

大口径铜蒸气激光“黑心”的优化消除^{*}

程 成 何赛灵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心 杭州 310027;

杭州师范学院物理系 杭州 310012)

(1999 年 10 月 10 日收到 2000 年 2 月 13 日收到修改稿)

应用遗传算法,以激光束径向光强无“黑心”的最大输出功率为目标函数,整体优化设计了百瓦量级铜蒸气激光系统的激光头以及放电电路.脉冲放电电场的趋肤效应导致“黑心”,但可通过选择合适的激光管半径、长度以及 LC 电路参数等,来消除或改善“黑心”现象.同时,激光功率也可大幅度提高.

关键词:铜蒸气激光,黑心,遗传算法,优化

PACC:4255

1 引 言

自终止型铜蒸气激光(CVL)作为一种应用很广的高功率、高效率、脉冲重复频率连续可调的激光器,已经受到人们的注意.近年来,人们开展了许多关于 CVL 的研究工作,例如:建立并发展了自洽的 CVL 计算机动力学模型^[1-4],用遗传算法优化 CVL 放电电路的 LC 参数^[5], $H_2-HCl-Ne$ 混合缓冲气体对激光强度的影响^[6],新型短波长紫外铜离子激光^[7]等等.人们在寻求增大激光功率和提高效率的同时,也在寻求具有优良输出光束的途径.

发展高功率铜蒸气激光器的一条有效途径是增加激光增益体积,即增大放电管口径和长度.但是,增加长度要受到放电闸流管耐压的限制,增大激光管口径又会使电场的趋肤效应严重,从而使激光束的“黑心”变得明显.因而,如何在增加激光功率的同时,又能消除“黑心”,是一个重要的问题.由于铜激光器是一个光、电、热、气等组成的复杂的综合性系统,其中可以调节和变化的参量很多,因此,企图仅仅通过实验来寻找既能提高激光功率,又可消除“黑心”的最佳工作条件十分困难.

近年来,一些全局优化方法已经被应用于许多领域.与传统的梯度优化方法不同,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^[8,9],它的思想来源于自然界的基因组

合和优化原理.由于遗传算法思想新颖,全局搜索,并且计算机程序也较简单,因而近年来得到了很大的推广和应用.

文献^[5]以激光输出最大功率为目标函数,用遗传算法优化设计和计算了 CVL 放电电路的 4 个 LC 参数.本文在此基础上,考虑百瓦量级的整个 CVL 激光系统(包括激光头和放电电路两个部分),以无(或弱)“黑心”输出的最大激光功率为目标函数,应用遗传算法,对 CVL 系统的 8 个参数进行优化设计.经过数十代的优化计算,设计并确定了 CVL 激光头以及放电电路的最佳电气及几何参数等.

2 优化设计原理

2.1 CVL 放电电路和电场方程

典型的铜蒸气激光脉冲充电等效电路示于图 1.图 1 中, R_d 为激光头两个电极之间的等离子体电阻. C_d 为储能电容,由一高压源 DC 周期性地充电至 V_0 , C_p 为峰化电容,用来加快放电脉冲前沿. L_d 和 L_p 为系统的等效电感, L_d 主要包括充氢闸流管的内电感、分布电感等, L_p 主要包括具有同轴结构的激光头的电感等. 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.

在放电脉冲期间,图 1 中外高压脉冲源对 LC

^{*}国家自然科学基金(批准号:39970220)资助的课题.

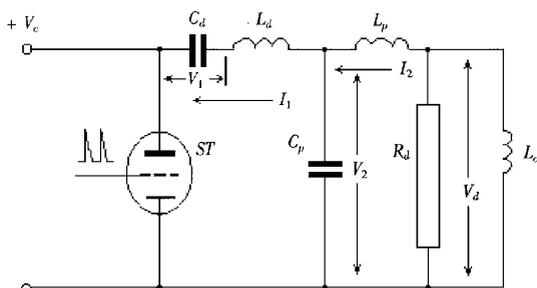


图1 典型的铜蒸气激光器放电等效电路图

等效电路放电的电路方程为

$$\frac{dI_1}{dt} = (V_1 - V_2 - I_1 R_{th1}) / L_d, \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = (V_2 - I_2 R_d) / L_p, \quad (2)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -I_1 / C_d, \quad (3)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = (I_1 - I_2) / C_p, \quad (4)$$

