

## 研究快讯

# 碱土金属蒸气中两种不同机理的高重复率 脉冲激光交替振荡现象\*

方本民 姚志欣 潘佰良 陈 星 陈 钢

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2000 年 2 月 4 日收到, 2000 年 3 月 15 日收到修改稿)

通过在钙、锶金属蒸气中的高重复率脉冲放电, 发现钙离子和锶离子的自终止跃迁激光脉冲和碰撞辐射复合激光脉冲交替振荡的实验现象, 在分析了它们激励机理异同的基础上进行了初步的实验对比研究.

关键词: 激光脉冲, 交替振荡

PACC: 4255H

## 1 引 言

通常意义下的铜蒸气激光和锶离子复合激光虽然都属于高重复率脉冲放电激励的金属蒸气激光, 但各自代表的却是激励机理完全不同的激光系统.

在 Walter 等<sup>[1]</sup>首次报道铜蒸气激光中, 已经对铜蒸气激光器为代表的自终止跃迁(self-terminating transition)激光系统作过分析. 在玻恩近似得以成立的放电激励条件下, 基态原子经由电子直接碰撞激励至共振能级的概率优势于至亚稳能级, 以此造成上下能级粒子数反转并实现激光, 由于激光下能级与基态之间光学禁戒, 激光跃迁本身将造成激光下能级的粒子数堆积, 粒子数反转被破坏, 激光自动终止, 只有当此瓶颈阻塞消除之后, 激光才有可能再次实现, 所以该类自终止激光必须脉冲方式运转. 值得注意的是, 激光脉冲仅发生于电流脉冲的上升前沿期间, 要求电流上升速率(激发速率)快于激光上能级的自发衰变速率<sup>[2]</sup>.

锶离子复合激光是 Latush 等<sup>[3]</sup>首次报道的, 在他们随后的论文<sup>[4]</sup>分析中, 也曾对锶离子复合激光器为代表的碰撞辐射复合(collisional radiative recombination)激光系统作过阐述. 锶离子复合激光产生于一价锶离子能级间的电子跃迁, 其激光能级的激励并非来自于电子对一价离子基态的碰撞, 而是

二价离子基态与电子碰撞辐射复合成一价离子后重新布居的结果. 由于激光是在放电余辉期间的等离子体复合过程中产生的, 所以该类复合激光也必须脉冲方式运转. 同样值得注意的是, 激光脉冲发生于电流脉冲结束之后, 它对电流脉冲最主要的要求是后沿陡峭, 干净利落, 不发生二次振荡<sup>[5]</sup>.

饶有兴趣的是就自终止跃迁激光系统对能级结构的要求而言, 碱土金属一价离子与铜原子相当类似, Walter 当初就曾将一价钙离子与铜原子的能级结构作过类比, 不仅实现了一价钙离子的自终止激光, 而且预言可能获得一价锶离子波长为 1033 和 1091 nm 的红外自终止激光谱线<sup>[1]</sup>, 该预言在随后的实验中已经得到证实<sup>[6]</sup>.

既然碱土金属一价离子的能级结构同时具备复合激光和自终止激光机理, 对激励电流脉冲后沿和前沿各自不同的要求并没有内在的矛盾, 那么, 有可能在适当的条件下同时获得复合激光和自终止激光呢? 为此我们开展了系列实验, 取得了令人振奋的结果. 先前在钙蒸气的脉冲放电中, 不仅同时确认了钙离子的两种不同机理不同波长的激光振荡, 而且在示波器上同时显示出激励电流脉冲及其激励产生的两个激光脉冲<sup>[7]</sup>, 下面报道的是在锶蒸气的脉冲放电中得到的进一步证实. 仔细的分析表明, 虽然同时获得了两种不同机理不同波长的脉冲激光高重复率持续振荡, 但脉冲之间却有着明确的时间间隔,

\* 国家自然科学基金(批准号 69778009)资助的课题.

