

用遗传算法优化铜激光放电电路的 LC 参量

程 成^{1,2)} 何赛灵¹⁾

¹⁾ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,应用光学及电磁波研究中心,杭州 310027)
²⁾ 杭州师范学院物理系,杭州 310012)
(1999 年 4 月 2 日收到,1999 年 5 月 6 日收到修改稿)

将遗传算法应用于铜蒸气激光(CVLs)计算机动力学模型,以最大输出激光功率为目标函数,优化了 CVLs 放电电路的 LC 参量.优化后,储能电容为 7.26 nF(实验选 8 nF),储能电容与峰化电容之比为 1.08(实验选 3:1),两等效电感之比为 4:1(实验选 2:1).优化后激光输出功率增加了 15%.

PACC : 4255

1 引 言

铜蒸气激光(CVLs)是一种高功率、高效率的激光器,它已经被应用于工业、医学、舞台灯光以及其他许多领域.近年来,发表了许多关于 CVLs 的研究论文,例如:建立与发展了自洽的 CVLs 放电动力学模型^[1-4], H_2 -Ne 混合缓冲气体的优化^[5],杂质对新型 CVLs 的影响^[6],等等.

铜蒸气激光的抽运输出主要由外放电电路,尤其是放电电路的电感电容 LC 参量以及作为放电电路负载的激光头决定的.由于铜蒸气激光的动力学过程比较复杂,加上某些原子数据的不完备,因而缺少合适的理论指导.在实验中,人们通常不得不依靠经验,反复调整 CVLs 的 LC 参量或者其他电气参量,以期获得最大激光功率输出.这样,就有可能因经验或实验所限,遗漏了一些最佳的 LC 组合.换言之,一些 CVLs 并没有在最佳条件下工作,其损失不言而喻.

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^[7,8],它的思想来源于自然界的基因组合和优化原理.由于遗传算法的计算机程序比较简单,因而,近年来它得到了很大的推广和应用.本文首先简要描述了 CVLs 放电原理和遗传算法的思想.然后,将遗传算法应用于 LC 电路参量的优化,给出了一台实际 CVL 的最佳 LC 参量组合.其中 CVLs 动力学模型采用了我们以前建立的、并经实验修正的

计算机模型.最后,讨论了储能电容与峰化电容之比以及等效电感之比值对激光功率的影响.

2 原 理

2.1 放电电路

铜蒸气激光脉冲充放电电路的等效电路示于图 1 中.图 1 中 C_d 是储能电容,由一高压源 DC 周期性地充电至 V_0 , C_p 是峰化电容,用来加快放电脉冲前沿, L_d 和 L_p 是装置的等效电感, 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 是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.图 1 中实验所选电容值为 $C_d = 8\text{ nF}$, $C_p = C_d/3$.激光装置的等效电感量的大小是通过实测放电电压以及电流的时间行为来确定的,分别为 $L_d = 0.4\text{ }\mu\text{H}$, $L_p = 0.2\text{ }\mu\text{H}$.

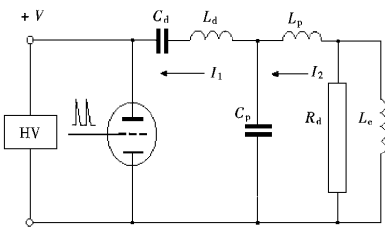


图 1 铜蒸气激光器放电等效电路

在放电脉冲期间,图 1 中的电路方程为

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

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

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

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

上式中激光管内等离子体电阻为 $R_d =$

$D / \int_0^R \sigma 2\pi r dr$ (D 为激光管的电极间距, R 为激光管半径, σ 为等离子体电导率).