其中激光管内等离子体电阻为 $R_d = D / \int_0^R \sigma 2\pi r dr$

(D 为激光管电极间距, R 为激光管半径, σ 为等离子体电导率). 放电闸流管的电阻由两部分组成. 第一部分来自于等离子体主传导区. 在闸流管导通之后, 主传导区的电阻 R_{th1} 满足方程 $dR_{th1}/dt = -K_{R_{th1}} I_1^2 R_{th1}^3$ [1], 其中 $K_{R_{th1}}$ 为一个实验系数. 第二部分来自于闸流管阴极等离子体鞘层小的残留压降, 其电阻为 $R_{th2} = V_{th2}/I_1$ ($V_{th2} \approx 50V$). 闸流管的总电阻为 $R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$. (2) 式中穿过激光管的放电电流 I_2 与等离子体的微观参量由方程

$$I_2 = \int_0^R \sigma E_1 2\pi r dr = \int_0^R \frac{e^2 n_e}{m_e \nu'_e} E_1 2\pi r dr \quad (5)$$

联系起来, 其中 E_1 为激光管内纵向放电电场, n_e 为等离子体电子密度, ν'_e 为电子动量输运碰撞频率, e 为电子电荷, m_e 为电子质量. 注意到 n_e , ν'_e 和 E_1 都是空间和时间的函数. 方程 (5) 是联结外电路与激光管内的等离子体微观参量的一个重要的关系.

方程 (1—4) 初始条件的选择与实验相同, 即 $I_1 = I_2 = V_2 = 0$, $V_1 = V_0 = 20 kV$ (初始峰值电压). 初始条件确定之后, 即可由通常的数值求解法 (例如四阶 Runge-kutta 法) 求解.

对于高重复率、大口径的激光, 应当考虑电场的趋肤效应. 一般而言, 外电场并不等于激光管内的等

离子体电场. 在高压脉冲的作用之下, 激光管内建立的电场应当满足麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

其中 \mathbf{J} 为放电电流密度, μ_0 , ϵ_0 为真空磁导率和介电常数. 合并以上两式, 得

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \epsilon_0 \mathbf{E}. \quad (8)$$

对于高重复率、大电流脉冲放电, 可以忽略准静态的 $\nabla \cdot \mathbf{E} \approx 0$, 以及电场的偏导数项 $\partial \epsilon_0 \mathbf{E} / \partial t \ll \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, 有如下一个关于电场的类扩散方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \frac{\partial \sigma \mathbf{E}}{\partial t} = 0. \quad (9)$$

在柱坐标中, 方程 (9) 纵向电场的径向分布为

$$E(r) = E_w e^{-r/\delta_d}, \quad (10)$$

其中 E_w 为管壁处的电场, 趋肤深度 $\delta_d = (2/\mu_0 \omega \sigma)^{1/2}$ (ω 为电场脉冲变化的特征频率).

本文将电路方程 (1—4) 中关于放电电压的解 $V_d = I_2 R_d = E_w D$ 作为加在管壁上的放电电压, 电场沿激光管径向向内渗入, 即管径 r 处的纵向电场强度相对于管壁处以指数衰减的方式向内渗透.

2.2 应用遗传算法

遗传算法是一种全局搜索法 [8,9], 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, 优胜劣汰, 最后收敛成为某种最佳基因组合.