所以准确的提法应该是两种不同机理不同波长的脉冲激光同时高重复率交替振荡。

## 2 实验安排

实验装置类同文献[5],原先仅用于获取波长为 430.5 nm 紫色锶离子复合激光,采用缓冲气体缓慢流动的工作方式。

主要不同之处是选取 2:1 非对称 Blumlein 后沿修饰电路<sup>[8]</sup>,测量表明不仅电流脉冲后沿陡峭干净,而且电流脉冲前沿上升速率也很高,考虑到这两种不同机理脉冲激光的波长相距甚远,故设计了如图 1 所示的三镜复合激光谐振腔。其中镜 3 和镜 1 是一样的,且可以随意移开,目的是为了在比较镜(1 2 4)与镜(2 3 4)两种不同的三镜组合中反射镜前后次序的影响时,避免放电激励条件因较长时间光路调整可能发生的变化。镜 1 与镜 2,镜 2 与镜 3 的间距都是 8 cm,镜 3 与镜 4 的间距是 122 cm。镜 1 3 4 的曲率半径都是 5 m,镜 2 是平镜。所有镜片都是多层介质镀膜,对相关波长的透过率见表 1。

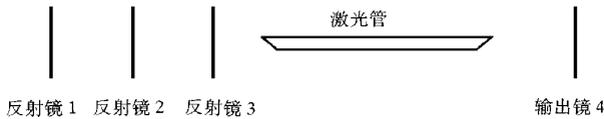


图 1 三镜复合谐振腔示意图

表 1 复合腔镜片对相关波长激光的透过率

波长 $\lambda$ /nm	透过率/%	全镜片编号
430.5	1060	
1	~0	85
2	90	~0
3	~0	85
4	30	83

电源电压为 4500 V,脉冲重复频率为 5.6 kHz,缓冲气体(氩气或氦气)压强约为 21 kPa,在前后的对比实验中维持不变,采取放电自加热和辅助外加热方式维持放电管内壁温度约为 600℃。

## 3 实验结果与讨论

按图 1 的实验布置,镜片 1 实际上不起作用,镜片 2 3 和 4 构成三镜复合腔,用宽谱平面强流光电二极管为光信号接收器, Pearson 410 脉冲电流转换

圈套在放电管阳极上接收电流信号,认为光脉冲在空气中的传播速度与电脉冲在传输线中的传播速度相当,用 Tektronix754C 示波器的两个通道将经过时间校正过的光信号和电信号同时显示在屏幕上如图 2 所示。图 2 中横坐标时间为 200 ns/格,纵坐标中脉冲电流为 20 A/格,光脉冲振幅没有定标。图 2 中 I 为电流脉冲波形,峰值高度约为 110 A,半高宽(FWHM)约为 120 ns;L1 为自终止激光脉冲波形,位于电流脉冲上升前沿,其半高宽约为 35 ns;L2 为复合激光脉冲波形,起始于反向电流峰值过后,其半高宽约为 380 ns。考虑到光、电信号的传输和接收器的响应延迟,时间误差为毫微秒量级。自终止激光脉冲 L1 和复合激光脉冲 L2 相对于电流脉冲 I 的位置和宽度均符合各自机理的特征表现,特别注意到复合激光脉冲的起始点被推迟到反向电流峰值过后,这是因为反向电流同样加热电子,对碰撞辐射复合不利,消除脉冲电流后沿的振荡对提高复合激光效率具有至关重要的作用<sup>[5,8]</sup>。

