

# Sr 离子自终止和复合激光交替 振荡的动力学模型<sup>\*</sup>

陈 立 毛邦宁 王煜博 王丽敏 潘佰良<sup>†</sup>

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2007 年 4 月 6 日收到 2007 年 7 月 3 日收到修改稿)

建立了一个反映高重复率脉冲放电激励的 Sr 离子自终止激光和复合激光交替振荡的动力学模型,得到了与实际测光电脉冲波形相一致的模拟结果,给出了 He-Sr 放电等离子体中长寿命粒子、激光上下能级粒子数密度和电子温度随时间的演化过程,分析了两种激光交替振荡的发射过程、脉冲宽度特性和粒子数反转机理,认为在放电早期和余辉期电子温度的急剧升高和降低是 Sr 离子自终止和复合激光实现交替振荡的关键所在.

关键词:自终止激光,复合激光,交替振荡,动力学模型

PACC: 4255H, 4260H, 4260D

## 1. 引 言

高重复率脉冲放电激励的 Sr 蒸气激光具有丰富的谱线(覆盖蓝紫到红外波段),较高的输出功率和转换效率等特点<sup>[1-4]</sup>,被广泛应用于激光加工、材料处理、微电子技术、激光医疗和红外技术等领域.其激光机制也是多种多样,包括 Sr 原子和 Sr 离子的共振-亚稳跃迁自终止激光、Sr 离子的碰撞辐射复合激光和 Sr 原子三能级 $^3D_{1,2,3} \rightarrow ^3P_{0,1,2}$ 跃迁的激光振荡<sup>[3,5-7]</sup>.自 Deech 等<sup>[8]</sup>和 Latush 等<sup>[9]</sup>分别在实验上首次实现 Sr 离子的自终止激光(1030, 1090 nm)和复合激光(416, 430 nm)振荡以来,人们相对独立地对这两种激光进行了持续的实验和机理研究并取得较大进展<sup>[10-12]</sup>.

近期的研究表明, Sr 离子是能同时满足自终止激光和复合激光机制要求的理想工作物质,通过改进放电电路和谐振腔结构,实验上已经实现了这两种激光的交替振荡<sup>[13-15]</sup>,但很少有报道从微观动力学角度研究这两种激光交替振荡的出光机制和粒子数反转过程.本文建立了一个自洽的激光动力学模型,全面描述了高重复率脉冲放电 He-Sr 等离子体的各种粒子微观碰撞、自发辐射和受激辐射跃迁等

过程.模拟结果不仅合理解释了此前关于 Sr 离子自终止激光和复合激光交替振荡的实验结果,而且定量地阐明了这两种激光上、下能级的抽运与排空过程、粒子数反转机制、电子温度对能级激励和消激励的影响等微观机制.为进一步优化和提高该类激光的输出特性提供一些可借鉴的理论指导.

## 2. 模型描述

模型考虑了 Sr, He 原子和离子的 19 个相关能级,图 1 给出了模型用到的 Sr 离子和 He 原子主要能级.建立速率方程时主要考虑这些能级的电子碰撞激发、消激发以及电离和离子复合过程,同时也考虑了缓冲气体 He 与 Sr 原子、离子的碰撞混合过程以及微观粒子由于气体温度径向梯度导致的扩散过程.激光跃迁考虑了 1030 nm 自终止激光和 430 nm 复合激光.假设电子温度的分布函数服从麦克斯韦分布.求解模型所需的各碰撞速率系数、辐射跃迁和其他相关系数引自文献 [14, 16],多重态能级之间的速率系数按统计权重重新计算.模型给出了各能级粒子数密度、腔内光强、电子密度及电子温度的速率方程.为简化计算过程,模型仅考虑了各微观参量的轴向分布,径向分布仅考虑粒子的扩散运动.模型中

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10574111, 10374081)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: pbl66@zju.edu.cn

用到的外部激励电路同文献 [4] .

