

高频激励横流 CO₂ 激光器的实验研究

王贤俊 陈 涛 丘军林

(华中理工大学, 武汉, 430074)

摘要: 本文在实验上在气压为 120mba, 100mba 和 80mba, 气压比为 CO₂ : N₂ : Ar = 7 : 46.5 : 46.5, 间隙为 20mm, 26mm 和 27mm, 电极直径为 12mm、长为 700mm 的情况下, 对网络的高频传输特性, 间隙高频放电的伏安特性及激光功率输出特性进行了一定的研究, 在国内首次得到高频激励横流 CO₂ 激光器 400W 的激光输出, 注入功率密度达 20W/cm³, 与相同条件下的直流针板式激光器相比最大注入功率提高了约一倍, 最大电光转换效率为 9%。

The experimental investigations of high frequency excited transverse CO₂ laser

Wang Xianjun, Chen Tao, Qiu Junlin

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: In this paper, the purpose is to introduce the some experimental investigations, such as high frequency transmission characteristic of the impedance network, the voltage-current characteristic of plasma, and laser power output characteristic. The gas is composed of CO₂, N₂, Ar in mole fraction of 7 : 46.5 : 46.5, and pressure is 120mba, 100mba, and 80 mba, respectively. The electrode is 12mm in diameter, 700mm in length. 400W laser power output and 9% electric-optic efficiency yield with high frequency excited transverse CO₂ laser in the country. The input power density, which is about 20 W/cm³, is about 2 times that of DC glow discharge pin-plan transverse CO₂ laser.

一、引 言

现代工业技术的发展, 要求用于机械加工工业的大功率气体激光器具有体积紧凑, 工作稳定, 光束质量好, 寿命长, 效率高, 而且可进行脉冲调制操作。70年代初, 外国科学工作者从改善放电区激励方式入手, 即用高频而不是直流放电激励, 通过大量的实验研究, 对大功率气体激光器的工作性能作了大大的改善。如日本的无声放电^[1](SD)及德国的射频(RF)放电^[2]激光器已基本投放市场。在高功率气体激光的高频激励技术方面的研究, 我国起步较晚。但这方面近年来也取得了一定的成绩, 在本文的研究中, 通过设计的高频阻抗匹配网络实现高频电源及放电等离子体间的阻抗匹配, 在不同的放电条件下研究了高频激励 CO₂ 激光器的各种特性, 并获得了横流激励 CO₂ 激光器 400W 的激光输出。

二、高频激励 CO₂ 激光器的实验装置

本实验主要装置框图如图 1 所示。

高频电源是由 CP15-B 型高频感应加热装置改装而成, 工作频率为 250kHz 左右, 输出电压从 0~8kV 间连续可调。

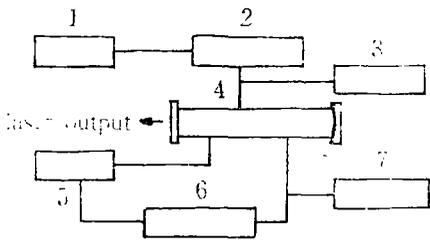


Fig. 1 Experimental setup arrangement

- 1—high frequency power supply
- 2—impedance match network
- 3—measurement setup
- 4—discharge chamber 5—fan-set
- 6—setup for heat exchange
- 7—gas filling and exhaustive system

高频阻抗匹配网络是为了降低高频功率在传输中的反射损耗,以实现高频电源与放电室的最佳功率耦合而设计的。考虑到放电负载阻抗呈容性,因而在电路中,先将一电感与容性负载进行补偿匹配,然后串入一Γ型匹配网络,补偿匹配满足^[3]

