

文章编号: 0253-2239(2001)03-0278-05

百瓦级铜蒸汽激光器最大功率的全局优化设计

程成^{1),2)} 何赛灵^{1),3)}

- 1), 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
- 2), 杭州师范学院物理系, 杭州 310012
- 3), 瑞典皇家工学院电磁理论系, 斯德哥尔摩 S-100 44, 瑞典

摘要: 将全局优化的遗传算法应用于百瓦级铜蒸汽激光器(CVL), 以最大输出激光功率为目标函数, 整体优化设计和确定了铜蒸汽激光器同轴结构的激光头和放电电源的电路参数等。提高激光功率的一条途径是: 在采用相对较小的储能电容的同时, 提高输入功率(主要是峰值电压)和管壁温度, 且使激光头与供电电源相匹配。

关键词: 铜蒸汽激光器; 优化; 遗传算法

中图分类号: TN242 文献标识码: A

1 引言

铜蒸汽激光器(CVL)是一种高功率(大于100 W)、高效率(约为1%)、输出绿(黄)波长的金属蒸汽激光器,它在分离铀同位素、抽运染料激光器、激光医学诊断和治疗等许多方面,都有重要的应用。近年来,发表了许多关于铜蒸汽激光器的研究论文,例如:建立与发展了自洽的铜蒸汽激光器计算机动力学模型^[1,2],研究了预脉冲等离子体电子密度对小口径铜蒸汽激光器的影响^[3],研究了充氢机理^[4],用遗传算法优化铜蒸汽激光器放电电路的LC参数^[5],H₂-Ne混合缓冲气体的优化^[6]等等。

虽然人们已经了解铜激光器的一些特性,但是仍有许多问题尚待解决。例如:目前单台铜激光器稳定的输出功率仅为100 W左右,离人们的预期值还有相当差距;大口径激光管很难与供电电源相匹配;同轴结构激光头的长度-半径比如何设计等等。由于铜激光器是一个复杂的光、电、气的综合性系统,可以调节和变化的参量很多,因此,很难通过实验来寻找最佳工作条件或优化整个铜激光器。近年来,一些全局优化方法已经被应用于许多领域,其中一种全局优化方法是遗传算法^[7,8],它的计算机程序比较简单,因而得到了很大的推广和应用。

本文简要描述了激光动力学模型以及全局优化的遗传算法的思想。并将遗传算法应用于激光动力学模型,以输出最大激光功率为目标函数,经过数十代的优化迭代计算,确定了铜蒸汽激光器放电电路

和激光头的最佳设计参数。最后,讨论了提高激光功率的途径。

2 优化设计原理

2.1 放电电路

典型的铜蒸汽激光器脉冲充放电等效电路示于图1中。图中激光管内的缓冲气体为氖,R_d为气体被击穿之后两个电极之间的等离子体电阻;C_s为储能电容,由一高压电源周期性地充电至V₀;C_p为峰化电容,用来加快放电脉冲前沿;L_i和L_h为系统的等效电感,L_i主要包括充氢闸流管的内电感、分布电感等,L_h主要包括具有同轴结构的激光头的电感等等;L_c为一电感量较大的充电电感,在高重复率的放电过程中,它可忽略不计。

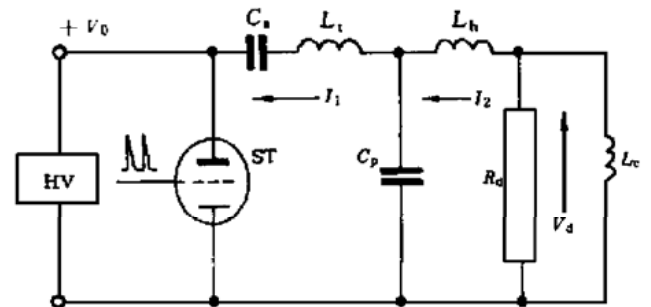


Fig. 1 The discharge equivalent circuit of CVL

2.2 铜蒸汽激光器动力学模型

激光管内有缓冲气体氖和铜原子蒸汽。在外高压脉冲源的作用下,激光管内的气体被击穿,形成弱电离的等离子体。在脉冲期间,电子从外场中获得

大量的能量,电子温度迅速上升。在较佳状态下,电子温度可超过 5 eV,高于激光上能级 $^2P_{3/2,1/2}$ 温度(约 3.8 eV)。位于基态 2S 的铜原子在电子碰撞激发作用下,被激励到激光上能态 2P 。由于自发辐射和自吸收作用, 2P 态粒子向下跃迁到激光下能态 2D ,形成受激辐射。在电场脉冲结束之后,电子温度和电子密度缓慢降低,粒子积累在激光下能级(亚稳态 2D),最终使粒子反转条件被破坏,激光脉冲终止。此后,电子温度和电子密度继续下降,激光亚稳态的粒子数逐渐被释放,弛豫至下一个脉冲到来。

