中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

射频轴快流CO_2激光器动态L型阻抗匹配网络设计

黄盼 赵崇霄 董祝君 赵振 潘其坤 冯育泽 张来明 郭劲

Design of dynamic L-type impedance matching network in RF excited fast axial flow CO_2 lasers

HUANG Pan, ZHAO Chong-xiao, DONG Zhu-jun, ZHAO Zhen, PAN Qi-kun, FENG Yu-ze, ZHANG Lai-ming, GUO Jin

引用本文:
黄盼, 赵崇霄, 董祝君, 赵振, 潘其坤, 冯育泽, 张来明, 郭劲. 射频轴快流CO_2激光器动态L型阻抗匹配网络设计[J]. 中国光学, 2025, 18(5): 1155-1163. doi: 10.37188/CO.2024-0096
HUANG Pan, ZHAO Chong-xiao, DONG Zhu-jun, ZHAO Zhen, PAN Qi-kun, FENG Yu-ze, ZHANG Lai-ming, GUO Jin. Design of dynamic L-type impedance matching network in RF excited fast axial flow CO_2 lasers[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1155-1163. doi: 10.37188/CO.2024-0096

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0096

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紧凑型波长自动调谐脉冲CO_2激光器

Compact pulsed CO_2 laser with wavelength automatic tuning

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 1007 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0107

机载宽温域CO_2激光器温控方法

Temperature control method of CO_2 laser operating in airborne wide temperature range

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 390 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0089

中红外Fe^{2+}:ZnSe激光器研究进展

Development progress of Fe^{2+}:ZnSe lasers

中国光学（中英文）. 2021, 14(3): 458 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0180

氧化型垂直腔面发射激光器的静电放电失效特性

Electrostatic discharge failure characteristics of oxide vertical cavity surface emitting lasers

中国光学（中英文）. 2022, 15(4): 722 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0226

2-μm MOPA结构全光纤激光器输出特性研究

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 399 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191

氧化型垂直腔面发射激光器的常见失效模式和机理分析

Common failure modes and mechanisms in oxide vertical cavity surface emitting lasers

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 187 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2021-0012

文章编号 2097-1842(2025)05-1155-09

射频轴快流 CO_2 激光器动态 L 型阻抗匹配网络设计

黄 盼[1,2], 赵崇霄[1*], 董祝君[1,2], 赵 振[3], 潘其坤[1], 冯育泽[1], 张来明[1], 郭 劲[1]
（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 空装驻长春地区代表室, 吉林 长春 130102）

摘要: 针对高功率轴快流 CO_2 激光器射频放电阻抗的匹配问题, 本文设计了低反射率、高动态匹配范围的阻抗匹配网络, 以实现射频激励轴快流 CO_2 激光器在不同放电结构下射频功率的高效利用。基于射频电路阻抗匹配理论, 构建了多电极等效电路模型, 提出向匹配网络中引入可调高压陶瓷电容的方法, 设计了适用于高功率射频激励轴快流 CO_2 激光器的动态 L 型匹配网络。模拟的动态 L 型匹配网络可向 16 根放电管注入 60 kW 射频功率, 在 12.81 Ω~49.94 Ω 总负载阻抗范围内反射率小于 1%。搭建了单管射频放电实验装置, 实验测得动态 L 型匹配网络在 4 kW 注入功率下反射率小于 1%, 与仿真结果相符。上述结果表明引入可调高压陶瓷电容的动态 L 型匹配网络能够实现高动态范围内的阻抗匹配, 基本满足高功率射频激励轴快流 CO_2 激光器匹配电路的设计要求。

关 键 词: 轴快流 CO_2 激光器; 射频激励; 阻抗匹配; L 型动态匹配
中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0096 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0096

Design of dynamic L-type impedance matching network in RF excited fast axial flow CO_2 lasers

HUANG Pan[1,2], ZHAO Chong-xiao[1*], DONG Zhu-jun[1,2], ZHAO Zhen[3], PAN Qi-kun[1], FENG Yu-ze[1], ZHANG Lai-ming[1], GUO Jin[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Air Force Equipment of the Military Representative Office in Changchun, Changchun* 130102, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhaochongxiao@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to solve the problem of RF discharge impedance matching of high-power fast axial

收稿日期: 2024-05-24; **修订日期:** 2024-06-25
基金项目: 国家自然科学基金(No. 62335016); 吉林省自然科学基金(No. 20220101207JC); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目(No. SKLLIM2209); 中国科学院青年创新促进会(No. 2021216); 吉林省青年成长科技计划项目 (No. 20230508139RC)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62335016); Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20220101207JC); State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter Project (No. SKLLIM2209); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2021216); Youth Growth Technology Project of Jilin Province (No. 20230508139RC)

flow CO_2 lasers, an impedance matching network with low reflectivity and high dynamic matching range was designed to realize the efficient utilization of RF excited fast axial flow CO_2 lasers under different discharge structures. Based on the impedance matching theory of RF circuits, a multi-electrode equivalent circuit model was constructed, a method of introducing tunable high-voltage ceramic capacitors into the matching network was proposed, and a dynamic L-type matching network suitable for high-power RF excited fast axial flow CO_2 lasers was designed. The simulated dynamic L-type matching network can inject 60 kW RF power into 16 discharge tubes and achieve a reflectivity of less than 1% in the range of total load impedance of 12.81 Ω~49.94 Ω. A single-tube RF discharge experimental device was built, and the reflectivity of the dynamic L-type matching network was measured as less than 1% at 4 kW injection power, which was consistent with the simulation results. It is proved that the dynamic L-type matching network with adjustable high-voltage ceramic capacitors can achieve impedance matching in the high dynamic range, which meets the design requirements of high-power RF excited fast axial flow CO_2 laser matching circuits.