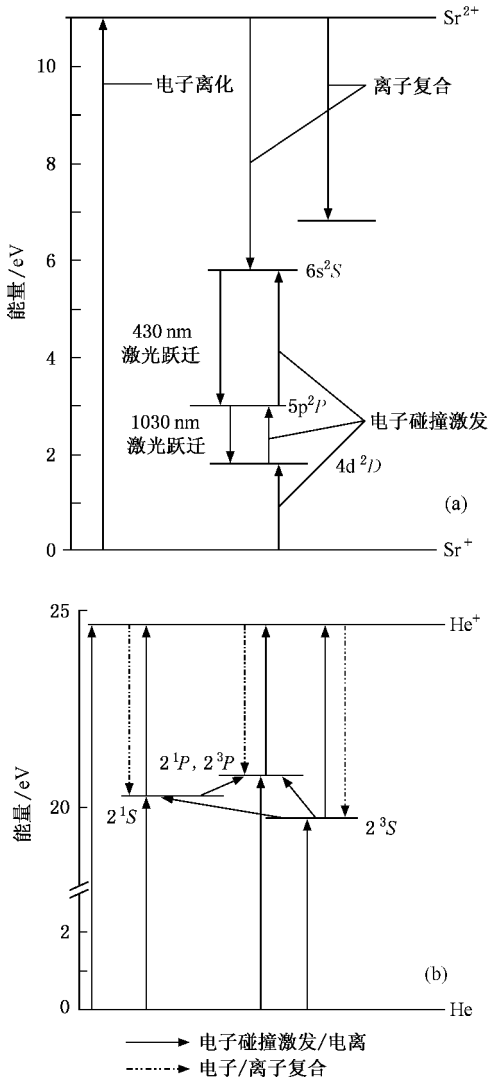


图 1 Sr 离子能级及其相关跃迁 (a) 和 He 原子能级及其电子碰撞激发 (b) 过程

### 2.1. Sr 原子和离子相关能级的粒子数密度变化方程

Sr 原子和离子相关能级的粒子数密度变化方程如下 :

$$\frac{dN_{Sr}}{dt} = - \sum_k \kappa_k N_{Sr} N_e + \sum_k \gamma_k N_{Sr^*} N_e + \sum_k A_k N_{Sr^*} - \sum_k \eta_p N_{Sr} N_k - \nabla \cdot \bar{\Gamma} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{Sr^+}}{dt} = \kappa_i N_{Sr} N_e + \sum_i \kappa_i N_{Sr^*} N_e + \sum_k \gamma_k N_{Sr^+} N_e - \alpha_i N_{Sr^+} N_e^2 - \nabla \cdot \bar{\Gamma} \quad (2)$$

$$\frac{dN_{Sr^{2+}}}{dt} = \kappa_i N_{Sr} N_e + \kappa_i N_{Sr^*} N_e + \sum_i \kappa_i N_{Sr^{+*}} N_e - \alpha_i N_{Sr^{2+}} N_e^2 + \sum_k \eta_p N_{Sr} N_k - \nabla \cdot \bar{\Gamma} \quad (3)$$

$$\frac{dN_{Sr^{+*}}}{dt} = \kappa_i N_{Sr^+} N_e - \sum_i \gamma_i N_{Sr^{+*}} N_e - \sum_k \kappa_k N_{Sr^{+*}} N_e + \sum_k \gamma_k N_{Sr_k^{+*}} N_e + \sum_i \kappa_i N_{Sr_i^{+*}} N_e - \sum_i A_i N_{Sr^{+*}} + \sum_k A_k N_{Sr_k^{+*}} + \alpha_k N_{Sr^{2+}} N_e^2 \pm I_p \gamma_0 / h\nu - \nabla \cdot \bar{\Gamma} \quad (4)$$