$$\omega L_0 = 1/\omega C_0$$

Γ型网络匹配满足

$$\omega L = \sqrt{R_s(R_g - R_s)},$$

$$\omega C = \sqrt{R_s(R_g - R_s)/R_s R_g},$$

式中,ω为电源频率,C₀为间隙等效电容,L₀为补偿电容,R_s为电源输出电阻,R_g为放电间隙电阻,

L,C为匹配网络的电容和电感。

激光器主体是由原有的直流放电激励 1kW 横流 CO₂ 激光器^[5]改装而成的。它包括谐振腔、热交换器、风机系统和放电室。光谱谐振腔由平凹镜组成,全反镜是镀金铜镜,曲率半径为 9m,反射率大于 98%,输出镜采用的是复合型碲化镓或硒化镓平面镜,透过率为 15%。热交换器采用的是半封闭式冷冻机组,最大热交换量达 10kcal/h,它可以将循环工作气体冷却至 15℃左右。风机是低噪音高效率离心式风机,放电区气体流速可达到 30m/s。

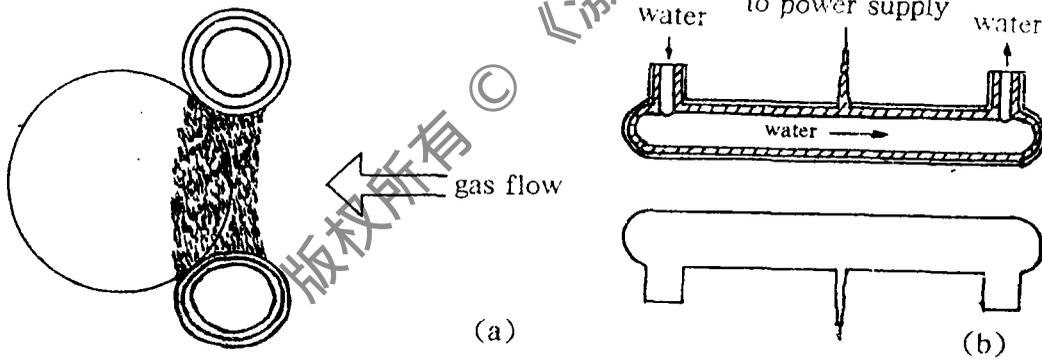


Fig. 2 Electrode structure

放电室主要由放电电极组成,它是高频放电的关键部件,实验中采用的电极如图 2 所示。它是由一对玻璃介质包裹的金属管组成,金属管外径为 10mm,金属管外烧结一层 1mm 的玻璃介质,这一层介质在放电中形成一个电容,起到镇流的作用,每个电极的外径为 12mm,放电间隙为 20mm 到 30mm 可调,电极长 700mm,用自来水冷却。另外,光谱谐振腔采用直式腔,输出窗口直径为 40mm,它放置在放电电极的下游,实验采用的是放电方向、光轴、气流三轴正交的方式。由两台真空机械泵组成的排气系统在半小时内可将放电室内真空度抽至 1.33×10⁻² mba,工作气体为 CO₂,N₂ 和 Ar 的混合物,即放电进行无 He 运行。

数据测量系统由高频电压表、HF 热耦式高频电流表和相差测量装置组成。相位测量装置

是由用电阻丝通过无感绕制的阻值为 2Ω 的电流取样电阻 R_1 , 阻值为 $200M\Omega$ 和 $200k\Omega$ 的电压取样回路电阻 R_2 和 R_3 以及存储示波器或 SR-37 示波器组成。为防止外界干扰, 取样电阻分别装在金属盒内, 信号用同轴电缆引至示波器, 由于工作波长较长, 取样电阻对相位的影响可忽略。整个实验的原理框图如图 3 所示。