Carman 等^[1]研究了激光管内气体被击穿的初始阶段闸流管的电流电压特征. 根据他们的讨论, 闸流管电阻由两部分组成. 第一部分来自于激光等离子体主传导区. 在闸流管导通之后, 主传导区的电阻 R_{th1} 满足 $dR_{th1}/dt = -K_{Rth1} I_1^2 R_{th1}^3$, 其中 K_{Rth1} 是一个经验系数, 对不同的闸流管有不同的数值. 本文取 $K_{Rth1} = 0.7$ 以便与实验相符. 第二部分来自于闸流管阴极鞘层小的残留压降, 电阻为 $R_{th2} = V_{th2}/I_1$ ($V_{th2} = 50$ V). 闸流管的总电阻为 $R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$.

图 1 中穿过激光管的放电电流 I_2 与等离子体的微观参量由以下方程联系起来:

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

其中 E_1 为纵向放电电场, 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 $I_1 = I_2 = V_2 = 0$, $V_1 = 20$ kV (初始峰值电压). 初始条件确定之后, 即可由稳定性和精度都比较高的隐式差分法求解方程.

2.2 CVLs 动力学模型描述

下面, 我们简要地叙述激光等离子体中的放电过程. 图 2 是铜原子的部分能级. 激光跃迁分别为 510.5 nm (绿激光) 和 578.2 nm (黄激光).

在外高压脉冲源的作用下, 激光管内的铜原子气体被击穿, 成为弱电离的等离子体. 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, 电子温度能升高到高于激光上能级 $^2P_{3/2, 1/2}$ (~ 3.8 eV) 的 ~ 5 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 (见图 2). 在场脉冲之后, 电子温度和电子密度缓慢降低, 粒子逐渐积累在激光下能级 (亚稳态 2D), 最终使粒子反转条件被破坏, 激光脉冲终止. 同时, 电子温度和电子密度继续下降, 弛豫直至下一个脉冲到来.

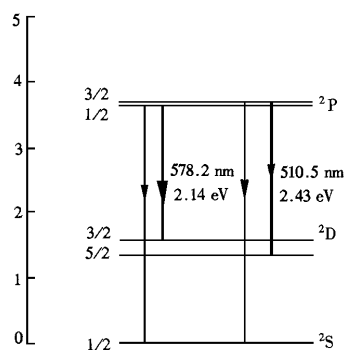


图 2 铜原子部分能级图 激光跃迁为 510.5 nm ($^2P_{3/2} \rightarrow ^2D_{5/2}$ 绿激光) 和 578.2 nm ($^2P_{1/2} \rightarrow ^2D_{3/2}$ 黄激光)

我们在文献 [3] 中, 发展了一组描述激光等离子体中各类粒子以及电子温度和电子密度、气体温度时空变化的激光动力学偏微分方程组, 并通过实验测得的激光脉冲波形及能量等, 修正了该微分方程组. 该模型在周期性放电的条件下是时空自洽的, 即: 计算的脉冲弛豫末期各粒子或能量的时空分布, 收敛于脉冲初期. 该计算机动力学模型也已用来数值模拟和研究更复杂的 CuBr 激光充氢机理^[4]. 应当说, 从其计算结果与实验的符合来看, 它还是比较成熟的. 具体的动力学微分方程可见文献 [3, 4]. 其中, 只需将氢置为零即可.

当计算了 CVL 计算机动力学模型中铜原子 Cu 的各个能级之后, 输出激光强度 I' 可由下式表达:

$$\frac{dP'_l}{dt} = P'_l \left(B \left(\text{Cu3} - \frac{g_3}{g_2} \text{Cu2} \right) - \frac{\alpha(1 - R_c)}{l_c} + \theta \right) + \delta h\nu c A_{32} \text{Cu3}, \quad (6)$$

其中 Cu3 和 Cu2 是分别激光上下能态 ($^2P_{1/2, 3/2}$, $^2D_{3/2, 5/2}$) 的粒子数密度, B 是受激辐射系数, R_c 是

长为 l_c , 每单位长度衍射损失 θ 的谐振腔输出镜的反射率 g_i 是第 i 能级的统计权重, A_{32} 是 $\text{Cu}3 \rightarrow \text{Cu}2$ 的自发辐射跃迁概率, δ 是自发辐射沿激光方向所张的立体角, h 是普朗克常量, ν 是激光频率, c 是真空中光速. 激光功率 P_l 可将 P'_l 沿激光管径向积分获得.

