

GW 大功率 CO₂ 激光系统

庄国良 于澍生 牛万青 杜龙龙 李明富 姜虹

(中国科学院上海光机所, 201800*)

提要: 本文报道新研制成功的 GW 大功率激光系统。使用双普克尔盒电光开关从混合型 CO₂ 激光振荡器中削出的激光窄脉冲通过一台三节双光程 TEA CO₂ 激光前置放大器和一台两节 TEA CO₂ 激光前置放大器、一台大口径 TEA CO₂ 激光放大器, 最后通过一台电子束控制 CO₂ 激光放大器放大后输出。激光输出功率高达 3.2×10^9 W, 脉宽为 4 ns。

关键词: TEA CO₂ 激光器, 电子束控制

A GW level high power CO₂ laser system

Zhuang Guoliang, Yu Shusheng, Niu Wanqing, Du Longlong, Li Mingfu, Jiang Hong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A GW level high power CO₂ laser system has been developed. A short laser pulse is cut out by a double Pockels cell electro-optical shutter from a hybrid CO₂ laser oscillator and amplified by a three-stage dual-path TEA preamplifier, a two-stage TEA preamplifier, a large aperture TEA amplifier and an electron beam controlled terminal amplifier. All parts of the laser system are controlled with a control system. The laser output power is up to 3.2×10^9 watts, and the laser pulse width is 4 ns.

Key words: TEA CO₂ laser, electron beam control

一、引 言

由于 CO₂ 激光器在效率、可靠性、重复性、制造成本和运转费用等方面具有明显的优点, 所以从七十年代起, 世界各主要经济强国, 如美国、日本等国为了惯性约束聚变计划, 在大力发展大功率钨玻璃激光系统的同时, 致力于研制大功率 CO₂ 激光系统^[1, 2]。我们为开展 10.6 μm 激光与物质相互作用及其它有关的基础实验研究, 研制了一台千兆瓦级的大功率 CO₂ 激光系统。实验表明, 其激光输出功率高达 3.2×10^9 W, 脉宽为 4 ns。

二、系统结构和原理

本文研制的大功率 CO₂ 激光系统如图 1 所示。该系统使用双普克尔盒电光开关从混合型

收稿日期: 1988 年 9 月 12 日。

* 为便于读者与作者之间的联系, 本刊从本期起在作者单位后面加上邮政编码。

CO₂激光振荡器中输出一个激光窄脉冲(脉冲宽度 < 5 ns, 可调), 此选通激光脉冲通过一台三节 TEA CO₂ 激光前置放大器和一台两节 TEA CO₂ 激光前置放大器、一台大口径 TEA CO₂ 激光放大器, 最后通过一台电子束控制 CO₂ 激光放大器放大后输出。系统各个部分由控制系统集中同步控制。

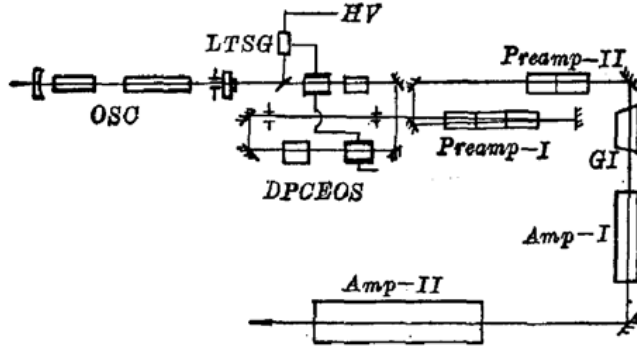


图1 GW大功率CO₂激光系统简图

OSC—混合型CO₂激光振荡器; DPCEOS—双普克尔盒电光开关; LTSG—激光触发火花隙; Preamp-I—三节TEA CO₂激光前置放大器; Preamp-II—二节TEA CO₂激光前置放大器; GI—气体隔离器; Amp-I—大口径TEA CO₂激光放大器; Amp-II—电子束控制CO₂激光放大器