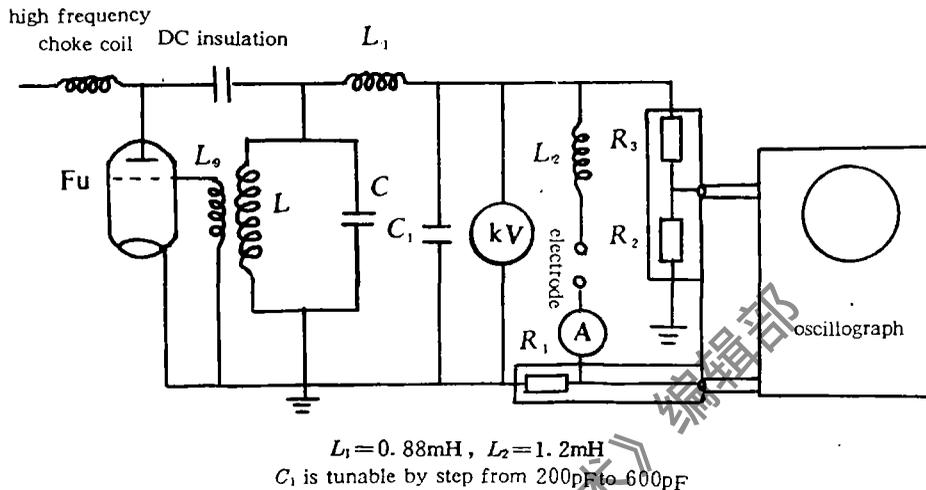


Fig. 3 Experimental schematic of high frequency excited CO_2 laser

三、阻抗匹配网络的设计

由于实验用的高频电源是由 GP15-B 型电子式高频感应加热装置^[3]改装而成的, 其振荡管是 FU-10S 水冷式电子管。通过计算得到这种振荡的阳极等效工作阻抗大致为 1460Ω , 谐振工作时, 电源的输出阻抗为振荡管的阳极等效阻抗。由无匹配网络时的实验数据, 经过一定的数据处理, 得到本实验放电时电极间的阻抗为 $3k\Omega$ 左右, 则由^[4] $\gamma = (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2) = 0.11$, 即如果不进行阻抗匹配, 将有 11% 的能量被反射掉, 这大致相当于损耗掉了一台同样规格的直流 CO_2 激光器的能量, 因而进行阻抗匹配很有必要。

四、实验结果

1. 高频传输特性

在加网络的情况下, 改变网络电容 C_1 , 使 C_1 分别为 600pF , 533pF 和 200pF 。对每一种情况, 分别对压力 $p = 120\text{mba}$, 100mba 及 80mba 进行放电实验, 可得外加电压与电流和电压间的位相差的关系以及外加电压与注入功率的关系, 如图 4 所示。图中 (a), (b), (c) 分别为 $p = 120\text{mba}$, 100mba , 80mba 时, 不加匹配网络, 以及加匹配网络但改网络电容 C_1 的情况下, 外加电压 V 与电流电压相位差 φ 的关系曲线。从图 4(a), (b), (c) 中可以看到, 在没有补偿线圈时, 电流与电压间的相位差是很大的。而加了补偿以后, 随着外加电压 V 的增加, 电流与电压间的相位差急剧减少, 在 $p = 120\text{mba}$ 和 $p = 100\text{mba}$ 时, 当电压达最大状态时, 相位差 φ 已接近于零, 即已达到完全补偿, 只有在 $p = 80\text{mba}$ 时, 出现电压超前于电流的情况, 即出现过补偿。但从总体情况上来看, 补偿网络还是很理想的。图 5 为放电等离子体的注入功率 P_{in} 与外加电压