Key words: fast axial flow CO_2 laser; RF excitation; impedance matching; L-type dynamic matching

1 引 言

射频激励轴快流 CO_2 激光器除广泛应用于激光切割、焊接等领域外，由于其激发的锡等离子体在极紫外 (Extreme Ultraviolet, EUV) 波段具有高光光转换效率的优势，也成为 LPP-EUV (Laser Produced Plasma-Extreme Ultraviolet) 光源中驱动激光器的重要组件。用于量产极紫外光刻机光源要求在进入曝光系统前的中间焦点 (Intermediate Focus, IF) 处的 EUV 输出功率达 200 W 以上[1-4]。这就要求光源系统中的驱动 CO_2 激光功率要达到 20 kW 量级。目前通常采用主振荡功率放大（Master Oscillator Power Amplifier, MOPA）结构的 CO_2 激光器实现万瓦级以上脉冲 CO_2 激光输出。为实现高功率 CO_2 激光输出，需要提升 MOPA 结构中射频激励轴快流 CO_2 激光放大器的激光增益。CO_2 激光放大器的激光增益与 CO_2 激光放大器的注入电功率呈正相关，目前国内对于射频气体放电研究不足，缺乏对于工程实际应用的高效稳定电功率注入技术研究，其中针对阻抗匹配网络匹配范围控制技术，优化 CO_2 激光放大器中的阻抗匹配网络以降低反射功率，可实现射频激励轴快流 CO_2 激光放大器的高效功率注入[5]。为满足工程应用对于万瓦级 CO_2 激光的需求，本文将通过优化匹配网络结构及元件参数提高激光器射频功率的注入效率。

阻抗匹配网络是设置于射频电源和产生等离子体激光增益的电极结构间的匹配电路，通过电感或电容元件的串并联将电源阻抗与等离子体阻抗相匹配从而提升放电注入效率。通常采用变压器型、L 型、Π 型、T 型等匹配网络[6-9]，其中 L 型和 Π 型匹配网络由于结构和匹配范围上的优势适用于负载为阻容特性的射频激励轴快流 CO_2 激光器。目前德国通快、印度拉贾拉曼纳先进技术中心以及华中科技大学均将 L 型匹配网络运用在射频激励轴快流 CO_2 激光器上，其中：德国通快和华中科技大学在网络中均使用双电感元件，在万瓦级和 10 kW 量级射频激励轴快流 CO_2 激光器上将射频放电反射功率分别降低至 1% 以下和 1.64%，工作时功率沉积分别达到 ~20 W/cm^3 以及 10.5 W/cm^3，峰值功率沉积分别可达~30 W/cm^3 以及 13.5 W/cm^3[10-11]；印度拉贾拉曼纳先进技术中心研制的 2 kW 级射频激励轴快流 CO_2 激光器则在并联回路中使用电容元件实现了~0.23% 的功率反射以及~13 W/cm^3 的功率沉积，峰值可达~30 W/cm^3[12]。

国内外射频激励轴快流 CO_2 激光器所采用的阻抗匹配网络均使用固定电路结构[13]，而射频介质阻挡放电产生的等离子体阻抗通常会随着气体配比、气体压力、气体温度、射频注入功率等条件而改变[14]，在实际装调工作时，激光器往往需要

调整对应工作条件, 从而导致阻抗匹配失调以及功率反射增大。为实现射频功率注入效率最大化, 本文建立模型计算射频介质阻挡放电等离子体的电学特性, 并在设计匹配网络过程中, 引入可调高压陶瓷电容, 优化电路结构, 以适应等离子体阻抗的变化, 大幅提升 L 型匹配网络的阻抗匹配范围。

2　射频放电模型及阻抗匹配原理

2.1　射频放电模型

射频激励的轴快流 CO_2 激光器单放电模块如图 1(彩图见期刊电子版)所示。在工作过程中启动风机使混合气体在玻璃管中快速流动, 维持放电区域的温度稳定。两个放电电极紧贴玻璃管外壁放置, 分别与阻抗匹配网络输出级和地级相连接。射频电源 RF 输出端通过阻抗匹配网络与放电电极正极相连, 放电电极正极与地级间形成射频电场激励 CO_2 混合气体产生等离子体。

