

输出 10 MW、ns 脉冲的光解碘原子激光振荡-放大系统

徐 淦

(北京航空航天大学)

T. A. King

(英国曼彻斯特大学)

提要: 报道了一台小型实验室规模的光解碘原子激光振荡-二级放大系统, 它可提供脉宽 1 ns~2 μs、脉冲能量几十 mJ~10 J、峰值功率 ~10 MW 的单模输出。文中着重讨论了该系统的设计、各种选模、脉冲发生技术及其工作特性。

A 10 MW, ns pulse output photodissociation iodine laser oscillator-amplifier system—Design and characteristics

Xu Gan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing)

T. A. King

(Manchester University, U. K.)

Abstract: We report a small laboratory size photodissociation iodine laser oscillator-two-stage amplifier system, which can provide single mode laser output with pulse widths of 1 ns~2 μs, energy of tens of mJ~10 J, peak power of ~10 MW. Discussions are concentrated on the system design, various mode selection, pulse generation techniques and their performances.

一、引言

光解碘原子激光 (IPL) 是固体激光、二氧化碳激光之外的又一种高功率激光。大型 IPL 系统可用于受控核聚变、激光与等离子体相互作用等研究^[1], 而小型 IPL 则可应用于激光加工、化学反应动力学^[2]、光纤传输性能测试、医学研究及太阳能光-光转换等领域。

实验室常需要单模、不同脉宽的单脉冲

激光。我们采用多种选模、脉冲产生和放大技术, 设计并建立了一套 IPL-二级放大系统。以下分别讨论该系统的设计、选模、脉冲产生与选择、脉冲放大及系统的工作性能。

二、系统设计

该系统(图1)由一个振荡器(OSC)和两级放大器(AMP1, 2)组成。为消除级间耦合引起的自振荡, 除适当加大各级间距, 在光路

收稿日期: 1987年3月24日。

线(图 2(b))。由于标准具的插入损耗,在最弱的 $F=3 \rightarrow F'=2$ 谱线上没有激光输出。

2. 横模选择。TEM₀₀ 模输出一般由加腔内小孔光阑 $A_{1,2}$ 实现,但输出能量降至多模时的10%左右。在不要求单纵模的情况下,采用近虚共焦腔型可使基模输出提高2倍以上(图 3)。但这种腔由于腔内光束发散角较大,不适于要求选频和单纵模输出的情况。

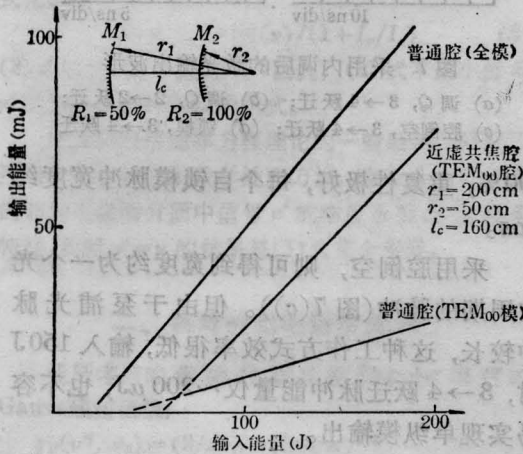


图 3 近虚共焦腔与普通平凹腔输出特性比较

3. 纵模选择。普通自由方式工作的 IPL 输出呈典型的弛豫振荡波形(图 4(a)),脉宽(FWHM)~2 μs,并为纵模间拍频效应所调制(图 4(b))。为获得单纵模输出,采用了两种方法。第一种采用短腔长(<55cm)、低气压(≤60 Torr)、强输出耦合(M_2 反射率 9%)、轻泵浦,以增大纵模间距和减小有效增益带宽,从而获得平滑的单模脉冲(图 4(c))。这种方法的主要缺点是输出能量较低。第二种是采用 Fox-Smith 干涉仪共振腔(FSR)(图 5)。FSR 一般用于连续波激光选模。IPL 虽是脉冲激光,但由于是磁偶极跃迁,振荡建立时间较长,也可应用。我们所用的未耦合腔长为 $l_1+l_2=140$ cm ($l_1=133$ cm), $l_2+l_3=14$ cm, M_4 位置可精确调节,以满足共振条件 $(l_2+l_3)/(l_1+l_2)=1:10$ 。反射镜曲率半径的选择要保证光束匹配要求。当 $M_{1,2}$ 反射率分别为 18%、20% 时,此腔

