

# 3 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器多电极放电均匀性与阻抗匹配性

王 振<sup>1,2</sup>, 彭 浩<sup>1</sup>, 王 炜<sup>1</sup>, 吴 超<sup>1</sup>, 唐霞辉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430071

**摘要** 针对 3 kW 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的多组电极放电均匀性与阻抗匹配性问题, 采用麦克斯韦时域差分法构建了多组电极下的放电模型, 获得了最佳放电均压效果的均压电感值。以放电区等效阻抗值为基础结合均压电感值得到极板放电的总负载阻抗值。利用总负载阻抗值并通过 Smith 圆图获得与之对应的匹配网络阻抗参数, 使总负载阻抗与匹配网络阻抗之和为纯电阻 50 Ω, 实现射频输入功率的完全馈入。实际测得当放电均匀与阻抗匹配时驻波比为 1.18。研究表明, 在时域差分法模型中增加匹配的均压电感后, 极板整体放电均匀性波动从之前的 15% 降低到 2.8%, 且每组电极的放电均匀性差异控制在 0.3% 以内。放电实验表明, 在放电均匀且阻抗匹配情况下, 对应激光器输出功率为 3.1 kW, 且在 2 h 内波动可稳定在 ±1% 以内。

**关键词** 激光器; 3 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器; 多组电极放电模型; 均压电感; 放电均匀性; 阻抗匹配

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0314002

## Discharge Uniformity and Impedance Matching of Multi-Group Electrodes for 3 kW Radio Frequency Slab CO<sub>2</sub> Lasers

Wang Zhen<sup>1,2</sup>, Peng Hao<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Wu Chao<sup>1</sup>, Tang Xiahui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optics and Electronics Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup> School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430071, China

**Abstract** As for the discharge uniformity and impedance matching problems during multi-group electrode discharge at 3 kW high-power radio frequency (RF) slab CO<sub>2</sub> lasers, the multi-group electrode discharge model is built with the Maxwell time domain difference method and the shunt inductor value is gained under the optimum discharge uniformity efficiency. The impedance of total load in the discharge electrode is calculated with the combination of the shunt inductor value and the equivalent impedance of discharge area. The impedance matching network parameters are given with the Smith circle and the impedance of total load, and the sum of impedance of total load and matched network impedance is 50 Ω which makes the RF input power completely fed. The actual measured standing wave ratio (SWR) is 1.18 when the discharge uniformity and impedance matching are satisfied simultaneously. The results show that, with the matched shunt inductors added in the time domain difference method, the fluctuation of the overall discharge uniformity of electrode slab decreases from previous 15% to 2.8% and the discharge uniformity difference between each electrode group is within 0.3%. The discharge experiment shows that, under the discharge uniformity and impedance matching conditions, the laser output power of 3.1 kW within 2 h can be stable with the fluctuation within ±1%.

**Key words** lasers; 3 kW radio frequency slab CO<sub>2</sub> lasers; multi-group electrode discharge model; shunt inductors; discharge uniformity; impedance matching

**OCIS codes** 140.3470; 140.3425

**收稿日期:** 2016-11-14; **收到修改稿日期:** 2016-12-13

**作者简介:** 王 振(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事工业激光器及其应用方面的研究。E-mail: 15327261057@163.com

**导师简介:** 唐霞辉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率工业激光器及其应用方面的研究。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

3 kW 射频(RF)板条 CO<sub>2</sub> 激光器具有功率高、光束质量好等优点,广泛应用于激光切割、焊接等领域。目前,国内出光最大的射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器功率为 2.3 kW,主要采用单极板放电方式,放电极板长度已达 800 mm,是国内单体镀膜炉的最大容纳尺寸。国外射频板条激励 CO<sub>2</sub> 激光器功率已达万瓦量级,其中 3~6 kW 激光器主要用于工业加工,输出光束质量  $M^2$  可达 1.2,体积紧凑,放电稳定,采用多电极放电<sup>[1-9]</sup>。

为满足国内工业加工对 3 kW 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的需求,必须解决多电极放电均匀性与阻抗匹配性等相关因素的制约问题。关于前者的研究方法主要有一维传输线理论和多维麦克斯韦时域差分法,而关于后者的问题主要通过外置合适的匹配网络解决。

本文给出多组电极射频板条放电结构、放电区等值电路、阻抗匹配网络结构,利用麦克斯韦时域差分法构建相应的放电模型,获得均压效果最优时的均压电感值,进而得到放电区负载阻抗值,最后利用 Smith 圆图获得最优阻抗匹配网络参数值,使输入射频功率最大,驻波比(SWR)趋近于 1。