V 之间的实验曲线, $P_m = VI \cos \varphi$, 曲线很好地说明了加阻抗匹配网络以后, 在相同的外加电压

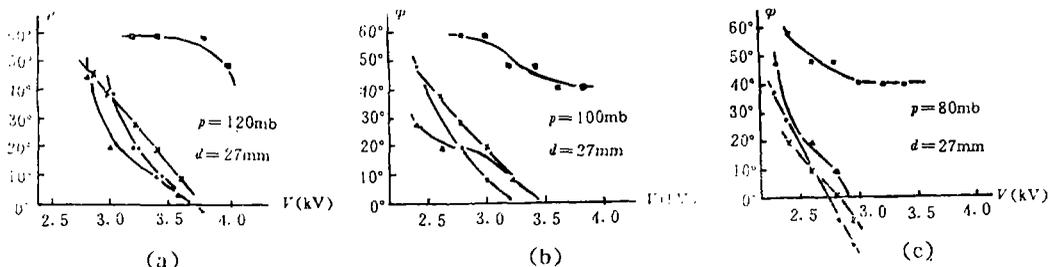


Fig. 4 Phase difference φ between current, voltage and applied voltage

■—free network ×— $C_1=600\text{pF}$ ●— $C_1=533\text{pF}$ ▲— $C_1=200\text{pF}$

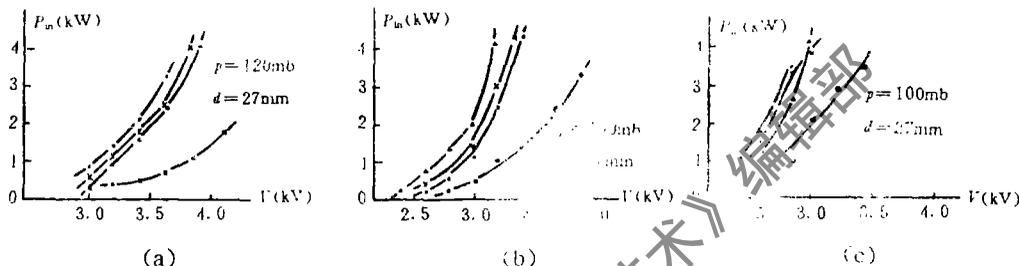


Fig. 5 Relation of input power P_m to applied voltage

■—free network ×— $C_1=600\text{pF}$ ●— $C_1=533\text{pF}$ ▲— $C_1=200\text{pF}$

下的注入功率与未加网络的情况相比大大增加。在加网络的情况下, 相同的外加电压时, 网络参数不同, 注入功率也不同, 三种气压情况下, 网络中电容 $C_1 = 200\text{pF}$ 时注入功率最大, 这符合理论计算的结果。图 4 和图 5 这两组曲线都很好地说明, 加阻抗匹配网络对提高放电电路功率因素及在相同的外加电压下提高注入功率有显著作用。另外, 实验中我们注意到在放电达到最佳状态时, 电源振荡管的阳极与栅流的数值。在不加网络时阳极电流约为 1.2A, 栅流约为 0.38A, 栅阳电流比约为 32%, 电子管处于过压状态。在加网络时, 阳极电流约为 1.5A, 栅流约为 0.15A, 栅阳电流比约为 10%, 电子管处于欠压状态。正常情况下, 电子管应处于欠压或临界状态, 这可说明^[6]不加网络时, 电源与放电电极处于阻抗失配状态。