本文将已有的计算机模拟 CVL 动力学方程组 (见文献 [4]) 作为子程序的直接解, 然后, 在主程序中按以下 4 个步骤进行: 1) 对 8 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_c 、放电电压峰值 V_0 、重复频率 f 、管壁温度 T_w 、储能电容 C_d 、峰化电容 C_p 、等效电感 L_d) 分别进行二进制基因编码和解码, 并随机产生 $M_i = 600$ 条初始染色体. 2) 调用子程序, 先对每一条染色体代码进行二至十进制转换, 然后求解激光动力学微分方程组, 计算代价函数或即激光功率 P_1 . 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, 丢弃另一半差的, 使进入下一代循环的工作染色体数为 $M_w = 300$. 3) 采用比例选择法选择母本, 并由交叉算法产生新一代的染色体 [9,10]. 对交叉算

法 本文采用单点交配. 对每一对染色体, 交配点是随机产生的. 4) 新一代的子染色体基因产生突变, 即以很小的概率将 0, 1 分别突变成 1, 0, 突变概率选为 2%. 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 2) 至 4) 步, 直到最佳染色体, 或即有最大激光功率、同时没有“黑心”的最佳参数被找到为止.

3 计算与结果

在主程序中, 根据各个待优化参数的变化范围以及所需的精度, 以 6 个字节为一个基因, 一个基因对应于一组待优化参数的随机二进制编码, 各个基因按一定的顺序排列成一条染色体. 主程序中遗传算法所用的数据为循环代数 30, 基因数 8, 每条染色体字节数 48, 交叉交配点为随机, 突变概率 2%.

在子程序中, 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”^[11]数值求解, 可计算得到激光功率. 将激光功率作为目标函数输出到主程序中, 应用上述的遗传算法, 经过 30 代的叠代计算, 最后获得无(或弱)“黑心”时整个铜激光系统的最佳匹配参数.

在计算过程中, 这 8 个待优化参数的变化范围为激光管半径 $R = 1\text{—}8\text{ cm}$, 激光管长度 $l_c = 80\text{—}400\text{ cm}$, 初始电压峰值 $V_0 = 16\text{—}31\text{ kV}$, 脉冲重复频率 $f = 4\text{—}6.5\text{ kHz}$, 内管壁温度 $T_w = 1450\text{—}1750\text{ }^\circ\text{C}$, 储能电容 $C_d = 3\text{—}16\text{ nF}$, 峰化电容 $C_p = 0.1\text{—}8\text{ nF}$, 等效电感 $L_d = 0.1\text{—}2\text{ }\mu\text{H}$. 另一等效电感 $L_p \approx L'_p = \frac{\mu_0 l_c}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{R_M}{R}\right) \right]$, L'_p 为同轴结构激光头电感, μ_0 为真空磁导率, 外金属套半径取为 $R_M = R + 3\text{ cm}$. 上述参数各自对应的输入功率变化范围为 $P_c = 1.5\text{—}46.1\text{ kW}$. 缓冲气体氖压强取为 $P_g = 10 \times 133.3\text{ Pa}$. 同时, 定义关于输出激光强度 P'_1 的“黑心度”

$$Q = \frac{P'_1(r=0)}{P'_{1\max}(r)}, \quad (11)$$

Q 值的大小代表了“黑心”的强弱. 分别计算了 Q 值没有限制、 $Q = Q_0 > e^{-1} = 0.37$, $Q = Q_0 > 1 - e^{-1} = 0.63$, $Q = Q_0 > 0.8$, $Q = Q_0 > 1$ 时的绿激光跃迁和黄激光跃迁. 激光总功率 P_1 为绿黄光强 P'_1 沿激光管径向积分的两者之和. 表 1 和图 2 是在不同 Q_0 限制条件下, 优化后的最佳参数和激光强度的径向分布. 在 $Q_0 > 0.37$ 的限制条件下, 优化的激光功率与 Q_0 不作任何限制时的相同. 在 $Q_0 > 1$ 的限制条件下, 没有激光出现.

表 1 优化后 CVL 的最佳参数

Q_0 限制条件	激光管半径 R/cm	激光管长度 l_c/cm	电压峰值 V_0/V	脉冲重复频率 f/Hz	内管壁温度 T_w/Hz	储能电容 C_d/nF	峰化电容 C_p/nF	等效电感 $L_d/\mu\text{H}$	激光功率 P_1/W	计算的 Q 值
不限制	2.22	176.51	29556	5968	1615.1	5.68	2.61	0.37	171.9	0.49
$Q_0 > 0.63$	1.67	181.59	29556	6000	1646.8	5.48	2.11	0.40	170.7	0.66
$Q_0 > 0.80$	1.11	232.38	30000	5937	1654.8	4.24	0.98	0.94	123.7	0.81
实验 ^[12]	3.25	220	20000	5000	1500*	8.9	3.7	0.4	91	0.65

注: * 为外管壁温度.