## 2 多组电极放电

### 2.1 多组电极射频板条放电结构

放电电极采用多组电极并配置均压电感,以两组电极为例,其结构如图 1 所示。射频电源通过 50  $\Omega$  传输线进行能量传输,并分别经过匹配网络后馈入到左右两组电极上。为便于后续仿真分析,假设射频电源经匹配网络后的馈入点位于图 1 所示位置,具体对应的实物照片如图 2 所示,其中红色圆圈内即为均压电感。实际射频馈入点位于图 2 的中间内侧位置,总馈入射频功率为 40 kW,假设均布在两个放电区。

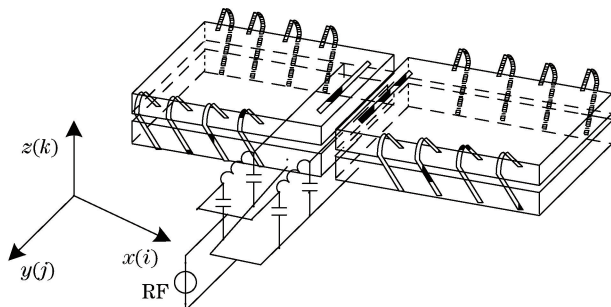


图 1 两组电极射频板条带均压电感的放电结构

Fig. 1 Discharge structure of two-group electrode RF slab with shunt inductors

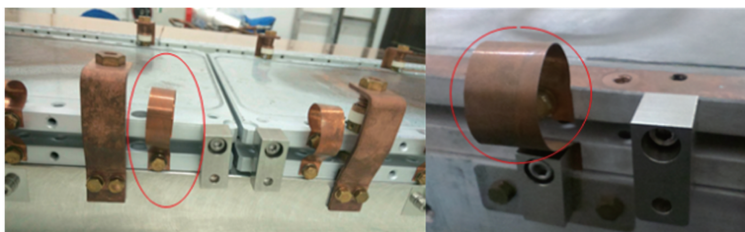


图 2 两组电极射频激励板条带均压电感实物照片

Fig. 2 Photographs of two-group electrode RF slab with shunt inductors

### 2.2 多组电极放电电路模型

#### 2.2.1 放电区等效电路

在射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器中,实际放电结构为射频电容放电,放电模式为  $\alpha$  放电,据文献[3,10-12]得到电极放电区等效电路如图 3 所示,其中  $C_s$  为电极放电区中鞘层放电等效电容值, $C_p$  和  $R_p$  分别为  $\alpha$  放电模式下电极放电区的等效电容和等效电阻值,三者的表达式<sup>[11-13]</sup>分别为

$$C_s = \frac{\epsilon A}{d_s}, \quad (1)$$

$$C_P = \frac{\epsilon A}{d - d_s}, \quad (2)$$

$$R_P = \frac{V_P^2}{S_{Pin} d A}, \quad (3)$$

式中  $d_s$  为鞘层总厚度,  $d$  为极板间距,  $A$  为放电极板面积,  $\epsilon$  为放电区介电系数,  $V_P$  为等离子区电压,  $S_{Pin}$  为注入功率密度。

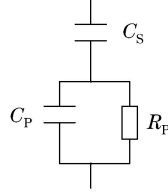


图 3 电极放电模型等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of electrode discharge model

单组极板放电区的总等效阻抗表达式为

$$Z_f = \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{\frac{1}{j\omega C_P} \times R_P}{\frac{1}{j\omega C_P} + R_P} = \frac{R_P}{1 + \omega^2 R_P^2 C_P^2} - j \frac{1 + \omega^2 R_P^2 C_P (C_P + C_s)}{\omega C_s (1 + \omega^2 R_P^2 C_P^2)}, \quad (4)$$

式中  $\omega$  为角频率, 与射频频率有关。考虑到电极放电介质电容  $C_c$  (采用介质放电时的电容值) 和均压电感感抗, 等效电路调整为图 4 所示, 则一个放电区负载的等效阻抗为

$$Z_L = \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{j\omega L_c} + \frac{1}{Z_f}}, \quad (5)$$

式中  $L_c$  为均压电感感抗值。

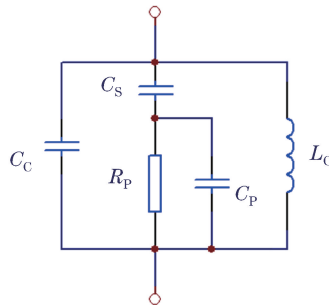


图 4 放电气体负载等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of discharge gas load

### 2.2.2 射频源与放电区负载的阻抗匹配

因为射频放电区的等效阻抗  $Z_f$  会随放电气压和放电气体配比的不同而变化, 所以实际的极板负载阻抗  $Z_L$  亦会随之变化。基于此, 本系统采用  $50 \Omega$  特征阻抗的射频电缆进行射频传输, 并在放电负载 (阻抗为  $Z_L$ ) 前分别接入一个阻抗匹配网络 (阻抗为  $Z_x$ ), 将对应的极板负载阻抗  $Z_L$  匹配成  $50 \Omega$  纯阻特性, 完成阻抗匹配, 其示意图如图 5 所示, 其中  $Z_c = 50 \Omega$  为传输线的特征阻抗,  $U_s$  为射频源,  $Z_s$  为射频源输出阻抗。相应的阻抗匹配网络采用  $\pi$  型结构, 如图 6 所示, 其中  $C_1$ 、 $C_2$  是匹配电容,  $L_m$  是匹配电感。

