

# 优化铜蒸气激光的动力学强化机理研究

程 成<sup>1)2)3)</sup> 庄 飞<sup>1)3)</sup>

<sup>1)</sup> 浙江大学光及电磁波研究中心, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

<sup>2)</sup> 浙江工业大学应用物理系, 杭州 310032)

<sup>3)</sup> 杭州师范学院物理系, 杭州 310012)

(2000 年 6 月 7 日收到, 2000 年 9 月 25 日收到修改稿)

研究铜蒸气激光优化后可提高输出功率的激光动力学机理. 结果表明, 1) 优化后储能电容和峰化电容减小, 改善了激光头与 LC 放电电路的匹配, 使馈入激光管的功率增加; 2) 管壁温度适当提高, 使铜激光各能级粒子数密度增大; 3) 电脉冲期间电子温度上升前沿加快, 电子密度明显提高.

关键词: 铜蒸气激光, 动力学强化, 优化机理

PACC: 4255

## 1 引 言

铜蒸气激光(CVL)是一种高功率( $\sim 100\text{W}$ )、高效率( $\sim 1\%$ )、脉冲重复频率连续可调( $1\text{--}100\text{kHz}$ )输出绿、黄可见波长的激光器,它在分离铀同位素、抽运蓝宝石可调谐激光、皮肤病的光动力治疗等许多方面,都有重要的应用<sup>[1]</sup>.近年来,人们一直致力于关于 CVL 的研究工作,例如:建立与发展了自洽的 CVL 的计算机动力学模型<sup>[2-5]</sup>,用遗传算法优化 CVL 激光头以及放电电路的 LC 参量<sup>[6,7]</sup>,采用  $\text{H}_2\text{-HCl-Ne}$  混合缓冲气体对 CVL 输出功率的影响<sup>[8]</sup>,预脉冲等离子体电子密度对 CVL 激光行为的影响<sup>[9]</sup>,新型短波长紫外铜离子  $\text{Cu II}$  激光<sup>[10]</sup>,等等.对铜蒸气激光的研究在不断地发展当中.如何优化设计和发展大功率铜蒸气激光,输出径向光强分布优良的激光束,仍是人们关心的一个问题.

近年来,一些全局优化方法已经被应用于许多领域.与传统的梯度优化法不同,全局优化方法没有“局部最小(大)”的问题.其中一种全局优化方法是遗传算法<sup>[11,12]</sup>,它的思想来源于自然界的基因组合和优化原理.通过交叉交配,自然选择,基因突变等,优胜劣汰,筛选出最优基因组合.由于遗传算法思想新颖,全局搜索,并且计算机程序也比较简单,因而,

近年来它得到了很大的推广和应用.

我们在文献[7]中,应用全局优化的遗传算法,以输出最大激光功率为目标函数,经过数十代的迭代计算,整体优化设计了 CVL 激光头和电源 LC 电路两个部分.经过优化,激光功率可从原来的 91W 提高到 172W,提高幅度达 89%,效率也有相应提高.在大口径时出现的“黑心”现象,也可通过优化得到明显改善或消除.在此基础上,本文分析了优化 CVL 激光头与外电路的匹配问题,研究了优化的激光动力学机理,讨论了激光等离子体参量对激光输出的影响,并给出了优化提高激光功率的三个主要机理.

## 2 激光的优化

铜蒸气激光的主要激光动力学过程见表 1.此外,还应考虑粒子的宏观输运、密度扩散、气体温度和电子温度的热传导等等.它们组成一非线性的偏微分速率方程组,用来描述激光等离子体内粒子数密度或能量的时空变化.应用全局优化的遗传算法,经过数十代的迭代计算,可得到铜蒸气激光器的优化参量.详细原理和遗传算法的优化过程以及所涉及到的原子数据等可见文献[5,7,11-13].

表 2 为优化前后的激光头参量、激光放电电路 LC 参量以及对应的激光功率和效率,其中遗传算

† 现在通讯地址.

法优化的初始染色体数  $M_i = 1000$ , 循环代数  $J_c = 60$ . 优化前的参量与实验的参量或测量值一致. 图 1 为优化前后电脉冲期间穿过激光管的放电电流  $i_d$ 、

激光管中心的放电电场  $E_1$  和输入功率  $P_e$  随时间的变化.