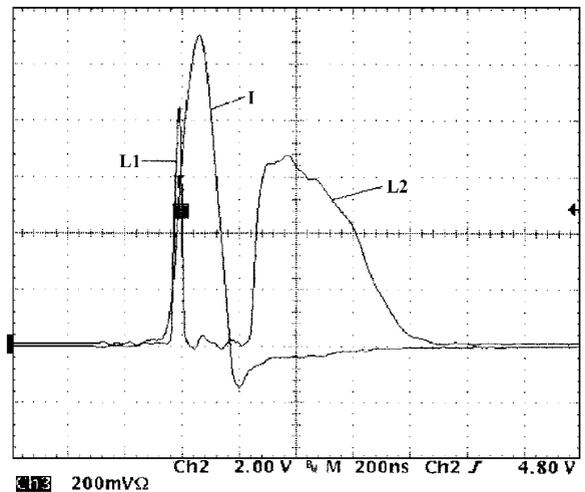


图 2 同时显示的电流脉冲 I、自终止激光脉冲 L1 和复合激光脉冲 L2 的波形

430.5 nm 紫色激光在实验中容易识别,而 1033 和 1091 nm 激光却在红外波段,为了作出明确的鉴别,我们先用红外上转换测试板(适用范围为 850—1500 nm)获得了边缘清晰的红色光斑,移动测试板证实其发散角很小,确认为激光,继而用市售的 YAG 全反介质膜镜片(中心波长为 1060 nm,带宽为  $\pm 45$  nm)遮挡,测试板上红色光斑完全消失,以此确定了激光波长的范围,实验中并没有对 1033 和 1091 nm 两种波长作出区分。

在脉冲重复频率为 5.6 kHz 情况下,脉冲间隔约为  $178 \mu\text{s}$ ,远远长于电脉冲或光脉冲本身的宽度,自终止激光脉冲 L1 和复合激光脉冲 L2 尽管相隔仅约 280 ns(按各自起始点估算),但在时间上的分辨却是明显的,原则上这两种激光彼此没有影响.自终止激光发生在电流脉冲前沿,这时电子激励的直接对象是上一次放电后残存下来的一价铯离子.因此,提高脉冲重复频率,缩短脉冲间隔,将有助于增大激励初始时刻的一价铯离子密度,从而提高激光效率.这在钙离子自终止激光的实验研究中已经得到证实<sup>[9]</sup>.一个值得探讨的问题是:为什么在复合激光进行期间和结束时刻,复合激光的下能级也就是自终止激光的上能级.虽然因为复合激光过程积累了大量的粒子,却并不能即刻获得自终止激光?我们初步的分析认为由复合激光造成激光下能级布居的时间度量,相当于复合激光脉冲半高宽,比起激励自终止激光要求的时间度量,亦即自终止激光脉冲的半高宽要高出一个数量级以上,显然不能借此产生自终止激光.何况,此时放电已经终止,系统处于碰撞辐射复合阶段,与激励自终止跃迁激光要求的玻恩近似放电条件相去甚远.

考察了 4 种情况下谐振腔镜片对激光功率的影响,改变复合腔中反射镜的次序并与单反射镜(用纸挡板遮挡后反射镜)比较,结果见表 2.

表 2 谐振腔结构对激光功率的影响

谐振腔镜片组合	②③+④	③+④	①②+④	②+④
激光功率 $P/\text{mW}$	58.0	51.2	36.3	13.0

实验结果表明,谐振腔结构对激光功率有较大的影响,前 3 种情况得到的均是自终止激光脉冲和复合激光脉冲同时交替振荡,第 4 种情况则仅为自终止脉冲激光.由于原装置的电子线路与各种参量均是为复合激光设计的,故不能认为第 1 种结构就是两种不同机理脉冲激光交替振荡的最佳谐振腔选择.

为了进一步考察运转参量的影响,将缓冲气体氦气换成氖气,所有其他参量均不变,在各种谐振腔条件下均得不到紫色的复合激光.调整参量,在 1:1 对称 Blumlein 线路电容器布置情况下<sup>[4]</sup>,在表 2 的

第 4 种情况下同时显示的电脉冲和光脉冲波形见图 3.图 3 中横坐标时间为 100 ns/格,纵坐标电流为 35 A/格,光脉冲振幅没有定标. I 仍为电流脉冲波形,其峰值高度约为 120 A,半高宽约为 110 ns,均与先前情况相仿,但反向电流明显增大且持续振荡,估计这是因为氖气的等效阻抗远小于氦气的等效阻抗,放电回路处于明显的负失配状态,在这种情况下,电子被不断地再次加热,不可能快速冷却,所以碰撞辐射复合激光不能实现. L 为自终止激光脉冲波形,位于电流脉冲上升前沿,其半高宽仍约为 35 ns,相对于电流脉冲 I 的位置和宽度完全类同于图 2 中 L1 的行为.