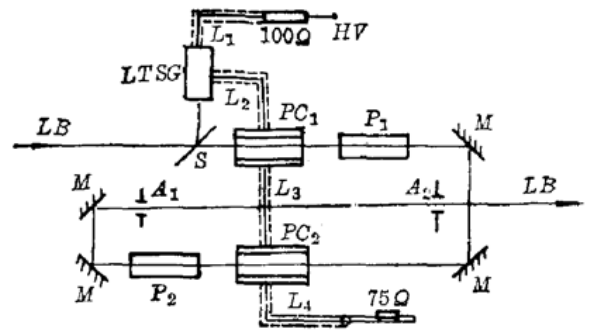


图2 双普克尔盒电光开关结构图

LB—激光束 LTSG—激光触发火花隙; S—分光片; PC—GaAs普克尔盒; P—偏振器; L—电缆; M—反射镜

2.1 振荡器

在单纵模条件下工作的TEA CO₂激光器的输出激光脉冲波形光滑, 适宜做大功率CO₂激光系统的振荡器。为使激光器在单纵模上运转, 在腔内增加低气压增益部分, 并使其满足条件

$$\Delta\nu_g \leq c/2L \quad (1)$$

式中, $\Delta\nu_g$ 为激光介质的增益带宽, c 为光速, L 为腔长。我们选定连续CO₂激光管的工作气压为10 Torr, 气体比分为CO₂:N₂:He=1:1:8。则根据碰撞加宽 $\Delta\nu_C$ 、多普勒加宽 $\Delta\nu_D$ 以及总加宽的半极大强度全宽度 $\Delta\nu_T$ 的表达式^[3]:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_C &= 5.76 \times 10^9 (\psi_{\text{CO}_2} + 0.73\psi_{\text{N}_2} + 0.6\psi_{\text{He}}) P_a (300/T)^{1/2}; \\ \Delta\nu_D &= 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 (T/M)^{1/2}; \\ \Delta\nu_T &= (\Delta\nu_C^2 + \Delta\nu_D^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ψ_{CO_2} 、 ψ_{N_2} 、 ψ_{He} 分别为CO₂、N₂、He的比分, P_a 为总气压, T 为温度, M 为分子量。可算得 $\Delta\nu_C=43$ MHz, $\Delta\nu_D=61$ MHz, $\Delta\nu_T=75$ MHz。若选定腔长为2.7 m, 则腔纵模间隔 $\Delta\nu=56$ MHz。控制连续CO₂激光管在低增益下工作, 即使两个纵模位于 $\Delta\nu_g$ 之间, 因其增益相差大, 单纵模工作仍十分稳定。

我们使用的混合型CO₂激光振荡器^[4]中TEA CO₂激光器放电体积为50×4.5×4.5 cm³, 气体比分为CO₂:N₂:He=2:1:8, 放电电容为0.063 μf, 放电电压为60 kV。连续CO₂激光管系三套管结构, 放电管内径为φ20 mm, 放电管长度为800 mm。通光窗口呈布儒斯特角, 材料为ZnSe。谐振腔为平凹型稳腔, 凹面镀金反射镜的曲率半径为3.5 m, 输出镜为一不镀膜的锗平板, φ7 mm的选横模光阑紧靠在输出镜上。

2.2 双普克尔盒电光开关

为了产生短脉冲激光, 研制了双普克尔盒电光开关^[5](图2)。它由普克尔盒、激光触发开关、

偏振器、电缆、高压充电电源、分光片及反射镜等组成。用 GaAs 晶体作电光开关晶体,长 80 mm,半波电压为 12.5 kV。偏振器由 4 片 $\phi 80$ mm 的锗片构成,入射角为 76° ,锯齿形放置以避免光束左右位移。激光触发开关为标准的 75Ω 阻抗同轴型结构,用镀增透膜的 Ge 透镜将激光束聚焦,通过一个电极上的小孔射到相对的另一电极上,电极间隔为 1 mm,充 14 atm 的 N₂ 气,调整各段电缆长度以调整脉宽。