2. 高频放电的伏安特性

对高频放电的伏安特性的研究, 本文是在加阻抗匹配网络情况下进行的。图 6 是放电间隙

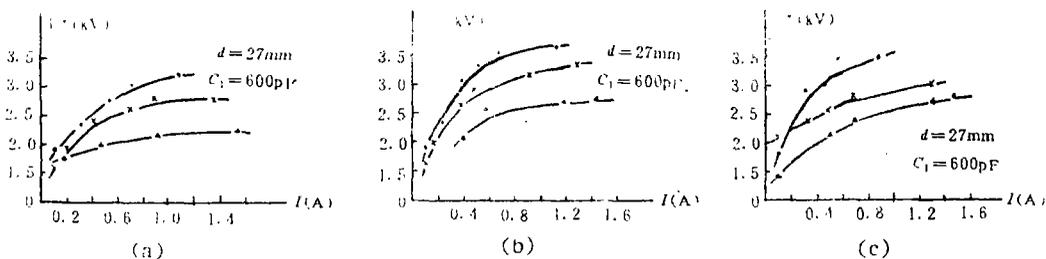


Fig. 6 Relation of gap voltage V^* to discharge current I

●— $p=80\text{mba}$ ×— $p=100\text{mba}$ ▲— $p=120\text{mba}$

电压 V^* 与放电电流间的关系曲线,图中(a),(b),(c)为不同的网络参数下的特性曲线。放电间隙 D 为 27mm,气压比仍为 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{Ar} = 7 : 46.5 : 46.5$ 。对于不同的网络参数,特性曲线基本相同,在高频辉光放电过程中,等离子体都具有正阻特性,但对于不同的气压,可以发现其放电发展趋势稍有差异,即在 $p = 120\text{mba}$ 和 $p = 80\text{mba}$ 时曲线趋于平缓,等离子体向负阻特性过渡。因为实验中在这两种情况下,若再升高电压,间隙便很容易起弧,这表明激光器工作于 $p = 100\text{mba}$ 的气压下,可能是一种较好的状态。

3. 激光功率输出特性

图 7 为三种气压下注入功率 P_{in} 与外加电压 V 之间的关系。图 8 为激光输出功率与注入功率之间的关系以及电光转换效率 η 与注入功率之间的关系。从图 7 可以看出若要得到相同的注入功率,气压 p 低的情况下所需的外加电压也低。从图 8 可以看到,在注入功率变化的过程中,电光转换效率 η 逐渐变大。气压不同时,尽管注入功率相同,但输出的激光功率 P_{out} 即电光转换效率也不同。在 $p = 80\text{mba}$ 时, η 略大于 8% 时便出现饱和现象。

从放电电极结构方面考虑,由于本实验中电极为圆形,且为横向放电,谐振腔处于电极的下游,如图 2 所示。放电初期,在间隙最窄处先行击穿、放电,受激跃迁的粒子处于谐振腔边缘,随着放电电压的增加,放电面变宽,整个间隙逐渐击穿,离子的受激跃迁逐渐发生在谐振腔区域。因而随着放电的发展,电光转换效率越来越大,据此可以断定,若将谐振腔向上游方向作适当移动,会提高总体电光效率。另外,如果气压偏低,则 E/N 变大,电子的自由程变长,电子能量大,则电离加剧,激发相对地较少,注入功率虽高,但易发生热不稳定,如果气压偏高,则 E/N 偏小,电子自由程变小,电子平均能量低,激发也少,注入功率也不高,这和图 4 所示的实验观测的结果是相符的。

图 8 中还可以看到, $p = 100\text{mba}$ 时斜效率最大,且电光转换效率与其他两种情况相比有上升趋势,因而在其他条件诸如放电间隙、放电频率、气体流速、气压比不变时, $p = 100\text{mba}$ 为放电最佳条件。此种条件下,实验中已得到稳定放电时最大注入功率为 4.5kW,激光输出为 400W,注入功率密度为 $20\text{W}/\text{cm}^3$,电光转换效率为 9%。

五、结 论

本文在高频激励横流 CO_2 激光器研究实验中,在加和不加高频阻抗匹配网络两种情况下研究了高频放电的特性,加匹配网络以后,在相同的外加电压下,放电注入功率及光输出功率

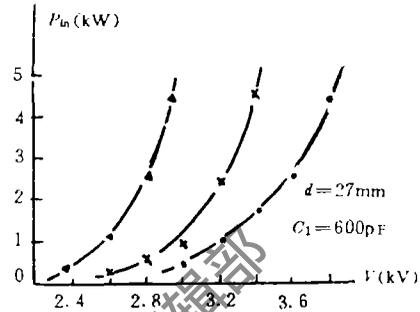


Fig. 7 Relation of input power P_{in} to applied voltage

● — $p = 80\text{mba}$ × — $p = 100\text{mba}$ ▲ — $p = 120\text{mba}$

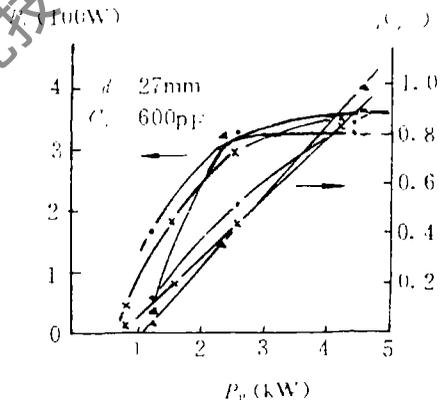


Fig. 8 Relation of output power P_{out} and electric-optic transformation efficiency η to input power P_{in}