表 1 CVL 激光等离子体碰撞动力学过程

No.	名称	反应过程	备注
1	电子碰撞激发与去激发	$A_i + e \leftrightarrow A_j + e - \epsilon_1$	
2	电子碰撞电离与三体复合	$A_i + e \leftrightarrow A^+ + e + e - \epsilon_2$	$A_i$ 为 $i$ 能级原子 (Cu1, Cu2, Cu3, Ne1, Ne2), $\epsilon$ 为对应电子能量得失, $A^+$ 为离子 Cu <sup>+</sup> , Ne <sup>+</sup> , $M$ ( $M_m$ ) 为基态 (亚稳态) 原子 Cu1, Ne1 (Cu2, Ne2)
3	原子 Penning 碰撞电离和复合	$A_i + M_m \rightarrow A^+ + M + e + \epsilon_3$	
4	离子电子碰撞辐射复合	$A_i + M \rightarrow A + M$	
5	受激辐射与吸收	$A^+ + e \rightarrow A_i + h\nu - \epsilon_4$	
6	自发辐射	$Cu3 \rightarrow Cu2 + h\nu$	

表 2 优化前后的激光头参数和激光放电电路的 LC 参数

	激光管半径 $R/cm$	激光管长度 $l_c/cm$	初始电 压峰值 $V_0/kV$	重复 频率 $f/Hz$	管壁 温度 $T_w/^\circ C$	气体 压强 $P_g /133.3Pa$	储能 电容 $C_d/nF$	峰化 电容 $C_p/nF$	等效 电感 $L_d/\mu H$	等效 感抗 $L_p/\mu H$	激光 功率 $P_l/W$
未优化	3.25	220	20	5000	1500	10	8.9	3.7	0.4	0.4	91
优化后	2.22	176.51	29.56	5968	1615.1	9.98	5.68	2.61	0.37	0.39	171.9

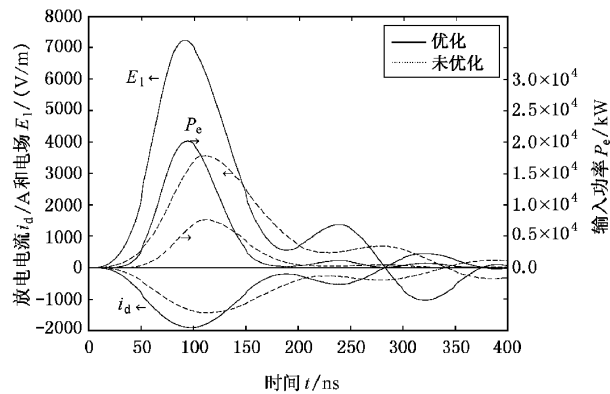


图 1 优化前后脉冲期间的放电电流  $i_d$ 、激光管中心的电场  $E_1$  和输入功率  $P_e$  随时间的变化

### 3 优化机理分析

1. 由图 1 可见, 优化后, 激光等离子体中的电场  $E_1$  远高于优化之前. 优化后最佳初始峰值电压  $V_0$  是优化前的约 1.5 倍, 但峰值电场却提高约 2 倍. 在时间行为上, 优化后的电场峰值前移 25ns, 并形成一典型的 LC 阻尼振荡的形态, 其第一个振荡半周期为 188ns, 比未优化时缩短了约 41ns. 优化后由于 LC 值减小 (见表 2), 使电压脉冲上升加快, 气体被迅速击穿, 导致等离子体电子温度和电子密度

上升加快, 这对激光抽运是十分有利的. 优化后放电电流峰值变化并不是很大, 其时间行为类似于电场, 电流峰值时间亦前移 20ns. 优化后输入激光管的电功率  $P_e(t) = E(t) i_d(t) D_l$  远大于优化之前, 两功率峰值之比达 2.7. 将功率曲线对整个放电周期  $T$  ( $\sim 200\mu s$ ) 作平均, 平均输入电功率为  $\langle P_e \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_1 D_l i_d dt = 14.3kW$  (优化后) 和  $8.6kW$  (优化前), 两者之比为 1.7. 由储能电容的平均功率公式  $\langle P'_e \rangle = \frac{1}{2} C_d V_0^2 f$  以及表 2 数据可知,  $\langle P'_e \rangle = 14.8kW$  (优化后) 和  $8.9kW$  (优化前), 它们与本文通过求放电功率曲线平均值得到的  $\langle P_e \rangle$  相当接近. 优化后效率提高并不多, 但输入功率大幅度增加, 这是优化提高激光功率的最根本的原因.