2.3 将遗传算法应用于 CVLs 模型

我们知道, 优化理论可以分成两大类. 一类是基于随机算法的全局搜索法, 另一类是以梯度算法为基础的局部搜索法. 遗传算法是一种全局搜索法^[7,8], 它将每一个参量分解成二进制编码(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.

本文将我们原先已有的 CVL 计算机动力学方程作为子程序的直接解. 然后, 在主程序中按以下四个步骤进行了计算:

1. 对四个 LC 参量(C_d, C_p, L_d, L_p , 见图 1) 分别进行编码和解码, 并随机产生 $M_i = 400$ 条初始染色体;
2. 调用子程序, 对每一条染色体估算代价函数. 即在解激光动力学微分方程组的基础之上, 计算由方程(6)决定的激光功率 P_l . 根据代价函数值的大小对所有染色体进行优劣排序, 保留好的二分之一, 丢弃另二分之一差的, 使得工作染色体数为 $M_w = 200$;
3. 采用比例选择法(见文献[8,9])选择母本, 并产生新一代的染色体. 比例选择法可由以下正比于其代价函数值概率的方程来描述:

$$P_i = \frac{P_l}{M_i/2} \cdot \sum_{n=1}^{M_i/2} P_n \quad (7)$$

式中 P_i 为第 i 条染色体对应的代价函数值. 在开始的几个循环中, 由于产生染色体时的随机性, (7)式中各个 P_i 相差很大. 经过若干代循环, P_i 的值逐渐趋于一致. 新一代的染色体则由交叉算法产生. 交叉算法也有许多种, 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, 重复进行上述的第二至第四步, 直到最佳

染色体, 或即有最大激光功率的最佳 LC 参量组合被找到为止. 图 3 给出了遗传算法应用于 CVL 模型的程序流程.

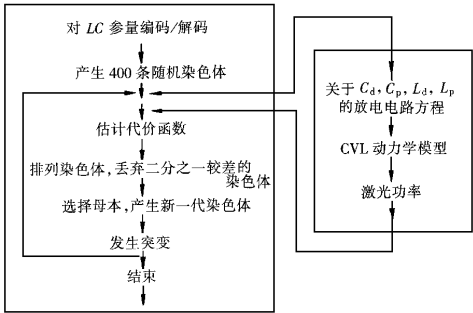


图 3 遗传算法应用于 CVL 模型的程序流程

3 数值计算与结果

为了能更清楚地看出 LC 参量对激光输出的影响, 本文假定除了 LC 参量本身之外, 所有的参量(包括恒压源对 C_d 的充电电压, 脉冲重复频率等)在优化计算过程中都不发生变化. LC 参量通过电路方程(1)–(4)影响激光功率. 激光管内存在有两种粒子: Cu 和 Ne . 考虑铜有四个能级: $\text{Cu}1(^2\text{S}_{1/2})$, $\text{Cu}2(^2\text{D}_{3/2, 5/2})$, $\text{Cu}3(^2\text{P}_{1/2, 3/2})$ 以及 Cu^+ ; 氖有三个能级: $\text{Ne}1(^2\text{P})$, $\text{Ne}0(^1\text{S})$ 和 Ne^+ . 分别计算绿激光跃迁和黄激光跃迁, 总功率为两者之和. 表 1 为计算所需的 CVL 激光头的有关参量和运行条件.