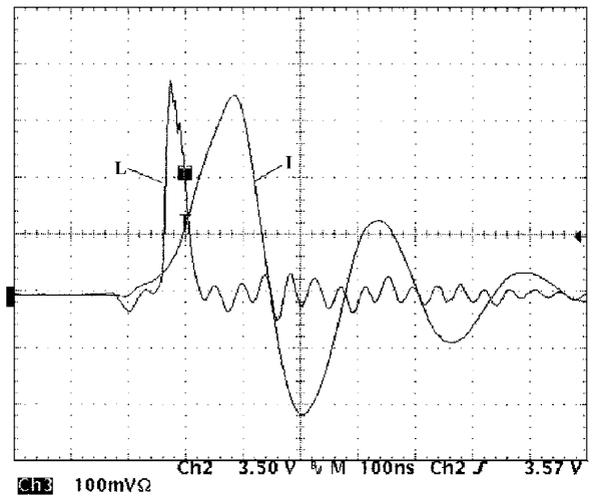


图 3 氖气为缓冲气体时的电脉冲 I 和光脉冲 L 的波形.

## 4 结 论

脉冲放电激励的高重复率金属蒸气激光器件中的自终止跃迁激光和碰撞辐射复合激光虽然是两种作用机理完全不同的激光系统,但是在碱土金属一价离子蒸气的特殊情况下,由于同时处理好电流脉冲的前沿和后沿,兼顾两种作用机理对参量组合的不同要求,求同存异,采用三镜复合双波长激光谐振腔,观察到自终止跃迁激光脉冲和碰撞辐射复合激光脉冲同时高重复率交替振荡的实验现象,深入的理论分析和参量组合的优化有待继续进行.

- [ 1 ] W. T. Walter *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **2**( 1966 ) , 474.
- [ 2 ] C. Cheng *et al.* , *Acta Physica Sinica* , **46**( 1997 ) , 897( in Chinese [ 程 成等 , *物理学报* , **46**( 1997 ) , 897 ] )
- [ 3 ] E. L. Latush *et al.* , *Sov. J. Quant. Electron.* , **3**( 1973 ) , 216.
- [ 4 ] V. V. Zhukov *et al.* , *Sov. J. Quant. Electron.* , **7**( 1977 ) , 704.
- [ 5 ] Z. X. Yao *et al.* , *Chinese J. Lasers* , **A23**( 1996 ) , 600( in Chinese [ 姚志欣等 , *中国激光* , **A23**( 1996 ) , 600 ] )
- [ 6 ] J. S. Deech *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **4**( 1968 ) , 474.
- [ 7 ] B. L. Pan *et al.* , *Acta Optica Sinica* ( in Chinese [ 潘佰良等 , *光学学报* ( 待发表 ) ] )
- [ 8 ] Z. X. Yao *et al.* , *Chinese J. Lasers* , **A24**( 1997 ) , 25( in Chinese [ 姚志欣等 , *中国激光* , **A24**( 1997 ) , 25 ] )
- [ 9 ] G. Y. Zhou *et al.* , *Chinese J. Lasers* ( in Chinese [ 周国耀等 , *中国激光* ( 待发表 ) ] )

## THE ALTERNATE OSCILLATION OF HIGH-REPETITIONRATE PULSE LASER BY TWO DIFFERENT PRINCIPLES IN ALKALINE-EARTH METAL VAPORS\*

FANG BEN-MIN YAO ZHI-XIN PAN BAI-LIANG CHEN XING CHEN GANG

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

( Received 4 February 2000 ; revised manuscript received 15 March 2000 )

### ABSTRACT

A new laser experimental phenomenon has been discovered by high-repetition-rate pulse discharge in the calcium-ion and strontium-ion vapor , that is , the alternate oscillation of self-terminating transition laser pulse and collisional radiative recombination laser pulse. On the basis of analyzing similarities and differences of their prompting mechanisms , some preparatory contrast experimental studies were undertaken.

**Keywords** : laser pulses , alternate oscillation

**PACC** : 4255H

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 69778009 ).