的光激发, 并列出了若干可能的组合体系, 比较有名的如 Na-Ne 线对和 Si-Al 线对^[3]。后来 Bhagavatula 进行了实验研究, 观察到了 O-Mg 组合体系的类氢 Mg XII 离子的粒子数反转现象^[4]。有关共振光激发线对组合选择

的激光等离子体 X 射线精细光谱的分析研究还在深入进行中^[5,6]。

考虑到目前我们的泵浦源高功率钹玻璃激光的输出功率水平尚不够高, 以及靶制作方面的技术限制, 我们提出用低 Z 元素构成的 Al-Na 组合体系来进行实验研究, 结果观察到了由互组合线共振光激发产生的对应于软 X 射线波段跃迁的 NaXI 离子的粒子数反转。

原理和实验条件

Al-Na 系统互组合线共振光激发的原

收稿日期: 1986 年 8 月 16 日。

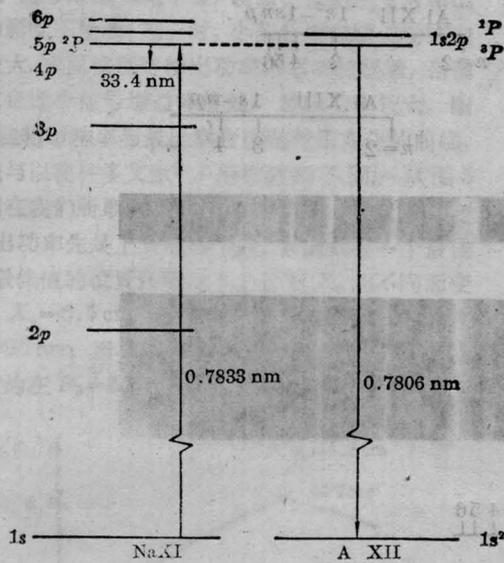


图1 Al-Na 互组合线共振光激发系统原理示意图

理如图1所示,以类氦AlXII离子和类氢NaXI离子分别作为激发源离子和激光工作离子;AlXII离子互组合线 $1s^2S_0-1s2p^3P_1$ 波长为0.7806 nm,NaXI离子 $1s^2S-5p^2P$ 线波长为0.7833 nm,实验表明这两条谱线有部分重叠。由于粒子数反转在高电子密度区会熄灭,而在较稀薄的等离子体中(如电子密度 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的铝等离子体)互组合线的强度并不比主共振线小很多,因而考虑用互组合线作为泵浦源是可取的。设激光工作离子基态能级及被泵浦能级的集居数密度分别为 N_1 及 N_5 ,则 $N_5=N_1P/D_5^{[5]}$,其中 D_5 为能级5的总去集居速率, $D_5=2A_{51}$;P为泵浦速率, $P=N_p\sigma_p c$, N_p 为激光介质中的泵浦光子密度, σ_p 为共振激发截面。利用互组合线共振光激发,将NaXI离子从1s泵浦到5p能级,可能在 $n=5-4$ 能级之间(相应跃迁波长33.4 nm)产生粒子数反转。

实验是在上海光学精密机械研究所的六路钕玻璃大功率激光装置上,利用一路激光输出光束进行的。脉宽 $\sim 600 \text{ ps}$,能量 $\sim 7 \text{ J}$ 的 $1.06 \mu\text{m}$ 波长激光,经相对孔径 $F/2$ 焦距120 mm的非球面透镜聚焦在平面复合靶