优化计算的结果提供了丰富的信息, 限于篇幅, 这里仅讨论与“黑心”有关的部分.

1) 在图 2 中, 当不对 Q_0 作任何限制时, 优化后的激光功率最大可达到 $P_1 = 171.9\text{ W}$, 但此时 Q 值较小 ($= 0.49$); “黑心”较明显. 当限制条件为 $Q_0 > 1 - e^{-1} = 0.63$ 时, 优化的激光功率稍有下降, $P_1 = 170.7\text{ W}$, 对应的 Q 增大到 0.66; “黑心”减弱. 注意到实验的“黑心度” ($Q_0 = 0.65$, 表 1) 大小与该优化情形几乎相等, 但实验激光功率仅为 91 W. 当限制条件为 $Q_0 > 0.8$ 时, 激光功率下降较大, $P_1 = 123.7$

W, 但是 Q 增大到 0.81, 或即“黑心”已经很弱.

人眼对光强的敏感程度按指数规律变化. 如果把“黑心度” $Q = Q_0 = 1 - e^{-1} = 0.63$ 看成是肉眼可以察觉“黑心”的临界系数, 那么, $Q > Q_0$ 时就可看成为“黑心”不明显或无“黑心”, 其激光束的径向分布是良好的. 此外, 从表 1 中关于激光管半径与长度的数据, 可以清楚地看到: 激光管口径越大, “黑心”越明显; 反之则反. 同时, 当激光管口径变小时, 为了保持较大的激活体积和增大增益, 其优化的激光管长度也相应变长. 注意到表 1 中随“黑心度” Q 的提

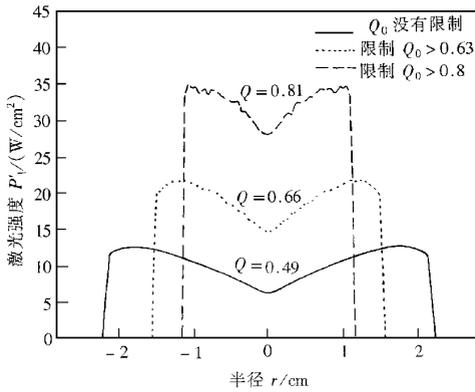
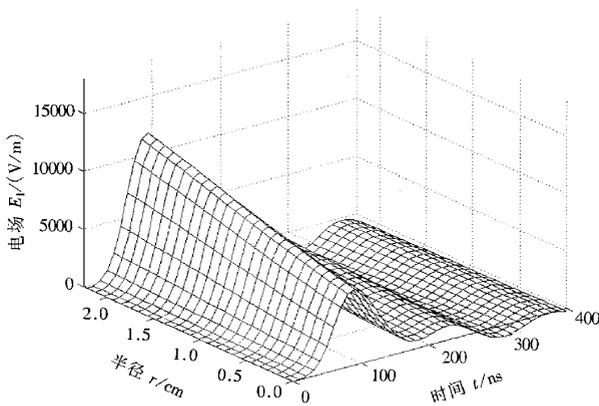
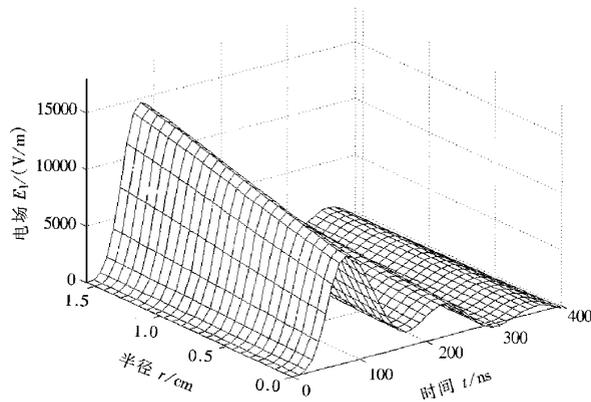
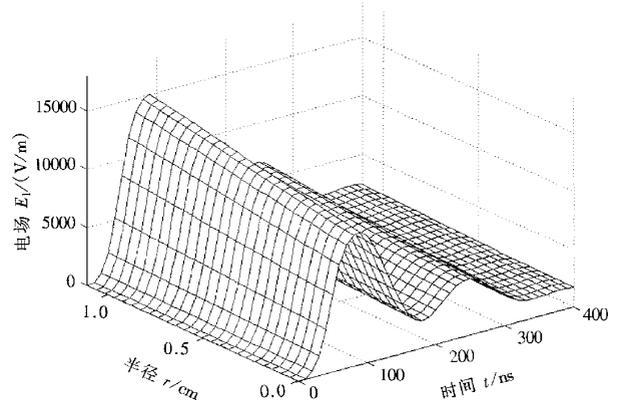