2.3 前置放大器

经双普克尔盒电光开关削波后的激光脉冲输入到前置放大器中作能量放大。这儿采用结构尺寸完全与振荡器中相同的 TEA CO₂ 激光器作为前置放大器的单节器件。设计时,设小信号增益系数 $g_0 = 0.025/\text{cm}$,输入激光强度 $I_{in} = 0.1 \text{ mJ}$,输出激光强度为 $I_{out} = 1 \text{ J}$,则由

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = e^{g_0 L} \quad (3)$$

可算得所需增益长度 $L = 368 \text{ cm}$ 。因一节 TEA CO₂ 激光放大器的增益长度为 50 cm,故需 8 节。在实际结构中我们采用三节 TEA CO₂ 激光前置放大器双光程放大,再经后二节 TEA CO₂ 激光前置放大器放大。运转时,充电电压和放电电容均与振荡器相同,充气比例则不同,为 CO₂:N₂:He = 3:2:8,总气压为 660 Torr。窗口材料为 $\phi 80$ mm 的 NaCl,均斜置 8° ,以防端面反射引起寄生振荡。

2.4 大口径 TEA CO₂ 激光放大器

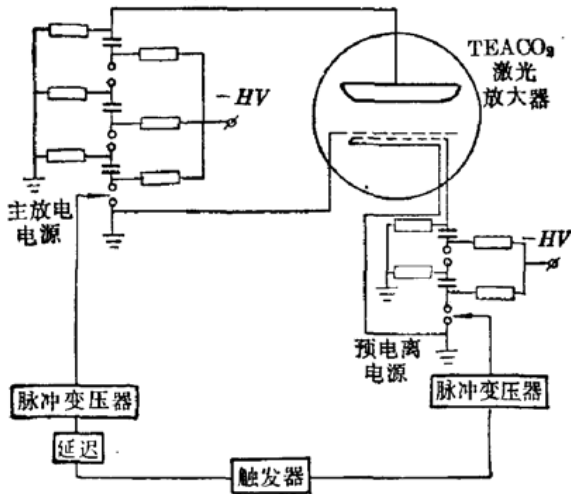
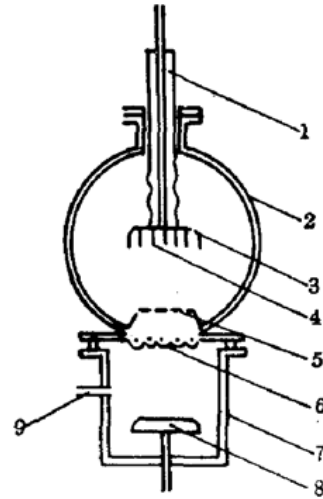
由混合型 CO₂ 激光振荡器输出的激光脉冲经双普克尔盒电光开关后由前置放大器放大,光束直径在光传输过程中逐渐扩大,因此,选用口径较大的 TEA CO₂ 激光放大器作为功率放大级的中放单元。

大口径 TEA CO₂ 激光放大器(图 3)采用外径 $\phi 280$ mm 的有机玻璃作外壳,分两节,每节长 850 mm。阴极为硬质铝,阳极为紧绷在有机玻璃框架上的不锈钢网。预电离采用火花隙阵列,由不锈钢片构成,分五行,每行 33 片,行距 10 mm,不锈钢片间距 1 mm。与五行不锈钢片相对应的有五条铜箔。不锈钢片与铜箔之间用 5 mm 厚的玻璃板作绝缘介质。每一不锈钢片与铜箔构成一个小电容。当小电容瞬间击穿时,就在玻璃板表面形成一片电火花,提供紫外光预电离。该预电离板离网状阳极约 25 mm。铝阴极表面经喷砂处理,以防止寄生振荡。器件两端使用 NaCl 窗口,与光轴成 5° 角,以防止端面反射而产生寄生振荡。