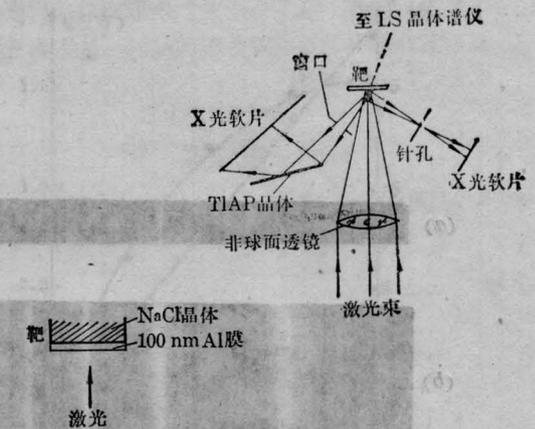


图2 实验光路布置示意图

上,靶面平均功率密度 $\sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$,激光束光轴大致垂直于靶面,实验装置的布局如图2所示。摄谱采用TIAP平晶谱仪(波段0.45~1.5 nm)和LS(硬脂酸铅)平晶谱仪(波段5.5~9.1 nm),观察方向互成直角,且与激光光轴垂直,记录采用上海感光胶片厂医用5F X光胶片。实验所用的晶体和X光胶片的性能均事先作了检测。靶为复合平面靶,即在NaCl晶体表面上镀以铝膜,最佳膜厚 $\sim 100 \text{ nm}$ 。复合靶铝膜的最佳厚度是经过多次实验选择决定的:铝层太厚,TIAP晶体谱仪拍摄的将主要是铝的高阶电离X射线光谱;而铝层太薄,则钠的X射线光谱又占主要成份。另外,激光脉冲的宽度在实验中也从250 ps延长到了600 ps,目的是使激光等离子体能充分膨胀到粒子数反转的电子密度允许区域。

实验结果及分析

图3中给出了用TIAP平晶谱仪摄得的时间空间积分的氯化钠涂铝靶激光等离子体的X射线光谱,注意到钠和铝的高阶电离离子的X射线光谱同时出现,表明已具备了Al-Na共振光激发泵浦的必要条件。其中图3(b)是在氯化钠表面铝膜厚度 $\sim 100 \text{ nm}$ 情况下得到的;作为比较,图3(a)是在靶表面