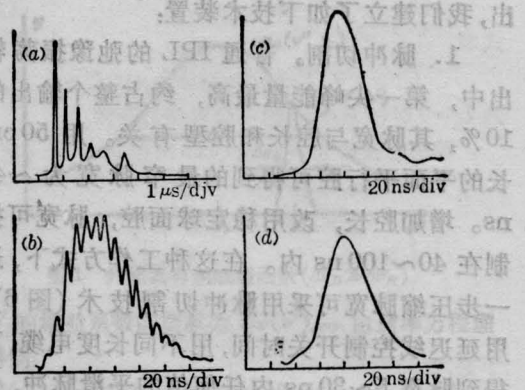


图 4 激光脉冲波形

(a) 自由振荡; (b) 自由振荡输出的第一尖峰; (c) 短腔单模输出(第一尖峰); (d) 等价 FSR 腔输出(第一尖峰)

的有效细度为 14, 共振频率间隔为 1.07 GHz, 约等于气压 50 Torr 时的增益线宽, 因而足以分辨出间隔为 107 MHz 的未耦合腔自然模。图 4(b)、(d) 比较了同样腔长的普通腔和 FSR 腔输出脉冲第一尖峰的波形, 图 5 为它们的输出能量特性比较。实验表明, 使用 FSR, 即使腔很长也能得到稳定单纵模输出。

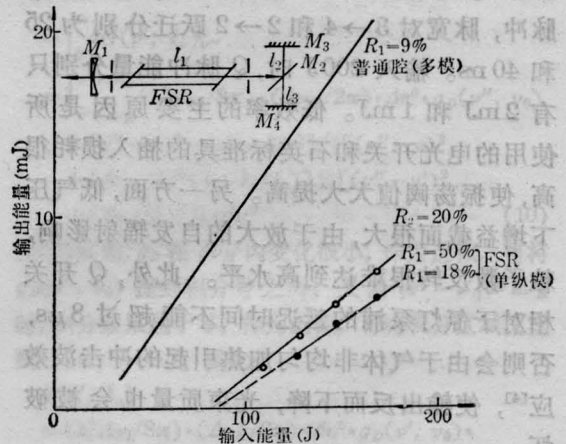


图 5 等价 FSR 与普通腔输出能量特性的比较

四、ns 脉冲产生技术

为获得脉宽为 1~100 ns 范围的脉冲输

出,我们建立了如下技术装置:

1. 脉冲切割。普通 IPL 的弛豫振荡输出中,第一尖峰能量最高,约占整个输出的 10%,其脉宽与腔长和腔型有关。用 50 cm 长的平面平行腔可得到的最窄脉宽为 ~ 40 ns。增加腔长,改用稳定球面腔,脉宽可控制在 40~100 ns 内。在这种工作方式下,进一步压缩脉宽可采用脉冲切割技术(图 6)。用延迟线控制开关时间,用不同长度电缆,可得到脉宽 5~30 ns 内任何值的平滑脉冲,但脉冲能量一般只有 10~20 μJ ,这是此方法的主要缺点。

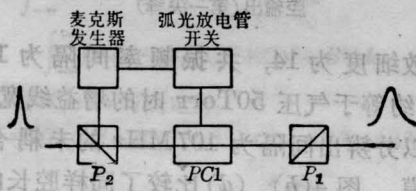


图 6 脉冲切割、选择器

2. 内开关。要提高输出脉冲功率,可采用调 Q、腔倒空技术。在腔长较短(105 cm)、工作气压较低(50 Torr)时,可得到平滑的 Q 脉冲,脉宽对 $3 \rightarrow 4$ 和 $2 \rightarrow 2$ 跃迁分别为 25 和 40 ns。输入 200 J 时, Q 脉冲能量分别只有 2 mJ 和 1 mJ。低效率的主要原因是所使用的电光开关和石英标准具的插入损耗很高,使振荡阈值大大提高。另一方面,低气压下增益截面很大,由于放大的自发辐射影响,粒子数反转很难达到高水平。此外, Q 开关相对于氙灯泵浦的延迟时间不能超过 8 μs ,否则会由于气体非均匀加热引起的冲击波效应^[4],使输出反而下降,光束质量也会被破坏。