表 1 计算所需的 CVL 激光头的有关参量和运行条件

激光管长度 l/cm	激光管半径 R/cm	电极间距 D/cm	外金属套内半径 R_m/cm	充电电压峰值 V/kV	脉冲重复率 f/kHz	缓冲气体压强 P/Pa
100	2	90	15	20	5	30×133.3

基因是构成遗传算法的基本单元, 它对应于一组 LC 参量的二进制编码. 本文根据各个 LC 参量的变化范围, 以 8 个字节组成一个基因. 例如, 储能电容 C_d 的变化范围选为 0.5—30 nF(注: 实验中, 选 $C_d = 8 \text{ nF}$ ^[41]). 起初, 我们选了 C_d 变化的上限为 80 nF, 但是后来发现当 $C_d > 30 \text{ nF}$ 时, 始终不会出现激光. C_d 变化的步长约为 0.12 nF. 其他三个参量的变化范围分别为: C_p 为 0.5—30 nF(与 C_d 相同); L_d 和 L_p 为 0.05—4 μH . 表 2 为本文遗传算法所用的一些数据.

表 2 本文遗传算法的一些数据

初始染色 体数	循环工 作染色 体数	交配点	突变 概率	循环 代数	基因数	每个基 因字 节数
400	200	0.9	0.02	50	4	8

在实际的激光器中,调换两个电容比较容易.由于电感主要是由同轴结构的激光头和充氩闸流管组成,因而,对于已经制成的激光器,调换电感很不方便或不太可能.鉴于此,我们对下列四种情形进行了优化:1)四参量 C_d, C_p, L_d, L_p 优化;2)三参量 C_d, C_p, L_d 优化,保持 $L_p=0.2\text{ }\mu\text{F}$ (实验值);3)二参量 C_d, C_p 优化,保持 $L_d=0.4\text{ }\mu\text{F}, L_p=0.2\text{ }\mu\text{F}$;4)单参量 C_p 优化,保持 $C_d=8\text{ nF}, L_d=0.4\text{ }\mu\text{F}$ 和 $L_p=0.2\text{ }\mu\text{F}$.表3为情形1)时经优化的LC参量和对应的输出激光功率.在实验中,测得的激光功率为 $45\text{ W}^{[3]}$.未优化前,CVL模型模拟的激光功率为 44 W .从表3可知,LC优化后的激光功率增大为 50.83 W ,激光功率增加了15%.注意到优化的 C_d 值接近实验值($8\text{ nF}^{[4,10]}$),但是,优化的 C_p 与实验值($\sim 2.67\text{ }\mu\text{F}^{[4,10]}$)相差很大.而且,优化的电感之比为 $L_d/L_p=4:1$,而实验值为 $2:1^{[4,10]}$.对于情形2),优化的电容电感分别为 $C_d=7.48\text{ nF}, C_p=2.14\text{ nF}, L_d=0.44\text{ }\mu\text{H}$.对于情形3),优化的电容为 $C_d=7.25\text{ nF}, C_p=2.48\text{ nF}$.对于情形4), $C_p=6.46\text{ nF}$.注意到后三种情形优化的电容之比 $C_d/C_p\approx 3:1$,与它们相对应的输出功率均比情形1)为小.

表 3 优化后的最佳 LC 参量组合

储能电容 C_d/nF	峰化电容 C_p/nF	等效电感 $L_d/\mu\text{H}$	等效电感 $L_p/\mu\text{H}$	激光输出 功率 P_{out}/W
7.26	6.74	1.28	0.32	50.83

在重复频率为 f ,电压为 V 的外电源周期性的充放电电场作用之下,储能电容中所储存的平均功率为 $P=1/2C_dV^2f$ (f 和 V 在我们的计算中均为恒量).显然,功率 P 随 C_d 线性增加.看起来,这似乎有利于激光管内的电子获得更多的能量.其实,它将同时导致平均电子温度增加,尤其是使初始电子温度增加,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得不到大的输出功率的主要原因.