在放电脉冲期间,激光管内等离子体区中存在的粒子种类或能级为:铜基态(Cu1)、铜激光能级上能态(Cu3)和下能态(Cu2)、铜电离态(Cu^+)、氖基态(Ne1)、氖亚稳态(Ne2)、氖电离态(Ne^+)、激光光子、电子,一共有 9 种粒子或粒子能级。每一种粒子或粒子能级都是电子温度或气体温度的函数,因而,需要有另外关于电子温度和气体温度的方程。略去次要过程,一共可用 11 个方程来描述铜蒸汽激光动力学过程。方程的边界条件如下:边界气体温度,为可测量的内管壁温度;管壁上铜原子蒸汽压为管壁温度的函数,它可以表达为: $P_{\text{Cu}} = 10^{A-B/T_g}$,这里 T_g 为气体温度,(由文献[9]所给的数据,可以推得常数 $A = 7.486, B = 12187.299$);管壁上的铜原子数密度 $n_{\text{Cu}} = P_{\text{Cu}}/kT_g$, k 为玻耳兹曼常数等等。

对于方程的初始条件,可以根据脉冲重复放电的特点,通过若干个迭代计算周期,使脉冲结束之后的各计算参数值逐步趋近于初始时刻,形成时空自治这样一个方法来确定。由于各参量是电子温度 T_e (或是电子密度 n_e ,或是气体温度 T_g)的函数,因而需要先初步确定这三者的初值。由于铜的电离能仅为 7.73 eV,而氖电离能高达 21.56 eV,因而,在电子温度较低的初始时刻,激光管内的正离子主要是由铜电离产生的。在弛豫末期或初始时刻,电子温度和电子密度变化平缓,正负离子处在相对平衡附近。萨哈(Saha)电离平衡方程为^[10]:

$$\frac{n_{\text{Cu}^+}}{n_{\text{Cu}}^*} = 6.0 \times 10^{21} \frac{g_{\text{Cu}^+} T_e^{3/2}}{g_{\text{Cu}}^*} \exp\left[-\frac{E_{\text{Cu}^+}}{T_e}\right], \quad (1)$$

式中 Cu^* 表示 Cu1、Cu2、Cu3, g 和 E_{Cu^+} 为对应的统计权重和电离能。当电子温度 T_e 一定时,可得到正离子数 n_{Cu^+} 和电子密度 n_e 的相互关系。再由激光管内总的正负粒子数相平衡的原则,即: $\sum n_{\text{Cu}^+}(r) = \sum n_e(r)$, 来初步确定 T_e 、 n_e 的初值。经过若干次循环迭代计算, T_e 和 n_e 的收敛误差可小于 5%。对于

气体温度 T_g 的初值,可采用稳态时满足热传导方程 $\nabla \lambda_g \nabla T_g = -P_{\text{in}}$ 的气体温度径向分布:

$$T_g(r) = \left[T_w^{\alpha+1} + \frac{P_{\text{in}}(\alpha+1)(R^2-r^2)}{4\lambda_{g0}} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (2)$$

式中 T_w 为管壁温度, P_{in} 为供电电源输入激光管单位体积内的功率, R 为激光管半径, 氖气热传导率 $\lambda_g = \lambda_{g0} T_g^\alpha$ 。可从文献[11]的数据推出

$$\lambda_{g0} = 1.194 \times 10^{-12} \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$\alpha = 0.64874.$$

由于初始气体温度应低于平均温度,因而,上式中的 P_{in} 需乘以一个小于 1 的因数,通过调整该因数来达到气体温度的循环迭代自治。实践证明,这样做可以较快或较方便地初步定出各有关参量的初值。