图2 优化的激光强度径向分布

高, C_d, C_p 均变小, 但两者之比值从 2.18 增大到 4.33, 等效电感 L_d 也逐渐增大。

2) 究其根源, “黑心”现象来源于放电脉冲电场的趋肤效应。图3至图5给出对应于表1中三个不同 Q_0 限制条件下优化计算的放电脉冲电场的时空变化。

图3 当 $Q=0.49$ 时电场的径向分布和时间变化图4 当 $Q=0.66$ 时电场的径向分布和时间变化图5 当 $Q=0.81$ 时电场的径向分布和时间变化

从图3至图5可以清楚地看到, 管径越大电场的趋肤效应越明显。图3中管轴处的峰值场强与管壁处之比值 $\eta = E_{r=0}/E_w = 0.55$ 。当管径减小到 1.11 cm 时, 比值增大到 $\eta = 0.76$ 。优化后 Q 值的变化规律(表1)与峰值电场比值 η 的变化规律一致。

看起来, 对于此类典型的轴向脉冲放电的激光装置, 趋肤效应不可避免。但是, 本文的工作表明, 仍然可以通过优化设计等手段, 将“黑心”降到最低。

3) 表1中最佳电压峰值 V_0 和脉冲重复频率 f 均接近预先给出的优化范围的上限(31kV, 6.5kHz), 此时对应也有很大的输入功率($P_e = C_d V_0^2 f / 2$)。这说明激光头只要与放电电源匹配良好, 电功率照样可以耦合进激光管内, 但输入功率也并不是越大越好。例如, 当限制 $Q_0 > 0.8$ 时, 最佳储能电容仅为 $C_d = 4.24$ nF, 它远低于优化范围的上限(16 nF)。从机理上分析, 增大储能电容, 看起来似乎有利于激光管内的电子获得更多的能量, 其实, 它将同时使 LC 振荡的弛豫时间加长。在一定的脉冲间隔周期中, 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升高, 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得不到大的输出功率的主要原因。

在优化计算中, 还需要说明以下几点:

1) 当输入功率在本文上述的一定范围内变化时, 我们的计算机动力学模型收敛性较好, 一般收敛误差 $< 5\%$ 。同时, 注意到当输入功率逐步增大并超过约 25 kW 时(虽然并无激光或激光很小), 计算机动力学模型的收敛误差也在增大, 自洽特性变差。其原因可能与我们采用放电闸流管的一些经验数据,

例如:开关滞后特征时间、内阻下降速率系数 $K_{R_{thl}}$ 等因素有关。由于没有在更高功率下放电闸流管的一些必要数据,因此,没有在更高输入功率的情况下进行计算。

2) 本文的工作与作者先前的工作^[5]相比,要复杂得多。一方面,这里有多达 8 个参数需要优化(文献 5 只有 4 个参数),另一方面,更重要的是,由于各个基因在较大范围内变化的随机性和突变性(不可以仅在一个小的范围内进行优化),使得子程序在计算过程中很容易出现诸如粒子数密度为负这样无物理意义的结果(这实际意味着此种基因组合根本不会出激光)。此外,计算结果应始终保持周期性时空自洽或基本自洽,子程序本身有若干次叠代循环,因此,计算的时间开销很大。如果一切顺利,在 Pentium III 450 M 计算机上,表 1 中每组数据的计算时间需 50 h 以上。

