

金属蒸气激光 G 判据的进一步验证*

姚志欣 金毅 潘佰良 陈钢 陈坤

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2001 年 12 月 22 日收到 2002 年 1 月 16 日收到修改稿)

将先前提出的放电激励金属蒸气自终止类型激光器高效运转的补充判据(G 判据)从应用于中性原子激光介质推广至一价离子激光介质,取得了圆满的成功.对已知的 17 条一价金属离子自终止激光谱线进行鉴别,其中 16 条均符合 G 判据,1 条不符合 G 判据的特例也给出了合理解释.进而对业已提出的 212 条可能的一价金属离子自终止激光谱线进行筛选,认为其中仅有 69 条符合 G 判据值得深入探索.

关键词:金属蒸气激光, G 判据

PACC: 4255H

1. 引言

以铜蒸气激光器为代表的放电激励金属蒸气自终止类型激光的本质特点在于相关的能级结构中激光上能级相对于基态是共振(resonance)态,激光下能级相对于基态是亚稳(metastable)态.因此在玻恩(Born)近似得以成立的放电激励条件下,激光上能级相对于激光下能级将得到优势的激励,以此造成粒子数反转并获得激光.另一方面,由于激光下能级是亚稳态,所以激光跃迁本身将造成其上的粒子数堆积,激光最终必将自动终止,因此习惯上称作自终止(self-terminating)跃迁激光器.

早在 1966 年, Walter 等就在其平均功率仅 20mW 的铜蒸气激光器实验基础上明确指出,这类激光器有可能实现高功率、高效率运转,并认为铜蒸气激光器将是其中最好的选择^[1]. 以后的进展充分证明了他们的远见卓识,发射 511/578nm 波长激光的铜蒸气激光器已经成为可见波段中功率最大、效率最高的激光器件,发挥着越来越大的作用.文献[1]还对实现高效脉冲放电金属蒸气激光器有效运转归纳出 5 条判据,第 1 条就是激光上能级相对于基态是共振态,第 2 条则是激光下能级相对于基态是亚稳态,其余几条与能级位置和电子在能级之间

跃迁速率的要求有关.当时他们据此对 15 种元素预言了 24 条可能的激光谱线,一直被视为探索该类激光新谱线的指南.时至今日,围绕这 24 条可能的激光谱线的研究工作,仍然不断在深化^[2,3].迄今为止,已有 9 条得到证实,但是还有 15 条始终未能实现激光振荡.

我们也持续不断地进行着探索,但大量的实验均以失败告终.通过对实验结果的深入分析,特别是经由计算机模拟激光过程揭示出来的微观物理量内在关联的启迪,1985 年,我们在 Walter 5 条判据的基础上提出了自终止类型金属蒸气激光器高效运转的一个补充判据——G 判据:激光上下能级简并度的比值应该小于 $(g_3/g_2 < 1)^{4[1]}$.

不等式中的 g_3 和 g_2 分别是激光上、下能级的统计权重.

用 G 判据作为补充对 Walter 等预言的 24 条可能的激光谱线重新审核表明:当时已经实现激光的 9 条谱线全都符合 G 判据;不满足 G 判据的 11 条谱线全都没有获得激光,剩下 4 条符合 G 判据而尚未得到激光的谱线中,有 3 条属于紫外波段,在这个波段产生激光是比较困难的,还有 1 条 583nm 镉谱线虽然属于可见光,但它的正常运转要求 3400℃ 高温而难以进行必要的实验^[4]. 以此对当时所有的实验结果做出了圆满地解释.

* 国家自然科学基金(批准号:19974037,10004008)资助的课题.

Walter 等预言的 24 条可能的激光谱线中有 20 条是原子谱线,只有 4 条是离子谱线,随着研究的不断深入,人们大量地开展离子类的金属蒸气自终止型激光的探索和研究.除了具备放电激励自终止型激光必须满足的工作物质能级结构的基本要求,即激光上能级为共振态,激光下能级为亚稳态之外,离子类自终止型激光较之原子类自终止型激光的显著特征之一是工作物质的电离阶数越高,其相应离子的能级间距越大,对应的激光波长更趋向短波长方向,所以人们据此提出了利用高阶金属离子之间的跃迁实现真空紫外乃至 x 射线激光的设想^[5].特征之二是能了解到的离子能级数据,诸如电子碰撞激发截面以及自发跃迁速率等较之原子能级的相应数据要少得多,因此 Walter 5 条判据的后 3 条往往无所依据,而 G 判据却不受此限制,在此情况下仍然能发挥功效.

