

类锂硅离子软 X 射线激光: 能级结构、辐射跃迁波长和速率

朱顺人 潘守甫 杨玉芬

(吉林大学原子与分子物理研究所, 130023)

提要: 根据“类锂硅离子软 X 射线激光实验研究”一文^[1], 本文从理论上考察了该激光的主要光谱性质。并且猜想了该激光器的最可几泵浦机制。

关键词: 软 X 射线激光, 类锂硅离子光谱

Li-like Si soft-X-ray laser: level structure, wavelengths and rates of the radiative transitions

Zhu Qiren, Pan Shoufu, Yang Yufen

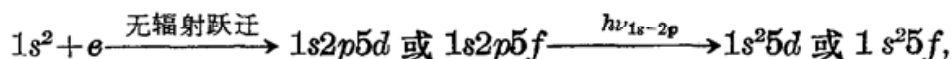
(Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Changchun)

Abstract: The main spectral properties of Li-like Si soft-X-ray laser are examined theoretically based on the relevant experimental study (Xu Zhizhan et al., Chinese Journal of Lasers, 16 (10), 616(1989)) and the most probable pumping mechanism for this laser is suggested.

Key words: soft-X-ray laser, Li-like Si spectra

一、引言

最近, 上海光机所徐至展等人以低于世界上类似实验一个数量级以上的驱动激光功率密度($2 \times 10^{12} \text{W/cm}^2$), 在很轻的类锂硅离子上, 实现了波长分别为 8.89 和 8.73 nm (增益分别为 1.5 和 1.4cm^{-1}) 的软 X 射线激光^[1]。这一实验, 大大开拓了人们的眼界。类锂离子的电离阈比其近邻离化阶的类氦离子的电离阈小得多, 所以它不大可能是该等离子体内的主要组分。迄今, 对软 X 射线激光介质的研究, 大多集中在基态为闭合壳层的离子上^[2, 3]。实际上, 在徐至展等人的实验中, 我们仍然可以假设, 类氦离子基态 $1s^2$ 有最大布居丰度; 但是, 注意到该态上面约 1.78 keV 处存在着类锂离子自电离态 $1s2p5d$ 或 $1s2p5f$, 在适宜的等离子体条件下, 就可以设想经由双电子复合过程:



以相当可观的速率布居 $1s^25d$ 或 $1s^25f$ 激光上能级。我们设想, 这应当是该激光的最可几泵浦

机制。对上述过程的理论计算我们将在另文中讨论。本文只想首先弄清类锂硅离子激光的光谱性质:能级结构、辐射跃迁波长和速率。

二、光谱性质的理论计算

本文的光谱计算,是运行多组态 Dirac-Fock 程序包^[4],连同其横向 Breit 修正和量子电动力学修正程序^[5],以及我们最近自编的计算相对论辐射跃迁几率的后续程序^[6]完成的。

表 1 给出了该激光方案中直接涉及的能级值。表 2 给出了表 1 所列在主量子数 $n=5$ 到 3 和 $n=3$ 到 2 各能级间较强的(对应的 f 值大于 0.01)电偶极辐射波长(以 nm 为单位)和自发发射几率速率值(以 s^{-1} 为单位)。表中, Coulomb 列是在 Coulomb 规范下的计算值, length 是在长度规范下的计算值。表中,带 * 号者为上列海光机所徐至展等观测到的激光跃迁^[1]。

表 1 Si^{11+} 的能级(eV)

No.	能 级	能 量	No	能 级	能 量
1	2S	0	9	5S	442.90
2	2P _{1/2}	23.95	10	5P _{1/2}	444.27
3	2P _{3/2}	24.95	11	5P _{3/2}	444.33
4	3S	296.11	12	5D _{3/2}	444.83
5	3P _{1/2}	302.70	13	5D _{5/2}	444.85
6	3P _{3/2}	303.00	14	5F _{5/2}	444.88
7	3D _{3/2}	305.36	15	5F _{7/2}	444.89
8	3D _{5/2}	305.45			

表 2 电偶极辐射波长(单位 nm)和跃迁几率(单位: s^{-1})