● — $p = 80\text{mba}$ × — $p = 100\text{mba}$ ▲ — $p = 120\text{mba}$

都大大提高,并在 $p=100\text{mba}$ 时得到最大输出功率为 400W,最大效率为 9%,最大功率密度为 20%,与相同条件下的直流针板式激光器相比最大注入功率提高了约一倍,并在国内首次得到高频激励横流 CO₂ 激光器 400W 的激光输出。实验中发现,稳定激光输出时放电具有正阻特性。对激光功率的输出特性的分析中可以得到,光谱谐振腔与放电之间并非处于最佳耦合状态,若将光腔向上游方向作适当移动,光功率及电光转换效率将会有很大提高。大量实验表明,在气压比为 CO₂:N₂:Ar=7:46.5:46.5 时,其注入功率密度、光功率、电光转换效率与其他情况相比均达到最大值。

另外,若适当调整谐振腔位置,进一步完善电源与放电等离子体之间的阻抗匹配,根据日本的经验^[6],输出功率可提高到 850W。若将放电间隙 D 提高到 45mm,电极外径改为 15mm,放电区气体流速提高到 50m/s,激光输出提高到 1500W 是不成问题的。

对龚志伟副教授、唐宗化高级工程师,陈义红、陈培锋讲师,黄善喜及周小伙等同志在实验中给予的帮助在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Yasui K, Kuzumoto M, Ogawa S *et al.* J Q E, 1989, 25(4), 536
- [2] Hoffmann P. The start of a new generations of CO₂ laser for industry. In: Kimmitt M Fed, Proc. Lasers in Manufacturing '85, Proceedings of the 2nd international conference on lasers in manufacturing 26~28 March 1985, Birmingham U K, 1985, IFS Ltd and North-Holland, 1985, 201
- [3] 潘天明. 电子式高频感应加热装置. 北京:冶金工业出版社, 1975; 第5章, 第6章
- [4] 何振亚. 高频阻抗匹配网络设计. 北京:人民邮电出版社, 1956; 第2章
- [5] 夏祖勇, 丘军林. 中国激光, 1987, 14(12): 705
- [6] 八木重典, 田中正明, 小川周治 *et al.* レーザ研究, 昭和 59 年 9 月, 8(5): 47

*

*

*

作者简介:王贤俊,男,1963年11月出生。硕士研究生。现从事激光通讯研究工作。

收稿日期:1992年11月26日。 收到修改稿日期:1993年4月20日。

· 简 讯 ·

窄于 50fs 脉冲的毫焦耳级放大组件

美国密执安大学超快光学科学中心(CUOS)和密执安德克斯特的 Clark/MXR 的研究人员共同研制成一种脉宽窄于 50fs、千赫重复率、毫焦耳量级的放大组件。超快中心的 Van Rudd 等人同 Clark/MXR 的 Phillippe Bado 合作研制成千赫级掺钛蓝宝石正反馈放大器,获得了放大的超短脉冲。

来自(Clark/MXR NJA-4 型)白锁模掺钛蓝宝石激光器的脉冲,在注入放大器之前已被展宽,放大器将其可靠地放大到要求的能量级。该脉冲被压窄到转换范围。当 38fs 脉冲进入该系统时,已放大的脉冲便被压窄到 48fs。某一谱线压窄的观测数据证明该脉冲得到展宽。进一步的工作将是包括增加系统的谱线到更进一步压窄脉宽。

译自 L F World, 1993; 29(7): 11 中免译 马理校