若  $Z_L$  已知, 则该匹配网络的参数设计可通过 Smith 圆图获得。忽略  $C_c$ ,  $Z_L$  主要由均压电感感抗  $L_c$  和极板放电区的等效阻抗  $Z_f$  确定, 其中  $L_c$  可在实现极板放电均匀化后确定。实现射频电源与极板放电匹配有以下步骤: 1) 获得当前极板放电区的等效阻抗  $Z_f$ ; 2) 进行极板均匀放电研究, 获得最佳均压效果下的均压电感值  $L_c$ , 并以此获得负载阻抗值  $Z_L$ ; 3) 通过 Smith 圆图获得一组最优  $\pi$  型结构匹配网络参数, 使匹配网络阻抗  $Z_x$  与负载阻抗值  $Z_L$  之和等于  $50 \Omega$  纯阻特性, 完成阻抗匹配。

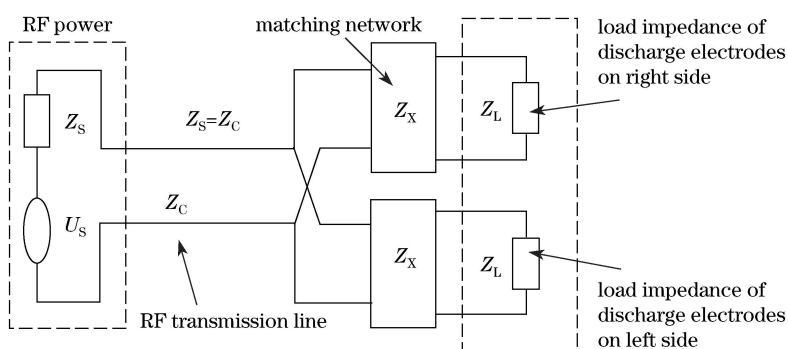


图 5 射频激励匹配网络示意图

Fig. 5 Schematic of RF excitation matching network

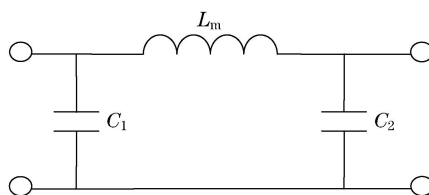


图 6  $\pi$ 型匹配网络结构

Fig. 6 Structure of  $\pi$ -type matching network

### 3 均压电感确定

要实现射频激励的阻抗匹配,首先需要确定放电区的均压电感值,因此建立放电模型仿真,通过对比方式获得最佳均压效果。

#### 3.1 二维(2D)多电极放电模型

采用 2D 放电模型研究放电均匀性相比一维模型而言,模拟精度会更高,同时均压电感的位置和数值大小对均压效果的影响更显著。

2D 放电模型的建立主要依据麦克斯韦公式,通过时域有限差分法(FDTD)<sup>[14]</sup>对其进行离散。据此需要将计算对象进行网格化,其中电场分量沿网格边分布,电磁分量分布于网格的各面中心,平行于各面的法线<sup>[15]</sup>,则多组电极放电区和极板间缝隙区域被切分为大小相同的多个网格,如图 7 所示。

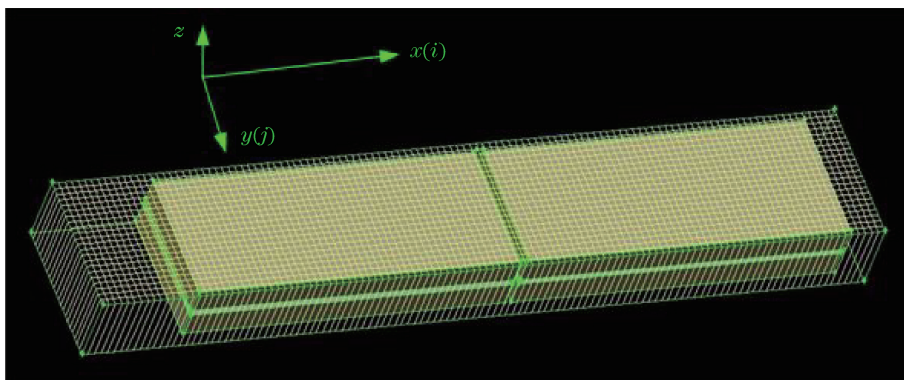


图 7 两组电极放电模型二维网格示意图

Fig. 7 2D grid map of two-group electrode discharge model

板条放电在只考虑  $z$  轴方向电场时的模型参考文献[16]。

为便于仿真,需要对放电电极板的边界进行相关处理。该边界涉及到两种情况,一是电极板之间间隙处物理参数的处理,二是电极板其他边界。对于第一种情况,考虑到在放电稳态下,利用间隙两侧电场强度相同则间隙区磁通量密度变化率相等的原则进行处理。对于第二种情况,依据边界上磁通量密度变化率为 0 来解决。