为了获得较大的功率输出,通常,人们总是想方

设法尽量降低激光装置的电感量.一般来说,降低电感可提升放电脉冲前沿,使电子温度和电子密度迅速增加,有利于激光能级的激励.装置的电感主要由激光头电感,闸流管内电感以及分布电感等组成的.如果略去激光管内等离子体电子密度的影响,具有同轴结构的激光头的电感可简单表示为^[11]

$$L_p' = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \left(\frac{R_m}{R} \right) \right), \tag{8}$$

其中 μ_0 为真空磁导率, R_m 为激光头外金属套的内半径, l 和 R 分别为激光管的长和半径.根据表1中的 l, R_m, R 数据,可知激光头的电感 $L_p' \approx 0.45\text{ }\mu\text{H}$.此外,一般闸流管内电感可取 $L_d' \approx 0.08\text{ }\mu\text{H}^{[12]}$.线路分布电感很小,可略去.如果互感不计,实验装置的总电感 $L_p' + L_d' \approx 0.53\text{ }\mu\text{H}$.然而,从表3中可知,最佳优化的系统总电感为 $L_d + L_p = 1.60\text{ }\mu\text{H}$,它比实验的($\approx 0.53\text{ }\mu\text{H}$)要大.为什么优化后系统的总电感反而比实验的大呢?我们认为:1)优化后,系统的两个等效电感优化比值应满足 $L_d:L_p=4:1$ 的要求.在实际的激光系统中,近似对应的电感比值 $L_d':L_p'=0.08:0.45$,它与优化比值的要求 $4:1$ 相去甚远;2)就激光头的电感而言,优化的电感值 L_p ($=0.32\text{ }\mu\text{H}$)确实比实际的电感值 L_p' ($=0.45\text{ }\mu\text{H}$)要小;3)外供电电路的电感 L_d 降低得太多,它将导致一个严重的后果,即外电路无法与作为其负载的激光头相匹配,外部能量实际上无法馈入激光管内.因此在设计或研制 CVLs 时,不但应当考虑降低激光头的电感,更重要的还应当考虑如何将外供电电路与激光头相匹配.

我们还计算了优化的激光输出功率随电容比 C_d/C_p 的变化(固定优化的电感 $L_d=1.28\text{ }\mu\text{H}, L_p=0.32\text{ }\mu\text{H}$),计算结果示于图4中.图4中的数据是通过逐点描绘的方法给出的,即对每一个 C_d/C_p 点,通过优化 C_d 值来寻找最大激光功率.图4中 C_d 的变化范围为 $6.74\text{--}12.76\text{ nF}$ (在 Pentium II 450 MHz PC 机上,计算每一个点所需的时间约为 6.5 h).从图4可知,在 $C_d/C_p=2.85$ 处,有一个局部最大.该比值接近于通常实验所选的 $3:1$ (见图1).然而,这是一个“局部最大”,而不是全局最大,全局最大出现在 $C_d/C_p=1.08$ 处.这是一个合理的结果.如果人们尚未用全局优化法,而仅仅凭经验去调整电容比,则很可能停留在这样一个“局部最大”中.

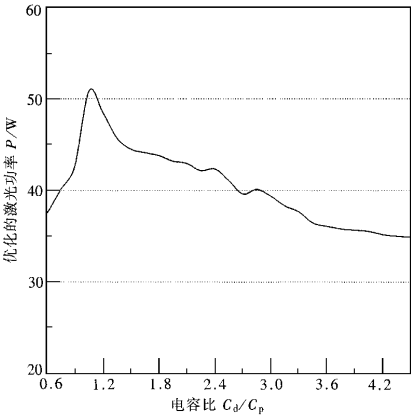


图 4 优化的激光功率随电容比 C_d/C_p 的变化 电感固定为 $L_d=1.28\ \mu\text{H}$; $L_p=0.32\ \mu\text{H}$

Tou 等^[13]通过实验研究了电容比 C_d/C_p 对 CuBr 激光输出功率的影响. 在激光管半径为 $R=5\ \text{cm}$ 的情况下, 他们的经验值为 $C_d/C_p=3:2$.