2. G 判据在已知金属离子自终止激光中的再度验证

1993 年 Markova 等全面详尽地分析了一价金属离子的自终止类型激光,他们称作 R-M(共振-亚稳)跃迁激光.根据 Walter 的 5 条判据,对元素周期表上 8 类 30 种元素罗列出 212 条他们认为可能的一价金

属离子自终止激光谱线值得重点探索,有待实验证实^[6].该文强调指出,由于所考虑离子的激发截面、跃迁速率、能级寿命等相关数据远不如原子的齐全,罗列出来的谱线必定超出了 Walter 5 条判据的限制,有必要进行筛选.另外,在稀土元素中还有一些他们认为有希望实现的一价金属离子自终止激光谱线没有在文中列出.

实际得到的一价金属离子自终止激光谱线确实要比上面的预期少得多,1998 年 Sem 等对脉冲金属蒸气离子激光器作了全面的分析,列出了所有已知的三大类一价金属离子激光谱线,其中自终止类型激光谱线总共不过 7 种元素 17 条激光^[7].而且仅有 4 种元素 7 条激光谱线在上述 30 种元素的 212 条谱线之中;另有 9 条激光谱线则分属 2 种稀土元素,估计也在上述可能的考虑之中,虽然在文献 6 中并没有列出;惟有 1 条铅离子波长 1159nm 的激光很特别,在上述 30 种元素中虽然考虑了铅离子,还列出了他们认为可能的 4 条铅离子激光谱线,但并不包含 1159nm 谱线.

我们用 G 判据对这 17 条已知的一价金属离子自终止激光进行鉴别,结果同样令人振奋,表 1 显示其中 16 条激光都符合或基本符合($g_3/g_2 = 1$)G 判据,惟一明显不符合 G 判据的恰恰是铅离子 1159nm 激光,下面我们将给出合理的解释.

表 1 一价金属离子自终止激光列表

| 编号 | 元素 | 基态 | 激光波长/nm | 跃迁组态 | g_3/g_2 |
|----|------|------------------------------|---------|---|-----------|
| 1 | CaII | $4s \cdot ^2S_{1/2}$ | 854.2 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$ | 0.66 |
| 2 | CaII | $4s \cdot ^2S_{1/2}$ | 866.2 | $^2P_{1/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$ | 0.50 |
| 3 | SrII | $5s \cdot ^2S_{1/2}$ | 1032.7 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$ | 0.66 |
| 4 | SrII | $5s \cdot ^2S_{1/2}$ | 1091.4 | $^2P_{1/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$ | 0.50 |
| 5 | BaII | $6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 614.2 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$ | 0.66 |
| 6 | BaII | $6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 649.7 | $^2P_{1/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$ | 0.50 |
| 7 | HgII | $6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 398.4 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$ | 0.66 |
| 8 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_0^0$ | 664.5 | $z^9 P_5 \rightarrow a^9 D_0^0$ | 0.84 |
| 9 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_0^0$ | 989.8 | $z^7 P_3 \rightarrow a^7 D_4^0$ | 0.77 |
| 10 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_4^0$ | 1361.1 | $z^9 P_4 \rightarrow a^7 D_5^0$ | 0.81 |
| 11 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_0^0$ | 1477.0 | $z^9 P_3 \rightarrow a^7 D_4^0$ | 0.77 |
| 12 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_4^0$ | 1001.9 | $z^7 P_4 \rightarrow a^7 D_5^0$ | 0.81 |
| 13 | EuII | $4f^7 6s \cdot a^9 S_4^0$ | 1016.8 | $z^7 P_4 \rightarrow a^7 D_4^0$ | 1.00 |
| 14 | YbII | $4f^{14} 6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 1345.3 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$ | 1.00 |
| 15 | YbII | $4f^{14} 6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 1649.8 | $^2P_{3/2}^0 \rightarrow ^2D_{5/2}$ | 0.66 |
| 16 | YbII | $4f^{14} 6s \cdot ^2S_{1/2}$ | 2437.4 | $^2P_{1/2}^0 \rightarrow ^2D_{3/2}$ | 0.50 |
| 17 | PbII | $6p \cdot ^2P_{1/2}^0$ | 1159 | $6p^2 \cdot ^2D_{3/2} \rightarrow 7p \cdot ^2P_{1/2}^0$ | 2.00 |

注:一价金属离子自终止跃迁激光汇总及相应波长取自文献 7 的表 2.