### 3.2 无配置均压电感下的数值仿真

仿真条件:假设  $Z_x + Z_L = Z_C = 50 \Omega$ , 输入射频功率完全馈入放电电极板。总输入射频功率为 40 kW, 每组放电区电极上注入 20 kW。射频频率为 81 MHz, 峰值电压为 9 kV。每块板条的尺寸为 495 mm × 200 mm, 两组极板之间的拼接间隙为 5 mm, 放电间距为 1.5 mm。网格单位长度为 1 mm, 因此共有 995 × 200 个网格, 两个放电电极分别位于  $x$  轴的 470~485 mm 与 510~525 mm。利用上述参数首先在没有外加均压电感下, 计算得  $Z_f = 0.5767 - 1.182j$ 。仿真得到两组电极平板放电在没有配置均压电感下的结果如图 8 所示。

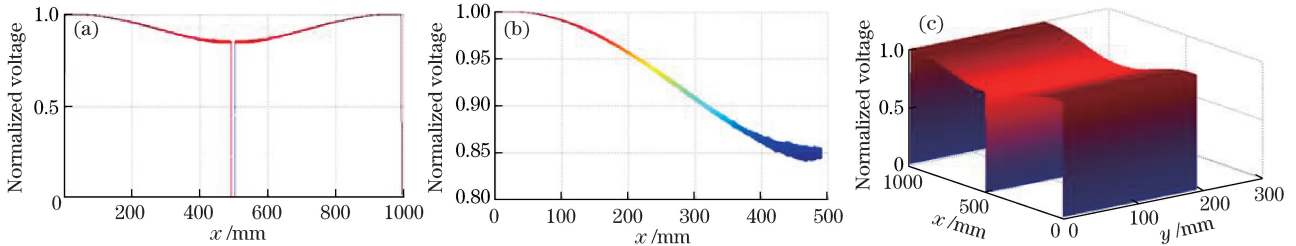


图 8 无配置均压电感下两组电极放电数值仿真结果。(a)  $x$  轴方向归一化电压分布;  
(b) 单组放电电极板(左侧)的  $x$  轴方向归一化电压分布;(c) 二维方向归一化电压分布

Fig. 8 Results of numerical simulation for two-group electrode discharge without shunt inductors.

- (a)  $x$ -direction normalized voltage distribution;
- (b)  $x$ -direction normalized voltage distribution of the left electrode group;
- (c) 2D normalized voltage distribution

从图 8 可知, 无配置均压电感时, 放电处于非均匀状态, 且左右两组极板放电幅度相差小于 0.3%; 其  $x$  轴方向最大与最小电压之差占整个幅值之比平均为 15%,  $y$  轴方向越接近中间间隙区波动较小, 远离中间间隙区时波动逐渐变大,  $y$  轴方向最大与最小电压之差占整个幅值之比的范围为 2%~0.1%; 同时在两组电极放电间隙处放电的电场强度为 0。

### 3.3 配置均压电感后的数值仿真

加入均压电感后, 在安装有均压电感的网格中, 其电流密度  $J_z(i, j)$  会因电感而发生变化, 进而影响到全部网格的电场强度  $E_z(i, j)$ 。电流密度修正公式为

$$J_z(i, j) = J_z(i, j) + \frac{E_z(i, j) \cdot d}{L(i, j)} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta S}, \quad (6)$$

式中  $L(i, j)$  为  $(i, j)$  位置的网格上均压电感值,  $\Delta t$  为时间步长,  $\Delta S$  为单个网格面积。在每组放电电极板上均安装了如图 1 所示 8 个相同的均压电感, 具体安装位置见表 1 (其中  $l_{01} \sim l_{08}$  是左边组放电电极板安装均压电感的位置,  $l_{11} \sim l_{18}$  是右边组放电电极板安装均压电感的位置), 则两组放电电极板总共安装有 16 个均压电感。因为加入了均压电感, 所以在  $x$  轴方向安装均压电感的位置处形成了电压波谷, 以及在安装两个均压电感的位置之间形成了电压波峰。通过对比波谷处  $y$  轴方向电压均匀性和波峰处  $y$  轴方向电压均匀性可以很好地得到二维平面的  $y$  轴波动幅度。基于此, 波峰处取  $x$  轴 200 mm 处, 波谷处取  $x$  轴 250 mm 处。通过同时变更所有 16 个均压电感值获得不同电感下  $x$ 、 $y$  方向电压均匀性比值的变化的, 具体参数见表 2。其中均匀性比值可表示为

$$R = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\%。 \quad (7)$$

表 1 均压电感安装位置

Table 1 Mounting positions of shunt inductors

		mm							
Direction		$l_{01}$	$l_{02}$	$l_{03}$	$l_{04}$	$l_{05}$	$l_{06}$	$l_{07}$	$l_{08}$
$x$		12	12	130	130	248	248	366	366
$y$		20	180	20	180	20	180	20	180
Direction		$l_{11}$	$l_{12}$	$l_{13}$	$l_{14}$	$l_{15}$	$l_{16}$	$l_{17}$	$l_{18}$
$x$		629	629	747	747	865	865	983	983
$y$		20	180	20	180	20	180	20	180