当激光腔较长(150 cm),并加缓冲气体 Ar 时, $3 \rightarrow 4$ 跃迁的 Q 脉冲受拍频调制,波形极不规则(图 7(a))。而对 $2 \rightarrow 2$ 跃迁,由于振荡建立时间长得多(达 300 ns), Q 脉冲呈现自锁模现象(图 7(b))。Ar 气压达 600 Torr 以上时,波形非常规则,调制深度近

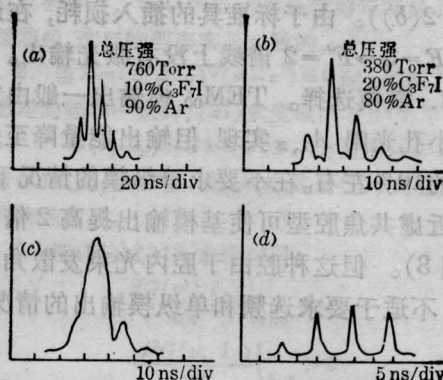


图 7 采用内调后的激光输出波形

(a) 调 Q, $3 \rightarrow 4$ 跃迁; (b) 调 Q, $2 \rightarrow 2$ 跃迁;
(c) 腔倒空, $3 \rightarrow 4$ 跃迁; (d) 锁模, $3 \rightarrow 4$ 跃迁

100%, 重复性极好, 每个自锁模脉冲宽度约 2 ns。

采用腔倒空, 则可得到宽度约为一个光腔周期的脉冲(图 7(c))。但由于泵浦光脉冲较长, 这种工作方式效率很低, 输入 150 J 时, $3 \rightarrow 4$ 跃迁脉冲能量仅 $\sim 200 \mu\text{J}$, 也不容易实现单纵模输出。

更短的脉冲可用主动锁模技术产生, 得到的脉宽一般为 1~2 ns(图 7(d))。若在高气压条件下锁模, 脉宽可短至 0.2 ns。

五、脉冲放大

我们的系统采用二级放大。AMP1 是前置放大级, AMP2 是能量放大级。放大管内径均为 16 mm, 有效长度 38 cm, 用双氙灯、紧耦合方式泵浦。放电电路和真空配气系统与振荡级类似。

为提高主放大级 AMP2 的能量增益, 要求 AMP1 的小信号放大率尽可能高。不加缓冲气体时, AMP1 对 $3 \rightarrow 4$ 跃迁的小信号增益很容易达到 200~500。但对 $2 \rightarrow 2$ 跃迁, 由于受激截面较小, 同样条件下的小信号增益只有 10~20。我们设计了双程放大和高气压工作方式来改善 $2 \rightarrow 2$ 跃迁的放大性能。在加缓冲气体 Ar 后, 由于压强加宽效

应, $2 \rightarrow 2$ 跃迁的增益随介质线宽 $\Delta\nu$ 单调增长^[5]。这在 $\Delta\nu = 1 \sim 5$ GHz 范围内最为有效(图 8(a))。双程放大使增益区长度加倍, 允许使用更高气压, 有助于加强上述效应。使用的典型配气比为 $C_3F_7I:Ar = 50$ Torr:200 Torr, 相当于 $\Delta\nu = 2$ GHz, 成功地使 AMP1 对 $2 \rightarrow 2$ 跃迁的增益提高到 >100 。实际测量的 AMP1 在不同气体混合时对两种跃迁的小信号增益与振荡器-放大器延迟时间的