4 结 论

应用遗传算法,以激光束径向光强无(或弱)“黑心”的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气激光系统的激光头以及放电电路等 8 个参数。脉冲放电电场的趋肤效应导致“黑心”,但可通过选择合适的激光头和 LC 参数等来消除或减弱“黑心”。例如,当优化的激光管半径 $R = 1.11$ cm,长度 $l_c = 232.4$ cm,初始峰值电压 $V_0 = 30$ kV,脉冲重复频率 $f = 5937$ Hz,内管壁温度 $T_w = 1655$ °C,LC 参数为 $C_d = 4.24$ nF, $C_p = 0.98$ nF, $L_d = 0.94$ μ H,“黑心度”可从原来的 $Q = 0.65$ 增大到 0.81,激光功率也可从 91 W 增加到 123.7 W。如果

维持“黑心”强弱相当,也可通过优化来大幅度提高激光功率。例如,当优化的激光管半径 $R = 1.67$ cm,长度 $l_c = 181.6$ cm,初始峰值电压 $V_0 = 29.6$ kV,脉冲重复频率 $f = 6000$ Hz,内管壁温度 $T_w = 1647$ °C,LC 参数为 $C_d = 5.48$ nF, $C_p = 2.11$ nF, $L_d = 0.40$ μ H,激光功率可从 91 W 增大到 170.7 W。同时,效率也可从 1.02% 提高到 1.19%。

感谢教育部“长江学者奖励计划”浙江大学光学和电磁波研究中心特聘教授的支持与帮助。

- [1] R. J. Carman, D. J. W. Brown, J. A. Piper, *IEEE J. Quant. Electron.*, **30**(1994), 1876.
- [2] R. J. Carman, *J. Appl. Phys.*, **82**(1997), 71.
- [3] C. Cheng, W. Sun, *Opt. Commun.*, **144**(1997), 109.
- [4] C. Cheng, W. Sun, *Acta Physica Sinica*, **46**(1997), 987 (in Chinese) [程 成、孙 威, *物理学报* **46**(1997), 897].
- [5] 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].
- [6] M. J. Withford, D. J. W. Brown, R. J. Carman *et al.*, *Opt. Commun.*, **154**(1998), 160.
- [7] R. J. Carman, *Opt. Lett.*, **21**(1996), 872.
- [8] R. L. Haupt, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **37**(1995), 7.
- [9] D. S. Weile, E. Michielssen, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **45**(1997), 343.
- [10] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms* (Addison Wesley, New York, 1989), Chapters 1—4.
- [11] K. Feng, *Numerical Methods* (National Defense Press, Beijing, 1978), p. 488 (in Chinese) [冯 康, *数值计算方法* (国防工业出版社, 北京, 1978), 第 488 页].
- [12] X. H. Yin, Y. X. Tao, L. Chen *et al.*, *Chin. J. Lasers*, **24**(1997), 293 (in Chinese) [尹宪华、陶永祥、陈 林等, *中国激光* **24**(1997), 293].

OPTIMIZATION AND ELIMINATION OF “BLACK CENTER” OF A LARGE-BORE COPPER VAPOR LASER*

CHENG CHENG HE SAI-LING

(*Research Center for Applied Optics and Electromagnetic Wave, State Key Laboratory for
Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*
Department of Physics, Hangzhou Normal College, Hangzhou 310012, China)

(Received 10 October 1999; revised manuscript received 13 February 2000)

ABSTRACT

Applying a genetic algorithm and taking the maximum output as an objective function, a copper vapor laser with about 100 W output is optimized and designed for reducing the “black center” of the radial laser intensity. The “black center”, which results from the skin effect of the continuing pulsed field, is reduced and the output is increased significantly by optimizing the laser tube radius-length and the LC circuit parameters.

Keywords : copper vapor laser, black center, genetic algorithm, optimization

PACC : 4255

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 39970220).