表 2 相同位置不同均压电感值下  $x$ 、 $y$  方向电压均匀性比值

Table 2 Discharge voltage uniformity ratio in  $x$  and  $y$  directions with different shunt inductor value at the same position

Shunt inductor value /nH	Voltage uniformity ratio $R$ /%			
	In $x$ direction (left electrode group)	In $x$ direction (right electrode group)	At the peak ( $x=200$ mm) in $y$ direction	At the valley ( $x=250$ mm) in $y$ direction
70	7.0	7.03	0.66	1.18
45	2.8	2.82	0.80	1.33
40	5.0	4.98	0.65	2.00
20	12.0	12.05	1.94	2.97

从表 2 可看出,增加均压电感后, $x$ 、 $y$  轴方向上的电压均匀性随着均压电感值的变化而变化,其变化导致  $x$  轴方向上放电电压非均匀性波动的范围为  $2.8\% \sim 12\%$ , $y$  轴方向上波动主要集中在安装电感的位置附近,范围为  $3\% \sim 0.6\%$ 。由表 2 可知,均压电感配置不合理有可能加重放电电压的非均匀状态,同时也可看出,在  $x$  轴方向上周期性放置均压电感后, $x$  轴边缘处会周期性出现波动,波谷出现在放置电感的位置,同时在中心放电区基本为平面状态,波动较小,并且两组放电极板相互之间无影响,呈现对称状态。通过对比可得,放电电压均匀性最好的状态是在均压电感值均为  $45$  nH 时,此时  $x$  轴方向上放电非均匀性被缩小至  $2.8\%$ , $y$  轴方向上的改变不大依然维持在  $1.3\% \sim 0.8\%$  之间。图 9 是均压电感在  $70, 45, 40, 20$  nH 下的电压分布图。