铅离子的基态是 $6s^2 6p \cdot ^2 P_{1/2}^0$, 1159nm 激光的上能级 $6s 6p^2 \cdot ^2 D_{3/2}$ 相对于基态显然是共振态; 其下能级 $6s^2 7p \cdot ^2 P_{1/2}^0$ 的宇称与基态的宇称相同, 彼此之间的光学跃迁禁戒, 相对于基态当然是亚稳态, 因此从铅离子的能级结构分析, 1159nm 激光理应属于 R-M 跃迁。但从它的电子碰撞激励途径考虑, 它却不是通常意义下起始于铅离子基态的放电激励金属蒸气自终止跃迁激光。根据原始文献 [8] 的分析, 可以容易地从原子组态的表述看出, 1159nm 激光上能级 $6s 6p^2 \cdot ^2 D_{3/2}$ 与中性铅原子基态 $6s^2 6p^2 \cdot ^3 P_0$ 的差异仅仅在于 1 个 6s 电子被剥离, 在所有的铅离子激发态中, 这是惟一凭借单个电子的碰撞就可以从基态铅原子获得有效强激发的能级。相比之下, 其他激发态的单电子直接碰撞激发都要弱得多, 其中也包括 1159nm 激光下能级 $6s^2 7p \cdot ^2 P_{1/2}^0$ 在内, 不仅要剥离 1 个 6p 电子, 还要将 1 个 6p 电子激发到 7p 轨道上去。这一强一弱就造成了 $6s 6p^2 \cdot ^2 D_{3/2}$ 能级与 $6s^2 7p \cdot ^2 P_{1/2}^0$ 能级的粒子数反转, 形成 1159nm 激光。正是因为激励并非来自于 1 价铅离子基态 $6s^2 6p \cdot ^2 P_{1/2}^0$, 而是直接来自于中性铅原子基态 $6s^2 6p^2 \cdot ^3 P_0$, 所以它不是 Walter 考虑可以应用 Born 近似的那种放电激励 [1], 自然不为 Walter 的 5 条判据所规范, 因此也无须用 G 判据作补充。

3. 利用 G 判据对可能的金属离子自终止激光进行筛选

我们用 G 判据对 Markova 等提出的 212 条他们

认为可能的一价金属离子自终止激光谱线 [6] 进行筛选, 发现其中有 143 条不符合 G 判据, 超过总数的三分之二; 符合 G 判据的仅 69 条, 不到总数的三分之一。由此可以看出, 采用 G 判据将大大压缩工作量, 对进一步探索金属离子自终止型激光新谱线将是十分有利的。

另外, 还对 212 条可能的一价金属离子自终止激光谱线进行了波长校对, 发现其中 196 条均处于紫外波段, 其中相当一部分并进入了真空紫外波段, 应该预料到其实现激光振荡会遇到更多的困难。从表 1 可以得出显而易见的事实: 已经实现激光振荡的 17 条一价金属离子自终止激光谱线中, 包括最短波长汞离子的 398.4nm 谱线, 基本上都在可见或红外波段。

4. 结 论

对所有放电激励金属蒸气一价正离子自终止激光的鉴别表明, G 判据作为 Walter 5 条判据的补充, 如同对中性原子自终止激光一样是十分合理的, 完全必要的。用于探索放电激励金属蒸气自终止激光新谱线, 无论是原子谱线还是离子谱线, 效果都是十分明显的。

- [1] Walter W T et al 1966 *IEEE J. Quantum Electron.* 2 474
 [2] Pan B L et al 2001 *Acta Phys. Sin.* 50 1290 (in Chinese) 潘佰良等 2001 物理学报 50 1290
 [3] Chen G et al, 2001 *Acta Phys. Sin.* 50 1294 (in Chinese) 陈钢等 2001 物理学报 50 1294
 [4] Yao Z X et al 1987 *Kexue Tongbao*, 32 17

- [5] Ivanov I G et al 1996 *Metal vapour ion lasers* (New York: John Wiley & Sons) J. X
 [6] Markova S N et al 1993 *SPIE* 2110 165
 [7] Sem M I et al 1998 *SPIE* 3403 120
 [8] Szeto L H et al 1979 *IEEE J. Quantum Electron.* 15 1332

The further validation of G-criterion for metal vapor lasers^{*}

Yao Zhi-Xin Jin Yi Pan Bai-Liang Chen Gang Chen Kun

(*Department of Physics ,Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China*)

(Received 22 December 2001 ;revised manuscript received 16 January 2002)

Abstract

The G-criterion formerly used for self-terminating transition in pulsed discharge-excited metal vapor laser is successfully extended from neutral atomic laser media to single ionic laser media. Through examination of the well-known 17 self-terminating transition laser lines of single metallic ions ,we find all but one of these ionic lines are in accord with G-criterion and a reasonable explanation is given. It is found that only 69 single ionic lines meeting the G-criterion are worth further investigation through choosing the predicted 212 single ionic laser lines according to the G-criterion.

Keywords : metal vapor lasers , G-criterion

PACC : 4255H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19974037 ,10004008).