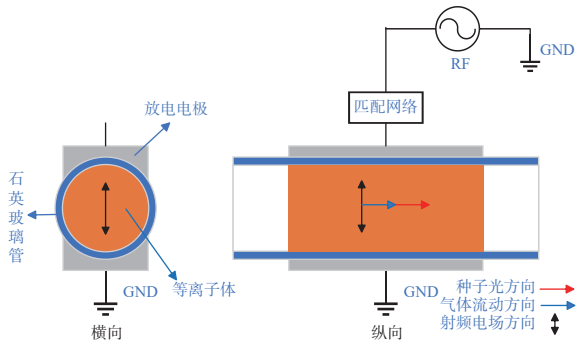

图 1　单管放电模块

Fig. 1　Single-tube discharge module

为了提高射频放电注入效率, 设计适用于激光器放电结构的阻抗匹配网络, 首先需要建立激光器整体放电结构的等效电路模型。放电管气体介质中电子在角频率为 ω 的电场下的运动方程为:

$$m\frac{\mathrm{d}\upsilon_D}{\mathrm{d}t}+m\upsilon_D\nu=-eEe^{i\omega t}\quad , \qquad (1)$$

其中 m 和 e 分别是电子质量和电荷值, υ_D和ν分别表示电子的漂移速率和碰撞频率, 这个方程的解υ_D可用于表示放电电流 $I(t)$

$$I(t)=ne^2AUe^{i\omega t}/m(i\omega+\nu)d\quad , \qquad (2)$$

其中 n、A、U、d 分别表示电子密度、放电面积、电压幅值和放电距离。由此可以得到等离子体阻抗:

$$Z=R_d+iX_d=\frac{md(\nu+i\omega)}{ne^2A}\quad , \qquad (3)$$

其中, $R_d=\dfrac{md\nu}{ne^2A}$, $X_d=\dfrac{md\omega}{ne^2A}$。

射频放电 CO_2 等离子体中电子碰撞频率ν的数量级通常在 10^{11}[15], 而 13.56 MHz 射频电源的角频率$\omega\approx8.5\times10^7$ rad/s, 由此可知射频放电下等离子体阻抗的$R_d\gg X_d$, 因此本文将射频放电等离子等效电路模型近似为纯电阻。

综上所述, 图 1 中的放电结构在放电时表示为等离子体电阻与电极电容串联, 如图 2 所示。

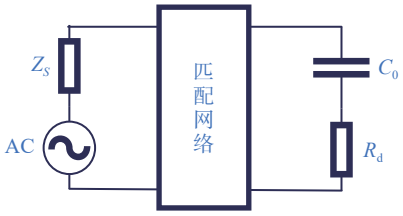

Fig. 2　Laser equivalent circuit model

图 2 中 C_0 表示电极间石英玻璃介质的等效电容, 可以通过式 (4) 计算

$$C_0=\varepsilon_rA/4\pi kl\quad , \qquad (4)$$

其中ε_r和 k 分别表示石英玻璃的相对介电常数以及静电力常量, l是电极间玻璃总厚度。

图 2 中的等离子体电阻可以通过放电管中理想气体方程$P=Nk_BT$, 以及混合气体维持自持放电的阈值条件$E/N\geqslant3.5\times10^{-16}\mathrm{V\cdot cm^2}$, 计算得到[11]。因此, 射频激励轴快流 CO_2 激光器的放电结构等效电路模型阻抗可以通过式 (5) 表示:

$$Z=R_d-\frac{1}{\omega C_0}j=\left(3.5\times10^{-16}\right)^2\frac{P^2d^2}{P_Lk_B^2T^2}-\frac{4\pi kl}{\omega\varepsilon_rA}j\quad . \qquad (5)$$

2.2　阻抗匹配理论

根据射频电路阻抗匹配理论知, 当负载阻抗和射频电源阻抗(通常为 50 Ω)匹配时, 电路功率传输效率最高。基于阻容特性的射频放电等离子体模型, 必须要引入匹配网络才能使负载阻抗 $Z=R_d+1/j\omega C_0$与电源输出阻抗 $Z_S=50\,\Omega$匹

配，同时要尽可能减少匹配网络中的电阻性功耗元件。

本文采用如图 3 所示的 L 型阻抗匹配网络以实现阻抗匹配[16]。

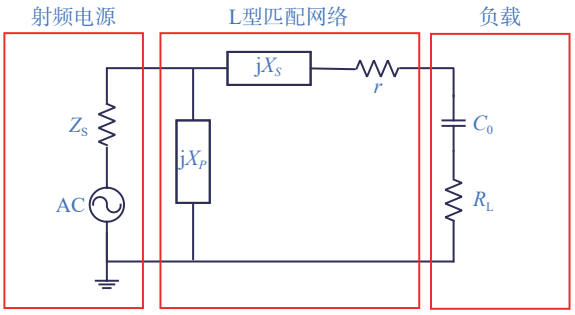

图 3 放电系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the discharge system

图 3 中，AC 表示射频电源，Z_s 表示 50 Ω 电阻，射频轴快流 CO_2 激光器放电结构由等效电路模型电容 C_0 以及电阻 R_L 组成。由于负载带有容性 C_0，故负载的串联回路 jX_S 应采用感性元件以中和 C_0 阻抗并补偿并联支路 jX_P 所带来的电抗影响。对于负载电阻小于 50 Ω 的情况，可采用正 L 型匹配网络进行匹配，其由两条阻抗为 jX_S 与 jX_P 的支路呈 L 型组合构成，两条支路均包含高压可调电容以提升阻抗匹配范围。其中 jX_P 支路中的电阻 r 用于计算匹配网络中所有的功率损耗，包括接触电阻损耗，欧姆损耗和辐射损耗等。在相关文献中[15]，以电感附带电阻为主的欧姆损耗要远大于接触电阻损耗和辐射损耗两者总和，因此本文在计算中只考虑电感的欧姆损耗。欧姆损耗与电感值大小有关，可以用 Q 值表示它们的关系。L 型匹配网络中，元件 X_S 与 X_P 若为电感，则取值为正，若为电容，则取值为负。为方便计算，可以通过比例系数 a 与 b 表示：

$$\begin{cases} r = X_S/Q \\ X = \dfrac{1}{\omega C_0} \\ X_S = aX \\ X_P = bX \end{cases} . \tag{6}$$