方程 (1)–(4) 中  $\kappa$  和  $\gamma$  分别是激发 (电离) 和消激发速率系数, 下标  $i$  和  $k$  分别对应所给能级的较低和较高能级,  $\alpha_k$  是复合系数,  $\eta_p$  是彭宁碰撞系数 ( $N_k = N_{He^+}$ ),  $A$  是自发辐射系数,  $I_p$  是腔内光子流强度,  $\nabla \cdot \bar{\Gamma}$  是径向粒子数密度扩散引起的粒子数密度损耗,  $\gamma_0$ ,  $h$  和  $\nu$  分别为增益系数、普朗克常数和辐射频率. 与 He 有关的各能级 (图 1(b)) 粒子数密度的速率方程形式上和方程 (1)–(4) 一样.

### 2.2. 电子密度变化方程

考虑到整个放电等离子体呈电中性, 电子密度的变化等于各阳离子密度的变化之和, 即

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{dN_{Sr^+}}{dt} + \frac{dN_{He^+}}{dt} + \frac{dN_{Sr^{2+}}}{dt} \quad (5)$$

### 2.3. 电子温度变化方程

根据放电等离子体内主要粒子碰撞对电子温度的变化, 给出电子温度的变化方程

$$\frac{d(1.5 N_e k_B T_e)}{dt} = \frac{N_e e^2 E^2}{m_e \nu_t} + \sum_{ij} \gamma_{ij} N_e N_j \epsilon_{ij} + \sum_j \eta_p N_{Sr} N_j \epsilon_p + \sum_{ij} \beta_m N_{He_i} N_{He_j} \epsilon_m - 2 m_e \sum_j (\nu_j / m_j) \times 1.5 N_e k_B (T_e - T_0) - \sum_{ij} \kappa_{ij} N_i N_e \epsilon_{ij} \quad (6)$$

方程 (6) 等号右边第一项代表纵向电场对电子的加热, 第二、第三项表示电子与重粒子的超弹碰撞和彭宁碰撞而获得的能量, 第四项为 He 原子亚稳-亚稳粒子的电离碰撞释放能量  $\epsilon_m$  对电子的加热, 第五项为电子与原子和离子气体的弹性碰撞导致能量损耗, 最后一项表示电子与重粒子间的非弹性碰撞而损耗的能量.

## 2.4. 腔内光强变化方程

腔内光强的变化方程如下：

$$\frac{dI_p}{dt} = \left( \frac{cI_p\gamma_0 L_0}{L_c} \right) - I_p c \left( \left[ \frac{1}{2L_c} \right] \ln \left[ \frac{1}{R_1 R_2} \right] \right) + \left( A_1 N_{Sr^*} h\nu c \frac{d\Omega}{4\pi} \right), \quad (7)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  是腔镜的反射率,  $c$  和  $L_c$  分别是光速和腔长,  $L_0$  是激活体长度. 方程(7)等号右边第一项代表光在增益系数为  $\gamma_0$  的等离子体中的受激辐射或吸收, 第二项代表腔镜的输出损耗, 第三项代表形成激光振荡所需的自发辐射,  $A_1$  为相应辐射衰减的跃迁概率,  $d\Omega/4\pi$  是激光束发散的立体角.

方程(1)–(7)与 He 有关能级的粒子数密度变化方程和外部激励电路方程一起, 组成了 Sr 离子自终止激光和复合激光交替振荡的动力学模型, 结合文献[13]给出的电路、光路参量和实验初始条件, 可用 Matlab 编程数值求解.

## 3. 计算结果及讨论

### 3.1. 光电脉冲分析

图 2(a) 给出了模拟得到的光电脉冲波形. 由图 2(a) 可以看出, Sr 离子的 1030 nm 自终止激光脉冲峰值出现在电流脉冲上升沿约 50 ns 处, 脉冲宽度约为 50 ns. 430 nm 复合激光则产生在放电脉冲完全结束后的等离子体复合余辉早期, 脉冲宽度约为 450 ns, 完全符合这两种激光各自的特征和机制. 图 2(a) 中伴随 1030 nm 430 nm 激光脉冲同时出现的脉冲分别属于 1030 nm 和 430 nm 的荧光脉冲, 本质上并不影响这两种激光交替振荡的产生. 为了验证模型的可靠性, 图 2(b) 给出了实测的光电脉冲波形. 对比图 2(a) 与 (b) 可以看出, 计算和实测的光电脉冲波形无论在时间先后上还是在脉冲宽度上都基本一致, 说明该模型较真实地反映了这两种激光发射的物理图像.