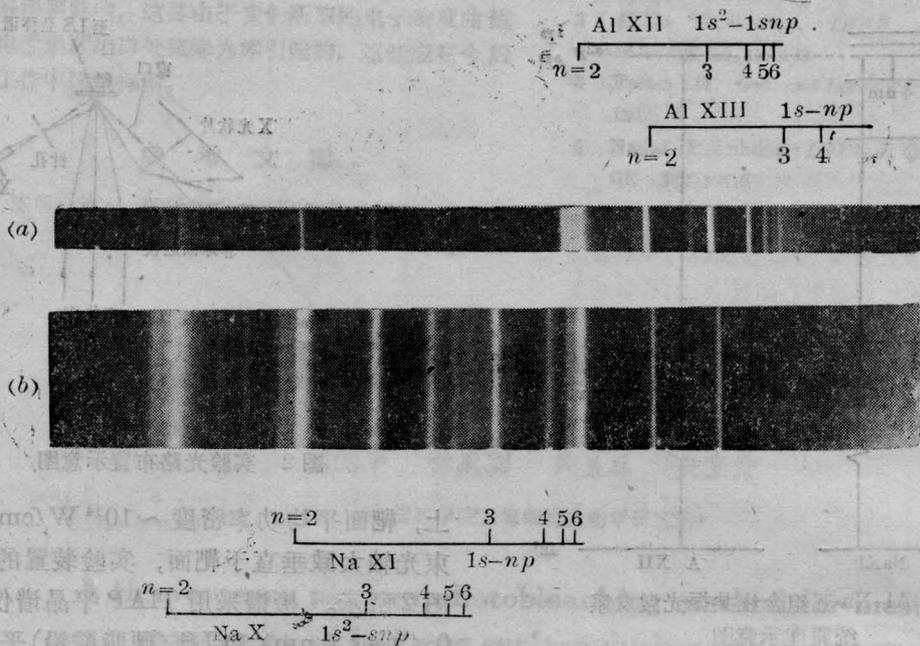


图3 用TIAP晶体谱仪摄得的NaCl镀Al复合靶激光等离子体X射线发射谱
(a) Al膜层厚度 ~ 100 nm; (b) Al膜层厚度 ~ 1 μ m

铝膜厚度 ~ 1 μ m情况下得到的,这时钠的谱线相当微弱,铝的谱线则很强。

实验得到的光谱软片在Carl Zeiss K201显微密度计上进行扫描,然后将Al XII $1s^2-1s2p$ 线及其邻近的谱线根据定标特性曲线还原成强度分布,并进行解叠(参见图4,图中所示为透过率扫描曲线)。在0.7833 nm波长位置处,存在铝的类氢离子的其它弱伴线,如s, t以及q, r, a, b线的可能贡献。它们贡献的大小估计不到j, k线强度的30%^[7],在解叠求 $1s\sim 5p$ 线的强度时作适当的扣除。事实上,在纯铝靶的情况下,类氢Al XII离子的互组合线与j, k伴线之间的界限是相当清爽的。从图中可以看出Al XII互组合线与Na XI $1s\sim 5p$ 线确有交叠,而 $1s\sim 5p$ 线虽只表现为一个“肩膀”,但其强度明显大于 $1s\sim 4p$ 线;在计及窗口薄膜的吸收后,有 $I_5/I_4=3.9$ 。由于前者的谱线振子强度明显小于后者,类似于文献[8]的推理,得到 $N_5 > N_4$,产生了粒子数反转的结论。

作为补充,图5给出了在类似实验条件

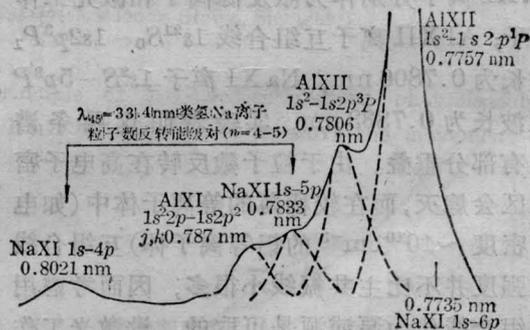


图4 显示类氢Na XI离子粒子数反转的Al-Na激光等离子体X射线光谱透过率扫描曲线,LS平晶谱仪摄得的软X射线光谱的黑度扫描曲线,从中可见钠的类氢离子的巴尔麦线系 $n=7\sim 2, 6\sim 2, 5\sim 2, 4\sim 2$ 跃迁的二级光谱。一般来说,在真空紫外、软X射线波段采用掠入射光栅谱仪摄谱,因为在波长大于2.5 nm光谱段目前尚缺乏合适的优质衍射晶体。本文实验中首次尝试用LS(硬脂酸铅)晶体拍摄激光等离子体的X软射线光谱,尽管LS皂膜晶体的晶体加宽较严重,但其衍射强度比掠入射光栅大,在一发激光实验内可以摄下分析所需要的光谱。不足的