在实验中, 人们往往试图通过尽量提高输入功率来增大激光输出. 但是, 由于 LC 电路很难与作为其负载的激光管相匹配, 增加的电功率实际上大部分都消耗在闸流管等外部器件上. 为了研究匹配问题, 我们计算了优化前后激光头 (具有同轴结构, 其等效感抗为  $L_p$ ) 阻抗  $Z$  以及激光管开路时 LC 电路的输出阻抗  $Z'$  随时间的变化 (图 2). 其中  $Z' = (R_{th} + Z_{Cd} + Z_{Ld}) // Z_{Cp}$  ( $R_{th}$  为闸流管电阻,  $Z$  为对应的 LC 器件复阻抗). 图 2 可见, 优化后的阻抗  $Z$  没有明显变化, 但是阻抗  $Z'$  明显地从  $\sim 1\Omega$  增大到  $\sim 4\Omega$ .

如果定义平均阻抗匹配因子

$$C_m = \frac{\langle Z' \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} ((R_{th} + Z_{Cd} + Z_{Zd}) // Z_{Cp}) dt}{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (R_d + Z_{Zp}) dt}, \quad (1)$$

最佳匹配应当发生在  $C_m = 1$ . 计算表明, 优化后  $C_m = 0.457$ , 未优化的  $C_m = 0.136$ , 显然, 阻抗匹配得到了明显改善. 其外在的原因可归结为优化后电源电路  $LC$  值的减小. 由表 2 可知, 优化后的储能电容值和峰化电容值均减小比较多(这两个电容大小对放电都比较敏感). 由于容抗  $Z_C \propto 1/j\omega C$  的特点, 因此, 阻抗将增加很多. 阻抗匹配的改善, 是优化提高激光功率在电路方面的主要原因.

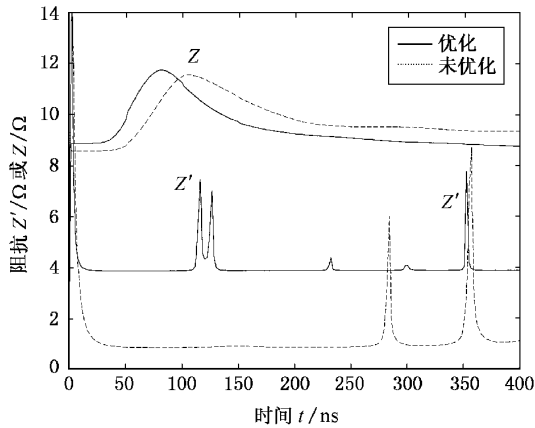


图 2 优化前后脉冲期间激光头阻抗  $Z$  和电源  $LC$  电路输出阻抗  $Z'$  随时间的变化

2. 图 3 为优化前后脉冲期间激光管中心铜激光能级粒子数密度随时间的变化. 由图 3 可见, 优化后激光脉冲峰值出现于  $t = 95\text{ns}$ (与电场峰值时间基本相同), 其脉冲高度或半高全宽均大于优化之前. 注意到优化后铜激光各个能级(包括激光下能级)的粒子数密度均有较大幅度增加. 例如铜基态能级, 在初始时刻, 优化前  $\text{Cu1} = 7.18 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 优化后为  $1.84 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ . 造成铜粒子数增大的直接原因是管壁温度的升高. 在铜激光器正常运行的温度范围内( $\sim (1800 \pm 100) \text{K}$ ), 铜粒子数密度大致线性正比于温度(图 4). 优化后最佳管壁温度高达  $T_w = 1615.1^\circ\text{C}$ (表 2), 这提供了足够高的激光工作物质粒子数密度. 对于激光上下能级, 在激光峰值时刻, 优化后  $\text{Cu3} = 1.99 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $\text{Cu2} = 3.26 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 它们均明显高于优化之前的  $\text{Cu3} = 5.75$

$\times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $\text{Cu2} = 8.56 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ . 由激光强度  $P'_1 \propto D_n \equiv \text{Cu3} - \frac{g_3}{g_2} \text{Cu2}$  可知, 由于  $\text{Cu3}$ ( $\text{Cu2}$ ) 的量级很大, 它们的一个小增长, 将导致激光强度的大增长. 因此, 管壁温度升高使铜粒子数密度增大是激光输出增强的一个重要的原因.