负载阻抗 Z_L 和电路整体阻抗 Z_H 表达式为：

$$\begin{cases} Z_L = R_L - Xj \\ Z_H = \left(\dfrac{1}{Z_L + r + aXj} + \dfrac{1}{bXj} \right)^{-1} \end{cases} . \tag{7}$$

由于阻抗匹配的复共轭条件要求 Z_H 的实部为 50 Ω，虚部为 0，那么有：

$$\begin{cases} \dfrac{(R_L + r)b^2X^2}{(R_L + r)^2 + (a + b - 1)^2X^2} = 50 \\ (R_L + r)^2 = (1 - a - b)(a - 1)X^2 \end{cases} . \tag{8}$$

综上所述，对于已知负载阻抗，通过式 (6)~式 (8) 可以计算确定 a 与 b 的数值，从而确定 L 型匹配网络所需的元件参数。阻抗匹配网络的反射率 η 以及驻波比 $VSWR$ 可以通过电压反射率 S 表示，假设射频电源输出功率为 P_0，负载功率为 P_L，则有

$$\begin{cases} S = \left| \dfrac{50 - Z_H}{50 + Z_H} \right| , \\ P_L = P_0(1 - S^2)\dfrac{R_L}{R_L + r} , \\ \eta = S^2 \dfrac{R_L}{R_L + r} . \\ VSWR = \dfrac{1 + S}{1 - S} . \end{cases} \tag{9}$$

电极两端电压幅值相比于射频电源输入阻抗匹配网络的电压幅值的增益 G 可由式 (10) 表示，放电管中功率沉积 W_L 则由式 (11) 表示，其中 V 为放电体积。

$$G = \left| \frac{(1 + S)Z_L}{Z_L + r + jX_S} \right| . \tag{10}$$

$$W_L = P_L/V . \tag{11}$$

3 阻抗匹配网络设计及实验

本文在第 2 节中建立了射频气体放电时单根放电管的等效电路模型，并通过阻抗匹配理论推导了 L 型匹配网络的电路元件及电学特性参数表达式。本节将在此基础上计算由 16 根内径为 24 mm、外径为 28 mm、电极长度为 300 mm 气体放电管组成的并联系统的等效阻抗，并设计能够实现 60 kW 射频电源且与并联系统间功率反射率小于 1% 的阻抗匹配网络，表 1 给出了设计所用到的激光器工作参数。

表 1　激光器工作参数

Tab. 1　Laser operating parameters

电源功率	射频频率	内径	外径	电极长度	电极面积	工作气压	工作温度
60 kW	13.56 MHz	24 mm	28 mm	300 mm	5.37×10^{-3} m^2	10 kPa	400 K

3.1　阻抗匹配网络设计

通常条件下射频激励轴快流 CO_2 激光器工作气压在~10 kPa, 温度约为 400 K, 当射频电源输出功率为 60 kW 时, 平均每根放电管的注入功率约为 3.75 kW, 将玻璃厚度 4 mm 以及放电面积 5.37×10^{-3} m^2 这些参数带入式 (5) 可以得到单根射频放电管等效阻抗为

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{\omega C_1 j} = 618\Omega - j283.5\Omega \quad . \qquad (12)$$

对于 16 根放电管并联的情况, 整体阻抗为

$$Z_L = \frac{Z_1}{16} = R_L - Xj = 38.6\Omega - j17.7\Omega \quad . \qquad (13)$$

在式 (6)~式 (8) 的基础上, 计算得到的 L 型匹配网络元件参数, 如图 4(a), 4(b) 所示, 其对应的解分别为 $a = -0.186$, $b = 5.186$ 和 $a = 2.180$, $b = -5.209$。其中图 4(a) 阻抗匹配网络由于在负载端串联电容 C_S 而排除, 因为呈现阻容特性的负载应当通过串联感性元件进行阻抗中和后再进行阻抗匹配。

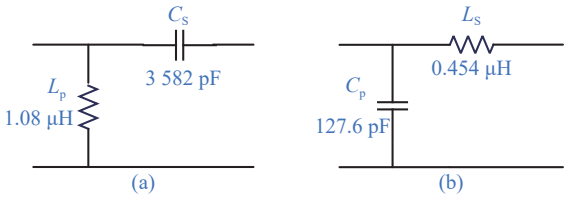

图 4　L 型阻抗匹配网络。(a) a=−0.186, b=5.186; (b) a=2.180, b=−5.209

Fig. 4　L-type impedance matching network. The corresponding solution of Eq. (8): (a) a=−0.186, b=5.186; (b) a=2.180, b=−5.209