应用稳定性较好和误差较小的隐式差分法,将偏微分方程化为差分方程并化为“三对角线方程”,应用“追赶法”^[12,13]数值求解,可计算得到激光功率。将输出的激光功率作为目标函数,通过下面将要叙述的遗传算法,最后获得整个铜激光系统的最佳匹配参数。

2.3 遗传算法应用于铜蒸汽激光器

在优化理论中,遗传算法是近年发展比较快的一种全局搜索法^[7,8],它将每一个参数分解成二进制编码(基因)序列,若干基因编码组成一条染色体。这些染色体经过若干代的自然选择、交配和突变,最后收敛成为某种最佳基因组合。本文将我们的铜蒸汽激光器的计算机动力学方程组作为子程序的直接解。在主程序中按以下几个步骤进行:

首先,对 9 个实际可以调整的电气和几何参数:激光管半径 R 和长度 l 、放电电压峰值 V_0 、重复频率 f 、管壁温度 T_w 、缓冲气体压强 P_g 、储能电容 C_s 、峰化电容 C_p 、等效电感 L_i 分别进行二进制基因编码,并随机产生 M_i 条初始染色体。其次,调用子程序,估算代价函数,即求解整套激光动力学微分方程组,计算得到激光功率 P_l 。根据代价函数值的大小对所有染色体进行优劣排序,保留激光功率大的一半,丢弃差的另一半,使进入下一代循环的工作染色体数为 $M_w = M_i/2$ 。然后,采用比例选择法(见文献[8])选择母本并产生新一代的染色体。经过若干代循环,代价函数 P_l 的值逐渐趋于一致。最后,使新一代的子染色体基因产生突变,即以很小的几率将 0、1 分别突变成 1、0。这种突变能将搜寻范围扩大到原先没有被包括进来的区域,也使得优化过程避免落入“局部最大”之中。最后,重复进行上述的估算代价函数至

基因突变,直到最佳染色体,或即有最大激光功率的最佳参数组合被找到为止。遗传算法应用的详细论述也可参见文献[5]。

本文遗传算法所用的一些具体数据为:初始染色体数 $M_i = 1000$,工作染色体数 $M_w = 500$,交叉交配点随机产生,突变几率为 2%,循环代数为 60,基因数为 9,每个基因字节数为 6。

3 计算与结果

在子程序中,假定除了前述的 9 个参数之外,其它参数都不发生变化。9 个待优化参数预先给定的变化范围为:激光管半径 $R = 1 \text{ cm} \sim 8 \text{ cm}$;激光管长度 $l_c = 80 \text{ cm} \sim 400 \text{ cm}$;电压峰值为 $V_0 = 16 \text{ kV} \sim 31 \text{ kV}$;脉冲重复频率 $f = 4 \text{ kHz} \sim 6 \text{ kHz}$;内管壁温度 $T_w = 1450 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1750 \text{ }^\circ\text{C}$;缓冲气体压强 $P_g = (5 \sim 50) \times 133.32 \text{ Pa}$;储能电容 $C_s = 3 \text{ nF} \sim 16 \text{ nF}$;峰化电容 $C_p = 0.1 \text{ nF} \sim 8 \text{ nF}$;等效电感 $L_l = 0.1 \text{ } \mu\text{H} \sim 2 \text{ } \mu\text{H}$;对应的输入功率 $P_e = 1.5 \text{ kW} \sim 46.1 \text{ kW}$ 。当 R, l_c 确定之后,另一等效电感 L_p 也可随之确定。如果略去电子密度径向分布的不均匀性和分布电感,则 L_p 即为激光头电感^[5]:

$$L_p = \frac{\mu_0 l_c}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln \left(\frac{R_m}{R} \right) \right], \quad (3)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, R_m 为激光头外罩金属壳半径。为了方便,假定 $R_m = R + 3 \text{ cm}$ 。本文分别计算了绿激光跃迁和黄激光跃迁,总功率为两者之和。

在子程序中的调试和计算中遵循如下步骤:

1) 首先,将实验所选的放电电路参数和激光头参数等(见表 1 最后一行所列),作为标准条件输入计算机激光动力学模型,使得未优化的铜蒸汽激光器参数与实验所选的参数相同。在此条件下,由子程序计算得到的放电电流脉冲、电压脉冲、输入的平均

Table 1. 5 set of optimized parameters of the CVL adopted in our computational model and the corresponding experimental parameters