### 3.2. 基态粒子数密度 $N_{Sr}$ , $N_{Sr^+}$ 和 $N_{Sr^{2+}}$ 的时间行为

由图 3 可知, 电流脉冲峰值约为 170 A, 脉冲宽度约为 100 ns. 在放电初期, 基态粒子数密度  $N_{Sr^+}$  得到有效激励, 粒子数密度约为  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 因为  $5p^2P_{3/2}^0$  能级是  $Sr^+$  的共振能级, 基态粒子数密度

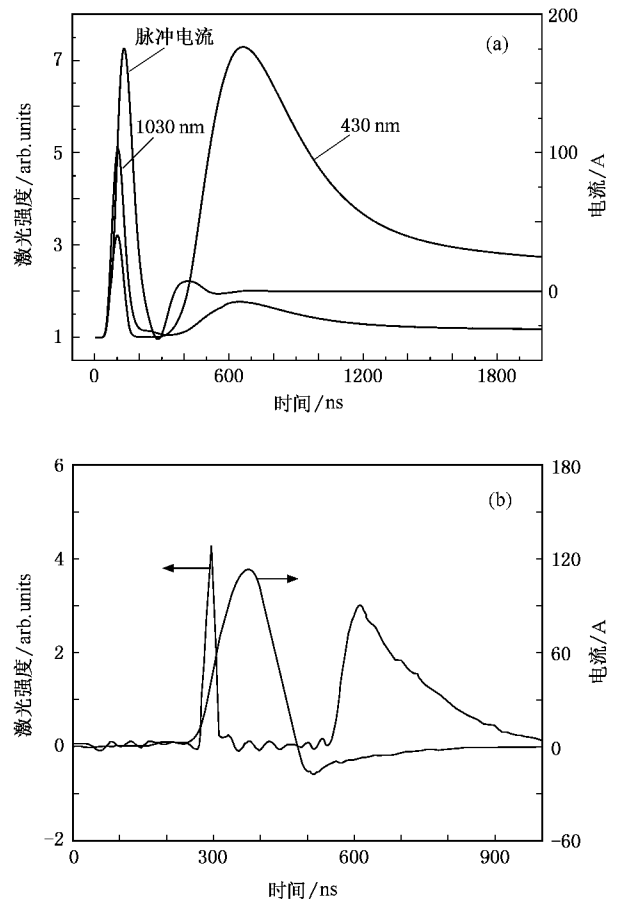


图 2 1030 nm 430 nm 激光强度和脉冲电流的计算值和实验值 (a) 计算值 (b) 实验值

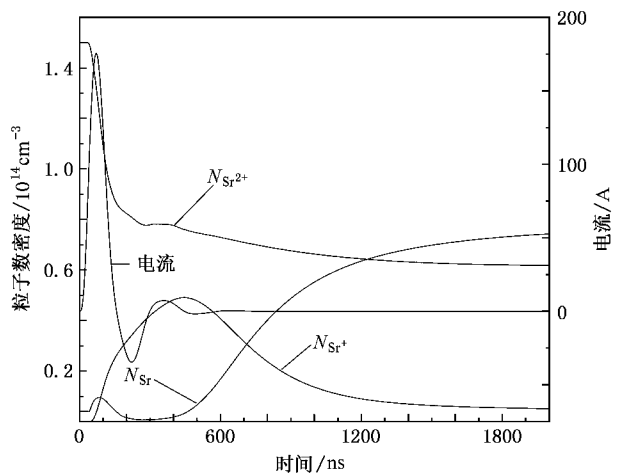


图 3 基态粒子数密度  $N_{Sr}$ ,  $N_{Sr^+}$ ,  $N_{Sr^{2+}}$  和电流脉冲

$N_{Sr^+}$  的增加有利于 1030 nm 自终止激光上能级  $5p^2P_{3/2}^0$  粒子数布居. 在放电后期, Sr 原子几乎全部被电离成基态  $Sr^{2+}$ , 在脉冲电流余辉期,  $Sr^{2+}$  和两个电

子发生如下的三体碰撞复合:



碰撞后导致  $\text{Sr}^{2+}$  粒子数密度从  $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  迅速减到  $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . 与此同时, 基态  $\text{Sr}^+$  粒子数密度上升缓慢且 Sr 原子粒子数密度相对较少. 根据粒子数密度守恒,

$$N_{\text{Sr}^{+*}} = N_{\text{Sr}^{2+}} - N_{\text{Sr}^+} - N_{\text{Sr}}.$$

在此过程中, 复合产生大量的高激发态  $\text{Sr}^{+*}$  粒子. 这些  $\text{Sr}^{+*}$  粒子对较低的 Sr 离子能群形成自上而下的激励并在能群中实现以电子温度为特征的玻尔兹曼分布, 从而在上能群的最低能级 ( $6s^2S_{1/2}$ ) 和下能群的最高能级 ( $5p^2P_{3/2}^0$ ) 间建立起粒子数反转, 产生对应 430 nm 波长的复合激光. 