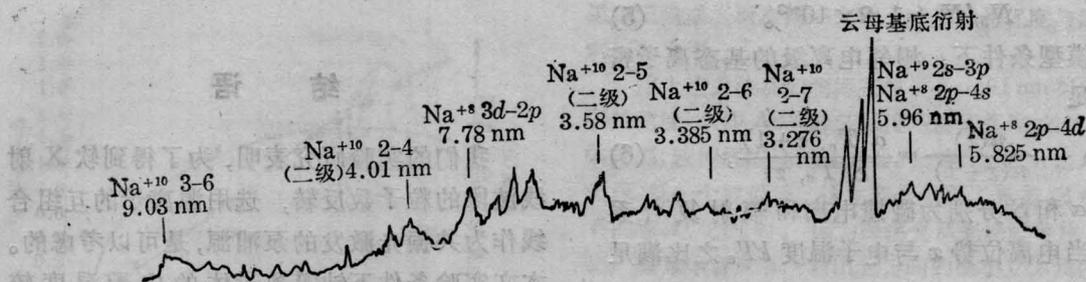


图5 用LS(硬脂酸铅)晶体谱仪摄得的NaCl镀Al复合靶激光等离子射线发射谱的黑密度扫描曲线

是,由于LS晶体在色散方向上的衍射均匀性尚不够好,图5中的衍射强度分布不能完全表示实际的情况。

已经验证,本文实验条件下激光等离子体在时空平均意义上满足冕模型的判据条件。在冕模型下按照通常的计算方法,用NaX离子的共振线与j、k伴线的强度之比求出电子温度 $T_e=513\text{ eV}$,用其互组合线与共振线强度之比求出钠等离子体电子密度 $n_e=1.4\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 。从Al XIII及Al XII离子两共振线强度之比,求出铝等离子体电子温度 $T_e=480\text{ eV}$,从Al XII离子的互组合线与共振线强度之比0.56,求出电子密度 $n_e=1.5\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 。由此亦可见,在较稀薄的等离子体中,互组合线与共振线相比亦有相当高的强度。此处从钠与铝的等离子体光谱求出的电子密度有数量级的差别是不奇怪的。约100 nm厚的铝膜先形成等离子体,由于激光脉宽长达600 ps,在时空平均意义上来说铝等离子体将膨胀得足够稀薄,而钠的等离子体是在激光后期产生的,相对来说还保持得比较稠密。

由上述获得的等离子体参数不难估计出Na XI的 $1s^2S\sim 4p^2P$ 和 $1s^2S\sim 5p^2P$ 谱线满足光学薄近似。与文献[8]相同,谱线强度

$$I_{nm}=1.32\times 10^{-16}\frac{g_n f_{nm}}{g_m \lambda^3} N_n \Delta V. \quad (1)$$

代入 $f_{41}=0.024$, $f_{51}=0.0139$,以及在j未定情况下 $g=(2l+1)(2s+1)$ 得到 $g_4=g_5=6$, $g_1=2$,从实验得到的强度比值,不难求出,

$$g_4 N_5 / g_5 N_4 = 7.5. \quad (2)$$

考虑到激光等离子体X射线发光区近似于一高为 $170\text{ }\mu\text{m}$,弦长为 $190\text{ }\mu\text{m}$ 的球台, $\Delta V=5\times 10^{-6}\text{ cm}^3$ 。底片上单位长度上的曝光量 $\int H dl$ 由实验确定,

$$\int H dl = I_{nm} \frac{R \Delta t T}{4\pi f^2} \frac{\sin^2(\alpha+\theta)}{\text{tg } \theta}, \quad (3)$$

这里, $R=2.5\times 10^{-4}$ (TAP晶体对波长 0.8021 nm X射线的积分衍射效率), T 为暗盒窗口透过率, α 为平晶谱仪中底片与晶体平面的交角, θ 为一定波长的X射线的布喇格衍射角, f 为激光等离子体点辐射源到底片平面的距离,假定激光等离子体的发光时间为激光脉宽的1.5倍^[9],即 $\Delta t=1.5\Delta t_{\text{激光}}$ 。由(1)、(3)式容易求出

$$N_4=6.6\times 10^{12}\text{ cm}^{-3}, N_5=5.0\times 10^{13}\text{ cm}^{-3} \quad (4)$$

下面进一步验证共振光激发在数量级上的正确性。按前面所述的公式

$$N_5=N_1 N_\nu \sigma_\nu c / D_5,$$

Al XII $1s^2S_0\sim 1s2p^3P_1$ 线辐射的实验光子密度

$$N_\nu=1.81\times 10^{17}\text{ cm}^{-3},$$

$$A_{51}=0.667 \frac{f_{51} g_1}{\lambda^2 g_5},$$

$$\sigma_\nu = \frac{\lambda r_0 C f_{51}}{4\gamma},$$

r_0 为经典电子半径;对于 $\lambda=0.7833\text{ nm}$ 谱线, $\Delta\lambda=34\text{ m}\text{\AA}$, $\Delta\nu=1.64\times 10^{15}\text{ s}^{-1}$ 。不难求出,