主放电采用三级麦克斯发生器,总电容量为 $0.047 \mu\text{f}$ 。预电离为二级麦克斯发生器,总电容量为 $0.07 \mu\text{f}$ 。主放电与预电离同时并联充电,电压为 -30 kV 到 -35 kV 。调节主放电与预电离之间的延迟时间,使放电最佳化。工作气体为 CO₂:N₂:He = 3:2:8,总气压 560 Torr。

2.5 电子束控制 CO₂ 激光放大器

能否成功地获得特别短的高功率激光脉冲能量,取决于合适的放大器系统。如要获得 ns 这样短的脉冲,作为末级放大器必须设计得在大气压或更高气压下工作,且通光口径要大。为此,研制了一台有效放电体积为 8 立升的两节冷阴极电子束控制 CO₂ 激光放大器^[9]作为该系统的末级放大器(图 4)。图的上部是冷阴极电子枪,下部是激光气体放电室。其间用金属箔(0.02 mm 厚的钛箔)隔开。该箔支撑在相距 14 mm、高 10 mm 的金属叶片列阵上,一起组成电子束窗口,面积为 $860 \times 80 \text{ mm}^2$ 。电子枪阴极由六条长 750 mm、厚 0.02 mm 的钼条组成。电子枪阴极和阳极间的距离可调,一般在 70 mm 左右。两节电子枪由各自的麦克斯发生器供

图3 大口径 TEA CO₂ 激光放大器图4 电子束控制 CO₂ 激光放大器剖面图

1—有机玻璃引线柱；2—不锈钢真空室外壳；3—电子枪阴极罩；4—电子枪阴极；5—电子枪阳极；6—电子枪薄膜窗口；7—激光盒；8—主放电电极；9—气嘴

电,由第一级球隙作同步触发,输出电压一般在 180 kV 左右,最大贮能达 3.7 kJ。

激光放电室外壳由有机玻璃组成,内侧面喷砂,以防寄生振荡。阳极用铝制成,表面喷砂,面积为 $920 \times 120 \text{ mm}^2$ 。阴极由间距 12 mm、 $\phi 2 \text{ mm}$ 的黄铜杆并排组成的列阵所构成,面积为 $870 \times 100 \text{ mm}^2$,它同时作为电子束窗箔的保护器。阴阳极距离可调(70~100 mm)。如同电子枪电源一样,每节放电室连接一个电容器组。两个电容器组同时充电,每组电容器由 15 只 $0.45 \mu\text{f}$ 、50 kV 的电容器组成。

2.6 气体隔离器

在高功率 CO₂ 激光系统中,由于放大器间的耦合、应用时靶与放大器间的耦合,以及放大器内部反射等因素,都会导致寄生振荡。为了克服寄生振荡,研制了使用可饱和气体的光学隔离器。为避免寄生振荡的一般条件是该系统各单元的增益 g_0 与其增益长度 L 的乘积之和应小于某值^[7]:

$$\sum g_0 L < N \quad (4)$$

N 的大小取决于系统的工作参数和光学部件的布局,由实验确定。由(4)式可以看出,如果有效地减小该系统各单元的小信号增益,就可克服寄生振荡,但这样做的结果会导致抽取能量的减少。一个有效的方法是在系统中加入可饱和气体吸收室就可使(4)式得到满足:

$$\sum g_0 L - \sum \alpha p L' < N \quad (5)$$

式中, α 是有效吸收系数 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$), p 是可饱和气体压力 (Torr), L' 是吸收室长度 (cm)。

本文研制的气体隔离器为 $\phi 60 \text{ mm}$ 、长 150 mm、两端 NaCl 窗口呈布氏角的玻璃室。图 5 给出了充 2 Torr SF₆ 时透过率与入射光强的关系,可看出 SF₆ 对 $10.6 \mu\text{mP}(20)$ 谱线的吸收呈饱和趋势。