从基态粒子数密度  $N_{\text{Sr}^{2+}}$  变化曲线得到, 在放电约 2000 ns 以后粒子数密度  $N_{\text{Sr}^{2+}}$  仍维持  $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 说明  $\text{Sr}^{2+}$  完全复合需要较长时间, 这使得复合激光有宽脉冲的特性.

### 3.3. 交替振荡的出光机制

4(a) 给出了 Sr 离子自终止和复合激光上、下能级  $4d^2D_{5/2}$ ,  $5p^2P_{3/2}^0$ ,  $6s^2S_{1/2}$  的粒子数密度及其电子温度随时间的变化曲线. 在脉冲放电初期, 电子温度快速上升到峰值 3.8 eV 左右, 期间电子能量较高, 电子碰撞激励满足玻恩近似条件, 1030 nm 自终止激光上能级  $5p^2P_{3/2}^0$  共振态比下能级  $4d^2D_{5/2}$  亚稳态得到了优势激励, 导致放电早期上能级  $5p^2P_{3/2}^0$  粒子数  $N_u$  迅速上升, 并与下能级  $4d^2D_{5/2}$  粒子数密度  $N_d$  在数量级上相当. 反转粒子数公式如下:

$$\Delta N = N_u - \frac{g_u}{g_d} N_d,$$

式中  $g_u, g_d$  分别表示上能级和下能级的统计权重, Sr 离子 1030 nm 自终止激光和 430 nm 复合激光上、下能级的统计权重之比分别为 2/3 和 1/2, 这有利于激光上下能级粒子数的相对反转, 也符合金属蒸气激光高效运转的  $G$  判据. 因此在放电早期约 50—100 ns 时, 共振能级  $5p^2P_{3/2}^0$  和亚稳能级  $4d^2D_{5/2}$  之间容易形成粒子数反转, 产生 1030 nm 自终止激光振荡. 随着电子温度的下降和受激辐射增强, 共振能级  $5p^2P_{3/2}^0$  的粒子数密度随之快速下降, 而亚稳态  $4d^2D_{5/2}$  的粒子数密度通过基态  $\text{Sr}^+$  的电子碰撞激励和激光跃迁而不断增加, 从而破坏了上下能级的粒子数反转条件, 导致 1030 nm 激光自动终止. 在放电结束后的余辉期, 电子能量快速下降到约 0.4 eV 以