关系见图 8(b)。能量放大级 AMP2 的气体配比与 AMP1 相同, 工作在部分饱和状态。

六、整个系统的工作性能

整个系统的工作性能如表所示。

在采用脉冲切割方式工作时, 该系统对 10 ns 脉冲的总放大率约为 ~ 5000 ($3 \rightarrow 4$ 跃迁)和 ~ 1000 ($2 \rightarrow 2$ 跃迁)。采用不同工作

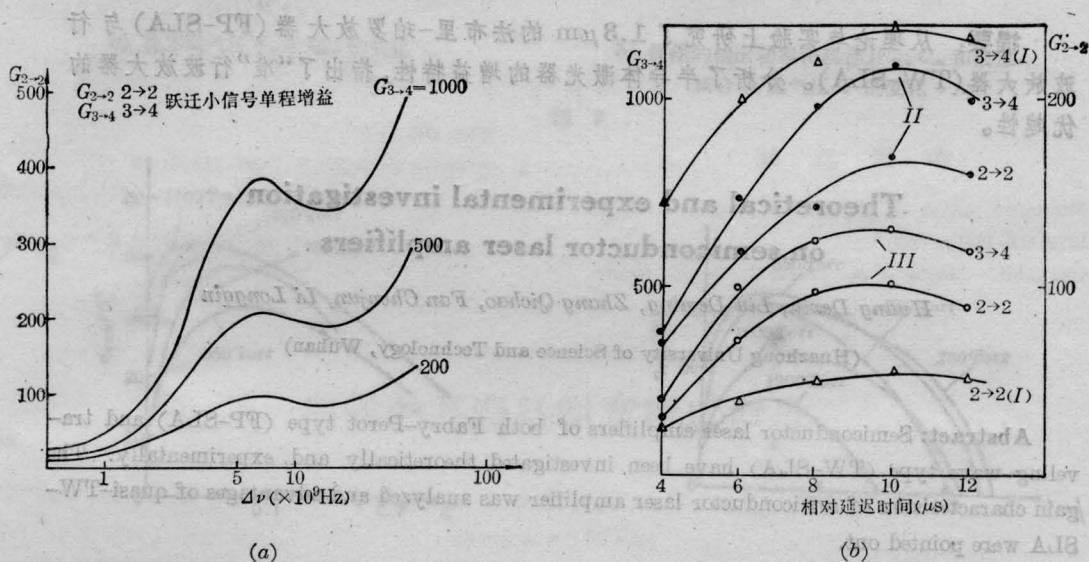


图 8 压强加宽对小信号增益的影响

工作方式	脉宽(FWHM)	模式	波形	输出能量		输出峰值功率
				振荡器	放大后	
自由振荡	$\sim 2 \mu s$	全模 TEM ₀₀	弛豫振荡	100 mJ	~ 10 J	~ 5 MW
				20 mJ	~ 5 J	~ 2.5 MW
				(2mJ)	(500mJ)	(0.25 MW)
自由振荡 (第一尖峰)	40~80 ns	TEM ₀₀ (SLM)	平滑脉冲	≤ 0.5 mJ (0.1 mJ)	~ 500 mJ (50 mJ)	~ 10 MW (1 MW)
自由振荡+ 脉冲切割	5~30 ns	TEM ₀₀ (SLM)	平滑脉冲	10~20 μ J (5~10 μ J)	20~100 mJ (5~30 mJ)	~ 4 MW (1 MW)
调 Q	20~40 ns	TEM ₀₀ (多纵模)	受拍频或自锁 模调制	2 mJ (1 mJ)	~ 1 J (300 mJ)	≤ 30 MW (≤ 10 MW)
锁模+脉冲选择	1~2 ns	TEM ₀₀	高斯分布平滑 脉冲	5~10 μ J	≤ 20 mJ	≤ 10 MW

注: SLM—单纵模工作; () 内指对 $2 \rightarrow 2$ 跃迁, 其他对 $3 \rightarrow 4$ 跃迁, 表中输出能量、功率对应于输入振荡级能量为 200 J, 放大级工作在最佳状态。

(下转第 394 页)