对于图 4(b) 阻抗匹配网络, 根据式 (9) 中间第 3 个式子由 Matlab 模拟计算得到的反射率约为 0.2%, 电压增益为 0.967。其中电感 Ls 附带欧姆损耗可由 Q 值(8.5k)计算得到, 为 10^{-2} Ω, 其远小于等离子体电阻。考虑到等离子体等效电阻 R_L 会随射频功率、气体配比、气压等因素发生改变, 模拟得到的阻抗匹配网络 (图 4(b)) 的反射率、功率沉积、电压增益如图 5(彩图见期刊电子版)所示。模拟结果表明反射率 η 以及电压增益 G 均在阻抗匹配网络 (图 4b) 所设计的匹配电阻 38.6 Ω 附近有最小值, 而且当等离子体电阻 R_L 满足 31.6 Ω≤R_L≤47.3 Ω时, 匹配网络反射率 η≤1%, 电压增益 G 变化范围为 0.967≤G≤1.074。根据辉光放电阈值条件计算得到的辉光放电所需的电压阈值为 1 522 V, 电压增益显示了等离子体两端电压与射频电源输出端电压的比值。由此可知, 当射频电源输出端电压大于 1 574 V, 满足设计的阻抗匹配网络在电压增益最小值 0.967 时, 等离子体两端电压大于 1 522 V 的辉光放电电压阈值。通过式 (9)~式 (11) 可知功率沉积 W_L 与反射率 η 成反比, 在匹配网络反射率小于 1% 时, 放电管功率沉积大约维持在 27 W/cm^3。

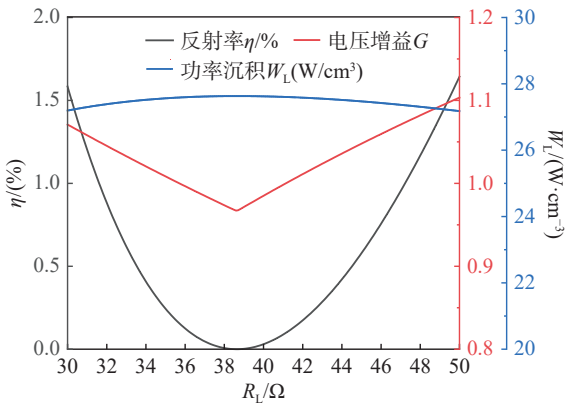

图 5　反射率 η/电压增益 G/功率沉积 W_L 与等离子体电阻 R_L 关系曲线

Fig. 5　Relationship curve of reflectivity η/voltage gain G/power deposition W_L versus plasma resistance R_L

为了使 L 型匹配网络能够与更大范围的等离子体电阻匹配, 阻抗匹配网络设计中可采用可调电容替代定值电容, 或者增大电感数值并在其串联线路上增加可调电容, 使得阻抗匹配网络的中心匹配阻抗动态可调, 从而提高匹配网络的适应性。动态匹配网络的匹配原理可表述为将图 4(b)中的静态元件电感 Ls 及 C_P 更换为图 6 中 $L1$+$C2$、

*C*1 的可调结构，其中 *L*1=*Ls*+*Ls*1。电感 *Ls*1 与可调电容 *C*2 中心值达谐振，那么通过调节 C2 可使等效电路阻抗在以 *Ls* 为中心的范围内调节，C1 负责调节整个电路的等效电阻。通过引入高压可调陶瓷电容的方法优化阻抗匹配网络图 4(b)，得到的动态 *L* 型匹配网络如图 6 所示。动态匹配网络与图 4(b) 静态匹配网络有着完全等效的阻抗变换能力。图 7(彩图见期刊电子版)展示了调节电容 *C*1 以及 *C*2 过程中匹配网络等效阻抗以及系统反射率的变化情况。电容 *C*1 与 *C*2 分别影响电路等效电阻以及电抗的匹配范围。可调电容 *C*1 以及 *C*2 的可调范围为 8 pF~400 pF，大幅提升了阻抗匹配网络的匹配范围，使匹配网络的中心阻抗 Z_L 由 38.6 Ω − 17.7 Ω*j* 这一单一固定值变为实部为 12.81 Ω~49.94 Ω，虚部为 −120.1 Ω*j* ~0 的可调范围。选用更大可调范围的电容 *C*1 以及 *C*2 将提高阻抗匹配网络的动态匹配范围。