下, 激发态  $6s^2S_{1/2}$  和  $5p^2P_{3/2}^0$  粒子数密度通过基态  $\text{Sr}^{2+}$  与双电子的三体碰撞过程得到自上往下的激励而不断增加. 尽管下能级  $5p^2P_{3/2}^0$  的粒子数密度略大于上能级  $6s^2S_{1/2}$  的粒子数密度, 但由于上下能级间的有利统计权重比, 同样容易形成粒子数反转, 产生 430 nm 波长的激光振荡.

综上所述, 由于不同的激光机制, Sr 离子自终止激光 1030 nm 出现在放电初期, 其复合激光 430 nm 则出现在放电结束余辉期. 两者交替振荡的出光机制并不相互矛盾, 关键是电子能量大小随时间的变化是否满足这两种激光机制各自的要求. 如图 4(b) 所示, 在放电初期几十纳秒内电流脉冲迅速上升有利于电子能量迅速增加. 在放电余辉期, 电流脉冲迅速下降有利于电子快速冷却, 图中的电流反峰使得电子温度平缓下降, 这减慢了复合激光上能级的激励速率. 因此, 实验上可通过改进放电电流脉冲的下降沿并消除二次振荡来提高 Sr 离子复合激光的输出特性.

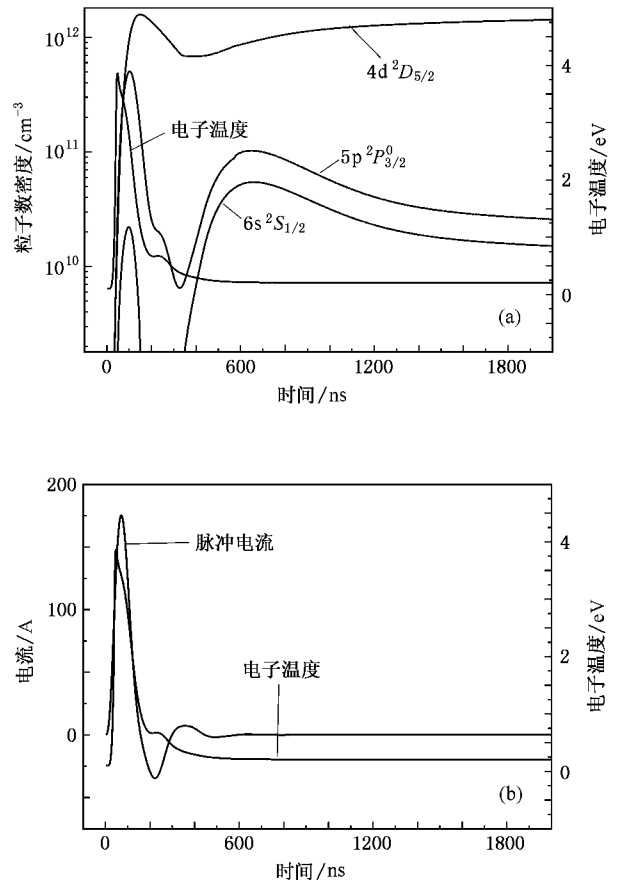


图 4  $4d^2D_{5/2}$ ,  $5p^2P_{3/2}^0$ ,  $6s^2S_{1/2}$  能级粒子数密度和电子温度 (a) 及脉冲电流和电子温度 (b)

## 4. 结 论

本文建立了 Sr 离子 1030 nm 自终止激光和 430 nm 复合激光交替振荡的动力学模型. 经数值计算得到了基态 Sr, Sr<sup>+</sup> 和 Sr<sup>2+</sup> 长寿命能级和两条激光上下能级粒子数密度随时间的演化过程. 分析了 1030 430 nm 激光的抽运过程和粒子数反转机理, 得

出电子温度在放电脉冲前后沿急剧升高和降低是 Sr 离子自终止和复合激光能否交替振荡的关键. 计算得到的交替振荡激光脉冲和电流波形、电子温度和粒子数密度、电子温度和电流波形的关系很好解释了实验现象和交替振荡的发光机理, 为实验上优化和提高 Sr 离子这两种激光交替振荡的输出特性提供了理论依据.