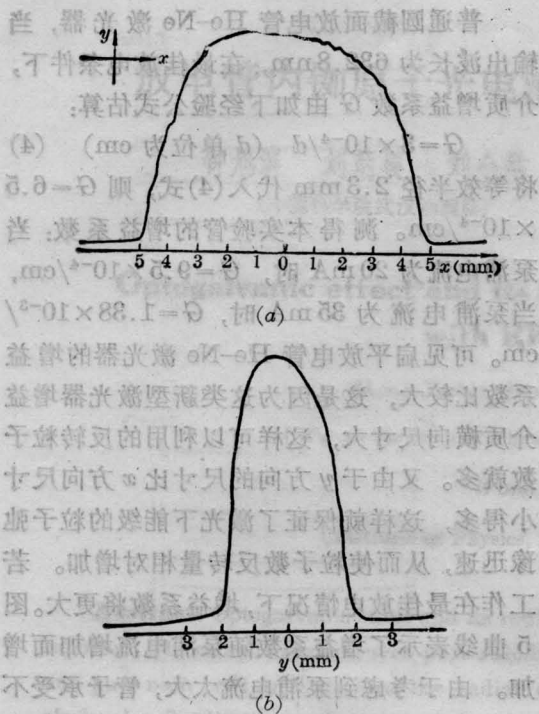


图7 激光光束的横向光强分布



图8 扁平激光器的输出光斑

向的分布比较均匀(见图7),且由于 x 方向线度大, x 方向的光强分布更加均匀。也正是由于衍射损耗,虽然放电截面为矩形,但形成的稳定光斑棱角不明显。

(上接第399页)

方式,可得到脉宽 $1\text{ns}\sim 2\mu\text{s}$,峰值功率 $1\sim 10\text{MW}$ 的 TEM_{00} 模、近傅里叶变换线宽极限(单纵模)的单脉冲输出。该系统能长时间稳定工作,提供了一个工作在 $1.3\mu\text{m}$ 波长,功率为兆瓦级的相干光源。

参 考 文 献

1 Witte K. *et al.* Laser Inter Relat Plasma Phenom.,

3.5 发散角的量测

利用测出不同位置处的光斑尺寸,从而计算出这段距离内的平均发散角。测出长边方向、短边方向的发散角分别为: $4.504\times 10^{-3}\text{rad}$ 和 $1.282\times 10^{-3}\text{rad}$ 。测试条件为:泵浦电流 I 为 20mA ,He与Ne的气压比为 $7:1$,总气压为 0.9Torr 。从测试值可以看出,长边方向光束发散角比短边方向的发散角大,这是因为长边方向线度大,从而使衍射损耗小的缘故。

3.6 激光输出功率的稳定性

在总气压为 0.9Torr ,He与Ne的气压比为 $7:1$,泵浦电流 30mA 时,对激光器进行了3小时40分钟的量测,其输出功率稳定性为 1.36% 。由于激光器腔长较长,因此形成振荡的纵模数有13个之多,在增益曲线上形成的烧孔几乎全部重迭。另外形成的横模数也比较多,从而模式在横向也迭加严重,因此激光器输出功率的稳定性较好。

对于这类新型结构的激光器,若进一步找出长边、短边长度的最佳比,找出最佳透射率,再抑制 $3.39\mu\text{m}$ 的振荡,考虑到泵浦电流造成的热量散发等问题,则该种激光器的输出功率还会有明显提高。对于这类结构的激光器,其设计理论还需进一步探讨。

参 考 文 献

1 凌一鸣 *et al.*“矩形放电管中等离子体参量的理论分析”。激光杂志,1988;9(1):18~21
 2 周炳琨 *et al.* 激光原理,国防工业出版社,1980
 1977;4A:115
 2 Bannister J J *et al.* Chem. Britain., 1984; 3: 227
 3 Xu Gan *et al.* Phys Rev., 1984; A30: 354
 4 Baker H J *et al.* IEEE J. Quant. Electr., 1981; QE-17: 1828
 5 Xu Gan, Proc. Inter. School of Lasers and Appl., Beijing, 1987