No.	Tube radius R/cm	Tube length l_c/cm	Peak voltage V_0/kV	Repet. Frequen. f/kHz	Inner wall temper. $T_w/^\circ\text{C}$	Gas press $P_g/133.3\text{Pa}$	Storage capacitor C_s/nF	Peaking capacitor C_p/nF	Equivalent inductance $L_l/\mu\text{H}$	Laser power P_l/W	Input power P_e/kW
1	2.11	161.3	29.11	5.78	1635	9.92	6.30	3.11	0.34	171.9	15.43
2	2.11	171.4	28.44	5.84	1619	9.92	6.30	3.23	0.37	170.1	14.88
3	2.11	176.5	28.22	5.87	1615	9.92	6.30	2.73	0.37	170.1	14.73
4	2.11	176.5	28.22	5.97	1611	10.62	6.30	3.11	0.37	170.1	14.98
5	2.22	181.6	28.89	5.75	1619	10.62	6.30	3.11	0.37	169.8	15.12
Exp. ^[14, 15]	3.25	220	20	5	1500*	10	8.9	3.7	0.4	91	8.90

* the exterior wall temperature

1) 从表 1 可知,各个优化的参数有一较小的变

均电功率、激光脉冲峰值时间和激光功率以及光束的径向分布等与实验测量^[14, 15]基本一致(见图 2)。

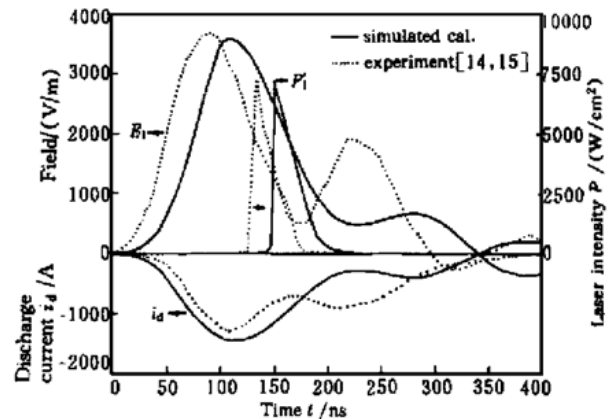


Fig. 2 The comparison of the discharge currents, voltages and laser intensity between the experiments^[14, 15] and the computation under the standard conditions

2) 其次,改变输入电功率,使之在前述的范围内变化为

$$P_e = C_s V_0^2 f / 2 = 1.5 \text{ kW} \sim 46.1 \text{ kW}.$$

计算结果表明,在极大或极小输入功率附近,没有激光出现。在较宽的中等输入功率区域附近,有激光出现。当输入功率逐步增大时(保持其它的参量不变),计算的激光功率及其变化趋势与实验曲线(文献[15]图 1)相符。并且,电子温度和电子密度等仍可形成周期性自洽,但迭代误差在靠近极大或极小区域处逐渐增大,最大可达 20% 左右。

3) 然后,在标准参数条件下,改变 9 个待优化参数中的其中一个参数,例如管壁温度、激光管半径或气体压强等,其它参数不变。结果表明,计算的激光功率呈不同程度的下降,这亦与实际装置中铜蒸汽激光器参数已被经验地局部优化情况相符。

由此,我们有理由相信,由该激光动力学模型计算得出的结果应当是可靠的。优化计算的铜蒸汽激光器的 5 组最佳参数列于表 1 中。下面讨论优化的主要结果。

由此,我们有理由相信,由该激光动力学模型

动范围。参数在该范围内变动时,仍可保持较大的

激光输出。其中最佳激光管半径 $R = 2.11 \text{ cm}$, 长度 $l_c = 161.3 \text{ cm}$ 。优化的激光管长度不到 180 cm , 这令人感到意外。仔细分析计算数据发现, 激光头电感越小越好, 它可提升放电电流脉冲前沿, 加快激励激光能级。由于具有同轴结构的激光头电感值正比于激光管长度[(3)式], 而激光功率又与激活体积密切相关, 因此, 作为放电电源负载的激光管不能太短(或太长)。该激光管的半径和长度, 应当和该电源(闸流管内电感和分布电感总和 $L_1 = 0.34 \text{ }\mu\text{H}$) 有一个最佳匹配。

Table 2. Standard conditions (i. e. experimental conditions) of CVLs adopted by Carman *et al.*^[11]