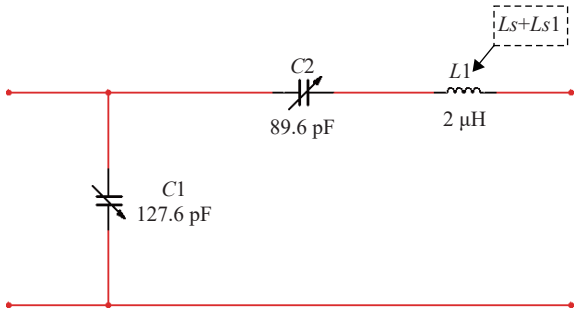

图 6 动态 L 型阻抗匹配网络

Fig. 6 Dynamic L-type impedance matching network

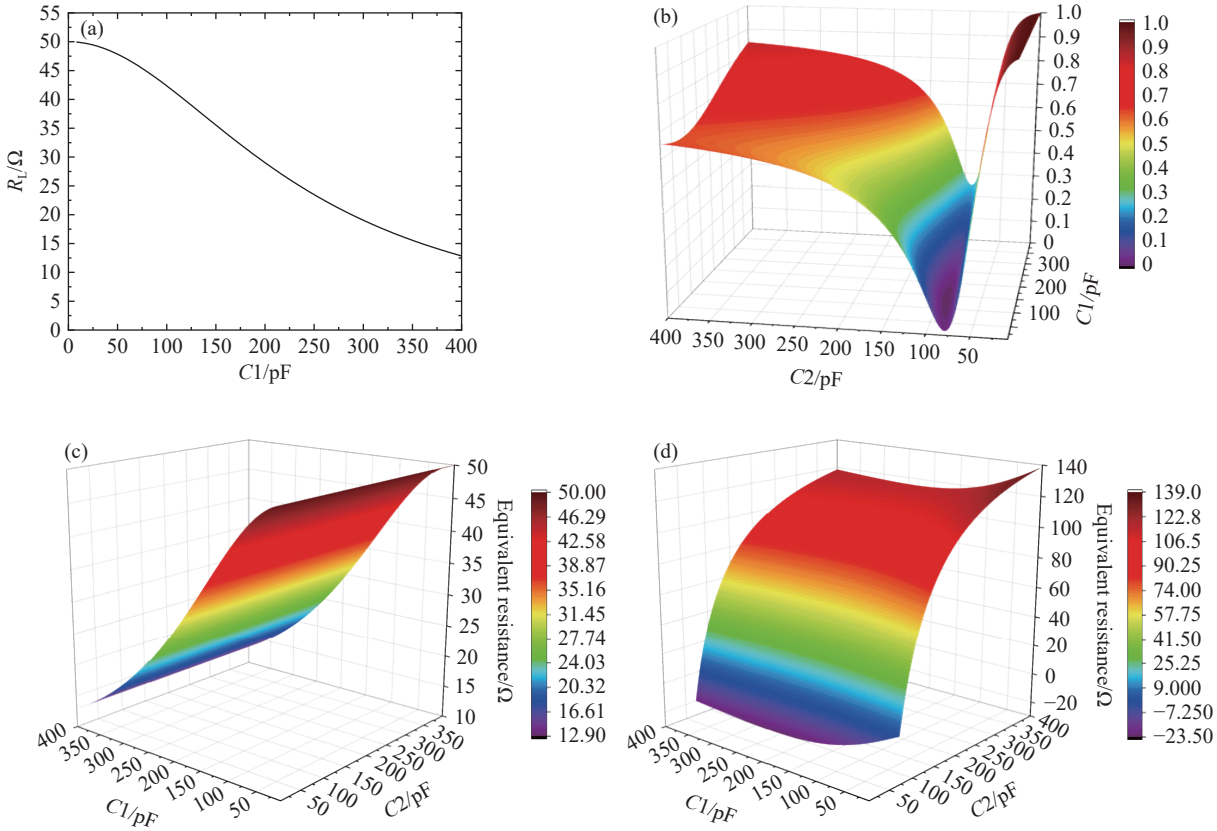

图 7 动态匹配网络。(a) C1-等效电阻调节曲线；(b) 反射率调节曲面；(c) 等效电阻调节曲面；(d) 等效电抗调节曲面

Fig. 7 Dynamic matching network. (a) C1-equivalent resistance adjustment curve; (b) reflectance adjustment surface; (c) equivalent resistance adjustment surface; (d) equivalent reactance adjustment surface

图 7(b) 中反射率曲面的零点位于 C_1=127.6 pF，C_2=89.6 pF 处，与图 6 中动态阻抗匹配网络元件参数相对应，实际应用时可以参照反射率曲面来调节电容大小以实现阻抗匹配。动态阻抗匹配网络的驻波比如图 8(彩图见期刊电子版)所示。驻波比 *VSWR*=1 的位置与反射率曲面零点对应。通过史密斯圆图验证的动态阻抗匹配网络如图 9(彩图见期刊电子版)所示。史密斯圆图展示了动态阻抗匹配网络在等离子体电阻分别为 20 Ω、30 Ω、38.6 Ω、40 Ω时依然能够通过可调电容的

调节作用完成匹配, 其中图 9 模拟的反射率在设计阻抗为38.6 Ω−17.7 Ωj处近似为 0。

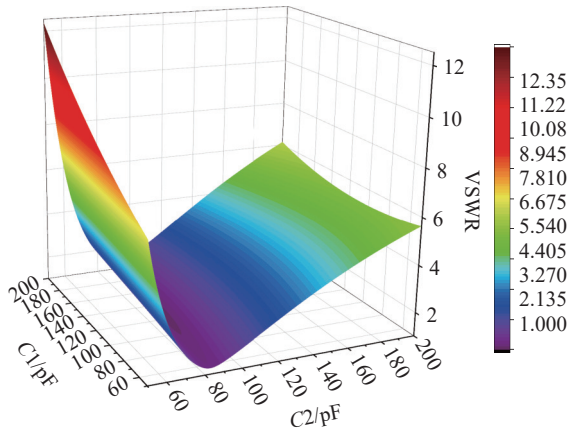

图 8　动态阻抗匹配网络驻波比调节曲面(匹配中心 $C1$=127.6 pF, $C2$=89.6 pF)