$$N_5/N_1 = 1.2 \times 10^{-3}. \quad (5)$$

在冕模型条件下, 相邻电离级的基态离子密度满足

$$\frac{n(z)}{n(z+1)} = \frac{\alpha(T_e, z+1)}{S(T_e, z)}, \quad (6)$$

其中 α 和 S 分别为碰撞电离和辐射复合系数。当电离位势 x 与电子温度 kT_e 之比满足

$1 < \frac{x}{kT_e} < 10$ 时, 有

$$\frac{n(z)}{n(z+1)} = 7.87 \times 10^{-9} x^2 \left(\frac{x}{kT_e} \right)^{3/4} \times \exp\left(\frac{x}{kT_e}\right), \quad (7)$$

其中 x 以 eV 为单位。钠的类锂、类氦和类氢离子的电离位势分别为 300、1465.1 和 1648.7 eV, 记 n_{Li} 、 n_{He} 和 n_H 为对应下标的离子的密度, n_i 为全电离离子密度, 令 $T_e = 513$ eV, $n_e = 1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 不难求出

$$\frac{n_{Li}}{n_{He}} \ll 1, \quad \frac{n_{He}}{n_H} = 0.645, \quad \frac{n_H}{n_i} = 1.28 \quad (8)$$

因为 $11n_i + 10n_H + 9n_{He} + 8n_{Li} \approx n_e$, 可求得 $n_H = N_1 = 4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。再由式(5)的结果, 得到理论上钠的类氢离子泵浦到 $n=5$ 能级的集居数密度 $(N_5)_{理} = 5.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 此值比实验中求出的 N_5 值(见式(4))约高两个数量级。

理论预计值偏大是合乎情理的。因为第一, 激光等离子体中谱线的物理加宽既有均匀加宽, 又有非均匀加宽, 共振光激发可通过均匀加宽的吸收传播到整个线性轮廓, 非均匀加宽仅在谱线线形上产生局部的凹陷, 即所谓“烧孔”效应。第二, 源离子与工作离子之间的光共振在时间空间上, 特别是时间上耦合得不好。由于铝膜是镀在 NaCl 表面, 在时间上铝的 X 射线发射时间要比类氢钠离子的形成超前。如果设法改善源离子与工作离子之间光共振在时间上的耦合, 提高粒子数反转度尚有很大潜力可挖。例如用离子束注入的方法将铝离子渗入到 NaCl 晶体中制成复合靶, 可能会有更好的效果。

结 语

我们的实验研究表明, 为了得到软 X 射线波段的粒子数反转, 选用源离子的互组合线作为共振光激发的泵浦源, 是可以考虑的。本文实验条件下钠等离子体的电子温度较高, $T_e = 513$ eV, 不利于三体碰撞复合泵浦机制发挥作用, 粒子数反转现象的获得, 显示了共振光激发泵浦机制的重要作用。

本文的工作是在上海光机所六路大功率玻璃激光实验装置上进行的, 得到该实验室林尊琪、毕无忌等同志的大力帮助; 王之江、邓锡铭、王润文、徐至展等同志指导和关心了本实验工作; 天津大学许美健同志参与了数据处理工作, 参加实验工作的还有徐建明、廖群峰同志; 实验中所用的 LS 晶体是由福建物构所的苏根博、黄躬泛同志提供的; 毛楚生、田莉亦提供了有效的帮助, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- Waynant R W, Elton R C. *Proc. IEEE*, 1976; **64**(7): 1059
- Hagelstein P L. Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, CA, UCRL Report No. 53100, Jan. 1981
- Vinogradov AV et al. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1975; **5**(1): 59
- Bhagavatula V A. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980; **QE-16**(3): 603
- Dixon R H, Elton R C. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1984; **1**(2): 232
- Burkhalter P G et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985; **2**(12): 1984
- Vainshtein L A, Safronova U. *Atom. Data & Nucl. Data Tables*, 1978; **21**(1): 49
- 卢仁祥, 毛楚生. 中国科学, A 辑, 1984; No. 6: 573
- Key M H. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1980; **A298**: 351