一个理想的可饱和吸收室,对小信号的透过率应是零,对超过某一值的大信号则能完全透过,这样就可抑制小振幅的寄生振荡,而又不减少激光脉冲输出。实际上这是做不到的,这时注意隔离器所放位置是很重要的。在我们的系统中隔离器置于前置放大器和大口径放大器之

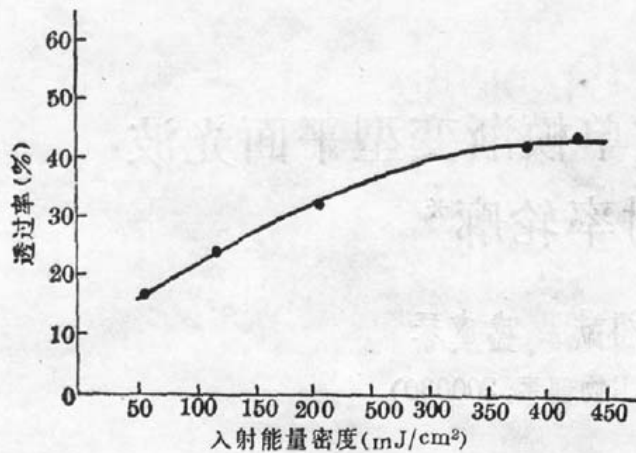


图5 SF₆的饱和特性(SF₆气压2Torr,吸收室长度15cm)

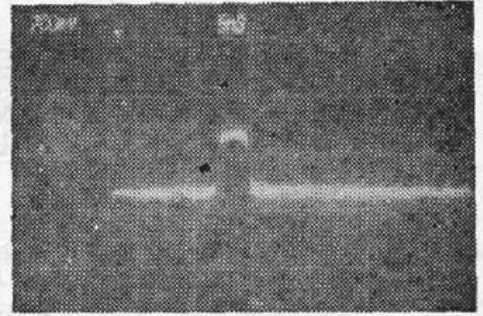


图6 前置放大器输出的激光波形

间,能有效地抑制寄生振荡。

三、实验结果

1. 用炭斗能量计测得混合型 TEA CO₂ 激光振荡器输出脉冲激光能量为 0.15~0.20 J。使用光子牵引探测器和 SS-6200 型示波器测得了振荡器输出激光波形脉宽约 400 ns。2. 使用 PT-1 型激光能量计测得经双普克尔盒电光开关整形后输入到第一台前置放大器中去的脉冲能量为 80 μJ 左右。用 φ150 mm 大炭斗能量计测得经两台前置放大器放大输出的单脉冲能量为 0.5~0.8 J,其激光波形如图 6 所示。由图可知,经双普克尔盒电光开关整形后,激光脉宽为 4 ns。3. 测得上述激光脉冲经大口径 TEA CO₂ 激光放大器放大后输出的能量为 5~8 J。4. 最后经电子束控制 CO₂ 激光放大器放大,测得单脉冲激光能量高达 12.9 J,激光功率高达 3.2×10⁹ W。

曾参加过该项工作的有蔡英时、李兰英、伊景荣、楼祺洪、何迪洁、庄斗南、陆载通、沈桂荣、丁爱臻等同志,他们做了大量工作,在此,谨向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 J. Jansen *et al.*, *Laser Focus*, **16**(11), 76~84(1980)
- 2 "TV Lekko program", Annual Progress Report on Laser Fusion Program, September 1977-August 1978, Osaka University
- 3 E. R. Pike, "High-Power Gas Laser", The Institute of Physics Bristol, London, 1975, 54; R. Loudon, "The Quantum Theory of Light", Clarendon press, Oxford, 1978, 90
- 4 蔡英时 *et al.*, 光学学报, **4**(2), 168(1984)
- 5 蔡英时 *et al.*, 中国激光, **12**(8), 485(1985)
- 6 庄斗南 *et al.*, 中国激光, **7**(3), 33(1980)
- 7 M. R. Green *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **13**, 1399~1404(1980)