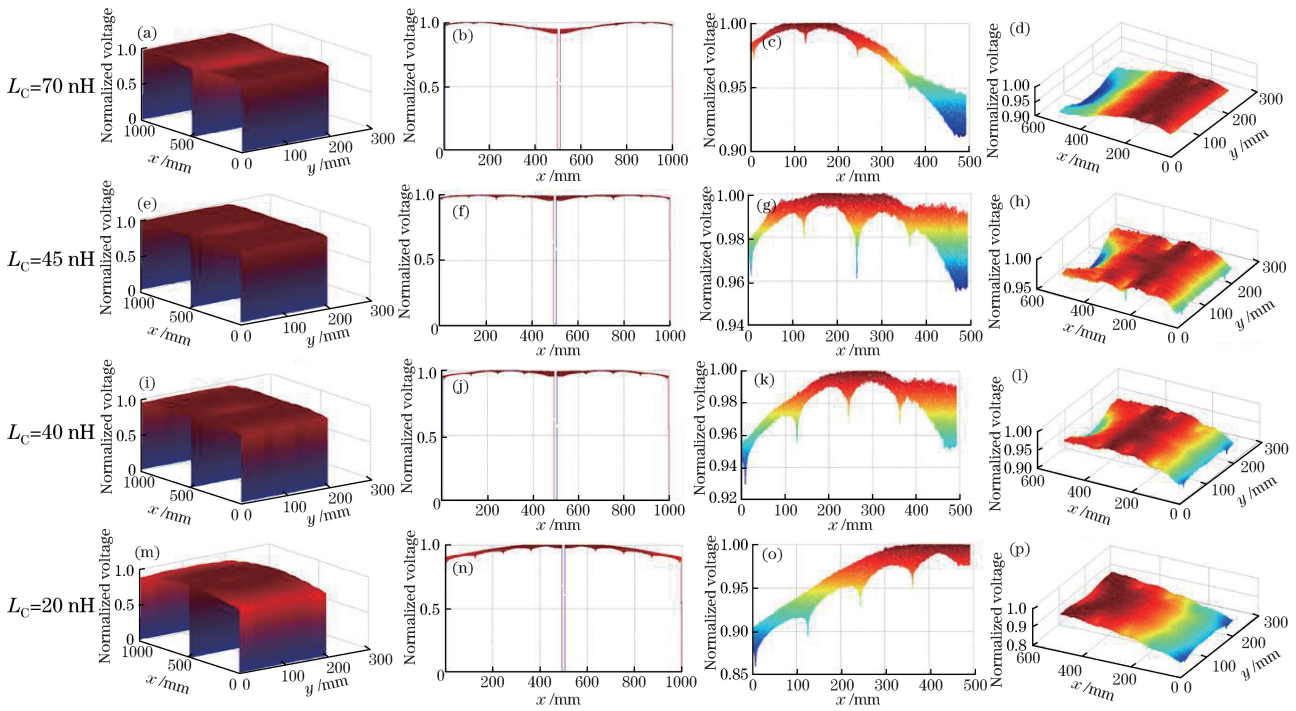


图 9 不同均压电感在两组电极放电下归一化电压分布仿真结果。(a) (e) (i) (m) 二维归一化电压分布;

(b) (f) (j) (n)  $x$  轴方向归一化电压分布;(c) (g) (k) (o) 单组放电极板(左侧极板) $x$  轴方向的归一化电压分布;

(d) (h) (l) (p) 单组放电极板(左侧极板)的二维归一化电压分布图

Fig. 9 Numerical simulation results of normalized voltage for two-group electrode discharge model with different shunt inductors.

(a) (e) (i) (m) 2D normalized voltage distribution; (b) (f) (j) (n)  $x$ -direction normalized voltage distribution;

(c) (g) (k) (o)  $x$ -direction normalized voltage distribution of left electrode group;

(d) (h) (l) (p) 2D normalized voltage distribution of left electrode group

#### 4 阻抗匹配

左右放电极板组是对称结构,在此以一边为例计算。由前述可知,单组极板放电阻抗  $Z_l = 0.5767 - 1.182j$ ,

最佳均压效果下的电感为 45 nH,因此集中表示的均压电感值  $L_c=5.625$  nH,则其中一组放电区的等效负载阻抗值  $Z_L=1.4978-1.4997j$ 。利用 Smith 圆图和匹配网络的结构,可以获得一组匹配为  $50 \Omega$  纯电阻下的理论参数: $C_1=393$  pF, $C_2=819.9$  pF, $L_m=11.9$  nH,驻波比为 1.0。匹配圆图如图 10 所示。

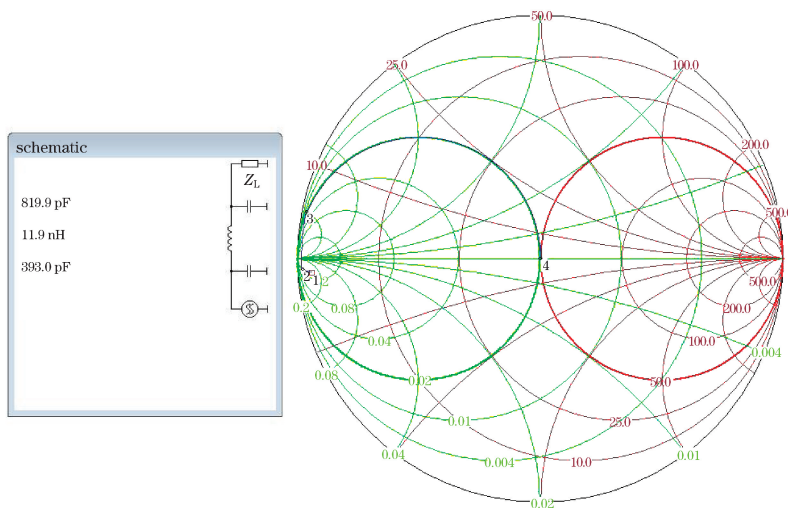


图 10 Smith 圆图

Fig. 10 Smith circle diagram

## 5 实验结果

参考前述分析,实际采用的匹配参数为  $C_1=390$  pF, $C_2=820$  pF, $L_m=12$  nH,构建的匹配网络实物图如图 11 所示,由 2 个电容和一个电感构成。图 11 只是其中一组放电电极板的匹配网络,另一个匹配网络与此结构相同。



图 11 放电电极板的匹配网络实物图

Fig. 11 Photograph of impedance matching network for discharge electrode slab

在上述匹配网络结构下,注入的气体配比为  $V(\text{He}):V(\text{N}_2):V(\text{CO}_2)=3:1:1$ , $V(\text{He})+V(\text{N}_2)+V(\text{CO}_2)=95\%$ , $V(\text{Xe})=5\%$ ,其中  $V(\cdot)$  表示体积分数,气压为 18000 Pa,在相同的电功率 40 kW 下进行实验。不同均压电感下的实验数据见表 3。

表 3 不同均压电感下的实验数据

Table 3 Experimental data at different shunt inductors

Shunt inductor value /nH	Reflecting power /W	Standing wave ratio	Laser output power /kW	Electro-optics conversion efficiency /%
45	280	1.18	3.10	7.75
70	680	1.30	2.48	6.20