	Tube radius R/cm	Optical cavity length l_c/cm	Charging voltage V_0/kV	Repet. freq. f/kHz	wall-temp $T_w/\text{ }^\circ\text{C}$	Gas press. P_g/Pa	Storage capacitor C_s/nF	Peaking capacitor C_p/nF	Equivalent inductance $L_1/\mu\text{H}$	Laser power P_l/W
Carman ^[11]	0.9	175	9	7.85	1517	4000	6	2	1	6
Mildren ^[16]	1.9	155	18.5	6	1600	4800	8			80

2) 表 1 最佳电压峰值(29.11 kV)和脉冲重复频率(5.78 kHz)均接近优化范围的最大值(31 kV, 6 kHz), 此时对应很大的输入功率 $P_e \approx 15.43 \text{ kW}$ 。与实验相比, 比较明显的是峰值电压提高很多, 增幅达 50% 左右。这说明只要匹配良好, 电源的大功率可耦合进激光管内。最佳储能电容 $C_s = 6.30 \text{ nF}$ ($C_s: C_p$ 约为 2:1), 它低于实验所选的值 8.9 nF。这一点与我们^[5]仅对铜蒸汽激光放电电路 4 个 LC 参数 C_s, C_p, L_1, L_p 进行优化的结果是一致的。在采用相对较小的储能电容的同时, 通过提高峰值电压来提高输入功率, 是提高激光功率的一条途径。

从机理上分析, 采用较大的储能电容, 看起来似乎有利于抽运电子获得更多能量。其实, 它将同时使 LC 振荡的弛豫时间延长。对于给定的重复频率, 脉冲间隔时间不变, 因而, 这将导致弛豫期间电子能量不能被及时释放, 使初始时刻的电子温度增加, 从而使激光下能态的初始粒子数密度过高, 甚至堵塞激光通道。这是储能电容太大反而使激光输出下降的主要原因。

3) 内管壁温度为 $1635 \text{ }^\circ\text{C}$ 时最佳, 明显高于实验值($1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 为外管壁温度, 一般比内壁温度低约 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)。因激光能级粒子数量级高达 $10^{13} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 且线性正比于温度的大小, 因此, 激光功率对温度的变化比较敏感。仔细分析激光能级粒子数, 发现在该最佳温度下, 由高温导致的激光能级亚稳态粒子数密度热布居作用比较小, 同时, 又能产生足够高的铜原子蒸汽压, 从而可维持较高的激光工作物质粒子数密度。因此, 温度的提高, 是优化提高

Carman^[11] 等曾做过详细的铜蒸汽激光动力学分析, 他们计算时采用的标准条件(即为实验条件)如表 2 所示。由表 2 可见, 在输出 6 W 激光功率的水平上, 他们的铜蒸汽激光器标准条件与本文的标准条件以及优化后的参数配置相差很大, 其中差别最大的是电压, 对激光输出敏感的等效电感 L_1 与本文表 1 的值也相差很大。对于激光管的长度, 则相差很小。Mildren^[16] 等人对动力学增强的铜蒸汽激光器的实验数据亦列于表 2 中, 他们的实验数据与本文优化的结果比较接近。

激光功率的一个重要原因。对于缓冲气体压强, 优化的结果则与实验值相当接近。

4) 在表 1 数据中, 最佳输入电压和脉冲重复频率都在其上限附近。如果继续增大输入电压和脉冲重复频率, 似乎还可以得到更大的激光输出。我们在输入电压和脉冲重复频率的上限值之外, 也进行了计算, 结果激光功率并没有增大。在计算过程中, 很容易产生粒子数密度为负这样没有物理意义的某个中间结果而使程序中断。同时也注意到: 当输入功率逐步增大并超过约 25 kW 时, 该计算机动力学模型的收敛误差也增大, 自洽特性变差。与激光功率相关的闸流管的经验数据, 例如: 开关滞后特征时间、内阻下降速率因数 K_{th} 等, 在更高功率下也没有可用的数据, 因此, 我们无法开展进一步的计算。关于这一点, 将留待今后的工作来解决。