- 
- [ 1 ] Sem M F ,Tvanov I G 1998 *Proc. SPIE* **3403** 120
- [ 2 ] Isaev A A ,Lemmerman G Y 1985 *Sov. J. Quantum Electron.* **15** 37
- [ 3 ] Chen G ,Yao Z X ,Pan B L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1294 ( in Chinese)[ 陈 钢、姚志欣、潘佰良 2001 物理学报 **50** 1294 ]
- [ 4 ] Temelkov K A ,Vuchkov N K ,Pan B L ,Sabotinov N V ,Ivanov B ,Lyutov L 2006 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **39** 3769
- [ 5 ] Fang B M ,Yao Z X ,Pan B L ,Chen G ,Chen X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1652 ( in Chinese)[ 方本民、姚志欣、潘佰良、陈 钢、陈 星 2000 物理学报 **49** 1652 ]
- [ 6 ] Pan B L ,Yao Z X ,Chen G 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 941
- [ 7 ] Chen G ,Feng J ,Pan B L ,Yao Z X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3149 ( in Chinese)[ 陈 钢、冯 鉴、潘佰良、姚志欣 2005 物理学报 **54** 3149 ]
- [ 8 ] Deech J S Sanders J H 1968 *IEEE J. Quantum Electron.* **4** 474
- [ 9 ] Latush E L ,Sem M F 1973 *Sov. J. Quantum Electron.* **3** 216
- [ 10 ] Little C E ,Piper J A 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 903
- [ 11 ] Latush E L ,Chebotarev G D ,Sem M F 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 471
- [ 12 ] Latush E L ,Chebotarev G D ,Vasilchenko A V 1998 *Proc. SPIE* **3403** 141
- [ 13 ] Pan B L ,Chen K ,Chen G ,Yao Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 445 ( in Chinese)[ 潘佰良、陈 坤、陈 钢、姚志欣 2004 物理学报 **53** 445 ]
- [ 14 ] Carman R J 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1588
- [ 15 ] Pan B L ,Chen G ,Fang B M ,Mao B N ,Yao Z X 2004 *Chin. Phys.* **13** 2071
- [ 16 ] Chebotarev G D ,Prutsakov O O ,Latush E L 2004 *Proc. SPIE* **5483** 83

# A kinetics model for alternate oscillation of self-terminating and recombination lasers in strontium ions<sup>\*</sup>

Chen Li Mao Bang-Ning Wang Yu-Bo Wang Li-Min Pan Bai-Liang<sup>†</sup>

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

( Received 6 April 2007 ; revised manuscript received 3 July 2007 )

## Abstract

A self-consistent model has been developed to simulate the kinetics of alternate oscillation of self-terminating and recombination lasers in univalent ions of strontium excited by high-repetition-rate pulsed discharge. Photoelectric pulse waveforms predicted by the model are in good agreement with the experimental measurement. Temporal behaviors of long-life particles, the upper and the lower level populations and the electron temperature in He-Sr discharge plasma are given by the model. The emission process of the two laser alternate oscillation, the characteristic of the laser pulse width and the population inversion mechanics are also analyzed. It is presumed whether the electron temperature can rise up quickly in the early discharge and fall down rapidly during the discharge afterglow is the key to realize the alternate oscillation of self-terminating and recombination lasers in univalent ions of strontium in experiment.

**Keywords** : self-terminating laser , recombination laser , alternate oscillation , kinetics model

**PACC** : 4255H , 4260H , 4260D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10574111 , 10374081 ).

<sup>†</sup> E-mail : pbl66@zju.edu.cn