由前述可知,因为阻抗匹配网络参数是在 45 nH 均压电感下计算得到的,考虑到实际参数有偏差,所以 99.3% 的输入射频功率被注入放电电极。同时由于此时均压效果较好,放电均匀性较高,因此获得的激光输

出功率较高,电光转换效率高。

但是在均压电感为 70 nH 时,极板放电负载阻抗变化为  $Z_L = 1.0369 - 1.4265j$ ,在阻抗匹配网络参数不变的情况下,阻抗匹配性变差,因此只有 98.3% 的输入射频功率被注入放电电极。同时,由于均压效果相比之前较差,因此输出的激光功率较低,电光转换效率降低。

图 12 是激光器在均压电感为 45 nH 下输出功率稳定性的实验结果。由图可知,在均匀放电且阻抗匹配的情况下,激光器输出功率为 3.1 kW,运行 2 h,功率波动小于 1%。

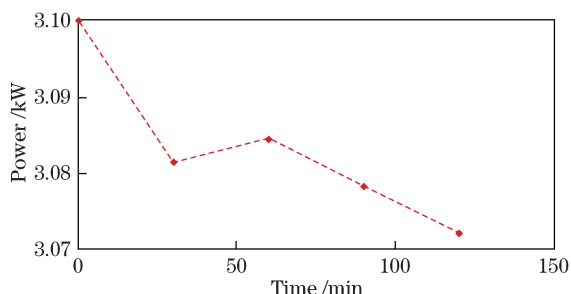


图 12 激光器在阻抗匹配且均压放电下输出功率稳定性

Fig. 12 Stability of laser output power under discharge uniformity and impedance matching conditions

图 13 是实际拍摄的两组电极板条在均压电感为 45 nH 下放电的情况。可知在安装有均压电感的情况下,放电均匀分布,且中间缝隙处无放电。

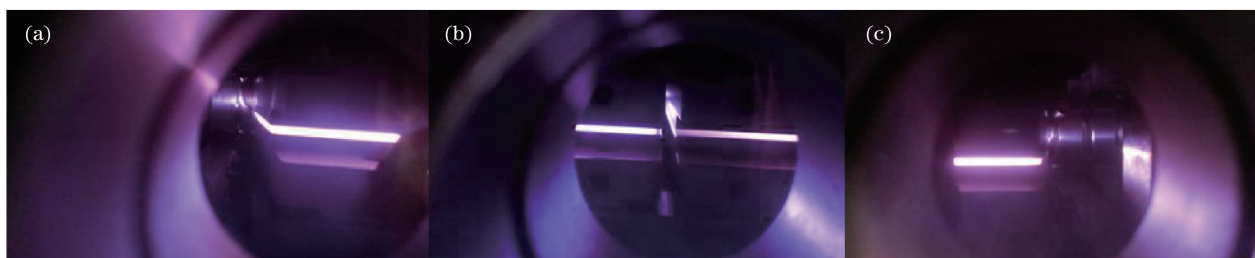


图 13 匹配电感下放置在两组电极(a)左侧、(b)中间和(c)右侧观察孔的放电实验图片

Fig. 13 Discharge experiment pictures captured through observation windows in (a) the left side, (b) the middle and (c) the right side of two-group electrodes with shunt inductors

同时需要指出的是,阻抗匹配程度对激光器的输出光斑模式影响不大。当均压电感在 70 nH 下输出激光功率为 2 kW 和均压电感在 45 nH 下输出激光功率为 3 kW 时,输出光束经光束整形系统<sup>[17]</sup>后 4 m 处的光斑如图 14 所示。由图可知,光斑输出模式变化不明显。

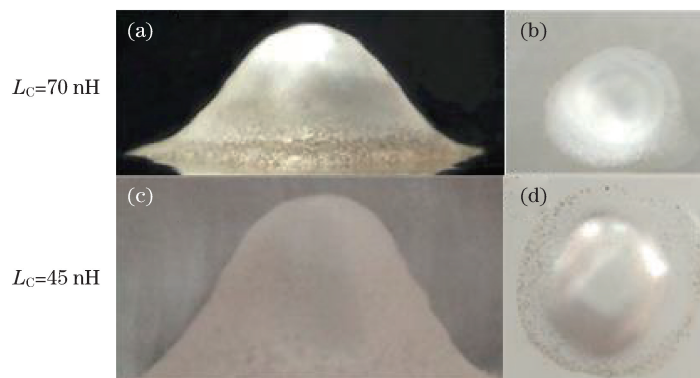


图 14 不同阻抗匹配和输出激光功率时,经过光束整形系统后的光斑。(a)(c)侧视图;(b)(d)俯视图

Fig. 14 Spot images after beam shaping system under different laser output powers and different impedance matching. (a)(c) Side view; (b)(d) top view



## 6 结 论

对 3 kW 多组电极射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的放电均匀性和阻抗匹配特性进行了研究,主要结论如下:

1) 利用 FDTD 构建多组电极放电数学模型,获得最佳均压效果下的均压电感值。以此为基础获得了极板放电的负载阻抗  $Z_L$ ,通过 Smith 圆图获得了阻抗匹配网络中各单元参数。通过实验说明该匹配过程可以有效分析 3 kW 以上大功率多组电极射频激励板条 CO<sub>2</sub> 激光器放电均匀与阻抗匹配特性,对大功率激光器的设计提供了新的设计流程;

2) 利用 FDTD 模型研究了有无均压电感下的多组电极放电仿真结果,说明配置合理的均压电感可以将  $x$  方向放电电压波动从 15% 缩小至 2.8%,且波动的波谷出现在放置电感的位置,放电电压分布从 V 型分布变成基本平直分布, $y$  轴由于长度有限,因此波动幅度不大,范围为 2%~0.2%;

3) 研究了不同匹配阻抗下的射频功率传输,结果显示,在匹配的均压电感下,可以获得最大输出激光功率为 3.1 kW,放电均匀性好,运行时间为 2 h,激光功率的波动始终维持在 ±1% 以内。

## 参 考 文 献

- [1] Strohschein J D, Bilida W D, Seguin H J J, *et al.* Enhancing discharge uniformity in a multi-kilowatt radio frequency excited CO<sub>2</sub> slab array[J]. Appl Phys Lett, 1996, 68(8): 1043-1045.
- [2] Lapucci A, Cangioli G. Phase-locked operation of a compact three-slab-sections radiofrequency discharge CO<sub>2</sub> laser[J]. IEEE J Quantum Elect, 1993, 29(12): 2962-2971.
- [3] Rao Hengrui. Analysis and design of electrode structure for high power slab waveguide CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.  
饶恒锐. 大功率板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器电极结构分析与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [4] Su Hongxin, Gao Yungui. Theoretical study on the waveguide coupling-loss of RF-excited slab CO<sub>2</sub> lasers[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2000, 17(3): 226-230.  
苏红新, 高允贵. 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器波导耦合损耗的理论研究[J]. 量子电子学报, 2000, 17(3): 226-230.
- [5] Hall D R, Baker H J, Villarreal F. High power RF excited planar waveguide carbon dioxide lasers for microprocessing applications[C]. SPIE, 2003, 5120: 23-29.
- [6] Li Gen, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.* The effect of electrode surface film on intracavity field eigenmodes for high power RF slab CO<sub>2</sub> laser[J]. Applied Laser, 2011, 31(3): 191-195.  
李 根, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 电极膜层对大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器腔内光场模式的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(3): 191-195.
- [7] Yang Weihong, Yuan Jinkun, Wang Du, *et al.* Study on electrode waveguide dielectric film for high power radio frequency slab CO<sub>2</sub> Laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0107001.  
杨卫红, 袁金坤, 王 度, 等. 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器电极波导介质膜研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0107001.
- [8] Wang Wei, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.* Influence of resonator mirror surfaces on output mode of radio frequency slab CO<sub>2</sub> lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0402004.  
王 炜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 腔镜面型对射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出模式的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0402004.
- [9] Zhao Lin, Susumu T, Zhang Yan, *et al.* Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406006.  
赵 琳, 塚本进, 张 岩, 等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406006.
- [10] Vitruk P P, Baker H J, Hall D R. The characteristics and stability of high power transverse radio frequency discharges for waveguide CO<sub>2</sub> slab laser excitation[J]. J Phys D Appl Phys, 1992, 25(12): 1767-1776.
- [11] Strohschein J D, Bailida W D, Seguin H J J, *et al.* Computational model of longitudinal discharge uniformity in RF-excited CO<sub>2</sub> slab lasers[J]. IEEE J Quantum Elect, 1996, 32(8): 1289-1298.
- [12] Liu Juan. Research on exciting characteristics of high power radio-frequency CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.  
柳 娟. 大功率射频 CO<sub>2</sub> 激光器激励特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [13] Lapucci A, Mascalchi S, Ringressi R. Parameters affecting the power distribution in the radio frequency discharge of large-area diffusion-cooled CO<sub>2</sub> lasers[J]. IEEE J Quantum Elect, 1998, 34(4): 616-621.

- [14] Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves engineering[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Xi'an: Xidian University Press, 2005.  
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [15] Weiland T. On the numerical solution of Maxwell's equations and applications in the field of accelerator physics[J]. Particle Accelerators, 1984, 15(4): 245-292.
- [16] Spindler G. Two-dimensional computational model of discharge uniformity in radio-frequency-excited CO<sub>2</sub> slab lasers with high aspect ratio electrodes[J]. IEEE J Quantum Elect, 2003, 39(2): 343-349.
- [17] Xiao Longsheng, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.* Shaping characteristics of output beam of 2 kW radio frequency slab CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402008.  
肖龙胜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出光束整形特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402008.