结论 应用全局优化的遗传算法, 以最大输出激光功率为目标函数, 整体优化设计了百瓦量级铜蒸汽激光器的激光头以及放电电路等共 9 个参数。经优化后, 最佳激光管半径为 $R = 2.11 \text{ cm}$, 长度为 $l_c = 161.3 \text{ cm}$, 峰值电压为 $V_0 = 29.11 \text{ kV}$, 脉冲重复频率为 $f = 5.78 \text{ kHz}$, 内管壁温度为 $T_w = 1635 \text{ }^\circ\text{C}$, 缓冲气体压强为 $P_g = 9.92 \times 133.2 \text{ Pa}$, LC 参数为 $C_s = 6.30 \text{ nF}$, $C_p = 3.11 \text{ nF}$, $L_1 = 0.34 \text{ }\mu\text{H}$ 。优化后, 计算的激光功率可从原来的 91 W 增加到 172 W, 效率也可从 1% 提高到 1.11%。提高激光功率的一条途径是: 在采用相对较小的储能电容的同时, 提高输入电

率(主要是峰值电压)和管壁温度,同时,使激光头与供电电源相匹配。

参 考 文 献

- [1] Carman R J, Brown D J W, Piper J A. A self-consistent model for the discharge kinetics in a high-repetition-rate copper vapor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8): 1876~ 1895
- [2] Cheng C, Sun W. Study on the kinetic mechanisms of copper vapor lasers with hydrogen-neon admixtures. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1~ 3): 109~ 117
- [3] Carman R J, Withford M J, Brown D J W *et al.*. Influence of the pre-pulse plasma electron density on the performance of elemental copper vapour lasers. *Opt. Commun.*, 1998, **157**(1~ 6): 99~ 104
- [4] 程 成, 孙 威. 高重复率铜蒸汽激光的充氢机制. *物理学报*, 1997, **46**(5): 897~ 907
- [5] Cheng C, He S. Optimization of LC circuit parameters for obtaining maximum output of a copper vapor laser by a genetic algorithm. *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, 1999, **22**(5): 343~ 348
- [6] Withford M J, Brown D J W, Piper J A. Optimization of H₂-Ne buffer gas mixtures for copper vapor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(8): 1310~ 1315
- [7] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagat. Magazine*, 1995, **37**(2): 7~ 15
- [8] Weile D S, Michielssen E. Genetic algorithms optimization applied to electromagnetics: a review. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1997, **45**(3): 343~ 353
- [9] Weast R C, Astle M J. CRC Handbook of chemistry and physics, Florida: CRC Press. 1982. D94~ 96
- [10] Huba J D. NRL Plasma Formulary. Washington: Naval Research Laboratory. 1998. 55
- [11] 童景山, 李 敬. 流体热物理性质的计算. 北京: 清华大学出版社, 1982. 246~ 335
- [12] 冯 康. 数值计算方法. 北京: 国防工业出版社, 1978. 488~ 510
- [13] 程 成. 连续脉冲激光的计算机求解程序. *杭州师范学院学报*, 1995, (6): 24~ 29
- [14] 梁宝根, 陶永祥, 尹宪华等. $\phi 60$ mm 大口径铜蒸汽激光器光束“黑心”问题的研究. *中国激光*, 1990, **17**(激光器件专集): 38~ 42
- [15] 尹宪华, 陶永祥, 陈 林等. 大口径铜蒸汽激光器的研究. *中国激光*, 1997, **24**(4): 293~ 296
- [16] Mildren R P, Withford M J, Brown D J W *et al.*. Afterglow ground state copper density behavior in kinetically enhanced copper vapor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(12): 2275~ 2278

A Global Optimization and Design of a Copper Vapor Laser with 100 W Order for Obtaining Maximum Output

Cheng Cheng^{1), 2)} He Sailing^{1), 3)}

- 1), *Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027*
 2), *Department of Physics, Hangzhou Normal College, Hangzhou 310012*
 3), *Department of Electromagnetic Theory, Royal Institute of Technology, S-100 44, Stockholm, Sweden*

(Received 18 August 1999; revised 19 January 2000)

Abstract: Both the laser head and the discharge circuit of a copper vapor laser (CVL) are optimizngly designed and determined for obtaining a maximum output by applying a global optimizing genetic algorithm. One way of increasing the laser output is to increase the input power (in which the peak voltage is primary) and to raise properly the wall-temperature while maintaining a smaller storage capacitor compared the experimental value.

Key words: copper vapor laser; optimization; genetic algorithm