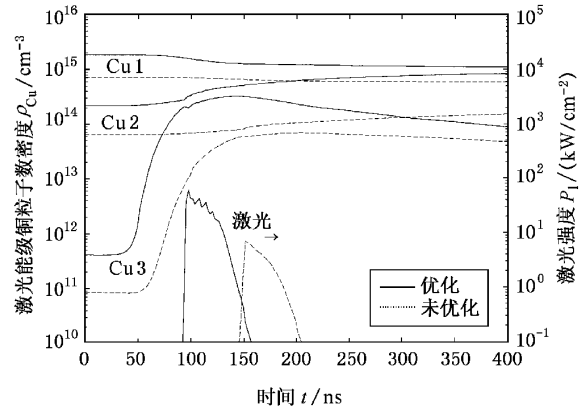


图 3 优化前后脉冲期间激光管中心铜激光能级粒子数密度  $\rho_{\text{Cu}}$  以及激光脉冲随时间  $t$  的变化

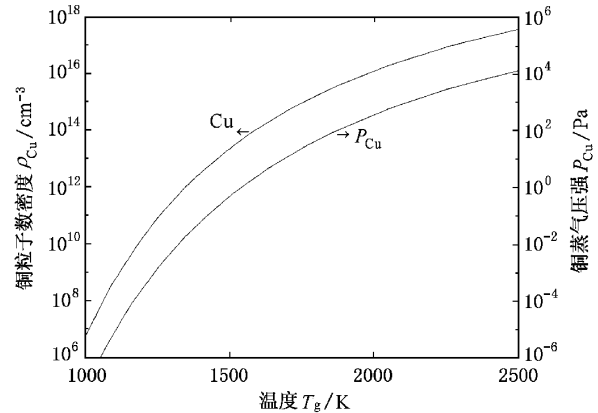


图 4 激光管壁处铜粒子数密度  $\rho_{\text{Cu}}$  以及铜蒸气压强  $P$  随管壁温度  $T$  的变化

3. 众所周知, 电子温度和电子密度是决定激光行为的两个重要等离子体参量. 在大口径激光管中, 电子温度和电子密度是时间空间的函数, 即  $T_e = T_e(r, t)$ ,  $n_e = n_e(r, t)$ . 图 5 为脉冲期间激光管中心等离子体电子温度和电子密度的变化. 由图 5 可见, 优化后, 虽然输入功率增大了很多, 但电子温度整体变化不大(峰值反而略有降低). 需要指出的是电子温度前沿的上升速率加快了很多, 峰值时间相应提前  $28\text{ns}$ . 注意到无论是在初始时刻还是在整个放电脉冲期间, 优化后的电子密度都明显增大. 例如, 在各自的激光峰值时刻, 电子密度从优化前  $n_e$

$= 3.36 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  提高到优化后  $n_e = 1.23 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  增大幅度相当可观. 电子密度的提高, 在脉冲期间有利于电子碰撞激励激光能级, 在弛豫期间, 也有利于加快激光下能级的电子碰撞消激励(这是消激励的主要通道). 电子温度上升前沿的加快和电子密度的提高, 是优化增大激光功率的重要等离子体动力学机理. 实际上, 这最终依赖于外电场, 即依赖于外电路  $LC$  值的减小以及馈入激光管的电功率增大, 亦即与我们前面讨论的改善  $LC$  电路与激光管的匹配有关.