Fig. 8　The dynamic impedance matching network's VSWR adjustment surface (match center $C1$=127.6 pF, $C2$=89.6 pF)

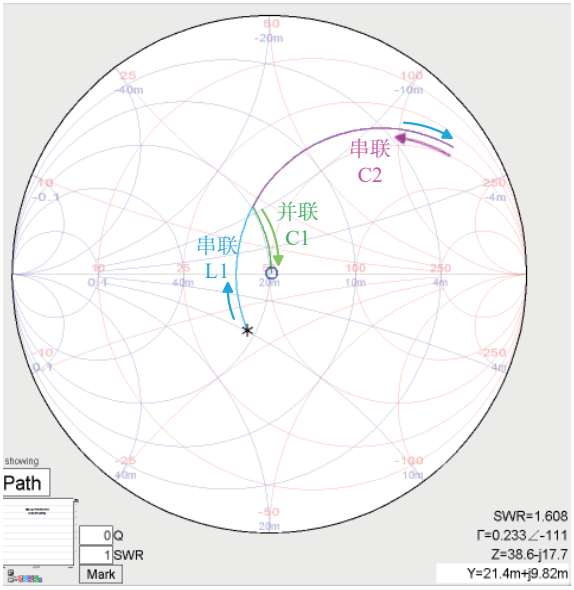

图 9　动态阻抗匹配网络史密斯圆图。等离子体阻抗为 38.6 Ω-17.7 Ωj

Fig. 9　Smith chart of dynamic impedance matching network. Plasma impedance is 38.6 Ω-17.7 Ωj

3.2　单管放电实验

为了验证本文设计的动态 L 型匹配网络的匹配能力, 本文搭建了单管射频放电实验装置进行验证。实验装置主要由 JS-5KW-F 型射频电源、涡轮风机、水冷机、阻抗匹配网络以及自行搭建的气体循环回路构成。其中阻抗匹配网络分为固定电感大小的外部电路 $Ls1$ 以及含有两个高压陶瓷可调电容的匹配箱。匹配箱接收射频电源的控制信号调节机械齿轮转动来改变可调电容大小。通过式 (5) 计算得到单管放电结构阻抗为 48.1 Ω − 398.9 Ωj。由此设计的动态 L 型阻抗匹配网络及实际装置如图 10 所示, 其中电感 Ls1 起到中和负载端容性的作用, Ls 可以补偿并联 C1 在电源端所带来的容性阻抗, 使得电源端与负载端在串联回路上呈现近似阻性。由于辉光放电实验稳定性受气体纯度影响较大, 在接通射频电源前需要对气体循环回路抽真空进行漏率测试, 保证回路中漏率小于 20 Pa/min, 而且在放电前还需要对回路重复进行 3-5 次的洗气处理, 以减小放电气体中存在杂质, 洗气完成后向回路中充入 CO_2 混合气体至 10 kPa 启动涡轮风机。启动射频电源后在低功率 400 W 附近开始点亮。根据射频电源上显示的功率反射对可调电容进行粗调, 将反射率降低至 5% 以下, 逐渐增大功率至 4 kW, 继续调节可调电容。4 kW 下单管稳定辉光放电如图 11 所示。

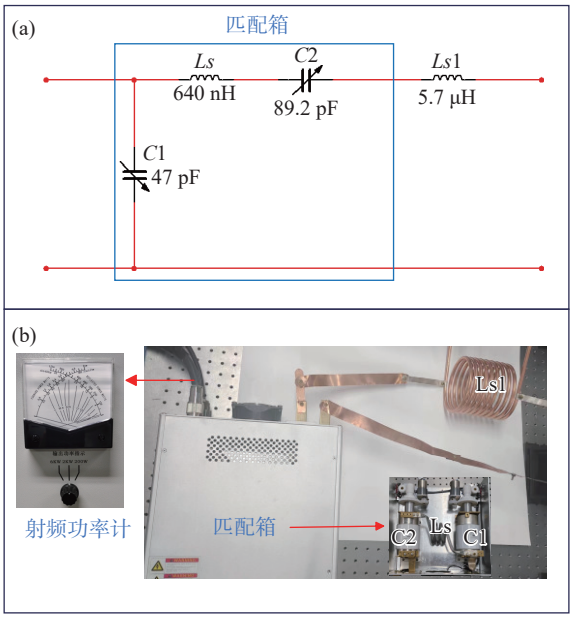

图 10　(a) 单管射频放电动态阻抗匹配网络; (b) 实际阻抗匹配网络装置

Fig. 10　(a) Single-tube RF discharge dynamic impedance matching network; (b) Actual device of the impedance matching network