4 结 论

本文应用遗传算法, 优化了铜蒸气激光放电电路的 LC 参量组合. 对一台实际的铜蒸汽激光器, 最佳 LC 参量为 $C_d=7.26\ \text{nF}$, $C_p=6.74\ \text{nF}$, $L_d=1.28\ \mu\text{H}$, $L_p=0.32\ \mu\text{H}$, 对应的最佳电容比为 $C_d/C_p\approx 1.08$. 此时, 输出的激光功率比未优化前增加了 15%. 本文还研究了电容比 C_d/C_p 对优化的激光功率的影响. 下一步, 我们将进一步开展优化整个激光系统的工作, 包括优化外放电电压大小、电压脉冲重复频率、缓冲气体压强以及气体种类、激光头同轴结构的内外半径之比和长度, 等等, 以期研制出功率更大、效率更高、配置更合理、完全消除“黑心”的铜蒸气激光器.

作者(C. Cheng)感谢包玉刚和包兆龙基金会对他在 1998 年 11 月至 1999 年 2 月访问瑞典皇家工学院期间给予的资助.

[1] R.J. Carman ,D. J. W. Brown ,J. A. Piper ,*IEEE J. Quantum Electron.* , **30**(1994) ,1876.

[2] R. J. Carman *J. Appl. Phys.* , **82**(1997) ,71.

[3] C. Cheng ,W. Sun ,*Optics Commun.* , **144**(1997) ,109.

[4] C. Cheng ,W. Sun ,*Acta Physica Sinica* **46**(1997) 897 in Chinese [程 成、孙 威 ,*物理学报* **46**(1997) 897].

[5] M. J. Withford ,D. J. W. Brown ,J. A. Piper ,*IEEE J. Quant. Electron.* , **32**(1996) ,1310.

[6] M. J. Withford ,D. J. W. Brown ,J. A. Piper ,*J. Phys.* , **D29** (1996) ,315.

[7] R. L. Haupt ,*IEEE Anten. Prop. Mag.* , **37**(1995) ,7.

[8] D. E. Goldberg ,*Genetic algorithms* (Addison Wesley , New York ,1989) ,Chap. 1-4.

[9] D. S. Weile , E. Michielssen ,*IEEE Trans. Anten. Prop.* , **45** (1997) ,343.

[10] B. G. Liang ,Y. X. Tao ,X. H. Yin *et al.* ,*Chin. J. Lasers* (*Special Issue on Laser Devices*) **1**(1990) 4. 38. (in Chinese [梁宝根、陶永祥、尹宪华等 ,*中国激光*(*激光器件专集*) (1990) ,第 38 页].

[11] P. Blau ,J. Smilanski ,*IEEE J. Quantum Electron.* , **30**(1994) , 763.

[12] D. L. Yu ,Y. X. Tao ,X. H. Yin ,R. W. Wang ,*Microwave and Opt. Technol. Lett.* , **20**(1999) ,56.

[13] T. Tou ,W. Siew K. Tham *Jan. J. Appl. Phys.* (1999 , to appear).

DETERMINATION OF CAPACITANCES AND INDUCTANCES OF A DISCHARGE CIRCUIT FOR A COPPER VAPOR LASER BY USING A GENETIC ALGORITHM

CHENG CHENG^{a,b)} HE SAI-LING^{a)}

^{a)}*(Research Center for Applied Optics and Electromagnetic Wave ,State Key Laboratory for
Modern Optical Instruments ,Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China)*

^{b)}*(Department of Physics , Hangzhou Normal College ,Hangzhou 310012 ,China)*

(Received 2 April 1999 ; revised manuscript received 6 March 1999)

ABSTRACT

The LC parameters of the discharge circuit for a copper vapor laser are optimized by applying the genetic algorithm , in which the cost function is the maximum laser output power ,and using the computational kinetics model. The optimized store-energy capacitor is 7.26 nF (8 nF chosen in experiments). The ratio of the store-energy capacitance to the peaking capacitance is 1.08 (3:1 chosen in experiments) and the ratio of the two equivalent inductances is 4:1 (2:1 chosen in experiments). The optimized laser output power is increased by 15 % .

PACC : 4255