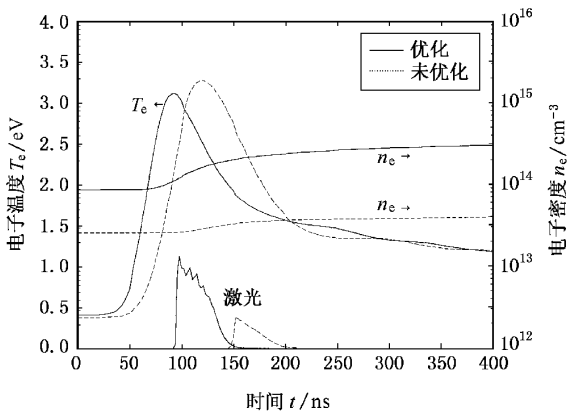


图5 脉冲期间激光管中心等离子体电子温度  $T_e$  和电子密度  $n_e$  随时间  $t$  的变化

在实验中, 往往在升高管壁温度之后, 激光功率反而下降. 一般认为管壁温度提高, 使激光管的中心

温度也升高, 从而使激光下能级粒子数布居增多. 我们的计算表明, 在整个放电过程中, 影响激光下能级粒子数布居的主要是电子温度  $T_e$  和电子密度  $n_e$ , 而不是气体温度. 只有在  $T_e$  和  $n_e$  都比较低的初始时刻, 过高的气体温度或管壁温度(例如  $T_w > 1650^\circ\text{C}$ ), 才会比较明显地影响激光下能级的布居. 优化后, 虽然气体温度提高了很多, 但是由于电子温度并未提高, 因此, 激光下能级粒子数布居仍属正常. 由于气体温度和其他许多一系列参量(如: 电子温度和电子密度等等)相互关连, 因而, 在实验中试图仅仅依靠提高管壁温度来增大激光功率, 是十分困难的.

## 4 结 论

优化 CVL 激光头和电源电路  $LC$  参量, 可以提高激光功率的主要机理是:

1. 优化改善了供电电源与激光头之间的阻抗匹配, 使馈入激光管内的电功率大幅度提高.
2. 管壁温度适当升高, 使铜激光各能级粒子数密度增大.
3. 电子温度上升前沿加快和电子密度提高, 在电脉冲期间有更多的粒子被迅速激励到激光上能级. 在弛豫期间, 较高的电子密度加快了激光下能级的消激励.

[1] M. D. Ainsworth, J. A. Piper (G. Morstyn, A. H. Kaye, Ed., Chur, Harwood, Switzerland, 1989), p. 37.  
 [2] R. J. Carman, D. J. W. Brown, J. A. Piper, *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**(1994), 1876.  
 [3] R. J. Carman, *J. Appl. Phys.*, **82**(1997), 71.  
 [4] C. Cheng, W. Sun, *Opt. Commun.*, **144**(1997), 109.  
 [5] C. Cheng, W. Sun, *Acta Physica Sinica*, **46**(1997), 897 (in Chinese) [程成、孙威, *物理学报* **46**(1997), 897].  
 [6] C. Cheng, S. L. He, *Acta Physica Sinica*, **49**(2000), 713 (in Chinese) [程成、何赛灵, *物理学报* **49**(2000), 713].  
 [7] C. Cheng, S. L. He, *Acta Physica Sinica*, **49**(2000), 1267 (in

Chinese) [程成、何赛灵, *物理学报* **49**(2000), 1267].  
 [8] J. Withford, D. J. W. Brown, R. J. Carman, J. A. Piper, *Opt. Commun.*, **154**(1998), 160.  
 [9] R. J. Carman, M. J. Withford, D. J. W. Brown, J. A. Piper, *Opt. Commun.*, **157**(1998), 99.  
 [10] R. J. Carman, *Opt. Lett.*, **21**(1996), 872.  
 [11] R. L. Haupt, *IEEE Antenn. Propag. Mag.*, **37**(1995), 7.  
 [12] D. S. Weile, E. Michielssen, *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, **45**(1997), 343.  
 [13] C. Cheng, S. L. He, *J. Phys.*, **D33**(2000), 1169.

# STUDY ON THE ENHANCEMENT MECHANISMS OF AN OPTIMIZED COPPER VAPOR LASER

CHENG CHENG<sup>1 2 3)</sup> ZHUANG FEI<sup>1 3)</sup>

<sup>1)</sup>Center for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

<sup>2)</sup>Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

<sup>3)</sup>Department of Physics, Hangzhou Normal College, Hangzhou 310012, China)

(Received 7 June 2000; revised manuscript received 25 September 2000)

## ABSTRACT

The enhancement mechanism of the optimized CVL by a genetic algorithm are presented in this paper. With a small storage capacitance and a small peaking capacitance, the input power increases due to the improved impedance matching between the laser head and the discharging  $LC$  circuit by the optimization. The lasing population increases as a result of the increased tube-wall temperature. The plasma electron temperature increases more rapidly during the period of the discharge, and the electron density increases obviously after the optimization.

**Keywords** : copper vapor laser, enhanced kinetics, optimization mechanisms

**PACC** : 4255