编 号	跃 迁	波 长(nm)	跃迁几率(s^{-1})	
			Coulomb($\times 10^{11}$)	length($\times 10^{11}$)
1	2S-3P _{3/2}	4.092	4.40	4.45
2	2S-3P _{1/2}	4.096	4.44	4.50
3	2P _{1/2} -3P _{3/2}	4.406	11.5	11.5
4	2P _{3/2} -3D _{5/2}	4.420	13.8	13.8
5	2P _{3/2} -3D _{3/2}	4.422	2.29	2.30
6	2P _{1/2} -3S	4.555	0.680	0.663
7	2P _{3/2} -3S	4.572	1.38	1.35
8	3S-5P _{3/2}	8.365	0.314	0.316
9	3S-5P _{1/2}	8.368	0.317	0.319
10*	3P _{1/2} -5D _{3/2}	8.723	0.594	0.595
11*	3P _{3/2} -5D _{5/2}	8.740	0.711	0.712
12*	3P _{3/2} -5D _{3/2}	8.742	0.119	0.119
13	3P _{1/2} -5S	8.843	0.088	0.087
14	3P _{3/2} -5S	8.862	0.178	0.176
15*	3D _{3/2} -5F _{5/2}	8.886	0.883	0.883
16*	3D _{5/2} -5F _{7/2}	8.892	0.944	0.944

由表 1 可知, $3P_{1/2}$ 和 $3P_{3/2}$ 的能差为 0.3 eV ; 而 $5dD_{3/2}$ 和 $5D_{5/2}$ 的能差仅为 0.02 eV , 因而可以将它忽略。这样, 我们可以得到表 2 的第 10、11、12 号跃迁的加权平均波长:

$$\bar{\lambda}_{pd} = \frac{8.723 \times 2 + 8.741 \times 4}{6} = 8.735 (\text{nm}),$$

同理, 可得表 2 第 15、16 号跃迁的加权平均波长

$$\bar{\lambda}_{df} = \frac{8.886 \times 4 + 8.892 \times 6}{10} = 8.890 (\text{nm}).$$

上述两个激光波长与徐至展等的实验值完全符合。另外, 由表 2 可知, 我们在两种规范下的跃迁几率计算值差最大时发生在第 6 号跃迁, $2P_{1/2} \sim 3S$, 其相对值差仅为 2.5% , 这突出表明, 本文的光谱计算是相当准确的。

三、讨 论

首先, 我们就所观测到的激光波长作简短讨论。注意到, 在表 2 所列前 7 个跃迁中, 以 $3S$ 为上能级的第 6、7 号跃迁速率明显地小, 对激光形成所需的在 $n=3$ 和 $n=5$ 能级间布居的粒子数反转最为不利。这样, 可以定性地解释 8.37 nm 激光没有出现的原因。至于 8.85 nm 激光没有出现, 则主要应归咎于 $3P-5S$ 跃迁(第 13、14 号跃迁)速率过小。

其次, 关于这一激光的泵浦机制: 如果真象我们在引言中设想的那样, 双电子复合是主泵浦过程, 那末, 在实验上应能测到相应的 $1S-2P$ 跃迁荧光。我们对 $1s^2 5d_{5/2} - [(1s2p_{3/2})_1 5d_{5/2}]_{5/2}$ 跃迁的试算结果是, 波长为 0.6663 nm , 速率为 $2.5 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 。它作为相应的类氦离子共振线 $1s^2-1s2p$ (波长为 0.6647 nm) 的卫线, 可以成为上述过程消长规律的特征标。

参 考 文 献

- 1 徐至展 *et al.*, 中国激光, **16**(10), 616(1989)
- 2 D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 110(1985)
- 3 S. Maxon *et al.*, *Phys. Rev.*, **A37**, 2227(1988)
- 4 I. P. Grant *et al.*, *Comput. Phys. Commun.*, **21**, 207(1980)
- 5 B.J. McKenzie *et al.*, *Comput. Phys. Commun.*, **21**, 233(1980)
- 6 朱頔人, 潘守甫, 计算物理, 待发表