实验测得匹配网络在 4 kW 入射功率下的反射功率小于 40 W, 反射率小于 1%, 辉光放电均匀且稳定, 射频功率通过图 10 功率计测得。

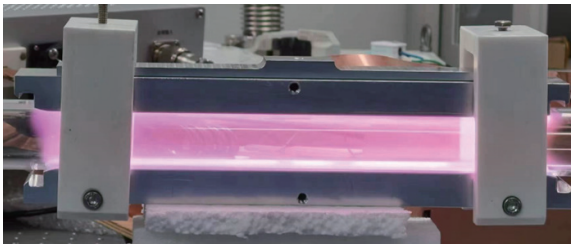

图 11 单管辉光放电

Fig. 11 Single-tube glow discharge

4 结 论

本文根据高功率射频激励轴快流 CO_2 激光器对于低反射率、高动态匹配范围的阻抗匹配网络这一需求，提出了动态 L 型匹配网络设计方案。分析了射频介质阻挡放电等离子体的电学特性。构建了多电极并联射频放电的等效电路模型，结合射频电路阻抗匹配理论，通过向匹配网络中引入可调高压陶瓷电容的方法，设计了适用于高功率射频激励轴快流 CO_2 激光器的动态 L 型匹配网络。模拟结果表明对于 60 kW 量级，频率为 13.56 MHz 的射频电源，动态 L 型匹配网络能够在 16 根放电管总负载阻抗达 12.81 Ω~49.94 Ω 这一高动态匹配范围内实现功率反射率小于 1%。通过单管射频放电装置验证了动态 L 型匹配网络设计电路的正确性。实验测得在 4 kW 注入功率下单管辉光放电均匀且稳定，反射率小于 1%，基本满足射频激励轴快流 CO_2 激光器对于反射率的要求。

参考文献：

[1] 游聪, 黄维, 林高洁, 等. 基于遗传算法的快轴流 CO_2 激光放大器的参数优化[J]. 中国激光, 2024, 51(7): 0701016.
YOU C, HUANG W, LIN G J, *et al*.. Optimization of fast axial flow CO_2 laser amplifier parameters based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(7): 0701016. (in Chinese).

[2] 黄维, 游聪, 林高洁, 等. 射频激励轴快流 CO_2 激光放大器增益性能的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 02.
HUANG W, YOU C, LIN G J, *et al*. . Research on gain performance of radio frequency excited axial fast flow CO_2 laser amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(23): 02. (in Chinese).

[3] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.
LI Y L, LIU X H, WU Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922006. (in Chinese).

[4] 林楠, 杨文河, 陈韫懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922002.
LIN N, YANG W H, CHEN Y Y, *et al*.. Research progress and development trend of extreme ultraviolet lithography source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922002. (in Chinese).

[5] YU S M, CHEN Z L, WU H, *et al*.. Best impedance matching seeking of single-frequency capacitively coupled plasmas by numerical simulations[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 132(8): 083302.

[6] HAGEN J B. 射频电子学: 电路与应用[M]. 鲍景富, 麦文, 牟飞燕, 等译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
HAGEN J B. *Radio-Frequency Electronics: Circuits and Applications*[M]. BAO J F, MAI W, MU F Y, *et al*. trans. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese).

[7] 王懿. 容性耦合式射频等离子体放电装置的设计及应用研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
WANG Y. *Design and application research of capacitive coupled RF plasma discharge device*[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023. (in Chinese).

[8] 张浩. ICP 源中负载匹配网络的设计[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.
ZHANG H. *Design of load matching network in ICP source*[D]. Yantai: Yantai University, 2023. (in Chinese).

[9] RODRIGUEZ C, VIOLA J, CHEN Y Q, *et al*.. Modeling and control of L-type network impedance matching for semiconductor plasma etch[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2024, 42(2): 022212.

[10] HERTZLER C, WOLLERMANN-WINDGASSE R, HABICH U, *et al*.. 30-kW fast-axial-flow CO_2 laser with rf excitation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2788: 14-23.

[11] 李波. 高功率轴快流 CO_2 激光器高效稳定放电方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
LI B. *Study on stable high-effective discharge of high power fast axial flow CO_2 laser*[D]. Wuhan: Huazhong University

of Science and Technology, 2010. (in Chinese).

[12] BHAGAT M S, BISWAS A K, RANA L B, *et al*.. Impedance matching in RF excited fast axial flow CO_2 laser: the role of the capacitance due to laser head[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2217-2222.

[13] SHIN D, HONG S J. Improved impedance matching speed with gradient descent for advanced RF plasma system[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2023, 41(6): 064002.

[14] SILAKHORI K, NESHATI R, GHOOCHANI D E, *et al*.. A parametric study on the effects of the electrode size on the performance of a small-size RF-excited fast-axial-flow CO_2 laser[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2023, 44(4): 399-406.

[15] MOGHBELI F, HE D, ALLCOCK G, *et al*.. Impedance matching in radio-frequency discharge excited waveguide lasers[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1984, 17(12): 1159-1164.

[16] 杨金法, 彭虎. 非线性电子线路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
YANG J F, PENG H. *Nonlinear Electronic Circuits*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese).

作者简介：

赵崇霄(1993—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 工程师, 2015 年, 2021 年于大连理工大学分别获得学士、博士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所工程师, 负责国家基金委青年基金项目 1 项, 国家重点实验室项目 1 项, 主要从事激光等离子体特性研究, 高功率 MOPA CO_2 激光器技术研究。E-mail: zhaochongxiao@ciomp.ac.cn